Ingmar Ott • Henn Timm

# SISEVEEKOGUD

Õpik kõrgkoolidele

■ Vastavalt litsentsilepingule on foto elektrooniline avaldamine keelatud. Fotot saab näha sellelt lingilt: http://www.roggo.ch/review/U19-339.jpg

Vesihüatsint (*Eichhornia* sp.) ja punane ludviigia (*Ludwigia* sp.) Paraguay jõe lammi väikeses ojas Pantanali märgalal Brasiilias.

Ain Järvalt
Rein Järvekülg
Anu Kisand
Helle Mäemets
Ingmar Ott
Kristel Panksep
Tiia Pedusaar
Helen Tammert
Henn Timm
Arvo Tuvikene
Lea Tuvikene
Ilmar Tõnno
Sirje Vilbaste

# Siseveekogud

## Õpik kõrgkoolidele

**Koostanud**

Ingmar Ott
Henn Timm

Kalanduse teabekeskus

Fotode autorid ja jooniste allikad: Andrea Jaeger Miehls (2.84), 3ucky(3all (1.93), Aditya Sainiarya (2.79), Agoda (1.182 aerofoto), Aimar Rakko (1.127 p), Ain Järvalt (lk 323 latikad), Alan Siegel / Derek J. Taylor (2.23 vesikirbuline), Albert Kok~enwiki (2.119), Alexander Oehrle (2.126), Allan, Castillo 2007 (2.134, 2.135), Allen, Pavelsky 2018 (1.30), Andres Piir (3.21), Andres Saag (2.56), Andy Ritchie / USGS (3.5), Anu Kisand (3.28 a, b, c), Anu Palm (3.7 pü kalurid), Arvo Tuvikene (2.10), Aski (1.58), Auckland Museum (2.44), bathyporeia (1.115), Bernard Dupont (2.124), Berrucomons (2.54), Björn S... (2.113 v), Blake Matheson (2.125), Bridget Wade (1.168), Brönmark, Hansson 2005 (2.150), Candra Firmansyah (1.192), Carrizo jt 2017 (2.37), Chris_M / phpBB Group (1.232), Christian Fischer (2.33, lk 331 vesitäht), Citron (2.91), CivicPlus (3.23 foto), Cooke jt 2005 (3.22), Daderot (2.61), Darren Puttock (2.131), David Perez (2.2 all), David Stanley (1.163 p a), Dickson 1980 (1.195), Diego Delso (1.41, 1.176, 2.132), Dieter Ebert (2.82 v), Dmitriy Konstantinov (2.25 angerjas), Donald Hobern (2.87), Doug Wirtz / EOL (2.85), Eesti Entsüklopeedia (1.263, 1.274), Eiseltová 1994 (3.26), Environmental Indicator Report (EEA 2017) (3.19), EOS, The Phytoplankton Encyclopaedia Project (1.215), EoSnap / Chelys srl (1.29), Eric Gibcus / Saxifraga (2.25 võldas), European ... 2012 (3.17, 3.18), European Comission (lk 100), European Space Agency (1.29), Evelyn Uuemaa (1.46, 1.48), FiMSeA / IUCN Red List (lk 331 hõbekoger), Frank Vassen (2.128), Géry Parent (1.220), Giovanni Arechavaleta (1.180), Google maps (1.182), Greame Guy / WWF (lk 330 angersäga), Greg Hume (lk 330 mosambiigi tilaapia), Gregory "Slobird" Smith (2.127), Hans Hillewaert (2.23 soolavähike, 2.68), Hanssson jt 1998 (3.32), Heinsalu, Alliksaar 2009 (3.16), Helle Mäemets (3.36), Henn Timm (1.57, 1.101, 1.120, 1.162, 1.198, 1.236, 1.248, 1.249, 1.252, 1.253, 1.255, 1.256 1.258, 1.259, 1.260, 1.267, 1.268, 1.269, 1.270, 1.275, 1.277, 2.2 ü, 2.6, 2.8 ü, 2.11, 2.12, 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17, 2.18, 2.19, 2.25 latikas, 2.25 rääbised, 2.26, 2.27, 2.28, 2.29, 2.30, 2.31, 2.32, 2.34 , 2.35, 2.36, 2.38, 2.45, 2.51, 2.53 v, 2.62, 2.63, 2.64, 2.65, 2.66, 2.71, 2.72, 2.73, 2.76, 2.77, 2.78, 2.80, 2.82 p haudekamber, 2.88, 2.90, 2.93, 2.94, 2.97, 2.98, 2.99, 2.100, 2.101, 2.102, 2.103, 2.104, 2.105, 2.106, 2.108, 2.109, 2.110, 2.111, 2.112, 2.113 ü vastne, 2.114, 2.115, 2.116, 2.117, 2.123, 2.137, 2.145, 3.2 ü, 3.3, 3.4, 3.6, 3.13, 3.14 Võrtsjärv, 3.34, 3.35, 3.37, 3.39, 3.40, 3.41, 3.42, 3.43, 3.44, 3.45, 3.46, 3.47, 3.48, 3.49, lk 16–17, lk 323 vastsed), Hutchinson 1957 (1.18), Ian Alexander (2.96), IISD Experimental Lakes Area Inc (1.210), Ingmar Ott (1.228, 1.245, 2.42, 2.46, 3.14 Loosalu järv, Äntu Sinijärv; 3.20), Ivar Leidus (3.10 Harku järv), Ixitixel (2.53 suur salviinia), Jakub Fryš (1.160), Jan Vutt (3.10 Jägala juga), Janno Loide / Amadvr (1.100), Jean-Daniel Echenard (2.95), Jelle Wissink (2.118), Jen Glass (1.158), Jenssen jt 2019 (1.109), Jeppesen jt 1999 (3.30), Jeroen van Nieuwenhoe (1.230), Jérôme Comte (1.60), Jerry Prezioso / NOAA (2.138), Jim Gathany (3.11), Joel Berglund (3.7 p a), John Biehler (2.147), Joosep-Georg (3.10 Linnamäe HEJ), Jose Manuel Mota (1.187), Josef Brief / Tree of Life (2.49), Jtmartin57 (3.7 v ü), Jun Zhang (1.12), Jutta Niggermann (1.94), K. David Hambright (2.83), Kairi Maileht (2.20, 2.21, 2.22, 2.39, 2.40, 2.41, 2.43), Karlheinz Kellert (1.182 foto), Katrin Saar (3.1 ü, 3.2 a, 3.14 Kaarepere Pikkjärv, Kooru järv, Saadjärv, Tänavjärv; 3.28 d, lk 278–279), Keskkonnaagentuur (1.133, 1.34 aluskaart, 1.47 aluskaart), Klapper 2003 (3.25), Lamiot (2.58), LaMotte (1.139), Len Andrews (lk 330 suursuu-forellahven), Likens 1972 (1.271), Likens 1992 (1.272), Lindy Buckley (1.261), Luciano Candisani (1.178), Maa-amet (1.28, 1.37, 1.63, 1.74, 1.76, 1.77, 1.243, 1.264, 3.1 a, 3.16 Pappjärv), Marco Spiller (2.23 ripsloom), Margariet Pronk (2.3), Markus Gayda (2.5), Martin Jürgenson (1.265), Martin Mergili (1.54), Martin Troncoso (2.23 keriloom), Mason Brock (2.55 vesitäht), Maurice Loir (1.208), Medea05 (1.61), Michael Goulding (2.121), Michal Manas (2.75), Michel Roggo (lk 2–3; lk 188–189), Miguel Alejandro Castillo Moya (1.204), Miyagawa jt 2018 (1.21), NASA (1.15, 1.27, 1.45, 1.53, 1.55, 1.63 ü p, 1.64, 1.65, 1.67 p, 1.70, 1.73, 1.112, 1.119 v, 1.167, 1.172 a, 1.174, 1.177, 1.183, 1.186, 1.188, lk 77, lk 193), Newbold 1992 (2.144), Nicholas A. Tonelli (1.262), Norbert Schuller (2.81), NOZO (lk 330 harilik gambuusia), Oki, Kane 2006 (1.23), OpenGage (2.60), Otago Regional Council Photo Archive (1.62), Ott jt 2012 (3.33), Patrick Randall (2.74), Paul Hermans (1.43), Peep Vermes (1.6, 1.17, 1.19, 1.59, 1.75, 1.88, 1.116, 1.117, 1.121, 1.227, 1.235, 1.243, 1.247, 1.257, 1.276, 2.1, 2.7, 2.9, 3.12, 3.14 Peipsi järv, 3.38), PenangLocal (1.111), Per Harald Olsen (2.24), Peter Höbel (1.226), Peter van der Sluijs (lk 331ümarmudil), Peter Vigier (1.184), phil (lk 330 Niiluse ahven), Picturepest (2.50 kingloom), Piotr Kuczynski (2.52), Pixnio (lk 330 tähniline madupea), Planet Labs Inc (1.32), Prakash Gudha (1.56), Proyecto Agua (2.70), Proyecto Agua (2.69), Proyecto Agua (2.50 tõrilane), Pseudopanax (1.98), Pxhere (1.119 p), Qwerter (1.11), r. nial bradshaw (1.211), Reelika Saar (1.251), Robert Ashworth (1.193), Robyn Draheim (lk 331 korvkarbiline), Roger Hatcliffe (2.129), Ryszard (2.89), Sall jt 2012 (3.10), Sampa (1.24), Scheffer 1998 (3.29), Semionk (1.7), SePRO Corporation (3.27), setre (1.25), Stephane di Mauro (2.122), Stefan Siebert / UC Davis (2.59), Stephen R. Lindemann (lk 85 Hot Lake), Steven G. Johnson (2.120), Sumistaja (1.44), Timm 1990 (2.151), Tino Strauss (2.136), TOF / Tree of Life (2.48), Tom Gill (1.104), Tom Roorda (3.5), Toomas Kõiv (1.26, 1.89, 1.148, 1.254, lk 61), tootja foto (1.140, 1.164), Ulrich Hopp (2.23 aerjalgne), Ulrich Kutschera (2.67), UNH Center for Freshwater Biology (2.47), University of California (2.107), USGS (1.66, 1.114, 3.7 v a), Verner 1994 (3.23, 3.24), Verpoorter jt 2014 (1.31), Vilbaste jt 2016 (3.9), Vladimir Medvedjev (1.161), Wald1siedel (1.87), Wetzel 2001 (1.52, 1.81, 1.86, 1.105, 1.108, 1.143, 1.144, 1.145, 1.146, 1.147, 1.149, 1.150, 1.151, 1.152, 1.153, 1.154, 1.155, 1.159, 1.169, 1.170, 1.171, 1.172, 1.173, 1.199, 1.231, 1.233, 1.234, 1.237, 1.238, 1.239), Whit Welles (1.181), Wilson44691 (1.185), Wolkenkratzer (1.113), worldalldetails.com (1.188), www.mr-crabs.de (2.92). ü - üleval, a - all, p - paremal, v - vasakul

Õpik on valminud riikliku programmi „Eestikeelsete kõrgkooliõpikute koostamine ja väljaandmine (2008–2012)" raames ning Eesti Maaülikooli ja Sihtasutuse Archimedes osalisel toel.

Haridus- ja Teadusministeerium

Sihtasutus Archimedes

Retsensendid: Kalle Olli, Kristjan Piirimäe

Koostajad: Ingmar Ott, Henn Timm

Autorid: Ain Järvalt, Rein Järvekülg, Anu Kisand, Helle Mäemets, Ingmar Ott, Kristel Panksep, Tiia Pedusaar, Helen Tammert, Henn Timm, Arvo Tuvikene, Lea Tuvikene, Ilmar Tõnno, Sirje Vilbaste

Toimetaja: Kalle Hein Kirjastus: Eesti Loodusfoto

Autoriõigus: autorid ja Kalanduse teabekeskus 2020

ISBN 978-9949-9568-8-3

www.emu.ee Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences

Kalanduse teabekeskus www.kalateave.ee

EMKF RAKENDUSKAVA 2014-2020

Euroopa Liit Euroopa Merendus- ja Kalandusfond

# Saateks

Inimeste kõige tavalisemad seosed siseveekogudega on matkamine, kalapüük, suplemine, janu kustutamine ja taimede kastmine. Et veekogude ääres viibimine mõjub paljudele rahustavalt, on jõgedel-järvedel miljonivaadete kaudu kindel koht ka kinnisvaraäris. Veekogudeta ei saa läbi sportlased (purjetajad, sõudjad ja motohuvilised). Leidub selliseidki indiviide, keda meelitavad mittesöödavad või koguni palja silmaga nähtamatud vee-elanikud.

Eesti on väike madal maa, millel on pikk mererand, aga kus leidub ka palju siseveekogusid. Eriline on kahe suure järve – Peipsi ja Võrtsjärve – asumine lähestikku. Seisuvete pindala osakaalu järgi kogu riigi pindalast on Eesti Euroopas pärast Soomet ja Rootsit koos Norraga kolmandal-neljandal kohal. Eesti ja tema ümbrus on puhta veega seni niisiis hästi varustatud, kuid see rikkus ühtlasi kohustab veekogusid heaperemehelikult ja jätkusuutlikult majandama. Ka Eestis on muresid nii veevarude, veekogude kui nende seisundiga.

Sisevete uurimine on Eestis kestnud juba üle 100 aasta. Seda on süstemaatiliselt korraldanud nii Looduseuurijate Selts, Tartu Riiklik Ülikool, Teaduste Akadeemia kui Maaülikool. Suurte järvede kõrval pole unustatud väikesi järvi ega vooluveekogusid. Uurida vee ja veekogude omadusi, arendada ja kasvatada nende spetsialiste ongi mõistlik seal, kus on, mida tundma õppida. Üha enam leitakse seoseid looduslike ja inimtekkeliste mõjurite ning ökosüsteemide vastuste vahel. Ühtlasi ühendatakse neid seoseid sotsiaalmajanduslike küsimuste ja looduskaitsega.

Eesti siseveekogude kohta on peale arvukate ja enamasti võõrkeelsete teadusartiklite ilmunud ka eestikeelseid raamatuid. Siin neist väike loetelu: väikejärved (Eesti järved, 1968; Mäemets, 1977; Laarmaa jt 2019); Võrtsjärv (1973, 2003); Peipsi (1999, 2008), vooluveed (Järvekülg jt 2001; Timm jt 2019). Kalaraamatuid esindavad Mikelsaar (1984) ning Hunt (2019), veetaimi „Eesti taimede määraja“ (2010). Silmaga nähtavate veeselgrootute ülevaate pakub Timm (2015). Ülevaatlikku eestikeelset õpikut siseveekogude ning nende talitlemise kohta seni polnud.

Eesti ülikoolides on kõigil kolmel õppetasandil (bakalaureuse-, magistri- ja doktoriõpe) õppekavasid, kus vajatakse teadmisi siseveekogudest. Võõrkeelseid eeskujusid leidub päris mitu, kuid need käsitlevad enamasti kas ainult hüdrobioloogiat või limnoloogiat. Esimene on elustiku-, teine keskkonna-alase suunitlusega. Uus õpik sisaldab mõlemaid ning sobib loodetavasti paljudele loodusteaduslikele ja looduskaitselistele kursustele, eriti bakalaureusetasemel. Õpik koosneb kolmest suurest alajaotusest: (1) siseveekogude füüsikalis-keemiline iseloomustus, levik ja teke; (2) elupaigad veekogudes, olulised elustikurühmad ning nendevahelised suhted; (3) siseveekogude majandamine, kaitse ja tervendamine. Peamiselt vaadeldakse Eesti siseveekogusid, aga seda kogu maailma taustal.

Koostajad loodavad, et raamat annab lugejatele nii vastuseid küsimustele kui ka süvendab huvi sisevete kui kaunite, põnevate ning inimestele eluliselt oluliste loodusobjektide suhtes.

# Sisukord


## 1. peatükk Siseveekogud kui elukeskkond ..... 17

**1.1. Sissejuhatus limnoloogiasse** 18–22

**1.1.1. Mõisted ja definitsioonid ..... 18**

**1.1.2. Sisevete uurimise ajalugu ..... 19**

Varane limnoloogia ..... 19
19. sajandi keskpaik – 1930 ..... 19
1930–1970 ..... 19

**1.1.3. Eesti limnoloogia ..... 20**

Varane aeg ..... 20
Ärkamisaeg ..... 20
Eesti limnoloogia pärast Teist maailmasõda ..... 21
1990. aastatest tänapäevani ..... 22

**1.2. Vesi ja veeringe** 23–34

**1.2.1. Vesi kui aine ..... 23**

Vee molekulaarstruktuur ..... 23
Tihedus ja rõhk ..... 25
Vesikeskkonna soojusiseärasused ..... 27
Pindpinevus ..... 28
Viskoossus ..... 28
Vesi lahustina ..... 29
Vee keemilised omadused ..... 31

**1.2.2. Veeringe ja Maa veevarud ..... 32**

Veeringe ..... 32
Maa veevarud ..... 33

**1.3. Maailma ja Eesti siseveekogud** 35–65

**1.3.1. Siseveekogud ..... 35**

Siseveekogude jaotus ..... 35

**1.3.2. Siseveekogude arv ja paiknemine ..... 37**

Vooluveekogud ..... 37
Järved ..... 38
Märgalad ..... 38

**1.3.3. Vooluveekogude tekkeviisid ja veerežiim ..... 39**

Vooluveekogude kujunemine ..... 39
Vooluveekogu iseloomustamine ..... 40

**1.3.4. Vooluveekogude geomorfoloogia ..... 41**

Jõeorg ja selle elemendid ..... 41
Looked, terrassid, kärestikud ja võrendikud ..... 43
Jõeorgude tüübid ..... 44
Jõesuudmed ja deltad ..... 47
Eesti vooluveekogud ..... 47

**1.3.5. Järvede tekkeviisid** . . . . . **50**
Tektooniline järveteke . . . . . 51
Vulkaaniline järveteke . . . . . 52
Maalihete toimel tekkinud järved . . . . . 53
Liustikulise ehk glatsiaalse tekkega järved . . . . . 53
Karstijärved . . . . . 55
Jõetekkelised järved . . . . . 55
Meretekkelised järved . . . . . 56
Tuuletekkelised järved . . . . . 56
Bioloogiline järveteke . . . . . 57
Meteoriiditekkelised järved . . . . . 57
**1.3.6. Järvede geomorfoloogia** . . . . . **58**
Sügavuskaardid . . . . . 58
Pindala . . . . . 59
Pindalaga seotud parameetrid . . . . . 60
Sügavus . . . . . 61
Maht . . . . . 62
Eesti järvede geomorfoloogia . . . . . 63
**1.3.7. Tehisveekogud ja veehoidlad** . . . . . **64**

**1.4. Valgus**
66–77
**1.4.1. Valguse olemus** . . . . . **66**
**1.4.2. Valguse liikumine atmosfääris ja jõudmine veepinnani** . . . . . **67**
**1.4.3. Valguse tungimine vette** . . . . . **69**
**1.4.4. Vee optilised omadused** . . . . . **70**
Valguse vertikaalne nõrgenemine vees . . . . . 70
Vee optiliste omaduste hindamine . . . . . 71
Vee värvus . . . . . 73
**1.4.5. Fotosünteesi iseärasused vesikeskkonnas** . . . . . **74**
Fotosünteesi põhialused . . . . . 74
Fotosüntees vees . . . . . 75
Fotosünteesi valgussõltuvus . . . . . 76

**1.5. Soojus**
78–89
**1.5.1. Soojusvahetus veekogu ja keskkonna vahel** . . . . . **78**
Seisuveekogude soojusvahetus . . . . . 78
Vooluveekogude soojusvahetus . . . . . 79
**1.5.2. Järve soojusbilanss** . . . . . **80**
**1.5.3. Järvede soojuskihistumine** . . . . . **81**
Soojuskihistumuse kujunemise põhjused . . . . . 81
Kihistumuse stabiilsus . . . . . 82
Kihistumuse kujunemine . . . . . 82
Kihistumuse roll järves . . . . . 83
**1.5.4. Järvede segunemistüübid** . . . . . **84**
**1.5.5. Meromiktilised järved** . . . . . **86**
Meromiksia mõiste . . . . . 86
Ektogeenne meromiksia . . . . . 86
Kreogeenne meromiksia . . . . . 87
Endogeenne meromiksia . . . . . 88
Eesti meromiktilised järved . . . . . 88

**1.6. Vee liikumine** 90–98

**1.6.1. Molekulaarliikumised ja vee voolamine** . . . . . 91
**1.6.2. Hoovused** . . . . . 92
**1.6.3. Lained** . . . . . 92
Lühikesed lained . . . . . 93
Pikad lained . . . . . 95
Loodelained ja tsunamid . . . . . 96
Vee liikumine vooluvetes . . . . . 97

**1.7. Gaasid** 99–112

**1.7.1. Gaaside lahustuvuse seaduspärasused** . . . . . 99
**1.7.2. Hapnik** . . . . . 100
Hapniku lahustumine ja hulk vees . . . . . 100
Hapnikusisalduse väljendusviise . . . . . 102
Hapnikusisalduse hindamine . . . . . 102
Hapnik vooluveekogudes . . . . . 104
Hapnik seisuveekogudes . . . . . 104
Hapniku defitsiit . . . . . 108
Eesti siseveekogude hapnikutingimused . . . . . 109
**1.7.3. Lämmastik** . . . . . 110
**1.7.4. Vesiniksulfiid** . . . . . 110
**1.7.5. Metaan** . . . . . 111

**1.8. Soolsus** 113–130

**1.8.1. Sisevete soolsus ja mineraalsus** . . . . . 113
**1.8.2. Sisevete ioonkoostis ja selle hindamise viisid** . . . . . 115
Ioonkoostis ja selle kindlaksmääramine . . . . . 115
Mineraalsuse mõõtmise viisid . . . . . 116
**1.8.3. Lahustunud mineraalainete päritolu** . . . . . 117
Väljapesemine ja -settimine atmosfäärist . . . . . 117
Väljauhtumine pinnasest . . . . . 119
**1.8.4. Enamusioonid siseveekogudes** . . . . . 122
Naatrium ja kaalium . . . . . 122
Kaltsium . . . . . 122
Magneesium . . . . . 124
Kloriidid . . . . . 124
Sulfaadid . . . . . 124
**1.8.5. Soolajärved** . . . . . 125
Soolajärvede paiknemine . . . . . 125
Soolajärvede soolsus ja vee ioonkoostis . . . . . 129

**1.9. pH ja mineraalne süsinik** 131–142

**1.9.1. Vesinikueksponent ehk pH** . . . . . 131
pH kui happelis-aluseliste omaduste mõõt . . . . . 131
Siseveekogude pH . . . . . 133
Hapestumine ja siseveekogud . . . . . 134
Eesti siseveekogude pH . . . . . 135
**1.9.2. Redokspotentsiaal** . . . . . 136
Redokspotentsiaal vooluveekogudes . . . . . 136
Redokspotentsiaal järvedes . . . . . 137

**1.9.3. Mineraalne süsinik sisevetes** . . . . . **138**
Süsihappegaas . . . . . 138
Karbonaatne puhversüsteem . . . . . 139
Mineraalse süsiniku ajalis-ruumiline jaotus . . . . . 140

**1.10. Toiteained**
143–152

**1.10.1. Lämmastik** . . . . . **144**
Lämmastiku peamised omadused ja lämmastikuringe . . . . . 144
Anorgaanilised lämmastikuühendid . . . . . 146
**1.10.2. Fosfor** . . . . . **148**
Fosfori esinemisvormid . . . . . 148
Fosfori allikad ja hulk . . . . . 149
Fosforiringe epilimnionis ja madalate järvede pelagiaalis . . . . . 150
Fosfor hüpolimnionis . . . . . 151
**1.10.3. Räni** . . . . . **152**

**1.11. Orgaaniline aine**
153–160

**1.11.1. Orgaanilise aine jaotus** . . . . . **153**
**1.11.2. Orgaanilise aine koostis** . . . . . **153**
**1.11.3. Lahustunud orgaaniline aine** . . . . . **155**
**1.11.4. Lahustumata orgaaniline aine** . . . . . **157**
**1.11.5. Mürgised orgaanilised ühendid** . . . . . **159**
**1.11.6. Orgaaniliste ainete sisalduse mõõtmine** . . . . . **159**
Biokeemiline hapnikutarve . . . . . 159
Keemiline hapnikutarve . . . . . 159
Spektrofotomeetria . . . . . 160

**1.12. Järvesetted**
161–164

**1.12.1. Setete fosfor** . . . . . **162**
**1.12.2. Setete poorivesi** . . . . . **163**

**1.13. Siseveekogude tüübid**
165–178

**1.13.1. Klassifitseerimise alused** . . . . . **165**
**1.13.2. Üksiknäitajatel põhinevad klassifikatsioonid** . . . . . **166**
**1.13.3. Troofsusklassifikatsioonid** . . . . . **166**
**1.13.4. Eesti siseveekogude tüpoloogiad** . . . . . **167**
Vooluvete tüpoloogia . . . . . 167
Järvede tüpoloogia . . . . . 168
Oligotroofsed järved . . . . . 169
Semidüstroofsed järved . . . . . 170
Düstroofsed järved . . . . . 170
Atsidotroofsed järved . . . . . 170
Eutroofsed järved . . . . . 171
Hüpertroofsed järved . . . . . 172
Alkalitroofsed järved . . . . . 172
Miksotroofsed järved . . . . . 173
Makrofüüdijärved . . . . . 173
Halotroofsed järved . . . . . 174

**1.13.5. Veepoliitika raamdirektiivil põhinevad tüpoloogiad ja klassifikatsioonid . . . . . 174**
Veekogude rühmitamine veepoliitika raamdirektiivi järgi . . . . . 174
Eesti järvede tüübid VRD järgi . . . . . 176
I tüüp: kareda veega järved . . . . . 176
II tüüp: keskmise karedusega kihistumata veega järved . . 176
III tüüp: keskmise karedusega kihistunud veega järved . . 176
IV tüüp: pehme ja tumeda veega järved . . . . . 177
V tüüp: pehme ja heleda veega järved . . . . . 177
VI tüüp: Võrtsjärv; VII tüüp: Peipsi järv . . . . . 177
VIII tüüp: rannikujärved . . . . . 177
Eesti jõgede tüübid . . . . . 177

**1.14. Siseveekogude ontogenees**
179–187

**1.14.1. Vooluveekogude ontogenees . . . . . 179**
**1.14.2. Järvede ontogenees . . . . . 181**
Akumulatsioon järvedes . . . . . 183
Allo- ja autotroofia . . . . . 183
Parasvöötme järvede areng . . . . . 184
**1.14.3. Eesti järvede arenguteed . . . . . 185**
Eesti väikejärvede looduslik areng . . . . . 185

## 2. peatükk Siseveekogude elupaigad ja elustik .. 189

**2.1 Vesikeskkonna erinevused maismaast ja nende mõju elustikule** 190–193

**2.1.1. Tihedus, rõhk ja pindpinevus** ..... **190**
**2.1.2. Temperatuur** ..... **191**
**2.1.3. Hapnikusisaldus** ..... **191**
**2.1.4. Soolsus ja elektrijuhtivus** ..... **192**
**2.1.5. Nägemine, kuulmine ja haistmine vees** ..... **192**
**2.1.6. Vesi- ja maismaakeskkonna vaheldumine** ..... **192**
**2.1.7. Vee-elustiku iseärasusi maismaaelustikuga võrreldes** ..... **193**

**2.2. Siseveekogude elupaigad** 193–203

**2.2.1. Seisuvete elupaigad** ..... **196**
Seisuvete pelagiaal ..... 196
Seisuvete bentaal ..... 196
**2.2.2. Vooluvete elupaigad** ..... **197**
Vooluvete veekiht ..... 198
Vooluvete bentaal ..... 199
**2.2.3. Üleminekuelupaigad** ..... **200**
Pinnaveekogu ja põhjavee üleminek ..... 200
Jõgede ja järvede üleminekud ..... 200
Sood ..... 200
Väikeveekogud ..... 201
Ajutised veekogud ..... 201
**2.2.4. Erilised elupaigad vooluvetes** ..... **202**
**2.2.5. Elupaigad substraadi järgi** ..... **202**

**2.3. Eluvormid** 204–214

**2.3.1. Pelagiaali eluvormid** ..... **204**
Bakterplankton ..... 205
Fütoplankton ..... 205
Zooplankton ..... 206
Nekton ..... 207
Neuston ..... 209
**2.3.2. Bentaali eluvormid** ..... **209**
Suurtaimed ..... 210
Perifüüton ..... 212
Zoobentos ..... 212

**2.4. Taksonoomilised rühmad** 215–251

**2.4.1. Leviku ja liigirikkuse seaduspäradest sisevetes** ..... **215**
**2.4.2. Liikide arv sisevetes** ..... **216**
**2.4.3. Bakterid ja arhed** ..... **216**
Bakterid (*Eubacteria*) ..... 217
Arhed (*Archaea*) ..... 219

**2.4.4. Protistid** . . . . . **220**
Punavetikad (*Rhodophyceae*) . . . . . 220
Koldvetikad (*Chrysophyceae*) . . . . . 220
Ränivetikad ehk diatomeed (*Bacillariophyceae*) . . . . . 220
Vaguviburilised (*Dinoflagellata*) . . . . . 221
Eugleniidid (*Euglenoidea*) . . . . . 221
Rohevetikad (*Chlorophyceae*) . . . . . 221
Mändvetikad (*Charophyceae*) . . . . . 221
Muud vetikarühmad . . . . . 222
Algloomad . . . . . 222
Sisevete elustiku fülogeneetiline jaotus . . . . . 223

**2.4.5. Taimed** . . . . . **223**
Mittesoontaimed . . . . . 223
Soontaimed (*Tracheophyta*) . . . . . 225

**2.4.6. Seened** . . . . . **226**

**2.4.7. Loomad** . . . . . **226**
Käsnad (*Porifera*) . . . . . 227
Ainuõõssed (*Cnidaria*) . . . . . 227
Lameussid (*Platyhelminthes*) ja kärssussid (*Nemertea*) . . . . . 228
Ümarussid (*Nematoda*) ja jõhvussid (*Nematomorpha*) . . . . . 228
Vööussid (*Clitellata*) ja hulkharjasussid (*Polychaeta*) . . . . . 229
Ripskõhtsed (*Gastrotricha*) . . . . . 230
Keriloomad (*Rotifera*) . . . . . 230
Limused (*Mollusca*) . . . . . 231
Sammalloomad (*Bryozoa*) . . . . . 233
Loimurid (*Tardigrada*) . . . . . 233
Lülijalgsed (*Arthropoda*) . . . . . 233
Ämblikulaadsed (*Arachnida*) . . . . . 233
Vähid (*Crustacea*) . . . . . 234
Hooghännalised (*Collembola*) . . . . . 338
Putukad (*Insecta*) . . . . . 238
Keelikloomad (*Chordata*) . . . . . 246
Silmud (*Cephalaspidomorphi*) . . . . . 249
Kõhrkalad (*Chondrichthyes*) . . . . . 246
Luukalad (*Osteichthyes*) . . . . . 246
Kahepaiksed (*Amphibia*) . . . . . 247
Roomajad (*Reptilia*) . . . . . 248
Linnud (*Aves*) . . . . . 249
Imetajad (*Mammalia*) . . . . . 250

**2.5. Vastastikused mõjutused vee-elustiku rühmade vahel**
252–268

**2.5.1. Toitumine** . . . . . **253**
Toidu tüübid . . . . . 253
Orgaanilise aine tüübid . . . . . 254
Toitumistüübid . . . . . 255
Herbi- ja detrivoorid . . . . . 256
Karnivoorid . . . . . 257
Kiskluse kaudne mõju . . . . . 258
Parasiidid . . . . . 259

Toiduahelad . . . . . 260
Toiduahelad planktonis ja nektonis . . . . . 260
Toidu päritolu . . . . . 262
Toitumistüüpide muutumine vooluvetes piki sängi . . . . . 262
Toidu korduvkasutus vooluvetes . . . . . 264

**2.5.2. Konkurents . . . . . 264**

**2.5.3. Liikide arvu muutumine koosluses . . . . . 266**

Aktiivne ja passiivne liikumine . . . . . 266
Liigiteke . . . . . 267
Lahkumine ja väljasuremine . . . . . 267
Uute veekogude asustamine . . . . . 267

**2.5.4. Mutualism . . . . . 267**

**2.5.5. Kommensalism ja amensalism . . . . . 267**

**2.6. Vee-elustiku asurkonnad ja nende muutumine**
269–277

**2.6.1. Sündimus ja suremus . . . . . 269**

**2.6.2. Kasv . . . . . 270**

**2.6.3. Produktsioon . . . . . 271**

Primaar- ehk esmasproduktsioon . . . . . 271
Fütoplanktoni produktsioon . . . . . 271
Primaarproduktsioon vooluvetes . . . . . 273
Soode primaarproduktsioon . . . . . 274
Sekundaar- ehk teisproduktsioon . . . . . 274
Bakterite ja arhede produktsioon . . . . . 276

## 3. peatükk Siseveekogude kaitse ja tervendamine .. 279

**3.1. Veepoliitika raamdirektiiv ja veemajanduskavad** 280–281

**3.1.1. VRD põhimõtted ja veemajanduskavade koostamine ..... 280**

**3.2. Siseveekogude seisundi halvenemine inimmõjul** 282–287

**3.2.1. Järved ..... 282**
Toiteainete välis- ja sisekoormus ..... 283
Veetaseme muutmine ..... 283
Järvenõgude täitumine setetega ..... 284
Soostumine ja maastumine ..... 284

**3.2.2. Vooluveed ..... 284**
Õgvendamine ..... 284
Paisutamine ..... 285
Sette kogunemine ..... 286
Vee reostus ..... 286
Tarbevee võtmine (vooluhulga vähendamine) ..... 287
Muud mõjurid ..... 287

**3.3. Siseveekogude ökosüsteemiteenused** 288–293

**3.3.1. Ökosüsteemiteenuste teooria ja tüpoloogiad ..... 288**

**3.3.2. Ökosüsteemiteenuste hindamise meetodid ..... 290**

**3.4. Siseveekogude ökoloogilise seisundi hindamine** 294–301

**3.4.1. Ökoloogilise seisundi mõiste ja tunnused ..... 294**
Ökoloogilise seisundi hindamise põhimõtted Euroopa Liidu siseveekogudes ..... 297
Järvede ja jõgede seisund Euroopas ja Eestis ..... 299

**3.5. Siseveekogude tervendusmeetodid** 302–338

**3.5.1. Mõisted: tervendamine, taastamine ja korrastamine ..... 302**

**3.5.2. Tervendamise eeldused ja eesmärgid ..... 302**
Veekogu tervendamine varasema seisundi saavutamiseks ..... 303
Veekogu välisilme muutmine – korrastamine ..... 303
Veekogu produktiivsuse suurendamine ja vesiviljelus ..... 303
Liikide ja koosluste kaitse ..... 304
Ökoloogilise seisundi ja puhkemajanduslike võimaluste parandamine ..... 304
Tööstusliku või tehnilise otstarbega veekogud ..... 304

**3.5.3. Järvede tervendamine ..... 305**
Veekihtide eemaldamine ja õhustamismeetodid ..... 305
Toiteainete keemiline setitamine ja kemomanipulatsioon ..... 307
Alumiiniumiühendid ..... 308
Rauaühendid ..... 309
Kaltsiumiühendid ..... 311
Kompleksmeetodid RIPLOX, PHOSLOCK, BENTOPHOS ... 312

Algitsiidid ja herbitsiidid . . . . . 314
Algitsiidid . . . . . 314
Herbitsiidid . . . . . 315
Veetaseme reguleerimine . . . . . 316
Setete eemaldamine ja katmine järvedes . . . . . 316
Setete eemaldamise viisid . . . . . 316
Alternatiivid . . . . . 318
Biomanipulatsioon . . . . . 319
Biomanipulatsiooni meetodid . . . . . 320
Eeldused edukaks biomanipulatsiooni rakendamiseks ja vajalikud eeluuringud . . . . . 321
Biomanipulatsiooni kui järve tervendamise meetodi tugevused, nõrkused, võimalused ja ohud . . . . . 322
Makrofüüdijärvede taastamine, tervendamine ja korrastamine. . . 324
Eemaldatavate taimede kogus . . . . . 325
Eeluuringud . . . . . 326
Makrofüüdijärvede töötlemise negatiivsed küljed . . . . . 327
Litoraali elupaikade tervendamine . . . . . 328
Mootorsõidukite lainete tekitatavate kahjustuste vältimine . . . . 329
Invasiivsete liikide mõju pidurdamine . . . . . 329

**3.5.4. Vooluveekogude tervendamine . . . . . 332**

Hoidumine vee reostamisest . . . . . 332
Pehme sette eemaldamine vooluvetest . . . . . 332
Kalapääsud . . . . . 333
Õgvenduse tagajärgede leevendamine . . . . . 334
Kaldapuhvrite taastamine . . . . . 336
Looduslähedase veerežiimi taastamine . . . . . 336
Biomanipulatsioon . . . . . 337
Veetaimestiku eemaldamine . . . . . 337
Võõrliikide leviku vältimine või piiramine . . . . . 337
Vooluvete tervendamise tulemusi . . . . . 337

**Kasutatud kirjandus . . . . . 340**
**Märksõnaregister . . . . . 347**
**Elustiku register . . . . . 352**
**Veekogude register . . . . . 358**
**Isikunimede register . . . . . 359**

# 1.

# Siseveekogud kui elukeskkond

■ Vesi on küll veekogude vajalik osa, kuid nende talitlemiseks ökosüsteemina üksinda ebapiisav. Veekogud ei koosne ainult veest ega selles lahustunud ainetest, vaid neil on ka põhi, kaldad ning iseloomulik elustik. Vann või bassein, mis on vett täis lastud, ei ole veel veekogu. Kui käsitada jõgesid pelgalt voolurennidena ja järvi paakidena, sarnaneks see olukorraga, kus inimeste kodust eluolu vaadeldaks ainult tänavaid ja parklaid kirjeldades. Vesi ilma elustikuta pole veekogu elupaiga tähenduses.

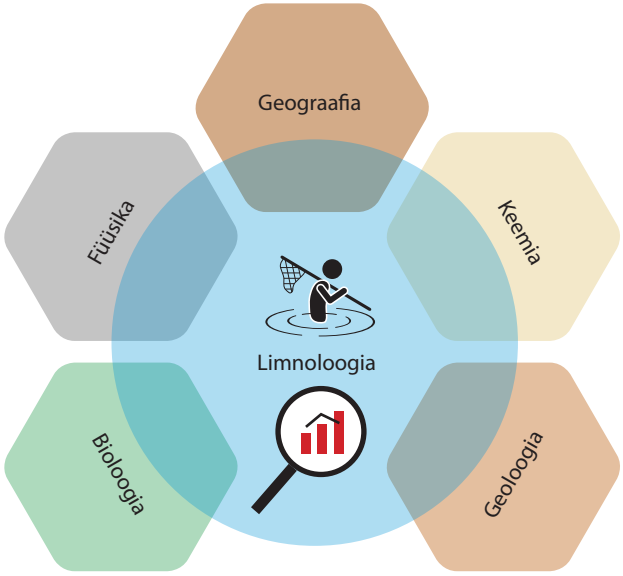
# 1.1. Sissejuhatus limnoloogiasse

## 1.1.1. Mõisted ja definitsioonid

Planeet Maa koosneb erineva tiheduse ja koostisega kontsentrilistest kihtidest – geosfääridest. Need on atmosfäär, hüdrosfäär, litosfäär, vahevöö ja tuum (joonis 1.1). Hüdrosfääri ehk vesikesta peamiseks osaks (70,8%) on Maa pinda kattev maailmameri. Lisaks hõlmab hüdrosfäär ülejäänud keemiliselt sidumata vee: pinnaveekogud (jõed ja järved), põhjavee, liustikud, lume ja atmosfääris sisalduva vee. Hüdrosfääri ning vee ringet ja levikut selles uurib **hüdroloogia**. Kitsamas mõttes on hüdroloogia siseveekogusid ning põhjavett käsitlev teadus, mis tegeleb sademete ja vee äravoolu ning veevarude uurimisega.

**Siseveekogud** (*inland waters*) on maapinnanõgudes või maapinnas olevad veekogumid, mis pole maailmamere osad. Näiteks Peipsi järv on siseveekogu, kuid Must meri mitte. Järved on merega ühenduses kas vooluvete kaudu või üldse mitte. Vee liikumine jõgedes tuleneb kõrguste vahest (mitte Maa pöörlemisest ega Kuu mõjust nagu meres).

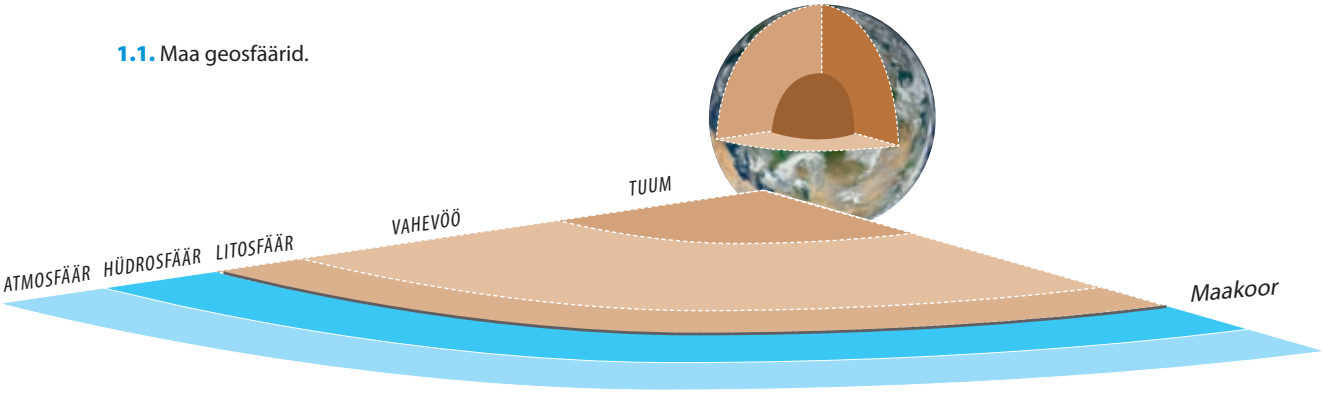
Poliitilis-geograafiliselt on siseveekogud tervenisti mingi riigi territooriumil asuvad veekogud. Nende vastandiks on sel juhul piiriveekogud, mis paiknevad kahe või enama riigi territooriumil. Euroopa Liidu veepoliitika raamdirektiivis (Euroopa... 2000) on kasutusel veel mõiste „üleminekuveed" (*transitional waters*), mis tähendab muutuva soolsusega üleminekuveekogusid sisevete ja mere vahel, näiteks jõesuudmed, deltad, laguunid, fjordid, kitsa ühenduskaelaga lahed.




**1.2.** Limnoloogia sõsarteadused.

Siseveekogude uurimisega tegelev teadusharu on **limnoloogia** (kr λίμνη, 'järv' ja λόγος, 'õpetus'). Kitsas tähenduses on limnoloogia järveteadus, mis käsitleb jõgesid vaid kui valgla mõju vahendajaid. Jõeteadust ennast kutsutakse **potamoloogiaks**. Traditsiooniliselt on limnoloogia väga lähedalt seotud hüdrobioloogiaga. Ta uurib siseveekogude elukooslusi füüsikaliste, keemiliste ja biootiliste tegurite mõjuväljas. Limnoloogia tegeleb ka soolajärvede, üleminekuveekogude, märgalade ja põhjaveega. Ta on multidistsiplinaarne teadus, kus omavahel on tihedalt põimunud paljud geoloogia, füüsika, keemia, geograafia ja bioloogia valdkonnad (joonis 1.2).

**1.1.** Maa geosfäärid.



### 1.1.2. Sisevete uurimise ajalugu

Süvitsi tutvumine mis tahes teadusharuga eeldab teadmisi ka selle minevikust ja senisest arengukäigust. Tagasivaade tähtsamate limnoloogide, uurimisrühmade ja organisatsioonide tegevusele ning nende panusele siseveekogude uurimisse aitab mõista tänapäeva veeökoloogia olemust ja tulevikusuundumusi.

**VARANE LIMNOLOOGIA** Sisevete ja nende koostise uurimisega on tegeldud juba väga pikka aega. Esimesed põhjalikumad hüdrokeemilised ülestähendused pärinevad antiikmaailmast, kus huvi vee vastu oli eelkõige seotud joogi- ja tarbeveevajadusega. Juba siis õppisid inimesed tundma mitmesuguse koostise ja omadustega põhjavett ning kasutama seda ravimiseks või mõnel muul praktilisel otstarbel. Rohkelt rajati kuurorte, mis olid pühendatud tervisejumalale Asklepiosele. Need tänapäeva mõistes spaad muutusid Vana-Roomas väga populaarseks u 300. aasta paiku eKr. Peale mineraalveebasseinide ja saunade oli seal mitmesuguseid ehitisi ka vaimu turgutamiseks, nagu teatrid ja raamatukogud.

Vee kui ürgse elemendi olemasolu postuleeris esimesena Vana-Kreeka mõtleja Thales (624–546 eKr). Aristoteles (384–322 eKr) arvas, et Maa koosneb neljast põhielemendist: tuli, vesi, maa ja õhk. Need elemendid pidid kujutama endast algmateeriat, mille vormiks on üks algkvaliteedivormide kombinatsioone. Selle skeemi kohaselt oli maa külm ja kuiv, vesi külm ja niiske, õhk kuum ja niiske ning tuli kuiv ja kuum. Elementidel oli võime üksteiseks muutuda. Näiteks vesi (külm ja niiske) võis keemisel kergesti muutuda õhuks (kuum ja niiske).

Vana-Roomas tehti katset klassifitseerida mineraalvett, liigitades seda leeliseliseks, soolaseks, sauna või basseini jaoks sobivaks jne. Sealt pärineb ka üks ajaloo tähelepanuväärsemaid eksimusi veevarustuse korraldamises: torustik valmistati pliilehtedest, mis joogivett mürgitasid.

Keskajal jäi teadustegevus soiku. Maailmapilti kujundas peamiselt kirik, osalt ka antiikteadlaste ülestähendused. Alkeemikud püüdsid leida võimalusi, kuidas teisi metalle kullaks muuta, ning otsisid „elueliksiiri“. Alkeemiaperiood (võib öelda ka keemia kui teaduse lapsepõlv) kestis 17. sajandini. Selleks ajaks oli aastasadade jooksul kogunenud piisavalt teadmisi, et neid süstematiseerida ja üldistada. Alkeemikute retseptide ja reeglite põhjal hakati püstitama hüpoteese ja välja töötama teooriaid, mis aitasid kujundada praktilise keemia teaduslikuks keemiaks.

Alles 17. sajandi teises pooles lükkas Iiri füüsik ja keemik Robert Boyle (1627–1691) oma raamatus „Skeptiline keemik“ („The Skeptical Chymist“, 1661) ümber seni visalt püsinud Aristotelese nelja elemendi (tuli, õhk, vesi, maa) teooria. Sellega andis ta surmahoobi valitsevale alkeemiale, võttes kasutusele keemilise elemendi mõiste. Ta käsitas elementi kõikide kehade lihtsaima osisena, millest koosnevad keerulisemad kehad ja milleks need lõppkokkuvõttes jälle lagunevad. Ühtlasi oli Boyle üks esimesi tõelisi hüdrokeemikuid, alustades mere- ja mineraalvee keemilist uurimist. Prantsusmaal tegeles samasuunaliste uuringutega Antoine Lavoisier (1743–1794). Teineteisest sõltumatult tegid nad kindlaks merevee keemilise koostise püsivuse. Lavoisier oli ühtlasi moodsa keemia isa, kelle kõige kuulsamad ja tähtsamad tööd käsitlevad põlemisreaktsioone. Neid uurides kasutas ta hermeetiliselt suletavaid nõusid ning kaalus ära reaktsiooni lähteained ja saadused. Nii näitas ta, et põlemine on ühinemine hapnikuga, ja demonstreeris veenvalt hapniku rolli roostetamises ning loomade ja taimede hingamises. 1785. a tõestas Lavoisier, et vesi on hapniku ja vesiniku ühend, seega liitaine.

Samal perioodil algas sisevete füüsika ja keemia uurimine. 1786. a leidis Horace Bénédict de Saussure, et mõnede Šveitsi järvede põhjakihtide vesi on pindmistega võrreldes palju külmem. Umbes samal ajajärgul tehti Inglismaal kindlaks mitme järve maksimaalne sügavus. 18. sajandil jätkus sisevete tundmaõppimine ka seoses mäetööstuse kiire arenguga.

**19. SAJANDI KESKPAIK – 1930** Tööstusliku tootmise kasv 19. sajandi keskpaigast 20. sajandi alguseni nõudis sisevete põhjalikumat uurimist. 1852. a leiti Inglismaal otsene seos happevihmade ja intensiivse söepõletamise vahel. Genfi järves avastati ja kirjeldati esmakordselt temperatuuri hüppekihti. Saksa keemik Christian Friedrich Schönbein võttis 1838. a kasutusele termini „geokeemia“. Belgia järvedes uuriti vee hapnikusisalduse ööpäevast dünaamikat ja seostati väikest hapnikusisaldust kalade suremisega. François-Alphonse Forel (vt ääremärkus 1.1) nentis, et järvi ei tohi käsitada isoleeritud üksikobjektidena, vaid neid tuleb vaadelda valglate kui tervikute komponentidena.

**1930–1970** Alates 1930. aastatest algas hüdrokeemias süstemaatiline ja projektipõhine uurimistöö, mis on ülekaalus tänapäevani. Kujunemist iseseisvaks teadusharuks soodustas 1950.–1960. aastail toimunud keskkonnateaduste võidukäik. Lõplikult vabanes hüdrokeemia teiste teaduste toetavast rollist Lars Gunnar Silléni (1916–1970) artikli „Merevee füüsikaline keemia“ („The Physical Chemistry of Seawater“) ilmumisega 1960. a. Selles kirjeldab Sillén merevee geokeemilist päritolu ja kujunemist lähtekivimite murenemisel süsinikdioksiidi ja vulkaaniliste hapete toimel. Artiklist sai lähtepunkt paljudele järgnenud uurimustele, milles käsitleti sisevete geokeemilist päritolu ning millest tärkas hüdro- ja geokeemikute süvendatud huvi keemiliste tasakaalumudelite ja porsumisprotsesside vastu. Sillén kirjeldab artiklis ka merevees leiduvate metalliioonide mitme-

kesisuse kujunemist ja nende keemiliste kompleksühendite iseloomu. See andis omakorda tõuke sisevete keemilise koostise analüüsimisele paljudes hilisemates artiklites. Arengu loogiliseks jätkuks oli Werner Stummi (1924–1999) ja James J. Morgani raamat „Veekeemia" („Aquatic chemistry", 1970), mis kujutab endast Stummi Harvardi ülikoolis veedetud aastate viljaka teadus- ja õppetöö kokkuvõtet. Stummi fundamentaalne hüdrokeemiakäsitlus hõlmab paljusid teadusharusid. Ta rõhutab molekulaartasandil tehtavate uuringute olulisust ja füüsikalise keemia põhiprintsiipide rakendamise vajadust sisevetes toimuvate keemiliste protsesside mõistmisel. Ilma veeökosüsteemide keemiliste, geokeemiliste, bioloogiliste ja füüsikaliste protsesside tundmiseta pole võimalik neid ökosüsteeme kui tervikut mõista. Siseveekogusid tuleb uurida valglapõhiselt, et hinnata maismaa- ja veeökosüsteemide omavahelisi seoseid ajas ja ruumis (Likens 1992).

1.1 ÄÄREMÄRKUS

**FRANÇOIS-ALPHONSE FOREL**

François-Alphonse Forel (1841–1912) oli Lausanne'i ülikooli meditsiiniprofessor, järvede uurimise pioneer ja mitmekülgne teadlane. Tema uuringud järvede bioloogia, keemia ja füüsika vallas viisid uue, siseveekogusid käsitleva teadusharu tekkeni. Kolmeköitelises monograafias „Le Léman: Monographie limnologique" (1892–1904), mis põhines Genfi järve (prantsuse keeles Léman) 30-aastasel uurimisel, nimetab ta oma tegevust limnoloogiaks ehk järvede okeanograafiaks. Mõne uurija arvates võiks limnoloogia kui teaduse rajajaks pidada ka geograaf Friedrich Simonyt, kes avastas 1850. a hüppekihi. Forel veendunud, et järve mõjutavad keskkonnanäitajad on omavahel läbi põimunud ning järv kui süsteem on tihedalt seotud teda ümbritseva valgalaga. Inimesi pidas Forel järve ökosüsteemi ja valgala kompleksi tähtsaks osaks ning tema kirjatöödes kajastub selgelt tänapäevane arusaam ökosüsteemi teenustest.

Füüsikalises limnoloogias on tema märkimisväärseks panuseks vee liikumisvormide selgitamine. Forel avastas gradienthoovused, mis on tavalised Alpi mäestikujärvedes, kuhu suubuvad liustikest lähtuvad ojad, ning andis seletuse seišidele (seisulainetele).

Viljakas oli tema koostöö teiste teadlastega. Koos Wilhelm Ulega töötas ta välja Foreli-Ule skaala, mille abil hinnatakse pinnaveekogude värvust. Forel mõõtis ka valguse tungimist vette, kasutades selleks fotopaberit. Samuti paelusid teda maavärinad. Koos Itaalia geofüüsiku Michele Stefano de Rossiga töötas ta välja esimese skaala maavärinate tugevuse iseloomustamiseks. Rossi-Foreli 10-palline skaala oli praegu laialt levinud Richteri skaala eelkäija.

Pärast professoriametist loobumist jätkas Forel limnoloogilisi uuringuid, mille sünteesiks sai 1901. a ilmunud maailma esimene limnoloogiaõpik „Handbuch der Seenkunde: Allgemeine Limnologie". Selle õpiku ilmumine oli tähtsündmuseks järveteaduse ajaloos: seni geograafia ja okeanograafia äärealadel hingitsenud teadusharu muutus iseseisvaks.

## 1.1.3. Eesti limnoloogia

Eesti ala siseveekogude teaduslik uurimine algas muude teadusharude varjus juba 19. sajandil. Eestikeelsel limnoloogial on vanust umbes sajandi jagu. Ülevaate Eesti siseveekogude uurimisest, eelkõige nende hüdrobioloogiast, on andnud Tarmo Timm (2014).

**VARANE AEG** Kuni Esimese maailmasõjani olid praeguse Eesti ala limnoloogilises uurimistöös kandvaks jõuks baltisakslased. Tõenäoliselt kõige varasema sedalaadi teose autoriks oli August Wilhelm Hupel (1737–1819). See kirikuõpetaja, publitsist, kodu-uurija ja keelemees kogus arvukate korrespondentide abil Baltimaade geograafia, ajaloo, halduse ja eluolu kohta rikkaliku materjali ning avaldas selle neljaköitelises teoses „Topograafilisi teateid Liivi- ja Eestimaalt" („Topographische Nachrichten von Lief- und Ehstland", 1774–1789; joonis 1.3). Selles leidub andmeid Võrtsjärve morfomeetriast ja kalade nimestik. Kogumikku täiendas Ludwig August von Mellini (1754–1835) koostatud „Liivimaa atlas" („Atlas von Liefland", 1798), kust võib leida juba paljude suuremate järvede kontuurid (joonis 1.4). 1778. aastal ilmus baltisaksa loodusteadlase ja apteekri Jakob Benjamin Fischeri „Uurimus Liivimaa loodusloost" („Versuch einer Naturgeschichte von Livland"; 2., oluliselt täiendatud trükk 1791). Esimeseks kaudselt siseveekogude uurimist toetavaks organisatsiooniks sai 1792. a loodud Liivimaa Üldkasulik ja Ökonoomiline Sotsieteet – tolle aja kohta uuenduslik ühistegevusorganisatsioon. 1839. a anti selle toetusel välja näiteks Liivimaa erikaart, millel on esimest korda tõeselt kujutatud Võrtsjärve kontuuri. 1853. a alustas sotsieteedi osakonnana Tartus tööd Eesti Looduseuurijate Selts, mis kujunes hiljem siseveekogude uurimist koordineerivaks ühinguks. Juba seltsi esimeses väljaandes ilmus Gregor von Siversi (1854) artikkel Emajõe veetaseme mõõtmisest 1852. aastal. Selles avaldab ta arvamust, et Võrtsjärve suuri üleujutusi põhjustab tema väljavoolu ummistumine liivaga. 1890. aastal uuris Võrtsjärve Johannes Christoph Klinge (1851–1902), kes selgitas, miks järvede tuulepealsed kaldad kattuvad rohkem taimestikuga kui tuulealused (Klinge seadus).

**ÄRKAMISAEG** Kasvav huvi järvede ja nende elustiku vastu viisid 1905. a järvekomisjoni moodustamiseni Looduseuurijate Seltsi juures (vt ääremärkus 1.2). Komisjon suunas Eesti ala hüdrobioloogilisi uuringuid Esimese maailmasõjani. Eesti limnoloogia kui iseseisva teadusharu loojaks võib pidada Tartu ülikooli professorit Guido Schneiderit, kes tegi 1904.–1905. a Ülemiste järvel kompleksseid hüdrobioloogilisi uuringuid (Schneider 1908). Esimene eestikeelne limnoloogiaalane uurimus ilmus 1923. a Aleksander Audovalt ja Hendrik Bekkerilt ning käsitles Pühajärve. 1921. a rajati Võrtsjärve

hüdroloogilise režiimi uurimiseks Rannu-Jõesuusse veemõõdupost, mille abil mõõdeti iga päev järve veetaset. Post töötab tänini. Enne Teist maailmasõda oli hüdrobioloogiliste uuringute keskuseks Tartu ülikooli juures tegutsenud Eesti Vete Uurimise Komitee, mille eesotsas oli Heinrich Riikoja. Temalt endalt ilmus muu hulgas Eesti järvede nimestik (1934), järvede morfomeetriaalane ülevaade (1930; joonis 1.5) ja kokkuvõte 76 Ida-Eesti järve hüdrokeemiast (1940). Avaldati hulk artikleid vee-elustiku kohta. Veetaimestikku käsitlesid Elsa Pastak (1936) ja Karl Eichwald (1939), kalastikku ja kalastamist Jaan Kodres (1920) ja Edvin Reinvaldt (1930, 1941) ning parasiite Villem Voore (1931, 1939). Vaatluste organiseerimisel ja teostamisel oli suur osa järvekomisjonil.

## EESTI LIMNOLOOGIA PÄRAST TEIST MAAILMASÕDA

1951. aastal alustati taas järveuurimuslikke välitöid professor Heinrich Riikoja eestvedamisel. Töös osalesid Teaduste Akadeemia zooloogia ja botaanika instituudi (ZBI) ning Tartu Riikliku Ülikooli zooloogiakateedri teadurid. Ihtüoloogilisi uuringuid hakkas juhendama Neeme Mikelsaar. Võrtsjärve uurisid Vaike Erm ja parasitoloog Harda Tell. 1952–1954 kogus Natalja Schönberg seal zooplanktoni proove. 1954. a rajati ZBI Võrtsjärve limnoloogiajaam, millest on nüüdseks saanud Eesti Maaülikooli põllumajandus- ja keskkonnainstituudi hüdrobioloogia ja kalanduse õppetooli osa ning siseveekogude uurimise peamine keskus (joonis 1.6). Kas kohe või pisut hiljem asusid jaamas tööle

**1.3.** August Wilhelm Hupeli kogumik.

**1.4.** Ludwig August von Mellini atlase Tartu kreisi kaardileht.

**1.5.** Heinrich Riikoja järvede morfomeetria ülevaade.

**1.6.** Eesti Maaülikooli limnoloogiakeskuses tehakse fundamentaal- ja rakendusuuringuid, õpetatakse üliõpilasi ning juhendatakse kraadiõppureid.

paljud Eesti tuntud veekogude uurijad, nagu Neeme Mikelsaar, Aare ja Aime Mäemets, Tarmo ja Viivi Timm, Õilme Tõlp, Henn ja Juta Haberman, Ervin ja Evi Pihu, Aare Kirsipuu, Mart Kangur, Saida Lokk, Harda Tünder, Reet ja Kalle Laugaste.

Tegeldi Võrtsjärve, väikejärvede ja alates 1960. aastatest Peipsi järve uurimisega. 1980. aastail võeti vaatluse alla ka vooluveekogud. Kalatoodangu suurendamise eesmärgil uuriti loomarühmade kasvatamise meetodeid. Suur praktiline saavutus oli Võrtsjärve kalamajanduse ümberkorraldamine teaduslikel alustel. Veekogude vaatlustest ja kirjeldustest arenesid välja kalandusalased ning kalade füsioloogiat, järvede eutrofeerumist ja produktsiooni käsitlevad uuringud. Avaldati mitu monograafiat, mis käsitlesid Eesti järvi, Verevi järve ja Võrtsjärve. Ilmus hulk populaarteaduslikke kirjutisi vee-elustikust ja veekogudest.

Teadustegevuse tulemusi avaldati sarjas „Hüdrobioloogilisi uurimusi“, artiklikogumikes ja üleliidulistes ajakirjades. Uuringuid tehti ka väljaspool Eestit ning nende tulemused pääsesid tihti rahvusvahelistesse ajakirjadesse.

**1990. AASTATEST TÄNAPÄEVANI** Eesti limnoloogiat iseloomustas pikka aega kirjeldav suundumus, kus paremal juhul tegeldi korrelatiivsete seoste uurimisega. Riigikorra vahetus, rahvusvaheline avatus ning teadustöö muutumine projektipõhiseks alates 1990. aastate keskpaigast mõjutasid oluliselt Eesti järveteadust: alustati põhjuslike seoste väljaselgitamist, kasutades modelleerimist ja tehes rahvusvahelist koostööd. Omaette töörühmad tegutsesid väikejärvedel, Peipsil, Võrtsjärvel ja vooluvetel. Veekogude ainevoogude, kihistumisprotsesside ja elustiku omavaheliste seoste uurimist juhtisid alates 1990. aastatest Peeter ja Tiina Nõges, Külli Kangur ja Ingmar Ott. Siseveekogude uurimine on tänapäeval tihedalt seotud osalemisega riikliku keskkonnaseire programmides. Üks mahukamaid projekte on olnud 2003. aastal alustatud „Järve- ja jõetüüpide ökoloogilise seisundi klassipiiride rahvusvaheline interkalibreerimine“. Selle peamisi eesmärke on Euroopa Liidu veepoliitika raamdirektiivi täitmine.

Tänapäeval on rakenduslimnoloogia põhiliseks probleemiks sisevete ökosüsteemide halb seisund või degradeerumine. Peamisteks põhjusteks on seejuures endiselt veekogude eutrofeerumine, hapestumine, raskmetallid ning tööstuslik ja olmereovesi. Vooluvete puhul on oluline maaparanduse ja paisutamise mõju, järvede puhul veetaseme muutumine, eriti alanemine.

1.2 ÄÄREMÄRKUS

**LUSi JÄRVEKOMISJON**

Eesti Looduseuurijate Seltsi (LUS) esimene ja vanim erialasektsioon – järvekomisjon – koordineeris kaua Eesti sisevete uurimist. 19. ja 20. sajandi vahetusel olid Venemaa Balti kubermangud tuntud kalakasvatuste poolest ja paljud kalakasvatajad olid Tartu ülikooli juures oleva LUSi liikmed. Seltsi üldkoosolekul 1905. a loodi LUSi Liivimaa kubermangu järvede uurimise komisjon, mille esimeheks valiti Max von zur Mühlen. Komisjoni ülesandeks sai kubermangu järvede geoloogiline, füüsikalis-keemiline ja bioloogiline uurimine ning tegelemine kalakasvatusküsimustega. Välitöid ja tehniliste vahendite ostmist toetas LUS. Tulemused kanti ette seltsi koosolekutel ning aruannetes rubriikides „Materjale Liivimaa järvede uurimisest“ ja „Andmed Eesti ala järvede uurimisest“. Järvekomisjon oli tollal Eesti sisevete uurimise keskus, mis pani aluse Eesti järvede hilisemale põhjalikule uurimisele. Esimese maailmasõja puhkedes jäi komisjoni tegevus soiku ja hoogustus taas alles 1921. a, mil LUS hakkas uuesti järvede uurimist rahaliselt toetama. Sellest perioodist pärinevad Heinrich Riikoja koostatud Eesti järvede nimestik ja paljud uurimused planktonist, põhjaloomadest ja kaladest. Kuigi Eesti Vabariigi esimesel iseseisvusperioodil loodi veekogude uurimiseks teisigi keskusi, säilitas järvekomisjon juhtiva koha ning Eesti järved olid tunduvalt paremini uuritud kui naabermaade omad. Järvekomisjoni teine aktiivne tegevusperiood lõppes 1940. aastal, kui katkes kogu LUSi töö. Kolmas tegutsemisperiood algas 1951. aastal ENSV Teaduste Akadeemia juures oleva LUSi järvekomisjoni reorganiseerimise aktiga. Järvekomisjon abistas Zooloogia ja Botaanika Instituuti ning Tartu Riikliku Ülikooli zooloogia kateedrit, osaledes hüdrobioloogilistel välitöödel ja materjali läbitöötamisel ning suunates üliõpilasi ekspeditsioonide koosseisu. Järvekomisjoni otsesel kaasabil uuriti väga paljusid Eesti veekogusid, kalaliike ning selgrootute ja taimede rühmi. Seltsi liikmete kogutud andmeid on kasutatud mitme mahuka monograafia koostamisel. Pearõhk järvekomisjoni töös koondus fenoloogilistele jt loodusvaatlustele, samuti nähti ette tegelemist looduskaitse ja loodusteaduste ajalooga, vähemal määral kalakasvatuse arendamisega. Praegu on komisjoni töö suuresti üle läinud ülikoolidele ja looduskeskustele.

**1.7.** Vesi vedelas, tahkes ja gaasilises olekus (Crateri järv).

# 1.2. Vesi ja veeringe

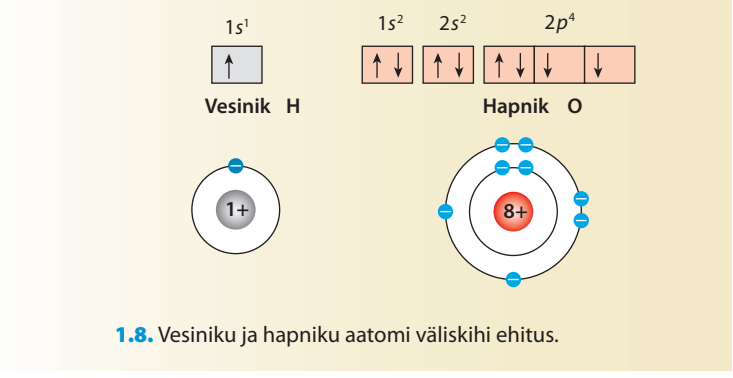
Maa on Päikesesüsteemis ainulaadne taevakeha. Võrreldes teiste planeetidega valitsevad just siin soodsad rõhu- ja temperatuuritingimused, mis lubavad Maa pinnal arvukalt leiduda veemolekulidel. Ligikaudu 71% maapinnast on kaetud vedela veega ja seetõttu tavatsetakse Maad kutsuda ka siniseks planeediks. Võib üsna kindel olla, et mujalt universumist pärinevad mõistusega olendid ei kasutaks esmamainimisel nime Maa, vaid hoopis midagi veega seonduvat.

## 1.2.1. Vesi kui aine

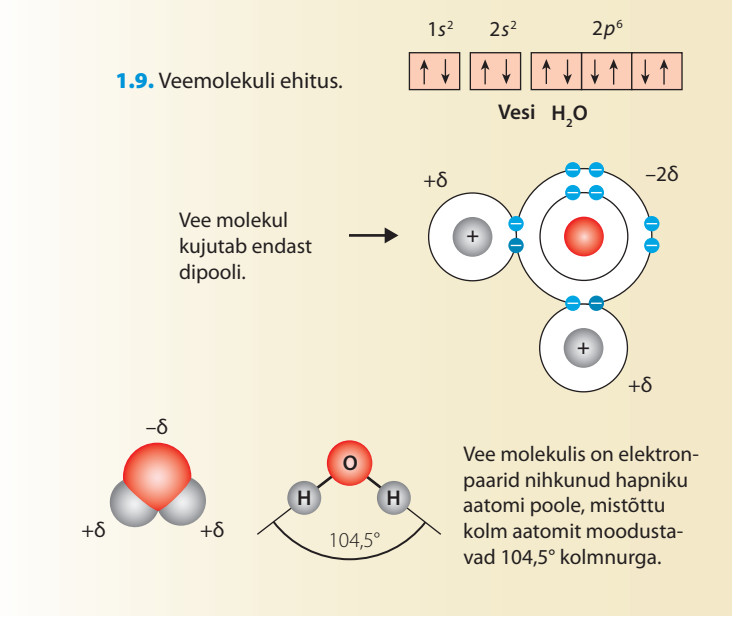
Tavaelus väga tuntud ja enamasti tähelepandamatu ainena on veel üsnagi erilised füüsikalis-keemilised omadused. Vesi on ainuke looduslikult esinev anorgaaniline vedelik Maal. Veelgi enam, vesi on ainuke looduslik keemiline ühend Maal, mida leidub kolmes olekus: tahkes, vedelas ja gaasilises (joonis 1.7). Vesi oli ka elu tekkepaigaks ning on siiani ülekaalus erandi-tult kõigi elusorganismide koosseisus. Põhjus on selles, et veel on mitmeid ebaharilikke või lausa anomaalseid omadusi, mis muudavad ta ainuvalitsevaks biokeemiliste reaktsioonide kandjaks elusorganismide sisekeskkonnas. Vedela keskkonna olemasolu on elu säilimiseks hädavajalik. Biokeemilised reaktsioonid ei saa toimuda gaasilises keskkonnas, sest liigse hõreduse tõttu poleks reaktsioonid enam juhitavad. Tahkes keskkonnas seevastu oleksid reaktsioonid molekulide piiratud liikumise tõttu liiga aeglased. Vee erilised omadused mõjutavad tugevalt vett elukeskkonnana ja seal toimuvaid keemilisi reaktsioone.

**VEE MOLEKULAARSTRUKTUUR** Vee eriliste omaduste aluseks on esmapilgul lihtne molekulaarne struktuur – $H_2O$. **Vesinik** (H) on universumis kõige levinum element ja kõige lihtsama ehitusega, kuid see teeb tema paigutamise perioodilisussüsteemi keerukaks. Valentselektronide konfiguratsioon $ns^1$ on küll omane I rühma elementidele ja vesinik moodustab ioone laenguga +1, kuid leelismetallidega on vesinikul vähe sarnasusi. Tema keemilised omadused ei luba teda paigutada ka halogeniidide hulka, ehkki temagi aatomi väliskihi täitmiseks tuleks liita vaid üks elektron ja ehkki ta moodustab (nagu halogeniididki) ioone laenguga –1 ja kaheaatomi-

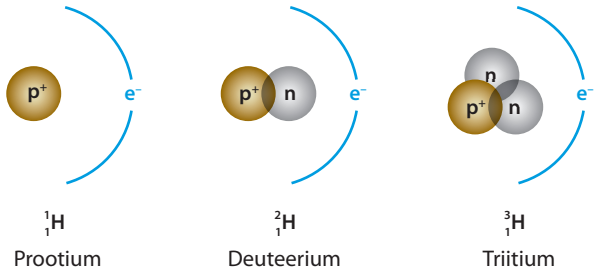
lisi püsivaid molekule. **Hapnik** (O) kuulub koos väävli (S), seleeni (Se), telluuri (Te) ja polooniumiga (Po) VI rühma, mille aatomite väliskihi ehitust iseloomustab valem $ns^2np^4$ ning seega on väliskihi täitmiseks vajaka kaks elektroni (joonis 1.8). Analoogselt VI rühma mittemetallidega moodustab hapnik kolmest aatomist koosnevaid vesinikuühendeid ehk **hüdriide**. Hapnik on selle rühma elementidest kõige suurema elektronegatiivsusega ehk võimega siduda endaga elektrone. Aatomipaari O–H vahel valitsevas polaarses kovalentses sidemes on mõlemad elektronpaarid nihkunud hapniku poole. Seetõttu ei paikne aatomid veemolekulis mitte ühtse ahelana, vaid moodustavad võrdhaarse (104,5°) kolmnurga, mille tipus asub hapnikuaatom ja aluse otstes vesinikuaatomid (joonis 1.9). Seejuures omandab suurema elektronegatiivsusega hapnik nõrga negatiivse osalaengu ja vesiniku aatomid positiivse osalaengu. Laengute jaotumise tõttu on vee molekul polaarse ehitusega. Ruumilist laengujaotust iseloomustatakse elektrilise dipoolmomendiga. Vee molekuli dipoolmoment on suur, 1,844 D (debai) = $6{,}151\times10^{-30}$ C·m.




**1.8.** Vesiniku ja hapniku aatomi väliskihi ehitus.




**1.9.** Veemolekuli ehitus.

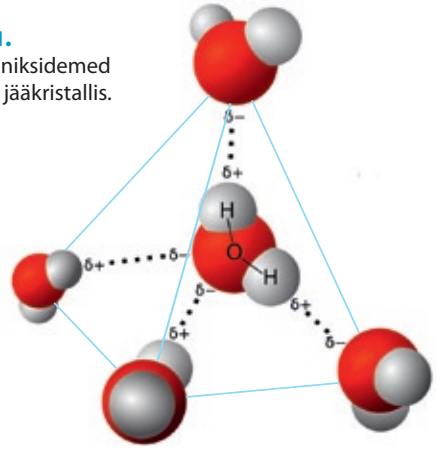



**1.10.** Vesiniku isotoopide aatommass sõltub nende tuumas sisalduvate neutronite arvust.
$p^+$ – prooton, n – neutron, $e^-$ – elektron.

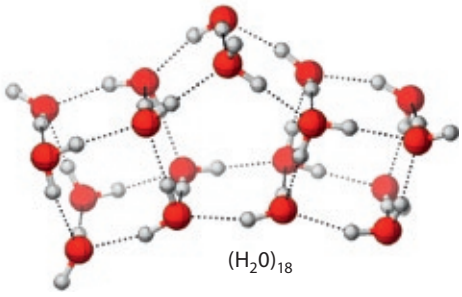
Üldjuhul on vee molekulmass 18. Kuid et nii vesinikul kui ka hapnikul on **isotoope**, s.t elemendi teisendeid, millel on ühesugune tuumalaeng, kuid erineva neutronite arvu tõttu erinevad aatommassid, võib vee molekulmass ka teistsugune olla. Vesiniku isotoopidest on tuntud prootium ($^1H$) ehk harilik vesinik (H), deuteerium ($^2H$) ehk raske vesinik (mitteametlik sümbol D) ja triitium ($^3H$) ehk üliraske vesinik (mitteametlik sümbol T) (joonis 1.10). Triitium on radioaktiivne isotoop poolestusajaga u 12,5 aastat ning seda leidub looduslikes reostamata vetes äärmiselt vähe (ligikaudu üks $^3H$ aatom $10^{18}$ $^1H$ aatomi kohta). Tuntud hapniku isotoope on kuus: $^{14}O$, $^{15}O$, $^{16}O$, $^{17}O$, $^{18}O$ ja $^{19}O$. Neist $^{14}O$, $^{15}O$ ja $^{19}O$ on radioaktiivsed ja lühiealised ning looduslikes vetes neid märkimisväärsel hulgal ei esine. Seega võiks teoreetiliselt leiduda tervelt 36 vee isotoopset teisendit. Looduses esineb üheksa stabiilsetest isotoopidest koosnevat vee teisendit, mille hulk sõltub küll proovi kogumise kohast, kuid levinumad on $H_2{}^{18}O$ (0,2%), $H_2{}^{17}O$ (0,04%) ja $HD^{16}O$ (0,03%). Ülejäänud kombinatsioone tuleb looduslikes veekogudes ette üliharva.

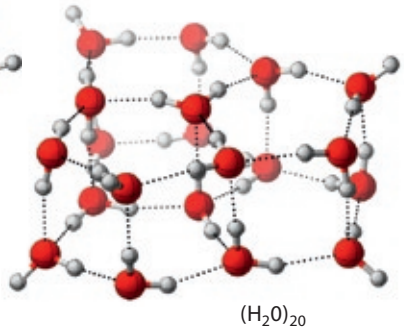
Ükskõik millise aine molekulid kipuvad üksteisele või mõne teise aine molekulidele piisavalt lähedale sattudes tõmbuma. Seda põhjustab molekulide polaarsus: kuigi molekulid on tervikuna elektriliselt neutraalsed, ei jagune elektronid molekulisiseselt ühtlaselt. Van der Waalsi jõud on summa molekulidevahelistest jõududest, mis ei tulene kovalentsetest sidemetest ega ioonide elektrostaatilisest vastastikmõjust neutraalsete või laetud molekulidega. Võrreldes kovalentsete sidemetega on van der Waalsi vastastikmõju palju nõrgem ning väheneb kauguse kasvades kiiremini, kuid sellega tuleb arvestada näiteks keemistemperatuuri ja lahustuvuse hindamisel.

Vedelas ja tahkes olekus valitseb veemolekulide vahel **vesinikside**, mis on omapärane keemiline side vesinikust ja suure elektronegatiivsusega elemendist koosnevate molekulide vahel (joonis 1.11). Vesiniksi-




**1.11.** Vesiniksidemed (···) jääkristallis.



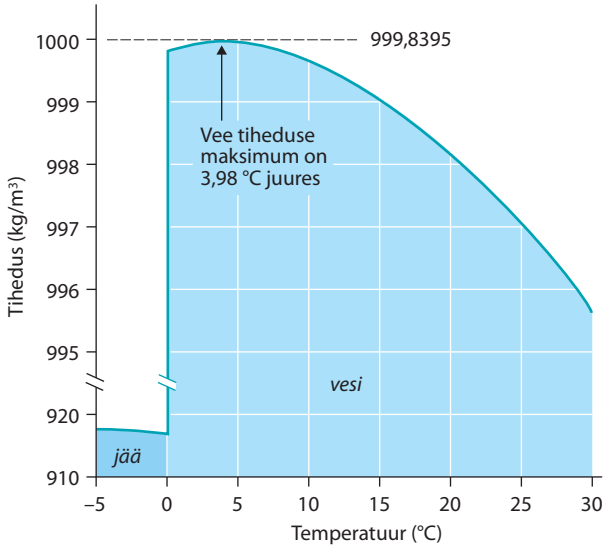

**1.12.** Vee molekulidest moodustunud klastrite näiteid.

demed moodustuvad osaliselt varjestamata prootoni ja vaba elektronpaari vahel ning on energeetilises mõttes vähese vastupidavusega, kuid märksa tugevamad van der Waalsi jõust. Kui kovalentse O–H-sideme lõhkumiseks vajatav energiahulk on 464 kJ/mol, siis veemolekulide vahel moodustuva vesiniksideme lõhkumiseks kulub ainult 21 kJ/mol. Seda on siiski tunduvalt rohkem kui näiteks ammoniaagis ($NH_3$) leiduvate vesiniksidemete puhul (13 kJ/mol) ja oluliselt vähem (155 kJ/mol) kui vesinikfluoriidi (HF) puhul. Erinevuste põhjuseks on vesinikuga kovalentset sidet moodustavate elementide erinev elektronegatiivsus. Vesiniksidemete moodustumise juures väärib tähelepanu ka fakt, et veemolekulis on kasutada kaks vesinikuaatomit ja kaks vaba elektronpaari hapnikuaatomi poolt ning seega võib iga molekul luua neli vesiniksidet. HF-molekul suudab näiteks ühe vesinikuaatomi tõttu luua vaid kolm vesiniksidet ning $NH_3$ molekulide vesiniksidemete moodustamise võime on piiratud ühe elektronpaariga. Molekulisisesed vesiniksidemed on levinud suurtes biomolekulides, nagu valgud ja nukleiinhapped, ning organismide elutegevuses on need väga olulised.

Vesiniksidemed on paljude vee eriliste omaduste põhjuseks. Nende tõttu moodustavad veemolekulid omalaadseid kogumikke – **klastreid** (joonis 1.12). Klastrite struktuur muutub ajas väga kiiresti ning klastrid ise on väga lühiealised ($10^{-10}$ s) moodustised, mis pidevalt tekivad ja kaovad. Klastrite eluiga on siiski pikem molekulaarse vibratsiooni perioodist (~$10^{-13}$ s) ning sõltub temperatuurist. Keskmiselt sisaldab üks klaster 0 °C juures 65 veemolekuli, kuid 100 °C juures vaid 12. Veeaurus on kõik vesiniksidemed lõhutud ja leidub vaid üksikmolekule.

■ **TIHEDUS JA RÕHK** Erinevalt paljudest teistest ainetest pole vesi suurima tihedusega mitte tahkes, vaid hoopis vedelas olekus. Puhta jää tihedus 0 °C juures on 916,8 kg/m$^3$, vedelal veel sama temperatuuri juures aga juba 999,8 kg/m$^3$ ehk 8,5% suurem. Temperatuuri tõustes kasvab tihedus veelgi ja saavutab oma suurima väärtuse 3,98 °C juures (joonis 1.13). Kuigi need tiheduserinevused võivad tunduda tühised, on nad veeökosüsteemide jaoks suure tähtsusega. Selle tulemusena moodustub jää veekogu pinnale, isoleerib selle jahutavast atmosfäärist ja lõpetab vee tsirkulatsiooni. Nõnda säilitab veekogu oma soojust kauem ega külmu põhjani.

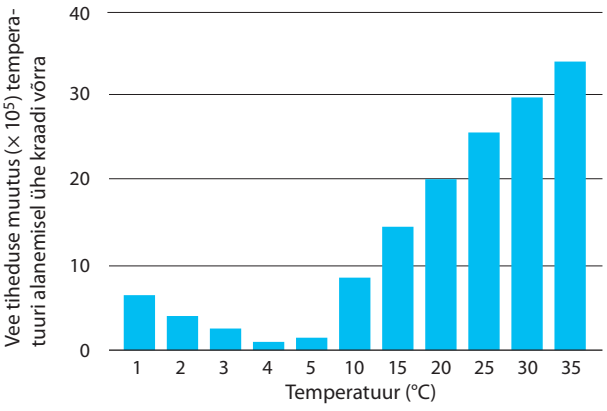
Tiheduse sõltuvus temperatuurist on seotud vee molekulaarse ehitusega. Mida madalam on temperatuur, seda rohkem molekule on koondunud klastritesse. Jääkristallides on iga veemolekul seotud vesiniksideme abil tetraeedriliselt nelja naabermolekuliga (joonis 1.11) ning moodustab „koheva“ ruumilise struktuuri. Sellise struktuuri tõttu on jää tihedus vedela vee tihedusest




**1.13.** Vee tiheduse sõltuvus temperatuurist.

väiksem. Jää tetraeedriline struktuur säilib korrastatuse mõttes pärast sulamist ka vees, kuid klastrid on juba väiksemad. Struktuuritühikute vähenedes molekulid koonduvad ja selle arvel kasvab vee tihedus, kuni saavutatakse temperatuur 3,98 °C. Vee soojenedes molekulide liikuvus küll suureneb, kuid struktuuriefekt ületab veel soojusliikumise mõju. Edasisel soojendamisel üle 3,98 °C on ülekaalus juba soojusliikumise mõju, molekulid eemalduvad üksteisest, vesi hakkab paisuma ning tihedus väheneb taas. Lõplikult lõhutakse vesiniksidemed alles vee aurustumisel. Vee tiheduse muutuse seos temperatuurimuutustega pole lineaarne (joonis 1.14). Kõige väiksemad tiheduse muutused on suurima tiheduse piirkonnas (4 °C ümber). Nelja- ja viiekraadise veekihi läbisegamiseks kulub u 40 korda vähem energiat kui 29 °C ja 30 °C veekihi läbisegamiseks. Seetõttu on suvel seisuveekogudes tekkiv temperatuurikihistumus võrdlemisi püsiv.

Vee tihedus suureneb vähesel määral koos soolsuse kasvuga ligikaudu lineaarselt (tabel 1.1). Elektrostaatilise tõmbe tõttu paigutuvad molekulid soolvees tihedamalt kui puhtas vees, mistõttu vee tihedus kasvabki. Magedate siseveekogude mineraalainesisaldus jääb vahemikku 0,01–1,0 g/l, kuid soolajärvedes võib see ületada 50 g/l, mis maailmamere keskmise soolsusega (35 g/l) võrreldes on üsna suur. Kuigi mageveejärvedes on soolsusest tingitud tihedusgradient väike, ei tohiks seda alahinnata. Kihistunud järvedes võivad anorgaanilised ained moodustada väga suuri tihedusgradiente, mis takistavad aasta ringi veekogu segunemist. Peale üldise tiheduse suurendamise alandab mineraalainesisaldus nii vee maksimumtiheduse temperatuuri (ligikaudu 0,2 °C/(g·l) kohta) kui ka külmumistemperatuuri. Viimase põhjuseks on asjaolu, et soolade lisandumine takistab vesiniksidemete teket. Kui soolsus on näiteks 35 g/l, on vee tihedus suurim temperatuuril –3,52 °C, kuid see on atmosfäärirõhu juures juba alla külmumispunkti (–1,91 °C). Magevetes on soolsuse mõju vee maksimaalsele tihedusele siiski tühine.




**1.14.** Vee tiheduse muutumine eri temperatuuripiirkondades, kui vee temperatuur alaneb ühe kraadi võrra.

Peale mineraalainete võib maksimaalse tiheduse temperatuuri alandada ka veesamba hüdrostaatiline ehk vedelikusisene rõhk. See on veesamba igas punktis valitsev rõhk, mis moodustub veepinnale mõjuvast atmosfäärirõhust ($p_0$) ja veesamba kaalu tekitatavast rõhust:

$$p_h = p_0 \rho h,$$

kus $\rho$ on vedeliku tihedus ja $h$ vedelikusamba kõrgus. Hüdrostaatiline rõhk kasvab ligikaudu $10^5$ Pa võrra 10 m sügavuse kohta. Vee temperatuurist ja soolsusest tingitud tiheduse erinevuse tõttu võib veesamba rõhk samal sügavusel veekogudes erinev olla.

Maksimaalse tiheduse temperatuur väheneb umbes 0,1 °C võrra 100 m sügavuse ehk $10^6$ Pa rõhu kohta. Nii seostatakse väga sügavate järvede 4 °C-st madalamat põhjatemperatuuri tihti just suure hüdrostaatilise rõhuga. Näiteks Baikali järves, mis on maailma sügavaim siseveekogu, on põhjalähedaste veekihtide temperatuur vaid 3,1–3,4 °C.

Tabel 1.1. SEOS VEE TIHEDUSE, SOOLSUSE JA TEMPERATUURI VAHEL

| Soolsus (g/l) | Tihedus (g/m³, 4 °C) | Suurima tiheduse temperatuur (°C) | Külmumistäpp (°C) |
|---|---|---|---|
| 0 | 1,00000 | 3,94 | 0,00 |
| 1 | 1,00085 | 3,72 | |
| 2 | 1,00169 | 3,50 | |
| 3 | 1,00251 | 3,28 | |
| 10 | 1,00818 | 1,80 | |
| 35* | 1,02822 | –3,52 | –1,91 |

* Ookeanivee tüüpiline soolsus.

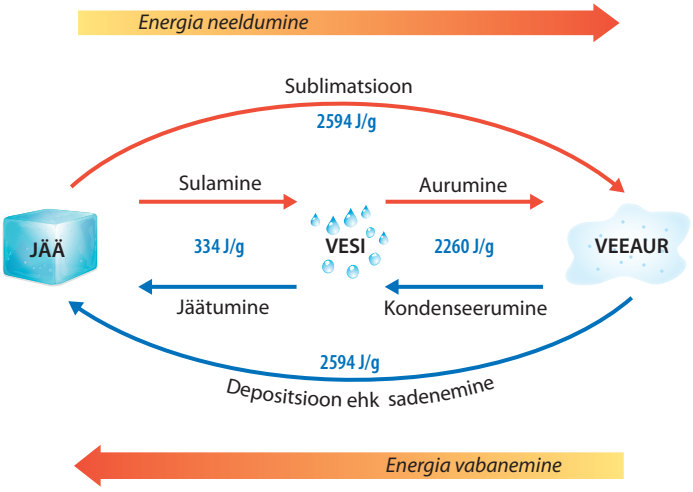
Tabel 1.2. VI RÜHMA ELEMENTIDE VESINIKUÜHENDITE SULAMIS- JA KEEMISTEMPERATUURID

| Element | Vesinikuühend | Külmumis-/sulamistemperatuur (°C) | Veeldumis-/keemistemperatuur (°C) |
|---|---|---|---|
| O (hapnik) | $H_2O$ | 0 | 100 |
| S (väävel) | $H_2S$ | –83 | –63 |
| Se (seleen) | $H_2Se$ | –65 | –45 |
| Te (telluur) | $H_2Te$ | –53 | –5 |

**VESIKESKKONNA SOOJUSISEÄRASUSED** Vesi erineb teistest VI rühma elementide vesinikuühenditest ehk hüdriididest kõrge sulamis- ja keemistemperatuuri poolest, mis normaalrõhul on vastavalt 0 ja 100 °C (tabel 1.2). Vesinikuühendid peaksid teoreetiliselt olema gaasilised, kuid vesi on erandina vedelik. Perioodilisusseaduse järgi peaks vee külmumis-sulamistemperatuur olema kindlasti madalam kui –83 °C ja kondenseerumis-keemistemperatuur allpool –63 °C. Seega peaks vesi meie planeedil esinema põhiliselt gaasilisena, veeauru kujul, välja arvatud talviti polaaraladel, kus harukordadel leiduks vett ka vedelas olekus. Selline eripära on tingitud vesiniksidemete olemasolust veemolekulide vahel. Kui jää sulab või muutub veeauruks, kulub märkimisväärses koguses energiat vesiniksidemete lõhkumiseks. Teiste vesinikuühendite molekulide vahel vesiniksidemed puuduvad ning neid seovad vaid tunduvalt nõrgemad van der Waalsi jõud.

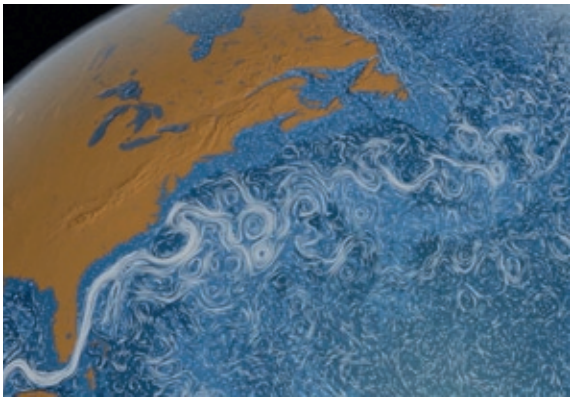
Sõltuvalt siseenergia hulgast võib vesi olla kolmes olekus: tahkes, vedelas ja gaasilises. Jääs on kõik vesinikuaatomid omavahel seotud, vedelas ainult osa neist ning veeaurus vesiniksidemed puuduvad. Siseenergia kasvades hakkavad veemolekulid kiiremini liikuma, veetemperatuur tõuseb ja vesiniksidemed katkevad. Siseenergia vähenedes toimub vastupidine protsess.

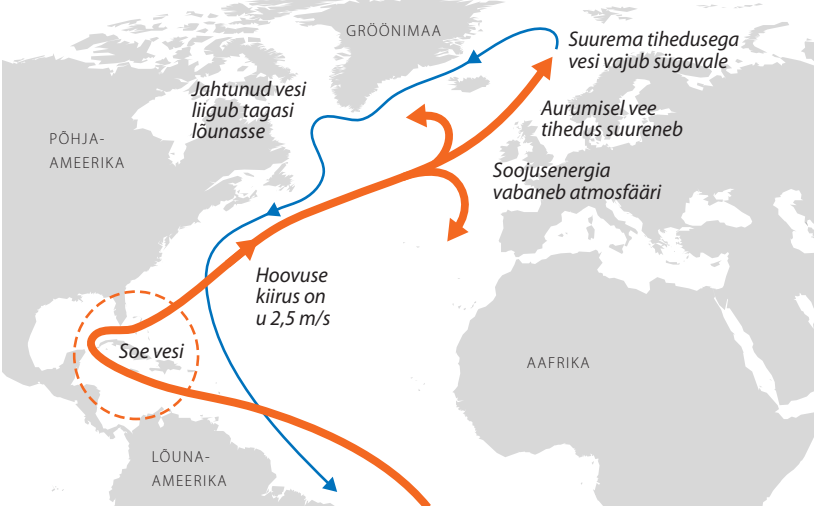
Aine soojuslikke omadusi iseloomustavat füüsikalist suurust nimetatakse **erisoojuseks**. See on soojushulk, mis on vajalik aine massiühiku temperatuuri tõstmiseks 1 °C võrra. Vee erisoojus on väga suur (4,19 J/(g·°C) ning sellest suurem erisoojus on vaid vedelal ammoniaagil (4,70 J/(g·°C)) ja liitiumil (4,38 J/(g·°C)). Teiste biosfääri koostisosade erisoojus on tunduvalt väiksem. Näiteks kivimitel on see ligikaudu 0,8 ja kuival õhul 1,00 J/(g·°C). Vee suur soojusmahtuvus loob hüdrosfääris hoopis stabiilsema keskkonna, kui see on maismaal. Temperatuurikõikumised toimuvad aegamööda ning päevased ja sesoonsed temperatuurierinevused on märksa väiksemad kui õhus. See omadus avaldab suurt mõju kliimale. Näiteks Atlandi ookeani soe Golfi hoovus parandab märkimisväärselt Lääne-Euroopa kliimatingimusi (joonis 1.15). Jää erisoojus on –10 °C juures umbes pool vee omast (2,11 J/(g·°C)) ja see väheneb progressiivselt temperatuuri langedes. Samas on jää sulatamiseks vajalik energiahulk suur (sulamissoojus 334 J/g) ning veel suurem on vee aurustumissoojus (2260 J/g). Ja vastupidi, veeauru veeldudes vabaneb 2260 J/g ning 0 °C juures oleva vee jäätudes vabaneb 334 J/g (joonis 1.16). Nende omaduste tõttu on kevadeti vaja suurel hulgal energiat jää sulatamiseks ja sama suurel hulgal energiat vabaneb sügisel jäätumisel. Seepärast on veekogude läheduses kevadel alati jahedam ja sügisel soojem kui mujal.




**1.16.** Vee olekumuutustest tingitud energia vabanemine ja neeldumine.

**1.15.** Golfi hoovus on soojade hoovuste süsteem, mis mõjutab oluliselt Atlandi ookeani põhjaosa, Põhja-Jäämere ja Euroopa kliimat ning hüdroloogilisi ja bioloogilisi tingimusi.





**PINDPINEVUS** Üks vedelike erilisi omadusi on pindpinevus. Vedelas vees on iga molekul ümbritsetud ühtlaselt naabermolekulidega ja seotud kohesioonjõududega, mis on keskmiselt võttes tasakaalus (joonis 1.17). Veest väljaspool on (gaasi)molekule väga vähe ja niisugust tasakaalu tekkida ei saa. Seetõttu mõjub vee pinnakihi molekulidele summaarne tõmme vedeliku sisemuse suunas ning vedeliku pinnakihis tekib pinge. Vee ja õhu piirpind on alati võimalikult väike. Et kindla ruumala juures on minimaalne pind keral, on muude jõudude puududes vedelikupiisk alati kerakujuline. Seda nähtust nimetatakse **pindpinevuseks**, mida omakorda on võimalik kirjeldada pindpinevusjõuga. Ühikulise pikkuse ($l$) kohta väljendatuna nimetatakse pindpinevusjõudu pindpinevusteguriks ($\sigma$):

$$\sigma = \frac{F_p}{l}$$

Pindpinevusteguri mõõtühikuks on enamasti dn/cm (düün, $10^{-5}$ N) ja see on konkreetset vedelikku või lahust iseloomustav suurus. Tavaelus tuntud ainetest on ainult elavhõbedal pindpinevustegur suurem kui veel. Pindpinevus väheneb temperatuuri tõustes ja suureneb pisut soolsuse kasvades. Peale nende tegurite mõjutavad pindpinevust oluliselt mitmesugused lahustunud orgaanilised ained, näiteks **pindaktiivsed ained** ehk **detergendid**. Loodusvetes on pindpinevus väiksem rabajärvedes, veeõitsengute korral ja suurtaimestiku poolest rikastes järvedes (tabel 1.3).

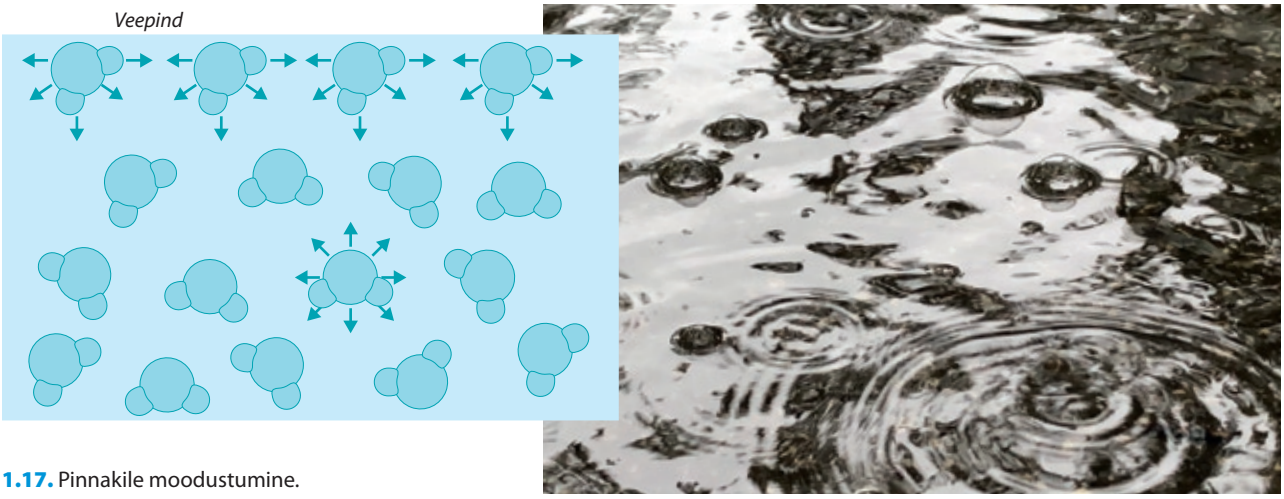
Pindkile on elupaigaks paljudele organismidele, keda kokku nimetatakse **neustoniks**. Pindkile pakub häid kinnitumisvõimalusi tervele hulgale organismidele, aga võib saatuslikuks saada neile, kes ei suuda end temast lahti rebida, näiteks bakteritele või väikestele vesikirbulistele. Pindpinevuse vähenemine rohkem kui 20 dn/cm võrra võib hävitada juba suurema osa neustonist.

Tabel 1.3. VEE PINDPINEVUS LOODUSLIKES VEEKOGUDES

| Keskkond | Pindpinevustegur (dn/cm) |
|---|---|
| Oligotroofsed järved | 0–2 |
| Eutroofsed järved | 0–20 |
| Rabajärved | 0–20 |
| Ujulehtedega taimestikuvöönd | 5–20 |
| Veesiseses taimestikus | 1–2 |
| Veeõitsengutes | 0–20 |
| Avameres | < 1 |

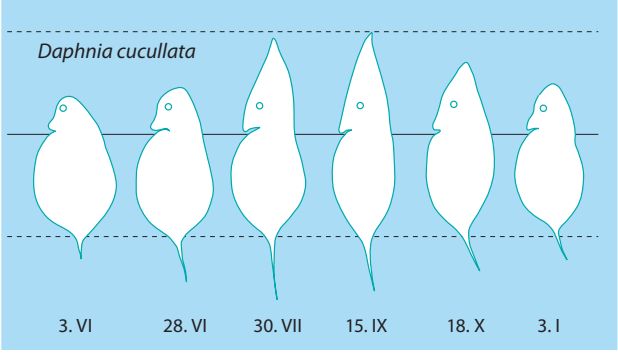
**VISKOOSSUS** Veele nagu teistelegi vedelikele on iseloomulik püüd takistada oma osakeste liikumist üksteise suhtes. See nähtus kannab nimetust **viskoossus** ehk **sisehõõrdumine** ja selles väljendub vedeliku võime muundada kineetiline energia soojusenergiaks. Viskoossuse toimet on lihtne ette kujutada laminaarsel voolamisel, kui vedeliku kihid liiguvad erineva kiirusega. Nad libisevad üksteise peal ja nende libisemispinnas tekib hõõrdumine, mis püüab takistada nende omavahelist liikumist. Mida suurem on takistav jõud, seda vaevalisem on vedeliku voolamine. Vedeliku viskoossus sõltub tema temperatuurist ja rõhust. Temperatuuri tõustes viskoossus väheneb ja rõhu tõustes suureneb. Viskoossust mõõdetakse harilikult puaasides (P; $N \cdot s/m^2$).

Vesiniksidemete tõttu on vee viskoossus suurem, kui molekulmassi põhjal võiks arvata. Puhta vee viskoossus 25 °C juures on 0,89 cP, mis on märksa suurem kui näiteks metanoolil (0,544 cP) ja palju väiksem kui maisisiirupil (1381 cP). Vahemikus 0–25 °C väheneb vee viskoossus ligikaudu kaks korda. Loodusvete viskoossust mõjutavad peamiselt temperatuur ja soolsus.




**1.17.** Pinnakile moodustumine.

Vee viskoossus on kujundanud voolujoonelise kehakuju aktiivselt liikuvatel organismidel ja kinnitunud organismidel vooluvetes. Vee muutuvale viskoossusele reageerivad mitmed planktonorganismid ujuvuse tagamiseks jätkete pikkuse muutmisega, teistel muutub näiteks limakihi paksus. Selliseid perioodilisi morfoloogilisi muutusi nimetatakse tsüklomorfoosideks (joonis 1.18).

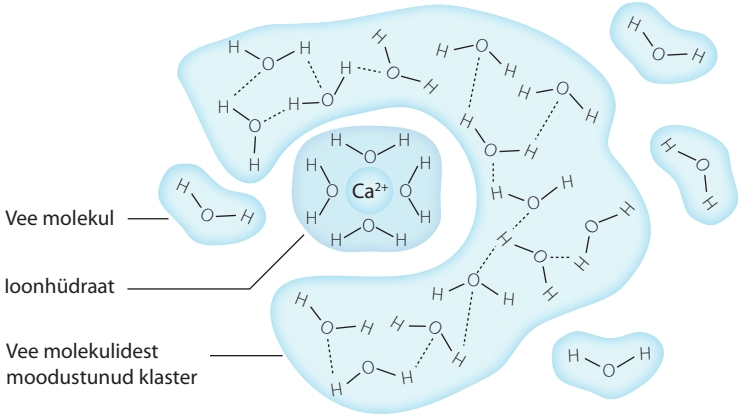



**1.18.** Zooplankterite tsüklomorfoos. Veetemperatuuri tõustes ning tiheduse ja viskoossuse vähenedes osutuvad väljaveninud keha, ogad ja jätked kasulikuks, et plankter suudaks endiselt veesambas hõljuda.

**VESI LAHUSTINA** Vesi on väga hea lahustamisvõimega ning selles lahustub kas või vähesel määral enamik aineid. Tugeva ja universaalse lahustina on vesi oluline reaktsioonikeskkond porsumisprotsessidele ning kõik looduslikud veed kujutavad endast lahuseid (joonis 1.19). Selliseid aineid, mis veega hästi segunevad või temas lahustuvad, nimetatakse **hüdrofiilseteks**, neid, mis ei märgu ega lahustu, aga **hüdrofoobseteks**. Omadustelt asuvad lahused keemiliste ühendite ja mehaaniliste segude vahepeal. Nii on lahuste iseloomulikuks tunnuseks võimalus muuta laiades piirides lahusti ja lahustunud aine vahekorda. Teisalt võib lahustumist vaadelda keemilise ühendi tekkimisena, millega kaasnevad tihti ruumala- ja soojusefektid. Näiteks eraldub etanooli ja vee segunemisel soojus ning saadava lahuse ruumala on väiksem lahusti ja lahustatava aine ruumalade summast.

Mingi aine lahustamine lõhub puhtale veele omase klastrilise struktuuri. Vee ja selles lahustunud aine vastastikmõju sõltub sellest, kas tegu on elektrolüütide või mitteelektrolüütidega. Elektrolüütide hulka kuuluvad happed, alused ja soolad ning nende lahustumisel vees jagunevad molekulid ioonideks. Mitteelektrolüüdid (näiteks etanool) lahustuvad vees molekulidena ja ioone ei moodustu. Tugevad elektrolüüdid (suurem osa sooli ning tugevad happed ja alused) jagunevad lahuses täielikult ioonideks ning molekulidena neid ei esine. Nõrgad elektrolüüdid (nõrgad happed ja alused) on lahustes peamiselt molekulidena ning on ioonideks jagunenud vaid osaliselt. Ka lahustuvad ioonvõrega ained siirduvad lahusesse ioonidena, mis ioonvõres püsivad koos tõmbejõudude mõjul. Lahustumisel pöörduvad vee molekulid lahustuva aine katioonide poole oma negatiivse poolusega ning anioonide poole positiivse poolusega.

**1.19.** Lubjakivide lahustumise ja stalaktiitide moodustumise eelduseks on põhjavee hea lahustamisvõime. Baradla koobas Aggteleki rahvuspargis Ungaris.



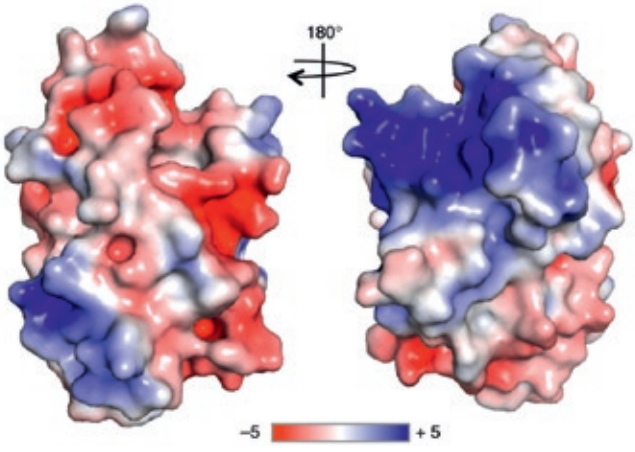

**1.20.** Vette sattunud $Ca^{2+}$-ioonid lõhuvad vee klastrilise struktuuri. Moodustuvad ioonhüdraadid, mis koosnevad ioonist ja seda ümbritsevatest vee molekulidest.

Soojusliikumise tulemusena tõukavad üha uued veemolekulid lahusesse neid molekule, mis on seostunud ioonvõrega. Samal ajal toimub ka ioonvõres olevate ioonide soojusvõnkumine ning nende protsesside summana ioonid eralduvad ioonvõrest. Veemolekulide ja ioonide vahel moodustuvad ioon-dipool-sidemed, mille energia sõltub iooni suurusest ja laengust. Väiksem iooni raadius ja suurem laeng annavad tugevama sideme. Ioonid ümbritsetakse veemolekulide poolt ning moodustuvad sfäärilised **ioonhüdraadid** (joonis 1.20). Neisse koondunud veemolekulid ei käitu enam lahustina ning seostumine kahandab lahuse mahtu võrreldes puhta veega. Lahuses olevast ioonist kaugemale jäävad vee molekulid on omavahel seotud dipool-dipool-sidemega. Soolade lahustumisest tingitud muutused vee viskoossuses tulenevad just lahusti struktuurimuutustest. Enamiku soolade lahustumisel vee viskoossus suureneb, kuid leidub ka erandeid (näiteks KCl ja $CaSO_4$), kus viskoossus struktuuri lagunemise tulemusena väheneb.

Vesi ei lahusta hästi mitte ainult elektrolüüte, vaid ka nõrgalt polaarseid orgaanilisi ühendeid, milles leidub hüdroksüül- ja aminorühmi. Sellised on näiteks suhkrud, alkoholid, aminohapped, amiidid ja orgaanilised alused. Polaarsete molekulide lahustumisele vees aitavad kaasa dipool-dipool-sidemed.

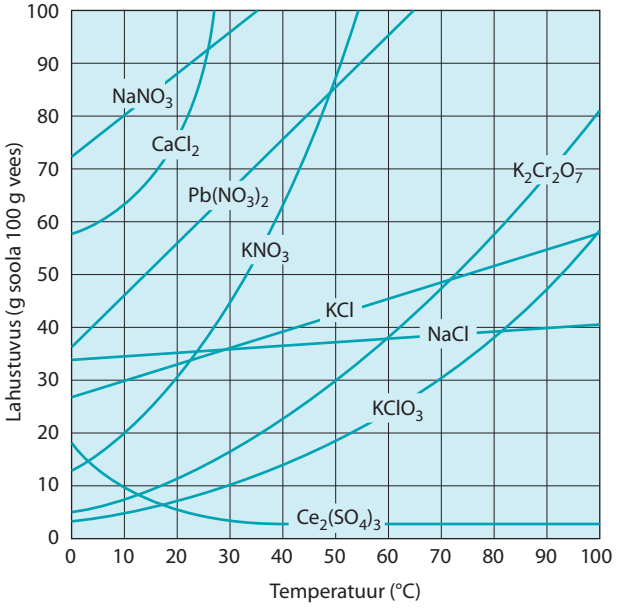
Vees lahustuvad halvasti mittepolaarsed ühendid, nagu õlid, rasvad, süsivesinikud, paljud metallid ja mitmed gaasid. Nende laenguta molekulid ja vee dipoolid tõukuvad teineteise suhtes ning segunevad väga vaevaliselt. Ainult vähesed selliste ainete molekulid on võimelised saavutama veemolekulidega lihtsat füüsikalist tasakaalu. Enamik suuri orgaanilise aine molekule on elektriliselt neutraalsed, kuid see ei tähenda, et neis ei võiks leiduda erineva elektronitihedusega piirkondi tingituna polaarseid sidemeid moodustavate keemiliste elementide aatomite erinevast elektronegatiivsusest (joonis 1.21). Suurtel molekulidel, mille ühes otsas on polaarsed rühmad ja teises mittepolaarsed, võivad käituda pindaktiivsete ainetena.

Lahustumisega kaasnevad tihti ka soojusnähtused. Ioonvõre lagundamine ja molekulide või ioonide eraldumine ioonvõrest ning molekulide dissotsieerumine ioonideks nõuab energia kulutamist (endotermiline protsess). Ioonide hüdratatsioonil seevastu soojus eraldub (eksotermiline protsess). Aine lahustumissoojus on eespool nimetatud protsesside summa. Tahkete kristalsete ainete lahustumisega kaasneb enamasti soojuse neeldumine, sest kristallides olevate sidemete lõhkumiseks kulub energiat. Kui lahustuva aine lõhkumiseks kuluv energia ning vee ja aineosakeste vaheliste side-




**1.21.** Valkude molekulid on suured ja nende pinnal leidub nii polaarseid (joonisel tähistatud sinise ja punasega) kui ka mittepolaarseid piirkondi (valged).

mete moodustumisel eralduv energia on võrdsed, jääb lahuse temperatuur muutumatuks. Hapete ja aluste hüdratatsioonil eraldub rohkem soojust, kui neeldub sidemete lõhkumisel, ning lahuse temperatuur tõuseb. Gaaside lahustumine vees on enamasti eksotermiline, sest sidemed neis on nõrgad või puuduvad sootuks ja nende lõhkumiseks kulub vähe energiat. Le Chatelier' printsiibi kohaselt nihkub temperatuuri tõstmisel tasakaal endotermilise protsessi suunas. Seega suureneb kristalsete ainete lahustuvus temperatuuri tõustes (joonis 1.22). Siiski ei sõltu mõne aine (näiteks NaCl, $AlCl_3$) lahustuvus temperatuurist peaaegu üldse või hoopis väheneb temperatuuri tõustes (näiteks $Ca(OH)_2$). Ka gaaside lahustuvus temperatuuri tõusu korral väheneb, sest veemolekulide kiirus kasvab ja gaasid difundeeruvad lahusest välja.




**1.22.** Mõnede soolade lahustumiskõverad.

**VEE KEEMILISED OMADUSED** Vesi on keemiliselt püsiv ja tema lagunemine lihtaineteks algab väga kõrgel temperatuuril. Näiteks koosneb veeaur temperatuuril 3000 K ligikaudu kolmandiku ulatuses lagunemissaadustest ($H_2$, H, $O_2$, O, OH). Siiski ei tohi vett pidada pelgalt passiivseks keskkonnaks, kus toimuvad keemilised reaktsioonid. Ka vesi ise on keemiliselt aktiivne aine, mis reageerib paljude teistega juba toatemperatuuril. Vee reaktsioonivõimelisus tuleneb hapniku käitumisest tugeva elektrofiilina ja prootonite kaasamisest autoionisatsioonireaktsioonidesse. Vee reaktsioonivõimet vähendab omakorda arvukate vesiniksidemete moodustamine.

- Normaaltingimustes on vesi polaarne vedelik, mis autoionisatsiooni tulemusena annab ioone:

$$2H_2O \leftrightarrow H_3O^+ + OH^-$$

- Amfoteerse ühendina käitub vesi keemilistes reaktsioonides kas happe või alusena. Hape on seejuures käsitatav prootoni ($H^+$) doonorina ja alus selle aktseptorina. Reageerides tugeva happega (näiteks HCl), käitub vesi alusena:

$$HCl + H_2O \leftrightarrow H_3O^+ + Cl^-$$

- Tugeva alusega reageerides käitub vesi seevastu happena. Näiteks reageerimisel ammoniaagiga loovutab vesi $H^+$:

$$NH_3 + H_2O \leftrightarrow NH_4^+ + OH^-$$

- Vesi võib käituda oksüdeerijana:

$$2H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^- + H_2$$

Nõnda toimub näiteks reaktsioon aktiivsete metallidega (K, Na, Ca, Ba):

$$2K + 2H_2O \rightarrow 2KOH + H_2$$

ning nende oksiidide, karbiidide, nitriidide ja fosfiididega. Enamik metallioksiide siiski veega ei reageeri.

Mittemetallioksiidid on suures osas happelised ning valdavalt reageerivad veega, andes vastava happe:

$$SO_2 + H_2O = H_2SO_3$$

Eranditeks on siin $SiO_2$ (liiv) ja neutraalsed oksiidid (CO, NO ja $N_2O$), mis veega ei reageeri.

- Oksüdeerijaks olemise kõrval võib vesi olla ka nõrk redutseerija:

$$4H^+ + O_2 + 4e^- \rightarrow 2H_2O$$

- Vesi käitub enamasti Lewise alusena, sest vee molekul võib loovutada ühe elektronpaari Lewise happele. Selle tulemusena moodustuvad kompleksioonid:

$$Fe^{3+} + 6H_2O \rightarrow Fe(H_2O)_6^{3+}$$

Vee omadus käituda Lewise alusena teeb võimalikuks hüdrolüüsireaktsioonid. Hüdrolüüs on soola ioonide vastastikmõju veega, mille tulemusena tekib nõrk elektrolüüt. Sisuliselt on tegu neutralisatsioonireaktsiooni pöördreaktsiooniga, mille tagajärjel peab tekkima nõrk hape või nõrk alus:

$$CH_3COONa + H_2O \leftrightarrow CH_3COOH + Na^+ + OH^-$$

Vee toimel hüdrolüüsuvad ka estrid ja rasvad ning tekivad happed ja alkoholid. Näiteks:

$$CH_3COOCH_2CH_3 + H_2O =$$
$$= CH_3COOH + CH_3CH_2OH$$

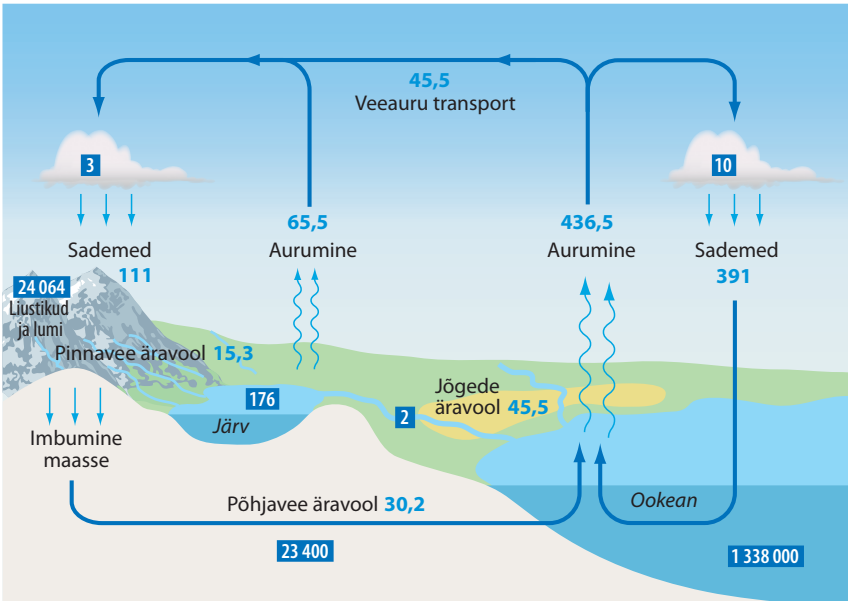
## 1.2.2. Veeringe ja Maa veevarud

**VEERINGE** Vesi Maal on pidevas liikumises planeedi eri osade vahel. **Veeringe** ehk **hüdroloogiline tsükkel** on vee ringlus Maa pindmistes sfäärides (litosfäär, hüdrosfäär ja atmosfäär; joonis 1.23). Vee koguhulk veeringes on jaotunud väga ebaühtlaselt ja toimub pidev vee liikumine ühest ringe osast teise. See on selgelt märgatav loodusvee keemilist koostist muutvate protsesside ebaühtlases paigutuses geosfääride vahel. Üleilmses veeringes võib vesi esineda nii vedelas, tahkes kui ka aurufaasis ning ringe energeetiliseks aluseks on päikeseenergia. Veeringe nähtavad komponendid on sademed ja pindmine äravool. Nähtamatud komponendid, nagu aurumine, maasse imbumine, taimaurumine ehk transpiratsioon, nõrgumine, vaheäravool ja põhjavee äravool, on nähtavatega võrdselt olulised.

**Aurumisel** toimub vee vedela oleku üleminek gaasiliseks. Aurumine kasvab, kui tõuseb vee- ja õhutemperatuur ning suureneb tuule kiirus ja päikesekiirgus. Suur veeauru hulk õhus (suur suhteline õhuniiskus) vähendab aurumist. Päikesekiirguse toimel aurustub pidevalt märkimisväärses koguses vett veekogude, maismaa ja liustike pinnalt ning talletub lühiajaliselt atmosfääris. Ookeanide pinnakihist aurub aastas 436 500 km$^3$ vett, mis on ligikaudu võrdne 1 m paksuse pinnakihiga. Maismaa kohalt on aurumine tunduvalt väiksem – 65 500 km$^3$/a. Veeaur püsib atmosfääris võrdlemisi lühikest aega. Troposfääri tõustes see kondenseerub ning moodustab pilved, mis annavad **sademeid** (vihm, lumi, lörts, rahe). Maapinnale jõudvad sademed võivad aurustuda kõikjalt – maapinnalt, taimede lehtedelt (transpiratsioon) või veekogude pinnalt. Osa kondenseerunud veest aurustub juba enne maapinnale jõudmist. Ookeanide pinnakihist aurunud veest langeb suurem osa sademetena ookeani tagasi – 391 000 km$^3$/a. Maismaal tagastatakse aurunud veest sademetena 111 000 km$^3$/a. Erinevus – 45 500 km$^3$/a – on tingitud sellest, et osa ookeanidest aurunud veest kandub õhuvooludega maismaale. Osa sellest veest salvestub seisuveekogudes ning lume ja liustikujääna, kuid pikemas ajaskaalas säilitab veeringe ikkagi tasakaalu. Sademed on veeringe osa, mida inimene saab reguleerida väga vähesel määral.

**VEERINGE KUJUNEMINE** Veeringe pole Maal toiminud pidevalt. Maa vanus arvatakse olevat ligikaudu 4,54 mld aastat, kuid teadmised esimese poole miljardi aasta kohta on väga napid, sest pole leitud kivimeid, mis oleksid vanemad kui 4 mld aastat. Veekogud on maakeral eksisteerinud oletatavalt 4,4 mld aastat ning hüdrosfäär hakkas kujunema ürgeooni alguses. Temperatuur maapinnal oli sel ajal väga kõrge ja vesi sai olla üksnes atmosfääris. Tuliselt maapinnalt aurustus vesi kiiresti. Ookeanid moodustusid alles pärast temperatuuri langust, kuid olid esialgu täidetud pidevalt keeva veega. Veeringe sai käivituda alles siis, kui ookeanide keemine lõppes. Sajuvesi täitis maapinnal olevad süvendid ja hakkas moodustama vooluvetevõrku ning kujundama seeläbi pinnamoodi.

Siiani on ebaselge hüdrosfääri vee päritolu. Maa tekke ajal ei saanud siin arvestataval hulgal vett olla, sest vesi on universumis vähe levinud molekul ja kerge vedelikuna oleks see kohe aurustunud ning maailmaruumi kandunud. Hüdrosfääris ja veeringes oleva vee „lähtematerjaliks" on pakutud vulkaanilistest gaasidest vabanenud veeauru, Maale langenud veerikkaid komeete või asteroide, maapõues olevaid kivimeid ja atmosfääris toimuvaid fotolüüsiprotsesse. Üldiselt ollakse arvamusel, et enamik Maal leiduvast veest pärineb vett sisaldavatest mineraalidest ning vabanes Maa moodustumisel kivimite sulamise ja jahtumise käigus.




**1.23.** Üleilmne veeringe (× 1000 km$^3$/a) ja veevaru (× 1000 km$^3$).

Sademetena maapinnale jõudev vesi võib aurustumise kõrval ka pinnasesse imbuda või äravooluna ookeanide poole liikuda. Vee valgumist pinnasesse nimetatakse **infiltratsiooniks** ehk maasseimbumiseks ja selle tulemusena moodustub põhjavesi. Igal aastal infiltreerub 2340 km$^3$ vett. Pinnasesse imbuva vee hulk varieerub paikkonniti suurtes piirides, sõltudes pinnase omadustest, näiteks veesisaldusest, lõimisest, orgaanilise aine sisaldusest, veejuhtivusest ja poorsusest. Veejuhtivus on pinnase ja kivimite omadus lasta endast pooride või lõhede kaudu vett läbi. Maasseimbumine ja veejuhtivus on suuremad poorsetel materjalidel, nagu liiv, kruus ja lõhelised kivimid, ning väike näiteks savil. Poorsus ehk urbsus on selliste väikeste tühikute (pooride) olemasolu pinnases või kivimites, mis võivad endas vett hoida. Maasseimbumist mõjutab peale pinnase omaduste ka selle pindmise kihi iseloom. Näiteks takistab tihenenud pinnas vee liikumist sügavamale. Ka taimestikul on infiltratsioonis oluline roll. Metsa- või rohumaapinnasel on suurem infiltratsioonivõime kui näiteks kivisillutisega parklal. Veel mõjutavad maasseimbumist topograafia, maapinna kallakus ja reljeef, samuti inimtegevus linnades ja põllumajanduspiirkondades, kus pinnase omadused on muutunud.

**Äravooluks** nimetatakse vee voolamist mööda maapinda või pinnases. Selle moodustavad pindmine äravool, maasisene ehk vaheäravool ja põhjaveeäravool. Kui sademete hulk ületab pinnase infiltratsioonivõime, täidetakse järk-järgult kõik pinnases olevad tühimikud. Kuna maapinnas liigub vesi aeglaselt, ei jõua pinnasekihid enne uute sademete saabumist kuivaks joosta ning vesi jätkab raskusjõu mõjul liikumist juba pindmise äravooluna või vooluveekogudes. Globaalne aastane pindmine äravool, millega toidetakse pinnaveekogusid, on 45 400 km$^3$.

Veeringes osaleva vedela vee hulk pole Maa ajaloos alati ühesugune olnud. Jahedamatel kliimaperioodidel talletub rohkem vett liustikes ja pooluste jääkilpides ning muud veeringeosad selle võrra vaesuvad. Viimasel jääajal oli näiteks jääliustike all umbes kolmandik maismaast ning ookeanide veetase praegusega võrreldes 120 meetrit madalam. Soojadel kliimaperioodidel on olukord vastupidine: suurem kogus veevarust on vedelal kujul. Ligikaudu kolm miljonit aastat tagasi, kui Maal valitses soojem kliimaperiood, oli ka ookeanide veetase tänapäevasest 50 meetrit kõrgem.

Tabel 1.5. KONTINENTIDE VEEMASS

| Manner | Pindala ($10^6$ km$^2$) | Sademed km$^3$/a | Sademed mm/a | Koguaurumine km$^3$/a | Koguaurumine mm/a | Äravool km$^3$/a | Äravool mm/a |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Euroopa | 10,0 | 6 600 | 657 | 3 800 | 375 | 2 800 | 282 |
| Aasia | 44,1 | 30 700 | 696 | 18 500 | 420 | 12 200 | 276 |
| Aafrika | 29,8 | 20 700 | 695 | 17 300 | 582 | 3 400 | 114 |
| Austraalia | 7,6 | 3 400 | 447 | 3 200 | 420 | 200 | 27 |
| Põhja-Ameerika | 24,1 | 15 600 | 645 | 9 700 | 403 | 5 900 | 242 |
| Lõuna-Ameerika | 17,9 | 28 000 | 1 564 | 16 900 | 946 | 11 100 | 618 |
| Antarktika | 14,1 | 2 400 | 169 | 400 | 28 | 2 000 | 141 |
| Kogu maismaa* | 148,9 | 111 100 | 746 | 71 400 | 480 | 39 700 | 266 |

* Kogu maismaa juurde on arvestatud ka Uus-Meremaa ja selle lähiümbruse saared, mis Austraalia juures ei kajastu.

(Dingmann 2002 järgi)

Tabel 1.4. MAA VEEVARUD

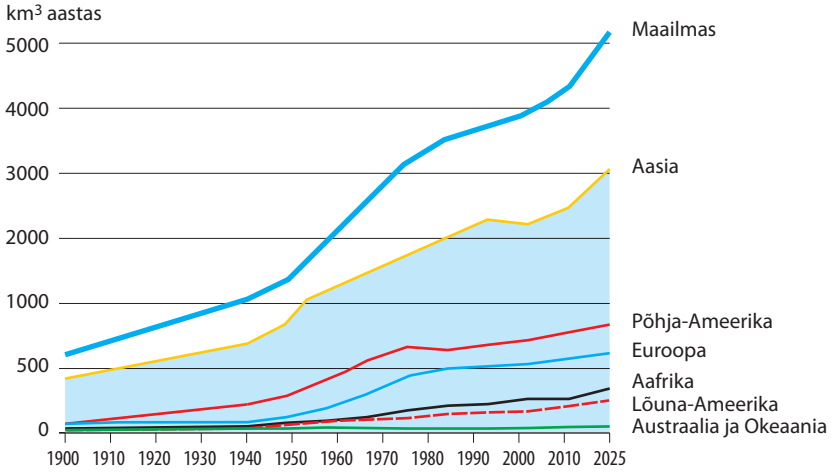
| Veeallikas | Vee hulk (km$^3$) | % mageveest | % kogu veest |
|---|---|---|---|
| Ookeanide, merede ja lahtede vesi | 1 338 000 000 | – | 96,5 |
| Jääkilbid, liustikud ja püsilumi | 24 064 000 | 68,7 | 1,74 |
| Põhjavesi | 23 400 000 | – | 1,7 |
| mage | 10 530 000 | 30,1 | 0,76 |
| soolane | 12 870 000 | – | 0,94 |
| Mullavesi | 16 500 | 0,05 | 0,001 |
| Maasisene jää ja igikelts | 300 000 | 0,86 | 0,022 |
| Järvevesi | 176 400 | – | 0,013 |
| mage | 91 000 | 0,26 | 0,007 |
| soolane | 85 400 | – | 0,006 |
| Atmosfäärivesi | 12 900 | 0,04 | 0,001 |
| Soovesi | 11 470 | 0,03 | 0,0008 |
| Jõevesi | 2 120 | 0,006 | 0,0002 |
| Vesi elusolendites | 1 120 | 0,003 | 0,0001 |
| Kokku | 1 386 000 000 | – | 100 |

(Gleick 1996 järgi)

**MAA VEEVARUD** Planeedi Maa pind on suures osas kaetud veega ning koguveevaru on 1,386 mld km$^3$. Esmapilgul tundub see kogus suur, kuid vesi on laotunud planeedi pinnale üsna õhukese kihina. Kogu hüdrosfääris olevast veest saaks moodustada sfääri, mille läbimõõt oleks ligikaudu 1385 km. Maa enda läbimõõduga (üle 12 700 km) võrreldes on see õige väike. Enamik (96,5%) veest paikneb ookeanides ja meredes ning on „laokaup“, sest veeringes osaleb korraga märksa väiksem veekogus (joonis 1.23). 97,5% veevarust on soolane, jättes mageveele väga väikese osa (tabel 1.4). Ligikaudu 68% mageveest on omakorda talletunud jääs ja liustikes ning 30% paikneb maapõues põhjaveena. Magedat pinnavett on järvedes ja jõgedes veidi üle 93 000 km$^3$. Seega on hüdrosfääris vedelal kujul ohtralt merevett, kuid napib joogi- ja tarbeveena kasutatavat magevett. Inimkonna peamisteks mageveeallikateks on läbi aegade olnud magedad pinnaveekogud ja põhjavesi.

Inimkonna veetarve on pidevalt kasvanud (joonis 1.24), samas halvendab inimtegevus veevarude kvaliteeti. Vee ringlemisel maapinna ja atmosfääri vahel liiguvad ning muunduvad seal looduslike protsesside ja inimtegevuse toimel aineosakesed ja keemilised ühendid. Seetõttu võib magevee kvaliteet ajas ja ruumis muutuda.

Sademete kasutamine mageveeallikana tundub esmapilgul ahvatlev ja odav lahendus, kuid vihmavesi on liiga väikese soolasisaldusega ning vahel happelistest saasteainetest rikutud. Vihmavee kasutamine nõuab selle pidevat kogumist, sest sajud ei pruugi olla perioodilised ning on raskesti ennustatavad.




**1.24.** Üleilmne ja prognoositav veetarbimine alates 20. sajandi algusest.

Põhjaveel on mageveeallikana suur eelis: maapõues paiknemise tõttu on vee keemilised omadused stabiilsed ega muutu märkimisväärselt pikema perioodi jooksul. Põhjavees puuduvad elusorganismid ja vesi ise on pinnaveekogudega võrreldes reostuse eest paremini kaitstud. Samas ohustab põhjavett imbväljakutest ja põllumajandusest lähtuv reostus. Kuna põhjavesi on atmosfäärist isoleeritud, on ta hapnikuvaene ega sobi näiteks koheseks pruukimiseks vesiviljeluses. Sügavamate kihtide põhjavesi võib sisaldada mürgiseid või lämmatavaid gaase ($NH_3$, $CO_2$, $H_2S$ ja $CH_4$) ning olla kasutuskõlbmatu liigse rauasisalduse või kareduse tõttu.

Soolarikast ookeani- ja soolajärvede vett on võimalik magedaks muuta, kuid see on kallis protseduur. Samas on rannikualade vesi saastunud võrdväärselt maismaa pinnaveekogudega. Tiheda laevaliiklusega piirkondades on probleemiks reostumine süsivesinikega. Tehnoloogiliselt takistavateks teguriteks on tihti soolsuse kõikumine, intensiivne pealiskasv seadmetel ning tõusu ja mõõna suur amplituud, mis muudab setted väga liikuvaks.

Mageda pinnavee allikateks võivad olla vooluveed, tiigid, järved ja veehoidlad. Ka sealt tuleb vee ammutamiseks seda pumbata, kuid põhjaveega võrreldes on see tunduvalt lihtsam ja odavam. Pinnavee pruukimise peamiseks probleemiks on aga selle sage saastumine. Pinnaveekogudes on tihti rohkelt heljumit, toiteaineid, pestitsiide, haigustekitajaid ja teisi ebasoovitavaid organisme. Samuti on pinnavesi sesoonselt väga muutuva kvaliteediga.

## KÜSIMUSED JA PROBLEEMÜLESANDED

1. Kellele kuuluvad tegelikult Maa mageveevarud?
2. Kuidas võiksid olla omavahel seotud magevee kvaliteedi tagamine ja majanduslik tulu?
3. Kui palju energiat kulub 20 000 kg puhta vee temperatuuri tõstmiseks 5 °C-lt 10 °C-ni?
4. Kuidas on biosfääris toimuv transpiratsioon seotud veeringega, eriti just taimestikurikastes piirkondades?
5. Kuidas on vee erilisi omadusi võimalik seletada veemolekuli ehitusest lähtudes?

## MÕISTED JA MÄRKSÕNAD

hüdroloogia
limnoloogia
potamoloogia
vesinik
hapnik
isotoobid
vesinikside
klastrid
erisoojus
pindpinevus
detergendid e pindaktiivsed ained
viskoossus e sisehõõrdumine
hüdrofiilsus
hüdrofoobsus
veeringe e hüdroloogiline tsükkel
aurumine
sademed
infiltratsioon
äravool

# 1.3. Maailma ja Eesti siseveekogud

## 1.3.1. Siseveekogud

Veekogud on maapinnanõgudes või maakoore pindmistes tühemikes olevad vee kogumid. Paiknemise järgi mandrite suhtes jaotatakse veekogud **maailmamereks** ja **siseveekogudeks**. Viimased on maailmamerega ühendatud ainult vooluvete kaudu.

Eristatakse ka **veekogumeid** – nii nimetatakse selgelt piiritletavaid ja olulisi osi mingist veekogust, nagu järv, veehoidla või jõgi. Veekogumeid on vaja eristada selleks, et teha kindlaks ja pidevalt jälgida veekogu seisundit selle kõigis võimalikes osades, mis võivad üksteisest erineda kas looduslike tingimuste või inimtegevuse tõttu.

**1.25.** Voolu- ja seisuveekogud Sareki rahvuspargis Rootsis Lapimaal.

■ **SISEVEEKOGUDE JAOTUS** Siseveekogud on võrdlemisi eripalgelised. Nad erinevad üksteisest pindala, sügavuse, vee liikumiskiiruse, keemilise koostise ja paljude muude näitajate poolest, moodustades nõnda erinevaid elupaiku ehk **biotoope**. Siseveekogusid saab liigitada mitmel viisil.

- Paiknemise järgi maapinna suhtes eristatakse **pinnaveekogusid** ja **maa-aluseid** veekogusid. Viimaste hulka kuuluvad näiteks koopaveekogud ning maaalused jõed ja järved.
- Veevoolu olemasolu või kiiruse põhjal jaotatakse kõik siseveekogud **voolu-** ehk **lootilisteks** veekogudeks ja **seisu-** ehk **lentilisteks** veekogudeks (joonis 1.25).
- Tekkeviisi järgi jaotatakse veekogud **looduslikeks** – näiteks järved, jõed ja allikad – ning **tehislikeks** ehk inimtekkelisteks, nagu veehoidlad, tiigid ja kraavid.

  Ka veekogumid jaotuvad looduslikeks, tugevasti muudetud ja tehisveekogumiteks. Tugevasti muudetud on selline veekogu või tema osa, mis on inimtegevusest põhjustatud füüsiliste muutuste tagajärjel oluliselt muutunud.
- Püsivuse või vee olemasolu põhjal võib veekogud jaotada **alalisteks** ehk permanentseteks ning **ajutisteks** ehk temporaarseteks (järvikud, lombid, kuivenduskraavid jne).

**Vooluveekogu** on mööda kitsast maapinna süvendit kulgev pidevalt vahetuva ja enamasti mageda veega looduslik või tehislik veekogu. Vooluveekogude vesi on ülejääk aurumisest ja maasseimbumisest ning voolab mööda maapinda maailmamerre (**eksoreilised jõed**). Osa vooluveekogusid sumbub kõrbetes soolajärvedesse või soodesse (**endoreilised jõed**). Mõned vooluveekogud on ajutised, jäädes kuival aastaajal veeta, või voolavad inimsilma eest varjatult täielikult või osaliselt maa all.

Looduslikke vooluveekogusid nimetatakse **jõgedeks** või **ojadeks**. Peajõgi koos temasse suubuvate lisajõgedega moodustab **jõestiku** (vt ka lk 194). Piir oja ja jõe vahel on väga tinglik. Inimtekkelisi vooluveekogusid nimetatakse enamasti kraavideks või kanaliteks.

**Seisuveekogud** on siseveekogud, milles vesi nähtavalt ei voola ja veevahetus on aeglane. Tuntuimad seisuveekogud on järved, kuid eristatakse veel tiike, laukaid, basseine ja muid väiksemaid seisuveekogusid.

**Järv** on suhteliselt suur seisva veega siseveekogu. Enamasti on looduslike järvede pindala alampiiriks seatud 1 ha ja sellest väiksemate veekogude puhul räägitakse lompidest või järvikutest. Need on sageli taimestikurohked ja madalad, omanäolise elustikuga veekogud, millest arengu käigus kujunevad sood. Rannikul kannavad järvikud laiside, viikide ja lahtede nimetust. Karstialadel olevad järvikud on enamasti ajutise iseloomuga

**1.26.** Piisupi järves on vett enamasti vaid kevadel.

**1.27.** Põhja-Ameerikas paiknev Suur järvistu on maailma suurim järvistu.

**1.28.** Kurtna järvestiku moodustavad 42 eriilmelist järve. Tegu on Eesti tihedaima järvealaga.

ja täidetud veega vaid suurvee ajal (joonis 1.26). Rabades leiduvaid järvikuid kutsutakse **laugasteks**. Need pruuniveelised sooveekogud tekivad siis, kui pinnavee äravool peatub. Laukad moodustavad tihti suure veepeegli pindalaga kogumikke – **laugastikke**.

Järved, mis on üksteisega seotud või paiknevad ühtses hüdroloogilises süsteemis, moodustavad **järvistu**. Tuntuim järvistu maailmas on viiest järvest koosnev Suur järvistu, kus on talletunud viiendik maakera magedast pinnaveest (joonis 1.27).

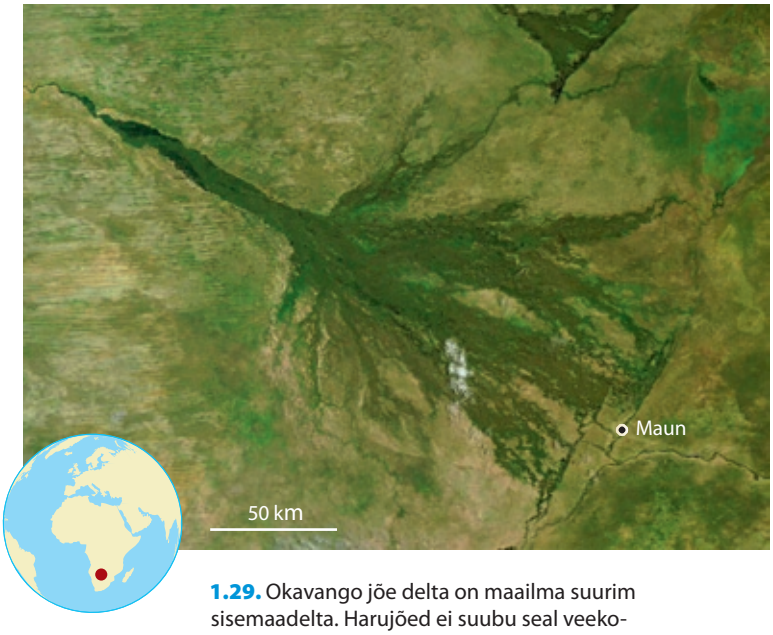
Üksteise lähedal paiknevad järved, mis ei pruugi omavahel seotud olla, moodustavad **järvestiku**. Eesti järvederohkeim piirkond on Kurtna järvestik enam kui 40 järvega Kirde-Eestis (joonis 1.28). Inimtekkelisi seisuveekogusid nimetatakse tehisjärvedeks, basseinideks või tiikideks.

**Märgalad** on alaliselt (sood, madalad järved) või ajutiselt (üleujutatavad piirkonnad) liigniisked alad, vahepealsed elupaigatüübid mitmesuguste sügavaveeliste ja kuivade maismaaelupaikade vahel.

Märgala mõistel on olenevalt piirkonna looduse eripäradest ja kirjeldamise traditsioonidest mitu tähendust. Eesti keeles võeti see mõiste kasutusele 1970. aastatel seoses rahvusvahelise märgalade kaitset reguleeriva Ramsari konventsiooni sõlmimisega, et leppe objekt oleks kõigile pooltele üheselt mõistetav. Konventsiooni järgi jaotatakse märgalad kolme rühma: **rannikumärgalad** (rannikulõukad, deltamärgalad jms), **magevete märgalad** (järved, jõed, ajutiselt üleujutatud alad jms) ning **inimtekkelised märgalad** (veehoidlad, karjäärid, kanalid jms).

## 1.3.2. Siseveekogude arv ja paiknemine

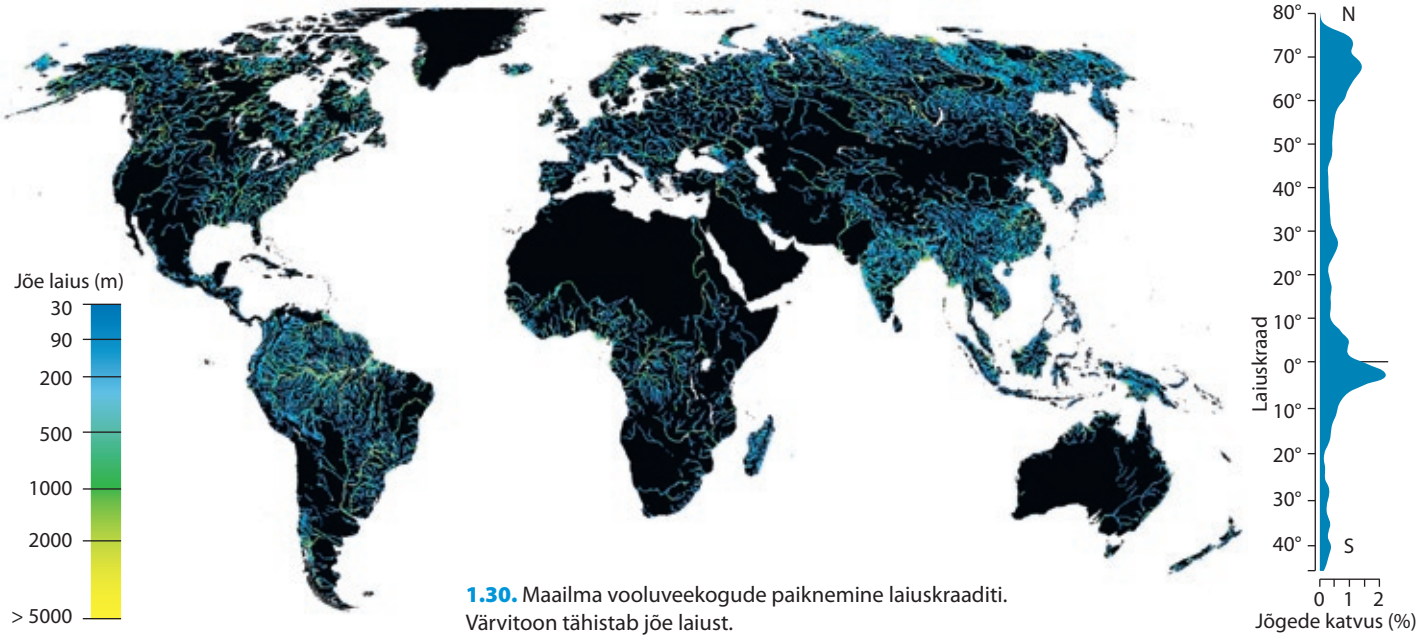
Siseveekogud on veeringe lahutamatu osa. Nad on vahetult seotud atmosfääris leiduva vee, pinnavee ja põhjaveega ning mõjutatud tugevalt piirkondlikest geomorfoloogilistest ja klimaatilistest iseärasustest. Kliima mõjutab vee kulgemist veeringes ja siseveekogusid aurumise ja sademete kaudu (vt tabel 1.5, lk 33). Nende mõjutegurite tõttu on siseveekogude jaotus väga ebaühtlane ja laialdastel aladel puuduvad need sootuks. Siseveekogude arvu ja paiknemistihedust on püütud hinnata juba pikemat aega ning tänapäeval toimuvad selles vallas aktiivsed teaduslikud uuringud. Sage hinnangute muutumine on tingitud üha uute ja täpsemate meetodite kasutuselevõtust (näiteks satelliitmõõtmistel põhinev kaugseire). Jõed, järved ja märgalad on palju laiema levikuga ning mõjutavad üleilmseid aineringeid märksa ulatuslikumalt, kui seni arvatud.




**1.29.** Okavango jõe delta on maailma suurim sisemaadelta. Harujõed ei suubu seal veekogusse, vaid aurustuvad või kaovad kõrbeliiva.

**VOOLUVEEKOGUD** Vooluveekogude täpne arv maailmas on teadmata, sest puudub ühtne suurusmääratlus, millest alates kuulub voolusäng koos veega vooluveekogude hulka. Lisaks on vaja otsustada, kas arvesse lähevad kõikvõimalikud voolusängid või ainult need jõestikud, mille peajõgi suubub merre või hääbub kõrbes (joonis 1.29). Isegi nende arv on tõenäoliselt väga suur. Seepärast ei hinnata tihti vooluveekogude arvu, vaid piirdutakse nende hõlmatava pindala leidmisega. Viimastel andmetel võtavad vooluveekogud keskmise vooluhulga juures enda alla 773 000 km$^2$ ehk 0,5% jääga katmata maismaa pinnast (joonis 1.30). Palju leidub vooluveekogusid sajurohketes piirkondades: parasvöötmes ja ekvaatori ümbruses. Kõrbetes on vooluveekogusid vähe ning enamik neist on ajutised. Niiskemas kliimas kipuvad ajutised olema peamiselt väikesed vooluveekogud ning suuremate ülemjooksud. Erandiks on siin peamiselt allikatest toituvad vooluveekogud.

Eestis on August Loopmanni (1979) järgi 7308 vooluveekogu kogupikkusega 31 019 km. Enamik Eesti vooluveekogusid (94,3% üldarvust) on väga väikesed, alla 10 km pikkused ojad ja kraavid, mis moodustavad voolu-vete mikrovõrgu. Selle kogupikkus on Loopmanni järgi 21 081 km (68,0% vooluveekogude kogupikkusest).



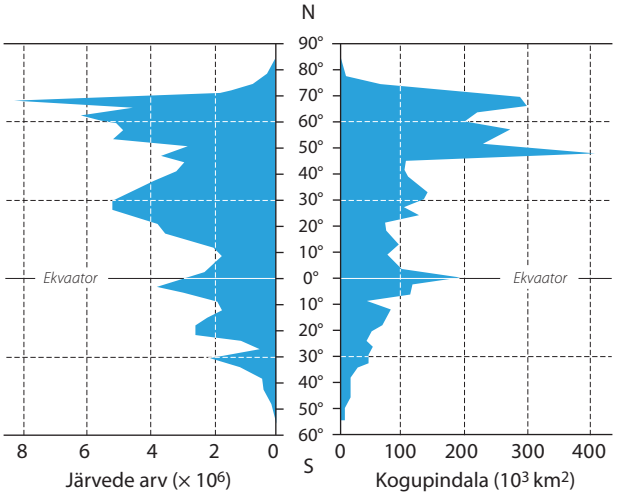

**1.30.** Maailma vooluveekogude paiknemine laiuskraaditi. Värvitoon tähistab jõe laiust.

**JÄRVED** Satelliitmõõdistamiste põhjal on ühest hektarist suuremate seisuveekogude arvuks hinnatud ligikaudu 27 miljonit. Kokku katavad järved (Kaspia merd arvestamata) maakera pinnast $4{,}76 \cdot 10^6$ km$^2$ ehk vaid 3,5%. Kui aga võtta arvesse kõik seisuveekogud, mille pindala ületab 0,18 ha, siis on nende koguarv umbes 117 miljonit. Samas on järvede jaotus maailmas väga ebaühtlane. Suurem osa neist paikneb põhjapoolkera parasvöötmes ja subarktilises vöötmes (joonis 1.31). Et maakera pind pole tasane, võivad järved asetseda väga erineval kõrgusel merepinnast. Kõige kõrgemal (6390 m) paiknev seisuveekogu on Andide mäestikus Ojos del Salado vulkaani jalamil asuv u 100 m läbimõõduga järveke. Kõrgeimal (3812 m) paiknev laevatav järv on Titicaca Boliivia ja Peruu piiril. Kõige madalamal paikneb Surnumeri – 430,5 m allpool merepinda.

Euroopas arvatakse olevat ligikaudu 500 000 looduslikku järve pindalaga rohkem kui 1 ha ja kaugelt üle 10 000 sama suure tehisjärve. Suurem osa looduslikke järvi paikneb Norras, Rootsis ja Soomes.

Soomes on üle 500 m$^2$ pindalaga seisuveekogude arvuks pakutud 187 888 ja nad katavad rohkem kui 10% riigi territooriumist, kuid neist vaid 56 000 on suuremad kui 1 ha. Rootsis on suuremate kui 8100 m$^2$ seisuvete arv 95 700 ning Norras suuremate kui 2500 m$^2$ seisuvete arv 243 000.

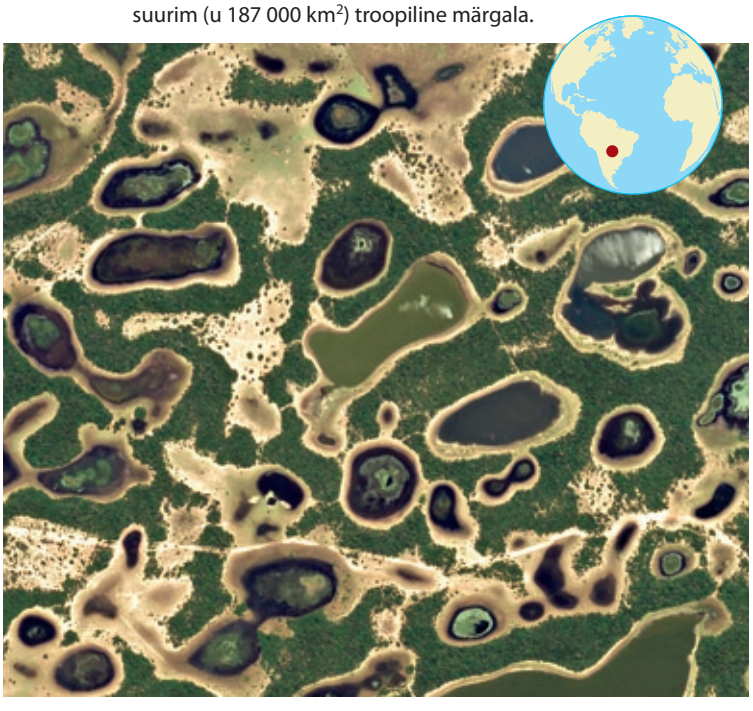
Rohkelt leidub järvi veel Iirimaal, Islandil ja Šotimaal. Looduslike siseveekogude poolest on vaesed Hispaania, Portugal ja Prantsusmaa, kuid neis riikides on rajatud arvukalt tehisveekogusid. Peale Soome on ka teistel Eesti lähinaabritel ohtralt järvesid. Lätis katavad järved näiteks 1,7% territooriumist ja nende arv on võrreldav Eesti omaga – 2256. Leningradi oblastis on järvi ligikaudu 1800, kuid tänu väga suurtele järvedele (Laadoga ja Äänisjärv) on nendega kaetud koguni 14% territooriumist.




**1.31.** Järvede arv ja pindala laiuskraaditi.

Eestis oli keskkonnaregistri andmetel 2017. aastal 1534 looduslikku ja 483 tehisjärve, kokku seega 2017. Arvestatud ei ole paisjärvi, mis on jõgede osad. Looduslikud järved ja tehisveekogud hõlmavad 2139 km$^2$ ehk 4,73% territooriumist, millest 281 km$^2$ on väikejärvede all. Samas pole järved Eesti territooriumil kuigi ühtlaselt levinud. Palju on neid Lõuna-Eesti kõrgustikel ning tihedalt on väikeste veesilmadega kaetud läänerannik ja saared. Seevastu suured alad Kesk- ja Lääne-Eestis on peaaegu ilma looduslike järvedeta. Enamikku järvedest on käesolevaks ajaks suuremal või vähemal määral mõjutanud inimtegevus, mis on jätnud oma jälje nende ökosüsteemi ja selle talitlemisse.

**1.32.** Lõuna-Ameerikas asuv Pantanal on maailma suurim (u 187 000 km$^2$) troopiline märgala.



**MÄRGALAD** Ka märgalade arvu ja pindala leidmine on keerukas nende laialivalguva määratluse tõttu. Suuruse järgi võivad märgalad varieeruda paariruutmeetristest märgadest lohkudest kümnete tuhandete ruutkilomeetrite suuruste aladeni Lääne-Siberi madalikul või Pantanalis (joonis 1.32). Märgalad hõlmavad ligikaudu 8,6 mln km$^2$, mis moodustab 6,4% maismaa pinnast. Pisut vähem kui poole neist moodustavad sellised turbaalad, kus ladestunud orgaanilise aine paksus on vähemalt 30 cm. Ligikaudu 2% märgaladest paikneb polaaraladel, 30% boreaalses vöötmes, 25% subtroopikas ja 31% troopikas.

Eesti on märgalade poolest silmatorkavalt rikas maa, kus nendega on kaetud ligi kolmandik pindalast. Peale soode on märgaladena olulise tähtsusega rannikumeri, rannaniidud ja -roostikud ning rannikujärved ja siseveekogud (jõed, järved ja veehoidlad) koos lamminiitudega.

### 1.3.3. Vooluveekogude tekke-viisid ja veerežiim

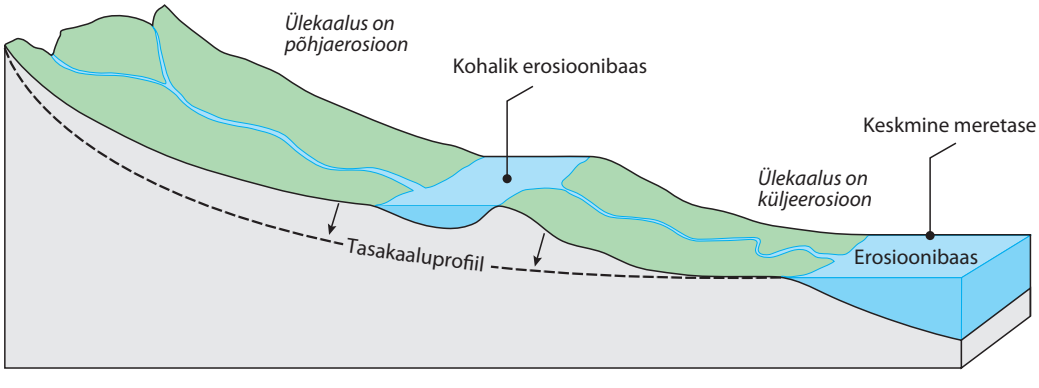
**VOOLUVEEKOGUDE KUJUNEMINE** Vooluveekogude kujunemine on osa veeringest. Olenevalt sellest, millist päritolu on vesi, millest vool koosneb, võib vooluveekogud jagada liustiku-, lume-, vihma- ja põhjaveetoitelisteks. Näiteks Eesti vooluvetes on kolm viimast toitumisviisi enam-vähem võrdselt esindatud. Maapinnale jõudev vesi ühineb väikesteks niredeks, need omakorda ojadeks ja siis edasi jõgedeks. Vesi liigub gravitatsioonijõu mõjul allamäge, sest ta molekulid on omavahel väga nõrgalt seotud. Liikumise käigus omandab vesi piisavalt kineetilist energiat, et olla võimeline endaga kaasa haarama mitmesugust settematerjali (erosioon), seda transportima ning selle käigus maapinda kujundama. Tähelepanuväärne on, et ligi 95% sellest kineetilisest energiast hajub tegelikult turbulentsi ja soojusvahetuse tõttu, kuid ka allesjääv napp 5% on igati piisav erosiooniks ja setete transpordiks.

Maapinnal võib vesi voolata laminaarselt või turbulentselt. Neist esimene on võimalik ainult siis, kui vee voolukiirus on väike ja veekiht õhuke. Laminaarset voolamist saadab vaid mõõdukas pindalaline erosioon, mille intensiivsust reguleerivad taimestik ja reljeef ning mõju on oluline vaid aladel, kus puudub pindmist mullakihti siduv taimkate. Enamik maapinnal voolavast veest liigub turbulentselt ja voolamine toimub suunatult, järgides olemasolevaid või ajutisi vooluteid ehk **voolusänge**. Nende mõõtmed varieeruvad mõnemillimeetristest maapinnauuretest Amazonase-taoliste hiiglaslike jõesüsteemideni.

Vesi on oluline Maa reljeefi tasandaja. See väljendub paljude protsesside kogumis, mida kutsutakse **kulutuseks** ehk **denudatsiooniks**. Voolusängi kulutus toimub kahel viisil: **põhjaerosiooni** ja **küljeerosioonina**. Esimene neist süvendab, teine aga laiendab voolusängi. Nende kulutusviiside vahekord pole püsiv, vaid muutub vooluveekogu arengu käigus koos pikiprofiili muutumisega (joonis 1.33). Noorte jõgede voolusängis ja jõgede ülemjooksul on ülekaalus põhjaerosioon. Pärast jõe pikiprofiili tasandumist ning kesk- ja alamjooksu kujunemist kasvab küljeerosiooni osakaal ning jõeorg laieneb.

Põhja- ja küljeerosiooni vahekorra määrab voolusängi **erosioonibaas**, s.t selle veekogu (mere, järve) tase, kuhu vooluveekogu suubub. Iga vooluveekogu saab oma sängi kulutada erosioonibaasi kõrguseni. Seejuures ei pea erosioonibaasiks olema tingimata maailmameri: vooluveekogu pikiprofiilil võib eristada globaalseid ja kohalikke erosioonibaase. Näiteks Jordani jõe globaalseks erosioonibaasiks on Surnumeri, mis paikneb 422 m allpool merepinda. Kohalikeks erosioonibaasideks võivad olla järved, veehoidlad ja jugade astangud.

Püsiva erosioonibaasi suhtes kujuneb voolusängil välja **tasakaaluprofiil** ehk tasakaaluline pikiprofiil, kus voolusängi erosioon ja setete akumulatsioon on tasakaalus (joonis 1.33). Põhimõtteliselt erodeeritakse tasakaaluprofiili igas punktis täpselt sama palju setteid, kui neid selles punktis settib või sealt läbi transporditakse. Erosioonibaasi muutudes püüdleb vooluveekogu uutele tingimustele vastava tasakaaluprofiili saavutamise poole. Kui maailmamere veetaseme languse tõttu langeb mingi vooluveekogu erosioonibaas, siis suureneb voolusängi põhjaerosioon, kuni saavutatakse uus tasakaaluprofiil. Veetaseme tõusu korral üritab aga vooluveekogu sängi täita kuni tasakaaluprofiili kujunemiseni. Kuigi kõik vooluveekogud püüdlevad tasakaaluprofiili poole, jääb see maapinna pideva ümberkujunemise tõttu praktikas saavutamata. Tasakaaluprofiilile on kõige lähemal alamjooksud; ülemjooksu suunas erinevus sellest kasvab.




**1.33.** Vooluveekogude pikiprofiil: erosioonibaasid ja tasakaaluprofiil.

**VOOLUVEEKOGU ISELOOMUSTAMINE** Äravoolu kirjeldamisel pruugitakse mitmesuguseid mõisteid. Enamikul veekogudel on **veelahkmega** piiratud ala, millest veekogu või selle osa toitub ja mida nimetatakse **valg(a)laks** (joonis 1.34). Jõgede valgala nimetatakse **jõgikonnaks**. Suuremad veelahkmealad jaotavad territooriumi **vesikondadeks**. Vesikonnad saavad enamasti oma nime veekogult, kuhu selle ala vooluveed lõpuks jõuavad. Valgala peamised füüsikalised omadused on pindala, kuju, absoluutne kõrgus, nõlvade ja orgude langus, geograafiline orientatsioon, pinnakatte tüüp, voolusängide süsteem, veemahutavus ja taimkate.

Enamik alalisi vooluveekogusid paikneb piirkondades, kus esineb rohkelt sademeid. Kuivemates kliimavöötmetes leidub suurel arvul ajutisi vooluveekogusid. Vooluhulk ehk voolusängi ajaühikus läbiva vee hulk on heas seoses valgala suurusega. Valgala iseloomustamiseks kasutatakse veel kahte mõistet. **Äravool** ehk **äravoolumaht** on ajaühikus valglalt veekogusse voolanud vee hulk. Seejuures võib äravool toimuda nii mööda maapinda (pindmine äravool) kui ka mööda vettkandvaid pinnasekihte (maasisene äravool). Hüdroloogiliselt suur valgala on ühtlasi ka suure veemahutavusega; seal toimub äravoolu puhverdamine ning selline valgla pole kuigi tundlik sademete ja maakasutuse muutuste suhtes. Väike valgala on väikese veemahutavusega ja äravool reageerib sademetele kiiresti. **Äravoolumoodul** on ajaühikus valgla pinnaühikult veekogusse voolanud vee hulk ehk vooluhulga ja valgala pindala suhe, mida kasutatakse eri valglate võrdlemisel. Äravoolumoodulil on üldjuhul olemas ligikaudne ülempiir. Ariidse ehk kuiva kliimaga aladel on äravoolumoodul väiksema väärtusega kui niiske kliimaga piirkondades. Erinevus valgala suuruse ja äravoolumooduli vahelistes seostes võib olla kuni sajakordne. Suurtel jõgedel on üldjuhul ka suur valgala, kust saab koguda rohkelt sademeid. Samas ei pruugi vooluhulk ja jõe pikkus omavahel seotud olla. Näiteks maailma pikkuselt teine jõgi Niilus (6650 km) on oma vooluhulgalt alles 36. kohal, sest jõgi kulgeb alamjooksul pikalt läbi kõrbete, kus pole sademeid ega lisajõgesid.

Vooluveekogude suuruse hindamisel ei saa kasutada seisuveekogude kirjeldamisel kasutatavaid näitajaid. Veekogu (veepeegli) pindala pruukimine poleks mõistlik, sest vooluveekogude sängid on üldjuhul kitsad ja keerulise kujuga. Ka sügavus – seisuveekogudele väga omane tunnus – pole vooluveekogude puhul kuigi oluline, sest keskmine sügavus on seisuveekogude omast enamasti väiksem ja hea segunemise tõttu jõuab lahustunud hapnik kõikjale. Teadaolevalt sügavaim jõgi maailmas on Kongo jõgi (220 m), millele järgneb Jangtse 200 meetriga. Eesti sügavaimad jõed on ühtlasi ka suurimad – Narva (16 m) ja Emajõgi (12 m).

Harilikult iseloomustatakse vooluveekogu suurust voolusängi pikkuse ja laiusega, vooluhulga, valgala suuruse ja suubumisjärguga. Kõik need näitajad on omavahel tugevas seoses. Pikemal ja laiemal jõel on üldjuhul ka suurem valgala ja voolusängi ristlõikest voolab ajaühikus läbi suurem veekogus. Pikkuse eelis teiste näitajate ees on selle lihtne hindamine kaardimaterjali põhjal. Vooluhulka samal viisil leida pole võimalik. Vooluveekogu **pikkus** on distants lähtest suudmeni piki voolusängi. Lähteks peetakse kohta, kus vee hulk on piisav voolusängi uuristamiseks, kuid vahel on lähteks ka koht, kus vesi jõuab maapinnale allikana. Viimasel juhul alahinnatakse vooluveekogu pikkust, sest maa-alune osa jääb arvestamata. Pikkuse hindamisel võib tekkida probleeme juhul, kui vesi voolab vahepeal maa all või läbib mingit seisuveekogu. Sellistel puhkudel kiputakse vahel maapealseid osi pidama eri vooluveekogudeks või saab järvest lähtuv vooluveekogu hoopis uue nime ning pikkuse arvestust alustatakse uuesti.

Maailma pikimad jõed on Amazonas ja Niilus (tabel 1.6). Euroopa pikim jõgi Volga (3692 km) esikümne hulka ei mahu. Eesti jõed on teatmeteoste järgi üsna lühikesed, pikim neist on Võhandu jõgi (163 km). Kui aga arvestada Narva ja Emajõe puhul ka nende lähtejõgesid, saaksime pikkuseks vastavalt ligikaudu 650 km ja 230 km.

Sageli kasutatakse jõe iseloomustamiseks voolusängi **laiust**, kuid kogu jõe kirjeldamiseks see näitaja hästi ei sobi. Esiteks võivad nii laius kui ka sügavus voolusängi eri lõikudes tugevasti varieeruda. Sängi laius sõltub oluliselt aastaajati muutuvast veetasemest. Maailma pikim jõgi Amazonas on ühtlasi suurima laiusega (suudme

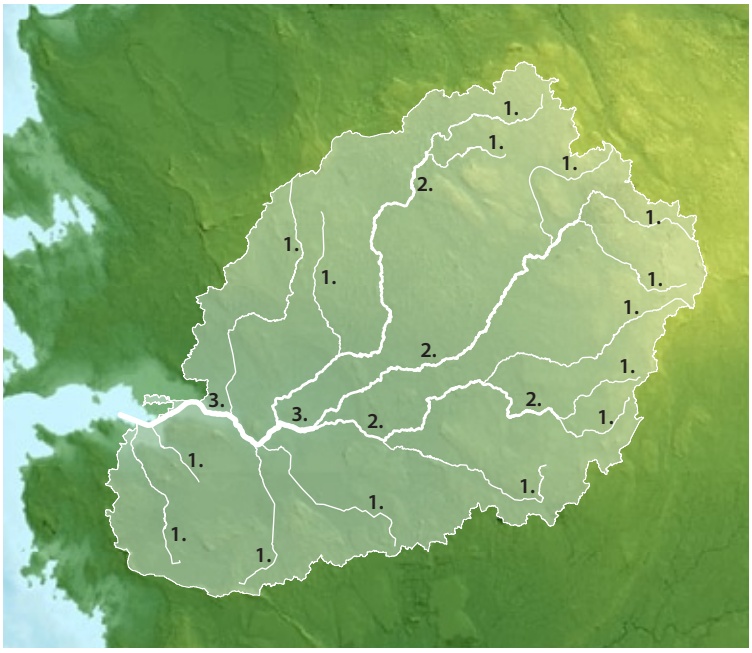
Tabel 1.6. KÜMME MAAILMA PIKIMAT JÕGE

| Jõgi | Pikkus (km) | Valgala ($km^2$) | Keskmine vooluhulk ($m^3/s$) | Suue | Manner |
|---|---|---|---|---|---|
| Amazonas* | 6 992 | 7 050 000 | 209 000 | Atlandi ookean | Lõuna-Ameerika |
| Niilus* | 6 650 | 3 400 000 | 2 830 | Vahemeri | Aafrika |
| Jangtse | 6 300 | 1 800 000 | 31 900 | Ida-Hiina meri | Aasia |
| Mississippi | 6 275 | 2 980 000 | 16 200 | Mehhiko laht | Põhja-Ameerika |
| Jenissei | 5 539 | 2 580 000 | 19 600 | Kara meri | Aasia |
| Huang He | 5 464 | 745 000 | 2 110 | Bo Hai laht | Aasia |
| Ob | 5 410 | 2 990 000 | 12 800 | Obi laht | Aasia |
| Paraná | 4 880 | 2 582 672 | 18 000 | La Plata laht | Lõuna-Ameerika |
| Kongo | 4 700 | 3 680 000 | 41 800 | Atlandi ookean | Aafrika |
| Amuur | 4 444 | 1 855 000 | 11 400 | Ohhoota meri | Aasia |

* Kuigi pikka aega on maailma pikimaks jõeks peetud Niilust, pole viimastel aastakümnetel Niiluse ja Amazonase pikkuse suhtes kindlale kokkuleppele jõutud.

lähedal 180 km). Selline laius ületab enamiku maailma, sealhulgas Eesti vooluvete pikkust. Kõige väiksemad vooluveed on sageli kitsamad kui 1 m.

Voolusängi iseloomustamiseks võib selle jagada ka suubumisjärkudeks. Enamasti kasutatakse vooluveekogude järgutamisel Strahleri klassifikatsiooni (joonis 1.34). Selle kohaselt paigutuvad esimesse järku kõige väiksemad vooluveekogud. Teist järku veekogud saavad alguse siis, kui ühinevad kaks 1. järku jõge või oja. 3. järk tekib kahe 2. järku veekogu liitumisel. Vooluveekogude järgud jäävad vahemikku 1–12, kusjuures maksimaalse väärtusega on Amazonase jõgi. 80% planeedi vooluveekogudest on vaid 1.–3. järku.



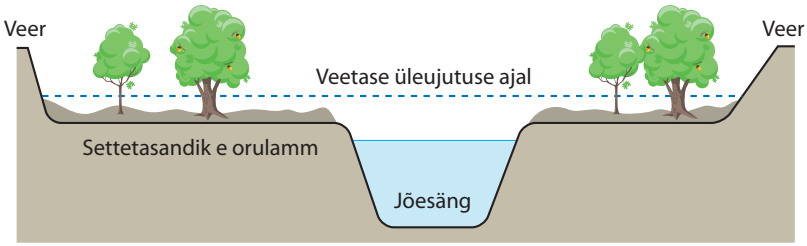

**1.34.** Jõe valgla ja jõelõikude järgutamine Strahleri klassifikatsiooni järgi.

## 1.3.4. Vooluveekogude geomorfoloogia

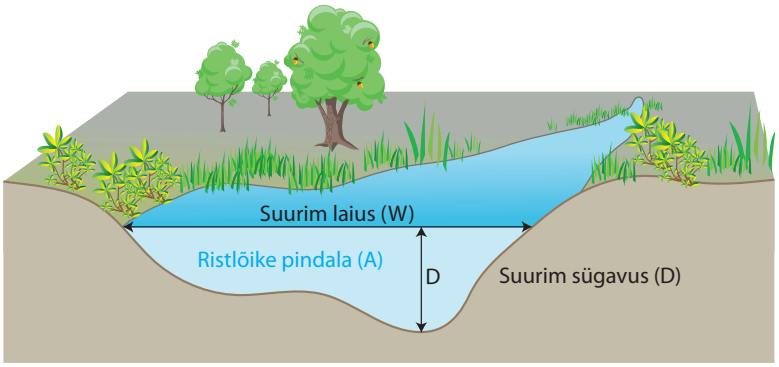
■ JÕEORG JA SELLE ELEMENDID **Jõeorg** on pikk ja suhteliselt kitsas negatiivne pinnavorm, mida kahest küljest piiravad veerud ja mille põhi on suudme poole kaldu. Jõeoru on kujundanud voolava vee uuristav toime. Selle ehituses eristatakse oru põhja, mille moodustavad harilikult jõesäng ja suurveeajal üleujutatav lamm, samuti pervi, veere ja terrasse (joonis 1.35). Eriti suurte mõõtmetega on jõeorud seal, kus maapind kerkib või on meretasemest palju kõrgemal. Tiibetis võib näiteks jõeorgude sügavus ületada 4 km ning Andides ja Kaukasuses leidub rohkem kui 1 km sügavusi orge.

**Jõesäng** ehk **voolusäng** on jõeoru sügavaim osa, milles voolab vesi. Jõesängi **veere** ehk külgi nimetatakse ka jõe kallasteks. Oluline on teha vahet parema ja vasaku kalda vahel: allavoolu vaadates jääb vasak kallas vasakule ja parem kallas paremale. Jõesängi iseloomustatakse **rist-** ja **pikiprofiiliga**, millest sõltub ajaühikus voolusängi ristlõiget läbiva vee hulk ja voolukiirus.

Voolusängi ristprofiilist sõltub peamiselt veevoolu keskmine kiirus. Morfomeetriliselt on ristprofiil võrdlemisi lihtne ja väheste parameetritega (joonis 1.36). Kui võrrelda erinevaid voolusänge, siis ühesuguse ristlõikepindala juures voolab vesi kõige kiiremini poolsfäärilises kanalis, sest kokkupuutepind vee ja kanali seinte




**1.35.** Jõeoru peamised elemendid.



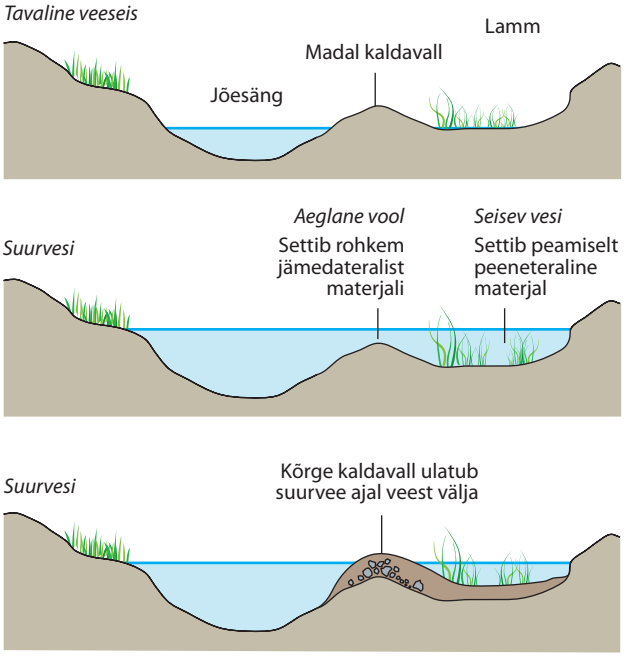

**1.36.** Jõesängi ristprofiili iseloomustavad peamised näitajad.

vahel ning seega ka külghõõrdumine on kõige väiksem. Kitsastes, kanjonilaadsetes ja madalates kanalites on vool suurema hõõrdumise tõttu aeglasem. Ristlõike pindalaga on otseselt seotud vooluhulk – aja jooksul voolusängi ristlõiget läbiva vee kogus. Keskmist vooluhulka jões saab arvutada, kui on teada valgala suurus ja äravoolumoodul. Tegeliku vooluhulga mõõtmiseks tuleb määrata jõe ristlõike pindala ja seda pinda läbiva voolu keskmine kiirus voolukiiruse mõõtja või lihtsa ujuki abil. Seejuures tuleb arvestada, et jõe keskel ja kallaste lähedal võib voolukiirus väga erinev olla. Hüdroloogilistes mõõtmispunktides kasutatakse vooluhulga mõõtmiseks ja registreerimiseks spetsiaalselt ehitatud paise, kus paisutuse kõrgus on vooluhulga funktsioon.

Väga oluline tegur jõe hüdroloogilise ja bioloogilise režiimi ning elustiku koosseisu kujundamisel on voolusängi pikiprofiili kallakus ehk **sängi kalde suurus**. Seda väljendatakse tavaliselt vertikaalse langusena kindla vahemaa kohta (näiteks m/km). Sängi kalle mõjutab tugevasti hapniku jt gaaside ning heljumi (detriit, mineraalosakesed) sisaldust vees, põhjasetete tüüpi, jõevee viibeaega ning sageli ka suvist veetemperatuuri.

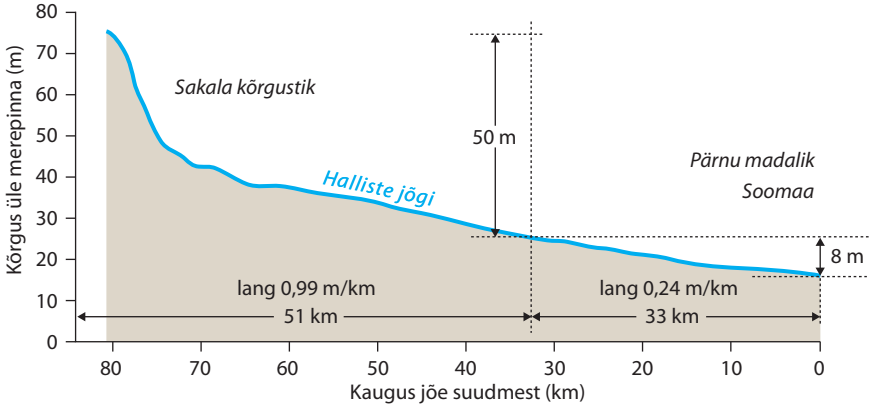
Pikiprofiili kirjeldamisel kasutatakse enamasti kahte mõistet: **langus** on jõe lähte ja suudme veetaseme kõrguste vahe ning **lang** veetaseme kõrguste vahe mingil jõelõigul (joonis 1.37). Gradient ning ristlõike kuju ja pindala võivad oluliselt varieeruda ka samal voolusängil, sõltudes maapinna geoloogilisest ehitusest, sademete jaotusest pikiprofiilil ja muudest teguritest. Pikiprofiili kuju on tavaliselt nõgus ja voolusängi gradient suurem (s.t säng järsema kallakuga) ülemjooksul (näiteks 10 m/km), vähenedes alamjooksu suunas, kus gradient võib olla ainult mõni cm/km.

**Lamm** ehk **üleujutustasandik** on suurveega üleujutatav orupõhi, kus eristatakse omakorda mitut osa. Kaldalamm on lammiala kõrgeim osa ja suurte jõgede puhul võib seal leida ka kaarjaid **kaldavalle**. Need tekivad suurvee ajal, kui veetase tõuseb ning vesi väljub jõesängist, ujutades lammiala üle. Suur osa jõesetteist ehk alluuviumist settib siis lammile, kus veevool muutub aeglasemaks kui jõe kohal. Seejuures jääb kõige rohkem setteid maha vahetult jõesängi kõrvale, kus nad panevad aluse kaldavallide moodustumisele (joonis 1.38). Kaldavallid takistavad suurvee lõpul vee tagasivalgumist jõesängi ja kujuneda võivad ajutised lammijärved. Veel eristatakse kesklammi ja jalamilammi. Viimane on madalaim lammi osa ja tihti soostunud ning seal paiknevad soodid. Lammide laius võib suurte jõgede puhul küündida paarikümne kilomeetrini, kuid Eesti jõgede puhul on see harva üle 0,5 km.




**1.38.** Kaldavallide tekke skemaatiline kujutus.

**1.37.** Halliste jõe pikiprofiil. Halliste jõe lähe asub Sakala kõrgustikul ja alamjooks Pärnu madalikul.



Halliste jõgi suubub Navesti jõkke 90–100° nurga all.

## LOOKED, TERRASSID, KÄRESTIKUD JA VÕRENDIKUD

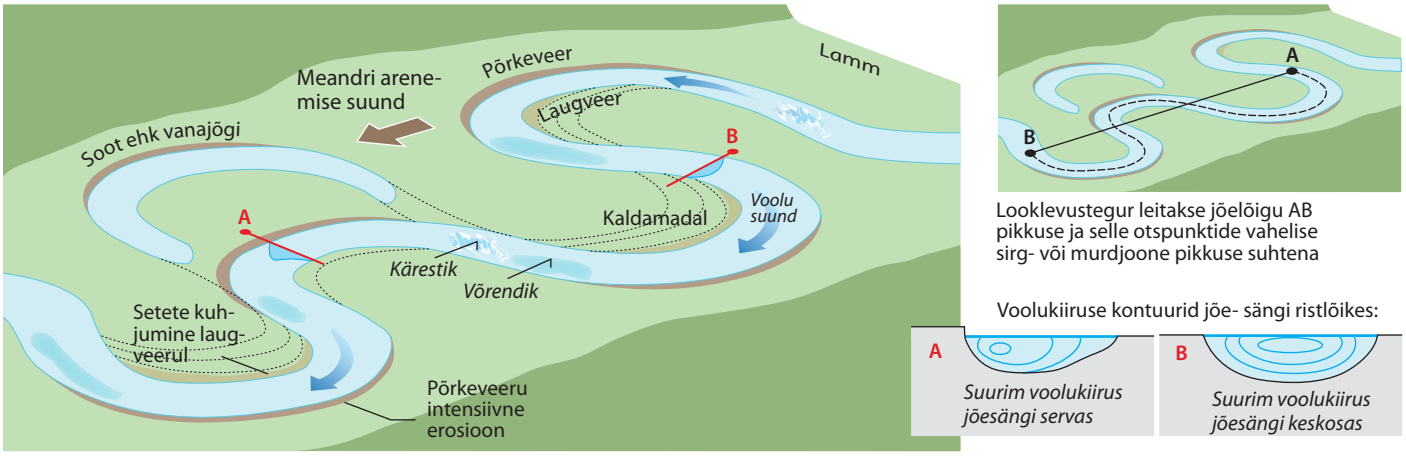
Looduslikud jõeorud pole peaaegu kunagi sirged, sest vee vool on enamasti turbulentne ja maapinna reljeef pole ühtlase kallakuga. Kui voolusäng on oma arengus saavutanud tasakaaluprofiilile lähedase kuju, muutub valdavaks küljeerosioon ning voolusäng hakkab selle tulemusena **looklema**. Selle all mõistetakse voolusängi või oru kulgemises ilmnevat kõrvalekallet sirgjoonelisest trajektoorist. Juba esialgsete väikeste voolunirede juures võib märgata pinnases olevaid **lookeid** ehk **meandreid**. Allavoolu liikudes ja vooluhulga kasvades, muutuvad need aina sügavamaks ja laiemaks. Alguses teeb kogu jõeorg need looked kaasa ja siis nimetatakse neid **oruloogeteks** ehk **orumeandriteks**. Aja jooksul uuristuvad külgerosiooni tõttu kõik orus olevad kõrgemad osad ja orus jääb looklema vaid voolusäng ise. Neid lookeid nimetatakse **sängiloogeteks** ehk **sängimeandriteks**.

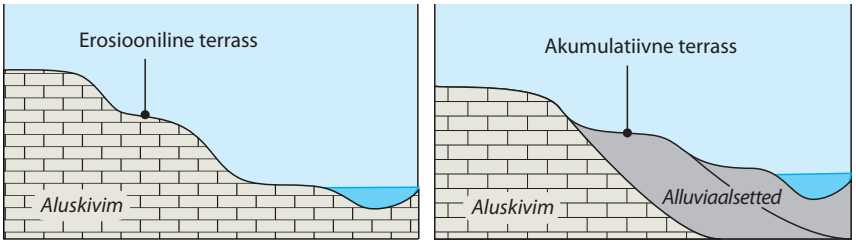
Esialgse lookleva voolusängi kujundavad maapinna ebatasasused, aluskivimite kulumise iseärasused ja Coriolisi jõud. Juba väljakujunenud jõelookeid kujundab edasi peamiselt küljeerosioon. Selle kutsub esile voolukiiruste ning erosiooni ja akumulatsiooni ebaühtlane jaotumine lookleva sängi piki- ja ristprofiili ulatuses (joonis 1.39). Liikuva veemassi inertsi tõttu kaldub looklevas jõesängis suurima voolukiirusega voolu osa sängi keskosast loogete väliskülje poole. See põhjustab loogete väliskülje ehk **põrkeveeru** intensiivsemat erosiooni ja sängi laienemist selles suunas. Kõige intensiivsem on erosioon põrkeveeru allavooluküljel ning seetõttu nihkub meander väliskülje poole liikudes ka pidevalt allavoolu. Vastavalt voolukiiruse suurenemisele põrkeveerus langeb voolukiirus sängilooke siseküljel ehk **laugveerus**, kuhu akumuleeruvad setted moodustavad kaldamadala. Loogete tõttu kantakse suurem osa põrkekaldast erodeeritud materjali kas samale lookele või vahetult allavoolu jäävatele kaldamadalatele. Seepärast voolusäng ei laiene, vaid teeb läbi näivat küljelt küljele ja allavoolu suunatud liikumist. Meandrite areng ei saa aga toimuda lõputult, sest varem või hiljem murrab jõgi oma tee sirgemaks. Tekivad **soodid** – voolusängist eraldunud seisuveekogud. Enamasti toimub läbimurre suurvee ajal ning tasandikujõgede lammialal võib leida sadu eri arengujärgus soote.

Looklevus on morfoloogiline näitaja, mis kirjeldab peamiselt voolusängi ja voolu tingimusi, mitte jõge ümbritsevat keskkonda. Voolusängis on vaadeldav kiirema vooluga trajektoorlooklevus, kus põhivool kulgeb ühe kalda põrkeveerust teise kalda põrkeveeruni. Sisuliselt on tegu voolujoomega ehk joonega, mis ühendab piki jõge suurima voolukiirusega punkte. Looklevust iseloomustatakse **looklevusteguriga**, mis on jõelõigu pikkuse ja selle otspunktide vahelise sirg- või murdjoone pikkuse suhe (joonis 1.39). Sirge jõelõigu looklevustegur on 1,00 ja mida suurem on looklevustegur, seda rohkem jõgi lookleb. Et jõed ei ole kogupikkuses ühesuguse looklevusega, on otstarbekas arvutada ka jõe **kogulooklevus**. Suurte jõgede puhul arvutatakse see jõe pikkuse ning lähte ja suudme vahelise kauguse suhtena. Eesti üsna väikeste jõgede puhul on kogulooklevus arvutatud jõelõikude looklevustegurite kaudu kaalutud keskmisena, kus kaaluks on lõigu pikkus.

Tihti on jõeorud astmelise ehitusega. Selliseid astmeid ehk **terrasse** võib leiduda mõlemal kaldal ja kogu jõe ulatuses, kuid neid võib olla ka ainult üksikutes jõelõikudes. Terrassid on kunagise jõeoru osad, mis on kuivale jäänud, kui jõgi on oru põhja süvendanud. Selle põhjuseks võib olla maapinna kõikuvliikumine, mille käigus on jõe langus suurenenud või erosioonibaas alanenud. Tekkeviisi ja ehituse järgi jaotatakse terrassid **erosiooniterrassideks** ja **akumulatiivterrassideks** (joonis 1.40). Erosiooniterrassid on välja uuristunud

**1.39.** Jõeloogete moodustumine ja sealsed voolukarakteristikud. Jõelooke ehitus.






**1.40.** Erosiooni- ja akumulatiivterrassi ehitus.

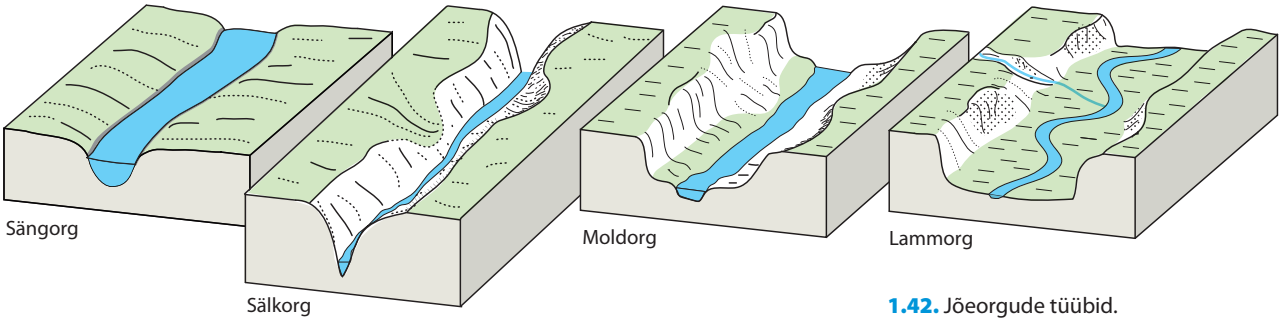
**1.41.** Jugades langeb vesi vabalt alla. Fotol olev Angeli juga on maailma kõrgeim (979 m) ja asub Venezuelas.

põhikivimites ja terrassi platvormidel jõesetteid ei ole või on need õhukesed. Akumulatiivterrassid on kujunenud paksus jõesettes (joonis 1.40). Suure ristlõikega vana jõeorg on täitunud setetega, milles võib hiljem olla mitu korda kujunenud uus tasakaaluprofiil.

Kui jõeorg koosneb erineva kõvadusega kivimitest, on jõe lang mõnes kohas suurem, teises jälle väiksem. Vastavalt sellele on ka jõe voolukiirus ja jõe energia suurem või väiksem. Selle tulemusena kujunevad võrendikud, joad, kosed ja kärestikud. **Kärestikud** on kivise põhjaga madalad jõeosad, sest peenema materjali kannab tugev vool ära. **Kosed** on kärestikega võrreldes veelgi suurema languga jõelõigud, kus vee voolukiirus on tunduvalt suurem. Tihti aetakse kosed segamini **jugadega** (joonis 1.41). Erinevalt koskedest langeb jugadel vesi vabalt alla, mitte ei voola. Nii kärestikes, koskedes kui ka jugades on vee hapnikusisaldus tugeva turbulentsi tõttu lähedane küllastatusele või esineb isegi kerge üleküllastatus.

**Võrendikud** on veevoolu uuristatud sügavad kohad voolusängis. Enamasti paiknevad võrendikud põrkeveeru ääres (vt joonis 1.39). Voolukiirus on võrendikes aeglasem, mistõttu seal settivad peeneteralised setted.

**JÕEORGUDE TÜÜBID** Jõeorud jaotatakse morfoloogilisteks tüüpideks oru ristlõike iseloomu järgi (joonis 1.42). Ühel ja samal orul võivad eri lõikudes olla ka mitme tüübi tunnused. Oru kuju määravad tema tekkeviis, ala geoloogiline ehitus, tektoonika, pinnamood ning loomulikult ka kliima. Orgude sügavust mõjutavad otseselt pinnamood ja tektoonilised liikumised. Sügavaimad jõeorud (üle 1 km) paiknevad intensiivselt kerkivates mäestikes. Viimase paarikümne tuhande aasta jooksul on näiteks Kaukaasia jõed süvendanud orge keskmiselt 0,5–1,0 mm ja Kesk-Aasia jõed 1–3 mm aastas. Et tektooniliste liikumiste kiirus ajas muutub, väheneb pikema aja jooksul süvendamiskiirus. Colorado kanjon on näiteks viimase seitsme miljoni aasta vältel muutunud sügavamaks 1500 m võrra ehk kõigest 0,2 mm/a.




**1.42.** Jõeorgude tüübid.

**1.43.** Suur kanjon on Ameerika Ühendriikides paiknev 446 km pikkune, kuni 29 km laiune ja kuni 1857 m sügavune Colorado jõe uuristatud kanjonorg.

Tasandikuorgude sügavus ei ületa tavaliselt 100 meetrit. Näiteks Koiva jõe org on 80–85 m sügav. Erandiks on vaid suurte Siberi tasandikujõgede orud, millel on sügavust 300–400 m. Hoolimata tasandikujõgede väikesest sügavusest toimuvad neis väga kiired muutused horisontaaltasapinnas, eriti väikese languga alamjooksul. Külgerosioon võib seal olla kümneid meetreid aastas.

**Sängorg** on kõige lihtsamat tüüpi algeline jõeorg, mis koosneb ainult voolusängist ja mida vesi täidab peaaegu pervedeni. Sängorud on levinud lauskja pinnamoega aladel, kus põhjauuristus on nõrk ja tugeva küljeuuristuse toimel on org väga looklev.

Noortele ja alles arenevatele jõgedele on iseloomulik **sälkorg**, mis tekib intensiivse põhjauuristuse tulemusena suure languga (mäestikujõed) või pudedate setetega kaetud aladel. Sälkorge iseloomustab V-kujuline ristlõige ja järsud veerud. Vesi täidab orgu vaid teatud kõrguseni.

Väga sügavat ja kitsast sälkorgu nimetatakse **kuristikoruks** ehk **lõhangoruks** ning sel juhul ületab jõeoru sügavus laiuse mitu korda. Eesti kõige sügavam (kuni 70 m) kuristikorg on Haanja kõrgustiku nõlvalt algav Kütiorg.

Sälkoru edasisel arenemisel kujuneb välja sügavam ja laiem **moldorg**. Põhja- ja küljeuuristus on moldorgude puhul tasakaalus ning jõesäng hõlmab vaid väikese osa oru põhjast. Eestis on moldorud levinud peaaegu kõikjal, kuid kõige sagedamini võib neid kohata Lõuna-Eesti saarkõrgustikel. Nad on mitme meetri laiused ja harva sügavamad kui 10 meetrit.

Moldorust areneb edasi **lammorg**, kus küljeuuristus on ületanud põhjauuristuse. Selle tagajärjeks on lammi kujunemine. Niisuguses orus voolava jõe lang on väike ja looklevus võrdlemisi suur. Lammorud on tasandike levinuim orutüüp.

**Kanjonorg** on samuti järskude, peaaegu püstloodsete seintega org (joonis 1.43). Kanjoni järskude seinte püsimiseks on oluline, et kanjoni alaosas paljanduksid pehmemad kivimid kui ülaosas. Samuti peab jõe uuristamiskiirus olema suurem kivimite murenemiskiirusest, mistõttu kanjonorud on levinud väheste sademetega piirkondades.

**JÕESUUDMED JA DELTAD** Kõik vooluveekogud on lõplikud, suubudes merre, järve või mõnda teise vooluveekogusse või hääbudes kõrbes. Kohta, kus vooluveekogu lõpeb, kutsutakse **suudmeks**. Igal vooluveekogul kindlat suuet ei ole. Kõikjal lainetusele avatud randades liigub peen purdmaterjal piki rannajoont valdava tuulesuuna järgi ning kujuneda võivad jõed, mille suudmeosa kulgeb mõnekümne või mõnesaja meetri kaugusel merest rööbiti rannajoonega just sellise setete edasikande tõttu (joonis 1.44). Setetesse mattumise tagajärjel nihkub suue järjest edasi. Vahel väljub jõgi ka voolusängist ning valgub lihtsalt laiali. See on iseloomulik äravooluta valgalaga jõgedele. Näiteks Aafrika lõunaosas asuva Okavango jõe alamjooksul hargneb voolusäng ulatuslikul territooriumil ning jõeharude vahele on kujunenud soine ala (joonis 1.29), kuhu saabuv vesi aurustub või lahkub transpiratsiooni teel.

Suudmes on vool enamasti aeglasem ja seetõttu algab purdosakeste (eelkõige liiva, aleuriidi ja savi) settimine. Setete kuhjudes hakkavad need veevoolu takistama ja voolusäng vahetab asukohta. Setteist moodustuvad saared ja poolsaared ning välja kujuneb mitmeharuline jõesuu – **delta** ehk **suudmemaa** (joonis 1.45). Deltade kujunemine võib viia maailmamere taandumiseni ja maismaa tekkeni. Eesti jõgedest on suurim delta Emajõel ja Kasari jõel. Merelised deltad kujutavad endast tasaseid, nõrgalt ookeani poole kallutatud settelavasid, mida liigestavad arvukad harunevad jõeharud. Settekeha ulatub tavaliselt jõesuust endast märgatavalt kaugemale ning koosneb veealusest ja veepealsest deltatasandikust. Delta kuju määravad lainetus ja looded. Lainetus takistab deltade edasitungimist setete ärauhtumisega ja rannavallide moodustamisega, mis ummistavad jõesuudmeid. Viimasel juhul säilib vaid üks jõesuue ning jõgi haruneb ja harud ühinevad uuesti enne rannavallist läbimurdmist. Ka looded takistavad deltade kujunemist. Tõusuveega ujutab meri jõekaldad üle ja uhab

**1.44.** Uuejõe suue Loode-Eestis. Tugeva tuule, kõrge meretaseme ja nõrga jõevoolu tõttu on suue korduvalt sulgunud liivavalli taha, millest murrab läbi suurvee ajal.

**1.45.** Yukoni jõe delta ehk suudmemaa nähtuna kosmosest. Mere mõjul kantakse setted suudmeosast ära, kuid jõe transporditavate setete hulk on nii suur, et moodustunud on mitu lehtersuuet.

setted jõesängist välja. Mõõna ajal uuristab jõesängist väljavoolav vesi suudmeosa laiemaks ning kannab setted samuti avamerele. Kui sealt kantakse ära peaaegu kõik ladestunud setted, siis moodustub **lehtersuue** ehk **estuaar**. Suure settehulga korral võib delta siiski moodustuda, kuid see koosneb mitmest lehtersuudmest, mille vahele jäävad arvukad saared. Estuaaride kujunemisel mängib peale tõusude-mõõnade ja rannikuhoovuste tähtsat osa ka mere pealetung ehk transgressioon, mille põhjuseks võib olla maismaa vajumine või ookeanide veemahu suurenemine. Tihti kujunevad sellistes tingimustes **suudmelahed** ehk **limaanid**, mis kujutavad endast lahelaadset, kaugele ülesvoolu ulatuvat üleujutatud jõesuuet.

**EESTI VOOLUVEEKOGUD** Maailma mõõtkavas on enamik Eesti jõgesid väikesed: lühikesed, kitsad ja suhteliselt madalad. Kui võtta hindamise aluseks rahvusvaheliselt kasutatav jõgede suurusklasside skaala pikkuse järgi (väga väikesed < 25 km, väikesed 26–100 km, keskmised 101–500 km, suured 500–1000 km, väga suured > 1000 km), kuuluvad peaaegu kõik Eesti jõed kas väga väikeste või väikeste, mõni üksik keskmise suurusega ning Narva jõgi suurte jõgede rühma.

Eesti vetevõrk on tihe, sest sademete hulk ületab siin aurumise. Vooluvetevõrgu keskmine tihedus on 0,72 km/km$^2$, kuid Eesti territooriumi piires jaotuvad vooluveekogud ebaühtlaselt (joonis 1.46). Väikseim (alla 0,2 km/km$^2$) on vooluvetevõrgu tihedus Pandivere kõrgustikul ja saarte rannikualadel. Pandivere kõrgustikul tingivad selle õhuke pinnakate ning aluspõhja tugevasti karstunud ja lõhestunud karbonaatkivimid, mistõttu sajuvesi imbub seal kiiresti maapinda, suutmata moodustada püsiva maapealse vooluga ojasid või jõgesid. Suurem osa sel viisil tekkinud põhjaveest avaneb Pandivere kõrgustiku jalamil allikatena.

Vooluvetevõrgu keskmine tihedus on Põhja-Eestis ligikaudu kaks korda suurem kui Kagu-Eestis: vastavalt 0,8–1,2 km/km$^2$ ja 0,4–0,6 km/km$^2$. Vooluvetevõrgu keskmine tihedus erineb mõningal määral ka vesikonniti: Liivi lahe – Väinamere vesikonnas on see 0,79 km/km$^2$, Soome lahe vesikonnas 0,78 km/km$^2$, Narva-Peipsi vesikonnas 0,69 km/km$^2$ ja saartel ainult 0,44 km/km$^2$.

**1.46.** Eesti vooluveekogude võrk on suhteliselt tihe (keskmiselt 0,72 km/km$^2$), kuid ebaühtlase jaotusega. Väikseim on tihedus Pandivere kõrgustikul.

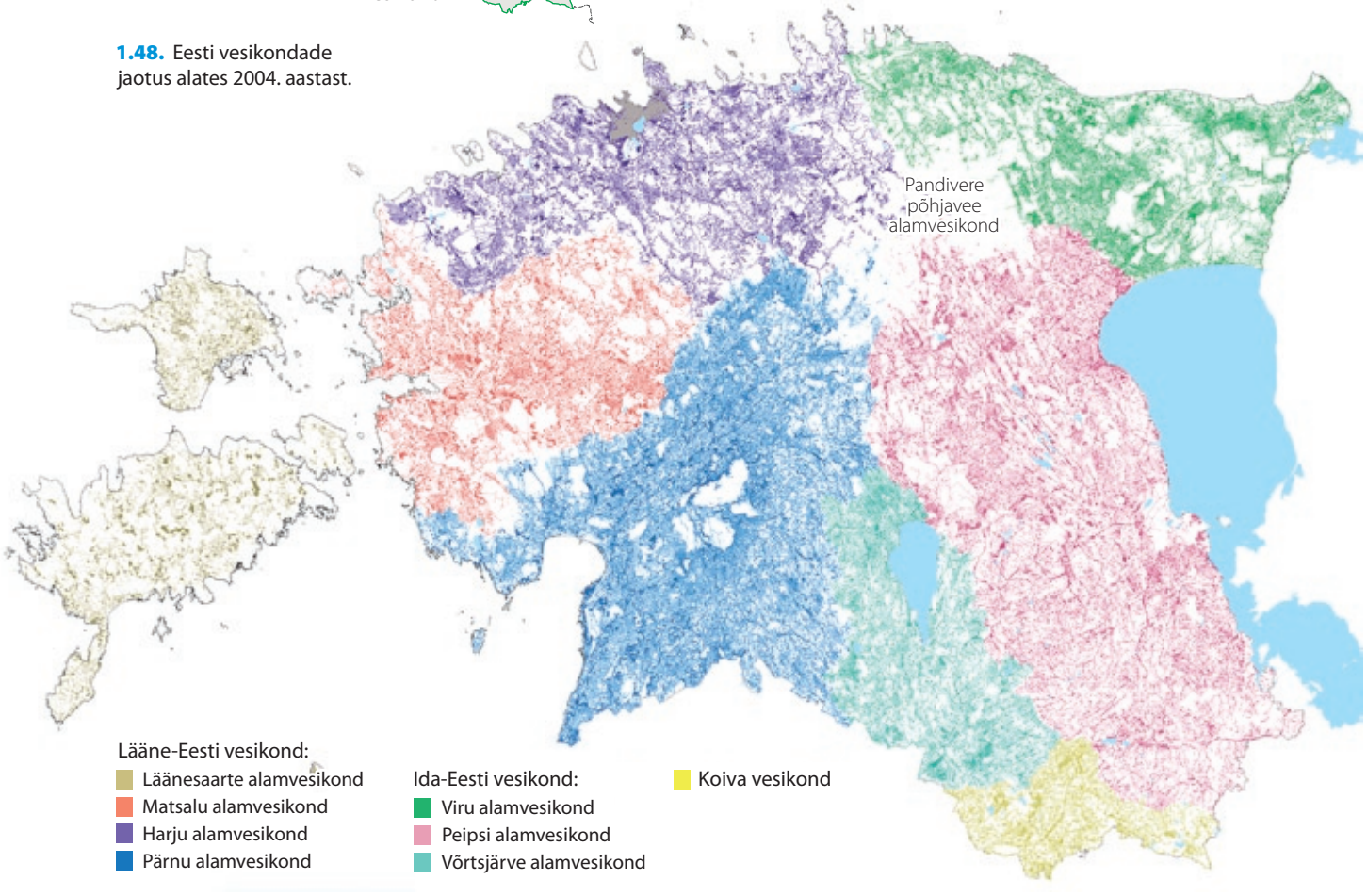
**1.47.** Eesti vesikonnad.

**1.48.** Eesti vesikondade jaotus alates 2004. aastast.

Eesti jaotatakse hüdrograafiliselt kolmeks vesikonnaks: Soome lahe, Liivi lahe – Väinamere ja Peipsi järve – Narva jõe vesikonnaks (joonis 1.47). Et Eestis jõuavad kõik veed lõpuks Läänemerre, kuuluvad kõik meie jõed Läänemere vesikonda.

Seoses veepoliitika raamdirektiivi täitmisega osutus ebaotstarbekaks terve Eesti paigutamine ühte vesikonda, sest see poleks võimaldanud arvestada naaberriikidega. Seepärast piiritleti 2004. a uued vesikonnad ja alamvesikonnad, mis kattuvad hüdrograafilistega ainult osaliselt (joonis 1.48):

- **Lääne-Eesti vesikond**, millesse kuuluvad läänesaarte, Harju, Matsalu ja Pärnu alamvesikond;
- **Ida-Eesti vesikond**, millesse kuuluvad Peipsi, Viru ja Võrtsjärve alamvesikond;
- **Koiva vesikond**, mis moodustab rahvusvahelise vesikonna koos Koiva jõe Lätis paikneva vesikonnaga ja Daugava jõestikku kuuluva Pedetsi jõestikuga;
- **Pandivere põhjavee alamvesikond**, mis moodustati põhjavee kaitseks ja kuulub nii Lääne- kui ka Ida-Eesti vesikonda.



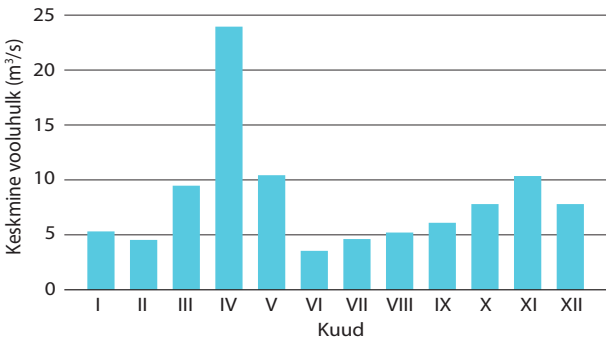
Eesti 14 veerikkaima jõe valglad on suuremad kui 1000 km². Suurima vooluhulgaga Narva jõe koguvalglast, mis ületab suuruselt Eesti territooriumi, jääb enamik Pihkva oblastisse. Narva jõe kaudu voolab Soome lahte keskmiselt 12,6 km³ vett aastas, mida on rohkem, kui kogu Eesti territooriumilt kokku. Peaaegu tervikuna Eestis paiknev Emajõe valgla moodustab riigi pindalast 22%.

Eesti suurima langusega jõed (millest küll ükski ei asu tervikuna Eestis) on Narva (Bežanitsõ kõrgustikult Narva laheni 256 m), Koiva (234 m) ja Piusa (220,5 m). Vähima langusega jõed paiknevad soodes ning voolavad enamasti ajuti.

Nagu öeldud, iseloomustab kõigi jõgede arengut suundumus tasakaalulise pikiprofiili saavutamisele, mille puhul jõe uuristav ja kuhjav tegevus oleks tasakaalus ning lang jõe kõigis osades ühtlane. Looduses ühelgi jõel täiuslikku tasakaaluprofiili ei ole ning tavaliselt vahelduvad suurema ja väiksema languga jõelõigud kogu pikiprofiili ulatuses. Jõgede pikiprofiil kujuneb pika aja vältel ning paljude tegurite koosmõjul (ala geoloogiline ehitus, pinnamood, tektoonika, kliima, taimkate, hüdroloogiline režiim jt).

Piirkonniti erinevad jõed üksteisest märkimisväärselt oma pikiprofiili kuju poolest (joonis 1.49). Põhja-Eesti jõgede lang on ülem- ja keskjooksul väike, kuid alamjooksul seevastu suur. Paekaldal moodustuvad joad (Narva, Loobu, Valge-, Jägala ja Keila jõel) või voolavad jõed alamjooksul sügavas orus (Püha-, Valge-, Pirita ja Keila jõgi). Lääne-Eesti jõgedel on väike lang. Enamik neist voolab viirsavisse ja meresetteisse uuristunud madalas orus. Lõuna-Eesti jõed algavad enamasti kõrgustikelt ja ülemjooksul on nende lang suur. Harilikult voolavad nad keskjooksul ürgorus ja alamjooksul soostunud tasandikel.

Eesti jõgedele on iseloomulik vooluhulga sesoonne muutumine (joonis 1.50). Aastasest äravoolust langeb kevadele keskmiselt 43%, suvele 14%, sügisele 24% ja talvele 19%. Teravalt tõuseb esile maksimaalse vooluhulgaga periood aprilli lõpul, mil väikeste jõgede ja ka suuremate Lääne-Eesti jõgede äravool võib moodustada isegi 40–90% aastasest äravoolust. Minimaalne on vooluhulk juunis-juulis ja talvel veebruaris. Suuri järvi läbivates jõgedes, nagu Emajõgi ja Narva jõgi, on vooluhulga sesoonne muutlikkus väiksem. Suurimad äravoolumoodulid ulatuvad neil vaid 30–50 l-ni/s · km²), samal ajal kui paljudel teistel jõgedel (Pärnu, Pedja, Kasari) tõusevad need 250–300 l-ni/s · km²).

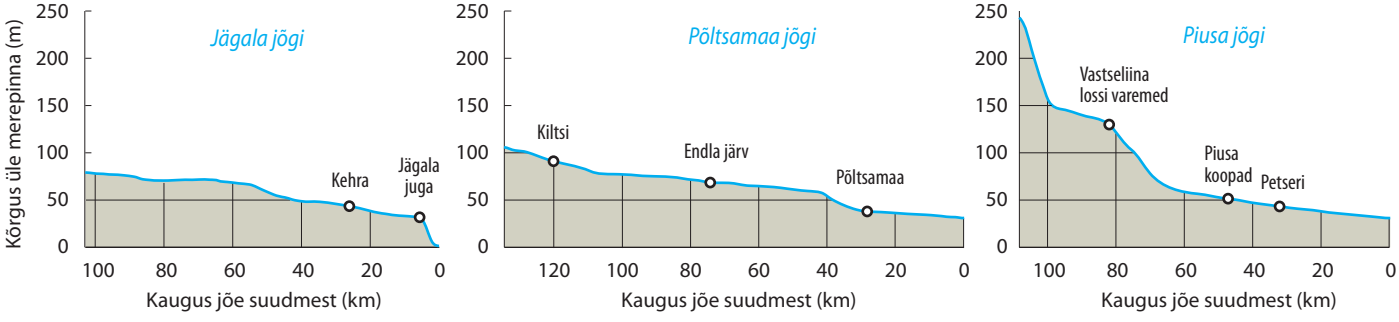



**1.50.** Väikese Emajõe vooluhulga aastane dünaamika.

Eesti jõgede voolukiirus on suurveeajal 0,5–1,0 m/s, Põhja-Eesti jõgede alamjooksul kohati 2–4 m/s. Madalveeajal on voolukiirus tavaliselt 0,1–0,3 m/s. Veetaseme paljuaastane keskmine kõikumine on Eesti jõgedel 2–4 m piires; harvadel aastatel muutub Pärnu jõe tase kuni 5,5 m. Veerikkaim on Narva jõgi – 385 m³/s, Pärnu ja Emajõgi on märksa tagasihoidlikumad (vastavalt 64 m³/s ja 70 m³/s). Kevadise suurveega tõuseb vooluhulk Narva jõel üle 2000 m³/s.

Üleujutuste ajal väljuvad veemassid voolusängist ja vee keemiline koostis võib olla tavalisest sootuks erinev. Enamasti suureneb siis humiinainete sisaldus ja setete hulk. Tulvad on iseloomulikud kevadeti paljudele Lääne-Eesti jõgedele, mis ujutavad üle suuri alasid. Eestis pindalalt suurimat üleujutusala Halliste, Navesti, Raudna, Kõpu ja Lemmjõe alamjooksul tuntakse Riisa küla järgi. Üleujutuste põhjuseks on tasane pinnamood, jõgede alamjooksu väike lang, setetest ummistunud ja osaliselt kinni kasvavad jõesängid, läbivoolujärvede puudumine ning lisajõgede ühinemine lähestikku, mistõttu peajõgi ei suuda vett kiiresti vastu võtta.

**1.49.** Eesti jõgede pikiprofiili piirkondlikud erinevused.

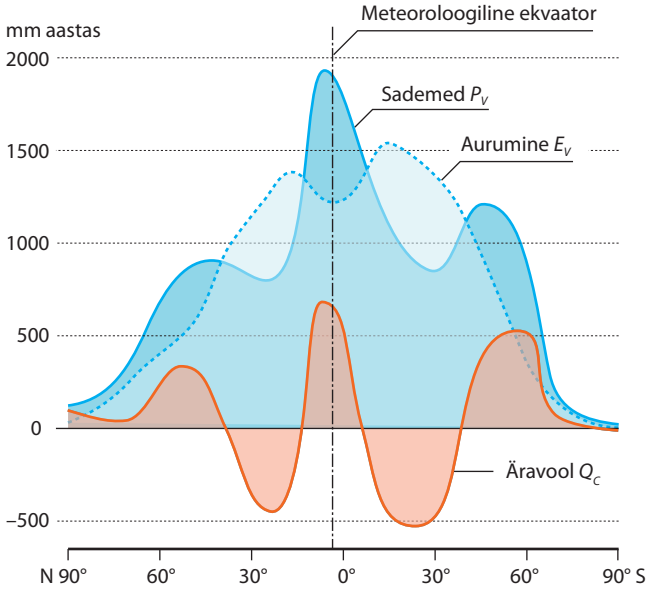


### 1.3.5. Järvede tekkeviisid

Järved on oma geograafilisest paiknemisest olenevalt varieeruva kujuga ja peegeldavad hästi neid kunagi vorminud looduslikke ja inimtekkelisi protsesse, olgu nendeks siis ammused maalihked, vulkaaniline tegevus, mandrijää toime või juba olemasoleva järvenõo kuju muutumine vooluvete ning valgalalt järve kantava materjali mõjul. Geoloogilises ajaskaalas on järved lühiealised ja enamiku neist võib arvata ajutiste loodusobjektide hulka. Ja kuigi meil on vähe võimalusi olla järvetekke tunnistajaks, toimub järvenõgude kujunemine samal viisil lakkamatult edasi ka tulevikus.

Iga järve tekkimisel võib eristada kolme elementi. Esimene neist on mingi protsess või jõud, mis kujundab järvenõo. See võib olla kataklüsmiline (vulkanism), väga aeglaselt kulgev (tektoonilised liikumised) või erakordselt harv (meteoriit). Teiseks elemendiks on sobiv maapind, kuhu saab järvenõo tekitada. Kolmas järvetekke element on vesi ise. See võib lisanduda tükk aega pärast järvenõo geoloogilist tekkimist. Vee doonoriks võivad olla jõed, sademed, jää, märgalad, põhjavesi ning juba olemasolevad järved. Seejuures võib veeallikas aja jooksul muutuda. Näiteks täituvad glatsiaalse tekkeviisiga järved esmalt jää sulaveega, kuid pärast jää sulamist võivad seda rolli hakata täitma sademed või põhjavesi.

Olenemata vee päritolust on üks järve täitumise eeltingimusi paiknemine klimaatiliselt sobivas piirkonnas. Sademete ja aurumise vahekord peab olema sademete kasuks. Enamik järvi paikneb laiuste 40–60° N ja 40–50° S vahel (joonis 1.51). Seda piirkonda iseloomustab sagedaste madalrõhkkondade tõttu vihma- ja lumesadude rohkus. Järvenõgude kujunemisel oli tähtis osa viimasel jääajal. Arvukalt paikneb järvi ka ekvaatori ümbruses ja sealgi esineb rohkelt sademeid, kuid järvenõod on peamiselt tektoonilist päritolu või kujunenud vooluvete kulutava-kuhjava toime tulemusena. Troopilises kliimavöötmes, kus valitsevad kõrgrõhkkonnad, esineb väga vähe sademeid, järvede arv on väike ja vesi sisaldab rohkelt mineraalaineid. Paiknemine sobivas kliimavöötmes ei pruugi veel tähendada, et järv on alati veega täidetud. Victoria järv, mille geoloogiline vanus on üle 400 000 aasta, on selle aja jooksul vähemalt kolm korda täiesti




**1.51.** Globaalne aurumise, sademete ja äravoolu vahekord laiuskraaditi.

ära kuivanud. Viimati täitus järv veega 14 700 aastat tagasi. Selliste muutuste põhjuseks peetakse muutuvat kliimat (eriti jääaegu), mis suures osas sademetest toituvat järve mõjutavad.

Järvede kujunemine ja sellega seotud protsessid on teadlasi köitnud juba rohkem kui sada aastat ning neid protsesse on püütud mitmel viisil rühmitada. Seni kõige põhjalikuma ja mahukama järvetekke klassifikatsiooni on välja töötanud George Evelyn Hutchinson (vt ääremärkus 1.3). Oma neljaköitelise teose „A Treatise on Limnology“ („Uurimus limnoloogiast“) esimeses osas (1957) eristab ta tekkeviisi ja geomorfoloogiliste tunnuste põhjal 11 põhilist järvetüüpi ja 76 alamtüüpi. Siiski ei alustanud Hutchinson päris tühjalt kohalt, vaid kasutas algmaterjalina William Morris Davise 1882. ja 1887. a ilmunud analoogseid töid. Täiuslikkusest hoolimata on Hutchinsoni klassifikatsiooni kasutamine selle mahukuse tõttu ebapraktiline ning seetõttu käsitleme alljärgnevalt vaid põhitüüpe.

1.3 ÄÄREMÄRKUS

**GEORGE EVELYN HUTCHINSON**

George Evelyn Hutchinson (1903–1991) oli Yale'i ülikooli professor. Sünnilt inglane, veetis ta suurema osa oma elust Ameerika Ühendriikides ja viimased aastad taas Inglismaal. Tänu tema loodud arvukatele ökoloogia- ja limnoloogiateooriatele võib teda pidada nüüdisaegse limnoloogia isaks, kuigi ta ei saanud isegi doktorikraadi. Sellest hoolimata oli ta väga laia silmaringiga teadlane. Geokeemia ja bioloogia suurepärane tundmine aitas tal edukalt tegutseda järvede biogeokeemia vallas. Peale selle orienteerus ta väga hästi okeanograafias, antropoloogias, paleontoloogias, sotsioloogias ja etoloogias ning käis tihedalt läbi ka näitlejate, kirjanike ja muusikutega. Tema tähtsaim teos, mis on ühtlasi üks limnoloogia alustalasid, on neljaköiteline monograafia „Uurimus limnoloogiast“ („A Treatise on Limnology“), mille viimane köide ilmus küll juba pärast autori surma.

Kuigi järvede kujunemisviise on arvukalt, on neist vaid vähesed Maa geoloogilise ajaloo jooksul suures ülekaalus olnud. Tänapäeval on enamik järvi kas glatsiaalset või tektoonilist päritolu või vormitud vooluveekogude kaasabil (tabel 1.7). Glatsiaalse tekkeviisi suur osakaal on tingitud laialdasest jäätumisest pleistotseenis, mil mandrijää kattis planeedi pinnast 25%. Ent järve puhul pole kunagi tegemist ajas püsiva objektiga ning isegi ühe ja sama järve kujunemistüüp võib muutlik olla. Näiteks Kivu järv Kesk-Aafrikas kujunes esmalt tektooniliselt, kuid hilises pleistotseenis sulgus järve väljavool vulkaanipursete tõttu ja see andis järvenõole hoopis uue kuju.

Tabel 1.7. MAAILMA JÄRVEDE JAOTUS TEKKEVIISI JÄRGI.

Arvesse on võetud järved pindalaga vähemalt 1 ha

| Tekkeviis | Järvede arv | % järvede koguarvust | Kogupindala ($km^2$) | % järvede kogupindalast |
|---|---|---|---|---|
| Glatsiaalne | 3 875 000 | 74 | 1 247 000 | 50 |
| Tektooniline | 249 000 | 5 | 893 000 | 35 |
| Vooluveeline | 531 000 | 10 | 218 000 | 9 |
| Mereline | 41 000 | < 1 | 60 000 | 2 |
| Vulkaaniline | 1 000 | << 1 | 3 000 | << 1 |
| Muu | 567 000 | 10 | 88 000 | 4 |
| **Kokku** | **5 264 000** | **~100** | **2 509 000** | **100** |

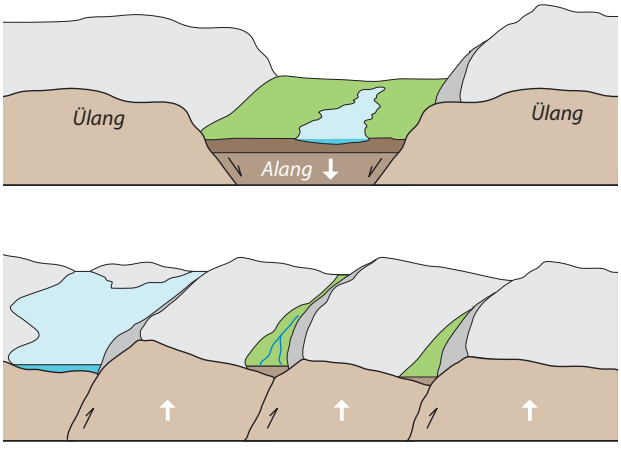
(Kalff 2002 järgi)

**TEKTOONILINE JÄRVETEKE** Maa välimine sfäär on võrdlemisi jäik ja liikumatu, kuid sisemuses toimuvad endiselt planeeti moodustavad protsessid, ainese ümberjaotumine ning lõplik geokeemilise ja gravitatsioonilise tasakaalu saavutamine. Ringlev Maa-sisene aine mõjutab ühtlasi Maa välimist sfääri, kus ainese voolamist ei toimu. Jõude, mis seda sfääri mõjutavad, nimetatakse tektoonilisteks jõududeks. Need põhjustavad litosfääri lõhustumist plokkideks (litosfääri laamadeks), laamade liikumist ning habraste ja plastiliste deformatsioonide teket maakoores. Selliseid liikumisi nimetatakse tektoonilisteks liikumisteks ja need pakuvad häid võimalusi järvenõgude kujunemiseks. Tektooniline järveteke võib toimuda kahel viisil: murrang- ja kõikuvliikumiste tulemusena.

**Murrangliikumisi** esilekutsuvad tektoonilised jõud toimivad vertikaal- ja horisontaalsuunas mitmesugustes kombinatsioonides. Kõikuvliikumistes osalevad vaid vertikaalsuunas toimivad jõud. Nende liikumiste tagajärjel tekivad maakoores deformatsioonid ehk rikked ning kujunevad nõod, kerkealad ja rebendrikked.

Rebendrikked on sellised maakoore siirded, kus kivimimassiivide või -kihtide terviklikkuse rikuvad lõhed. Rebendrikete tekke eelduseks on kivimi jäikus: plastilistes kivimites ega kobedates setetes lõhesid ei kujune. Rebendrikkeid, kus mööda lõhepinda toimub eraldunud kivimiplokkide liikumine teineteise suhtes, nimetatakse **murranguteks**. Normaalmurrangud tekivad maakoore väljavenimisel ja kerkemurrangud kokkusurumisel. Ulatuslikumate nihete puhul on murrangud seotud litosfääri laamade liikumisega. Murrangud rühmituvad murrangusüsteemidesse, mis jagavad maakoore plokkideks. Need võivad paikneda üksteise suhtes eri kõrgustel. Teistest kõrgemat plokki nimetatakse ülanguks ja kõige rohkem vajunud plokki alanguks (joonis 1.52). Nii ülangud kui ka alangud võivad kujuneda ühes paralleelses murrangusüsteemis, olles pikliku ja väljavenitatud kujuga. Alangutesse võivad omakorda moodustuda järvenõod. Paralleelset murrangusüsteemi, kus kõrvuti olevad plokid moodustavad treppi meenutava astmestiku, tuntakse ka astmelise murranguna. Järvenõod kujunevad sellisel juhul plokkide piirialadele (joonis 1.52). Kujult on mõlema tekkeviisiga järvede nõod üldjuhul kitsad ja pikad ning väga sügavad.

Murrangutes on tekkinud Maa vanimad ja sügavaimad järved. Näiteks Baikali järve nõgu kujunes juba vanaaegkonna alguses 500 mln aastat tagasi. Esialgu oli see merelaht, mis mis hakkas järveks muutuma uusaegkonna ajal 30 mln aastat tagasi. Miljonite aastate jooksul on Baikali fjordisarnane nõgu küll tugevasti setetega täitunud (vt joonis 1.266, lk 182), kuid tänu väikesele settimiskiirusele on ta endiselt sügavaim järv maailmas (1642 m). Vee läbipaistvus on ligi 40 m ja järve on talletunud u 20% kogu hüdrosfääri mageveest. Sarnase tekkeviisiga Tanganjika järv on maailmas sügavuselt




**1.52.** Tektoonilise järvetekke viisid maakoore kerkimisel. Ülemisel joonisel moodustuvad järvenõod kivimiplokkide vajumise ja alumisel üksteise suhtes nihkumisel tagajärjel.

teine (1430 m). Keskmine sügavus on seal 570 m, kuid aluskivimeid katvate setete paksuseks on hinnatud 4,5 km. Vanuse ja eraldatuse tõttu leidub selliste järvede elustikus rohkelt endeeme.

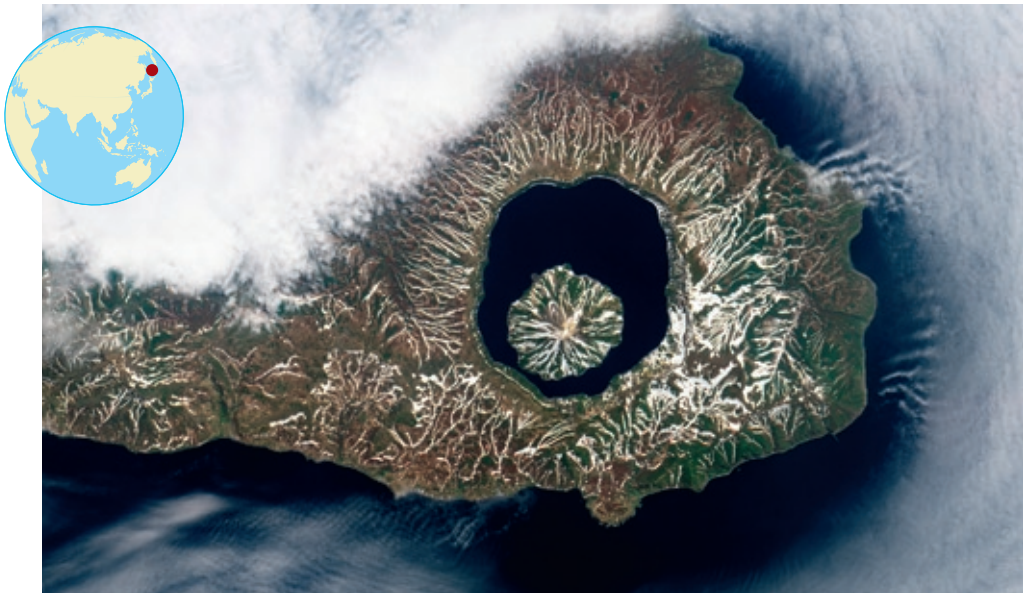
**Kõikuvliikumised** on maakoore ulatuslikke piirkondi hõlmavad aeglased vertikaalliikumised – kerkimine või vajumine. Kõikuvliikumistest tingitud tektooniline järveteke on seotud **merepõhja kerkimisega.** Selle tulemusena paigutub rannajoon ümber, mõni osa merest isoleeritakse ja moodustub uus siseveekogu. Nii on tekkinud näiteks Kaspia ja Araali meri. Ka Läänemeri on jääajajärgsel perioodil korduvalt isoleeritud olnud. Näiteks Antsülusjärve teke ja kadumine oli seotud just tektooniliste protsessidega. Kuju, pindala ja sügavus varieeruvad sellistel järvedel suuresti, sõltudes merest eraldunud osa morfomeetrilistest iseärasustest.

■ **VULKAANILINE JÄRVETEKE** Nähtuste kompleksi, mis on seotud magma jõudmisega maapinnale, nimetatakse vulkanismiks ja mõnikord kujunevad sel viisil välja ka järvenõod. Näiteks võivad järved moodustuda kustunud vulkaanikraatrites ja laava tõkestatud orgudes. Tihti on vulkaaniline aktiivsus kombineeritud tektoonilise aktiivsusega. Vulkaanilise tekkeviisiga järved on levinud peaaegu kõigis vulkaaniliselt aktiivsetes piirkondades ning on kivimite koostise ja valgala iseloomu tõttu enamasti toiteainete poolest väga vaesed. Järvede üldarvust moodustavad vulkaanilise tekkega järved tühise osa, olles pigem kohaliku tähtsusega. Vulkaanilisel järvetekkel eristatakse kolme alatüüpi.

Suurte vulkaanikraatrite kõrged nõlvad võivad aja jooksul hävineda. Langatuse tulemusena võivad nende asemele tekkida ümmargused tasase põhjaga nõod – kaldeerad, mille veerud on järsud ja läbimõõt võib ulatuda paarikümne kilomeetrini. Kaldeerad võivad kujuneda ka plahvatuslikul vulkaanipurskel. Soodsate hüdroloogiliste tingimuste korral täituvad kaldeerad veega ja nii kujunevad **kaldeerajärved** (joonis 1.53). Vahel võib keset järve näha saarena kõrgumas osa uuest vulkaanikoonusest. Järskude veerude tõttu võivad sellised veekogud olla väga sügavad. Üks tuntumaid kaldeerajärvi on Oregonis asuv Crateri järv (vt joonis 1.7, lk 23), mis oma 592 meetriga on sügavuselt seitsmes järv maailmas ning tuntud taevasinise vee ja erakordselt suure läbipaistvuse poolest (43 m). Selle põhjuseks on sissevoolude ja kaldaasustuse puudumine, mistõttu vesi on väga toiteaine- ja elustikuvaene, kuid siiski suure mineraalainesisalduse ja madala temperatuuriga.

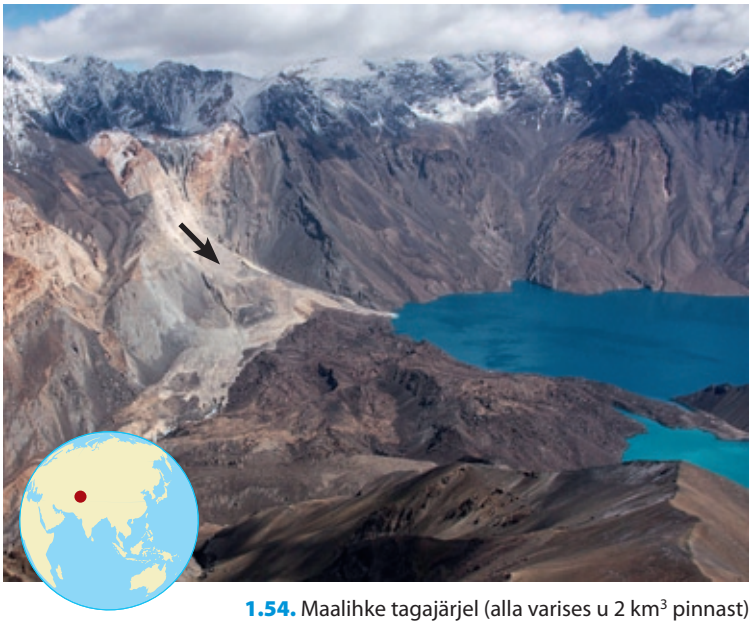
Suhteliselt väikseid, enamasti alla 2 km läbimõõduga kraatrijärvi nimetatakse **maarideks**. Need moodustuvad plahvatuse tagajärjel, kui magma on puutunud kokku põhjaveega või on toimunud vulkaaniliste gaaside äkiline vabanemine. Kujult on nad samuti ideaalsed ringid, kuid kaldeerajärvedega võrreldes madalad. Mõne maari sügavus võib siiski küündida üle 100 m. Tüüpiline maar on näiteks New Mexicos asuv Zuni soolajärv. Tegu on väga madala järvega, millel niiskel aastaajal on sügavust vaid 1,2 m ja mis põuaperioodidel kuivab suureks soolaväljaks.

Vulkaanilise aktiivsuse tulemusena võivad **jõeorgudesse moodustuda looduslikud paisud** ja nende taha kujuneda järved. Paisu materjaliks võib olla maapõuest väljavoolav laava või täidab kasvav vulkaanikoonus ise jõeoru. Selliste järvede eluiga ei pruugi kuigi pikk olla, sest laavast moodustunud pais mureneb ja laguneb või hävineb järv uue purske ajal. Tuntuimad selle tekkeviisi esindajad on Rotoaira järv Uus-Meremaal ja Bunyonyi järv Ugandas.



**1.53.** Tao-Russõri kaldeeras paiknev Koltsevoje järv Kuriili saarestikus. Rohkem kui 9000 a tagasi toimunud vulkaanipurske tagajärjel kujunes selgeveeline järv, mille keskel kõrgub uus vulkaan.

**MAALIHETE TOIMEL TEKKINUD JÄRVED** Nii kujunenud järved on levinud mäestikes ja tektooniliselt aktiivsetes piirkondades. Mäenõlvadelt allavajuv pinnasemass tõkestab sügavates orgudes veevoolu ning moodustuvad paisjärved. Mõõtmetelt suured ja tihti sügavad järved on võrdlemisi lühiealised, eksisteerides vahel vaid nädalaid või kuid. Ilmekas näide on Tadžikistanis Pamiiri mäestikus paiknev Sarezi järv (joonis 1.54). See tekkis 1911. aastal tugeva maavärina käigus, kui maalihe sulges Murghobi jõe, moodustades hiiglasliku Usoi paisu. Järv on 61 km pikk ja 500 m sügav ning mahutab 17 km$^3$ vett. Kuna piirkond on seismiliselt väga aktiivne, siis kardetakse, et ootamatult võivad murduda järve kallasteks olevad kaljud. Vette sattudes tekitaksid need hiidlaine, mis ületaks Usoi paisu ning põhjustaks allavoolu liikudes laiaulatusliku ja katastroofilise üleujutuse, mille mõju oleks tuntav isegi Araali meres. Et selles piirkonnas elab umbes viis miljonit inimest, seirab paisu seisundit mitu rahvusvahelist uurimisrühma ja plaanis on hakata veetaset järves järk-järgult alandama.

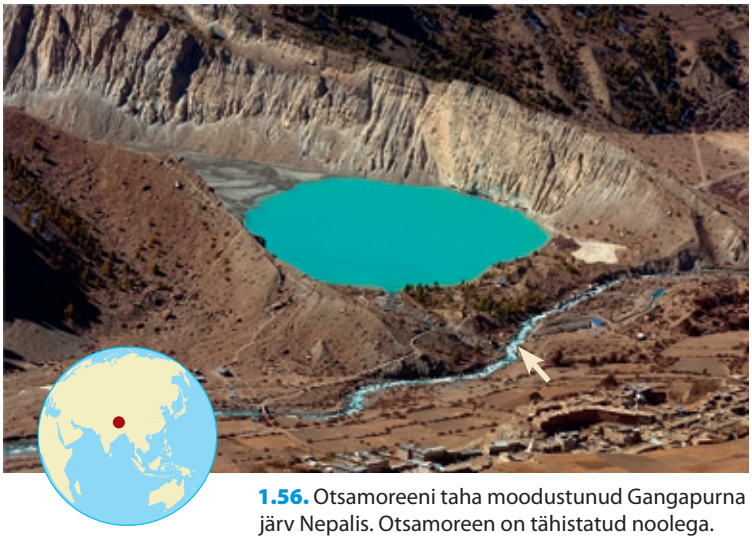


**1.54.** Maalihke tagajärjel (alla varises u 2 km$^3$ pinnast) moodustunud Usoi pais Sarezi järves Tadžikistanis.

**1.55.** Liustikujääl paiknev järvik Gröönimaal.

**LIUSTIKULISE EHK GLATSIAALSE TEKKEGA JÄRVED** Kõige arvukam osa maailma järvenõgudest on tekkinud liustike kaasabil ehk glatsiaalsel teel. Sellise tekkeviisiga järved on enamuses nii Eestis kui ka põhjapoolkera parasvöötmes tervikuna. Liustik on jäämass, mis tekib lume või teiste sademete tihenemisel ja ümberkristalliseerumisel ning liigub gravitatsioonijõu mõjul. Tema toime maapinnale liustike pealetungil ja taandumisel avaldub kulutus-kuhjelises tegevuses. Ühtlasi kujundavad maapinda ka liustike sulaveed. Glatsiaalsed järved jaotatakse kahte rühma: praegu eksisteerivates liustikes kujunevad ja kunagiste liustike loodud järvenõod.

Tänapäeval on liustikega kaetud ligikaudu 10% maismaast. Nüüdisaegsetes liustikes (Gröönimaal, Antarktikas, mäestikes) on järved tekkinud kolmel viisil. Esiteks moodustuvad liustike sulades järved jää pinnal olevatesse lohkudesse ja tühimikesse (joonis 1.55). Enamasti on nad väikesed, madalad ja ajutised ning vahel aasta ringi jääkaane all. Teiseks võivad järved moodustuda, kui liustik või otsamoreen tekitavad sulavee ette paisu (joonis 1.56). Otsamoreen on liustiku serva ees moodustunud kaarjas vallikujuline pinnavorm, mis koosneb liustikust väljasulanud moreenist. Säärased paisjärved võivad säilida ka hiljem, kui neid toitev liustik on ise juba lõplikult sulanud. Kolmandat nüüdisaegset kujunemisviisi esindavad subglatsiaalsed järved, mis paiknevad liustike all. Levinud on sellised järved Antarktikas ja praegu teatakse seal rohkem kui 70 niisugust veekogu. Tuntuim neist on Vostoki järv, mis paikneb peaaegu 4 km paksuse jääkihi all.



**1.56.** Otsamoreeni taha moodustunud Gangapurna järv Nepalis. Otsamoreen on tähistatud noolega.

Mandrijää kunagise pealetungi ja taandumise mõju järvenõgude kujunemisele võib kirjeldada mitut moodi. Pleistotseenis oli maad kattev jääkilp mitme kilomeetri paksune ja avaldas maapinnale tohutut survet. Liustike taandudes algas maapinna kerge, mille tulemusena taandus ka meri ja kunagistest lahtedest kujunesid madalaveelised järved (joonis 1.57). Et maakerge toimub siiani (Loode-Eestis 2–3 mm aastas), jätkub ka meie aladel pidev uute rannajärvede teke. Vähese sügavuse ja maakerke jätkumise tõttu on aga sellised veekogud lühiealised – nende iga on mõõdetav aastasadadega. Kujult kopeerivad nad kunagisi merelahti.

Mitme kilomeetri paksuse jääkilbi liikumine kujundas põhjalikult ümber maapinna, moodustades nii positiivseid kui ka negatiivseid pinnavorme, mis on pannud aluse praegustele järvenõgudele. Mäestike nõlvadel võib leida tsirkusorge – nõgusa põhja ja järskude veerudega amfiteatrikujulisi orvandeid, mille on kujundanud oruliustikud. Pärast liustiku taandumist ja kliima soojenemist võisid neist kujuneda tsirkusjärved (joonis 1.58). Jää liikumine jättis endast maha mitmesuguseid kulutusjälgi. Kulutusnõod on pikliku või ovaalse kujuga suletud nõod, mida jää on süvendanud. Kulutusvagumused on pikemad ja avatud otstega orulaadsed pinnavormid. Näiteks on tüüpiline kulutusnõgu Peipsi järvel. Mandrijää kulutus-kuhjelise tegevuse tulemusena on moodustunud voored. Nende vahel olevates vagumustes paiknevad näiteks Vooremaa järved, mis oma kujult meenutavad jõelõike. Oluline tegur oli ka jää sulamisvee uuristav tegevus, mille tagajärjel kujunesid orujärved (nt Viljandi järv), mis meenutavad jõgesid ja mille nõod on tihti väga järsu kaldenurgaga.

**1.59.** Andsu Ede- ja Peräjärv on tüüpilised söllijärved.

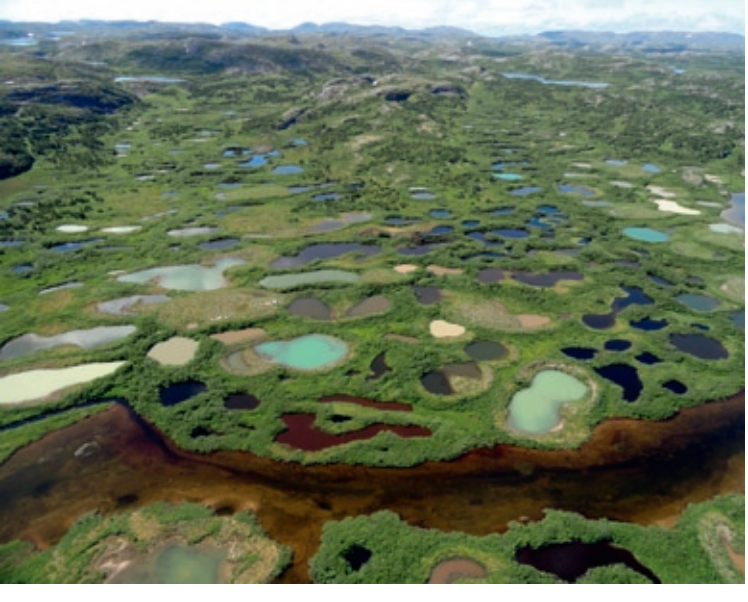
**1.57.** Käina laht Hiiumaal on maakerke tõttu nüüdseks merest peaaegu eraldunud.

**1.58.** Rila tsirkusjärved Bulgaarias. Vasakul sügavaim neist (37,5 m), Okoto järv.

Jää kiirel taandumisel tekkisid mahajäänud ja moreeni sisse mattunud irdjääpankade sulades nõod – **söllid**, kuhu moodustusid hiljem järved (selleks kulus sadu aastaid). Lähestikku paiknenud jääpankadest tekkisid tihti aheljärvestikud. Söllijärved on üsna väikesed, kuid oma pindala kohta paiguti väga sügavad veekogud. Eestis leidub neid rohkelt Lõuna-Eestis (joonis 1.59). Söllid liigitatakse vahel termokarstiliste või glatsiokarstiliste järvenõgude hulka, kuigi viimastel puudub otsene seos liustikega. Termokarsti puhul toimub negatiivsete pinnavormide teke küll maasisese jää sulamise tagajärjel, kuid see on iseloomulik igikeltsaaladele. Nõgudesse kogunev vesi ei saa igikeltsa tõttu maapinda imbuda. Järve kaldanõlvad moodustuvad aga pinnase kerkides, kui külmumine ja sulamine pidevalt vahelduvad (külmakerge; joonis 1.60).

**KARSTIJÄRVED** Karstijärved moodustuvad $CaCO_3$ väljalahustumisel happelise vee (lahustunud $CO_2$) toimel (joonis 1.61). Sellised järved on levinud peamiselt Balkanil, Alpides ja Põhja-Ameerikas. Ka meil on Pandivere servaalal mitu allikajärve (nt Äntu Sinijärv), mida iseloomustab väga suur lubiainesisaldus ja väga suure läbipaistvusega vesi. Karstiveest toituvad näiteks ajutised Võhmetu-Lemmküla-Porkuni järved Lääne-Virumaal. Selles piirkonnas on võimalik jälgida lubjakivisse moodustuvate langatuslehtrite kujunemisfaase. Selline järveteke ei pruugi seotud olla vaid lubjakivimitega. Näiteks mageda vee sattumine soolakaevandustesse on tekitanud väga suuri langatuslehtreid ja toonud endaga kaasa isegi katastroofe, nagu juhtus 1980. a Peigneuri järvega USAs Louisiana osariigis.

**1.60.** Vaade Quebeci põhjaosa maastikule, mida iseloomustavad arvukad termokarstijärved.



**JÕETEKKELISED JÄRVED** Kuigi jõed on enamasti järvedele pigem toitevee allikaks, võivad vooluveekogud osaleda ka järvenõgude kujundamises. Koskede ette moodustuvad näiteks allalangeva vee mõjul **uhtenõod**, mis aja jooksul muutuvad jõesängist laiemaks ja pärast jõevoolu katkemist on käsitatavad juba omaette veekogudena. **Allikatoitelised jäänukjärved** võivad pikka aega püsida ka vanades, juba kuivanud jõeorgudes. Samuti kujunevad järved tihti jõgede kesk- ja alamjooksul voolusängi muutumisest mahajäänud jõeloogetesse, mis setete kuhjumise tõttu on peajõest eraldunud. Neid kutsutakse **vanajõgedeks** ehk **sootideks** (joonis 1.62). Arvukalt võib neid kohata näiteks Emajõel ja selle lisajõgedel.

**1.61.** Plitvica karstijärved Horvaatias. Suur lubiainesisaldus on üks põhjusi, miks järved on väga läbipaistva veega.

**1.62.** Taieri jõgi ja soodijärved Ülem-Taieri märgalal Uus-Meremaal.

**MERETEKKELISED JÄRVED** Peale tektoonilise tekkeviisi pakub mererannik järvede tekkeks ka teisi võimalusi, mis on seotud rannajoone muutumisega. Järvenõgusid kujundavaks teguriks on siis peamiselt vee liikumine ja intensiivne ainete ärakanne. Eristada saab kahte sarnast tekkemehhanismi.

Esimeseks võimaluseks on estuaari sulgumine rannavalli või säärega. Estuaar on jõesuue, mille meri on maapinna vajumise või merevee tõusu tõttu üle ujutanud. Estuaari sulgumise tulemusena moodustub **säärlõugas** ehk **haff**, mis mere taandudes võib säilida reliktjärvena. Tuntuimate selliste veekogude hulka kuuluvad Kura, Visla ja Oderi säärlõugas. Tegu on madalate veekogudega, mis on mage- või riimveelised ja kus veetemperatuur on merevee omast tunduvalt kõrgem. Säärlõukad paiknevad sageli tiheda asustusega piirkondades, mistõttu nende reostuskoormus on suur ja vee kvaliteet tihti väga halb.

Teine tekkeviis on seotud laguunidega – rannikul paiknevate pikliku kujuga ja enamasti vähese soolsusega või riimveeliste veekogudega. Uhteliivade kuhjumise tagajärjel laguunid eralduvad ja kujunevad välja rannajärved (joonis 1.63). Need ei pruugi aga kuigi püsivad olla, sest tugevad tormilained võivad liivabarjääri lõhkuda ning ühenduse merega taastada.

**TUULETEKKELISED JÄRVED** Need eksootilised järved on tuntud ka kui **eoolilise tekkega** järved. Nad moodustuvad liiva ümberpaigutumise tagajärjel kujunenud nõgudesse. Tuule toimel liikuv liiv tõkestab kas jõevoolu või eraldab lahesopi. Sageli on nii kujunenud järved ajutise iseloomuga ja väikesed (alla 1 km²). Selline tekkeviis on levinud Uus-Meremaal ja Austraalias. Neist viimase puhul on heaks näiteks Murray-Darlingi vesikond, kus toimub pidev uute tuuletekkeliste järvede kujunemine.

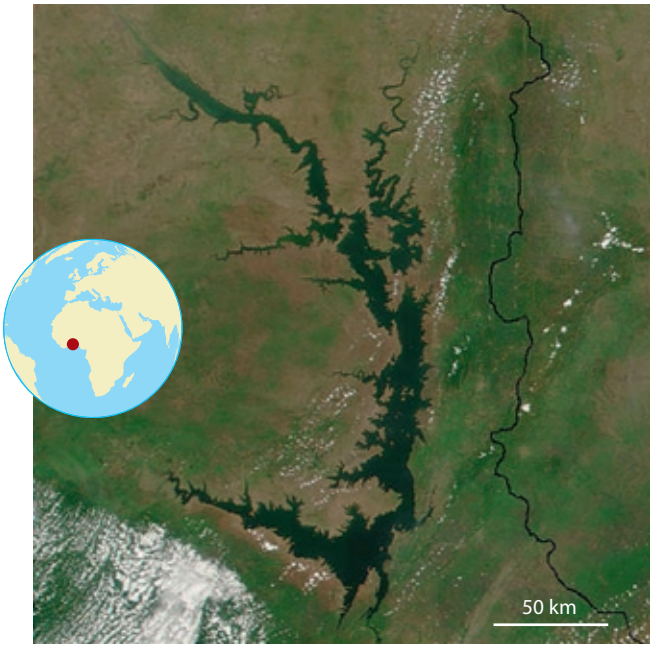
**1.63.** Laialepa laht Saaremaal Harilaiul. Liivased setted paigutuvad pidevalt ümber madaliku, kus uuristav toime avaldub läänest ja liiv kuhjub idas. Kirdekaldal eraldab järve merest vaid liivavall.

**Tuuletekkelised järved**. Ounianga järved (kokku 18) Sahara kõrbes Tšaadis (satelliidifoto). Need on jäänukid kunagisest suurest, võib-olla kümneid kilomeetreid pikast järvest, mis siin laius umbes 14 800 kuni 5500 aastat tagasi. Hilisemal kuival ja kuumal ajal vähenes järve pindala ning pealetungivad düünid jaotasid veekogu osadeks.

**BIOLOOGILINE JÄRVETEKE** Selle tekkeviisi puhul on inimene oma tegevusega kujundanud järvenõo või paisutanud üles mõne jõelõigu. Jõgesid paisutavad ka koprad. Paisjärvi ei tuleks tegelikult arvata mitte järvede, vaid muudetud jõgede hulka. Tihti nimetatakse selliseid veekogusid **tehisjärvedeks** ja käsitletakse looduslikest järvedest eraldi. Võrreldes looduslike järvedega kipuvad tehisveekogud ilma pideva hoolduseta lühiealised olema, sest jõgedele rajatuna täituvad nad kiiresti setetega ning paiknevad tihti ka tiheda inimasustusega või põllumajanduspiirkondades, kus reostuskoormus on suur. Kujult on nad väga varieeruvad, kopeerides enamasti ümbritseva maastiku reljeefi iseärasusi. Suurte ja eeldatavalt vananemiskindlate tehisjärvede rajamine hoogustus 20. sajandil ning praegu arvatakse tehisveekogude pindala olevat vähemalt 300 000 km$^2$. Maailma suurim paisjärv on Ghanas paiknev Volta veehoidla pindalaga 8052 km$^2$ (joonis 1.64). See rajati peamiselt elektri tootmiseks. Ulatuslike alade üleujutamise tõttu pidi elupaika vahetama vähemalt 78 000 inimest.

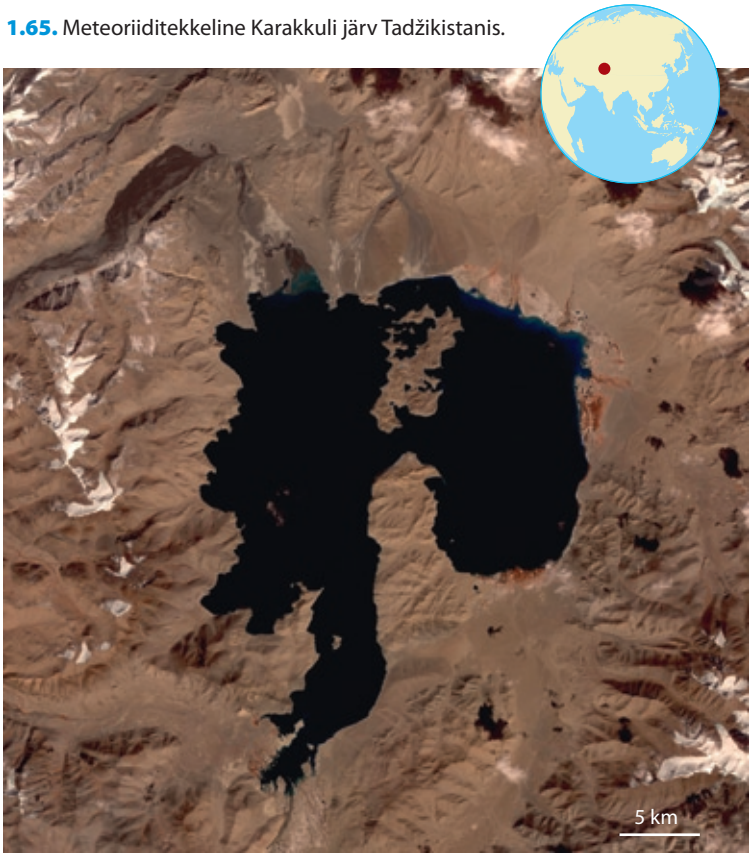
Järvenõgude tekkes võivad osaleda ka mereorganismid. Õisloomade hulka kuuluvad korallid moodustavad oma elutegevuse käigus lubjakivist rõngassaari ehk atolle. Need on ümara põhiplaaniga korallrahud, mille keskel paikneb ookeanist osaliselt või täielikult eraldatud laguun. Bioloogilise tekkeviisi alla võib veel liigitada sekundaarsete huumustoiteliste järvede kujunemise. Need pole kunagiste järvede jäänukid, nagu huumustoitelised järved, vaid moodustuvad laugaste liitumise teel või lasundiliste vooluteede väljumisel raba pinnale raba arengu hilisemas järgus.

**1.64.** Maailma suurim paisjärv Volta kosmosest nähtuna.




**METEORIIDITEKKELISED JÄRVED** Need on kogu maailmas haruldased veekogud, mis paiknevad kunagistes meteoriidikraatrites. Kaali järv Saaremaal on ainuke omataoline Euroopas. Selle pisiveekogu (läbimõõt olenevalt veeseisust 15–40 m) vanus arvatakse olevat vahemikus 3500–7500 a. Oma tekkemomendil on väiksemad meteoriiditekkelised järved korrapärase kujuga ja väga sarnased vulkaaniliste järvedega. Suuremate, üle 20 km läbimõõduga järvede kuju on juba keerukam, sest peale põhikraatri leidub veel väiksemaid kõrvalkraatreid ning tihti on moodustunud mitmesugused terrassid ja poolsaared. Meteoriiditekkelised järved on pikaealised, sest nende valgala on järve enda pindalaga võrreldes väga väike. Sageli on tegu umbjärvedega ja ainete sissekanne järve tühine. Kõrged kraatriseinad varjavad järvi tuule eest ja vesi võib olla teravalt kihistunud või lausa meromiktiline. Hea näide suurest meteoriiditekkelisest järvest on Karakkuli järv Tadžikistanis Pamiiri mäestikus (joonis 1.65). 3900 m kõrgusel paiknev veekogu kujunes u 5 mln aastat tagasi. Tugevalt liigestatud kaldajoonega järve meteoriiditekkeline päritolu selgitati välja alles kosmosefotode põhjal. Tekkemomendil oli kraatri läbimõõt umbes 45 km, kuid praeguseks on tektooniliste protsesside tõttu järve suurim pikkus vaid 25 km. Poolsaar jagab järve kaheks, idapoolseks madalamaks (13–18 m) ja läänepoolseks sügavamaks osaks (221–230 m).

**1.65.** Meteoriiditekkeline Karakkuli järv Tadžikistanis.



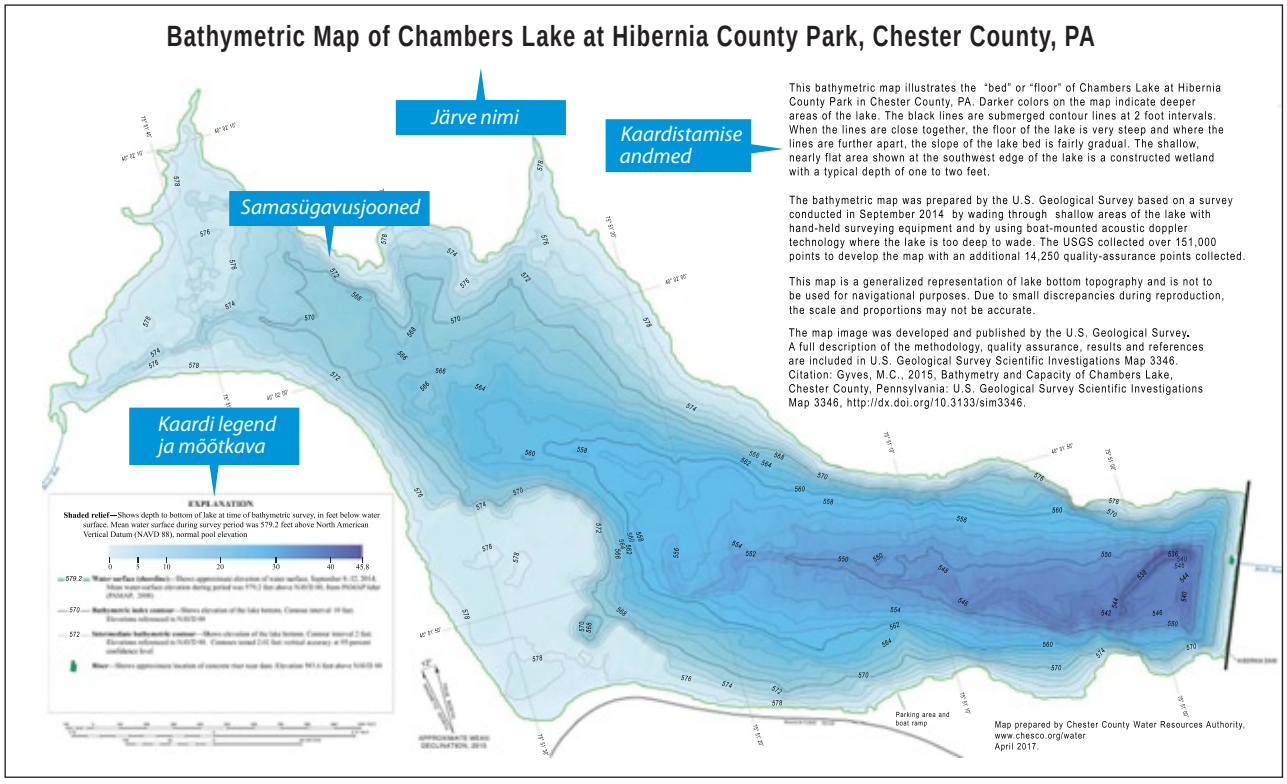
## 1.3.6. Järvede geomorfoloogia

Kui paluda tavalisel inimesel kirjeldada suvalist järve, siis üpris tõenäoliselt mainib ta esmalt järve suurust, vee läbipaistvust ja värvust, veetaimestiku hulka ning kalavarusid. Seega meenuvad kõigepealt just sellised näitajad, mis on olulised veekogu praktilisel kasutamisel. Siiski on järve enda iseloomustamise seisukohalt palju olulisemad järvenõo kuju ja ehitust iseloomustavad parameetrid, sest need avaldavad väga suurt mõju kõigile järve füüsikalis-keemilistele ja bioloogilistele näitajatele.

Järvenõo tekkimise, kuju ja ehitusega seotud iseärasusi uurib **järve morfoloogia**, mis on järvede majandamise ja taastamisega tegelevatele inimestele sama tähtis kui näiteks arstidele anatoomia tundmine. Kui tohtrid panevad diagnoosi ja ravivad patsienti paremini tänu kehaehituse ja selle funktsioonide heale tundmisele, siis limnoloogid ja järvede majandajad oskavad järve kohta nii mõndagi öelda, uurides selle **morfomeetrilisi näitajaid**, nagu pindala, sügavus, pikkus jne. Näiteks suure pindalaga, kuid madala Võrtsjärve puhul peab majandaja arvestama tugeva lainetusega, sest järv on avatud tuultele, ja põhjasetete üleskeerutamisest tingitud vee sogasusega. Järve kaldale ehitisi projekteerides tuleks seega arvestada lainete ja jää võimaliku kulutava või purustava tegevusega ning sellega, et pidevalt sogane vesi ei pruugi puhkajatele sugugi meelepärane olla. Niisiis võib öelda, et olenemata järvenõo kujunemise viisist panevad morfomeetrilised näitajad, nagu veepeegli ja järvenõo kuju, pindala ja sügavus, paika järve segunemise, kihistumise, settimise, resuspensiooni ja litoraaliala ulatuse kui peamised ökosüsteemi toimimist määravad tegurid.

■ **SÜGAVUSKAARDID** Kui kavandada reisi tundmatusse piirkonda, on mõistlik teekonnale kaasa võtta kaart. Eriti kasulik on topograafiline kaart, mis annab rohkelt informatsiooni maastiku iseärasuste, pinnamoe, kõrguste ja veekogude paiknemise kohta. **Sügavuskaardid** sarnanevad topograafiliste kaartidega, ainult et sügavuskaartide puhul paikneb maastik koos oma iseärasustega vee all. Batümeetriline kaart kujutab endast järve pinnale kantud **samasügavusjoonte** ehk **isobaatide** jada (joonis 1.66), mis iseloomustab kindlates vahemikes sügavuse muutumist veekogu eri piirkondades. Et midagi öelda järve morfomeetriliste näitajate kohta, tuleb hankida või hoopis ise koostada järve sügavuskaart. Millised on aga heale sügavuskaardile esitatavad nõuded? Üldjuhul peaksid seal kajastuma järgmised andmed: järve nimi ja asend lähikonnas paiknevate teiste objektide suhtes; korralik mõõteskaala; kindla intervalliga samasügavusjooned; asend ilmakaarte järgi; kaardistamise aeg ja kaardistaja andmed.

**1.66.** Batümeetriline kaart (Chambersi paisjärv USAs Pennsylvanias).



Eesti väikejärvede sügavuskaarte on napilt ja neil kajastuv info kaunis puudulik. Peamiselt pärinevad kaardid Heinrich Riikoja 1930. a uurimusest „Zur Morphometrie einiger Seen Eestis“ („Mõnede Eesti järvede morfomeetriast“), mida geograafid (Tõnis Kallejärv jt) on hiljem kontrollinud ja täiendanud. Suurema osa järvede kohta puuduvad kaardid üldse ning teada on vaid mõni üksik morfomeetriline näitaja, nagu pindala ja suurim sügavus. Digitaalsed kaardid on loodud vaid suuremate siseveekogude kohta, nagu Peipsi, Lämmijärv, Ülemiste järv ja Emajõgi.

**Tabel 1.8. KÜMNE MAAILMA SUURIMA JÄRVE PINDALA JA PIKKUS**

| Järv | Pindala ($km^2$) | Pikkus (km) | Asukoht |
|---|---|---|---|
| Kaspia meri | 371 000 | 1199 | Iraan, Venemaa, Aserbaidžaan, Kasahstan, Türkmenistan |
| Ülemjärv | 82 414 | 616 | Kanada, USA |
| Victoria | 69 485 | 322 | Uganda, Keenia, Tansaania |
| Huron | 59 600 | 332 | Kanada, USA |
| Michigan | 58 000 | 494 | USA |
| Tanganjika | 32 893 | 676 | Tansaania, Kongo DV, Sambia |
| Baikal | 31 500 | 636 | Venemaa |
| Suur Karujärv | 31 080 | 373 | Kanada |
| Njassa | 30 044 | 579 | Malawi, Mosambiik, Tansaania |
| Suur Orjajärv | 28 930 | 480 | Kanada |

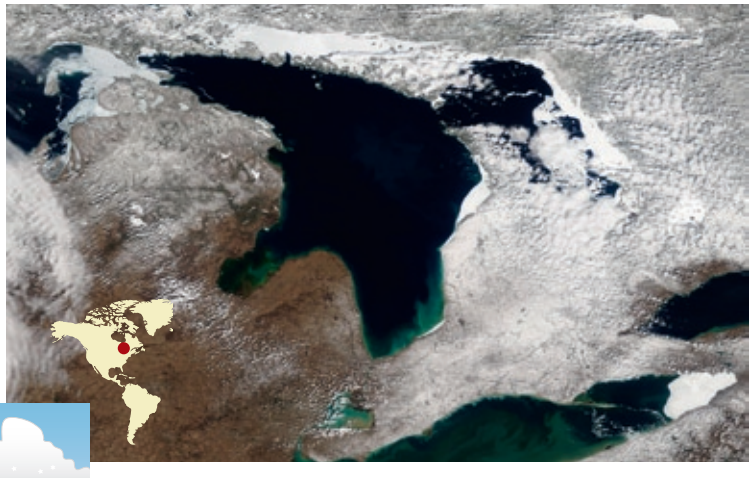
**PINDALA** **Pindala** (*A*) on üks kõige tuntumaid ja laialdasemalt kasutatavaid morfomeetrilisi näitajaid. See kajastab otseselt järve suurust, mida väljendatakse hektarites või ruutkilomeetrites, angloameerika ühikute puhul aakrites. Enamik maailma järvi on üsna väikese pindalaga. Vaid 253 järve pindala on suurem kui 500 $km^2$ ning nende hulgast eristuvad selgelt mõned väga suured järved (tabel 1.8). Suurima pindalaga järv on soolaka veega Kaspia meri. Kaspia rekord on aga teistest mäekõrguselt üle: tema pindala on suurem kui kuue talle mõõtmetelt järgneva järve pindala kokku. Traditsioonilises tähenduses on suurim mageveejärv Ülemjärv (82 103 $km^2$). Kuid tegelikult paiknevad Michigani ja Huroni järv samas jõestikus samal veetasemel ning nende pindala on kokku 117 350 $km^2$.

Pindala on üks kõige tähtsamaid järve morfomeetrilisi näitajaid, sest ta mitte ainult ei iseloomusta järve suurust, vaid mõjutab mitmel viisil järve ökosüsteemi.

Esiteks sõltub järve pindalast tema avatus tuultele. Üldjuhul tekib suure pindalaga järvedel tugevam lainetus, mis segab ulatuslikumalt veemasse ja mõjutab väikese sügavuse korral ka põhjakihte, põhjustades setete resuspensiooni ning häirides veetaimestiku kasvu ja arengut. Setete üleskeerutamine mõjutab omakorda vee läbipaistvust ja toiteainete kättesaadavust. Tugev lainetus on peamine kallaste erosiooni põhjustaja.

Teine oluline tegur on sademete ja aurumise vahekord. Enamasti on suurte järvede kohal vähem sademeid, kuid toimub intensiivne aurumine. Suurtele järvedele on seetõttu talvel omane nn järveefekt: kui jahe õhk liigub üle sooja järvepinna, kondenseerub veeaur paksudeks pilvedeks ja võimalikud on tugevad lumesajud. Järveefekt on väga iseloomulik näiteks Suure järvistuga piirnevatele aladele (joonis 1.67).

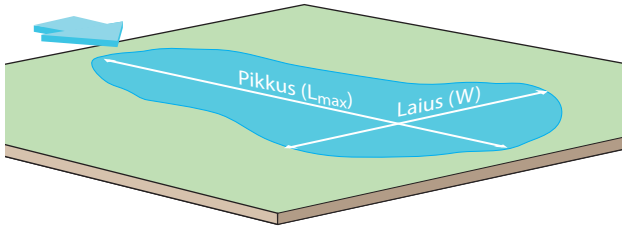
Kolmandaks on suure pindalaga järved tundlikumad atmosfäärist lähtuva reostuskoormuse suhtes, sest võimalused kuiv- ja märgdepositsiooniks on oluliselt suuremad. Ja lõpuks sõltub pindalast kaldavööndi ja avavee osatähtsus järve kui terviku funktsioneerimisel. Väikestes järvedes on litoraali ja seal toimuvate protsesside mõju järve aine- ja energiaringetele suurem.



**1.67.** Järveefekt saab tekkida vaid kindlatel tingimustel: temperatuurierinevus peab olema vähemalt 8–13 kraadi, veekogu laius vähemalt 80–100 km ja tuule suund püsiv. Fotol: kevadine lumetorm (1. aprillil 2019) tõi Suures järvistus Huroni ja Erie järve idakallastele paksu lume.

**PINDALAGA SEOTUD PARAMEETRID** Peale pindala on sügavuskaardilt võimalik välja lugeda veel mitut parameetrit, mis iseloomustavad järve veepeegli suurust ja kuju. **Suurim pikkus** ($L_{max}$) on kahe teineteisest kõige kaugemal asetseva kaldajoonepunkti vahekaugus mõõdetuna mööda järve pinda (joonis 1.68). Suurima pikkusega on tihedalt seotud **laine ajutee**, mis väljendab vaba veevälja, mille ulatuses saab tuul laineid kasvatada. Laineteekonna pikkus koos tuule tugevusega määrab lainete potentsiaalse kõrguse. Järveefekti tekkeks peab laineteekonna pikkus olema vähemalt 100 km. Järve laiust võib iseloomustada kahel viisil. **Suurim laius** ($W$ või $b$) on suurim kaugus kallaste vahel mõõdetuna risti järve pikkust tähistava sirgega. **Keskmine laius** on arvutuslik näitaja – pindala ja pikkuse suhe.

**Kaldajoone pikkus** ($L$). See näitaja iseloomustab lineaarselt järve ümbermõõtu konkreetse veetaseme juures ja annab hea ülevaate järve ja teda ümbritseva maismaa vahelise ökotoni ulatusest. Kaldajoone pikkus ei anna siiski täit informatsiooni veepeegli kuju kohta,




**1.68.** Järve suurima pikkuse ($L_{max}$) ja suurima laiuse ($W$) leidmine. Laineteekonna pikkus kattub antud juhul suurima pikkusega.

mis võib järve tekkeviisist olenevalt väga mitmesugune olla (joonis 1.69). Kaldajoone graafiline kujutamine on küll näitlik, kuid seda infot on statistiliselt raske töödelda. Seetõttu on praktikas levinud **kaldajoone keerukuse** ehk **liigendatuse** ($D_S$) arvutamine, mis on kaldajoone tegeliku pikkuse ja järve pindalaga võrdse ringi ümbermõõdu suhe:

$$D_S = \frac{L}{2\sqrt{\pi A}}$$

Tegu on olulise parameetriga litoraalikoosluste hulga ja ulatuse hindamisel. Ideaalse ringikujulise järve $D_S = 1$. Paisjärvedel, mis on rajatud keerulise reljeefiga maastikule, on sagedasti $D_S > 4$ (joonis 1.70).

Kujult ideaalsele ringile lähedaste järvede puhul on enamasti tegu kaldeerajärvede, maaride või meteoriiditekkeliste veekogudega.

Ümara kujuga ($D_S = 1{,}5$) järvede hulka satuvad eespool nimetatud siis, kui nende kaldajoont on pikema aja jooksul kujundanud mingid loodusjõud. Ümarad on ka söllijärved, tsirkusjärved ja kunagistest merelahtedest maakerke tulemusena moodustunud rannajärved.

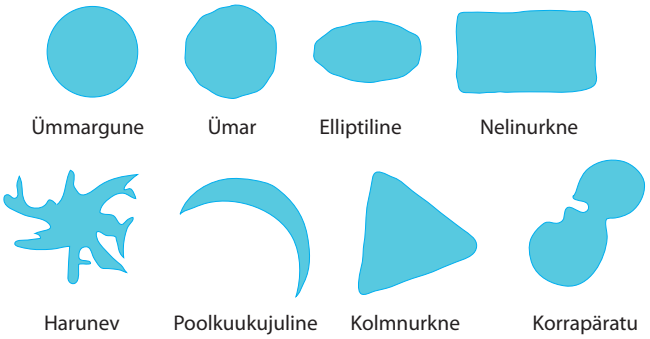
Elliptiliste järvede teke on mõneti ebaselge, kuid sellise kuju saab järv pärast järvenõo moodustumist mingite väliste jõudude toimel. Näiteks rannikul asuvad tuuletekkelised järved on elliptilise kaldajoonega ning nende $D_S$ on juba üle 2.

Harunev kuju on iseloomulik paisjärvedele: nende harud kopeerivad kunagiste jõeorgude asendit ja kuju. Paisjärvede kaldajoone liigendatus on väga suur ($D_S > 5$). Tehisveekogud on tihti nelinurksed ja samasuguse kujuga võivad olla ka tektoonilise tekkega järved.

Poolkuu- või komakujulised on enamasti soodijärved ehk vanajõed, samuti mõned vulkaanilise tekkega järved. Viimaste puhul on uus vulkaanikoonus hakanud kasvama servast, muutes järve poolkuukujuliseks.

Võrdlemisi harvad on kolmnurksed järved; nende teket seostatakse tektooniliste protsessidega. Ka glatsiaalse tekkega järved võivad sellise kuju omandada.

Ning lõpuks on osa järvi lihtsalt ebakorrapärase kujuga hoolimata nende tavapärasest tekkeviisist.




**1.69.** Järvede veepeegli võimalikke kujusid.

**1.70.** Keeruka kaldajoonega Shasta paisjärv USAs Californias.

■ **SÜGAVUS** Järvede geomorfoloogias ei saa järvenõo kirjeldamisel piirduda ainult pikkuse, laiuse ja pindalaga, sest järved on kolmemõõtmelised loodusobjektid ning meil on hädavajalik teada nii sügavust kui ka mahtu. Tähtsaim neist ja ühtlasi tavainimese arusaama järgi üks olulisimaid näitajaid on **sügavus** ($Z$). Üldiselt on järved ookeanidega võrreldes üsna madalad ja vaid kolme järve sügavus ületab ühte kilomeetrit (tabel 1.9). Sügavuse suurim roll on seotud veesamba kihistumise ja selle iseloomuga. Madalad järved ei kihistu püsivalt kunagi. Sügavates järvedes tekib aga stabiilne soojuskihistumus, mis omakorda mõjutab valgustingimusi ning hüpolimnionis leiduvate gaaside ja toitesoolade hulka. Sügavus määrab ka ainevahetuse põhjasetetega, mistõttu väga sügavad järved võivad olla morfomeetriliselt vähetoitelised, sest põhjakihtides olevad toiteained ei jõua pindmisse valgustatud veekihti. Ka veetaimestiku levikupiir on seotud järve sügavusega.

**Suurim sügavus** ($Z_{max}$) on ära toodud peaaegu kõigi järvede morfomeetriliste näitajate loetelus, kuid limnoloogi jaoks on see väheütlev parameeter, sest suurima sügavusega veekiht moodustab enamasti järvepinnast ja veemassist vaid tühise osa. Tunduvalt teaberikkam on **suhteline sügavus** ($Z_r$), mis näitab, mitu protsenti moodustab järve suurim sügavus järve keskmisest läbimõõdust (ringi läbimõõdust, mille pindala on võrdne järve pindalaga). Seda arvutatakse järgmiselt:

$$Z_r = \frac{50 \cdot Z_{max} \cdot \sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}$$

Tabel 1.9. KÜMME MAAILMA SÜGAVAIMAT JÄRVE

| Järv | Sügavus (m) | Asukoht |
|---|---|---|
| Baikal | 1642 | Venemaa |
| Tanganjika | 1470 | Tansaania, Konga DV, Sambia |
| Kaspia meri | 1025 | Iraan, Venemaa, Aserbaidžaan, Kasahstan, Türkmenistan |
| O'Higgins / San Martin | 836 | Tšiili |
| Njassa | 706 | Malawi, Mosambiik, Tansaania |
| Õsõk-Köl | 668 | Kõrgõzstan |
| Suur Orjajärv | 614 | Kanada |
| Crater | 592 | USA |
| Matano | 590 | Indoneesia |
| General Carrera / Buenos Aires | 586 | Tšiili, Argentina |

Tabelist puudub Antarktikas paiknev Vostoki järv, mille suurimaks sügavuseks arvatakse olevat 500–900 m.

Enamiku järvede suhteline sügavus on alla 2% ning üksnes väga sügavatel ja väikese pindalaga järvedel on $Z_r > 4\%$. Suure suhtelise sügavuse korral on takistatud vee täielik segunemine ja osa hüpolimnionist kannatab hapnikupuuduse all.

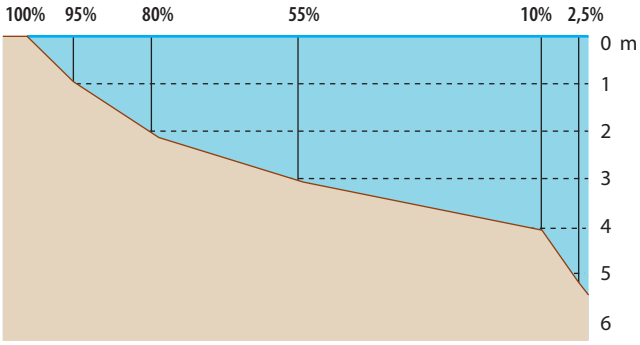
Suhteline sügavus aetakse tihti segamini teise arvutusliku näitajaga, milleks on **keskmine sügavus** ($Z_m$). Tegu on mahu ja pindala suhtega ($V/A$) ning see on üks parimaid üksiknäitajaid järve iseloomustamisel. Suurte järvede puhul on keskmisel sügavusel selge pöördvõrdeline seos kõigi troofiliste tasemete produktiivsusega. Madalad järved on üldiselt sügavamatest produktiivsemad. Järve mõõtmete vähenedes see seos siiski ähmastub. Keskmine sügavus iseloomustab hästi ka lainetuse ja segunemise võimalikku mõju põhjasetetele.

## SÜGAVUSKAARTIDE KOOSTAMINE

Järve sügavuskaardi koostamine on lihtne, kuid töömahukas tegevus. Esmalt tuleks hankida või luua järve kaldajoone kontuur. Selle võib kopeerida mõnelt kaardilt või aerofotolt, kuid parima tulemuse annab väljavõte digitaalselt põhikaardilt. Kaardistamiseks tuleb mõõta sügavus kindlates punktides, mis kataksid kogu järve ning arvestaksid ka võimalikke morfomeetrilisi iseärasusi (näiteks kaldajoone keerukus, kiirelt muutuv sügavus). Kaartide koostamisel tehakse mõõtmised enamasti 50 x 50 m ruudustiku kõigis sõlmpunktides, asetades ruudustiku piisava suurendusega järvekontuurile. Mõõtepunkti asukoht määratakse satelliitnavigatsiooni abil. Sügavuse hindamisel on põhiliseks vahendiks saanud elektrooniline kajalood. Lihtsamate mõõtmiste puhul kasutatakse ka käsiloodi, mõõtes põhjalastava raskuse külge kinnitatud loodliini pikkuse. Loodimine ja asukoha määramine on omavahel ühendatud digitaalsete meetoditega. Piisab, kui vastava seadmestikuga varustatud paat (vt juures-

olev foto) läbib järvel varem planeeritud teekonna, ning arvuti määrab kajaloodi ja GPS-anduri lugemi põhjal automaatselt sügavuse ja geograafilised koordinaadid. Nende andmete põhjal koostatakse juba täisdigitaalne sügavuskaart.

Sügavusega seotud näitajaid saab kasutada järvenõo kuju iseloomustamisel. Üks selliseid näitajaid on **batümeetriline** ehk **hüpsograafiline kõver**, mis näitab veekogu (nt järve) põhja pindala jaotumist (ruutmeetrites või protsentides) kõrguse järgi veepinnast ja annab põhja pinna üldistatud profiili (joonis 1.71). Ristkoordinaadistikus on püsteljele märgitud põhja sügavus, rõhtteljele pindala. Siiski on tegu ligikaudse lähendusega, sest järvenõlva kalde tõttu on konkreetsel sügavusel eksponeeritud põhjasetete tegelik pindala arvutatust suurem. Näiteks 15° nõlvakalde korral on tegelik põhjasetete pindala 1,04 korda ja 35° kalde korral juba 1,22 korda suurem kui veepeegli põhjal arvutatu. Hüpsograafiline kõver annab ettekujutuse biotoopide levikust järves ja võimaldab hinnata veetaseme muutustest tingitud mõju.




**1.71.** Näide hüpsograafilisest kõverast.

■ **MAHT** **Maht** ($V$) väljendab järvenõos oleva vee hulka ja seda mõõdetakse kasutatavast mõõtühikute süsteemist olenevalt kas kuup(kilo)meetrites või aakerjalgades. Järve mahtu võib arvutada kahel meetodil. Esimese puhul määratakse maht kihtide kaupa **samasügavusjoonte** (isobaatide) põhjal, lähtudes tüvikoonuse ruumalast (joonis 1.72):

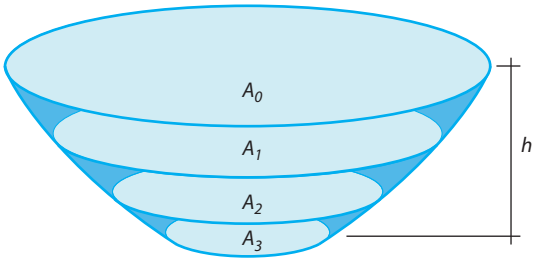
$$V = \frac{h}{3}\left(A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 \cdot A_2}\right),$$

kus $V$ on kihi maht, $h$ isobaatide vahekaugus ning $A_1$ ja $A_2$ järjestikustele isobaatidele vastavad pindalad.

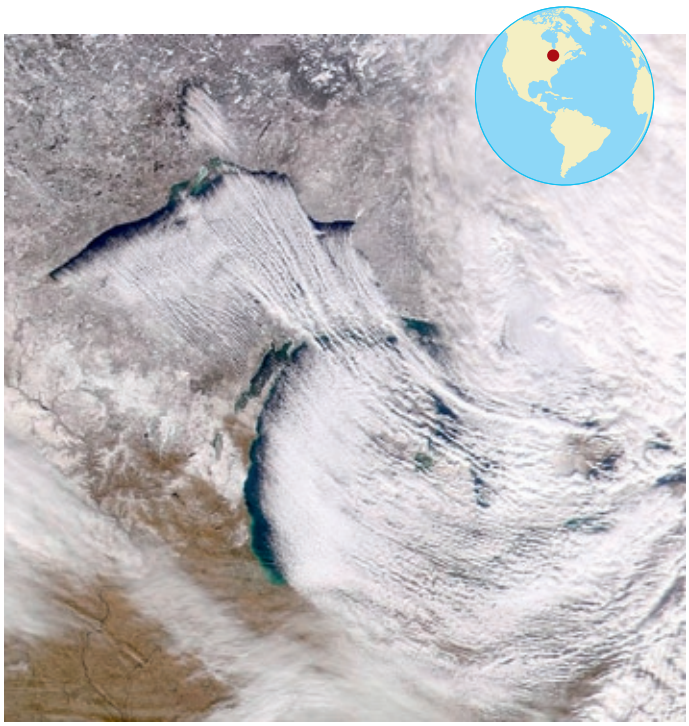
Teine võimalus on kasutada mahu leidmiseks batümeetrilist kõverat:

$$V = \int_{Z_0}^{Z_{max}} A_z \cdot d_z$$

Nii nagu pindalast sõltub ka järve mahust mitu ökosüsteemi tugevalt mõjutavat tegurit. Esiteks on järve maht seotud järve soojusvaruga, mis omakorda mõjutab ilmaolusid järve lähiümbruses (joonis 1.73). Vee suure soojusmahtuvuse tõttu vajavad suure veemahuga järved soojenemiseks ja jahtumiseks rohkem aega ning seepärast on kevadeti nende lähiümbruses ilm alati jahedam ja sügisel soojem. Teiseks sõltub veemahust sissekantavate ainete lahjenemise määr. See on oluline näiteks valgalalt lähtuva toiteaine- ja reostuskoormuse arvutamisel. Kolmandaks määrab maht ära veevahetuse kiiruse, mis on suuremates järvedes üldjuhul aeglasem. Nii vahetub vesi näiteks Võrtsjärves aastaga ja Peipsi järves kahe aastaga. Baikali järves (maht 23 600 km$^3$, suurim mageveereservuaar) kulub aga veevahetuseks tervelt 330 aastat.




**1.72.** Järve mahu arvutamine tüvikoonuse ruumala põhjal.



**1.73.** Lumepilved Suure järvistu kohal. Suure veemassi tõttu jahtuvad järved aeglaselt ning külma arktilise õhu liikumisel üle järvepinna moodustuvad paksud lumepilved, mis annavad rannikul rikkalikult sademeid.

**EESTI JÄRVEDE GEOMORFOLOOGIA** Enamik Eesti järvi on glatsiaalse tekkega, kuid arvukalt leidub ka tektoonilise tekkeviisiga rannajärvi ja tehisveekogusid. Tekkeviis kajastub hästi ka meie järvede veepeegli kujus. Ideaalselt ümmargusi järvi on meil väga vähe; tuntuim neist on Kaali järv. Paljud ümara kujuga järved on sõllijärved, mille nõgu on kujunenud irdunud ja pinnasesse mattunud jääpankade sulamisel. Mandrijää liikumine on kujundanud elliptilise kujuga järvenõgusid. Sellised on näiteks paljud voorte vahel paiknevad järved (joonis 1.74). Arvukalt leidub korrapäraselt nelinurkseid järvi, mis on loodud kas maaparanduse käigus või kujutavad endast vanu, ammendunud karjääre (joonis 1.75). Huvitavatest kujuvormidest tasub veel mainida kolmnurkseid järvi (vt joonis 3.16, lk 299), mis on üldjuhul siiski glatsiaalse tekkega, ning rõngakujulisi järvi. Viimaste tüüpesindaja on Laiuse Kivijärv (joonis 1.76), mis algselt oli ümara kujuga, kuid omandas veetaseme alandamise ja soostumise tõttu lõpuks O-kujulise välimuse.

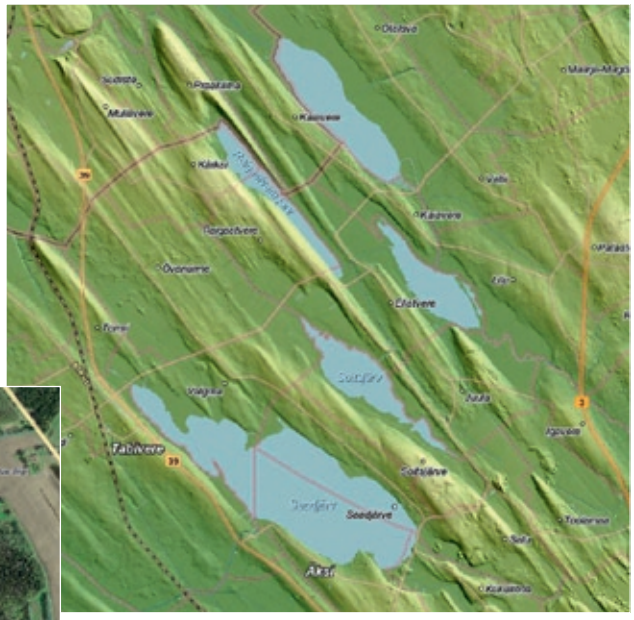
Pindala poolest on Eesti järved võrdlemisi väikesed. Vaid 54 järve pindala küünib üle 100 ha. Teistest selgelt suuremad on Peipsi-Pihkva (pindala 3509 km$^2$) ja Võrtsjärv (260 km$^2$). Suurim paisjärv on Narva veehoidla pindalaga 191 km$^2$. Suure pindalade erinevuse tõttu tavatsetakse ülejäänud järvi kutsuda lihtsalt väikejärvedeks.

Meie järvede kaldajoone liigendatus pole kuigi suur, jäädes 1,2 ja 2,5 vahele. Suurema liigendatusega on paisjärved, looduslikest veekogudest rabalaukad ja rannajärved. Rekordiomanik on Kauksi järv, mille liigendatus on pisut üle 8 (joonis 1.77). Peale selle, et enamik Eesti järvi on väikese pindalaga, pole nad ka teab kui sügavad: vaid 12 järve suurim sügavus ületab 20 meetrit. Sügavaim neist on 38 meetriga Rõuge Suurjärv, mis ühtlasi on esikohal keskmise sügavuse poolest (11,9 m). Üle viie meetri ulatuv keskmine sügavus on mõõdetud vaid u 50 järves.

Looduslike järvede veemahtu puudutavad andmed on väga puudulikud, sest enamasti pole kusagilt võtta korrektseid sügavuskaarte. Seetõttu on mahu arvutamisel sagedasti kasutatud pindala ja keskmise sügavuse korrutist.

**1.77.** Kauksi järv on keerukaima kaldajoone liigendatusega paisjärv Eestis.

**1.76.** Laiuse Kivijärv Jõgevamaal on muutunud hobuserauakujuliseks veetaseme alanemise ja kinnikasvamise käigus.




**1.74.** Vooremaa järved (ülevalt alates Kaiavere, Raigastvere, Elistvere, Soitsjärv ja Saadjärv) on voortevahelistesse nõgudesse kujundanud liikuv mandrijää.

**1.75.** Nelinurkse kujuga vana kruusakarjäär Harjumaal.

### 1.3.7. Tehisveekogud ja veehoidlad

Eesti veekogude registris on seisuveekogud jaotatud looduslikeks, tehis- ja paisjärvedeks. Paisjärved kujundatakse vooluvete tõkestamise teel. Tehisjärvede nõgu on maasse kaevatud süvend, kuhu koguneb pinna- ja põhjavesi, või täidetakse see mõne loodusliku veekogu veega.

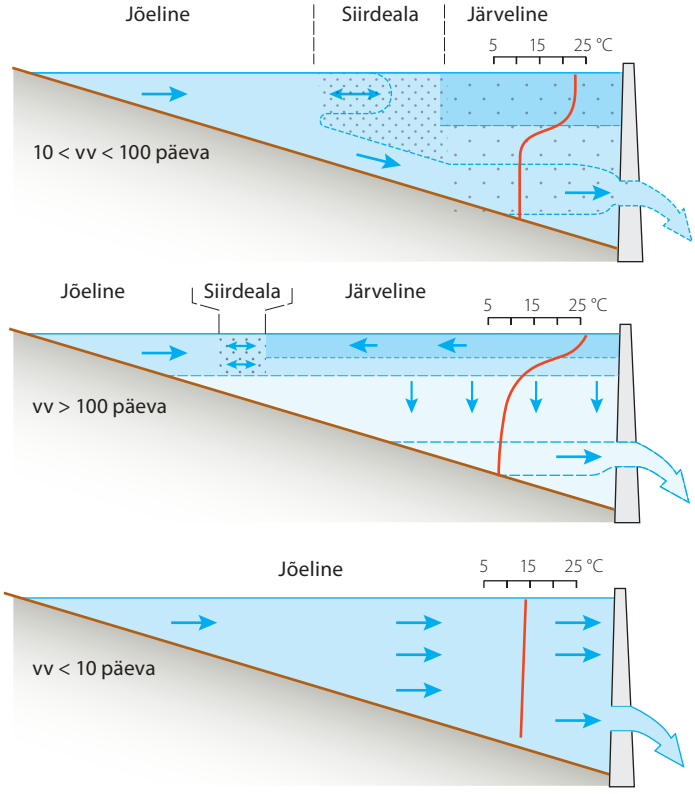
Praktikas tehakse looduslikel, tehis- ja paisjärvedel limnoloogiliste näitajate ja veekvaliteedi parameetrite järgi harva vahet. Esmapilgul tunduvad need eri tüüpi tekkeviisiga veekogud tõesti üsna ühtemoodi välja nägevat. Teisalt on neil aga erinevusi, mida on hädavajalik teada nende veekogude tervendamisel ja majandamisel. Näiteks veekvaliteedi seisukohast käituvad paisjärved hoopis teisiti kui looduslikud järved. Seetõttu pole ka mõistlik nende puhul rakendada looduslike järvede kohta kogutud spetsiifilisi teadmisi ja kogemusi.

Madalad ja väikese pindalaga tehisjärved (tiigid) on talitluselt ja limnoloogiliste näitajate poolest looduslike järvedega üpris sarnased. Tihti on vanemaid ja juba väljakujunenud elustikuga tehisjärvi pealiskaudsel vaatlusel väga raske eristada looduslikest järvedest. Erinevused ilmnevad aga siis, kui võrrelda neid suurte, sügavate ja kihistuvate paisjärvedega. Paisjärvede omapära tingivad peamiselt valgala, järvenõo ja veetaseme reguleerimise insener-tehnilised iseärasused. Vähegi arvestatavate mõõtmete korral tulevad paisjärvedes esile longitudinaalsed ehk piki kunagist jõeorgu kulgevad muutused abiootilistes näitajates. Tavaliselt on ühele konkreetsele jõelõigule rajatud paisjärves eristatavad kolm piirkonda: jõeline, siirdeala ja järveline (joonis 1.78).

*Jõeline piirkond* on enamasti madal ja kitsas ning kopeerib suuremal või vähemal määral kunagist jõesängi. Vesi voolab keeriseliselt ja voolukiirus on suur. Selle piirkonna ulatus paisjärves oleneb üldjuhul veevahetuse kiirusest ja veetasemest.

*Siirdealas* hakkab vooluveekogust kujunema seisuveekogu ning seda piirkonda iseloomustab voolukiiruse järsk langus ja kihistumisilmingute teke. Tavaliselt on jõevesi paisjärve veest madalama temperatuuri ja suurema tihedusega. Seetõttu laskub see sügavusele, kus erinevused vee tiheduses puuduvad, ja jätkab oma teekonda kas mööda veekogu põhja või nn vahevooluna. Jõevesi sisaldab tihti rohkelt hõljuvaid osakesi ja on väiksema läbipaistvusega kui paisjärve vesi ning siirdealas on võimalik veekihtide eristumine läbipaistvuse alusel. Siirdeala on ühtlasi piirkond, kus toimub kõige intensiivsem setete kuhjumine.

*Järveline osa* on veehoidlas juba tasakaalustunud ja stagneerunud piirkond, kus vee liikumine toimub tuule jõul ning kihistumus on kõige teravam. Veetaseme kõikumine on paisjärvedes märksa suurem kui looduslikes. Kõikumise ulatuse määravad juurdevoolu varieeruvus ja paisjärve otstarve.




**1.78.** Paisjärvede hüdroloogilised iseärasused olenevad suurusest ja vooluhulgast. Piisavalt suurte mõõtmete ja aeglase veevahetuse (vv) korral on paisjärves selgesti eristatavad jõeline ja järveline ala koos siirdealaga (ülal ja keskel). Kiire veevahetuse korral on kogu paisjärv jõelise iseloomuga (all).

Hüdrokeemiliselt koostiselt peegeldavad paisjärved ümbritsevat valgala samamoodi nagu looduslikud järved. Paisjärvede vesi on oma kvaliteedilt ja omadustelt väga sarnane jõeveega. Üksnes suuremate paisjärvede puhul, kus on selgelt välja kujunenud järveline osa, võib täheldada suuremaid erinevusi. Paisjärvede toiteainekoormus on sarnase maakasutusega valgala korral alati suurem kui looduslikel järvedel. Selle põhjuseks on paisjärvede suurem valgala. Tihti on tehisveekogud rajatud maastiku ilmestamiseks põllumajanduslikult intensiivselt haritavatele aladele ning seetõttu kujunevad neist omalaadsed toiteainete reservuaarid. Fosfori ja üldse ainete kinnipidamine on veevahetuse kiirusest olenevalt veehoidlates suurem. Looduslikud järved vajavad tunduvalt pikemat veevahetuse aega, et tõhusalt fosforit kinni pidada. Intensiivne setete kogunemine ja toitelisuse kasv põhjustavad paisjärvede kiirema vananemise. Looduslikel järvedel kestab see tuhandeid aastaid, kuid paisjärvedel tihti vaid aastakümneid.

Paisjärvede elustikku on Eestis looduslike järvede omaga võrreldes üsna vähe uuritud. Eestis sarnanevad nad karedaveeliste järvedega, mis kipuvad taimi täis kasvama. Põhjuseks on nende madalus ning lubjarikka pinnakatte ja põhjaallikate mõju. Selliste järvede vesi on suure läbipaistvusega, sest toiteainekonkurentsis jääb fütoplankton suurtaimedele alla. Paisjärvede veetaseme kõikumine ja seeläbi sügavuse muutumine loovad aga tihti olukorra, kus muutlike valgustingimuste tõttu saab peamiseks orgaanilise aine tootjaks suurtaimede asemel fütoplankton. Taandareng ja muutused suurtaimestikus viivad omakorda muutusteni kõrgemate toiduahelate koosseisus.

## KÜSIMUSED JA PROBLEEMÜLESANDED

1. Põhjendage, miks on vahel keeruline selgitada järvenõo teket vaid ühe geoloogilise sündmusega.
2. Miks paikneb suurem osa järvi ekvaatorist üsna kaugel?
3. Joonistage ühe jõgikonna dendrogramm ja kandke sellele 1.–3. järku jõelõigud.
4. Miks on geoloogiliselt noored jõeorud võrdlemisi sirged ja V-kujulise ristlõikega, vanemad jõeorud aga looklevad ja laiade lammialadega?
5. Millised järve morfomeetrilised näitajad on kõige kasulikumad potentsiaalse produktiivsuse hindamisel? Miks?
6. Millist rolli mängivad järve produktiivsuses laine ajutee ja järvenõo asend? Kas järve ümbritsev taimestik võib seda mõjutada?
7. Miks on mäestikujõgedel harva üleujutustasandikke?

## MÕISTED JA MÄRKSÕNAD

siseveekogu
maailmameri
biotoop e elupaik
pinnaveekogu
põhjavesi
seisu- e lentiline veekogu
voolu- e lootiline veekogu
looduslik veekogu
tehislik veekogu
alaline veekogu
ajutine veekogu
jõgi, jõestik, jõgikond
ekso- ja endoreilised jõed
järv, järvestik, järvistu
laugas, laugastik
märgala
kulutus
põhja- ja küljeerosioon
erosioonibaas
tasakaaluprofiil
valgla
valgala
vesikond
äravool
äravoolumoodul
jõe pikkus ja laius
jõeorg
jõesäng e voolusäng
jõe veerud
ristprofiil
pikiprofiil
sängi kalle
langus
lang
lamm
kaldavall
looge e meander
orulooge
sängilooge
põrkeveer ja laugveer
looklevustegur
kogulooklevus
terrass
erosiooni- ja akumulatiivterrass
kärestik
kosk
juga
võrendik
sängorg
sälkorg
moldorg
lammorg
kanjonorg
suue
delta
lehtersuue e estuaar
suudmelaht e limaan
Eesti vesikonnad
järvede tekkeviisid
kaldeerajärv
maar
söll
uhtenõgu
vanajõgi e soot
säärlõugas e haff
järve geomorfoloogia
sügavuskaart
samasügavusjoon e isobaat
järve pindala
järve suurim pikkus
laine ajutee
järve suurim laius
kaldajoone pikkus
kaldajoone keerukus e liigendatus
järve suurim sügavus
järve suhteline sügavus
järve keskmine sügavus
batümeetriline e hüpsograafiline kõver
järve maht
veevahetuse kiirus

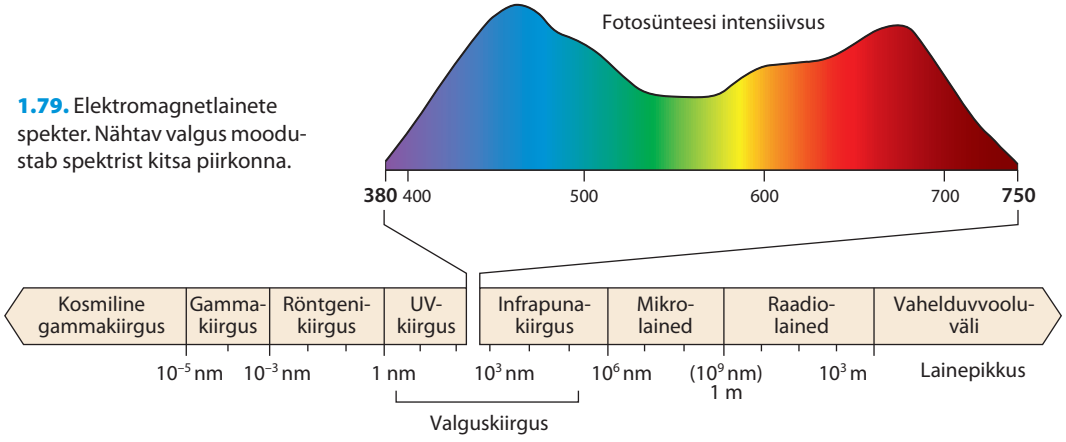
# 1.4. Valgus

Valgus on siseveekogude jaoks oluline ökoloogiline tegur mitmel põhjusel. *Esiteks* muutub vees neeldunud päikesekiirgus soojuseks ning soojusrežiim määrab veetemperatuuri, soojuskihistumise ja segunemise. Need omakorda mõjutavad tugevalt toiteainete jaotumist veesambas, gaasirežiimi kujunemist ja elustiku paiknemist. Niisiis reguleerivad vee optilised omadused veeorganismide füsioloogiat ja käitumist. *Teiseks* vajavad valgust fotosünteesivad planktonvetikad ja suurtaimed. Fotosünteesi käigus seotud kiirgus paneb aluse bioloogilisele aineringele veekogudes. Orgaanilise aine kujul talletatud energia on seotud kas veekogus endas või valgalal. Ning *kolmandaks* kasutavad silmade või fotosensoritega varustatud organismid valgust nägemiseks või signaaliallikana.

## 1.4.1. Valguse olemus

Veealuse valgusvälja iseloom sõltub ühelt poolt valguse ja teiselt poolt vee omadustest. Mõiste „valgus“ ise on mitmeti mõistetav. Tavaelus mõtleme selle all vaid nähtavat valgust, mis on nägemisaistingu tekitaja. Rääkides valgusest kui ökoloogilisest tegurist, tuleks seda vaadelda laiemalt (vt ääremärkus 1.4) – ühe osana elektromagnetlainete spektrist (joonis 1.79), mille eri osadel on elusorganismidele erinev toime (tabel 1.10). Valgus on energia, mis on võimeline tegema tööd ja muutuma ühest liigist teiseks või kanduma ühelt kehalt teisele, kuid see ei teki ega kao. Bioloogiliste protsesside seisukohalt on valgus kiirguslik energia, mis on muudetav orgaanilises aines talletatud keemiliseks energiaks. Sellise muundumise kasutegur on siiski palju väiksem kui 100%, sest enamik energiat muutub soojuseks.

Inimsilm on võimeline tajuma spektrivahemikku 400–700 nm ja osa inimesi isegi vahemikku 380–780 nm. Valguskiirguse lainepikkus määrab selle tajumise ühe või teise **värvusena**. Inimene on võimeline tajuma kahe nanomeetri suurust erinevust valguskiirguse lainepikkuses ja teoreetiliselt eristama umbes 150 spektrivärvust. Kõige tundlikum on inimsilm üldjuhul spektri rohelise osa suhtes, mis jääb 555 nm piirkonda. Valgusspekter ei sisalda sugugi kõiki värvusi, mida me oma




**1.79.** Elektromagnetlainete spekter. Nähtav valgus moodustab spektrist kitsa piirkonna.

### Tabel 1.10. ELEKTROMAGNETLAINED JA NENDE TOIME

| | Lainepikkus | Bioloogiline toime |
|---|---|---|
| Raadiolained | $2\times10^{4}$ – $1\times10^{-4}$ m | Sisuliselt puudub |
| Infrapunane kiirgus | $10^{-4}$ – $10^{-6}$ m | Soojendab vett, mõned bakterid suudavad kasutada fotosünteesiks |
| Nähtav valgus (punane) | 700–570 nm | Nähtav, soojendab vett, fotosüntees |
| Nähtav valgus (roheline) | 570–490 nm | Nähtav, soojendab vett, fotosüntees |
| Nähtav valgus (sinine) | 490–400 nm | Nähtav, soojendab vett, fotosüntees |
| UV-A kiirgus | 400–320 nm | Mutageen, lõhub rakke |
| UV-B kiirgus | 320–280 nm | Mutageen, lõhub rakke |
| UV-C kiirgus | 280–200 nm | Mutageen, lõhub rakke, looduses väga vähesel määral |
| Röntgen- ja gammakiirgus | $10^{-8}$ – $10^{-13}$ m | Mutageen, lõhub rakke, looduses väga vähesel määral |

1.4 ÄÄREMÄRKUS

**KUIDAS ISELOOMUSTADA VALGUST?**

Valguse dualistlik olemus ei tee sugugi kergemaks tema üheselt mõistetavat iseloomustamist. Spetsiaalseid valgussuuruste mõõtühikuid, nagu kandela (cd; valgustugevus), luumen (lm; valgusvoog) ja luks (lx; valgustustihedus ehk valgustatus), kasutatakse loodusvete optilisel iseloomustamisel harva. Olulisemad on need näiteks töötervishoius ja fotograafias. Paremini sobivad kiirguslikud ehk energeetilised ühikud, mille puhul valgust käsitatakse energiavoona. Energiahulga mõõtühikuteks on džaul (J) ja kalor (cal) ning energiavoog ehk võimsus on defineeritud kui energiahulk ajaühiku kohta. Võimsuse mõõtühik on vatt (W, J/s).

Limnoloogilistes uuringutes ei piisa enamasti võimsusest, vaid vaja on teada, kui palju energiat jõuab ajaühikus pinnaühikule. Seda näitajat kutsutakse energiavoo tiheduseks ehk **intensiivsuseks** ja selle levinumad mõõtühikud on W/m$^2$, cal/(cm$^2$·s) ja MJ/(m$^2$·h). Viimane neist on kasutusel päikesekiirguse mõõtmisel aktinomeetriajaamades. Valgussuuruste sobimatust näitab ka see, et ühe luksi energeetiline väärtus ei ole püsiv, vaid sõltub Päikese kõrgusest ja pilvisusest. Päikesepaistelisel suvepäeval on 1 lx ≈ 5,7·10$^{-6}$ cal/(cm$^2$·min).

Fotosünteesi- ja primaarproduktsiooniuuringutes on kiirgusvoo intensiivsuse hindamiseks praktiline kasutada ajaühikus pinnaühikule langevat kvantide arvu fotosünteetiliselt aktiivse kiirguse (PAR) piirkonnas, sest fotosünteesi mehhanismi olemuse tõttu sõltub selle intensiivsus otseselt just kvantide arvust, mitte nende energiast. **Kvandivoogu** mõõdetakse tavaliselt einsteinides (E) ruutmeetri kohta tunnis. 1 E = 1 mool kvante = 6,02·10$^{23}$ kvanti. Et kiiratud kvantide energia sõltub lainepikkusest, ei ole kvantide hulga ja kiirgusenergia vahel jällegi üksühest vastavust, kuigi PAR-piirkonnas kehtib keskmiselt seos 1 W = 2,5 ± 0,25·10$^{18}$ kvanti/s.

silmade ja aju koostöös tajume. Näiteks puuduvad selles roosa ja pruun. Nähtava valguse alaga kattub vahemik, mida kasutavad fotosünteesivad organismid. Seda piirkonda nimetatakse **fotosünteetiliselt aktiivse kiirguse piirkonnaks** (*photosynthetically active radiation* – PAR). Et inimsilma tajutav elektromagnetlainete spektrivahemik langeb kokku PAR-piirkonnaga, polegi valguse mõiste kasutamine siseveekogude puhul otseselt vale.

Valgusel on dualistlik iseloom: selle levimisega seotud nähtuste puhul kirjeldatakse valgust makrotasandil ning valguse kiirgumise ja neeldumisega seotud nähtuste puhul mikrotasandil. Valguse levimist atmosfääris ja vees on kõige lihtsam seletada **lainetena**. Elektromagnetlained kujutavad endast elektromagnetvälja levimist ruumis, milles elektri- ja magnetväli perioodiliselt muutuvad. Elektromagnetlainete omadused sõltuvad **lainete sagedusest** $\nu$ (ajaühikus toimuvate võngete arvust) ja **lainepikkusest** $\lambda$ (naaberlaineharjade vahekaugusest):

$$\nu = \frac{c}{\lambda},$$

kus konstant $c$ on valguse kiirus (2,9972·10$^8$ m/s õhus ja 2,2492·10$^8$ m/s vees).

Teine võimalus on kirjeldada valgust **osakestena**. Sel juhul käsitatakse valgust energiapakikestena – valguskvantide ehk footonitena (nähtavas spektrivahemikus). Footonitel puudub seisumass ja nende **energia** ($E$) sõltub ainult **elektromagnetkiirguse sagedusest** $\nu$:

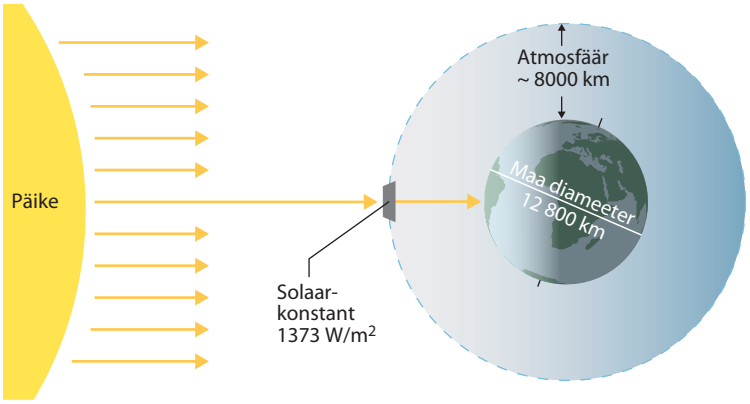
$$E = h\nu,$$

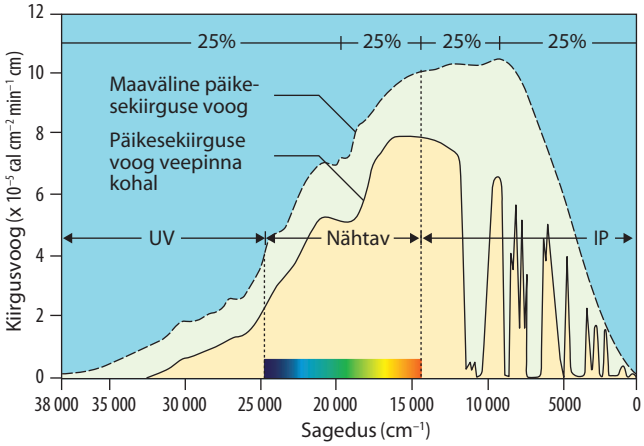
kus $h$ on Plancki konstant (6,63·10$^{-34}$ J/s). Seega on footonitel lainepikkusega 700 nm (PAR-piirkonna punane servaala) vaid 57% sellest energiast, mis on sinise spektriosa (400 nm) footonitel. Üksikkvantide arv ise on väga suur. Näiteks suvisel keskpäeval ja pilvitu taeva korral langeb 1 m$^2$ suurusele alale nähtavas spektriosas 10$^{21}$ kvanti sekundis. Valguse käsitamine osakestena sobib hästi näiteks fotosünteesiprotsesside seletamiseks.

## 1.4.2. Valguse liikumine atmosfääris ja jõudmine veepinnani

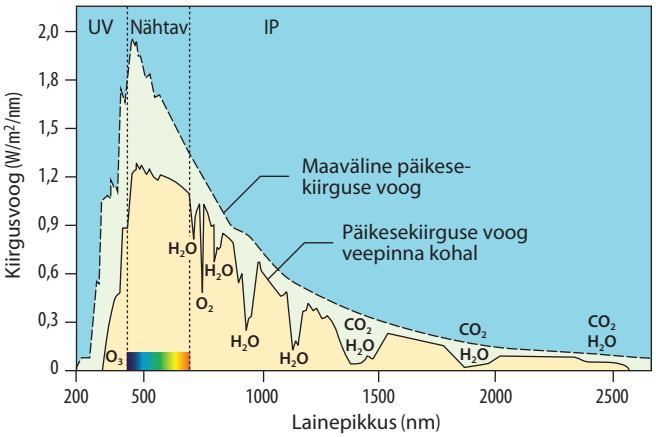
Päikest võib lihtsustatult käsitada musta kehana, mille kiiratava energia hulga ja kiirguse spektraalse jaotuse määrab temperatuur. Musta kehana on Päike vaadeldav seetõttu, et enamik Päikeselt lahkuvast kiirgusest on sealt siseprotsesside tõttu kiiratud, mitte mujalt pärit kiirgusena peegeldunud. Päikesest lähtub 63,4·10$^6$ W kiirgust ruutmeetri kohta ehk tervikuna 385·10$^{24}$ W. Maa kaugus Päikesest on 147–152 mln km ning keskmiselt jõuab Maa atmosfääri väliskihile päikesekiirtega risti asetsevale pinnale 1373 W kiirgust ruutmeetri kohta ehk 1,97 cal/(cm$^2$·min). Seda suurust nimetatakse **solaarkonstandiks** ja see on väga suur energiahulk (joonis 1.80). Päikeselt lähtuva kiirgusvoo spektrivahemik on 100–4000 nm. Päikese pinnatemperatuur on ligikaudu 5800 K ning Wieni seaduse järgi on 1 nm kõige energiarikkam 500 nm juures.

**1.80.** Päikesekiirte jõudmine maale. Solaarkonstant.






**1.81.** Maast keskmisel kaugusel asuva Päikese kiirguse spektraaljaotus atmosfääri väliskihis ja merepinnal. Kõveraalune pind on proportsionaalne spektriosa energiaga.



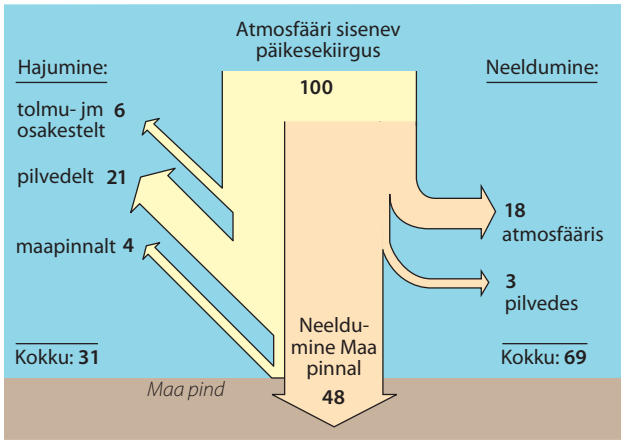

**1.82.** Päikesest lähtuv Maa-väline kiirgusvoog ja selle spektraalkoostise muundumine Maa pinnale jõudes. Diagrammile on kantud ühendid, mis vastutavad mingi konkreetse spektriosa „äralõikamise" eest.

Solaarkonstandi energeetilisest väärtusest moodustab infrapunane kiirgus umbes poole ning nähtav valgus ja ultraviolettkiirgus kokku teise poole (joonis 1.81). Tavaliselt kujutatakse valguse spektraalset jaotust graafikuna, mille rõhtteljel on sageduse asemel hoopis valguse lainepikkus (joonis 1.82). Sel juhul jääb erinevalt joonisest 1.81 väärmulje, nagu paikneks energiamaksimum nähtava valguse rohelises osas.

Atmosfäär takistab oluliselt valguse levikut. Maapinnale jõudva kiirguse hulk sõltub atmosfääri koostisest, ilmastikust, maapinna reljeefist ning aasta- ja kellaajast. Isegi puhta, kuiva ja pilvitu atmosfääri korral ei jõua maa- või veepinnani solaarkonstandist rohkem kui 900 $W/m^2$.

Atmosfääri jõudes valgus **hajub** ja **neeldub** (joonis 1.83). Selle käigus ei vähene mitte ainult valguse intensiivsus, vaid muutub ka spektraalne koostis. Hajutajateks on õhu molekulid ja tolmuosakesed ning neelajateks veeaur, hapnik, osoon ja süsihappegaas. Õhu molekulide mõõtmed on valguse lainepikkusest tunduvalt väiksemad. Valguse hajumine on Rayleigh' seaduse järgi pöördvõrdeline lainepikkusega ning atmosfääri sisenenud lühilainelisest kiirgusest hajuvad kõige rohkem sinised ja violetsed kiired. Sellepärast paistab taevas sinise, mitte aga mustana.

**1.83.** Päikesekiirguse hajumine ja neeldumine atmosfääris.




Päikesepaistelise ilmaga saame eristada **otsest kiirgust** ($S'$) – päikeseketta suunast paralleelsete kiirte kimbuna langevat kiirgust – ja **hajunud kiirgust** ($D$) – taevavõlvi helendust (helendava taevavõlvi iga punkti võib vaadelda punktvalgusallikana), mis kokku moodustavad **summaarse kiirguse** ($Q$):

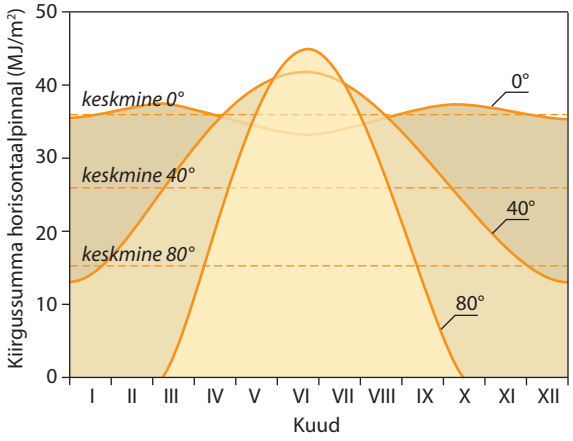
$$Q = S' + D$$

Ilusa ilmaga on keskmiselt $S' = 40\%$ ja $D = 60\%$. Pilves ilmaga esineb ainult hajuskiirgus.

Atmosfääri läbides nõrgeneb valgus teatud lainepikkustel väga tugevasti. Osoonikiht neelab ära spektri ultravioletse osa, mis on lühem kui 290 nm. Nähtavat valgust ja infrapunast osa neelavad tugevasti veeaur, süsihappegaas ja õhuaerosoolid (joonis 1.82). Infrapunase spektriosa neeldumine varieerub, sest veeauru hulk atmosfääris on muutlik. Lõpptulemusena läbib atmosfääri kõige paremini valgus, mis kuulub PAR-piirkonda.

Maa orbiidi parameetrid ja tema pöörlemine ümber oma telje on põhilised tegurid, mis mõjutavad kiirguse jõudmist Maale. Igal hetkel sõltub maapinnale langeva valguskiirguse intensiivsus Päikese kõrgusest horisondi kohal ($h_0$). Päikese kõrgus mõjutab kiirgusvoo tihedust kahel viisil, kuid ühes suunas:

$$Q = \frac{S_0 \cdot \sin h_0}{1 + f \cdot \operatorname{cosec} h_0}$$




**1.84.** Aastane kiirgussumma laiuskraaditi.

Kiirgusvoo tihedus horisontaalsel pinnal on võrdeline kiirte langemisnurga siinusega ja pöördvõrdeline kiirte langemisnurga pöördsiinuse ehk koosekansiga. Koefitsient *f* sõltub atmosfääri läbipaistvusest.

Päikese nurk muutub päeva jooksul pidevalt ning sõltub peale kellaaja veel geograafilisest laiusest ja aastaajast. Kiirguse päevasummat mõjutab nii kiirguse intensiivsus kui ka päeva pikkus. Ekvaatoril on kiirgussumma enamvähem konstantne, sest päevad on ühepikkused (joonis 1.84). Parasvöötmes ja polaaraladel sõltub päikesekiirte langemisnurk aastaajast ning talveperioodil peavad päikesekiired atmosfääris läbima tunduvalt pikema teekonna kui suvel. Polaaröö ajal puudub otsene päikesekiirgus sootuks. Seevastu suvised kiirgussummad on meie aladel märgatavalt suuremad ekvaatori omadest. Pilvkate võib samas neid maksimume vähendada kuni poole võrra.

## 1.4.3. Valguse tungimine vette

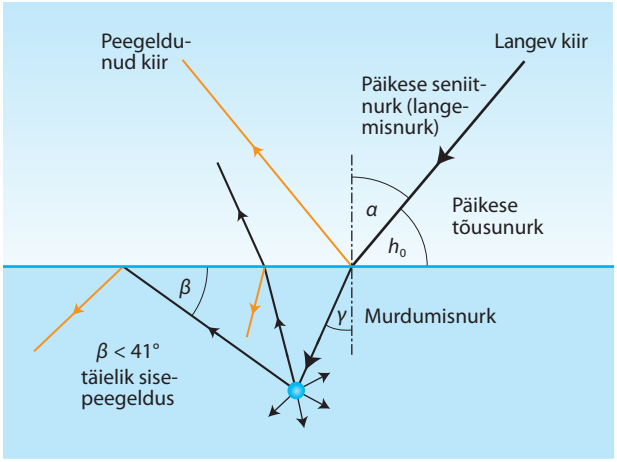
Enne kui atmosfääri läbinud päikesekiirgus muutub kättesaadavaks veeökosüsteemile, peab ta ületama veel viimase takistuse – õhu ja vee piirpinna. Veepinnani jõudnud valguskiirgus tungib vette vaid osaliselt, märkimisväärne hulk sellest peegeldub. Osa peegeldunud kiirgusest võib siiski vette tagasi jõuda juba hajunud kiirgusena. Hajutajateks võivad olla atmosfäär ja ümbritsev maastik.

Peegeldumise määr sõltub Päikese kõrgusest horisondi kohal (joonis 1.85). Otsese kiirguse peegeldumist kirjeldab Fresneli võrrand:

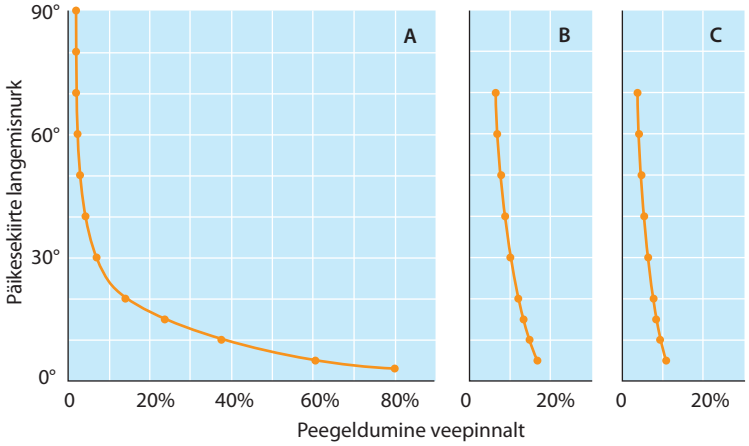
$$R(\%) = 50 \cdot \left[\frac{\sin^2(\propto - \gamma)}{\sin^2(\propto + \gamma)} + \frac{\tan^2(\propto - \gamma)}{\sin^2(\propto + \gamma)}\right],$$

kus $\alpha$ on langemisnurk vertikaali suhtes ja $\gamma$ murdumisnurk vertikaali suhtes. Sõnadesse panduna ütleb Fresneli reegel, et mida madalamal on Päike horisondi kohal, seda suurem osa tema valgusest peegeldub. Veepinnaga risti langevatest päikesekiirtest peegeldub 2% ja langemisnurga suurenedes peegeldumine aeglaselt kasvab. 50 kraadist väiksemate tõusunurkade korral kiireneb peegeldumine järsult. Seetõttu on päev vees lühem kui maismaal. Ka hajuskiirgus peegeldub veepinnalt, kuid sellise peegeldumise määr sõltub Päikese kõrgusest märksa vähem ega ületa ka väga väikese $h_0$ korral 20% (joonis 1.86). Keskmiselt peegeldub suvel 5–6% summaarsest kiirgusest.

Peegeldumist mõjutab peale Päikese nurkkõrguse veel terve hulk tegureid. Lainetus suurendab peegeldumist vähesel määral, kõige rohkem 10% suurte tõusunurkade korral. Väikeste tõusunurkade korral lainetus seevastu vähendab peegeldumist, sest veepinna liikumise tõttu on keskmine kiirte tõusunurk suurem kui sileda veepinna korral.

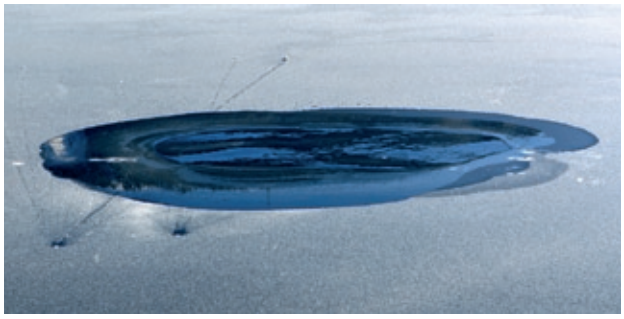



**1.85.** Päikesekiirte peegeldumine ja tungimine vette Fresneli reegli järgi.




**1.86.** Peegeldumise sõltuvus paikesekiirte langemisnurgast. A – otsene kiirgus, pilvitu taevas B – hajuskiirgus, mõõdukas pilvisus C – hajuskiirgus, lauspilvisus.

Siseveekogude talviseid valgustingimusi mõjutab tugevalt jääkate. Sile ja täiesti läbipaistev jää peegeldab valgust ligikaudu võrdselt veega ning seetõttu võivad paljud vetikad kasvada ka jää all. Jääs olevad õhumullid ja eelkõige lumikate vähendavad tublisti valguse edasipääsu. Lumi on väga hea peegeldaja: 20 cm paksune lumikate peegeldab juba 99% kogu langevast kiirgusest (joonis 1.87). Ühtlasi tuleb arvestada, et kui Päike on madalal, võib nähtava valguse peegeldumine 100%-ni jõuda ka märksa õhema lumikatte korral. Sellistes tingimustes pole jääalune fotosüntees loomulikult enam võimalik.



**1.87.** Kuigi jääaugus olev vesi on väga läbipaistev, on jää all pime, sest valgus ei suuda tungida läbi jää ja lume.

Veepinna suunas tagasihajunud kiirgusest peegeldub ligikaudu pool uuesti vette. Kiired, mille nurk veepinna suhtes on väiksem kui 41°, peegelduvad täielikult vette tagasi – toimub **täielik sisepeegeldumine** (vt joonis 1.85). Veest väljunud hajuskiirgus moodustab koos peegeldunud kiirgusega veekogust lahkuva kiirgusvoo, mille suhet langevasse kiirgusse nimetatakse **albeedoks**. Albeedo suurus on tavaliselt 6–25%. Hajunud valguse komponent selles on tavaliselt vähemuses ega ületa kolmandikku.

## 1.4.4. Vee optilised omadused

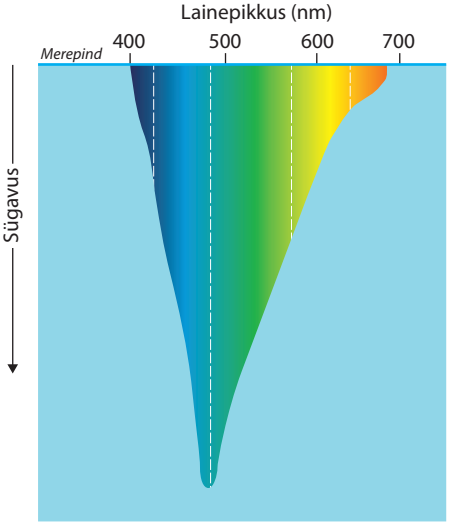
Vette tunginud valgusest mingi osa **neeldub** ja mingi osa **hajub**. Hajumine toimub vee ja lahustunud aine molekulidelt, looduslikes vetes peamiselt hõljumilt ning veekogu madalates osades ka põhjalt. Hajumist võib lihtsustatult kujutada igas suunas toimuvate peegeldumiste summana. Kuna hõljum on peamine hajutaja, sõltub tagasihajumise määr hõljumi hulgast, hõljumi kihistumusest (pinnalähedaselt hõljumilt hajub rohkem tagasi) ning osakeste läbipaistvusest ja pinnaomadustest.

### VALGUSE VERTIKAALNE NÕRGENEMINE VEES

Puhas vesi hajutab kõige rohkem sinist valgust (joonis 1.88). Vees olevad **osakesed** neelavad kiirgust valikuliselt spektri eri osades. Valguse neeldumine veele värvust andvates **lahustunud ainetes** suureneb sujuvalt punasest spektriosast lühemalainelise (sinise, violeti) kiirguse poole, mistõttu hajunud ja läbinud komponendis hakkab domineerima pikemalaineline kiirgus (annab rabaveele punaka või pruunika tooni).

Valguse osaline neeldumine ja hajumine vees moodustavad kokku **valguse vertikaalse nõrgenemise** ehk

**1.88.** Kui hõljumit on vees väga vähe, pääsevad mõjule veemolekulide hajutavad omadused ning vesi on sinakat tooni.



**ekstinktsiooni**. Nõrgenemine ei toimu sügavuti mitte lineaarselt, vaid eksponentsiaalselt. Kui tähistame kiirguse intensiivsuse enne vette tungimist $I_0$-ga ja pärast $z$-paksuse kihi läbimist $I_z$-ga, saame valguse nõrgenemist väljendada järgmiselt:

$$I_z = I_0 \cdot e^{-k \cdot z},$$

kus $k$ on konkreetset keskkonda iseloomustav ekstinktsioonikoefitsient. Sellisel kujul kannab see võrrand **Bouguer'-Lamberti seaduse** nime. Rangelt võttes kehtib see vaid monokromaatilise ehk ühevärvilise valguse kohta (tabel 1.11). Seetõttu peaks lainepikkust arvestades võrrandi kirjutama kujul

$$I(\lambda)_z = I(\lambda)_0 \cdot e^{-k(\lambda) \cdot z}$$

Spektri eri osade erineva ekstinktsiooni tõttu on summaarse kiirguse nõrgenemine pinnalähedases kihis kiirem kui sügavamal, sest pinnakihis leidub veel kiiresti nõrgenevaid komponente (pikemalainelist kiirgust). Sügavamal spekter aheneb ja sinna jõuavad vaid väikese ekstinktsioonikoefitsiendiga kiired. Destilleeritud vees muutub pindmises ühemeetrises kihis soojuseks 53% summaarsest kiirgusest. Nähtava valguse keskmine ekstinktsioonikoefitsient puhtas vees on 0,04.

Looduslikes vetes on valgusolud tunduvalt keerulisemad ning vee **enda neelavatele ja hajutavatele omadustele** ($k_w$) lisandub **lahustunud ainete** ($k_d$) ja **hõljumi** ($k_p$) optiline mõju. Loodusliku vee ekstinktsioonikoefitsient moodustub kõigi optiliselt aktiivsete komponentide ekstinktsioonikoefitsientide summana:

$$\Sigma_k = k_w + k_d + k_p$$

Iga komponent mõjutab valguse spektraalset koostist isemoodi. **Lahustunud orgaaniline aine** (peamiselt ligniini ja tselluloosi lagunemissaadused) neelab eelistatult sinist valgust. Selle omaduse tõttu nimetatakse teda hüdrooptikas ja limnoloogias sageli **kollaseks aineks**. **Mineraalne hõljum** mõjutab valguse spektraalset koostist võrdlemisi vähe ja mõjub seetõttu neutraalfiltrina. **Bioloogilise päritoluga hõljumil** võib olla koostisest olenevalt mitmesugune mõju. Omaette käsitlemist väärib **fütoplankton**, mis sisaldab erilisi valgust neelavaid pigmente. Kui eespool toodud Bouger'-Lamberti seadus väidab, et aine optiline tihedus on võrdeline tema kihi paksusega, siis **Beeri seaduse** kohaselt on optiline tihedus võrdeline optiliselt aktiivse aine kontsentratsiooniga. Enamasti vaadeldakse neid seadusi koos **Bouger'-Lamberti-Beeri** seadusena. Selle järgi võime ekstinktsiooni väljendada kujul

$$E = k_c \cdot C \cdot z,$$

kus $k_c$ on optiliselt aktiivse aine spetsiifiline valguse nõrgendamise koefitsient, $C$ optiliselt aktiivse aine sisaldus ja $z$ veekihi paksus.

**Tabel 1.11. MONOKROMAATILISE VALGUSE NÕRGENEMISKOEFITSIENDID DESTILLEERITUD VEES**

| Lainepikkus (nm) | Värvus | $k$ ($m^{-1}$) |
|---|---|---|
| 380 | ultraviolett | 0,026 |
| 400 | violett | 0,013 |
| 460 | sinine | 0,005 |
| 520 | roheline | 0,016 |
| 580 | kollane | 0,078 |
| 620 | oranž | 0,273 |
| 680 | punane | 0,455 |
| 820 | infrapunane | 2,420 |

Teades klorofülli kontsentratsiooni uuritavas vees, saame summaarse valguse nõrgenemise koefitsiendi kirjutada ka kujul

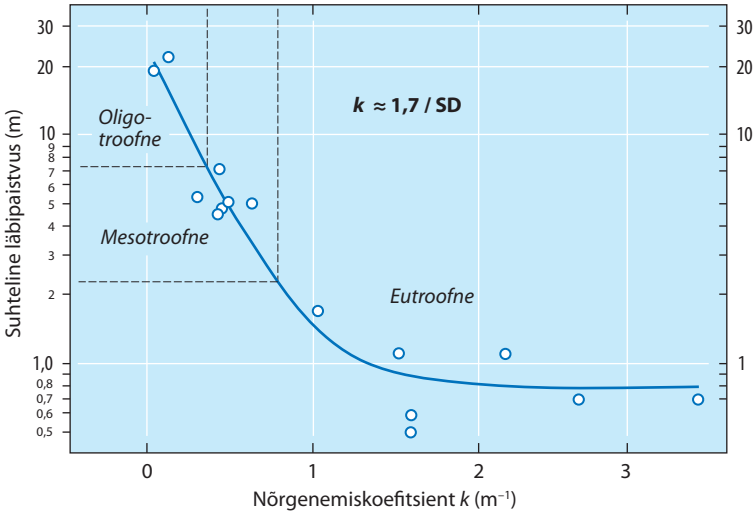
$$\Sigma_k = k_n + k_{chl} \cdot [chl],$$

kus $k_n$ on vee, lahustunud ainete ja klorofülli mittesisaldava hõljumi valguse nõrgendamise koefitsient, $k_{chl}$ klorofülli erineelamiskoefitsient ($m^2$/mg *chl* a) ja [*chl*] klorofülli kontsentratsioon.

Klorofüll neelab valgust **valikuliselt**. Üks neeldumistipp paikneb spektri **sinises osas** (425 nm), teine **punases** (662–665 nm; joonis 1.88). Rohkesti fütoplanktonit sisaldavates järvedes jõuab seetõttu kõige sügavamale kollakasroheline spektriosa, mitte sinine valgus. Kloroplastidesse „pakitud" klorofülli valguse neelamise võime on väiksem kui sama kontsentratsiooniga klorofülli tõmmisel. See nn pakkimisefekt tuleb eriti ilmsiks suuremate rakkude puhul, kus enesevarjutus on suurim. Seetõttu ei allu vetikate suspensioon täpselt Beeri seadusele ja tema optiline tihedus ei ole võrdeline mitte klorofülli kontsentratsiooni ega vetikate biomassiga, vaid nende suurustega astmes ⅔.

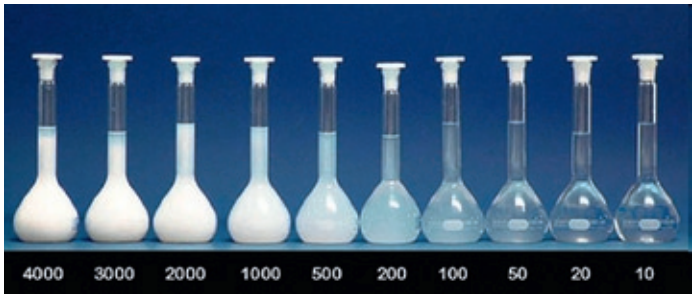
**■ VEE OPTILISTE OMADUSTE HINDAMINE** Praktikas on kõige laialdasemalt kasutatav vee optilisi omadusi kirjeldav näitaja **suhteline läbipaistvus**. Esimese ja siiani pruugitava vahendi vee läbipaistvuse hindamiseks võttis kasutusele Itaalia astronoom ja vaimulik **Pietro Angelo Secchi** (1818–1878). Selleks vahendiks oli nööri otsa riputatud 30 cm läbimõõduga valge ehk **Secchi ketas** (joonis 1.89). Ketas lastakse lapiti vette ja leitakse sügavus, kus see kaob silmist. Meetod põhineb ketta heleduse ja ketast ümbritseva keskkonna heleduse erinevusel ehk kontrastil. Keskmiselt kaob ketas silmist sügavusel, kuhu jõuab 5% pinnale langevast valgusest. Ketta näit on üsna hästi seotud ekstinktsioonikoefitsiendiga (joonis 1.90). Meetodi geniaalsus peitub selles, et tulemus ei sõltu peaaegu üldse valguse intensiivsusest. Inimese silm kohaneb valgustugevusega väga suurtes

**1.89.** Suhtelise läbipaistvuse hindamine Secchi ketta abil.




**1.90.** Suhtelise läbipaistvuse seos ekstinktsioonikoefitsiendiga.

**1.91.** Suhtelise läbipaistvuse hindamine nn läbipaistvustoruga.




**1.92.** Nefelomeetrilise hägususühiku etalonskaala.

piirides ja suudab eristada üliväikest erinevust heleduses. Mõõtmisvead võivad tekkida varahommikul ja hilisõhtul, kui Päikese väikese tõusunurga tõttu suureneb peegeldunud kiirguse osakaal. Secchi ketta näitu mõjutab peegeldumine veepinnalt ja põhjalt, tagasihajumine ketta kohal olevast veest ja kettast sügavamal olevast veest ning vee värvus. Secchi ketta näit on hajunud valguse suhtes märksa tundlikum kui neeldunud valguse suhtes. Seetõttu võib erineva värvuse ja hõljumihulgaga vete järjestus Secchi ketta näidu järgi erineda instrumentaalse valgusmõõtmise abil saadud järjestusest. Pruunis ja hõljumivaeses rabavees näitab Secchi ketas suurt läbipaistvust, hõljumirikkas eutroofses järves aga väikest.

Kõige selgema veega on vähetoitelised järved, mille valgala on väga väike. Suurima mõõdetud läbipaistvusega järv on USAs Oregonis asuv Crateri järv – 53,3 m. Eestis on Äntu Sinijärve vee läbipaistvus horisontaalsuunas 13,5 m. Eesti järvede keskmine suhteline läbipaistvus on aga üsna tagasihoidlik – 1,9 m. Kõige väiksem vee läbipaistvus (vaid 6 cm) on registreeritud tugevalt reostunud Pappjärves.

Madalates veekogudes pole Secchi ketta kasutamine tihti võimalik, sest veekiht on liiga õhuke, et jõuda sügavuseni, kus ketas silmist kaob. Sellistel puhkudel kasutatakse nn **läbipaistvustoru**, mis kujutab endast umbes 1,5 m pikkust gradueeritud klaas- või plasttoru, mille alumises otsas on Secchi ketta kujutis ja kraan (joonis 1.91). Toru täidetakse uuritava veega ja kraani avades fikseeritakse näit hetkel, mil Secchi ketta kujutis nähtavale ilmub.

Loodusvetes on alati mitmesuguseid hõljuvaid osakesi, mis hajutavad valgust ja vähendavad vee läbipaistvust, suurendades **hägusust**. Peamised hägususe teki-

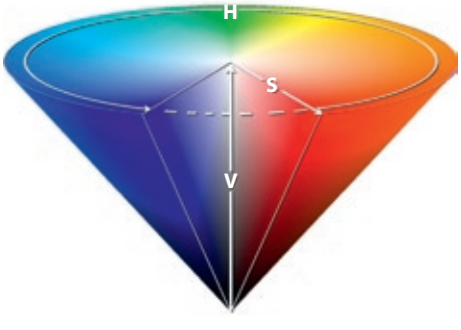
tajad on **fütoplankton** ja **mineraalne heljum** (savi- ja liivaosakesed). Hägususe määramine on väga oluline joogi- ja tarbevee puhul, sest vees hõljuvatele osakestele võivad kinnituda haigustekitajad (bakterid ja viirused), mis on sel juhul kaitstud vee puhastamiseks kasutatava kloori ja ultraviolettkiirguse toime eest. Väga häguses vees on häiritud fütoplanktoni kasv ja areng. Näiteks Võrtsjärve bioproduktsiooni limiteerib just hägune vesi. Peale selle ummistavad peened aineosakesed veeloomade lõpuseid ja filteraparaate. Kuigi savi on võimas hägustaja, on kalad tundlikumad hoopis suuremamõõtmelise heljumi suhtes.

Hägusust mõõdetakse mitmel viisil. Varem kasutati põhiliselt meetodit, kus heljum filtreeriti, kuivatati ja kaaluti ning hägusust väljendati milligrammides kuupdetsimeetri kohta. Tänapäeval on levinuim näitaja **nefelomeetriline hägususühik NHÜ** (*nephelometric turbidity unit* – NTU), mis vastab 0,58 mg kaoliini ($SiO_2$) tekitatud hägususele ühes kuupdetsimeetris vees (joonis 1.92). Näiteks ebarahuldavaks joogiveeks peetakse vett, mille hägusus on üle 5 NHÜ (2,9 mg/dm$^3$). Välitingimustes (näiteks seireandmete kogumisel) mõõdetakse hägusust tihti spetsiaalsete multisensoritesse integreeritud anduritega.

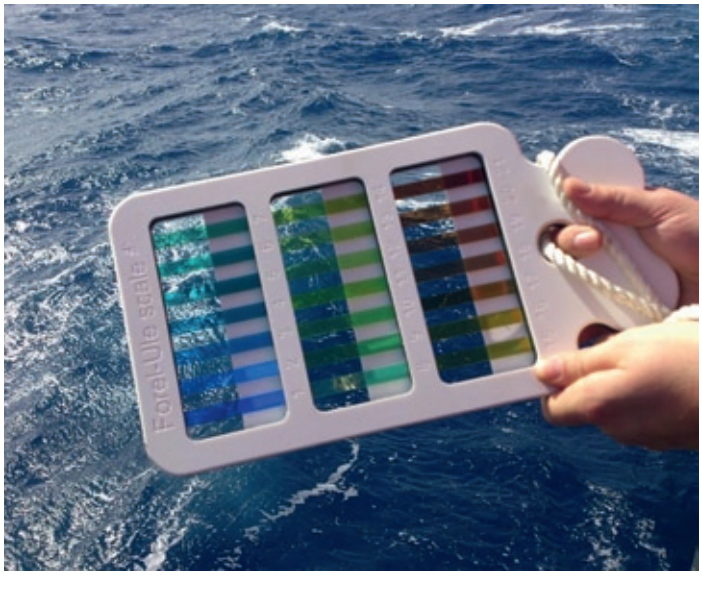
**VEE VÄRVUS** Kuigi vee värvus tundub esmapilgul olevat liiga „kirjelduslik“ parameeter, iseloomustab see paljudel juhtudel päris edukalt vee kvaliteeti. Vaadeldes mingit värvilist eset, võimaldab meie nägemistaju eristada selle kaht omadust – **heledust** ja **värvsust** (joonis 1.93). Mõlema omaduse hindamiseks on limnoloogias välja töötatud spetsiaalsed etalonskaalad.

**Heledus** on mingi keha tekitatava nägemisaistingu omadus, mille kohaselt keha näib läbi laskvat või hajutavalt peegeldavat osa talle langevast valgusest. Kui kaht võrdse heledusega eset vaadelda võrdsetes valgustingimustes, on neil sõltumata nende värvitoonist võrdne **paistvus.** Vee heleduse määramisel leitakse etalonskaalalt sama paistvusega etalon. Heleduse hindamisel on üks levinumaid etalonskaalasid **plaatina-koobalti skaala**, mis saadakse 2,5 g $K_2PtCl_6$ ja 2 g $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ lahustamisel 200 ml kontsentreeritud soolhappes ning mahu edasisel viimisel ühe liitrini destilleeritud vee abil. Saadud etaloni tumedus on kokkuleppeliselt 1000 ühikut. Praktikas kasutatakse kindlatele skaala väärtustele vastavate valgusfiltrite komplekte. Vee heleduse määramiseks võrreldakse proovi sama koguse destilleeritud veega ja leitakse filter, mis võrdsustab nende paistvuse.

**Vee värvsus** on inimese värvitajuga hinnatav **värvitooni** ja **küllastuse** kaudu. Need inimese nägemistajuga seotud mõisted vastavad ligikaudu kolorimeetria terminitele **„dominantlainepikkus“** ja **„värvipuhtus“.** Esimene neist on kirjeldatav värvuse nimetusega (sinine, roheline, kollane jne), teine hindab puhta kromaatilise komponendi osa värviaistingus ja on kirjeldatav sõnadega „lahja“ või „intensiivne“. Vee värvsust hinnatakse enamasti Secchi ketta taustal, mis on sukeldatud vette poole vee läbipaistvuse sügavuseni. Sel viisil saavutatakse teatud määral standardsed tingimused värvuse küllastuse hindamisel. Tuntuim värvsuse etalonskaala on **Foreli-Ule skaala** (joonis 1.94), mis on saadud kolme aine – vasksulfaadi ($CuSO_4$; sinine), kaaliumkromaadi ($K_2CrO_4$; kollane) ja koobaltsulfaadi ($CoSO_4$; roosa) – lahuse segamisel erinevates vahekordades. Skaala ulatub helesinisest tumepruunini, kuid kõiki veekogude toone see siiski katta ei suuda.




**1.93.** Värviruumi kirjeldatakse kolme parameetri abil: heledus (V), värvitoon (H) ja küllastus (S), millest kaks viimast iseloomustavad värvsust.




**1.94.** Vee värvsuse hindamine Foreli-Ule skaala abil.

## 1.4.5. Fotosünteesi iseärasused vesikeskkonnas

Atmosfääriga võrreldes on vesikeskkond tunduvalt „tihedam“ ja valgusvoog nõrgeneb seal sügavuse suurenedes järsult. Seejuures muutub ka valguse spektraalne koostis, eelkõige PAR-piirkonnas. Samas ei toimu fotosüntees mitte kogu nähtava valguse alas ühesuguse intensiivsusega. Enamiku taimede kloroplastides on protsess maksimaalse aktiivsusega spektri punases või violetses osas. Nende tegurite koosmõjul on vesikeskkonnas tingimused fotosünteesiks keerukamad kui maismaal.

**FOTOSÜNTEESI PÕHIALUSED** Vesikeskkonnas toimuva fotosünteesi iseärasuste mõistmiseks on esmalt vaja meelde tuletada fotosünteesi põhitõed. Fotosüntees on fotoautotroofide primaarproduktsiooni esimene etapp, mille käigus moodustuvad lihtsad süsivesikud:

$$CO_2 + 2H_2O + h\nu \rightarrow CH_2O + O_2 + H_2O$$

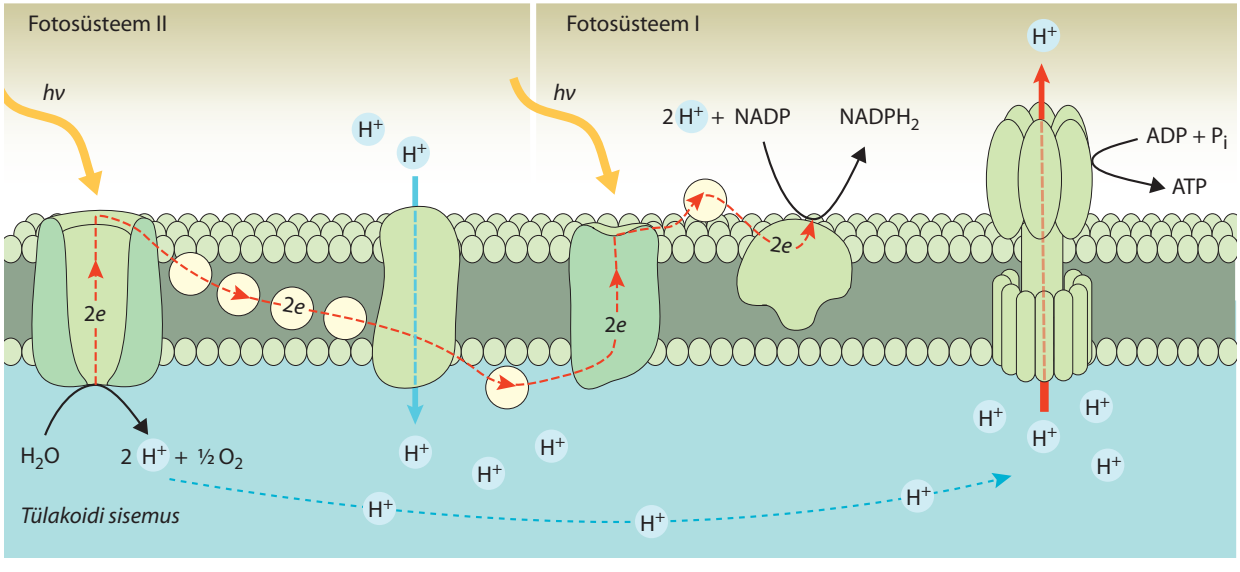
Niisiis on fotosünteesiks vaja kolme komponenti: $CO_2$, vett ja valgust. $CO_2$ moodustab 0,04% atmosfääri koostisest ja lahustub hästi vees. Seal osaleb ta paljudes tasakaalulistes reaktsioonides, mis viivad vesinikkarbonaatide ja karbonaatide tekkeni ning moodustavad kokku karbonaatse puhversüsteemi (vt ptk 8). $CO_2$ kättesaadavus võib piirata veesisest fotosünteesi vaid harvadel juhtudel väga pehmeveelistes veekogudes, kus tasakaalulise $CO_2$ hulk on vesinikkarbonaatide ja karbonaatide vähesuse tõttu napp. Seega sõltub fotosünteesi tulemus kõige rohkem just valgusest.

Fotosünteesis eristatakse kahte staadiumi: valgus- ja pimedusstaadiumi. **Valgusstaadium**, mis jaguneb fotofüüsikaliseks ja fotokeemiliseks faasiks, varustab rakku energiaga (ATP) ja reduktiivjõuga ($NADPH + H^+$). Elektronid pärinevad vee molekulist, mille hapnik vabaneb jääkproduktina. **Pimedusstaadiumis** seotakse $CO_2$ orgaanilise aktseptormolekuliga (ribuloosdifosfaadiga). Järgnevas tsüklilises reaktsiooniahelas (Calvini tsüklis) sünteesitakse süsivesikud ja regenereeritakse ribuloosdifosfaat. Pimereaktsioonides kasutatakse ära nii energia (ATP) kui ka reduktiivjõud ($NADPH + H^+$).

PAR-piirkonnast pärit valguskvandid, mis tabavad kloroplaste, neelatakse spetsiaalsete antennpigmentide poolt, mis seeläbi ergastuvad. Ergastusenergia kantakse üle **fotosüsteem I** pigmentidele, mis on taimedes teistsugused kui fotosünteesivates bakterites – vastavalt P 700 ja P 890. Pigmentidest emiteerunud elektronid juhitakse transpordiradadesse (joonis 1.95), kus nad teevad teatud kasuteguriga tööd, redutseerides $NADP^+$ ja luues sel viisil reduktiivjõudu või madalamale energianivoole langedes ATPd. Emiteerunud elektronid asendab **fotosüsteem II** nendega, mis vabanevad vee fotolüüsil.

Kui palju valgusenergiat on vaja $CO_2$ sidumiseks? Teoreetiliselt on ühe molekuli $CO_2$ redutseerimiseks vaja vähemalt kaheksat kvanti. Seda väärtust nimetatakse **kvanttarbeks** ja selle pöördarv (0,125) on **kvantsaagis** ($\phi_m$) ehk ühe mooli PAR-kvantide redutseeritud $CO_2$ moolide arv. Kui fotosüsteemide ergastamiseks kasutada vähima energiasisaldusega punast valgust, tõuseb fotosünteesi energeetiline kasutegur teoreetilise maksimumini, mis on kõigest 35%. Looduslikes tingimustes ei jõuta aga sellise väärtuseni kunagi, sest valgus-

**1.95.** Fotosünteesi valgusstaadiumi protsessid fotosüsteemis I ja II. Fotosüsteemis II kasutatakse ergastunud elektronide energiat vee molekulide lagundamiseks ja ATP sünteesiks. Fotosüsteem I põhiülesanne on $NADPH_2$ moodustamine. ATP ja $NADPH_2$ on vajalikud fotosünteesi pimedusstaadiumi reaktsioonide toimumiseks.



kvandid on keskmiselt suurema energiasisaldusega ehk valguse lainepikkus on väiksem. Pealegi ei kasutata kõiki emiteerunud elektrone ainult reduktiivjõu loomiseks, vaid mingi osa toel sünteesitakse ATPd. Rakkudes on alati ka alternatiivseid aktseptoreid (näiteks $NO_3^-$), mis samuti elektrone neelavad. Seetõttu jääb suurim mõõdetud kvantsaagis vahemikku 0,08–0,09 ehk kvanttarve vahemikku 11–12 kvanti ühe molekuli $CO_2$ kohta. Sellele vastab energeetiline kasutegur 20–25%. Sageli on kvantsaagis ja niisiis ka energeetiline tõhusus vesikeskkonnas veelgi väiksem.

**FOTOSÜNTEES VEES** Valguse vertikaalse nõrgenemise tõttu väheneb sügavuse suurenedes fotosünteesi kiirus. Samas pole need kõverad sugugi identsed (joonis 1.96). Joonisel on pideva kõverjoonega kujutatud süsiniku assimilatsioonikiirust ehk **primaarproduktsiooni**, mis sõltub sügavusest. Hingamine (*R*) jääb aga sügavuse muutudes samaks. Teatud sügavuses muutub süsiniku assimilatsiooni kiirus võrdväärseks hingamisega. Seda sügavust nimetatakse **kompensatsioonisügavuseks**. Veekihti ülalpool kompensatsioonisügavust, kus netoproduktsioon on positiivne, nimetatakse **eufootiliseks kihiks**. See on orgaanilise aine tootmise seisukohalt kõige olulisem veekiht. Kompensatsioonipunktist sügavamale jääb **afootiline kiht**, kus valgust fotosünteesiks juba napib.

**Eufootilise kihi paksus** ($Z_{eu}$) on veekogu ökosüsteemi toimimise seisukohalt üks tähtsamaid parameetreid. Füüsikaliste tegurite kõrval sõltub see ka vetikate liigilisest koosseisust ja valguskohastumisest. Seetõttu on eufootilise kihi paksuse ainsaks tõeliselt korrektseks mõõtmisviisiks fotosünteesi ja hingamise sügavusjaotuse mõõtmine ning nende põhjal kompensatsioonisügavuse määramine. Praktikas on see meetod raskesti rakendatav ja seepärast kasutatakse mitmeid lähendusi, mis põhinevad empiirilistel seostel. Ühe enim kasutatava määratluse järgi on eufootilise kihi alumiseks piiriks sügavus, kuhu jõuab 1% pinnale langevast valgusest. Seda võib väljendada järgmiselt:

$$\frac{I_0}{I_z} = 100 \rightarrow z_{1\%} = ln\,\frac{100}{k} = ln\,\frac{4{,}605}{k}$$

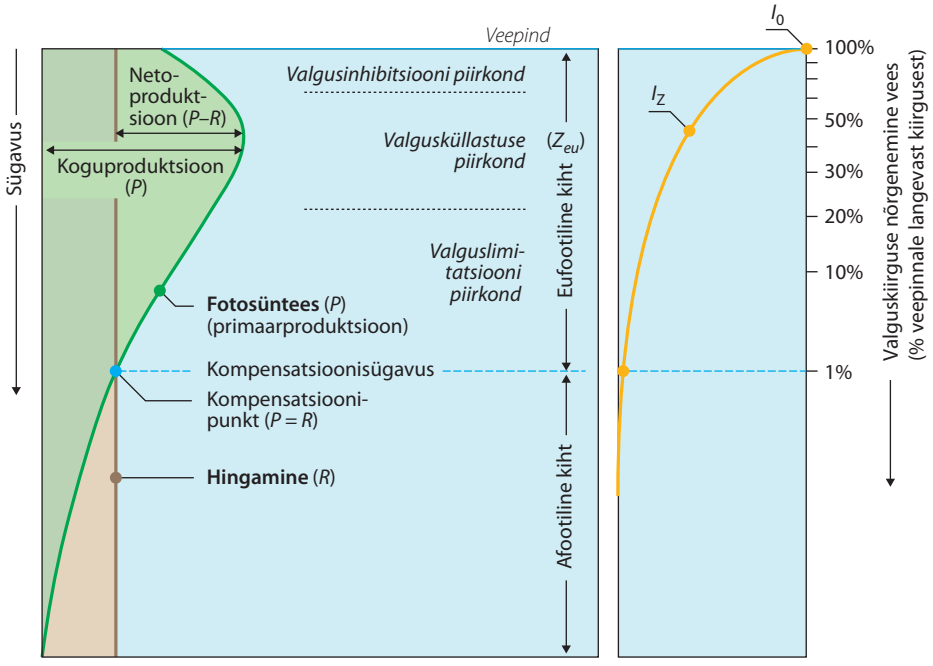
Selliselt määratletud eufootilise kihi paksus ei sõltu kiirguse intensiivsusest, vaid ainult vee omadustest. Määramiseks ei ole vaja absoluutühikutes kalibreeritud valgusmõõtjat. Kui optiliselt aktiivne aine on ülalpool 1% piiri ühtlaselt jaotunud, on keskmine valguse intensiivsus selles kihis 21% veepinnal olevast väärtusest.

Väga käepärane viis eufootilise kihi paksuse ligikaudseks hindamiseks põhineb vee suhtelisel läbipaistvusel Secchi ketta järgi ($Z_s$). Keskmiselt kehtib seos

$$Z_{eu} = 1{,}7 \cdot Z_s,$$

kuigi väärtused võivad langeda vahemikku 1,2–2,7. Kui aga võtta arvesse ainult veemolekulide neelamisvõime, võiks eufootilise kihi paksus teoreetiliselt küündida 200 meetrini.

Veesammas pole enamasti stabiilne ja isegi kihistunud järvedes toimub ringlus, eriti kevadisel ja sügisesel segunemisperioodil. Seega on teine oluline tegur, mis reguleerib fütoplanktoni puhasproduktsiooni sõltuvust valgusest, **vee läbisegunemise sügavus** ($Z_{mix}$). Kui veekogu seguneb läbi sügavamalt kui $Z_{eu}$, kanduvad vetikad




**1.96.** Fotosüntees ja hingamine termiliselt kihistunud veekogus. Valguse vertikaalne nõrgenemine ja veesamba kihistumine mõjutavad fotosünteesi intensiivsust ja hingamist veekogus. Valgus kahaneb veesambas eksponentsiaalselt, kuid veepinnal valguse ülekülluse juures on fotosüntees piiratud. Kihistunud järves on fotosüntees sageli kõige intensiivsem epilimnioni ja metalimnioni piirialal, kus on küllalt valgust, toiteaineid ja soojust.

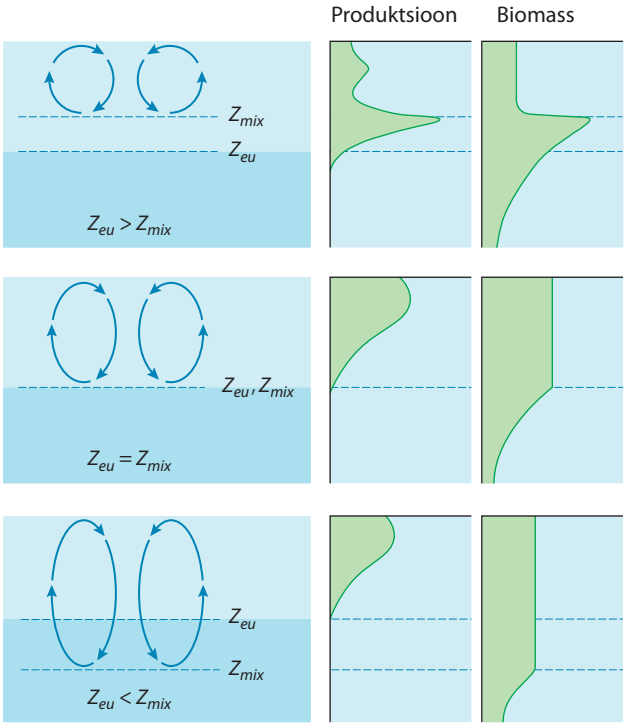
lühemaks või pikemaks ajaks tingimustesse, kus hingamine ületab süsiniku assimilatsiooni kiirust (joonis 1.97).

Sügavust, kus ülespoole jäävas veesambas keskmine süsiniku assimilatsiooni kiirus võrdsustub keskmise hingamisega, nimetatakse **kriitiliseks sügavuseks** ($Z_{cr}$). Kui läbisegunemise sügavus ületab kriitilist sügavust, ei suuda fütoplanktoni kooslus enam oma biomassi säilitada. Keskmiselt kehtib seos

$$Z_{cr} = 5 \cdot Z_{eu} = 10 \cdot Z_s$$

Ülalpool kriitilist sügavust moodustab keskmine kiirguse intensiivsus veesambas 4% pinnale langeva kiirguse intensiivsusest.

Looduslikes veekogudes võib klorofülli neelatud osa valgusest ulatuda 1%-st suure läbipaistvusega oligotroofsetes vetes 50%-ni fütoplanktonirikastes eutroofsetes vetes. Et kogu valguse neelaks klorofüll, peaks eufootilise kihi paksus lähenema nullile. Mida tihedam on vetikate suspensioon, seda tõhusamalt nad valgust kasutavad. Hõredamas suspensioonis suureneb klorofülli mittesisaldavate komponentide roll.



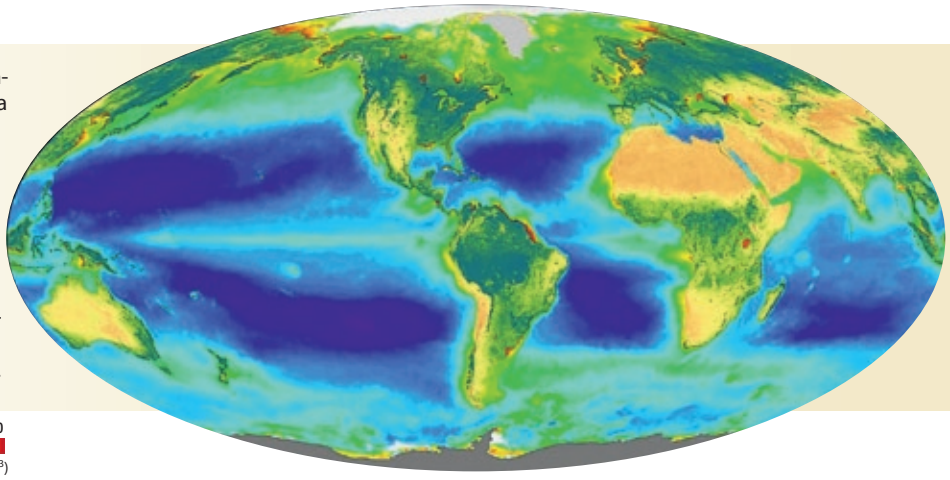

**1.97.** Vetikate biomassi ja produktsiooni seos läbisegunemissügavusega. $Z_{eu}$ – eufootilise kihi paksus, $Z_{mix}$ – vee läbisegunemise sügavus.

**FOTOSÜNTEESI VALGUSSÕLTUVUS** Antennpigmendid moodustavad koos fotosüsteemi pigmendiga omalaadse kompleksi (vt joonis 1.95). See saab footonitega pommitamisel elektrone emiteerida vaid juhul, kui ta on redutseeritud olekus. Pärast elektronide emiteerimist jääb kompleks „suletuks“, kuni vee fotolüüsil vabanevad elektronid ta redutseerivad. Seega suurendab kasvav valguse intensiivsus ehk footonite voo tihedus fotosünteesi kiirust ainult seni, kuni keskmine ajaline intervall, mille jooksul footonid tabavad üht reaktsioonitsentrit, on suurem fotosünteesitsentri redutseeritud oleku taastumiseks kuluvast ajast või sellega võrdne. Footonite voo edasisel tihenemisel hakkab üha rohkem footoneid tabama „suletud“ kompleksi ja fotosünteesi kiiruse lineaarne sõltuvus valguse intensiivsusest kaob – fotosünteesi kiirus jõuab platoole. Veelgi suurema valguse intensiivsuse juures võib tekkida hoopis valgusinhibitsioon. Sellise toimemehhanismi tõttu on fotosünteesi valgussõltuvuses eristatavad kolm sügavuspiirkonda (joonis 1.96).

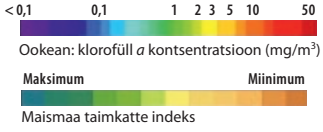
**Valgusinhibitsiooni piirkond.** Fotosünteesi pidurdumisel ülemäära tugevas valguses on mitu põhjust. Olulisimad neist on elektronide transpordiahela inaktiveerumine UV-kiirguse mõjul, suurenev valgushingamine ja klorofülli fotooksüdatiivne lagunemine. 50% ulatuses põhjustab valgusinhibitsiooni UV-kiirgus ja 50% ulatuses nähtav valgus. Tõenäoliselt hindab tavaline fotosünteesi mõõtmise metoodika fotoinhibitsiooni üle, sest looduses on vetikad pidevas liikumises erineva valgustugevusega kihtide vahel, fotosünteesi mõõtmisel aga suletud pudelitesse, mida eksponeeritakse püsivates valgustingimustes veekogu erinevates sügavustes. Inhibitsiooni väljakujunemiseks peavad vetikad viibima vähemalt 10 minutit küllastustaset ületava valgustugevuse juures.

**Valguskküllastuse piirkond.** Optimaalsetes valgustingimustes saavutab fotosünteesi kiirus siin maksimumi. Valgustugevuse nivoo, mille juures fotosüntees küllastub, sõltub temperatuurist. Külmemas vees tekib valguskküllastus väiksema valguse intensiivsuse juures. Mõnel juhul võib küllastuse saabumine sõltuda toiteainete kättesaadavusest. Alati ei õnnestu seda seost näidata, sest vetikad on võimelised looma toiteainete rakusiseseid varusid.

**Valguslimitatsiooni piirkond.** Teoreetiliselt sõltub fotosünteesi kiirus selles piirkonnas valguse intensiivsusest lineaarselt ja fotosünteesi kvantsaagis ($\phi_m$) on suurim. Valguslimitatsiooni iseloomustamiseks kasutatakse sõltuvuse algtõusu nurka α, mis on klorofüllispetsiifilise valguse nõrgenemiskoefitsiendi ($k_{chl}$) ja kvantsaagise ($\phi_m$) funktsioon. Klassikalise Liebigi miinimumireegli järgi on valguslimitatsiooni piirkonnas fotosünteesi kiirus tundetu muude tegurite suhtes peale valguse. Üleminek valguslimitatsioonilt valguskküllastumisele on sujuv.



Maal on vesikeskkonna fotosünteesi intensiivsus jaotunud väga ebaühtlaselt, kuigi võiks arvata, et enim mõjutavad tulemust soojus ja valgus. Suurimate järvede ja merede rannikupiirkondades on fotosüntees intensiivsem kui avaookeani ekvatoriaalsetel aladel. Väikseim on fotosünteesi intensiivsus väga ulatuslikel aladel ekvaatorist lõuna ja põhja pool.




## KÜSIMUSED JA PROBLEEMÜLESANDED

1. Eksperimendi käigus uputati 20 meetri sügavusse vähetoitelisse järve järve punane, valge, sinine ja must keha. Mis värvi paistaksid need meile veepinnalt vaatlusi tehes?
2. Miks on vee ekstinktsioonikoefitsient suurtes jõgedes enamasti suurem kui suurtes järvedes?
3. Millise lainepikkusega kiirgus soojendab järve pinnakihti kõige rohkem? Kui suure osa moodustab see kiirgusvahemik koguspektrist?
4. Üldjuhul peetakse kompensatsioonisügavuseks vee sügavust, kuhu jõuab 1% veepinnale langevast kiirgusest. Arvutage ekstinktsioonikoefitsient järvedes, kus kompensatsioonisügavus on 3, 10 ja 30 meetrit.
5. Kui suures sügavuses saab fotosüntees järves veel toimuda?
6. Fotosünteesi käsitlevates uurimustes on vahel eufootilise kihi piiriks võetud sügavus, kuhu jõuab summaarne kiirgus 0,75 J/(cm$^2$·h). Miks pole energeetilise väärtuse kasutamine sellistel puhkudel siiski mõistlik?
7. Düstroofsed järved sisaldavad rohkelt lahustunud orgaanilisi aineid (humiinaineid). Millise lainepikkusega kiirgus jõuab sellistes järvedes kõige sügavamale?
8. Te hindate valgusolusid oligotroofses ja eutroofses järves. Kummas järves tungib valgus sügavamale? Mis värvi valgus jõuab kõige sügavamale oligotroofses ja mis värvi eutroofses järves?
9. Järve vee ekstinktsioonikoefitsient on 0,22. Leidke selle põhjal kompensatsioonisügavus.

## MÕISTED JA MÄRKSÕNAD

värvus
fotosünteetiliselt aktiivse kiirguse piirkond
elektromagnetkiirgus
elektromagnetlainete sagedus ja lainepikkus
solaarkonstant
valguse hajumine ja valguse neeldumine
valguse peegeldumine
otsene ja hajunud kiirgus
summaarne kiirgus
täielik sisepeegeldumine
albeedo
valguse vertikaalne nõrgenemine e ekstinktsioon
mineraalne hõljum
bioloogiline hõljum
vee suhteline läbipaistvus
Secchi ketas
läbipaistvustoru
vee hägusus
mineraalne heljum
vee heledus
vee värvsus
plaatina-koobalti skaala
Foreli-Ule skaala
fotosünteesi valgusstaadium
fotosünteesi pimedusstaadium
fotosüsteem I
fotosüsteem II
kvanttarve
kvantsaagis
kompensatsioonisügavus
afootiline kiht
eufootiline kiht
vee läbisegunemise sügavus
kriitiline sügavus
valgusinhibitsiooni piirkond
valgusküllastuse piirkond
valguslimitatsiooni piirkond

# 1.5. Soojus

**Soojus** on energia, mille tekitab aatomite või molekulide juhuslik võnkumine. **Temperatuur** on vastus soojuse lisandumisele süsteemi või eemaldumisele süsteemist ehk molekulide keskmise kineetilise energia mõõt. Temperatuur keskkonnategurina on veekogudes tähtis kolmel põhjusel. *Esiteks* reguleerib temperatuur vee segunemist. Kõrgema temperatuuriga veekihte on palju raskem omavahel segada, tekkiv temperatuurikihistumus mõjutab oluliselt veekogu energia- ja aineringeid. *Teiseks* määrab temperatuur vesikeskkonnas toimuvate reaktsioonide kiiruse. Nii keemilised kui ka bioloogilised protsessid kulgevad kõrgemal temperatuuril kiiremini ja organismide ainevahetus intensiivistub. Kui näiteks akvaariumis temperatuuri liiga kõrgel hoida, suureneb kalade toiduvajadus. *Kolmandaks* reguleerib temperatuur liikide levikut. Paljud veeorganismid on kohastunud kindla temperatuurioptimumiga. Näiteks kaladest on karplased soojalembesed, lõhilased eelistavad jahedamat vett.

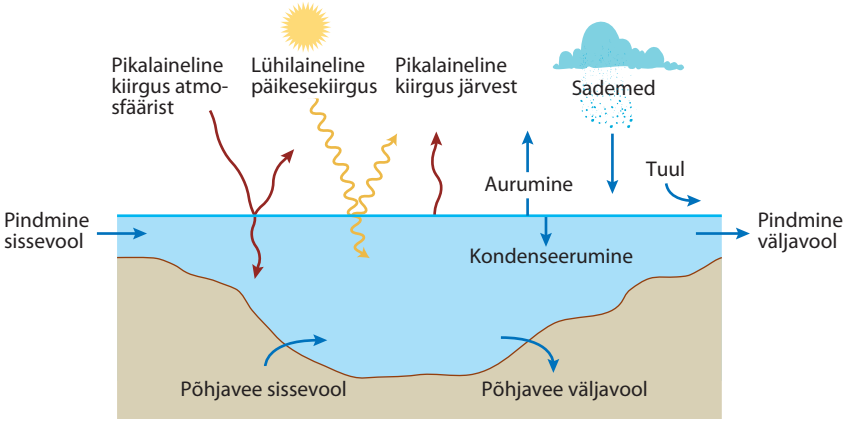
## 1.5.1. Soojusvahetus veekogu ja keskkonna vahel

Peamine veekogude soojusenergia allikas ja veetemperatuuri tõstja on päikesekiirgus (joonis 1.98). Maale jõuab päikesekiirgus lainepikkuste vahemikus 290–4000 nm ehk lühilainelise kiirgusena. Maalt lahkub energia juba muudetud kujul, peamiselt pikalainelise ehk soojuskiirgusena. Atmosfääri soojuskiirgus on lainepikkuste vahemikus 3000–80 000 nm (maksimum 10 000 nm juures), maismaa ja ookeani soojuskiirgus vahemikus 4000–120 000 nm (maksimum 15 000 nm juures). Päikeselt pidevalt saadavast kiirgusest hoolimata on Maa temperatuur suhteliselt püsiv. Järelikult peab Maalt lahkuv energiavoog olema võrdne Maale saabuvaga.

■ **SEISUVEEKOGUDE SOOJUSVAHETUS** Päikeseenergia neeldumine vees sõltub tervest hulgast füüsikaliskeemilistest ja paljudel juhtudel bioloogilistest teguritest ning lühilaineline päikesekiirgus pole veekogudes ainuke soojusülekande viis (joonis 1.99). Soojusbilansi komponentidest tuleks eelkõige rõhutada kolme peamist. Esimene neist on **konvektiivne soojusvahetus atmosfääriga**, mille suund sõltub vee- ja õhutemperatuuri erinevusest. Teiseks toimub pidev **soojusvahetus järvede ja vooluveekogude vahel**, mida kutsutakse ka advektiivseks soojusvahetuseks. Üldjuhul transpordivad vooluveekogud järvedesse külmemat vett ja välja voolab pindmine soe veekiht. Olulist rolli soojusbilansis etendab vee suur aurustumissoojus. Veeauru kondenseerumisel veepinnale lisandub aurustumissoojusega võrdväärne soojushulk, kuigi üldjuhul ületab aurumine märgatavalt kondenseerumist. Külmumisel vabanev ja jää sulamisel neelduv soojushulk on võrdsed ega mõjuta veekogu aastast soojusbilanssi. Jää sulatamiseks ja vee aurus-

**1.98.** Kuuma veega Frying Pani järv Uus-Meremaal. Veekogude temperatuuri tõus Maa sisesoojuse mõjul on pigem erand kui reegel.

tamiseks kuluvat (külmumisel ja kondenseerumisel vabanevat) soojushulka nimetatakse **latentseks** (varjatud) **soojuseks**, sest need ei väljendu temperatuuri muutusena. Ja kolmandaks tuleb arvesse võtta setetest eralduvat ja seal salvestuvat soojust.




**1.99.** Soojusbilansi komponendid järves.

## VOOLUVEEKOGUDE SOOJUSVAHETUS

Vooluveekogude veetemperatuur muutub nii aastaajaliselt kui ka ööpäevaselt, sõltudes kõrgusest merepinna suhtes, kliimast, kaldavöötme taimkattest ja põhjavee osakaalust vooluhulgas. Muutused õhutemperatuuris kajastuvad vooluveekogudes tavaliselt paremini kui seisuveekogudes. Seisuveekogudele omast soojuskihistumust vooluveekogudes üldjuhul pole. Parasvöötmes järgib vooluveekogude temperatuur õhutemperatuuri kõikumist hilinemisega, kuigi talviti ei lange vedela vee temperatuur alla nulli. Tavaliselt jääb parasvöötme vooluveekogude aastane temperatuurivahemik 0 ja 25 °C vahele. Suurematel laiuskraadidel on vooluveekogude vesi harva soojem kui +15 °C ning jää võib seda katta rohkem kui pool aastat. Troopilises kliimavöötmes võib veetemperatuur tõusta +40 °C lähedale. Et suured jõed võivad aga sealgi alata liustikest toituvatest mägiojadest, võib vesi allavoolu liikudes soojeneda kümneid kraade. Vahel võivad vooluveekogud olla väga püsiva temperatuuriga. Kui veebilansis on suur osakaal põhjaveel, ei muutu vooluveekogu temperatuur õhutemperatuuriga võrreldes aasta jooksul kuigi palju, sest põhjavee temperatuur vastab ligikaudu aasta keskmisele õhutemperatuurile (joonis 1.100). Kuumaveeallikatest vett saavate vooluveekogude puhul selline seos muidugi ei kehti. Troopilises kliimavöötmes, kus õhutemperatuur on püsiv, ei kõigu ka allikatega mitteseotud vooluveekogude temperatuur.

Taimestiku mõju vooluveekogude temperatuurile sõltub nende mõõtmetest. Suure ja laia jõe veetemperatuuri ei mõjuta selle kallastel kasvav mets kuigi palju. Seevastu väikeste ojade veepeegli võivad puuvõrad täielikult varjata (joonis 1.101) ning näiteks metsaraie võib nende temperatuuri paljude kraadide võrra tõsta. Selline soojusrežiimi muutumine on üsna tavaline asulate rajamisel või põllumajanduspiirkondades. Suurem on temperatuuri ööpäevane kõikumine neis väikestes vooluveekogudes, mis asuvad mägedes või millel pole varjavat kaldametsa. Suvine temperatuur võib varieeruda +5 kraadist öösiti +15 kraadini päeval. Suurtes jõgedes takistab veetemperatuuri kõikumist nende suur veemass. Teine oluline soojusrežiimi muutja vooluvetel on paisutamine. Aeglasema vooluga jõelõigud soojenevad rohkem, mistõttu temperatuur kogu jõesängis tõuseb. Samal ajal väheneb suurema aurumise tõttu vooluhulk.

**1.100.** Üks Eesti külmima veega vooluveekogusid on Võlingi oja, mis toitub allikaveest, läbides muu hulgas pildil olevaid Vilbaste allikaid.

**1.101.** Paljude ojade veepeegel on isegi kevadel puuvõradest varjutatud (Tiskre oja Harjumaal).

## 1.5.2. Järve soojusbilanss

Nii nagu Maa tervikuna saavad ka veekogud Päikeselt pidevalt soojust juurde, kuid veetemperatuur neis lakkamatult siiski ei tõuse. Järelikult on järve saabuv energiavoog tasakaalus järvest lahkuvaga. Järve üldise **kiirgusbilansi** (joonis 1.102) saab kirjutada kujul

$$Q_B = S' + D + Q_A - Q_R - Q_U - Q_W ,$$

kus $Q_B$ on kiirgusbilanss ehk kiirguse puhasjääk, $S'$ veepinnani jõudnud otsene kiirgus, $D$ veepinnani jõudnud hajuskiirgus, $Q_A$ soojuskiirgus atmosfäärist, $Q_R$ peegeldunud kiirgus, $Q_U$ veest väljuv hajuskiirgus ja $Q_W$ soojuskiirguse emissioon veest.

Öösel säilib vaid pikalainelise kiirguse bilanss, sest muude tegurite osatähtsus muutub tühiseks:

$$Q_B = Q_A - Q_W$$

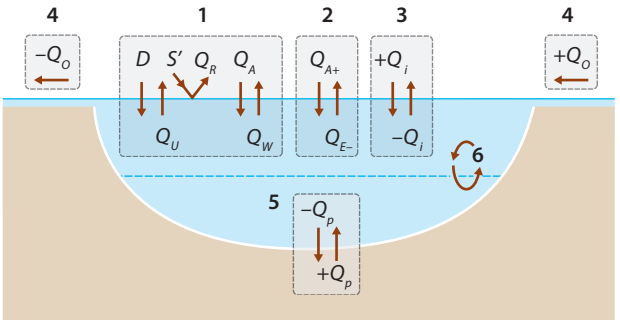
Seda vahet nimetatakse **efektiivseks kiirguseks** ja see on lihtsalt arvutatav, lähtudes vee- ja õhutemperatuuri erinevusest:

$$Q_B\,(\mathrm{cal \cdot cm^{-2} \cdot päev^{-1}}) = -11 \cdot (t^\circ_W - t^\circ_A)$$

**Järve energiabilanss** sisaldab peale kiirgusbilansi veel teisigi elemente, sest kiirgus ei ole ainus soojuse ülekande viis (joonis 1.102). Soojuse lisandumise korral on bilanss positiivne, lahkumise korral negatiivne. Kuid järve soojusbilanss võib olla negatiivne ka positiivse kiirgusbilansi korral. Summaarne **soojusbilanss** $Q_t$ on soojushulk, mis lisandub vette või lahkub sealt vaadeldava ajavahemiku jooksul:

$$Q_t = Q_B + Q_i - Q_e - Q_0 - Q_p ,$$

kus $Q_i$ on konvektiivne soojusvahetus õhuga, mille suund sõltub vee- ja õhutemperatuuri erinevusest, $Q_e$ vee aurustumissoojus (2260 J/g), $Q_0$ jõgede kaudu toimuva soojuse välja- ja sissekande vahe ning $Q_p$ setetesse salvestuva ja sealt eralduva soojuse vahe.




**1.102.** Järve energiabilanss.
1 – kiirguslik soojusvahetus, 2 – latentne soojusvahetus, 3 – konvektiivne soojusvahetus atmosfääriga, 4 – advektiivne soojusvahetus valglaga, 5 – soojusvahetus setetega, 6 – turbulentne soojusvahetus epi- ja hüpolimnioni vahel.

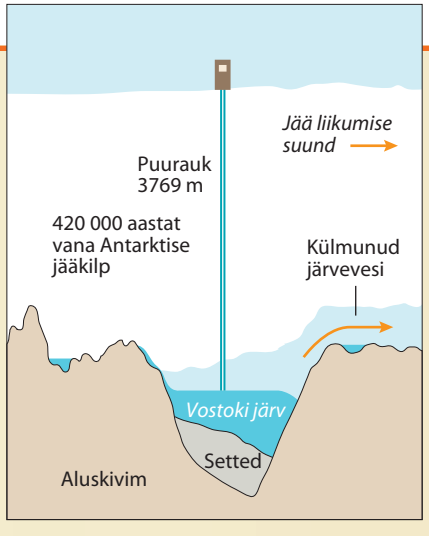
Järve soojuslikuks iseloomustamiseks kasutatakse limnoloogias järves **aasta jooksul salvestuvat soojushulka** ($Q_y$), mis on vajalik konkreetse järve kõigi veekihtide soojendamiseks aasta miinimumtemperatuurilt aasta maksimumtemperatuurini (ääremärkus 1.5). Parasvöötme keskmise sügavusega järvede puhul on see vahemikus 125–170 kJ/cm$^2$. Erandi moodustavad eriti suured ja sügavad järved, nagu Baikal ja Michigan, milles salvestuv soojushulk on 210–275 kJ/cm$^2$. Polaarvöötme järvedes salvestub pisut üle 40 kJ/cm$^2$.

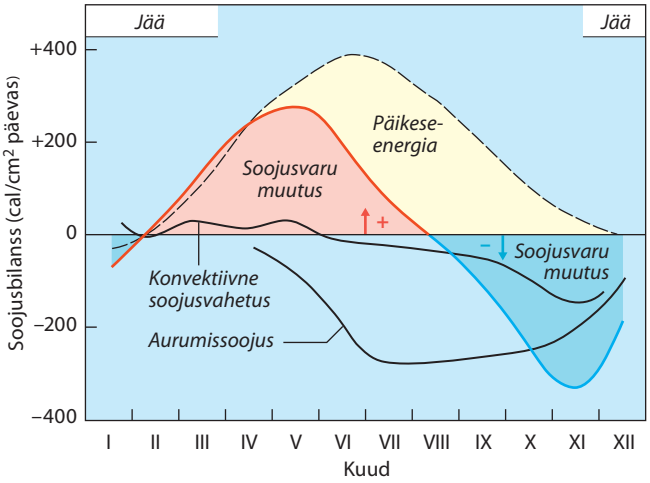
Aastase soojushulga võib polaar- ja parasvöötmejärvede puhul kaheks jagada. **Suvine soojuse lisa** ($Q_s$) tõstab järve veetemperatuuri homotermia seisundist (kogu veesamba temperatuur on +4 °C) suvise maksimumtemperatuurini. See soojushulk salvestub vee pinnakihi soojenemise ja tuule poolt ümberjaotamise tulemusena. **Talvine soojuse lisa** ($Q_w$) soojendab järve aasta miinimumtemperatuurilt homotermia (+4 °C) seisundini. Jää moodustumisel eraldub märkimisväärne hulk soojust:

1.5 ÄÄREMÄRKUS

### VOSTOKI JÄRV

Teadaolevalt suurim subglatsiaalne järv Vostok asub Antarktikas ja on nime saanud sealse polaarjaama järgi. Kuigi järve olemasolu tõestati alles 1993. aastal, oletas Andrei Kapitsa juba 1950. aastatel seismiliste uuringute põhjal, et selles piirkonnas peaks asuma suur jääalune veekogu. Ligikaudu 4000 m paksuse jääkilbi all oleva järve pikkus on 250 km, laius 50 km ja pindala 12 500 km$^2$ ning suurim sügavus üle 800 m. Tektoonilise tekkega järv kattus jääga umbes 15–25 miljonit aastat tagasi ja on sellest ajast peale olnud atmosfäärist isoleeritud. Veetemperatuur vahetult jää all on –3 °C, kuid järvevesi püsib vedelana jääkilbi tekitatud suure rõhu (35,5 MPa) tõttu. Sügavamad veekihid on märksa soojemad (u 10 °C). Põhjalähedase veekihi soojus pärineb tõenäoliselt geotermilisest allikast. Järv on oligotroofne ning üleküllastunud hapnikust ja lämmastikust. Sellises keskkonnas elavad mikroorganismid võivad olla ainulaadsed, sest nad isoleeriti väga pikka aega tagasi ning evolutsiooniprotsessid on seal kulgenud muust maailmast sõltumatult. Vostoki järve uurimine on keerukas, sest läbi tuleb puurida kilomeetritepaksusest jääkihist ning kasutada külmumise takistamiseks antifriisi. Sellega kaasneb oht, et järvevesi reostatakse tänapäeva mikroflooraga.






**1.103.** Sesoonne soojusbilanss kihistunud Mendota järves (USA).

1 cm jää paksuse kohta 335 J/cm$^2$. Arvestades meie järvede keskmist jää paksust (30–50 cm), moodustab see latentne soojus 10–154 kJ/cm$^2$, mis tuleb talvises soojuse lisas arvesse võtta.

Parasvöötmes asuva Mendota järve sesoonne soojusbilanss (joonis 1.103) näitab, et järve soojusvaru saavutab maksimumi enne päikesekiirguse suvist haripunkti, sest soojuskadu aurumise ja konvektsiooni tõttu ületab kesksuvel Päikeselt saadava kiirgusliku soojushulga. Siiski võib soojusbilansi käik olla ilmastikust olenevalt aastati üsna muutlik.

## 1.5.3. Järvede soojuskihistumine

**SOOJUSKIHISTUSE KUJUNEMISE PÕHJUSED** Päikesekiirgus on veekogude peamine soojusallikas ja seepärast võiks arvata, et temperatuurijaotus järvedes sarnaneb kiirgusjaotusega. Tegelikult on olukord vee omaduste tõttu mõneti teistsugune. Pindmises ühemeetrises veekihis muutub soojuseks üle poole vette tunginud lühilainelisest kiirgusest (nähtava valguse neeldumine on palju väiksem). Kuna neeldumine suureneb sügavuti eksponentsiaalselt, jõuab sügavamale kui 2 m ka kõige puhtamas vees vähem kui veerand Päikese lühilainelisest kiirgusest. Veest väljuv soojuskiirgus on veelgi enam veepinnanähtus, sest soojust kiirgab vaid mõne sentimeetri paksune pindmine veekiht. Sügavamal tekkinud soojuskiirguse vesi neelab. Vee molekulaarne soojusjuhtivus on väga halb ning soojuse transpordiks ühemeetrise vahemaa taha kuluks vähemalt üks kuu.

Seega tekib olukord, kus pindmine, kiirgusele avatud ja atmosfääriga termilises kontaktis olev veekiht saab pidevalt soojusenergiat juurde, kuid alumised mitte, ning seetõttu peaks kiiresti tõusma just pinnavee temperatuur. Samal ajal toimub veemassis pidev segunemine. Erineva temperatuuriga (tihedusega) veekihtide läbisegamiseks tuleb teha seda rohkem tööd, mida suurem on kihtide temperatuurierinevus, ning võrdse temperatuurierinevuse korral seda rohkem tööd, mida kõrgem on temperatuur. Kihtide segamiseks vajalik töö (ergides) on leitav järgmiselt:

$$W = \frac{A \cdot C^2}{12 \cdot (\rho_2 - \rho_1)'} \ ,$$

kus $A$ on veesamba pindala (cm$^2$), $C$ veesamba kõrgus (cm), $\rho_1$ vee tihedus veesamba ülemisel pinnal ja $\rho_2$ vee tihedus veesamba alumisel pinnal. Praktikas pruugitakse mõõtühikut nimetusega **suhteline termiline vastasseis** (*relative thermal resistance* – RTR).

$$1 \text{ RTR} = 8 \cdot 10^{-5} = \rho_{4^\circ} - \rho_{5^\circ}$$

Näiteks:

$$\rho_{24^\circ} - \rho_{25^\circ} = 30 \text{ RTR}$$
$$\rho_{29^\circ} - \rho_{30^\circ} = 40 \text{ RTR}$$

Pinnakihi segunemise põhjused võib jaotada mehaanilisteks ja konvektiivseteks. Enamikus järvedes jaotub soojus suvel ümber peamiselt tuule mehaanilise segamise toimel, mis moodustab u 90% kõigi vee segunemises osalevate protsesside energeetilisest väärtusest (joonis 1.104). Vee konvektiivse segunemise põhjused on mitmekülgsemad. Veekogu pinnakihti võib jahutada öine õhutemperatuuri langus, külm vihm ja suurenenud aurumine ning tulemuseks on pindmise veemassi laskumine põhja poole. Konvektiivse segunemise osatähtsus on vee soojenemise perioodil siiski väike ja tema ulatus ei küüni tavaliselt sügavamale kui kolm meetrit.

**1.104.** Tuul on peamisi soojuse ümberjaotajaid veekogudes. Torm Michigani järvel.

**KIHISTUMUSE STABIILSUS** Järvenõo ja valgala morfomeetria ning tuule kiirus määravad kihistumuse stabiilsuse. Kihistunud **järve stabiilsus** (*S*) järve pindalaühiku kohta on mehaanilise energia hulk või töö, mida on vaja teha kogu veesamba segamiseks ühesuguse temperatuurini soojuse lisandumise ja lahkumiseta. Suvisel kihistumisperioodil väljendab stabiilsus niisiis töö hulka, mida on vaja teha järve kihistumise takistamiseks. Stabiilsus on seotud järve suuruse ja morfomeetriaga ning sõltub pindalast ja sügavusest:

$$S = \frac{1}{A_0} \cdot \int_{z_0}^{z_m} A_z(z - z_g)(\rho_z - \rho_m) \cdot dz \,,$$

kus $A_0$ on järve pindala, $Z$ konkreetse kihi sügavus, $A_z$ pindala sügavusel $Z$, $Z_m$ suurim sügavus, $\rho_z$ vee tihedus sügavusel $Z$, $\rho_m$ vee keskmine tihedus täielikul segunemisel ja $Z_g$ järve raskuskeskme sügavus. $Z_g$ võib kihistumata järvedes võtta võrdseks keskmise sügavusega; kihistunud järvedes arvutatakse see järgmiselt:

$$z_{gs} = \frac{1}{V} \cdot \int_{z_0}^{z_m} z \cdot \rho_Z \cdot A_Z \cdot dz \,,$$

kus $V$ on järve maht:

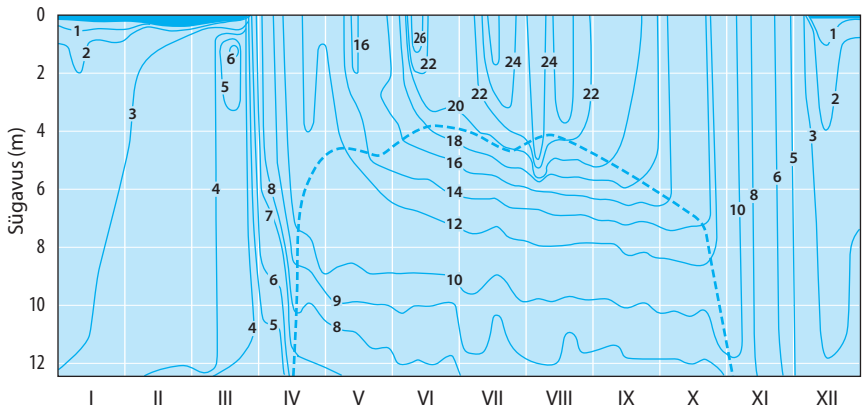
$$V = \int_{z_0}^{z_m} A_z \cdot dz$$

Väikeste ja tuulte eest hästi varjatud järvede kihistumus võib olla väga stabiilne. Suured ja madalad järved, eriti need, kus lainete ajutee on väga pikk, ei pruugi üldse kihistuda.

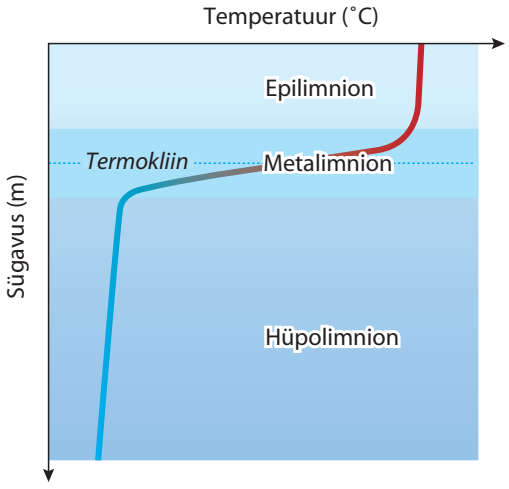
**KIHISTUMUSE KUJUNEMINE** Termilise kihistumuse iseloomu ja kujunemist järvedes on mõistlik vaadelda parasvöötme dimiktiliste järvede näitel, mis on järvede hulgas enamuses ja limnoloogidele kõige tuttavamad ning milles ilmnevad kõik kihistumisnähtused. Jääst vabanemise hetkel on kogu veemassi temperatuur ligikaudu +4 °C (joonis 1.105). Sellel temperatuuril on termiline vastupanu vee läbisegamisele kõige väiksem ja piisab nõrgast tuulest, et kogu veemass põhjani läbi segada. Ühtlustunud temperatuuri järgi nimetatakse seda perioodi **kevadiseks homotermiaks** ehk **tsirkulatsiooniks**. Selle kestus sõltub järve omadustest ja ilmastikust. Väikeses tuulte eest varjatud järves võib homotermia püsida paar päeva, suurtes ja avatud järvedes isegi mitu nädalat, mille jooksul segunenud veekihi temperatuur võib tõusta +10 °C-ni ja rohkemgi. Homotermilise soojenemise määr sõltub tugevasti järve sügavusest ja mahust.

Kui soojad ja tuulevaiksed ilmad püsivad, soojeneb intensiivselt järve pinnakiht. Piisab paarikraadisest temperatuurierinevusest, et takistada veemassi edasist segunemist. Sellega lõpeb kevadine homotermia ja algab (**suvine**) **kihistumine** ehk **stratifikatsioon**, mille käigus kujuneb järves kolm eraldatud veekihti: epilimnion, metalimnion ja hüpolimnion (joonis 1.106).

**Epilimnion** on pindmine, ühtlaselt soe ja läbisegatud veekiht, mis vastandub külmale ja staatilisele põhjakihile – **hüpolimnionile**. Epilimnioni kui vee ja õhu piirpinna paksust mõjutab tugevasti järve suurus. Tuule eest varjatud väikestes järvedes võib epilimnioni paksus olla alla kahe meetri, kuid suurtes (kümned ruutkilomeetrid) ja tuulte räsitavates järvedes isegi 15–20 m. Epi- ja hüpolimnioni vahel paiknevat suurima temperatuuri- ja tihedusmuutusega veekihti kutsutakse **metalimnioniks**. Selle osaliselt kattuvateks sünonüümideks on **termokliin** ja **temperatuuri hüppekiht**, kuid tegelikult on need pigem metalimnioni komponendid. Metalimnionit on mõnikord keerukas piiritleda ja segadus sünonüümidega on tekkinud eelkõige ajaloolistel põhjustel. Termokliiniks nimetati algselt gradienti, kus veetemperatuuri langus on vähemalt 1 °C/m (Birge 1897). Metalimnioni määratlus (Brönsted, Wesenberg-Lund 1911) pole nii jäik kui Birge definitsioon, hõlmates ka veekihti, kus paiknevad erinevad tihedusgradiendid ja suurima temperatuurilanguse piirkond – tasandiline termokliin (Hutchinson 1957).

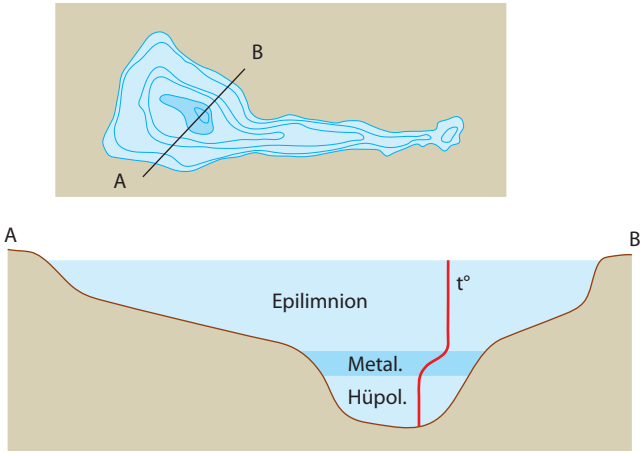



**1.105.** Veetemperatuuri aastane käik Lawrence'i järves. Punktiiriga on tähistatud termokliin.




**1.106.** Temperatuurijaotus suvises kihistunud järves. Suvine temperatuur võib kihistunud järves väga ebaühtlaselt jaotuda. Metalimnionis langeb temperatuur vertikaalis oluliselt sageli meetri või mõne ulatuses. Epilimnion on ühtlaselt soe ja hüpolimnion külm.

Kevadise tsirkulatsiooni lõppedes kujuneb metalimnion põhjalähedases kihis (joonis 1.105) ja esialgne temperatuurigradient temas on väike, umbes 1 °C/m. Vee edasisel soojenemisel kerkib metalimnion ülespoole ja stabiliseerub ning temperatuurigradient võib kasvada kuni 10 °C-ni/m. Metalimnioni paksus ei ole kihistumisperioodil püsiv: kevadel tekkiv õhuke metalimnion pakseneb kihistumisperioodi jooksul pidevalt. Suvisel stagnatsiooniperioodil tõuseb aeglaselt ka hüpolimnioni temperatuur. Sellel on peamiselt kolm põhjust. Esiteks võib hea läbipaistvuse korral hüpolimnioni tungida päikesekiirgus. Teiseks toimub turbulentne soojusülekanne epilimnionist. Ja kolmandaks on võimalik soojusülekanne lahustunud ainete erinevast kontsentratsioonist tingitud gradienthoovuste mõjul. Orgaaniliste ainete bioloogilisel oksüdatsioonil eraldub samuti soojust, kuid selle hulk on tühine ega tule praktikas arvesse.




Et põhjakihtide temperatuur on suve jooksul tõusnud, tekib **sügisene homotermia** ehk **tsirkulatsioon** tavaliselt kõrgemal temperatuuril kui kevadine. Sügisese homotermia teke võib olla väga kiire, kuid kestus varieerub olenevalt ilmastikust ja veemassist. Kui kogu veemass saavutab temperatuuri +4 °C, võib tsirkulatsioon lõppeda ja kiirel pinnakihi jahtumisel tekkida jää. 0- ja +4-kraadise vee tiheduse erinevus on väike ja kihistumus ebapüsiv. Sageli tsirkulatsioon jätkub ja kogu veemass jahtub nullilähedase temperatuurini. Väga suured ja sügavad järved jahtuvad nii aeglaselt, et jääd ei pruugi tekkidagi (näiteks Suur järvistu).

Kohe pärast jääkaane moodustumist on jääga piirneva veekihi temperatuur 0 °C, millele sügavuti järgneb temperatuurihüpe selle temperatuurini, mille juures viimati enne külmumist oli homotermia. Talve jooksul kujunevat kihistumust, kus põhjakihtides on veetemperatuur kuni +4 °C ja nende peal lasuvad külmemad veekihid, mille temperatuur ulatub vahetult jää all 0 °C-ni, nimetatakse **talviseks pöördkihistumuseks**. Anomaalset talvist temperatuurikihistumust võib tekitada ka jää alla tunginud sulavesi, mille mineraalsus on järvevee omast väiksem ja mis seetõttu ei lasku põhja ka soojenemisel +4 °C-ni.

Dimiktilistes järvedes võib äsja kirjeldatud kihistumisprotsessist siiski kõrvalekaldeid esineda. Neist tüüpilisim on mitme termokliini kujunemine, kui intensiivse soojenemise perioodid vahelduvad intensiivse segunemise perioodidega. Tugeva läbivooluga järvedes ähmastuvad termokliin ja metalimnion ning madalatele järvedele on iseloomulik püsiva suvise kihistumuse puudumine.

**■ KIHISTUMUSE ROLL JÄRVES** Kihistumine on järvedes mitmel põhjusel väga oluline protsess. Tihedusgradient jagab järve erinevalt talitlevateks kihtideks. Hüpolimnion on isoleeritud atmosfäärist ja järve pinnal toimuvatest protsessidest. Epilimnion seevastu on isoleeritud setetest, kuigi kontakt nendega säilib litoraalivööndis. Soojuse ja ainete transport läbi metalimnioni on väga piiratud ning ainete ümberjagamine veesambas toimub ainult kevadise ja sügisese läbisegamise käigus. Ja lõpuks kujundavad stagnatsiooniperiood ja tihedusgradient organismide jaoks mitmesugused ökonišid.

Siiski tuleb arvestada, et järve suurusest ja järvenõo kujust olenevalt võib kihistumine mõjutada vaid väga väikest osa järvest (joonis 1.107). Seepärast ei tohiks järves toimuvaid protsesse hinnata ainult mõnes süvikus mõõdetud näitajate põhjal, vaid lähtuda tuleks järve keskmisest või suhtelisest sügavusest.

**1.107.** Järve suurusest ja järvenõo kujust olenevalt võib kihistumine mõjutada vaid väga väikest osa järvest.

### 1.5.4. Järvede segunemistüübid

Järvede soojenemine päikesekiirguse toimel ja jahtumine konvektsiooni teel on peamised tegurid, mis muudavad veesamba termilist struktuuri. Erinevused järvede kihistumises ja segunemises on tingitud energiavahetuse iseärasustest atmosfääriga ning sissevoolude mõjust. Neid protsesse reguleerivad kliimatingimused ja veekogu morfomeetria. Kuigi parasvöötmes asub kõige rohkem järvi ja dimiktiline segunemine on kõige levinum, leidub teistes kliimavöötmetes ka hoopis teistsuguseid segunemistüüpe.

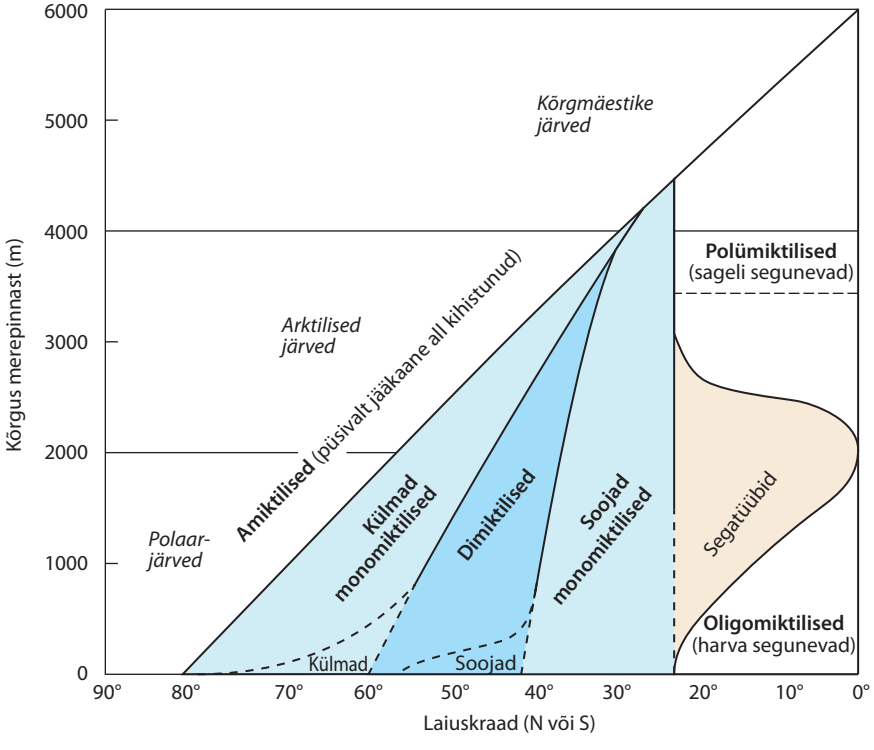
Erinevused vertikaalses segunemises ja temperatuurijaotuses on üks järvede rühmitamise aluseid. Tuntuim ja tänapäeva limnoloogias kõige laiemalt kasutatav on Hutchinsoni-Löffleri tüpoloogia (1956), mida on täiendanud Lewis (1983). See hõlmab järvi, mis on kihistumiseks piisavalt sügavad. Tüüpide eristamine põhineb segunemise ja kihistumise aastaajalisel jaotusel. Segunemistüüpide levik sõltub geograafilisest asukohast ja kõrgusest merepinna suhtes (joonis 1.108). Segunemise põhjal võib kõik maailma järved jagada kolme rühma.

- **Amiktilised järved** on aasta ringi püsiva jääkaane all ega segune üldse. Haruldaste veekogudena on need levinud ainult Antarktikas ja Arktikas ning kõrgel mägedes (Andid, Himaalaja, Alpid). Segunemise puudumine on amiktiliste järvede puhul siiski tinglik kriteerium, sest madalates järvedes võib päikesekiirgus tungida läbi jääkaane, soojendada setteid ning kutsuda esile konvektiivse segunemise. Antarktika järvedele on aga iseloomulik aeglane segunemine maapõueenergia varal.
- **Meromiktilised järved** ei segune kunagi täielikult veesambas valitseva suure tihedusgradiendi tõttu (vt ääremärkus 1.6). Enamasti jääb segunemisest kõrvale mingi osa hüpolimnionist.
- **Holomiktilised järved** moodustavad järvedest enamiku ja neis seguneb vesi täielikult vähemalt ühel korral aastas.

Segunemise sageduse ja temperatuurijaotuse järgi liigitatakse holomiktilised järved veel omakorda mitmesse rühma (joonis 1.109).

**Monomiktilistes järvedes** esineb vaid üks segunemisperiood, ülejäänud osa aastast on nad kihistunud. Olenevalt kliimavöötmest võivad monomiktilised järved olla soojad või külmad. **Külmades** monomiktilistes järvedes ei tõuse veetemperatuur kunagi üle +4 °C. Toimub vaid üks vee tsirkulatsioon suvel, mil jää lühikeseks ajaks kaob (joonis 1.109). Sellised järved on levinud peamiselt Arktikas ja kõrgmäestike liustikel. Arktika ja parasvöötme piirialal võib kohata järvi, mis aasta ilmastikust olenevalt on mono- või dimiktilised. **Soojades** monomiktilistes järvedes seevastu ei lange temperatuur kunagi alla +4 °C, mistõttu need järved ei külmu. Vee segunemine toimub üks kord aastas – talvel – ning suvel on nad püsivalt kihistunud (joonis 1.109). Selliseid järvi leidub parasvöötme merelise kliimaga aladel Põhja-Ameerikas ja Euroopas (Iirimaal, Šotimaal) ning lähistroopilises kliimavöötmes.

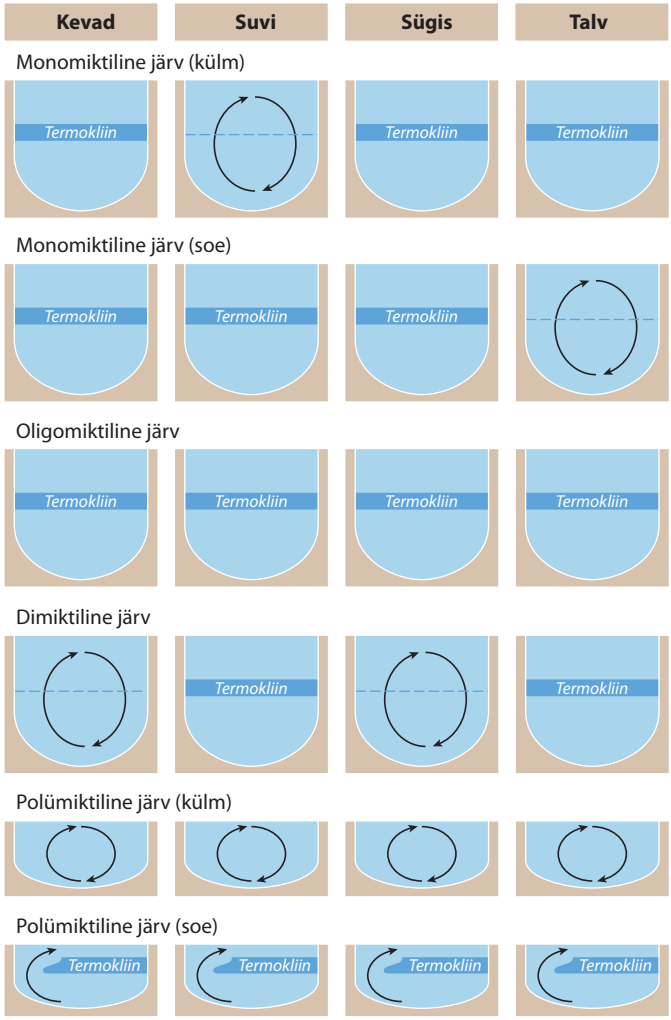
**1.108.** Segunemistüüpide geograafiline jaotus.



**Oligomiktilised järved** on levinud peamiselt ekvaatorilähedastel aladel. Enamasti on tegu selliste järvede ja veehoidlatega, millel on stabiilne veesammas. Segunemiste vaheajal, mis võib kesta mitu aastat, on nad püsivalt kihistunud (joonis 1.109), ehkki pinna- ja põhjatemperatuuri erinevus on vaid paar kraadi. Ebaregulaarse ja mittetäieliku segunemise põhjuseks on öine veepinna jahtumine või külm vihm. Kui veepind jahtub, kasvab järsult vee tihedus ning konvektsioonivoog jahutab ka alumisi veekihte. Kõrge päevase ja madala öise temperatuuri vaheldumine võib mõnes järves kujundada saehambaid meenutava kihistumisgraafiku.

**Dimiktilistes järvedes** vaheldub kevadine ja sügisene segunemine päripidise kihistumisega suvel ja pöördkihistumisega talvel (joonis 1.109). Tegu on parasvöötmes levinuima segunemistüübiga, mis kontinentaalse kliimaga piirkondades võib ulatuda kaugele lõunasse. Tugevalt merelise kliimaga aladel (näiteks Iirimaa) võivad dimiktilised järved ka puududa.

**Polümiktilised järved** on hüpolimnioni tekkimiseks ja püsiva kihistumuse säilitamiseks liiga madalad ning kogu veemass seguneb juhuslikult tugevate tuulte või ööpäevaste temperatuurikõikumiste tulemusena. **Külmades** polümiktilistes järvedes püsib temperatuur aasta ringi +4 °C ümber. Need on troopilise vöötme kõrgmäestiku järved. Päeval ammutavad nad suure hulga soojust, kuid tugeva öise jahtumise tagajärjel tekivad konvektsioonivoolud, mis segavad kogu veesamba läbi (joonis 1.109). **Soojad** polümiktilised järved on keskmise sügavuse ja suhteliselt suure pindalaga troopilised järved, kus vee kihistumus on ebapüsiv. Kihistumuse tekkeks piisab neis kõrge veetemperatuuri tõttu üsna väikesest temperatuurierinevusest veesambas.




**1.109.** Holomiktiliste järvede segunemistüübid.

1.6 ÄÄREMÄRKUS

### HOT LAKE

Madalates meromiktilistes järvedes võib suure soolasisalduse tõttu tekkida erakordseid pöördkihistumusi. George C. Andreson kirjeldab näiteks Washingtoni osariigis Oroville'i lähedal vanas soolakarjääris asuvat väikest soolajärve Hot Lake (pindala 1,27 ha, suurim sügavus 3,5 m), mille 1 m paksune miksolimnion (vt lk 86) sisaldab 100 g $MgSO_4$ liitri kohta. Monimolimnionis on soolade sisaldus kuni 400 g/l. Suve jooksul salvestub monimolimnionis suur hulk soojust, mis vee halva soojusjuhtivuse ja kihistumuse tõttu ei pääse järvest välja ning veetemperatuur võib tõusta kuni 50 kraadini. Talvel püsib 2 m sügavusel jääkaane all temperatuur ligi +30 °C.

## 1.5.5. Meromiktilised järved

Märkimisväärne osa Maa järvedest on püsivalt kihistunud. Eelkõige kuuluvad nende hulka suured ja väga sügavad veekogud, nagu näiteks Baikali järv, Kaspia meri, Tanganjika järv ja mõned teised. Kuid ka paljud väiksemad järved ei segune tsirkulatsiooniperioodil täielikult, sest teatud eripärade tõttu jääb tuulte mõju ja konvektsioon veesambas liiga nõrgaks, et kihistumust lõhkuda. Selliseid järvi nimetatakse **meromiktilisteks** ning püsiva kihistumuse põhjuseks võib olla varjatus tuulte eest, morfomeetrilised ja hüdroloogilised iseärasused või suur tihedusgradient veesambas.

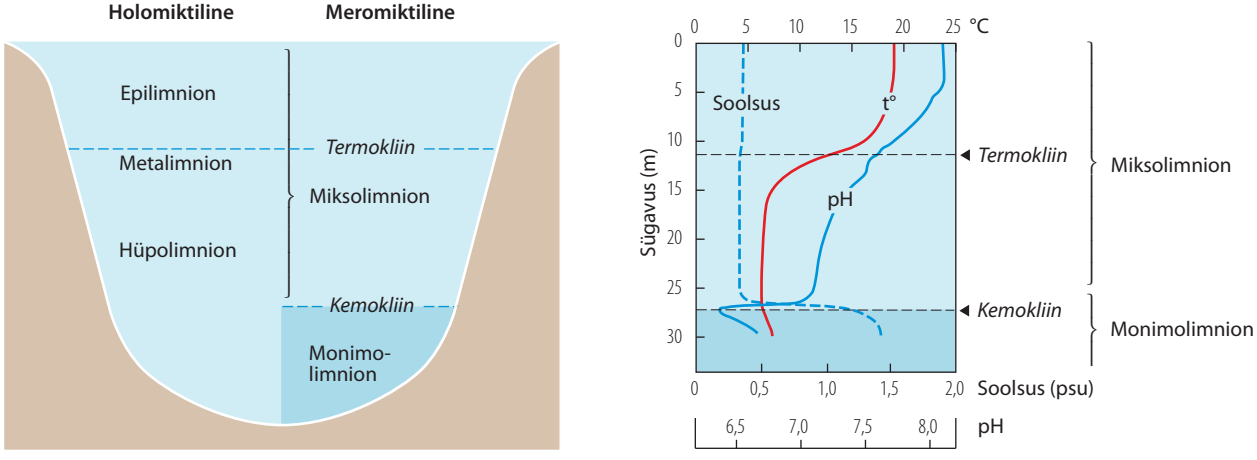
**MEROMIKSIA MÕISTE** Meromiktiliste järvede mõiste tõi 1930. aastatel limnoloogiasse Ingo Findenegg, kui ta Austrias Kärnteni järvi uurides avastas, et mõnedes neist toimub segunemine vaid piiratud ulatuses veesambast. Veesamba temperatuurijaotuse poolest sarnanevad meromiktilised järved holomiktiliste järvedega (joonis 1.110). Meromiktilistes järvedes toimub tsirkulatsioon ainult pindmises, üsna väikese mineraalsusega veekihis, mida kutsutakse **miksolimnioniks**. Kõige sügavamas, põhjalähedases kihis paikneb segunemisest kõrvale jääv **monimolimnion**. Nende vahel asub suure tihedusgradiendiga **kemokliin**.

Hoolimata meromiksia pikaajalisest tuntusest on teadaolevalt meromiktiliste järvede arv maailmas väike – pisut alla 200. Selle põhjal võib oletada, et meromiksia on üsna harvaesinev nähtus, kuid inimtegevuse mõjul kasvab selliste järvede arv pidevalt. Näiteks muutuvad paljud kaevandusveekogud meromiktiliseks suure sügavuse ja soolsuse tõttu. Meromiktilisuse määramist takistab ühtsete kriteeriumide puudumine, kui kaua peab kihistumus kestma, et järve võiks meromiktiliseks pidada. Findenegg eristas holo- ja meromiktilisi järvi selle põhjal, et esimesed segunevad vähemalt korra aastas (Findenegg 1937). Teiste autorite arvates peaks kihistus püsima aastaid või aastasadu, kuid täpset määratlust pole keegi andnud. Silmas tuleb pidada veel seda, et tõeliste meromiktiliste järvedega võrreldes on palju laiemalt levinud ebaregulaarse segunemisega järved, kus tavaoludes holomiktiline järv jätab vahele ühe või mitu segunemisperioodi. Sellist nähtust nimetatakse osaliseks või ebatäielikuks meromiksiaks.

Enesestmõistetavalt võivad meromiksia tekkes ja püsimises osaleda paljud protsessid ja tegurid, kuid traditsiooniliselt rühmitatakse meromiktilised järved peamise teguri järgi, mis viib püsiva kihistumuseni. Kõigi meromiksia vormide kujunemise juures on olulisteks teguriteks morfoloogilis-hüdroloogilised näitajad, nagu järve suhteline sügavus ja veevahetuseks kuluv aeg. Seega peaksid pika viibeajaga järved, mille pindala on ainult paar hektarit, kuid sügavus küündib paarikümne meetrini, muutuma suure tõenäosusega meromiktiliseks. Säärane morfoloogiline meromiksia kujuneb enamasti välja karsti-, vulkaani- ja söllijärvedes. Siiani on levinuim Hutchinsoni (1957) klassifikatsioon, mille järgi meromiksia võib olla ektogeenne, kreogeenne või endogeenne.

**EKTOGEENNE MEROMIKSIA** Ektogeense meromiksia korral toimub soolase vee kiire sissetung mageda veega järve või magevee jõudmine soolajärve, nii et moodustub veekogu, kus mageveekiht katab soolase ja tihedama veega monimolimnioni. Lahustunud mineraalained suurendavad kihistumise seisukohalt oluliselt vee tihedust. Soolsuse erinevus 10 mg/l võrra põhjustab sama suure tiheduserinevuse, kui on nelja- ja viiekraa-

**1.110.** Holomiktilise ja meromiktilise järve võrdlus.



**1.111.** Meromiktiline järv Penangi rahvuspargis Malaisias. Meromiksia tekib soolase merevee tungimisel mageveejärve.

**1.112.** Must meri pole küll käsitatav järvena, kuid tegemist on siiski maailma suurima meromiktilise veekoguga.

**1.113.** Gemündeni maarijärv Saksamaal toitub mineraalainerikkast põhjaveest. Suurem vee tihedus põhjakihtides soodustab veesamba kihistumist.

**1.114.** Kokkuvajunud pingo Alaskas, mille lohku on moodustunud teravalt kihistunud järv (USA, Alaska).

dise vee vahel. Ektogeenselt meromiktilisi järvi kohtab kõige sagedamini mererannikul, kus tormid või merevee tõus ujutavad soolase veega üle estuaarijärved (joonis 1.111). Väikestes sisemaajärvedes võib meromiksiat põhjustada ka inimtegevus, näiteks järvega piirnevate teede talvine soolatamine või alepõletus järve valgalal. Üks ektogeense meromiksia tähelepanuväärseid näiteid on Must meri, kus 9000 aastat tagasi pärast pikka „järve"-faasi algas soolase vee sissetung Vahemerest. Praegu on Must meri, mille kemokliini soolsus jääb vahemikku 18–20‰, suurim meromiktiline veekogu maailmas (joonis 1.112).

**KREOGEENNE MEROMIKSIA** Kreogeenne meromiksia on üks ektogeense meromiksia alltüüpe, kus järve põhjakihtidesse voolab põhjaallikate kaudu mineraalainerikast ja suurema tihedusega vett. Niisuguste järvede esindajaid võib arvukalt leida Euroopast; näiteks on sellised Saksamaal Eifeli mäestikus asuvad maarijärved (joonis 1.113). Neid on ka Eestis paikades, kus järvedesse suubuvad karbonaadirikkad põhjaallikad. Seda tüüpi meromiktilisi järvi on leitud veel Alaska siseosast, kus maa-alused allikad toovad soolast vett väikestesse ja sügavatesse järvedesse. Need järved asuvad lohkudes, mis on tekkinud külmunud mineraalses pinnases kujunenud jäise tuumaga kühmude (pingode) sulamisel (joonis 1.114).

**1.115.** Meromiktiline Njassa järv Aafrikas (suurim sügavus 706 m, pindala 29 600 km$^2$).

**■ ENDOGEENNE MEROMIKSIA** Endogeense ehk biogeense meromiksia korral suureneb mineraalainete (karbonaatide ja toiteainete) kontsentratsioon hüpolimnionis orgaanilise aine lagunemise tõttu. Enamasti ei kasva mineraalainete hulk stagnatsiooniperioodil nii kiiresti, et see takistaks sügisest või kevadist segunemist, kuid väga sügavates ja väikese pindalaga ning tuulte eest varjatud järvedes võib segunemine ära jääda. Kui see protsess kordub, on elektrolüütide kontsentratsioon juba nii suur, et järv muutub püsivalt meromiktiliseks.

Peaaegu kõik erakordselt sügavad ekvatoriaalsed järved, nagu Tanganjika ja Njassa, on endogeenselt meromiktilised (joonis 1.115). Parasvöötme kontinentaalse kliimaga piirkondades, kus on karmid talved, on biogeenne meromiksia tavaline ka väikese pindala ja mõõduka sügavusega tuulte eest varjatud järvedes.

**1.116.** Rõuge Kaussjärv.

**1.117.** Osaliselt meromiktiline Verevi järv.

**■ EESTI MEROMIKTILISED JÄRVED** Eesti meromiktiliste järvede kohta on vähe teada. Siiski viitab mõnede järvede temperatuurijaotuse eripära võimalikule meromiksiale. Näiteks väga sügava (24,5 m), kuid väikese (1,9 ha) Kaussjärve süvakihtide temperatuur on tublisti alla 4 °C (joonis 1.116). Magneesiumisisaldus põhjalähedases vees on üle viie korra suurem kui pinnakihis, rauasisaldus isegi 14 korda suurem. Biogeense meromiksia tüüpiline näide Eestis on Kooraste Linajärv (vt joonis 1.243, lk 161). Seda väikest tuulte eest väga hästi varjatud pehmeveelist järvekest kasutati varem linaleotuseks. Tulemuseks on põhjakihtide äärmiselt suur toiteainesisaldus (kogufosfor üle 1000 mg/m$^3$ ja kogulämmastik üle 5000 mg/m$^3$).

Verevi järv Elvas esindab **osaliselt meromiktilisi** veekogusid, jättes tihti segunemise vahele just kevadel (joonis 1.117). Seal on põhjuseks mineraalainerikkad allikad, varjatus tuulte eest ja suur toitesoolade hulk hüpolimnionis.

## KÜSIMUSED JA PROBLEEMÜLESANDED

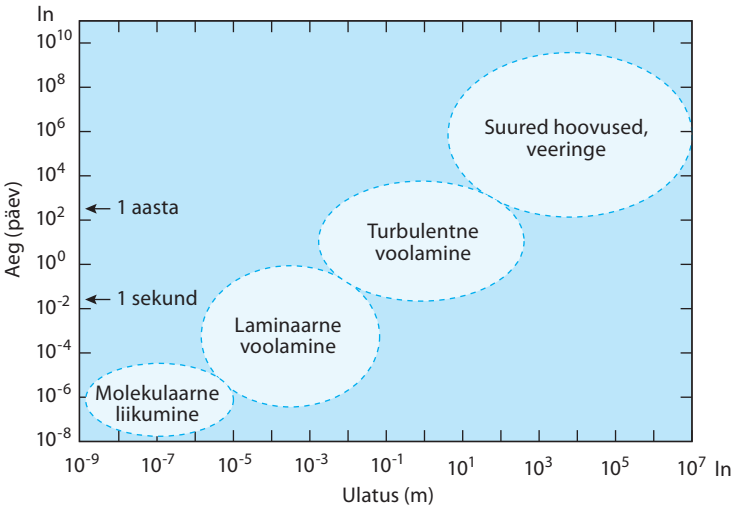
1. Enamik soojusest saabub järve päikesekiirguse kaudu. Miks erineb sügava järve suvine temperatuurijaotus valgusjaotusest?
2. 2000. a kevad algas kiirelt ning ilmad olid väga soojad ja tuuletud. Kas Elvas asuvas Verevi järves kujunes soojuskihistumus välja keskmisest varem või hiljem? Kas hüpolimnioni temperatuur oli keskmisega võrreldes kõrgem, madalam või ei erinenud sellest oluliselt?
3. Miks seguneb suure pindalaga järv sagedamini ja sügavamalt kui väike järv?
4. Miks kujuneb troopiliste järvede soojuskihistumus välja veekihtide väiksema temperatuurierinevuse juures kui parasvöötme järvede soojuskihistumus?
5. Selgitage, miks mõne jõe vesi laskub järve suubudes hüpolimnioni, teisel jääb epilimnioni ja kolmandal valgub laiali hoopis metalimnionis.
6. Kaks kliimatüübilt ja valgala geoloogiliselt iseloomult identset järve kihistuvad siiski erinevalt. Ühes järves kestab kevadine segunemisperiood kõigest nädala, teises aga kuus nädalat. Nimetage vähemalt kaks põhjust, mis seda erinevust selgitaksid.
7. Mõelge tegurite üle, mis põhjustavad meromiksiat ja aitavad seda säilitada. Millele pööraksite maastikupildis tähelepanu, kui otsiksite uusi meromiktilisi järvi?
8. Kuidas mõjutaks suvine äikesetorm oja soojusbilanssi?

## MÕISTED JA MÄRKSÕNAD

konvektiivne soojusvahetus
advektiivne soojusvahetus
seisuveekogude soojusvahetus
vooluveekogude soojusvahetus
soojusvahetus järvede ja vooluveekogude vahel
latentne e varjatud soojus
järve kiirgusbilanss
järve energiabilanss
efektiivne kiirgus
järve soojusbilanss
järves aasta jooksul salvestuv soojushulk
suvine soojuse lisa
talvine soojuse lisa
suhteline termiline vastasseis
järve stabiilsus
kevadine homotermia e tsirkulatsioon
vee kihistumine e stratifikatsioon
epilimnion
metalimnion
hüpolimnion
termokliin e temperatuuri hüppekiht
sügisene homotermia e tsirkulatsioon
talvine pöördkihistumus
amiktiline järv
meromiktiline järv
holomiktiline järv
monomiktiline järv
külm monomiktiline järv
soe monomiktiline järv
oligomiktiline järv
dimiktiline järv
polümiktiline järv
külm polümiktiline järv
soe polümiktiline järv
meromiksia
miksolimnion
monolimnion
kemokliin
ektogeenne meromiksia
kreogeenne meromiksia
endogeenne e biogeenne meromiksia

# 1.6. Vee liikumine

Tähelepanuväärne vee omadus on tema liikumisvormide rohkus. Need erinevad üksteisest nii mõõtmete kui ka kestuse poolest (joonis 1.118). Molekulaarsed liikumised kestavad murdosa sekundist ja läbitud vahemaad saab mõõta nanomeetrites. Ookeanihoovused ringlevad tuhandeid kilomeetreid sadade ja tuhandete aastate jooksul. Suuremad vee liikumised võib jagada suunatud **vooluks** (*flow*) ja **hoovusteks** (*currents*) ning perioodilisteks **laineteks** (*waves*).

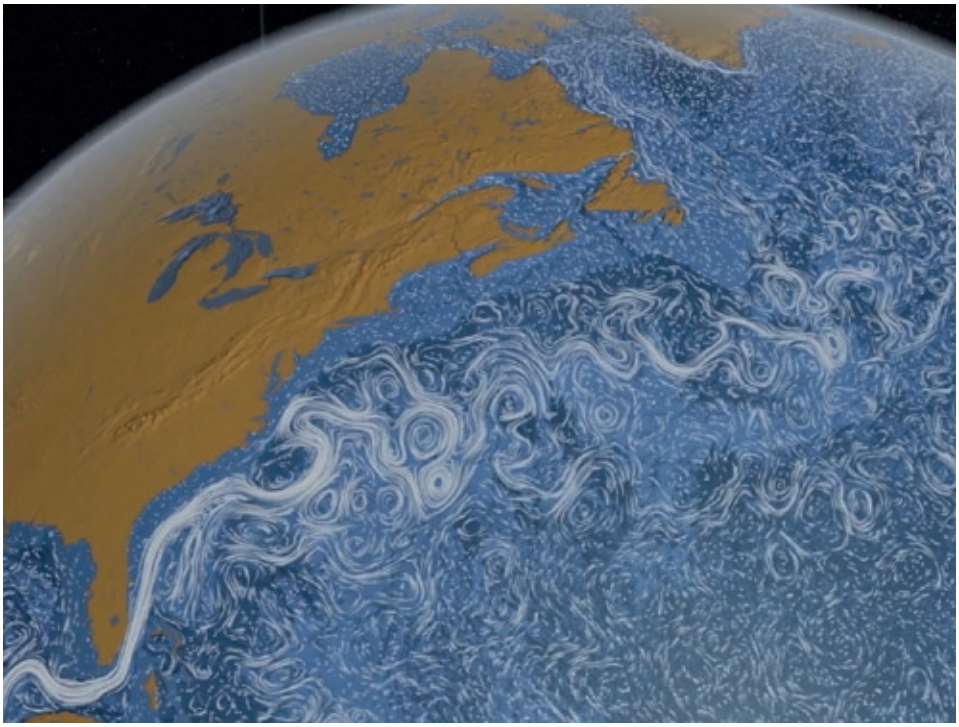



**1.118.** Vee liikumise ulatus ja kestus.

Peamine veemasse liigutav jõud hüdrosfääris on vee soojenemine ja aurumine päikesekiirguse toimel. Selle energiaallika abil käivitub veeringe, mille käigus ookeanide kohal auruv vesi langeb sademetena maismaale. Maapinnal kõrgemalt madalamale voolavast veest vabaneb sinna aurustumisel talletunud potentsiaalne energia. Pinnase ja kivimite kulutamine vooluvete poolt on üks potentsiaalse energia vabanemise näiteid. Suur kanjon Colorado jõel on ilmekas tõend vooluvete energeetilisest võimekusest (joonis 1.119).

Inimsilmale kõige paremini nähtav liikumapanev jõud on tuul, mis tekitab pinnalaineid ja segunemist veekogudes. Sellel liikumisel on väga suur mõju paljudele veeorganismidele.

Maa pöörlemisest tingitud Coriolisi jõud mõjutab vee liikumist ookeanides, meredes ja suurtes, rohkem kui 100 km² suuruse pindalaga järvedes: põhja või lõuna suunas liikuv veemass kaldub oma teelt kõrvale, sest Maa tema all pöörleb. Coriolisi jõu tõttu ei lange tuule suund ja vee liikumise suund kokku. Kõige paremini on



**1.119.** Näiteid vee liikumise tüüpidest. Colorado jõgi USAs (üleval) on mitme miljoni aasta jooksul kivimeid purustades oma sängi süvendanud. Nii on moodustunud nüüdseks ligi 2 km sügavune Suur kanjon. Golfi hoovus (vasakul), mis muu hulgas mõjutab tugevalt ka Euroopa kliimat, liigub üldjoontes põhja, kuid kaldub Coriolisi jõu mõjul oma teelt paremale.

**1.120.** Inimene mõjutab vee liikumist näiteks kanalite rajamisega. Pildil Valguta polder Võrtsjärve lähedal.

see märgatav suurte ookeanihoovuste puhul, mis Coriolisi jõu mõjul liiguvad antitsüklonaalselt – põhjapoolkeral päripäeva ja lõunapoolkeral vastupäeva. Samal põhjusel uuristavad jõed põhjapoolkeral rohkem oma paremat kallast, lõunapoolkeral vasakut.

Mandrite kohal, kus õhk soojeneb enam, on suviti ülekaalus tõusvad õhuvoolud ja tsüklonaalne tegevus. Seetõttu on ka sisemeredes ja järvedes põhiliselt tsüklonaalsed hoovustesüsteemid.

Organismid võivad samuti oluliselt vett liigutada. Näiteks põhjaloomastik intensiivistab vee vahetumist setetes. Seeläbi satuvad vette setetes sisalduvad ained. Inimene ja kobras aeglustavad paise ehitades vee liikumist, seevastu kanalite rajamine jälle suurendab vee liikumiskiirust (joonis 1.120).

## 1.6.1. Molekulaarliikumised ja vee voolamine

Kõige väiksema ulatusega on molekulaarne liikumine ehk soojusliikumine (ka Browni liikumine). Vedelikes molekulid kas võnguvad, liiguvad hüppeliselt edasi või põrkuvad naabermolekulidega. Soojusliikumisel on otsene seos temperatuuriga: mida kiiremini molekulid liiguvad, seda kõrgem on temperatuur. Veemolekulide liikumiskiirus võiks olla väga suur (> 100 m/s), kuid pidevate põrkumiste tõttu naabermolekulidega jääb tegelik kiirus väga väikeseks ($50 \times 10^{-9}$ m/s). Seepärast on ainete ja gaaside difusioon seisvas vees üliaeglane.

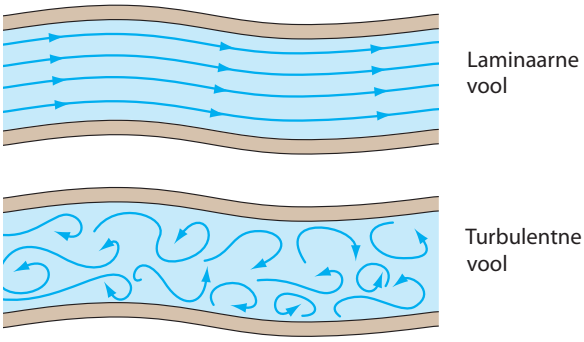
Suuremas ruumilises skaalas võib vee voolamine olla kas laminaarne või turbulentne. **Laminaarse voolu** korral on vee liikumiskiirus väike, voolujooned paralleelsed ja vool korrapärane (joonis 1.121). Laminaarne vool toimub järvedes näiteks sette ja vee piirpinnal, hõljuvate vetikarakkude ümber ja ka zooplankterite ümber, kui nad väldivad enda hüdrodünaamilist avastamist vaenlaste poolt.

Teatud voolukiiruse juures hakkab hõõrdumine põhjustama keeriseid ja vool muutub **turbulentseks** (joonis 1.121). Sama nähtus on jälgitav õhu liikumisel veepinna kohal või kahe erineva tihedusega veekihi liikumisel teineteise suhtes. Kriitilise kiiruse ületamise korral tekivad kahe erineva tihedusega keskkonna piirpinnal esialgu lained, mis amplituudi kasvades lähevad üle keeristeks (murdlained). Üleminekut laminaarselt voolamiselt turbulentsele iseloomustab Reynoldsi arv:

$$R_e = \frac{UL}{\nu},$$

kus $U$ on voolukiirus, $L$ vooludistantsi pikkus ja $\nu$ kinemaatiline viskoossus ehk viskoossuse ja tiheduse suhe. Kui $R_e < 500$, siis on voolamine laminaarne, $R_e > 2000$ korral aga turbulentne. Et vee turbulentsi tekitav kriitiline kiirus on juba paar mm/sek, siis looduslikes veekogudes päris laminaarset voolu peaaegu ei leidu.

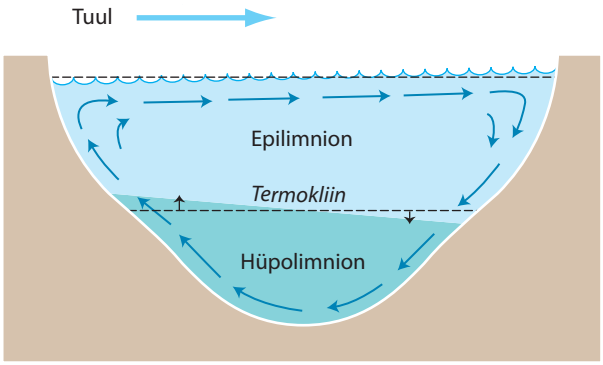
**1.121.** Laminaarset voolamist looduses peaaegu ei esine. Juba väikesel kiirusel tekivad keerised ja voolamine muutub turbulentseks.



## 1.6.2. Hoovused

Hoovused on seisuvete kulgliikumised. Vee liikumise suuna järgi jaotatakse hoovused **konvektiivseteks** (vertikaalseteks) ja **advektiivseteks** (horisontaalseteks). Hoovusi tekitavad tuuled (tuulehoovused ehk triivhoovused), vee tiheduse erinevused (tihedus- ehk gradienthoovused) ja veepinna kallakus (äravooluhoovused).

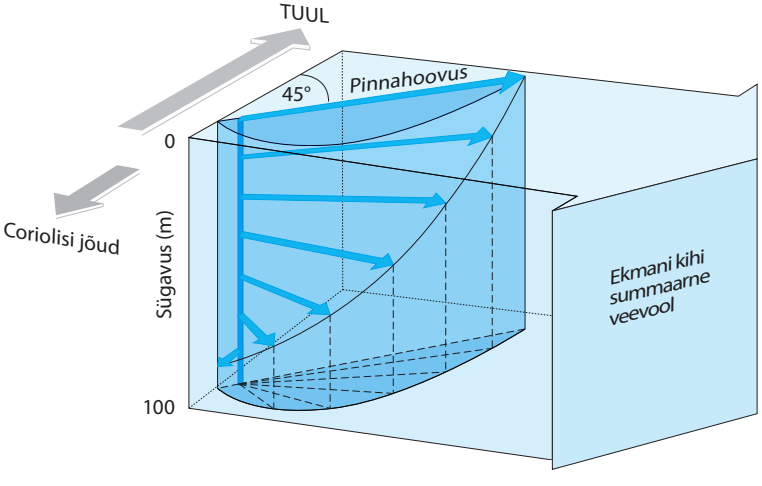
Järvedes on kõige levinumaks hoovuste liigiks **tuulehoovused**. Maa pöörlemise (Coriolisi jõu) tõttu ei lange tuule suund ja vee liikumise suund kokku. Püsiva ühesuunalise tuule korral kandub soe pinnavesi järve ühte otsa (joonis 1.122). Vastusena tekib kompensatsioonivool, mis kihistunud järves kulgeb piki termokliini ja kihistumata järves mööda põhja. Tuulepealses kaldas veepind tõuseb, tuulealuses langeb. Vastupidise kalde saab termokliin, mida laskuvad sooja vee vood kulutavad. Veepinnal on kiirusvektor Coriolisi jõu tõttu pööratud tuule suunast 45 kraadi paremale. Liikumiskiirus kahaneb sügavuse suurenedes ning kiirusvektor nihkub põhjapoolkeral järjest paremale, pöördudes lõpuks tuule suunale vastu. Tuulehoovust koos vastassuunalise kompensatsioonivooluga nimetatakse **Ekmani spiraaliks** (joonis 1.123). Selle tekkemehhanism on lihtsustatult järgmine. Pindmine veekiht tõmbab sisehõõrde tõttu liikuma vahetult tema all oleva veekihi. Hõõrdumise tõttu on selle kihi kiirus pisut väiksem pinnakihi kiirusest. Kiiruse suund on pinnakihi liikumissuunaga võrreldes pisut paremale nihkunud (ka selle kõrvalekalde põhjuseks on Coriolisi jõud). Nii tõmbab iga veekiht endaga kaasa tema all oleva veekihi. Iga järgmise kihi kiirus on eelmise omast väiksem ja pisut paremale suunatud. Mõnekümne meetri sügavusel võib vee liikumissuund juba ollagi pinnakihi liikumissuunale vastupidine.




**1.122.** Tuule mõju järve pinnale ja hüppekihi sügavusele.

**Äravooluhoovused** on tavaliselt tingitud veetasemete vahest järve sisse- ja väljavoolu vahel. Võrtsjärve veepinna kõrguste erinevus suurima sissevoolu ja väljavoolu vahel on näiteks 6 mm. Olenevalt jõe- ja järvevee tiheduse vahest võib sissevool avalduda üle- ehk pinnavooluna, põhjavooluna või vahevooluna. Järvest välja voolab tavaliselt soe pinnavesi.

**Gradienthoovused** võivad olla tingitud veemasside talvise tiheduse erinevusest. Kui veekogu on jahtunud alla 4 °C, põhjustab setetest eralduv soojus vee tiheduse suurenemise ja selle raskema vee valgumise süvikutesse. Tavaliselt tõuseb setete temperatuur läbi jää tuleva soojuse toimel kiiremini just madalaveelises kaldavööndis. Kui aga setetega kokkupuutuv kiht soojeneb üle 4 °C, tekitab see konvektiivseid tõusvaid veevoole ja radiaalsuunalisi vee liikumisi jää all.




**1.123.** Ekmani spiraal selgitab, miks tuule suund ja vee voolusuund ei lange kokku.

## 1.6.3. Lained

Lained on võnkumise levimisprotsess ruumis. Laine tekitamiseks elastses keskkonnas on vaja häiritust, millest tuleneb võnkumine ümber tasakaaluasendi. Vesikeskkonna elastsuse tõttu levib häiritus ühest punktist teise. Laine põhitunnuseks ei ole mitte keskkonna enda, vaid energia edasikandmine naaberosadele. Mehaaniline laine kannab energiat edasi, ilma et keskkond kohta vahetaks. Laine kirjeldamisel pruugitakse mitmesuguseid näitajaid. Neist olulisimad on lainepikkus ($\lambda$), lainekõrgus ehk hälve ($h$) ja lainete levimise kiirus ($v$) (joonis 1.124).

Veelained, mida peamiselt tekitab tuul, jagunevad pikkuse järgi kaheks. **Lühikeste lainete** pikkus on tunduvalt väiksem veekogu laiusest. **Pikkade lainete** hulka kuuluvad sellised, mille pikkus on samas suurusjärgus veekogu mõõtmetega (laiusega).

## LÜHIKESED LAINED

**Lühikesed pinnalained**. Üle veepinna puhuv tuul põhjustab pinnakihi triivi ja lainetust. Tuule tugevnedes lainetuse amplituud kasvab. Ehkki lainetus on seisuvete liikumistest kõige silmatorkavam, nõrgeneb tema mõju sügavuti kiiresti ja avaldub oluliselt üksnes madalates veekogudes ja kaldavööndis. Lainetuse mõjul liiguvad vee pinnakihi osakesed mööda tsükloidi (joonis 1.125) – kujuteldavat joont, mille joonistab ringjoonel paiknev punkt selle ringi veeremisel piki horisontaalset sirget. Lainetuse puhul on selle kujutletava ringi läbimõõt veepinnal võrdne laine kõrgusega ($h$) ja tema tsenter liigub keskmisel veepinna kõrgusel. Pinnalaine mõju nõrgeneb sügavuti eksponentsiaalselt, kusjuures vähenemise kiirust mõjutab lainepikkus ($\lambda$), mitte aga laine kõrgus:

$$r = 0{,}5\,h \cdot exp\,(-2\pi / \lambda \cdot z)$$

Pinnakihis ($z = 0$) on tsükloidi raadius võrdne poolega laine kõrgusest, kuna eksponent muutub nulliks. Lainepikkusega võrdsel sügavusel ($z = \lambda$) on veeosakeste orbiidi raadius 1/535 raadiusest pinnal:

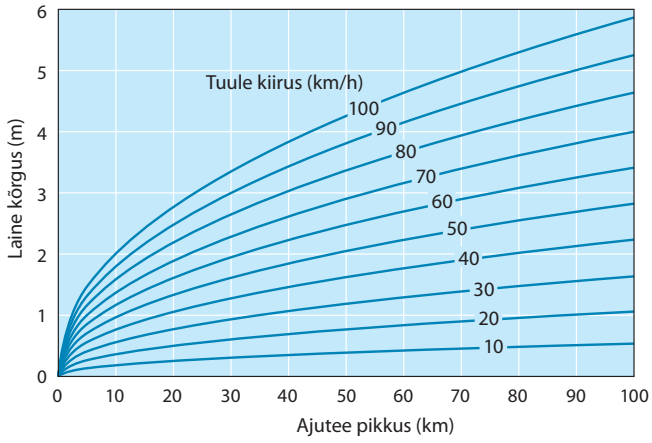
$$r_\lambda = 0{,}5\,h \cdot exp\,(-2\pi)$$

Kui vee sügavus on alla poole lainepikkuse, puutub laine kokku veekogu põhjaga ja tsükliline liikumine lakkab (joonis 1.125).

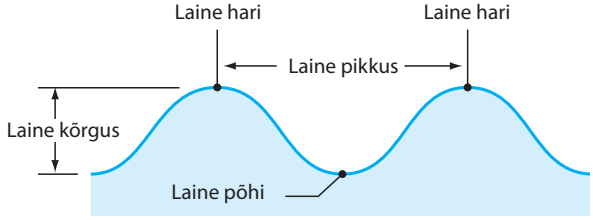
Väikestes järvedes ei mõjuta järve sügavus oluliselt laine kõrgust ega pikkust, kuid suurtes järvedes suurenevad mõlemad koos järve sügavusega. Suhe $h/\lambda$ võib olla vahemikus 1 : 100 kuni 1 : 10. Suhte 1 : 10 juures muutuvad laineharjad teravaks ja ebastabiilseks. Maksimaalne laine kõrgus ($h$, m) on võrdeline laine ajutee pikkusega ($x$, km):

$$h = 0{,}34 \cdot \sqrt{x}$$

ja sõltub ka tuule kiirusest (joonis 1.126). Põhja-Ameerika Suure järvistu Ülemjärves on laine ajutee pikkus näiteks 482 km, nii et teoreetiliselt võiks seal suurim lainete kõrgus olla 7,3 meetrit. Eesti suurimat siseveekogu Peipsit iseloomustavad lühikesed ja järsud lained. 5 m/s puhuva tuule korral võib nende kõrgus olla 0,4–0,6 m, kuid tormiga (üle 20 m/s) 2,3–2,4 m.

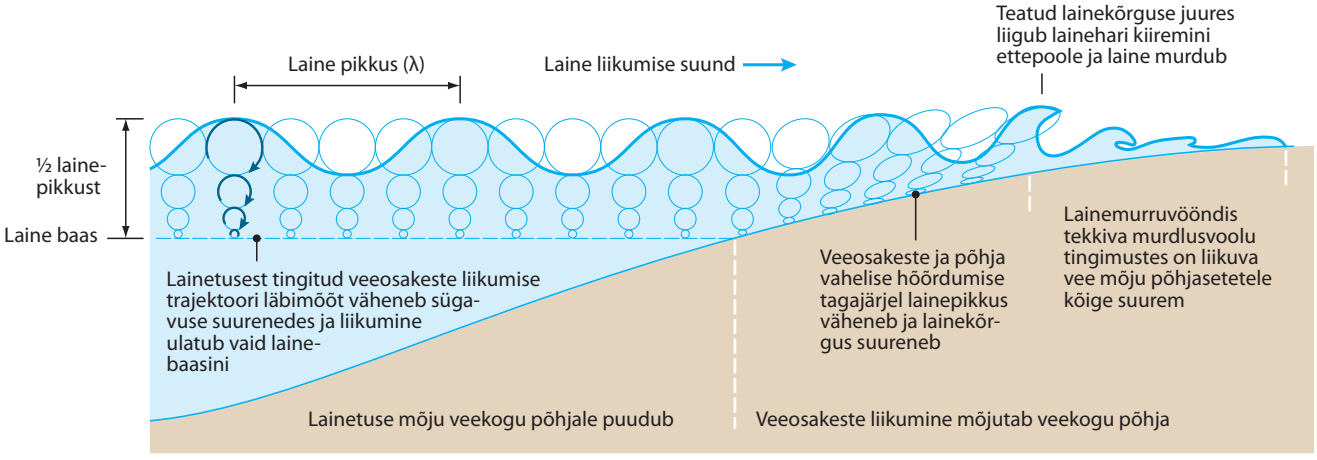


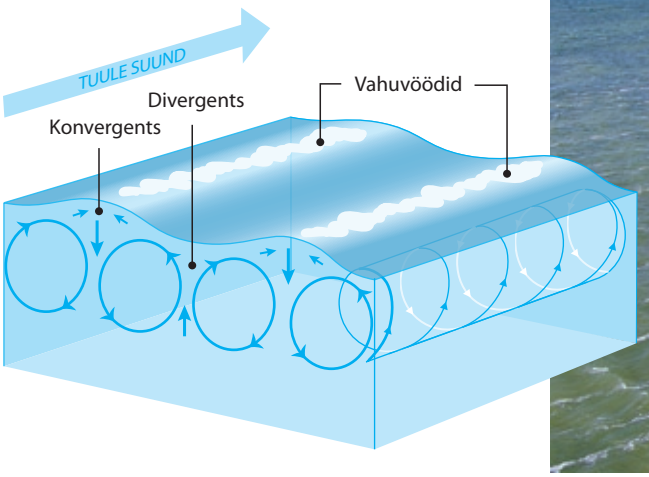

**1.126.** Laine kõrguse sõltuvus laine ajutee pikkusest ja tuule kiirusest.




**1.124.** Pinnalaineid iseloomustavad näitajad.

**1.125.** Vees leiduvate osakeste liikumine pinnalainetes ja pinnalainete käitumine madalas vees.



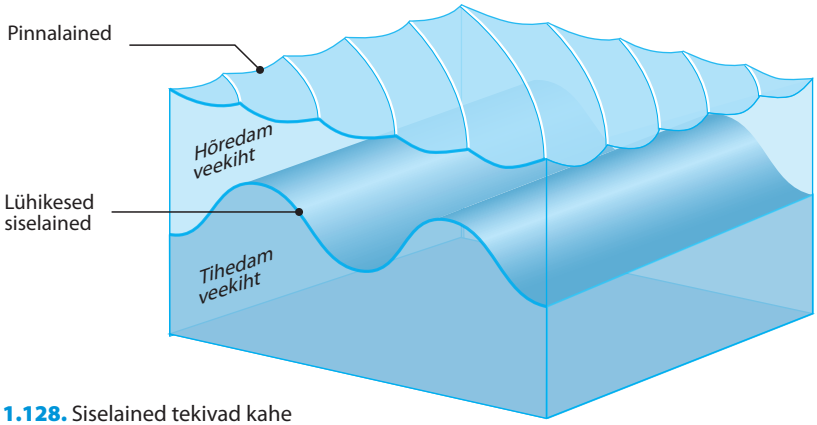


**1.127.** Heeliksikujulised spiraalvood ehk Langmuiri tsirkulatsioon veekogu pinnakihis. Langmuiri tsirkulatsioon avaldub selgelt märgatavates vahutriipudes.

Laine **liikumiskiirus** on võrdeline ruutjuurega lainepikkusest. Madalasse vette jõudes hakkab laine kiirus sõltuma sügavusest ja kahaneb. Kiiruse kahanemise tõttu väheneb ka lainepikkus. Laine kõrgus esialgu kahaneb, kuid siis kasvab järsult ja laine muutub **murdlaineks**. Laine murdub, kui laine kõrguse ja lainepikkuse suhe on ¾ (joonis 1.125). Tekkiv tuuleenergia ülejääk hajub turbulentsina.

Suurtes madalates kihistumata seisuveekogudes põhjustab vee liikumine setete resuspensiooni. Nii hoovused kui ka lained tekitavad veekogu põhjale mõjuva hüdrodünaamilise rõhu, mille suurusest sõltubki resuspensiooni intensiivsus.

**Langmuiri tsirkulatsioon**. Lainetusest tingitud turbulents avaldub sageli veemassi hajusas liikumises, millel pole midagi ühist tuule ega laine suunaga. Alates tuule tugevusest 2–3 m/s organiseerub turbulentne liikumine heeliksikujulisteks spiraalvooludeks veekogu pindmises kihis (joonis 1.127). Vee pöörlemissuund on kahes kõrvuti asetsevas heeliksis vastupidine. Nii moodustuvad heeliksite vahekohtades veepinnal vaheldumisi divergentsi ja konvergentsi piirkonnad. Viimastesse kogunevad pinnal ujuvad osakesed ja pindaktiivsed ained, moodustades lainefrondiga ristuvaid vahuvööte (joonis 1.127). Divergentsi ja konvergentsi aladele kogunevad ka füto- ja zooplankton, mistõttu nende horisontaalne jaotus muutub ebaühtlaseks (laiguliseks). Langmuiri tsirkulatsioon tekib kõigis vähegi arvestatava suurusega järvedes. Pinnalainetuse vertikaalne toime on väike, kuid epilimnioni segab just peamiselt temalt energiat saav Langmuiri tsirkulatsioon.




**1.128.** Siselained tekivad kahe erineva tihedusega veekihi piirpinnal.

**Lühikesed siselained**. Kahe teineteise suhtes liikuva erineva tihedusega veekihi piirpinnal tekivad turbulentsi tõttu lühikesed siselained, mille kõrgus võib kihtide väikese tiheduse erinevuse tõttu ületada pinnalainete kõrguse kuni 10 korda (joonis 1.128). Selliste lainete periood võib ulatuda 1,5–10 minutini. Lühikestel siselainetel on suur tähtsus soojuse ülekandes epi- ja hüpolimnioni vahel. Nad võivad tekitada vee pinnakihis Langmuiri tsirkulatsiooniga sarnanevaid, kuid mitte nii korrapäraseid veekeeriseid ja põhjustada sellega planktoni ebaühtlast jaotumist.

## PIKAD LAINED

**Pikad seisulained** ehk **seišid**. Tuule raugedes püüavad kihid taastada oma gravitatsioonijõu määratud **ekvipotentsiaalset asetust**, kuid lähevad inertsi tõttu tasakaaluasendist üle. Tekib siselainetus, mis sarnaneb vee loksumisega kausis ja hõlmab kogu veemassi (joonis 1.129). Vastu kallast põrgates tekib peegeldunud laine, mis koos seda põhjustanud lainega moodustab **pika seisulaine** ehk **seiši**. Selles vahelduvad poole lainepikkuste vahedega maksimaalse vertikaalse amplituudiga võnkuvad punktid (laineharjad) ja vertikaalsuunas liikumatud punktid (nodaalpunktid), mis veekogus moodustavad nodaaljoone. Tavalised on ühe ja kahe nodaaljoonega ehk **uninodaalsed** ja **binodaalsed seišid**, harvem **multinodaalsed** (kuni 17 nodaaljoont).

**Pinnaseiši** periood sõltub järve pikkusest ja laiusest. Uninodaalsel pinnaseišil on maksimaalne amplituud kahes äärmises punktis (vastaskallastes). Nodaalvööndis järve keskosas toimub sama perioodiga horisontaalne vee liikumine. Suure pindalaga madala järve puhul võib see horisontaalne liikumine olla tugev. Perioodi pikkuse saab arvutada võrrandist

$$t = \frac{2 \cdot l}{\sqrt{g \cdot h}},$$

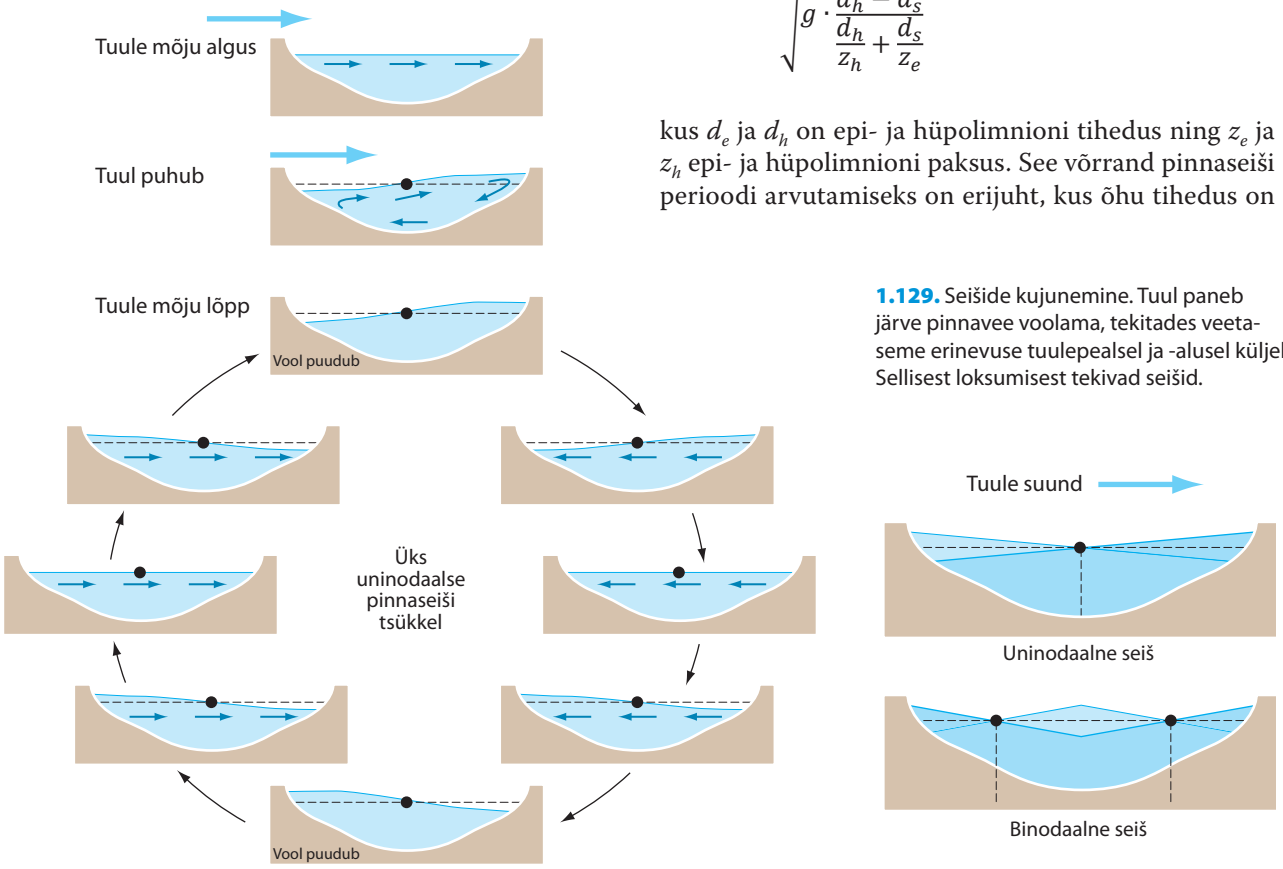
kus $l$ on järve läbimõõt tuule suunal (m), $h$ keskmine sügavus (m) ja $g$ raskuskiirendus (9,81 m/s$^2$).

Nii arvutades võiks Võrtsjärve idakaldal läänetuulest põhjustatud pinnaseiši periood olla 51 minutit (järve laius on seal 8 km, sügavus 2,8 m). Eri järvedes mõõdetud pinnaseišide perioodid jäävad vahemikku 5–800 minutit. Hõõrdejõudude tõttu hakkab seiš sumbuma; selle kiirus sõltub järve sügavusest ja kujust. Pinnaseišid on tavaliselt väikesed. Suurimad mõõdetud pinnaseišid on Erie järves ulatunud 2 meetrini ja nende periood 14 tunnini.

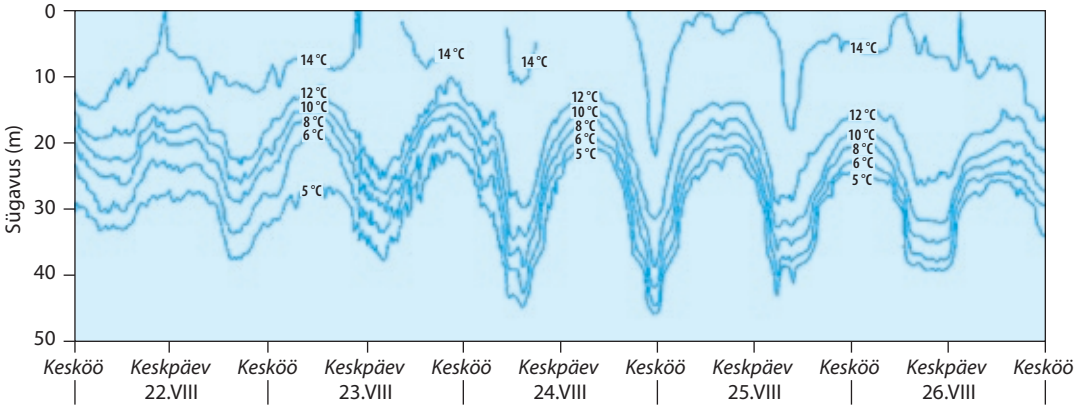
**Siseseišid** tekivad järve termilise kihistumise tasakaalustumise käigus pärast tuule mõju lakkamist. Erineva tihedusega veekihid nihkuvad üksteise suhtes. Kõige selgemini on jälgitav hüppekihi kõikumine. Et veekihtide tiheduserinevused on mitme suurusjärgu võrra väiksemad kui vee ja õhu tiheduserinevus, on siseseiši amplituud ja periood tunduvalt suuremad kui pinnaseiši omad. Siseseiši periood arvutatakse võrrandist

$$t = \frac{2 \cdot l}{\sqrt{g \cdot \frac{d_h - d_s}{\frac{d_h}{z_h} + \frac{d_s}{z_e}}}},$$

kus $d_e$ ja $d_h$ on epi- ja hüpolimnioni tihedus ning $z_e$ ja $z_h$ epi- ja hüpolimnioni paksus. See võrrand pinnaseiši perioodi arvutamiseks on erijuht, kus õhu tihedus on




**1.129.** Seišide kujunemine. Tuul paneb järve pinnavee voolama, tekitades veetaseme erinevuse tuulepealsel ja -alusel küljel. Sellisest loksumisest tekivad seišid.

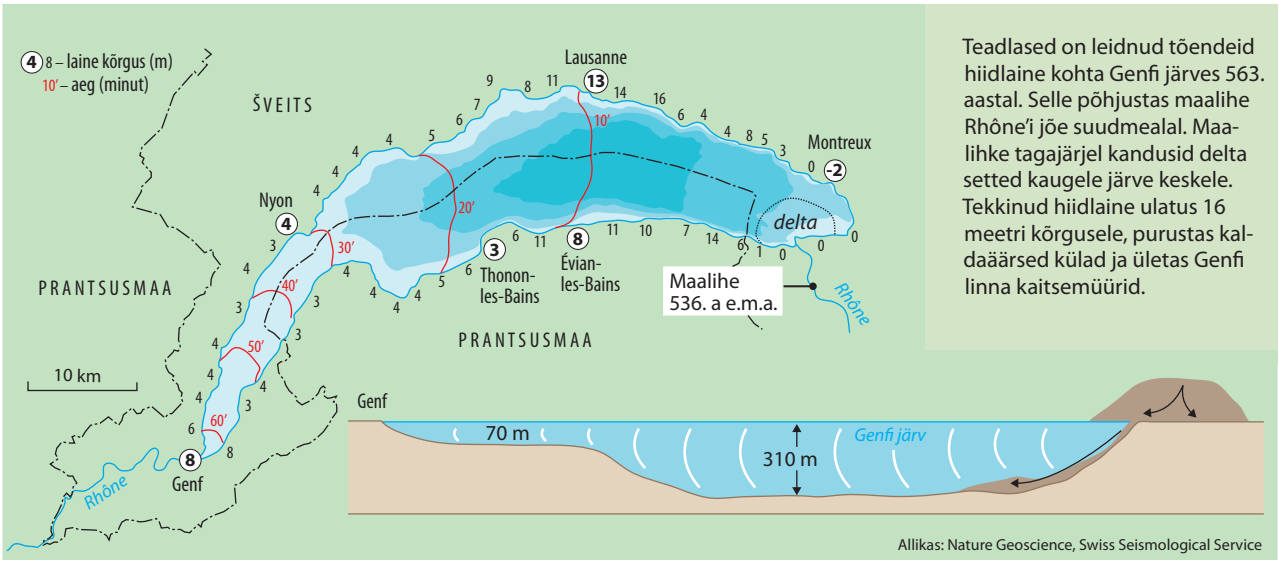



**1.130.** Siseseišid Ontario järves. Termokliini kõikumise amplituud ulatub 18 meetrini.

jäetud arvestamata. Eri järvedes mõõdetud siseseišide perioodid jäävad vahemikku 4–900 tundi. Sügavates järvedes võib termokliini kõikumise amplituud ulatuda üle 10 m (joonis 1.130).

■ **LOODELAINED JA TSUNAMID** **Looded** (tõus ja mõõn) on tingitud Päikese ja Kuu mõjust Maale. Kuu mõju on tugevam. Tõus toimub üheaegselt Maa vastaskülgedel ja sama lugu on mõõnaga. Kuu tiirlemise tsentrifugaaljõud on tasakaalustatud Maa massikeskmega. Kuu poole pööratud Maa küljel on ookean Kuule lähemal kui massikese ja talle mõjub suurem tõmbejõud. Maa vastasküljel on ookean samal ajal Kuust kaugemal kui Maa massikese ja talle mõjub samavõrra nõrgem tõmbejõud. Need jõud tirivad vee ookeani keskele kokku ja samal ajal on rannikul mõõn. Sellise bipolaarsuse tõttu toimub tõusu ja mõõna tsükkel enamikus ookeani rannikupiirkondades kaks korda ööpäevas. Kaks korda kuus on Kuu ja Päike Maa suhtes samal telgjoonel, mis tugevdab loodeid. Samuti kaks korda kuus on Kuu ja Päike Maa suhtes täisnurga all, mis nõrgendab loodeid. Järvedes on Kuu gravitatsioonist tingitud tõus ja mõõn väga nõrgad ega tule seetõttu arvesse. Suurimad tõusust ja mõõnast tingitud pinnakõikumised Baikali järves ja Ülemjärves on jäänud alla 2 cm.

**Hiidlained** ehk **tsunamid** võivad tekkida seismiliselt aktiivsetes piirkondades ning on tihti suure kõrguse ja tugeva purustusjõuga. Hiidlaine laieneb keskmest ringikujuliselt. Laine kiirus sõltub otseselt vee sügavusest. Avamerel võib tsunami kiirus olla isegi 700 km/h, kuid ta on ohutu, sest laine kõrgus pole suur. Madalasse vette jõudes laine aeglustub ning avamerelt kiirelt järele tulevate veevoolude mõjul muutub üha kõrgemaks. Rannikuäärses madalas vees surutakse veemassid kokku ja lained võivad kerkida mitmekümne meetri kõrguseks. Tsunameid seostatakse tavaliselt ookeanidega, kuid neid esineb ka järvedes, kus nad on isegi ohtlikumad, sest reageerimisaeg jääb enamasti napiks.




Teadlased on leidnud tõendeid hiidlaine kohta Genfi järves 563. aastal. Selle põhjustas maalihe Rhône'i jõe suudmealal. Maalihke tagajärjel kandusid delta setted kaugele järve keskele. Tekkinud hiidlaine ulatus 16 meetri kõrgusele, purustas kaldaäärsed külad ja ületas Genfi linna kaitsemüürid.

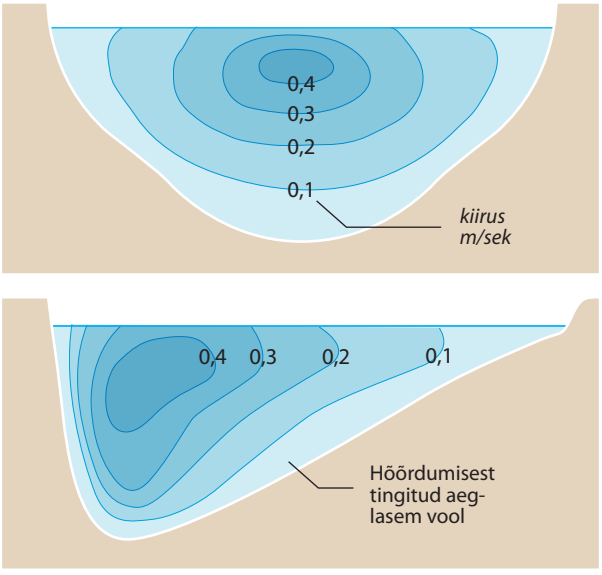
Allikas: Nature Geoscience, Swiss Seismological Service

**VEE LIIKUMINE VOOLUVETES** Jõgede ja ojade vool on veeringe peamisi osi. See koosneb maismaale sadanud vee nõrgumisest juba tekkinud voolusängidesse, sadamisest otse vooluvetesse, põhjavee sissevoolust ning inimtekkelistest veevooludest. Peale vee kui keskkonna enda kannab vool kaasa mineraalseid ja orgaanilisi aineid nii lahustunud kujul, peente osakestena kui ka suurte tükkidena (nt kivid, puutüved). Ühtlasi liigub koos vooluga väga kergesti edasi inimtekkeline reostus. Vesi liigub piki voolusängi ühes suunas raskusjõu mõjul. Vooluveteta ei pääseks vesi maismaalt ookeani või väljavooluta järvedesse. Igal aastal kannavad maailma jõed ookeani 32 000–37 000 km$^3$ vett. Kümme suurimat jõge annavad sellest 40%, maailma suurim jõgi Amazonas üksi 15%. Veevool on ühtlasi jõepõhja ja -kallaste elupaikade peamine kujundaja.

Vooluhulka mõjutavad kliima, taimestik, maastik, aluskivimid, maakasutus ja mulla iseloom. Enamik jõgesid jätkab voolamist pärast vihmasaju lõppu. Need on alalised jõed, mille vooluhulgast suure osa moodustab allikavesi. Madalveeperioodil koosneb kogu vool just sellest. Pärast suurt sadu või lumesulamist võib vooluhulk järsult kasvada ja vesi kallastelt palju setteid kaasa haarata.

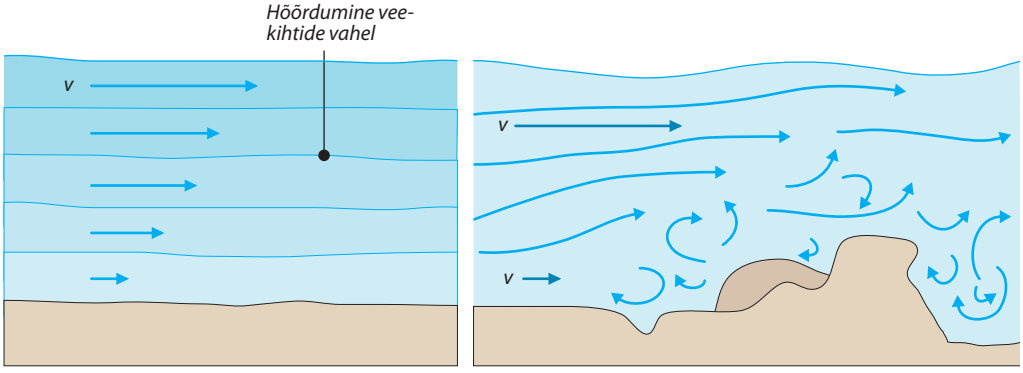
Voolukiirus jõesängis varieerub tugevasti hõõrdumise tõttu vastu põhja ja kaldaid, samuti jõeloogete ja takistuste tõttu (joonis 1.131). Kõige kiirem on vool seepärast veepinnal või selle ligidal ning sängi keskel. Peaaegu laminaarset voolu võib leiduda väikese vooluhulga korral madalas vees (näiteks muda või sileda kivipõhja kohal). Enamasti on vool turbulentne: iga veeosake võib liikuda nii edasi, külgedele kui ka vertikaalselt. Mida ebatasasem on põhi ja mida kiirem vool, seda paremini vesi voolates seguneb, ühtlustudes nii temperatuurilt kui ka hapniku- ja muude lahustunud ainete sisalduselt.

Enamasti ei ületa voolukiirus 3 m/s. Keskmine voolukiirus on 80–90% pinnalähedasest voolukiirusest. Põhja ebatasasuse tõttu uhutakse mõnda kohta tugevamini, teist nõrgemini ning kohati võib kiirus peaaegu nullini langeda. Kivide jm takistuste taha tekib „surnud tsoon“, kus voolukiirus oluliselt väheneb (joonis 1.132). Vesi moodustab sellise paiga ümber liikuvaid keeriseid ning põhja settivad peened osakesed (liiv ja muda). Takistustest vahetult allavoolu kujunevad sügavamad kohad, kuhu setted ei pääse.

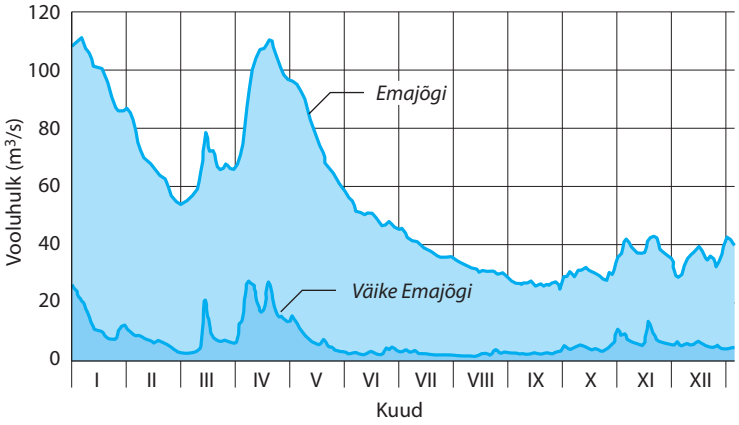



**1.131.** Vee liikumiskiiruse jaotus voolusängis. Voolukiirus on suurim kohtades, kus hõõrdumine on väikseim. Põhja ja kallaste lähedal on vool aeglasem.

Edasiliikuva vee hulka võib hinnata nii kohapeal otsesel vaatlusel kui ka selle välja arvutada. Keskmist vooluhulka jões saab arvutada, kui on teada valgala suurus ja äravoolumoodul. Tegeliku vooluhulga mõõtmiseks tuleb määrata jõe ristlõike pindala ja seda pinda läbiva voolu keskmine kiirus. Vooluhulga otseseid regulaarseid mõõtmisi tehti varem kord kuus. Väikestel ojadel võidakse vooluhulga mõõtmiseks ja registreerimiseks ehitada spetsiaalseid paise, kus paisutuse kõrgus on vooluhulga funktsioon. Nüüdisaegsetes veemõõdupostides hinnatakse veetaset ja voolukiirust siiski looduslikus voolusängis. Ühekordsel mõõtmisel arvutatakse vooluhulk sängi mõõtmete, vee sügavuse ja voolukiiruse järgi. Akustilise vooluhulgamõõtjaga saab voolukiirust hinnata vees leiduvatelt osakestelt peegeldunud ultraheliimpulsside järgi. Sellega on võimalik mõõtmist sooritada nii üksikutes punktides kui ka paadiga seadet risti üle jõe vedades.




**1.132.** Veekeeriste tekkimine sõltub põhjareljeefist.




**1.133.** Emajõe ja Väikese Emajõe igapäevaste vooluhulkade hüdrograafid Tartu ja Tõlliste hüdromeetriajaamas kogutud andmete põhjal.

Vooluhulga arvutuslikuks hindamiseks võib kasutada Gauckleri-Manningi võrrandit. See hindab vedeliku keskmist voolukiirust avatud kanalis järgmiselt:

$$V = (k/n)\, R_h^{2/3}\, S^{1/2},$$

kus $V$ on keskmine voolukiirus veesamba ristlõikes, $R_h$ hüdrauliline raadius (ristlõike pindala ja ümbermõõdu suhe), $S$ põhja kaldenurk (eeldusel, et sügavus on konstantne) ning $k$ ja $n$ koefitsiendid. Näiteks 1. järku ojade keskmine vooluhulk Kanadas on 0,013 $m^3/s$, 9. järku jõgedes aga 466 $m^3/s$.

**Hüdrograaf** on graafik, mis näitab vooluhulga, veetaseme või äravoolu muutumist aasta või mingi muu ajavahemiku jooksul. Selle joonistamiseks võetakse igapäevased või pikaajalised andmed veehulga või veetaseme muutumise kohta (joonis 1.133). Püstteljele paigutatakse vastavate mõõtühikute skaala (nt kuupmeetrit sekundis) ja rõhtteljele ajaühikute skaala.

## KÜSIMUSED JA PROBLEEMÜLESANDED

1. Miks settib bakterirakk märksa aeglasemalt kui surnud kala, kuigi nende rakkude tihedus on ligikaudu võrdne?
2. Miks on liigendatud kaldajoonega järvel väiksemad lained kui sama suure pindalaga ringikujulisel järvel?
3. Langmuiri tsirkulatsiooni korral hakkavad veest pisut suurema tihedusega osakesed vahetult veepinna all koonduma. Kus selline osakeste kogunemine aset leiab ja miks?
4. Leia järgmiste organismide liikumist iseloomustav Reynoldsi arv, kui vee viskoossus on $10^{-3}$ Pa·s:
   (a) 5 µm pikkune viburloom, liikumiskiirus 1 m/h; (b) 50 µm pikkune ränivetikas, uppumiskiirus 1 m/d;
   (c) 10 cm pikkune kala, ujumiskiirus 1 m/s; (d) 1 m pikkune kala, ujumiskiirus 3 m/s.
5. Miks on üleujutused sagedased eelkõige linnastunud ja õgvendatud vooluveekogudega piirkondades?
6. Leidke läänetuultest tingitud pinnaseiši periood Võrtsjärve idakaldal. Järve ida-läänesuunaline laius on 8 km ja keskmine sügavus 2,8 meetrit.

## MÕISTED JA MÄRKSÕNAD

laminaarne vool
turbulentne vool
konvektiivne e vertikaalne hoovus
advektiivne e horisontaalne hoovus
tuulehoovus
Ekmani spiraal
äravooluhoovus
gradienthoovus
tiheduse erinevus
lühike laine
pikk laine
lühike pinnalaine
laine liikumiskiirus
murdlaine
Langmuiri tsirkulatsioon
lühike siselaine
ekvipotentsiaalne asetus
pikk seisulaine e seiš
uninodaalne seiš
binodaalne seiš
multinodaalne seiš
pinnaseiš
siseseiš
looded
tsunami e seismiline laine
hüdrograaf

# 1.7. Gaasid

Sisevetes sisalduvate gaaside peamine allikas on otseselt või kaudselt atmosfäär. See koosneb pika aja jooksul stabiliseerunud koostisega gaasisegust (tabel 1.12). Atmosfääri praegune koostis on väga erinev ürgse atmosfääri omast ja selliseks on see kujunenud peamiselt elusorganismide toimel. Üks säärase gaasisegu esmaseid iseloomustajaid on keskmine molekulmass. See on segu koostises olevate gaaside molekulmasside kaalutud keskmine ja selle väärtus on 28,9645. Atmosfääri suhtelist koostist väljendatakse kas massi või ruumala järgi ehk teisisõnu selle järgi, millise osa iga gaas moodustab õhu ühikulisest massist või ühikulisest ruumalast.

Põhigaasid on **lämmastik** ja **hapnik**. Teisi gaase on õhus tunduvalt väiksemas koguses. Kui veel suhteliselt ohtra sisaldusega **argoon** juurde arvata, on tublisti üle 99,9% kuiva õhu ruumalast täidetud. Ülejäänud gaase nimetatakse **lisandgaasideks**, kuid nende roll pole sellest hoolimata vähem tähtis ei atmosfääris ega hüdrosfääris. Kõik nimetatud gaasid on vees lahustuvad, mistõttu veemassi gaasikoostis saab olla tasakaalus atmosfääriga. Atmosfääris leiduvad gaasid lahustuvad vees siiski võrdlemisi halvasti (v.a $CO_2$). Pinnaveekogud on harilikult lämmastikust, argoonist ja lisandgaasidest küllastunud, kuid hapniku- ja süsihappegaasisisaldus varieerub vee-elustiku tõttu. *Lahustunud hapnik* on veekvaliteedi seisukohalt oluline, sest seda vajatakse hingamiseks ja veesamba ning sette ja vee piirpinna aeroobse keskkonna säilitamiseks. *Süsihappegaas* on fotosünteesi süsinikuallikas ja määrab loodusvete pH. *Lahustunud lämmastikku* on teiste gaasidega võrreldes rohkem, kuid selle mõju bioloogilistele ja keemilistele protsessidele on tunduvalt väiksem kui hapnikul või süsihappegaasil. Ülejäänud gaasid mõjutavad veekvaliteeti vähe.

## 1.7.1. Gaaside lahustuvuse seaduspärasused

Vees lahustunud gaaside hulk sõltub paljudest teguritest, mis erinevad näiteks mineraalainete lahustumist mõjutavatest teguritest. Esiteks sõltub gaasi lahustuvus **gaasi molekulaarsetest omadustest**. Loodusvetes leiduvate gaaside lahustuvus pole nende erineva molekulaarse iseloomu tõttu ühesugune ja seda iseloomustatakse konkreetse gaasi adsorptsioonikoefitsiendiga. Näiteks $CO_2$ lahustub vees palju paremini kui $CH_4$. Teine oluline tegur on **temperatuur**. Üldiselt soodustab kõrgem temperatuur ainete lahustumist, kuid gaaside lahustuvus on Le Chatelier' printsiibi kohaselt temperatuuriga pöördvõrdeline. Näiteks $N_2$ lahustuvus tema normaalse osarõhu korral on 0 °C juures 23,04 mg/l, aga 30 °C juures vaid 12,58 mg/l. Kolmas lahustuvust määrav tegur on **soolsus**. Soolasisalduse suurenedes gaaside lahustuvus väheneb. Seda tuleb arvestada näiteks soolajärvede gaasisisalduse hindamisel, sest lahustunud gaaside kogused on seal alati väiksemad kui magevees. Ja neljandaks sõltub gaaside lahustuvus **rõhust**. Rõhu suurenedes kasvab ka gaaside lahustuvus ja rõhk on üks peamisi loodusvete gaasikoostist reguleerivaid tegureid. Gaaside lahustumise ja nende osarõhu seost konstantsel temperatuuril väljendab Henry seadus:

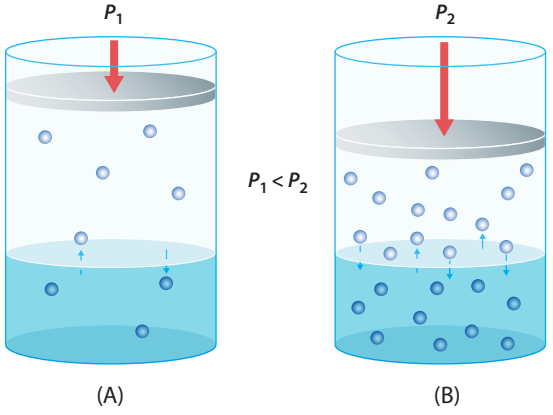
$$c_a = K_H \cdot p_a ,$$

kus $c_a$ on gaasi $a$ kontsentratsioon lahuses (mol/l; mg/l) ja $p_a$ gaasi $a$ osarõhk lahuse kohal (atm). Et gaaside lahustuvus pole ühesuguse osarõhu juures võrdne, tuleb iga gaasi puhul kasutada talle eriomast temperatuurist sõltuvat konstanti ehk Henry konstanti ($K_H$; (mol·l)/atm; (mg·l)/atm).

Henry seaduse järgi on gaasi lahustuvus vedelikus võrdeline tema osarõhuga lahuse kohal (joonis 1.134). Osarõhk ehk partsiaalrõhk on rõhk, mida mingi gaasisegu komponent avaldaks, kui see komponent esineks üksi samal temperatuuril ja samal ruumalal. Osarõhkude seaduse kohaselt on üksteisega mittereageerivate

Tabel 1.12. PEAMISED ATMOSFÄÄRIS LEIDUVAD GAASID

| Gaas | Molekulmass | Suhteline sisaldus ruumalas (%) |
|---|---|---|
| $N_2$ | 28,013 | 78,084 |
| $O_2$ | 31,998 | 20,948 |
| Ar | 29,948 | 0,934 |
| $CO_2$ | 44,010 | 0,04 |
| Ne | 20,183 | 0,00182 |
| He | 4,003 | 0,00524 |
| $CH_4$ | 16,043 | 0,00017 |




**1.134.** Gaaside lahustuvus sõltub osarõhust. Väikese osarõhu korral (A) on lahustuvus väiksem kui suure osarõhu korral (B)

ideaalsete gaaside segu kogurõhk võrdne segu moodustavate gaaside osarõhkude summaga. Atmosfääri puhul võib kogurõhku ($p_t$) ehk õhurõhku väljendada gaaside osarõhkude summana:

$$p_t = p_{N_2} + p_{O_2} + p_{Ar} + p_{CO_2} + p_{H_2O} + p_{lisandgaasid}$$

Gaasisegu (nt õhu) iga koostisosa lahustuvus on võrdeline selle gaasi osarõhuga lahuse kohal olevas gaasisegus.

Kui rõhk järsult väheneb, eraldub osa gaasi lahusest mullidena (vt ääremärkus 1.7). Selline olukord tekib näiteks gaseeritud joogi pudeli kiirel avamisel ning see põhjustab kessoontõbe akvalangistidel. Henry seadus ei kehti siiski gaaside puhul, mis osaliselt veega reageerivad ja annavad oodatust parema lahustuvuse. Nii käituvad näiteks $CO_2$, $NH_3$ ja $SO_2$:

$$SO_3 + 2H_2O \rightarrow H_3O^+ + HSO_4^-$$

## 1.7.2. Hapnik

Hapnik on siseveekogudes leiduvatest gaasidest vaieldamatult kõige tähtsam. Hapnik on aeroobsel ainevahetusel elektronide aktseptor ja seetõttu vajavad kõik aeroobsed organismid piisaval hulgal lahustunud hapnikku. Kui lahustunud hapnikku on vähe või see puudub sootuks, hakkavad anaeroobsed mikroorganismid orgaanilist ainet lagundama. Selle tagajärjel vabanevad vette mitmesugused redutseeritud ühendid, nagu ammoniaak, nitritid, vesiniksulfiid jt. Väike lahustunud hapniku ja suur redutseeritud ühendite ning mürgiste ainevahetusjääkide sisaldus avaldab häirivat mõju tervele veeökosüsteemile. Hapniku lahustuvus, ruumiline jaotumine veekogudes ja sesoonsed muutused määravad ka veeorganismide jaotumise ning avaldavad tugevat mõju nende käitumisele ja füsioloogiale. Hapniku tarbimise ja fotosünteesil vabanemise vahekord on oluline kogu veeökosüsteemi aineringe seisukohalt, mõjutades paljude mineraalainete lahustuvust, ning on tugevasti seotud veekogu morfomeetriliste, keemiliste ja bioloogiliste näitajatega. Huvitav on ka fakt, et kuigi vesi ise koosneb kaalu järgi 90% ulatuses hapnikust, pole see organismidele kättesaadav.

**HAPNIKU LAHUSTUMINE JA HULK VEES** Õhus on $O_2$ keskmiselt 20,95 mahuprotsenti ehk 209,5 ml/l. Hapniku **adsorptsioonikoefitsient** vee suhtes on normaalrõhul (1 atm) ja 0 °C juures 0,04898. Järelikult lahustub neis tingimustes 209,5 · 0,04898 = 10,29 ml $O_2$ ühes liitris vees. Hapniku lahustuvus vees on suurem kui lämmastikul ja atmosfääriga tasakaalustatud olekus moodustab $O_2$ 35% õhu lahustunud komponentidest.

1.7 ÄÄREMÄRKUS

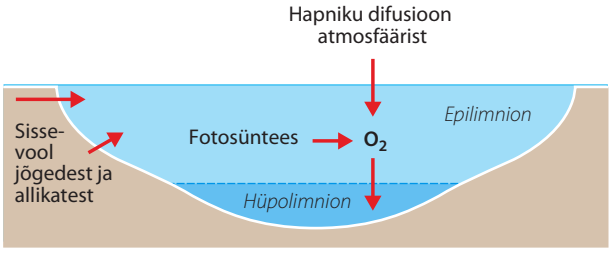
### NYOSI JÄRVE KATASTROOF

Üks äärmuslik näide järve kogunenud gaaside käitumisest on Nyosi järvega toimunud sündmused. Järv paikneb Lääne-Kamerunis väikese Nyosi külakese ligidal kustunud vulkaani kraatris. Tegu on noore (u 400 a) ja väikese (1,6 km$^2$) veekoguga, mille sügavus on vulkaanilise tekkeviisiga järvele omaselt väga suur (208 m). 1986. a 21. augusti õhtul kuuldi järve poolt lühiajalist kõminat. Seejärel oli õhus tunda veidrat lõhna, mida võrreldi püssirohu või mädamuna lehaga. Peatselt hakkasid inimesed tundma peapööritust ja lämbumistunnet. Magajad surid vaikselt oma asemetel, teised tormasid tänavale, kust nende surnukehad hiljem leiti.

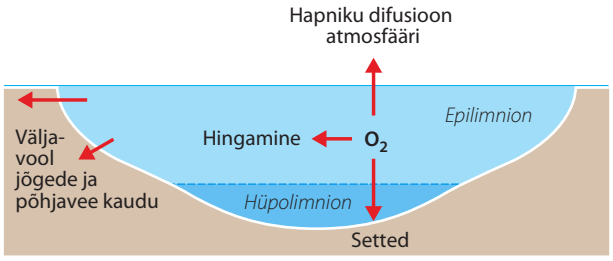
Teade toimunust jõudis lähimasse linna alles järgmise päeva õhtuks, kui juhuslikult saabunud valitsusametnikule avanes kohutav vaatepilt. Selge veega järv oli muutunud sogaseks ja värvunud punakaspruuniks ning taimed järve kallastel olid veidralt närbunud. Järveäärsetes külades vedelesid peaaegu kõikjal inimeste ja kariloomade laibad, mida troopikapäike oli juba lagundama hakanud.

Ametlik ohvrite arv oli 1746 inimest ja kuni 6000 karilooma, kuid tegelik arv võis märksa suurem olla, sest epideemia puhkemise kartuses maeti laibad kiiresti ühishaudadesse. Järve ümbruses 25 km$^2$ ulatuses polnud elus ühtegi lindu ega looma.

Katastroofi põhjus oli vulkaaniline aktiivsus, mille tagajärjel inimesed lämbusid gaasipilves. Pärast järve tavapärase kihistumuse kadumist jõudsid hüpolimnionis akumuleerunud gaasid veepinnale. Magmakivimid on poorsed ja juhivad hästi gaase. See võimaldaski gaaside jõudmist hüpolimnioni ja aeglast akumuleerumist tänu suurele hüdrostaatilisele rõhule (22 atm). Gaaside osarõhk kasvas kümnete atmosfäärideni ning olukord järves muutus väga ohtlikuks. Päästikuks osutus mussoonvihmade algus ja tormine ilm. Tõenäoliselt vabanes mõne hetkega rohkem kui miljard kuupmeetrit gaasi. Tekkisid kuni 25 m kõrgused hiidlained ning põhjasetteist toodi veepinnale suurel hulgal rauaühendeid, mis värvisid vee pruuniks. Tekkinud vee-, vahu- ja gaasipilv tõusis 100 m kõrgusele ning levis nagu jõgi rohkem kui 15 (100) km kaugusele, sest gaaside peamine koostisosa $CO_2$ on õhust raskem. Gaasidest vabanenud järve veetase langes meetri võrra.

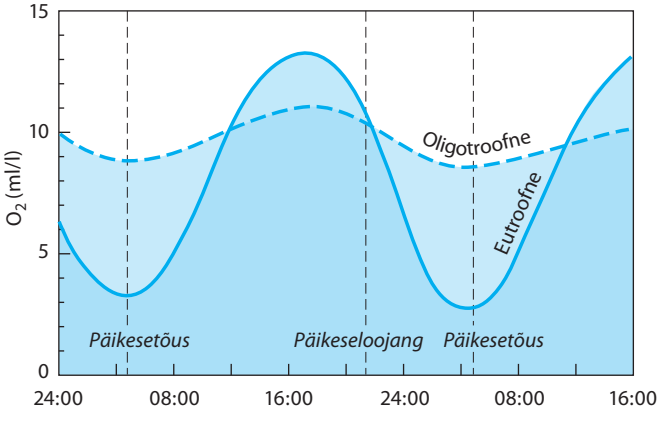



**1.135.** Hapnikuallikad loodusvetes.




**1.136.** Hapnikutarbijad loodusvetes.

**Hapniku allikad** loodusvetes on seotud peamiselt fotosünteesi ja difundeerumisega atmosfäärist (joonis 1.135). Fotosünteesi käigus eralduv hapnik pärineb lagundatud veemolekulidest, mitte süsihappegaasist. Võrreldes difusiooniga atmosfäärist on fotosüntees üldjuhul olulisem hapnikuallikas. Hapniku tootmine fotosünteesi käigus leiab aset veemassiivi ülemises, piisavalt valgustatud kihis (eufootilises kihis). Sügavamatesse ja pimedamatesse veekihtidesse jõuab hapnik peamiselt vee segunemise ja vertikaalse tsirkulatsiooni kaudu, sest hapniku difusioon seisvas vees on väga aeglane. Seisuveekogudesse võivad hapnikku transportida ka vooluveekogud ja põhjavesi. Vooluveekogud on hapniku transpordi seisukohalt eriti olulised, sest turbulentse voolamise tõttu kärestikes õhustub neis vesi intensiivselt. Väikestes hulkades toimub ka hapniku difusioon epi- ja hüpolimnioni vahel.




**1.137.** Hapniku kontsentratsiooni muutumine oligo- ja eutroofsetes järvedes ööpäeva jooksul. Oligotroofses järves on hapnikudünaamika tasakaalustatum.

**Hapniku tarbijateks** on orgaanilise aine lagunemine organismide hingamisel ning vees ja setetes leiduva orgaanilise aine aeroobne lagundamine (joonis 1.136). Osa hapnikku lahkub veest õhku üleküllastumisel, mis on seotud temperatuuri ja intensiivse fotosünteesiga, või vooluveekogude kaasabil.

Hapniku kontsentratsioon kõigub sisevetes enamasti vahemikus 0–14 mg/l, kuid esineb ka märkimisväärseid sesoonseid ja ööpäevaseid kõikumisi (joonis 1.137). Lahustunud mineraalainete sisalduse suurenedes hapniku lahustuvus väheneb eksponentsiaalselt. Seda muutust tuleb arvestada riimvete ja soolajärvede puhul. Merevees soolsusega 35 g/l väheneb hapniku lahustuvus näiteks 20%. Pinnaveekogud on hapnikurikkamad ja neis võib intensiivse fotosünteesi korral täheldada hapnikuga üleküllastumist. Hapnikusisaldus võib seejuures tõusta 150 ja isegi 400 protsendini võrreldes normaalse lahustuvusega. Hapnikudefitsiiti täheldatakse tihti jääkatteperioodil, merede ja järvede põhjalähedastes kihtides ning reostunud vetes.

Hapnikusisaldus avaldab veekogule ja selle elustikule olulist mõju. Kalad suudavad pikemat aega taluda hapnikusisaldust 1–1,5 mg/l, kuid külmalembesed liigid vajavad vähemalt 2,5–3,5 mg/l. Siiski kujuneb kaladel ja teistel veeorganismidel väikese hapnikusisalduse juures välja stress, nad muutuvad tundlikuks haiguste suhtes ja kasvavad aeglaselt (tabel 1.13). Enamasti on veeorganismide jaoks parim, kui küllastusaste ei lange alla 50%. Veekogu osi, kus hapniku kontsentratsioon langeb püsivalt alla 2 mg/l, peetakse juba **anoksiliseks** ja need piirkonnad on eukarüootidest märkimisväärselt vaesunud.

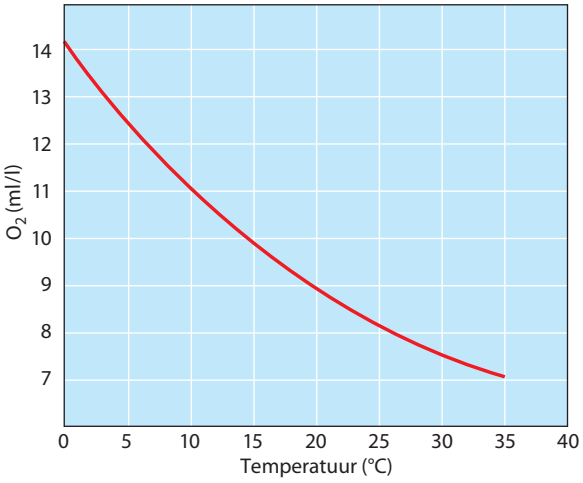
Tabel 1.13. HAPNIKUSISALDUSE MÕJU KALADELE

| Hapnikusisaldus (mg/l) | Mõju kaladele |
|---|---|
| 0–0,3 | Väiksemad kalad taluvad lühiajaliselt |
| 0,3–1,5 | Surmav, kui mõju kestab üle mitme tunni |
| 1,5–5,0 | Pole eluohtlik, kuid kasv aeglustub ja kalad on vastuvõtlikumad haiguste suhtes |
| 5,0–100 küllastus | Sobiv vahemik |
| Üleküllastus | Pikema aja jooksul võib tekkida gaasimullihaigus |

(Boyd 2015)

**HAPNIKUSISALDUSE VÄLJENDUSVIISE** Hapniku lahustuvuse väärtust normaalrõhul nimetatakse **normaalkontsentratsiooniks** sellel temperatuuril. Kui vees leidub hapnikku normaalkontsentratsioonis, on vee küllastatus hapnikust 100%. Veetemperatuuri tõustes väheneb hapniku lahustuvus mittelineaarselt (joonis 1.138). Kui teame ainult hapniku kontsentratsiooni, kuid ei tea veetemperatuuri, siis on raske otsustada, kas hapnikku on neis tingimustes palju või vähe. Ka elusorganismide tegevuse tõttu võib pinnaveekogude hapnikusisaldus olla normaalkontsentratsioonist suurem või väiksem. Normaalrõhul määratud hapniku küllastuskontsentratsiooni nimetatakse **suhteliseks küllastuskontsentratsiooniks** ($c_{sat}$), mida saab arvutada järgmisest empiirilisest seosest:

$$c_{sat} = 14{,}79 \frac{1}{1 + 0{,}03156\ t°}$$




**1.138.** Veetemperatuuri tõustes lahustunud hapniku hulk vees väheneb mittelineaarselt.

Mõõdetud hapnikusisalduse protsentuaalset suhet suhtelisse küllastuskontsentratsiooni nimetatakse **suhteliseks küllastusastmeks** ($O_2$ %). Hapniku küllastusaste vees arvutatakse järgmiselt:

$$O_2\,\% = \frac{c_x \cdot 760}{c_0\ p_T} \cdot 100,$$

kus $c_x$ on hapniku kontsentratsioon vees (mg/l), $c_0$ hapniku normaalkontsentratsioon sellel temperatuuril ja õhurõhul 1 atm ning $p_T$ õhurõhk määramishetkel.

**Õhurõhu muutumine** võib hapniku lahustuvust arvestatavalt mõjutada mägedes. Sel juhul kasutatakse parandusskaalat (tabel 1.14), mis arvestab õhurõhku või kõrgust merepinnast. Kui näiteks kõrgusel 0 m mõõdetakse 20 °C temperatuuriga vees hapniku lahustuvuseks 10 mg/l, siis on küllastusaste 123%. Kõrgusel 1500 m on aga küllastusaste täpselt samadel tingimustel juba 148%. Praktikas tuleb õhurõhku arvestada ka hapnikuandurite kalibreerimisel.

Lahustuvust mõjutab veel **hüdrostaatiline rõhk**. Mida suurem on sügavus, seda suuremat suhtelist küllastust on vaja, et gaas vabaneks mullidena ja jõuaks atmosfääri. Kui vesi veesambas ei seguneks, oleks vaja juba väga suurt suhtelist üleküllastust, et sügavamal kui 1 m vabaneks hapnik mullidena. Kui veepinnal on rõhk $p_0$ (atm), siis sügavusel $z$ (m) on rõhk tuletatav kujul

$$p_z = p_0 + 0{,}0967 \cdot z$$

Seega ligikaudu 10 m sügavusel rõhk kahekordistub. Küllastusastet, mis arvestab ka hüdrostaatilist ja atmosfäärirõhku, nimetatakse **absoluutseks küllastusastmeks**.

Tabel 1.14. PARANDUSSKAALA ÕHURÕHU VÄHENEMISEST TINGITUD HAPNIKU LAHUSTUVUSE MUUTUMISE KOHTA

| Kõrgus (m) | Õhurõhk (mm Hg) | Parandustegur |
|---|---|---|
| 0 | 760 | 1,00 |
| 500 | 714 | 1,06 |
| 1000 | 671 | 1,13 |
| 1500 | 631 | 1,20 |
| 2000 | 594 | 1,28 |
| 2500 | 560 | 1,36 |

**HAPNIKUSISALDUSE HINDAMINE** Hapniku tähtsuse tõttu veeökosüsteemides on palju tähelepanu pööratud selle gaasi võimalikult kiirele ja täpsele mõõtmisele vees. Hapnikusisaldust määratakse loodusvetes peamiselt kahel meetodil: keemiliselt ja hapnikuandureid kasutades.

Hapniku määramine **keemilisel** ehk **Winkleri meetodil** (vt ääremärkus 1.8) sai alguse juba 19. sajandi lõpus ning nüüdisajastatud kujul on see kasutusel veel tänapäevalgi (joonis 1.139). Winkleri meetod on väga täpne ja sobib seetõttu hapnikuandurite kalibreerimiseks. Välitingimustes saab seda kasutada juhul, kui pole ohtu, et rõhu- ja temperatuurimuutuste tõttu vabaneb hapnik mullidena (näiteks sügavates ja kihistunud järvedes) ega ole enam mõõdetav. Kuid see meetod on tundlik nitraatide, orgaanilise aine ja rauaühendite suhtes, mis teeb loodusvete analüüsimise keerukaks.

Winkleri meetodi puudusi pole mitmesugustel **hapnikuanduritel**, mida pruugitakse **hapnikumõõtjates** ehk **oksümeetrites** (joonis 1.140). Enamik hapnikumõõtureid sisaldab temperatuuriandurit, mis võimaldab neil peale vees lahustunud hapniku hulga mõõtmise arvutada välja ka suhtelise küllastusastme. Olenevalt ehitu-

**1.139.** Kemikaalikomplekt hapniku määramiseks Winkleri meetodil. Lihtsalt ja kiirelt pruugitavad reagendid võimaldavad analüüse teha ka välitingimustes.

1.8 ÄÄREMÄRKUS

### WINKLERI MEETOD

Kindla ruumalaga uuritavat veeproovi töödeldakse $MnSO_4$ aluselise KI lahusega. Hapniku juuresolekul toimub üleminek $Mn^{2+} \rightarrow Mn^{4+}$ ning moodustub pruunikas sade:

$$MnSO_4 + 2\,KOH \rightarrow Mn(OH)_2 + K_2SO_4$$

$$2\,Mn(OH)_2 + O_2 \rightarrow 2\,MnO(OH)_2$$

Sadet töödeldakse väävelhappega, mille tulemusena moodustub $Mn(SO_4)_2$, mis omakorda muudab lahuses olevad jodiidid joodiks:

$$2\,MnO(OH)_2 + 4\,H_2SO_4 \rightarrow 2\,Mn(SO_4)_2 + 6\,H_2O$$

$$2\,Mn(SO_4)_2 + 4\,KI \rightarrow 2\,MnSO_4 + 2\,K_2SO_4 + 2\,I_2$$

Lahusele lisatakse pisut tärkliselahust (tekib sinine värvus) ja tiitritakse naatriumtiosulfaadiga kuni sinise värvuse kadumiseni:

$$4\,Na_2S_2O_3 + 2I_2 \rightarrow 2\,Na_2S_4O_6 + 4\,NaI$$

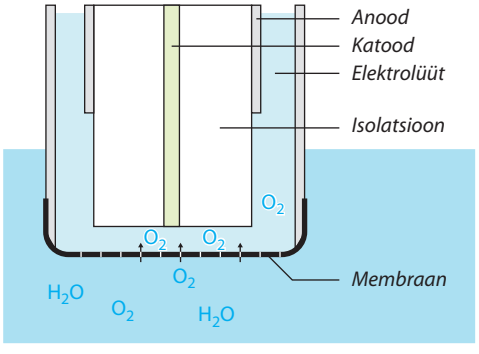
Ülaltoodud võrrandist nähtub, et ühe mooli $O_2$ kohta kulub tiitrimisel neli mooli $Na_2S_2O_3$.

sest ja mõõtmisviisist jaotatakse hapnikuandurid kahte rühma: elektrokeemilised ja optilised.

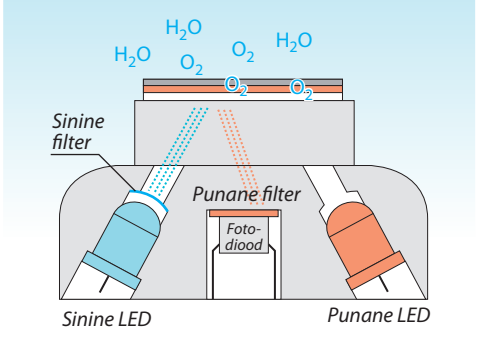
**Elektrokeemiline hapnikuandur** koosneb kahest elektroodist (anood ja katood), mis on sukeldatud elektrolüüti (enamasti küllastatud KCl) ning eraldatud uuritavast keskkonnast õhukese hapnikku läbilaskva membraaniga (joonis 1.141). Vees leiduvad hapnikumolekulid tungivad läbi membraani vastavalt kontsentratsioonigradiendile. Katoodi pinnal redutseerub hapnik hüdroksiidioonideks ning tekkiv elektriline signaal liigub katoodilt anoodile ja sealt edasi hapnikumõõtjasse. Et hapnik redutseeritakse (tarbitakse) katoodil kiiresti, on anduri siseruumis hapniku osarõhk võrdne nulliga ja läbi membraani difundeeruva hapniku hulk proportsionaalne väliskeskkonnas lahustunud hapniku osarõhuga.

**Optilise hapnikuanduri** töö põhineb hapnikusisalduse määramisel luminestsentsi mõõtmise teel. Andur koosneb tajurist, millele on kantud hapnikutundlik aine; valgusallikast, mis ergastab hapnikutundlikku ainet; luminestsentsitajurist (fotodiood) ja väljundvoolu võimendist (joonis 1.142). Hapnikutundlikud molekulid ergastatakse sinise valgusega, mille tulemusena hakkavad molekulid punaselt luminestseeruma. Tekkinud valgus suunatakse luminestsentsitajurisse, kus registreeritakse selle intensiivsus. Et hapnik kustutab anduri hapnikutundlikus aines luminestsentsi, on lahustunud hapniku sisaldust võimalik määrata nii luminestsentsi intensiivsuse kui ka eluea järgi. Mõõtetulemuste täpsuse suurendamiseks kasutatakse anduris veel punast lisavalgusallikat, mille tekitatud valgus peegeldub tagasi hapnikutundliku aine tajurist ning on samuti luminestsentsitajuriga mõõdetav. Mõõtmistulemused on võrdlusaluseks eespool mainitud luminestsentsi mõõtmisel saadud tulemustele.

**1.140.** Eestis toodetud portatiivne hapnikumõõtja Marvet Junior.




**1.141.** Elektrokeemilise hapnikuanduri ehitus.

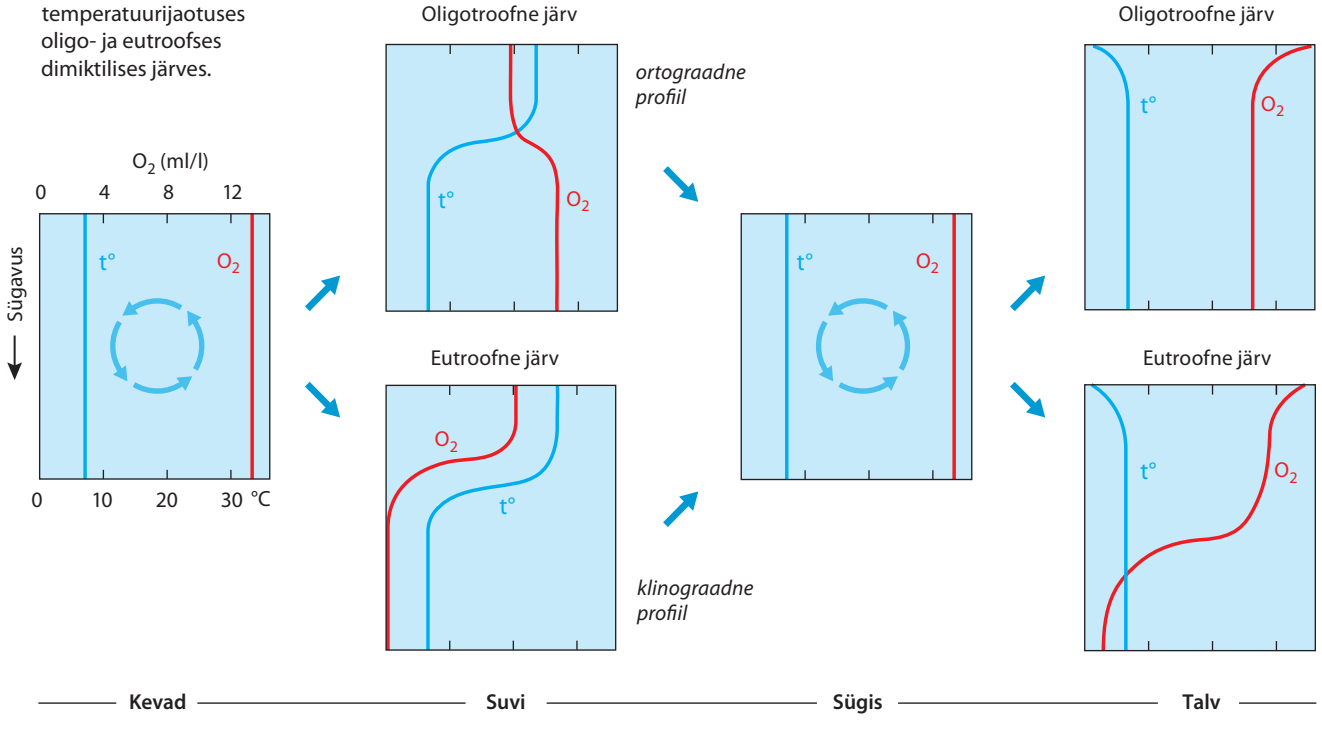



**1.142.** Optilise hapnikuanduri ehitus.

**HAPNIK VOOLUVEEKOGUDES** Lahustunud hapniku kontsentratsioon vooluvete vees oleneb paljudest teguritest, eelkõige veetemperatuurist, vooluveekogu toitumistüübist ning fotosünteesi, hingamise, orgaaniliste ainete lagunemise ja vee turbulentse segunemise intensiivsusest. Vooluveekogud rikastuvad hapnikuga peamiselt õhu kaudu ja hapnik kantakse laiali vee liikumisega. Hapnikusisaldus vooluveekogudes, eriti väikestes kärestikurikastes ojades, on lähedane küllastuskontsentratsioonile. Pideva ühesuunalise voolu ja jõesängi käänakute, põhja ebatasasuse ning kivide jm tõkete tõttu on vool keeriseline, mis soodustab õhustamist ega võimalda hapnikukihistumuse teket ka jõe sügavamates osades. Vee aeratsiooni kiirus oleneb suurel määral jõe voolukiirusest, mis omakorda sõltub langust ja veetasemest. Temperatuuri tõustes hapniku lahustuvus vees väheneb, seega pakuvad külma- ja jahedaveelised jõelõigud soodsaid elutingimusi hapnikunõudlikele liikidele. Teine oluline hapnikuallikas on fotosüntees. Siin on nõudeks muidugi piisava hulga valguse ja toiteainete olemasolu, seepärast on fotosüntees suurema tähtsusega kesk- ja alamjooksul.

Vooluvetes esineb siiski tihti ka olukordi, kus vee hapnikusisalduse määrab peale temperatuuri veel mingi muu tegur. Allikatoitelistes jõgedes on hapnikusisaldus maapinnale väljuvas põhjavees madalast temperatuurist hoolimata väike (0,5–4,5 mg/l). Õhukese kihina voolates rikastub vesi hapnikuga juba paarisaja meetri jooksul. Väga oluline hapnikusisalduse kahandaja on orgaaniline aine, mistõttu soodest algavates jõgedes, mille vesi on rikas humiinainete poolest, leidub lahustunud hapnikku vähe. Ka reoveest pärinev kergesti lagunev orgaaniline aine on tugev hapnikusisalduse vähendaja. Ebasoodsat mõju avaldab veel talv püsiva ja lausalise jääkattega, mis takistab hapniku neeldumist vette ja süsihappegaasi eraldumist atmosfääri. Halvad talvised valgusolud takistavad ka hapniku teket fotosünteesi teel. Kõige suurem hapnikudefitsiit kujuneb aeglase vooluga ja mudase põhjaga vooluveekogudes, eriti rohke laguneva orgaanilise aine olemasolu korral.

**HAPNIK SEISUVEEKOGUDES** Hapniku hulk veesambas ei saa enamasti olla homogeenne, sest gaaside difusioon seisvas vees on väga aeglane. Veemassi gaasikoostise tasakaal atmosfääriga on saavutatav vaid vee intensiivsel ja turbulentsel läbisegamisel. Seega ühtlustab tuule mõju gaasijaotuse veesambas vaid madalates polümiktilistes järvedes ja kihistuvates järvedes segunemisperioodidel. Viimastes kujuneb tasakaal välja paari päeva jooksul, kuid väga sügavates järvedes ei pruugi veesammas tasakaaluni jõuda, sest enne toimub juba termiline kihistumine. Ühtlasi on seisuveekogudes alati lokaalseid hapnikutootjaid ja -tarbijaid, kes olulisel määral muudavad hapniku horisontaalset ja vertikaalset jaotust.

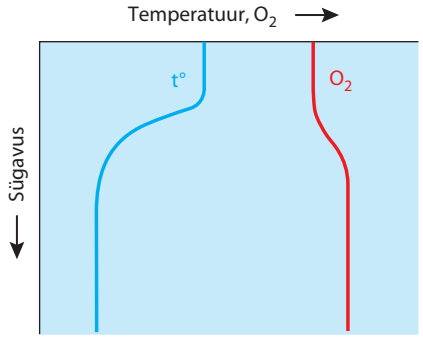



**1.143.** Aastaajalised erinevused hapniku- ja temperatuurijaotuses oligo- ja eutroofses dimiktilises järves.

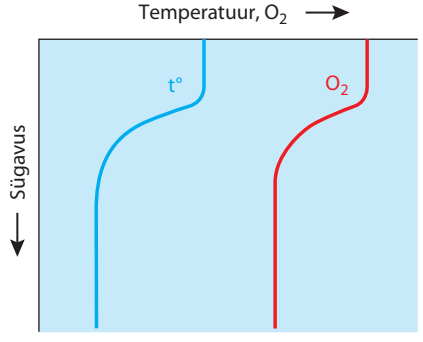
Vertikaalse hapnikujaotuse iseärasusi kihistunud järvedes on mõistlik vaadelda dimiktiliste järvede näitel, sest see kihistumistüüp on järvede seas kõige levinum. Kevadise ja sügisese tsirkulatsiooni ajal on veetemperatuuri (4 °C) ja hapniku jaotus pinnalt põhjani ühtlane (joonis 1.143) ning hapniku küllastusaste 100% lähedal (12–13 mg/l). Tegelikult kujuneb järvede eufootilises kihis siiski kerge üleküllastus ja afootilises kihis jääb hapniku hulk suhtelisest küllastuskontsentratsioonist veidi väiksemaks. Suvel ja talvel tekivad pinna- ja põhjakihi vahel erinevused: kujuneb välja temperatuuri- ja hapnikujaotuse dihhotoomia, mis hapniku puhul sõltub veekogu toitelisusest. Sügisel, kui epilimnion jahtub, kasvab seal taas hapnikusisaldus ning temperatuuri ühtlustumise tulemusena võimalikuks saav tsirkulatsioon võrdsustab taas kord hapniku kontsentratsiooni kogu veemassis.

**Suvise hapnikujaotuse** oligotroofsetes järvedes määravad peamiselt füüsikalised tegurid. Epilimnioni soojenedes langeb seal hapniku kontsentratsioon, kuid hüpolimnioni temperatuur ja hapnikusisaldus jäävad ligikaudu kevadise tsirkulatsiooni tasemele. Sellist jaotust, kus küllastusaste on pidevalt 100% lähedal, nimetatakse **ortograadseks profiiliks** (joonis 1.144). Looduses võib seda kohata vaid erakordselt väikese produktiivsusega järvedes. Eutroofsetes järvedes kasutatakse hüpolimnioni hapnikuvarud kiiresti ära ja seal tekib hapnikupuudus.

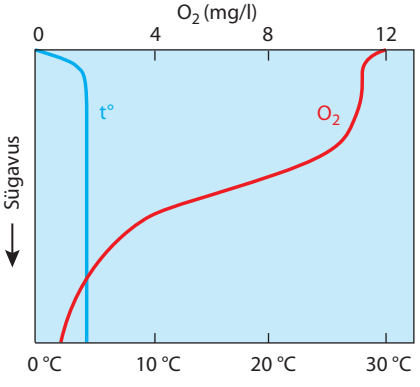
Epilimnionis kõigub hapnikusisaldus ööpäeva jooksul märkimisväärselt (joonis 1.137) ja intensiivse fotosünteesi ajal võib tekkida tugev, mitmesaja protsendini ulatuv üleküllastus. Sellist hapniku jaotust nimetatakse **klinograadseks profiiliks** (joonis 1.145). Hapnikusisalduse vähenemise hüpolimnionis põhjustab orgaanilise aine biokeemiline (hingamine, lagundamine) ja keemiline oksüdeerimine ning redutseeritud anorgaaniliste ühendite suur hulk. Eriti kiiresti tarvitatakse hapnik ära sette poorivees, kus bakterite hapnikutarve on suurim ja kuhu hapnik difundeerub kõige aeglasemalt. Üleminekul aeroobsetelt tingimustelt anaeroobsetele muutub tihti märkimisväärne osa järve põhjast ja veemassist loomadele ja taimedele kasutamatuks. Samal ajal toimuvad suured muutused mikroobikoosluses. Anaeroobsetes tingimustes aeglustub orgaanilise aine lagunemine tunduvalt. Kihistumisperioodil on siiski mõned võimalused atmosfäärist isoleeritud hüpolimnioni aereerimiseks. Olulist osa selles etendavad lühikesed siselained, mis hõlbustavad hapniku difundeerumist sügavamatesse veekihtidesse. Ka $Fe^{3+}$- ja $Mn^{4+}$-oksiidide transport võib kõne alla tulla aereerimisviisina. Need oksiidid on vähelahustuvad ja settivad veesambast välja, kuid redutseeritakse hüpolimnionis. See muudab nad uuesti lahustuvaks ja annab neile võimaluse kanduda epilimnionisse. Meeles tasub pidada, et humiinainerikastes rabajärvedes, kus on ülekaalus orgaanilise aine fotooksüdatiivne ja bakteriaalne lagundamine, jääb hapnikusisaldus isegi epilimnionis küllastustasemest tunduvalt väiksemaks.




**1.144.** Vähetoitelise järve ortograadne hapnikuprofiil.

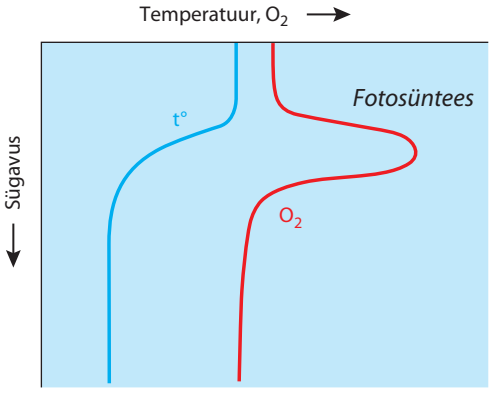



**1.145.** Eutroofse järve klinograadne hapnikuprofiil.

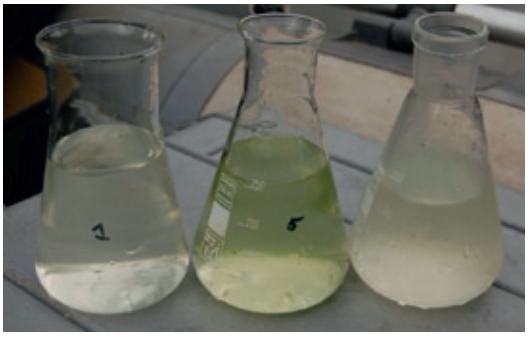



**1.146.** Hapnikujaotus eutroofses järves talvise pöördkihistumuse ajal.

**Talvel** lõpeb jääkatte tõttu gaasivahetus atmosfääriga. Vähetoitelistes järvedes säilib hapnikujaotuses sügisene olukord, seevastu eutroofsetes järvedes alates põhjasetete pinnast hapniku kontsentratsioon langeb (joonis 1.146). Järvede talvine hapnikurežiim sõltub järve sügavusest, jääalustest valgustingimustest ja kergesti laguneva orgaanilise aine hulgast vees ja pindmises settekihis.



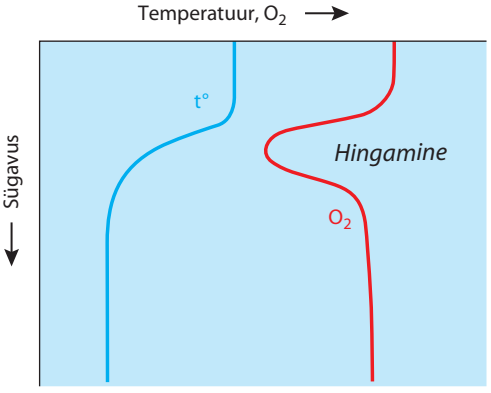

**1.147.** Positiivne heterograadne kõver.



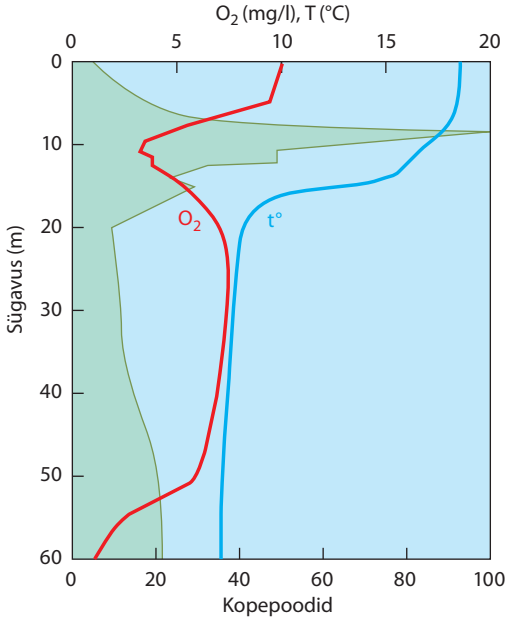
**1.148.** Veeproovid kihistunud järve epi-, meta- ja hüpolimnionist. Metalimnioni proovi (kolb nr 5) roheline toon annab tunnistust seal paiknevast fütoplanktoni biomassi maksimumist.

Peale termilisest kihistumisest ja limnoloogilisest tüübist tingitud vertikaalse hapnikujaotuse võib kohata veel mitmeid anomaalseid jaotusi, mis on seotud järve ökosüsteemi ja morfomeetriaga. Neist kõige sagedamini esineb metalimnionis paiknev hapniku maksimum ehk **positiivne heterograadne kõver** (joonis 1.147), mis võib kujuneda kolmel viisil. Esimene neist on puhtfüüsikaline: vee pinnakihi soojenemise tõttu väheneb seal hapniku lahustuvus ja kontsentratsioon langeb, hüpolimnionis toimub aga hapniku ärakasutamine ning kontsentratsiooni maksimum jääb hüppekihti, kus küllastusaste on 100% lähedal. Suure läbipaistvusega järvedes võib vetikate fotosünteesi maksimum paikneda hüppekihis 3–10 m sügavusel ja põhjustada seal väga tugevat (kuni 400%) hapniku üleküllastust (joonis 1.148). Eraldumist mullidena takistab hüdrostaatiline rõhk. Väikestes järvedes, kus hüppekihiga samal sügavusel paikneb suurtaimestikuvöönd, võib maksimumi põhjuseks olla sealt avavette eralduv hapnik.

Tunduvalt harvem nähtus on hüppekihis paiknev hapniku miinimum ehk **negatiivne heterograadne kõver** (joonis 1.149). Ka sellel võib olla mitu põhjust, mis sageli on omavahel põimunud. Kihistunud järvedele on üsna tavaline partikulaarse orgaanilise aine settimiskiiruse vähenemine metalimnionis, mille tõttu tarvitatakse just seal ära hapnikuvaru. Suurenenud detriidi ja bakterite hulga tõttu koguneb sellesse piirkonda ka rohkem zooplanktonit, mis omakorda vähendab hapniku kontsentratsiooni (joonis 1.150). Väikestes järvedes võib metalimnioni hapnikukontsentratsiooni kahandada kaldavööndi mudakihi hapnikutarve, mis samal sügavusel paiknedes mõjutab ka avavett. Ja lõpuks võib põhjuseks olla veekogu põhjast tõusva metaani oksüdeerimine metülotroofsete bakterite poolt, sest metaani toodetakse anaeroobsetes tingimustes ja aeroobsed metülotroofid paiknevad veekihis, kus leidub nii metaani kui ka hapnikku.




**1.149.** Negatiivne heterograadne kõver.

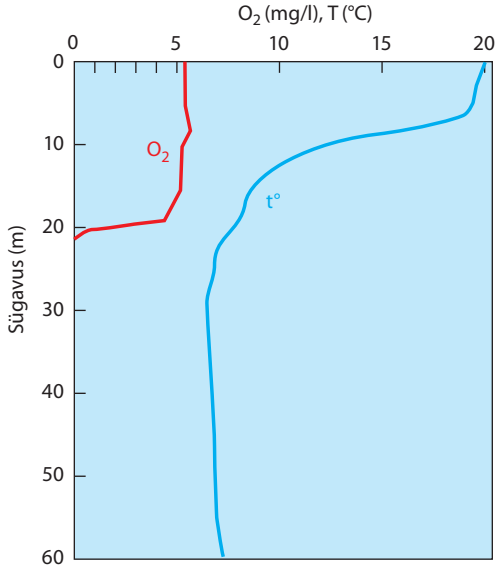



**1.150.** Hapniku kontsentratsiooni järsk langus metalimnionis zooplanktoni suure arvukuse tõttu.

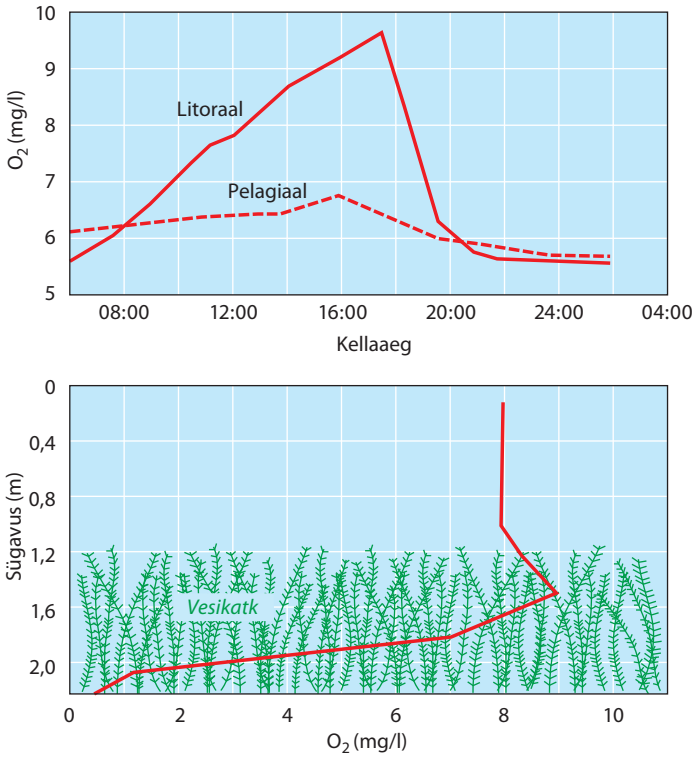
Väga omapärane võib olla **meromiktiliste järvede vertikaalne hapnikujaotus**. Monimolimnionis valitseb enamasti anoksia ning hapnikukihistumus on üliterav (joonis 1.151). Näiteks Verevi järves võib suvel hapnikusisaldus langeda 10 milligrammilt liitri kohta 0 milligrammini vaid paarikümnesentimeetrisel sügavuse suurenemisel. Difusiooni teel monimolimnioni jõudev hapnik tarvitatakse kohe ära oksüdatsiooniprotsessides.

Iseäralike vertikaalsete hapnikujaotuste kõrval võib ka **horisontaalne hapnikujaotus** järvedes tugevalt varieeruda. Tavaliseks ilminguks on kaldavööndi (litoraali) erinevus avaveest. See tuleb eriti ilmsiks järvedes, kus kaldavööndis on rohkelt veesisest taimestikku, mis koos tema peal kasvava epifüütoniga üleküllastab päeval litoraalivööndi hapnikuga (joonis 7.152). Öösel kulub suur osa hapnikust hingamiseks. Hüpertroofsetes järvedes võib ööpäevane hapnikusisalduse kõikumine olla väga suur ning hapnikku mõõtes tuleb arvestada, et tulemus sõltub kellaajast. Taimestiku suremise ja lagunemise ajal suve teisel poolel võib vaikse ilmaga tekkida hapnikupuudus, nn **suvine ummuksisse jäämine**. Suure produktiivsusega madalaveelistes järvedes võib talviti, eriti paksu lumikatte korral, kujuneda kogu järve hõlmav **talvine ummuksisse jäämine**.

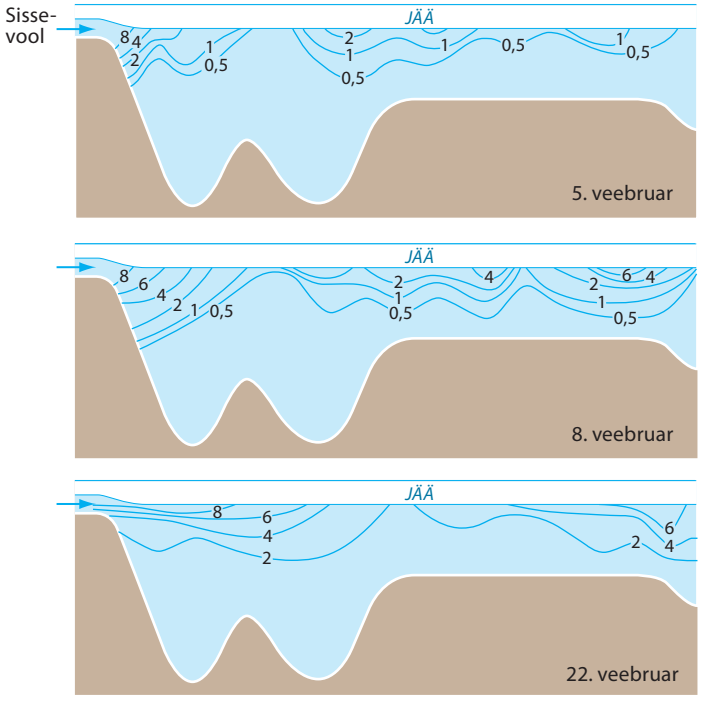
Olenevalt litoraali osakaalust ja taimestiku koosseisust võivad **suure liigendatusega järvede eri osad** käituda väga erinevalt. Sissevoolude mõju suudmeala hapnikurežiimile võib olla kahesugune: külma ja hapnikust küllastunud vee juurdevool võib põhjustada järves lokaalse üleküllastuse piirkonna (joonis 1.153), samal ajal kui kergesti lagunevaid orgaanilisi aineid sisaldav vesi halvendab tunduvalt suudmeala hapnikurežiimi.



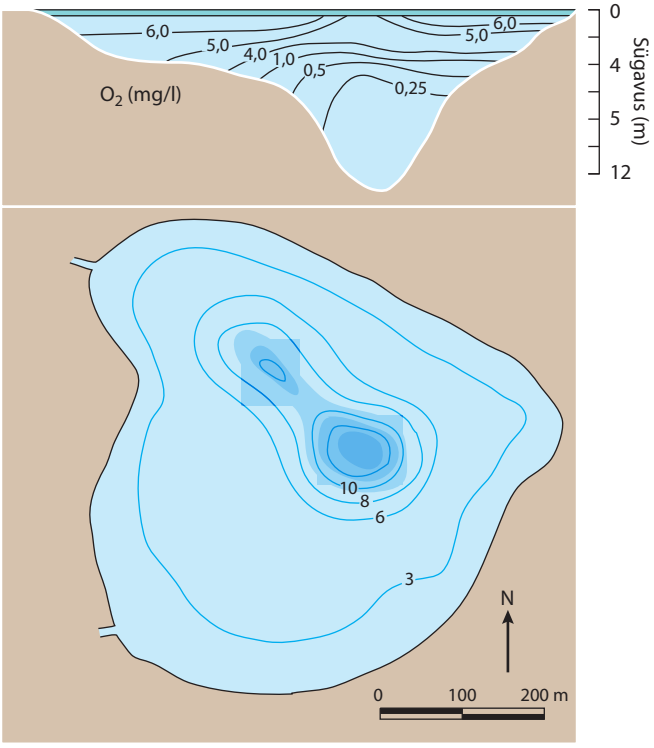

**1.151.** Meromiktiliste järvede hapnikujaotus.




**1.152.** Hapnikujaotuse iseärasused litoraalis ja pelagiaalis. Litoraalis on ajalised kõikumised suuremad (ülemine joonis) ja esineb ka hapnikujaotuse ruumiline muutlikkus (alumine joonis).




**1.153.** Sissevoolu mõju talvisele hapnikujaotusele. Hapnikurikka jõevee sissevool parandab järk-järgult järve hapnikutingimusi.



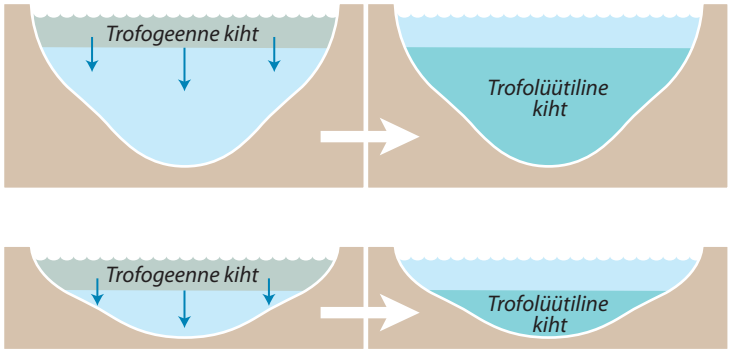

**1.154.** Süvikute mõju järve hapnikujaotusele. Süvikutest eralduvad metaan ja vesinik oksüdeeritakse, mille tulemusena langeb süviku kohal hapnikukontsentratsioon.

Sügavates järvedes, kus põhjakihid on anaeroobsed, eraldub põhjasetetest gaasilist metaani ja vesinikku (joonis 1.154). Talvel võib nende gaaside oksüdeerimine vähendada hapnikusisaldust süvikute kohal. Seda efekti tugevdavad põhja pidi süvikute poole suunatud gradientvoolud, mis süvikute kohal tekitavad tõusvaid voole ja moonutavad kihistumuse iseloomu.

**HAPNIKU DEFITSIIT** Mõistete „eufootiline“ ja „afootiline kiht“ kõrval kasutatakse veesamba iseloomustamisel tihti mõisteid „**trofogeenne**“ ja „**trofolüütiline kiht**“, kui vaatluse all on orgaanilise aine sünteesi ja lagunemisega seotud veekihid (joonis 1.155). Trofogeenses kihis toodetud orgaaniline aine sadeneb trofolüütilisse tsooni, kus ta laguneb. Hapnikusisalduse vähenemine või isegi puudumine trofolüütilises kihis võib seega olla järve produktiivsuse kaudne näitaja.

Kõnekeeles kasutatakse mõistet „hapniku defitsiit“ sageli hapnikupuuduse tähenduses. Limnoloogilises terminoloogias on sellel mõistel sootuks teine tähendus. **Hapniku defitsiit** on hapniku kontsentratsiooni langus küllastuskontsentratsiooniga võrreldes ajavahemikus, mis on möödunud kihistumisperioodi algusest. Sisuliselt on seega tegemist kiirusliku näitajaga – **hapnikutarbe kiirusega**. Ajaloos on hapniku defitsiiti mitut moodi mõistetud. August Thienemann (1928) käsitas hapniku defitsiiti kui erinevust tegelikult mõõdetud hapniku kontsentratsiooni ja küllastuskontsentratsiooni vahel selle veekihi temperatuuril, millest proov võeti. Sellist defitsiiti nimetatakse **aktuaalseks hapniku defitsiidiks**. Gustaf Alsterberg (1927) pidas õigeks lähtuda hapniku defitsiidi määramisel küllastuskontsentratsioonist +4 °C juures, mitte hetketemperatuuril. See seisukoht põhineb tõsiasjal, et sügavamatest kihtidest, millel puudub turbulentne gaasivahetus atmosfääriga, ei saa hapnik hüdrostaatilise rõhu tõttu mullidena eralduda ka temperatuuri tõustes. Järelikult tuleb hapniku algkontsentratsiooniks, millest langust arvestatakse, pidada kevadise tsirkulatsiooni temperatuurile vastavat küllastuskontsentratsiooni. Sellist defitsiiti nimetatakse **absoluutseks hapniku defitsiidiks**. Kaare Strøm (1931) näitas, et paljudes sügavates järvedes ei saavuta hapniku kontsentratsioon kevadise tsirkulatsiooni ajal küllastustaset. Seetõttu on õigem arvutada **suhteline hapniku defitsiit** ehk erinevus tegelikust kevadisest kontsentratsioonist.

Hapniku defitsiit trofolüütilises kihis sõltub hapnikuvaru suurust määrava kihi mahust. Kahe võrdse produktiivsusega ja võrdse trofogeense kihi paksusega järve puhul kujuneb madalas järves palju suurem hapniku defitsiit kui sügavas, suure hapnikuvaruga järves. Järve




**1.155.** Trofogeense ja trofolüütilise kihi ulatus madalas ja sügavas järves.

### KUIDAS ENNUSTADA UMMUKSISSE JÄÄMIST?

Parasvöötme järvede majandamisel on üheks oluliseks probleemiks talvised hapnikutingimused. Ummuksisse jäämist on keerukas ennustada, sest pikaajalised ilmaprognoosid pole usaldusväärsed ja mõjurite hulk on suur.

Madalate ja rohketoiteliste järvede puhul võib aluseks võtta näiteks Võrtsjärve. Tingimustes, kus gaasivahetust takistab jääkate, veevahetus jõgede kaudu on soikunud ja vetikate fotosünteesi takistab jääl olev paks lumi, jäävad järele vaid hapnikku tarbivad protsessid: orgaanilise aine lagunemine, anorgaaniliste ainete oksüdeerumine ja veeorganismide hingamine. Keskmine talvine hapnikuhulga kahanemise kiirus Võrtsjärves on pikaajalise seire andmetel 100 mg/m$^2$ ööpäevas. Ebasoodsate tingimuste korral võib see näitaja tõusta väärtuseni 600 mg/m$^2$ ööpäevas. Umbes sellises tempos väheneb hapnikuvaru ka teistes rohketoitelistes järvedes. Liigtoitelistes järvedes on prognoos kehvem ja mõõdukama toitelisusega järvedes parem. Ühe meetri sügavune järv, mis aastavahetusel on hapnikust küllastunud (0 °C juures 14,6 mg/l, 4 °C juures 13,1 mg/l), sisaldab ruutmeetri kohta 13–15 g lahustunud hapnikku. Seda jätkuks keskmiselt 130–150 päevaks ehk mai lõpuni, mil jää on ammu sulanud. Ebasoodsate tingimuste korral saaks aga hapnik otsa juba enne 25. jaanuari. Kuna hapnikku tarbivad talvel peamiselt setted, on selge, et viie meetri sügavune järv peaks samades oludes umbes viis korda kauem vastu.

produktiivsuse parameetrina soovitas Strøm kasutusele võtta **areaalse hapniku defitsiidi** mõiste, millega ta tähistas hapniku defitsiiti hüpolimnioni ühikpinnaaluses veesambas. Areaalset defitsiiti võib mõõta nii absoluutse kui ka suhtelisena (s.t kas 4 °C vee küllastuskontsentratsiooni või tegeliku kevadise kontsentratsiooni suhtes). Kuu kohta arvestatud areaalne hapniku defitsiit erineva troofsusega (produktiivsusega) veekogudes on järgmine:

- oligotroofsed < 1,0 mg O/(cm$^2$·kuu),
- mesotroofsed 1,0–1,5 mg O/(cm$^2$·kuu),
- eutroofsed > 1,5 mg O/(cm$^2$·kuu).

Järve produktiivsuse hindamisel sel meetodil võib vigu põhjustada allohtoonse orgaanilise aine sissevool järve. Seda meetodit ei saa kasutada järvede puhul, kus hüpolimnionis kujuneb kiiresti hapnikupuudus.

### EESTI SISEVEEKOGUDE HAPNIKUTINGIMUSED

Kõiki soostumata valgalaga Eesti jõgesid iseloomustab püsivalt suur vee hapnikusisaldus. Valdavalt jääb see vahemikku 8–13 mg/l ja küllastumus hapnikust on 60–100%. Hapnikusisalduse hindamiseks on loodud omaette skaala (tabel 1.15). Enamasti on hapnikusisaldus keskmine või suur, kuid piirkonniti võivad erinevused olla väga suured. Suur sisaldus on levinud laialdastel aladel Mandri-Eesti idaosas Lahemaalt Haanja kõrgustikuni. Mandri lääneosa jõgedes on hapnikusisaldus tagasihoidlikum.

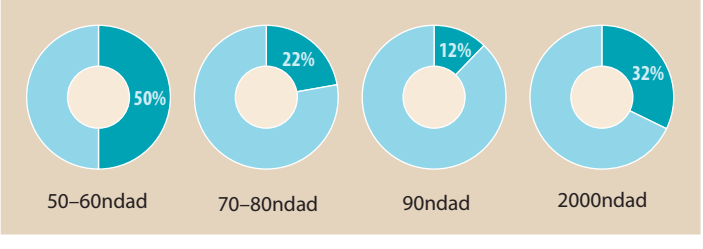
Väikejärvede hapnikurežiimi on põhjalikumalt jälgitud alates möödunud sajandi keskpaigast ja kuni viimase aastakümneni hapnikutingimused pidevalt halvenesid. Ortograadse hapnikujaotusega vähetoitelised järved peaaegu puuduvad. Kihistunud järvede hapnikujaotus on enamasti **klinograadne** või **positiivselt heterograadne**. Väga paljudes kihistunud järvedes puudub hapnik suvel hüpolimnionis sootuks (joonis 1.156). Üks Eesti omapärasid on väikeste humiinainerikaste raba- ja soojärvede rohkus. Neis jääb ka epilimnionis hapnikusisaldus alati küllastuskontsentratsioonist tublisti väiksemaks, sest hapnikku kulutatakse orgaanilise aine lagundamiseks. Külmadel ja karmidel talvedel on väga tavaline talvine ummuksisse jäämine, mida soodustab sügisene madal veetase ja sademete vähesus. Eriti sageli tuleb seda ette rohketoitelistes, madalates ja aeglase veevahetusega järvedes ning mõnedes liigtoitelistes sügavates järvedes. Potentsiaalselt ummuksisse jäävate järvede arv võib küündida isegi 25–30%-ni uuritud järvede koguarvust.

Eesti suurjärvede Peipsi ja Võrtsjärve hapnikurežiim on väikejärvede omast mõneti erinev nende morfomeetria tõttu. Võrtsjärve eripära on seotud suure pindala, väikese keskmise sügavuse ja suurtes piirides kõikuva veetasemega. Jäävabal perioodil on järvevee hapnikusisaldus lähedane küllastusele, kuigi pindmise ja põhjalähedase veekihi vahel on erinevus 1–2 mg/l. Selline gradient on tingitud fotosünteesist ja põhjasetete hapnikutarbest. Keskmiselt igal kolmandal talvel langeb põhjalähedases veekihis (0,5–1 m põhjasetetest) hapni-

Tabel 1.15. EESTI VOOLUVEEKOGUDE HAPNIKUSISALDUSE HINDAMISE SKAALA

| | Hapnikusisaldus (mg/l) |
|---|---|
| Väga väike | < 3,0 |
| Väike | 3,1–5,0 |
| Alla keskmise | 5,1–7,0 |
| Keskmine | 7,1–9,0 |
| Suur | 9,1–11,0 |
| Väga suur | > 11,0 |

(„Eesti jõed" 2001 järgi)




**1.156.** Eesti kihistunud järvede hüpolimnioni hapnikusisaldus aastakümnete kaupa vegetatsiooniperioodil.

kusisaldus alla 1 mg/l, mis järve enda ökosüsteemile otseselt ohtlik veel pole. Madala veetaseme ja karmi talve korral võivad järve väike veemaht ning suur hapnikutarve (100 mg/($m^2$·d)) viia anoksia väljakujunemiseni kogu veesambas. Ka Peipsi järve vesi on jäävabal ajal hapnikurikas ning järveosad ei erine üksteisest keskmise hapnikusisalduse poolest. Kuumade ja tuulevaiksete ilmadega, mis vältavad pikemat aega, on pindmine veekiht fotosünteesi tulemusena tugevasti üleküllastunud ja tekib hapnikukihistumus. Talvine hapnikurežiim on aastati küllaltki muutlik, sõltudes jääkatte kestusest, lumikatte paksusest, sulailmadest jms. Märtsikuuks on põhjalähedane vesi keskmiselt kolm korda hapnikuvaesem kui pindmine veekiht.

### 1.7.3. Lämmastik

Lämmastikku on õhus u 78%. Et lämmastik on inertne gaas ja vees tarbitakse seda vähe, on kontsentratsioon ligilähedane küllastatusele. Keskmine kontsentratsioon vees on 10–23 mg/l, suurim on sisaldus talvel. Kontsentratsioon tõuseb sügavuse suurenedes madalama veetemperatuuri tõttu (joonis 1.157, vasakul).

Molekulaarne lämmastik on oluline lämmastikku fikseerivatele bakteritele ja sinivetikatele, mis muudavad inertse gaasilise lämmastiku teistele veeorganismidele „suupäraseks“ ammooniumlämmastikuks. Gaasilise lämmastiku dünaamika peamised mõjutajad loodusvetes (joonis 1.157, paremal) on lämmastiku fikseerimine ning gaasilise lämmastiku vabanemine denitrifitseerimisel ja **anammoksi** ehk ammooniumi anaeroobse oksüdatsiooni käigus (vt joonis 1.213, lk 145).

### 1.7.4. Vesiniksulfiid

Vesiniksulfiid ($H_2S$) on õhust pisut raskem gaas, mis oksüdeerub kergesti molekulaarse hapniku mõjul:

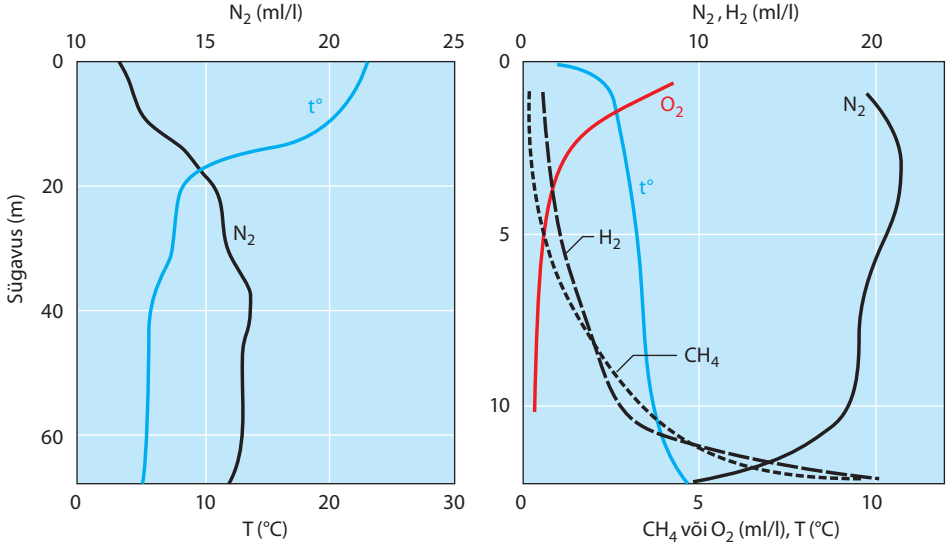
$$2H_2S + O_2 = 2H_2O + 2S$$

Lahustumisel vees moodustub nõrk vesiniksulfiidhape:

$$H_2S \leftrightarrow HS^- + H^+$$

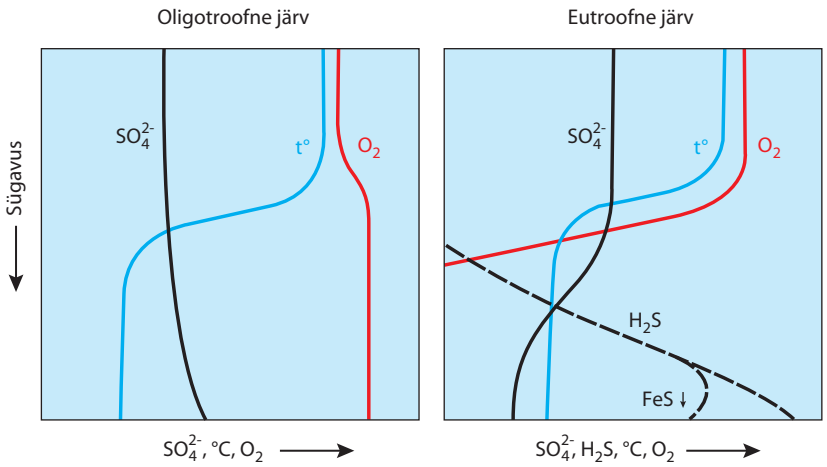
Reaktsioon sõltub pH-st: gaasilist $H_2S$-i leidub loodusvetes vaid madala pH juures, pH tõustes on ülekaalus juba vesiniksulfiidid. Veekogudes moodustub $H_2S$ eranditult biogeensel teel (sulfaatide redutseerimisel ja orgaanilise aine koostises oleva väävli baasil) mitmesuguste bakterite elutegevuse tulemusena. Seda tarbivad ka värvitud ja rohelised ning purpursed väävlibakterid (joonis 1.158). Redutseerimine $SO_4 \rightarrow H_2S$ toimub juhul, kui redokspotentsiaal on alla 100 mV.

$H_2S$ on vee-elustikule mürgine juba väikeses koguses. Mürgisus on võrreldav vesiniktsüaniidi omaga ja tuleneb kompleksühendi moodustamisest mitokondriaalses tsütokroomis oleva rauaga. Mustas meres on näiteks selle gaasi tõttu eukarüoodivabad need piirkonnad, mis on sügavamal kui 150–250 m. Ka kihistunud liig- ja rohketoiteliste väikejärvede hüpolimnioni koguneb talvisel või suvisel stagnatsiooniperioodil tihti väga suures koguses vesiniksulfiidi (joonis 1.159), millest vabanemine toimub kevadise ja sügisese segunemise ajal. Vastupidi gaasilisele vesiniksulfiidile pole tahked sulfiidid vee-elustikule mürgised. Sulfiidide hulk järves ja nende dünaamika sõltub suurelt jaolt raua- ja mangaanivarudest, sest nende sulfiidid on lahustumatud ja sadenevad põhja.




**1.157.** Gaaside jaotus Wisconsinis paiknevas Greeni järves (vasakul) ja Venemaal Beloje järves (paremal).

**1.158.** Purpurseid väävlibaktereid sisaldav veeproov Mahoney järvest Kanadas.




**1.159.** Väävliühendite vertikaalne jaotus oligo- ja eutroofses järves.

## 1.7.5. Metaan

Metaan ($CH_4$) on värvitu ja lõhnatu gaas, mis lahustub vees halvasti (Henry konstant $1{,}27 \cdot 10^{-5}$ mol/($m^3 \cdot Pa$)). Elustikule ei ole ta otseselt mürgine. Vesikeskkonnas tekib metaan orgaanilise aine anaeroobsel lagunemisel mikroorganismide elutegevuse tulemusena (joonis 1.160), moodustades 30–50% kõigist põhjasetteist eralduvatest gaasidest. Anaeroobsetes setetes toodetud metaan on oluline süsinikuallikas aeroobsete veekihtide toiduahelates. Metaani moodustumise kiirus sõltub suuresti lagundatavast substraadist ja temperatuurist. Kõige rohkem tekib seda gaasi madalates, hästi soojenevates ning orgaanilise aine rikastes veekogudes. Näiteks tuumaelektrijaamade jahutusbasseinides on metaani moodustumise kiiruseks mõõdetud 200–300 ml/$m^2$ ööpäevas. Troopiliste merede madalates lahtedes ja laguunijärvedes on see koguni 600–900 ml/$m^2$ ööpäevas. Osa moodustuvast metaanist lendub atmosfääri, osa kasutavad ära mikroaerofiilsed ehk väikest hapnikusisaldust eelistavad bakterid, kes oksüdeerivad selle süsihappegaasiks.

**1.160.** Metaanimullid külmunud Abrahami järves Kanadas.

### EDWARD ASAHEL BIRGE JA CHANCEY JUDAY

ÄÄREMÄRKUS 1.9

Edward Asahel Birge (1851–1950) ja Chancey Juday (1871–1944) olid USA akadeemilise limnoloogia ja Wisconsini koolkonna rajajad (uurimisjaam Wisconsin School of Limnology) ning võrdleva limnoloogia loojad. Tuntuks said nad sadade uuringutega Ameerika järvedel. Birge tundis alguses huvi zooplanktoni vastu ja ka Juday oli hariduselt bioloog, kuid koos järvi uurides koondasid nad oma tähelepanu temperatuuri- ja hapnikutingimustele järvedes. Birge ja Juday olid veendunud, et füüsikalised ja keemilised tingimused järves panevad aluse planktoni dünaamikale ning abiootilisi näitajaid eirates ei saa planktonit uurida. Nende uurimused soojuskihistumisest ja vees lahustunud gaasidest võimaldasid limnoloogidel mõista järvede bioloogilisi aineringeid. Siiski ei peetud neid headeks teadlasteks, sest nende töödes puudusid selgesti sõnastatud hüpoteesid, statistika ja korduskatsed.

## KÜSIMUSED JA PROBLEEMÜLESANDED

1. Millistes tingimustes põhjustab suvine soojuskihistumus hüpolimnionis anoksia?
2. Aafrikas asuv Tanganjika järv on 1470 m sügav. Kuigi järv on oligotroofne, puudub veesamba sügavamas osas hapnik. Kuidas on see võimalik?
3. Kirjeldage lahustunud hapniku sisalduses toimuvaid muutusi, mis leiavad aset eutroofse järve hüpolimnionis suvise soojuskihistumise ajal. Miks sellised muutused üldse toimuvad?
4. Titicaca järv asub 3812 m kõrgusel merepinnast. Arvutage hapniku lahustuvus selles järves, kui veetemperatuur on 5 °C. Henry konstant on selle temperatuuri juures $1{,}9 \cdot 10^{-8}$ mol/(l·Pa).
5. Kui pikaks ajaks jätkub teoreetiliselt hapnikku, kui ühe meetri sügavune järv jäätub 1. detsembril ja põhjasetete hapnikutarve on 100 mg $O_2/(m^2 \cdot d)$?
6. Kalade talvine keskmine hapnikutarve on 60 mg/(kg·h). Kas Eesti järvedes võib kalade talvine hingamine mängida olulist rolli hapnikupuuduse tekkes? Põhjasetete hapnikutarve võib olenevalt troofsusest olla 100–600 mg $O_2/(m^2 \cdot d)$.
7. Kuidas muutub epilimnioni horisontaalne hapnikusisaldus liikumisel litoraalist avavee poole?

## MÕISTED JA MÄRKSÕNAD

põhi- ja lisandgaasid
hapnik
(hapniku) adsorptsioonikoefitsient
hapniku allikad ja tarbijad vees
anoksia
(hapniku) normaalkontsentratsioon
(hapniku) suhteline küllastuskontsentratsioon
(hapniku) suhteline küllastusaste
(hapniku) absoluutne küllastusaste
Winkleri e keemiline meetod
hapnikumõõtja e oksümeeter
elektrokeemiline hapnikuandur
optiline hapnikuandur
suvine hapnikujaotus
ortograadne profiil
klinograadne profiil
positiivne heterograadne kõver
negatiivne heterograadne kõver
ummuksisse jäämine
trofogeenne kiht
trofolüütiline kiht
hapniku defitsiit
hapnikutarbe kiirus
aktuaalne hapniku defitsiit
absoluutne hapniku defitsiit
suhteline hapniku defitsiit
areaalne hapniku defitsiit
lämmastik
anammoks
vesiniksulfiid
metaan

# 1.8. Soolsus

Mineraalainete roll veekogus ja hüdrobiontide elus on mitmesugune. Kui mineraalainesisaldus kasvab, suureneb vee tihedus ja viskoossus (joonis 1.161), mis avaldab otsest mõju vee-elustiku ujuvusele ja liikumisvõimele. Mineraalainete hulk vees määrab osmoregulatsiooni ulatuse, mille eesmärk on sobiva soolsuserinevuse säilitamine organismi sise- ja väliskeskkonna vahel. Osa mineraalaineid, nimelt toiteained, on fütoplanktonile ja suurtaimedele vajalikud biosünteesiks. Selliste ainete hulka, mis limiteerivad veetaimede kasvu ja arengut, kuuluvad lämmastikku, fosforit, räni ja rauda sisaldavad ühendid. Ning lõpuks on väga tähtis vee kaltsiumi- ja magneesiumisoolade sisaldus ehk **karedus**. Piisavalt kare vesi on üks tingimusi, et seal suudaksid elada kalad, koorikloomad ja limused, kes vajavad kaltsiumi ja magneesiumi oma skeleti ülesehitamiseks.

**1.161.** Eltoni järv Venemaal on Euroopa suurim soolajärv (pindala u 150 km$^2$) ja üks mineraalainerikkamaid järvi maailmas. Vee soolasisaldus ulatub seal 200–500 g-ni/l, mistõttu ka vee tihedus ja viskoossus on väga suur.

## 1.8.1. Sisevete soolsus ja mineraalsus

Lahustunud mineraalainete hulka vees ehk **ioonide summat** (Σi) nimetatakse siseveekogude puhul **mineralisatsiooniks** ning mere- ja riimvete puhul **soolsuseks**. Ingliskeelses kirjanduses kasutatakse mõistet „soolsus“ (*salinity*) ka sisevete puhul. Magevee soolsust väljendatakse milligrammides liitri kohta või **milligramm-ekvivalentides** (mg-ekv). See on aine kogus milligrammides, mis vastab arvuliselt tema valentsiga jagatud molekulmassile (näiteks 1 mg-ekv $Ca^{2+}$ = 40 : 2 = 20 mg). Suure mineraalainesisalduse korral (soolajärved ja ookeanid) kasutatakse ühikut g/kg ehk **promill** (‰). Soolasisalduse järgi võib loodusliku vee jaotada järgmiselt:

- magevesi kuni 0,5‰,
- riimvesi 0,5–30‰,
- soolane vesi 30–50‰,
- soolvesi üle 50‰.

Lihtsaim ja praktikas laialdast kasutust leidev viis soolsust hinnata on mõõta uuritava lahuse elektrijuhtivust. Mida rohkem sisaldab elektrolüüt ioniseerunud sooli, seda väiksem on tema eritakistus. Et elektrijuhtivuse mõõtmine on saanud veekogude uurimisel standardmeetodiks, kasutatakse üha sagedamini 1978. aastal väljatöötatud **praktilist soolsuse skaalat** (*practical salinity scale*, PSS-78), kus soolsus arvutatakse elektrijuhtivuse, temperatuuri ja rõhu järgi ning seda väljendatakse **praktilise soolsuse ühikutes** (*practical salinity unit* – PSU). Suuremale elektrijuhtivusele vastab suurem soolsus ning temperatuuri tõustes suureneb üldiselt ka elektrijuhtivus. Arvutusvalemid on kalibreeritud nii, et standardse ioonkoostisega merevesi, mille soolsus on 35 kg soolasid ühe kuupmeetri vee kohta, annab tulemuseks 35 PSUd. Väiksemate soolsuste puhul on arvutuslik sõltuvus saadud katsetest, kus standardset merevett on lahjendatud. Kõikide ülejäänud vete soolsus, mille ioonkoostis võib erinev olla, on defineeritud elektrijuhtivuste suhte järgi temperatuuril 15 °C ja rõhul 1 atm.

Loodusvete mineraalainesisaldus on piirkonniti väga erinev. Maailmamere keskmine soolsus on 35‰ ning 99% merede puhul jääb see vahemikku 30–37‰. Varieeruvus on tingitud piirkondade erinevast sademete ja aurumise vahekorrast. Väga varieeruv on ka

sisevete mineraalainesisaldus, sest ioonkoostise kujunemise tingimused on maailmajagudes erinevad ja see avaldub nii magevete ioonkoostises kui ka soolade keskmises üldhulgas (tabel 1.16 ja 1.17). Maailma jõgede keskmine mineraalainesisaldus on 120 mg/l, kuid soolajärvedes on see vahemikus 50–400‰ (vt ääremärkus 1.10). Surnumeri (soolsus 30%) on näiteks 8,6 korda soolasem kui ookeanid keskmiselt.

Eesti järved on valdavalt magedad, kuid ka nende mineraalsus kõigub suurtes piirides, jäädes vahemikku 5–4000 mg/l. Et meie sisevete põhiline anioon on $HCO_3^-$, hinnatakse pinnavete mineraalsust enamasti just selle iooni sisalduse järgi (tabel 1.18). Rohkelt (200–350 mg/l) on mineraalaineid Lõuna-Eesti moreenpinnasel (joonis 1.162) ning Põhja- ja Lääne-Eesti paekivi avamusaladel paiknevates järvedes. Liivasel pinnasel, näiteks mõhnastikes olevates järvedes on mineraalsus palju tagasihoidlikum – 50–120 mg/l. Rabaveekogudes ja sooveest toituvates järvedes võivad mineraalained peaaegu puududa. Kõige suurem (1000–4000 mg/l) on mineraalsus Lääne-Eesti ja saarte rannajärvedes, mis pole veel ühendust merega lõplikult kaotanud. Siiski pole seal peamine anioon enam mitte $HCO_3^-$, vaid hoopis kloriidid. $HCO_3^-$ hulk sõltub magevee sissevoolust ja on pisut suurem kevaditi.

**1.162.** Lõuna-Eestis, kus pinnakate on valdavalt moreenirikas, on ka veekogudes rohkelt mineraalaineid (Kavilda jõgi).

### Tabel 1.16. SISEVEEKOGUDE SOOLSUSKLASSIFIKATSIOON

| Soolsusklass | Soolsus (‰) | TDS (mg/l) | Elektrijuhtivus (S/m) |
|---|---|---|---|
| Magevesi | 0,5 | < 500 | < 850 |
| Subsaliinne | 0,5–3 | 500–3000 | 850–5500 |
| Hüposaliinne | 3–20 | 3000–20 000 | 5500–30 000 |
| Mesosaliinne | 20–50 | 20 000–50 000 | 30 000–70 000 |
| Hüpersaliinne | > 50 | > 50 000 | > 70 000 |
| *Maailmameri* | *35* | *35 000* | *53 000* |

### Tabel 1.17. MAGEDATE SISEVEEKOGUDE KESKMINE MINERAALAINESISALDUS KONTINENTIDE KAUPA

| Kontinent | Mineraalainete sisaldus (mg/l) |
|---|---|
| Põhja-Ameerika | 142 |
| Lõuna-Ameerika | 69 |
| Euroopa | 182 |
| Aasia | 142 |
| Aafrika | 121 |
| Austraalia | 59 |
| *Keskmine* | *120* |

1.10 ÄÄREMÄRKUS

**KÕIGE SOOLASEM JÄRV MAAILMAS**

Enamiku siseveekogude soolsus on ookeanide omast väiksem. Siiski leidub hulgaliselt soolajärvi, mille mineraalainesisaldus ületab maailmamere keskmist väärtust mitu korda. Paljud soolased veekogud asuvad kuivas kliimavöötmes, kus kõrge õhutemperatuuri tõttu ületab aurumine tugevalt sademeid. Kõige soolasema veega järved asuvad Antarktika külmakõrbes McMurdo kuivades orgudes. Väikese õhuniiskuse tõttu seal jää ja lumi sisuliselt puuduvad. Mineraalainete hulk nende järvede vees on isegi suurem kui Surnumeres. Rekordiomanik on Don Juani järv, mille soolsus on 40% ja mis ei külmu isegi –30 °C juures (vt joonis 1.186, lk 129). Selle järvekese mõõtmed on väga tagasihoidlikud: pindala 0,03 km² ja suurim sügavus 0,3 m.

### Tabel 1.18. EESTI JÄRVEDE MINERAALSUSE KLASSIFIKATSIOON $HCO_3^-$-IOONI SISALDUSE PÕHJAL

| Mineraalsusklass | Mineraalsus | |
|---|---|---|
| | mg/l | mg-ekv/l |
| Väga väike | < 50 | 0,5 |
| Väike | 50–120 | 0,5–1,3 |
| Keskmine | 120–250 | 1,3–2,6 |
| Suurenenud | 250–350 | 2,6–4,0 |
| Suur | > 350 | > 4,0 |

## 1.8.2. Sisevete ioonkoostis ja selle hindamise viisid

### IOONKOOSTIS JA SELLE KINDLAKSMÄÄRAMINE

Loodusvete koostises domineerivad mineraalainete hulgas neli katiooni – $Na^+$, $K^+$, $Mg^{2+}$ ja $Ca^{2+}$ – ning neli anniooni – $Cl^-$, $SO_4^{2-}$, $HCO_3^-$ ja $CO_3^{2-}$. Neid kaheksat iooni nimetatakse seetõttu **enamusioonideks**. Kui mõne teise iooni, näiteks $Fe^{2+}$ või $NO_3^-$ sisaldus ületab 0,1 mg/l, arvatakse ka need enamusioonide hulka. Toiteainetena olulised $NH^{4+}$, $PO_4^-$ ja $Fe^{2+}$ kuuluvad **vähemusioonide** hulka. Peale nende leidub vees jälgedena veel paljusid elemente (Cu, Co, Mo, Mn, Zn jt). Nende puhul pruugitakse mõistet **mikroelemendid**. Enamusioonid moodustavad loodusvete mineraalainete peamise osa – magevetes 90–95%, soolastes 99%.

Aineringes osalemise järgi võib põhiioonid omakorda jaotada **konservatiivseteks ioonideks** – $Mg^{2+}$, $Na^+$, $K^+$ ja $Cl^-$ –, mille hulk veekogus ületab väga tugevasti nende bioloogilise tarbe ja mille sisaldus vees muutub seetõttu aastaajati vähe, ning **dünaamilisteks ioonideks** – $Ca^{2+}$, $HCO_3^-$, $CO_3^{2-}$, $SO_4^{2-}$ –, mille sisaldust vees mõjutab nimetamisväärselt elustik.

Ioonide absoluutse sisalduse kõrval on väga olulised vee keemilise koostise näitajad **ioonide suhteline vahekord** ning **ühe- ja kahevalentsete ioonide suhe**. Need näitajad mõjutavad elustikku sama palju kui absoluutne sisaldus ja nende kindlakstegemine on seetõttu väga tähtis (vt ääremärkus 1.11). Milligramm-ekvivalentides mõõdetud enamusioonide keskmine protsentuaalne vahekord maailma siseveekogudes on järgmine:

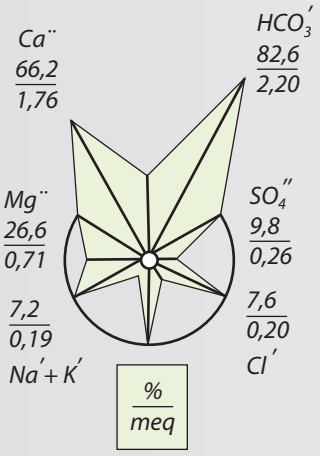
**katioonid** – $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$
64 : 17 : 16 : 3

**anioonid** – $HCO_3^- + CO_3^{2-} > SO_4^{2-} > Cl^-$
73 : 16 : 10

1.11 ÄÄREMÄRKUS

### IOONKOOSTISE GRAAFILISI VÄLJENDUSVIISE

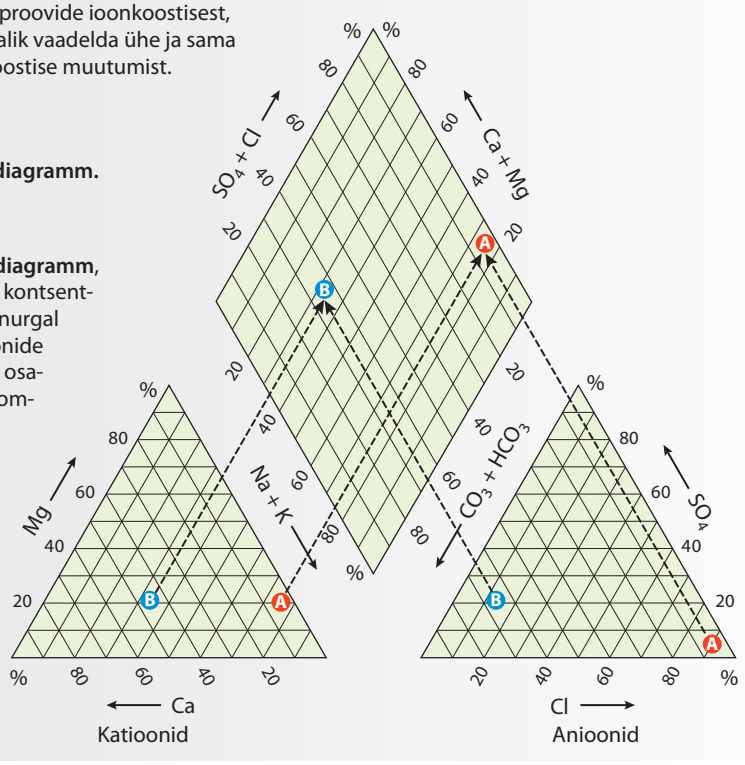
Kuigi enamusioone pole palju, on nende sisaldusest arvulisel kujul ülevaate saamine ebamugav ja pruukida tuleks mõnda graafilist väljendusviisi. Ioonkoostise graafiliseks väljenduseks on pikka aega kasutatud „soolaroosi“ ehk **Maucha diagrammi**. Selle hulknurkse diagrammi joonistamiseks jagatakse ring põhiioonidele vastavateks sektoriteks. Sektoreid võib olla kuus või kaheksa olenevalt sellest, kas $K^+$- ja $Na^+$- ning $HCO_3^-$- ja $CO_3^{2-}$-ioonid esitatakse summana või mitte. Ringi vasakule poolele kantakse katioonid ja paremale anioonid. Iga sektor poolitatakse joonega, mille pikkus on võrdeline iooni kontsentratsiooniga. Joone tipp ühendatakse sektori servapunktidega ringjoonel ja saadakse kristalli meenutav kujutis. Iga sektori juurde lisatakse vastava iooni kontsentratsioon milligramm-ekvivalentides ning protsentuaalne osakaal või kantakse joonele vastava iooni kontsentratsioon ekv-%-des. Soolaroose kõrvutades saab kiiresti ülevaate eri veeproovide ioonkoostisest, samuti on võimalik vaadelda ühe ja sama veekogu ioonkoostise muutumist.




„Soolaroos“ ehk Maucha diagramm.

Piperi diagramm.

Teine väga levinud graafiline väljendusviis on **Piperi diagramm**, mis koosneb rombist ja kahest kolmnurgast ning kus kontsentratsiooni väljendatakse % mg-ekv/l. Katioonide kolmnurgal kujutatakse $Na^+$- + $K^+$-, $Ca^{2+}$- ja $Mg^{2+}$-iooni ning anioonide kolmnurgal $Cl^-$-, $SO_4^{2-}$- ja $HCO_3^-$- + $CO_3^{2-}$-ioonid suhtelist osakaalu veeproovis. Saadud punktid kombineeritakse rombile, mis näitabki veeproovi üldist keemilist koostist. Tüübi määramisel lähtutakse domineerivatest ioonidest. Näiteks joonisel toodud veeproov A on NaCl-tüüpi, veeproov B aga $CaCO_3$-tüüpi.. Piperi diagramm ei kirjelda pelgalt loodusvete iseloomu, vaid annab võimaluse võrrelda ühel ja samal diagrammil korraga mitut veeproovi. Nii saab jälgida ja klassifitseerida eri veeproovide keemilise koostise muutusi. Piperi diagrammi puuduseks on keeruline kasutatavus vähemusioonide (näiteks Fe) väga suure kontsentratsiooni korral.



Erinevused nendest keskmistest väärtustest võivad olla väga suured. Kaks peamist sisevete soolsustüüpi on **karbonaatsed veed**, kus katioonidest on tavaliselt ülekaalus kaltsium, ja **kloriidsed veed** NaCl-i suure osakaaluga. Erinevalt siseveekogudest on merevees ioonide vahekord väga püsiv.

Soolade lahustuvusest lähtudes võib enamusioonid reastada nende domineerimise järgi loodusvete koostises mineralisatsiooni suurenemise korral järgmiselt:

$$Ca^{2+} \rightarrow Mg^{2+} \rightarrow Na^{+}$$

$$HCO_3^- \rightarrow SO_4^{2-} \rightarrow Cl^-$$

*mineralisatsiooni suurenemine* →

Näiteks kuiva kliimavöötme järvede vees domineerivad kõige suurema lahustuvusega $Na^+$- ja $Cl^-$-ioonid.

Enamusioonide vahekord kannab endas küll hulgaliselt informatsiooni, kuid on veekogu iseloomustamiseks ja klassifitseerimiseks kohmakas. Sellest probleemist aitavad üle saada **ioonkoostisel põhinevad klassifikatsioonid**. Läbi aegade on neid loodud päris mitu. Enamikus neis on peamiseks klassifikaatoriks anioonid, mida täiendavad katioonid. Ühe parima ja kõige laialdasemalt kasutuses oleva ioonkoostisel põhineva klassifikatsiooni lõi Vene hüdrokeemik Oleg Alekin. Süsteem töötati välja küll jõgede keemiliste omaduste rühmitamiseks, kuid seda saab probleemideta kasutada peaaegu kõigi loodusvete puhul. Klassifikatsiooni aluseks on enamusioonide sisaldus ning veekogud jagatakse domineeriva aniooni järgi kolmeks klassiks (joonis 1.163):

1) **vesinikkarbonaatsed** ja **karbonaatsed veekogud**, mille hulka kuulub enamik mageveelisi jõgesid, järvi ja tehisveekogusid ning osa põhjaveest;
2) **sulfaatsed veekogud**, mis kujutavad endast vahevormi karbonaatsete ja kloriidsete vete vahel; sulfaatne vesi on tekkelt seotud mitmesuguste sademetega;
3) **kloriidsed veekogud** ehk suure soolsusega veekogud, nagu ookeanid, mered ja soolajärved. Siia rühma kuuluvad ka paljud põhjaveed.

Iga klass jaguneb domineeriva katiooni (Ca, Mg või Na) järgi kolmeks rühmaks ja iga rühm omakorda kolmeks tüübiks. Erinevaid tüüpe on neli:

**I tüüp**. Tekib tardkivimite porsumisel või ioonvahetuse tulemusena, kusjuures $Ca^{2+}$ ja $Mg^{2+}$ asenduvad soolsuse kasvades $Na^+$-ioonidega.

**II tüüp**. On geneetiliselt seotud peamiselt settekivimitega. Siia alla kuuluvad vähe või mõõdukalt mineraliseerunud veega põhjaveekogud ning enamik jõgesid ja järvi. Kõik Eesti jõed ja enamik järvi kuulub II tüüpi.

**III tüüp**. Metamorfiseerunud veega veekogud. Vees olnud $Na^+$-ioonid on osaliselt asendunud $Ca^{2+}$- ja $Mg^{2+}$-ioonidega. Need veekogud on tugevasti mineraliseerunud. Sellist tüüpi vesi on meredes ja ookeanides, kuid siia kuuluvad ka tugevalt mineraliseerunud põhjaveekogud ning soolajärved.

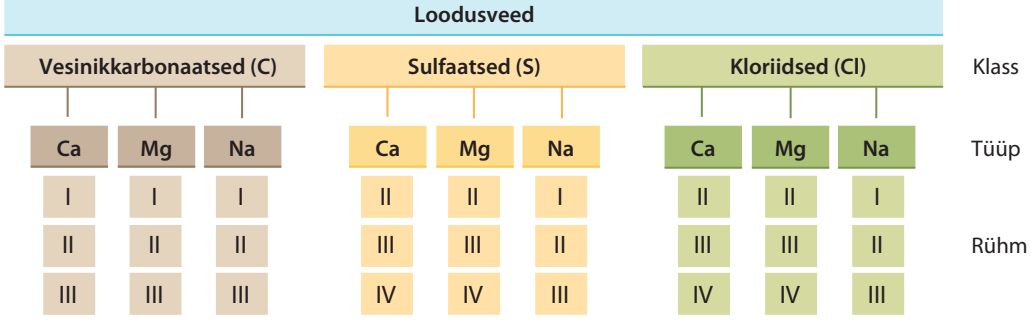
**IV tüüp**. Happelise veega veekogud, milles kogu mineraalne süsinik esineb vaid lahustunud süsihappegaasina ning (vesinik)karbonaatioonid puuduvad. Tegu on peamiselt raba-, kaevandus- ja vulkaaniliste vetega. Eestis esindavad seda tüüpi rabalaukad ja -järved.

Alekini klassifikatsioonis on klasse, rühmi ja tüüpe arvestades võimalik tekitada 27 erinevat kombinatsiooni, mida kokkuvõtlikult tähistatakse **veeindeksiga**, näiteks nii:

$$C\,\frac{Ca_4}{II_{0,3}}$$

Ülaltoodud veeindeks iseloomustab Emajõe vee keemilist koostist, kus $Ca_4$ näitab üldkaredust (Ca+Mg mg-ekv/l) ja $II_{0,3}$ mineralisatsiooni (g-ekv).

**■ MINERAALSUSE MÕÕTMISE VIISID** Vees lahustunud mineraalainete koguhulga mõõtmiseks on mitu võimalust. Üldjuhul alustatakse uuritava veeproovi **elektrijuhtivuse mõõtmisest**. Mida rohkem sisaldab elektrolüüt ioniseerunud sooli, seda väiksem on tema




**1.163.** Alekini enamusioonidel põhinev loodusvete klassifikatsioon.

**1.164.** Portatiivne konduktomeeter.

eritakistus. Elektrolüüdi eritakistust mõõdetakse kahe 1 $cm^2$ pindalaga elektroodi vahel, mis asetsevad teineteisest 1 cm kaugusel. Eritakistuse pöördväärtus on **erijuhtivus**, mille ühik on siimensit (S) meetri või sentimeetri kohta. Loodusliku vee erijuhtivus on ligikaudu võrdeline enamusioonide sisaldusega ja jääb vahemikku 10–100 000 µS/cm. Lahuste elektrijuhtivust mõõdetakse konduktomeetriga (joonis 1.164). Tihti võimaldavad need seadmed peale otsese erijuhtivuse kindlaks teha ka palju laialdasemalt kasutatava **üldise lahustunud ainete sisalduse TDS** (*total dissolved solids*). TDS kujutab endast vees lahustunud anorgaanilisi ja orgaanilisi aineid ioonsel, molekulaarsel või kolloidsel kujul ning mõõtühikuks on sel enamasti mg/l.

Laborites määratakse vee mineraalsus sageli vee aurutamisel 105 °C juures. Järele jääb **tahke jääk**, mis sisaldab peale mineraalainete ka orgaanilisi ühendeid. Tahke jäägi põletamisel 550 °C juures lendub **tuhavaba orgaaniline aine** ja järele jääb **mittelenduv tahke jääk**. Paraku lendub põletamisel ka osa karbonaatides seotud süsinikust, leelismetallidest ja kloriididest ning mittelenduva tahke jäägi järgi määratud mineralisatsioon võib olla seetõttu oluliselt alahinnatud.

Standardsel keemilisel ioonkoostise määramisel mõõdetakse veel üldkaredus (Ca- ja Mg-soolade sisaldus) ning $Ca^{2+}$, $SO_4^{2-}$, $Cl^-$ ja $HCO_3^-$ + $CO_3^{2-}$ sisaldus. Mõõtmistulemuste põhjal arvutatakse omakorda katioonide summa milligramm-ekvivalentides (võrdub anioonide summaga), $Mg^{2+}$ (üldkaredusest lahutatakse $Ca^{2+}$) ja $Na^+$ + $K^+$ (katioonide summast lahutatakse üldkaredus). Selle meetodi kasutamisel summeeruvad kõigi ioonide määramisel tehtud vead leelismetallide kontsentratsioonis. $Na^+$ ja $K^+$ kontsentratsiooni täpseks määramiseks kasutatakse leekfotomeetrit.

Mõnel juhul standardanalüüsist ei piisa ja vaja on kindlaks määrata ka mikroelementide, toiteainete (peamiselt N-i ja P mitmesugused vormid), stabiilsete isotoopide ($^{14}C$, $^{18}O$, $^{2}H$ jt) või radionukliidide ($^{226}Ra$, $^{207}Pb$, $^{208}Po$, $^{231}Th$) sisaldus.

## 1.8.3. Lahustunud mineraalainete päritolu

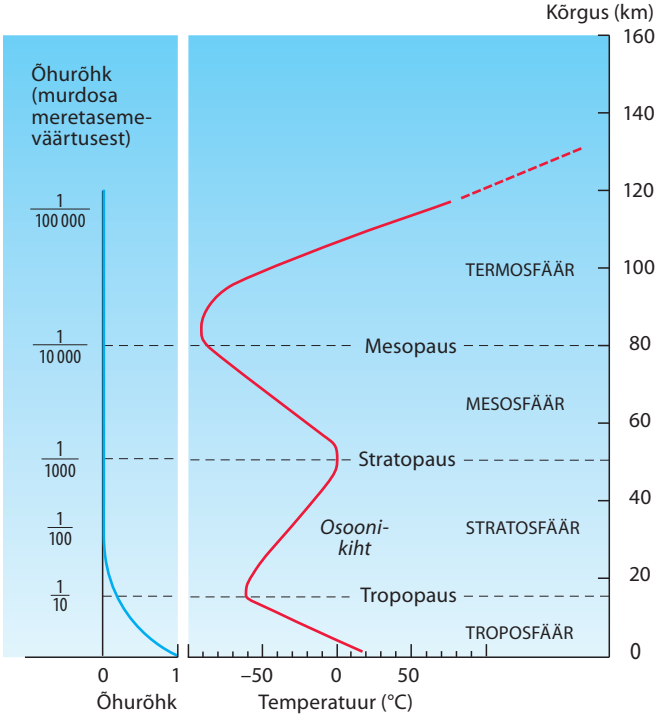
Piltlikult öeldes võib loodusvett võrrelda puljongiga, mille retsepti määravad klimaatilised, hüdroloogilised ja geoloogilised tingimused. Säärane „puljong“ tekib veeringe tulemusena. Vee koguhulk veeringes on jaotunud väga ebaühtlaselt, mis avaldub selgelt ka loodusvee keemilist koostist muutvate protsesside ebaühtlases paigutuses geosfääride vahel.

Üks loodusvete kujunemise tähtsamaid etappe on nende rikastumine anorgaaniliste ainetega nii ioonsel kujul kui ka kompleksühenditena. Seda protsessi mõjutavad ja reguleerivad ainete väljapesemine atmosfäärist, väljauhtumine pinnasest ja kliimatingimused.

### VÄLJAPESEMINE JA -SETTIMINE ATMOSFÄÄRIST

**Atmosfäär** on Maad ümbritsev gaasiline kiht, mille ülapiir pole täpselt määratav. Meteoroloogias loetakse atmosfääri paksuseks 1000–1200 km. Atmosfäär pole samas mitte homogeenne gaasipilv, vaid kihilise ehitusega (joonis 1.165). Sademete moodustumise peamiseks tegevuslavaks on maapinnale kõige lähemal paiknev ning võrdlemisi ühtlase koostisega **troposfäär**, mis moodustab atmosfäärist suhteliselt väikese osa (paksus vaid 10–16 km). Troposfääri homogeensus on tingitud pidevalt tsirkuleerivatest õhumassidest. Eriti oluline on troposfääri alumine, u 5 km paksune kiht, kuhu on koondunud ligikaudu pool atmosfääri kogumassist.

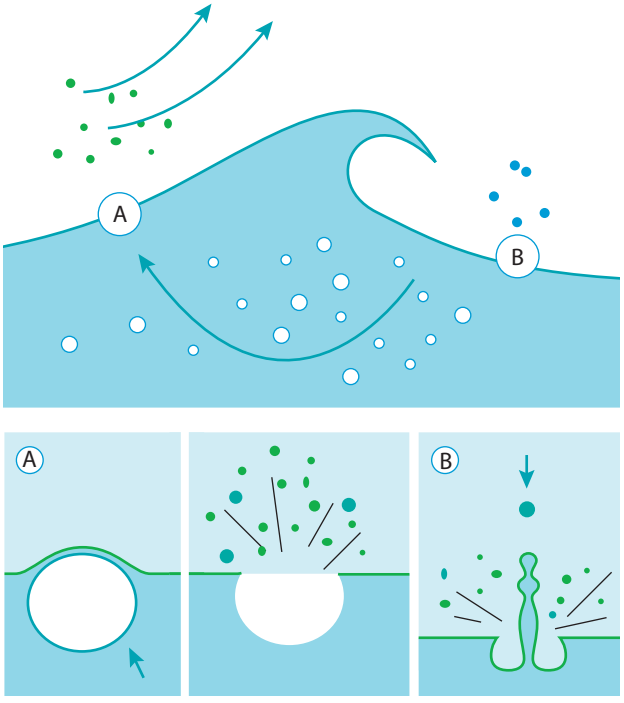
**1.165.** Atmosfääri ehitus.



Sademete moodustumise seisukohalt on tähtsad atmosfäärikihid veel **tropopaus** ja **stratosfäär**. Tropopaus on konstantse temperatuuriga atmosfäärikiht 9–18 km kõrgusel ja eraldab troposfääri stratosfäärist. Väga madala temperatuuri tõttu toimib tropopaus omalaadse barjäärina, põhjustades veeauru kondenseerumist jääks ning takistades selle jõudmist kõrgematesse atmosfäärikihtidesse, kus ultraviolettkiirguse tõttu algaks veemolekulide fotodissotsiatsioon. Selle tagajärjel vabanev vesinik lenduks kerge gaasina maailmaruumi. Vahetult troposfäärile järgneb stratosfäär, mis paikneb kõrgusvahemikus 10–50 km ja kus temperatuur tõuseb –2 °C-ni, enne kui algab **stratopaus**. Stratosfääri iseäralikku termilist režiimi kujundavad osoonimolekulid, mis neelavad ultraviolettkiirgust ja põhjustavad atmosfääri soojenemist.

Atmosfäär on heterogeenne süsteem, mis koosneb **aerosoolist** – segust, mis tekib tahke või vedela aine pihustumisel gaasi. Eristatakse suitsu tüüpi aerosoole (tahked osakesed) ja udu tüüpi aerosoole (pihustunud vedelik). Troposfääri aerosool sisaldab 30–50% vett ja nii sademed kui ka aerosool on vesilahused. Üks kuupsentimeeter õhku sisaldab ligikaudu 106 aerosooliosakest, mis võivad pärineda nii litosfäärist, hüdrosfäärist kui ka atmosfäärist. Üldjoontes on aerosooli tekkeks kaks teed: materjali **abrasioon maapinnalt** (või tilgakeste õhkupaiskumine veepinnalt) ehk desintegratsioon ning õhus olevate **molekulide** ja **radikaalide liitumine** suuremateks üksusteks. Valmis kujul õhku tõstetud aerosooli nimetatakse sageli **primaarseks**, õhus kondensatsiooni ja nukleatsiooni teel tekkinud aerosooli aga **sekundaarseks**. Primaarse aerosooli tekitajateks on pinnase- ja vulkaaniline tolm, meresool ning metsatulekahjudest pärinev tahm. Sekundaarsed aerosoolid tekivad atmosfääris olevatest gaasidest. Suur osa õhku sattunud aerosooliosakesi langeb tagasi maapinnale oma tekkeallika lähedal, kuid teine osa, eriti gaasilised heitmed, võivad levida tekkeallikast sadade kilomeetrite kaugusele. Atmosfäärse päritoluga ioonid on olulisel kohal pehmeveelistes järvedes, kus mineraalainesisaldus on üliväike, ning soolastes kõrbejärvedes.

**Merelised aerosoolid** tekivad mereveest, kui tormiga pihustub laineharjadelt vett aerosoolina atmosfääri (joonis 1.166). Aerosoolidest vesi aurustub ja mikroskoopilised soolakristallid kujunevad troposfääri ülakihtides vihmapiiskade kondensatsioonitsentriteks. Enamik merelise päritoluga sademeid ei levi rannikualadest kuigi kaugele. Mereliste aerosoolide ioonkoostis vastab täpselt merevee ioonkoostisele. Levinud keemilisteks elementideks on neis Na, Cl, Br, I, K, P ja N. Rannikualade aerosool on tavaliselt merelise ja mandrilise aerosooli segu, milles olenevalt tuule suunast prevaleerib üks või teine. Merelist aerosooli võivad imiteerida ka pärast merevee külmumist jää pinnalt eralduvad




**1.166.** Merelised aerosoolid tekivad vee pihustumisel õhku. See võib toimuda nii õhumulli lõhkemisel (A) kui ka veetilkade langemisel veepinnale (B).

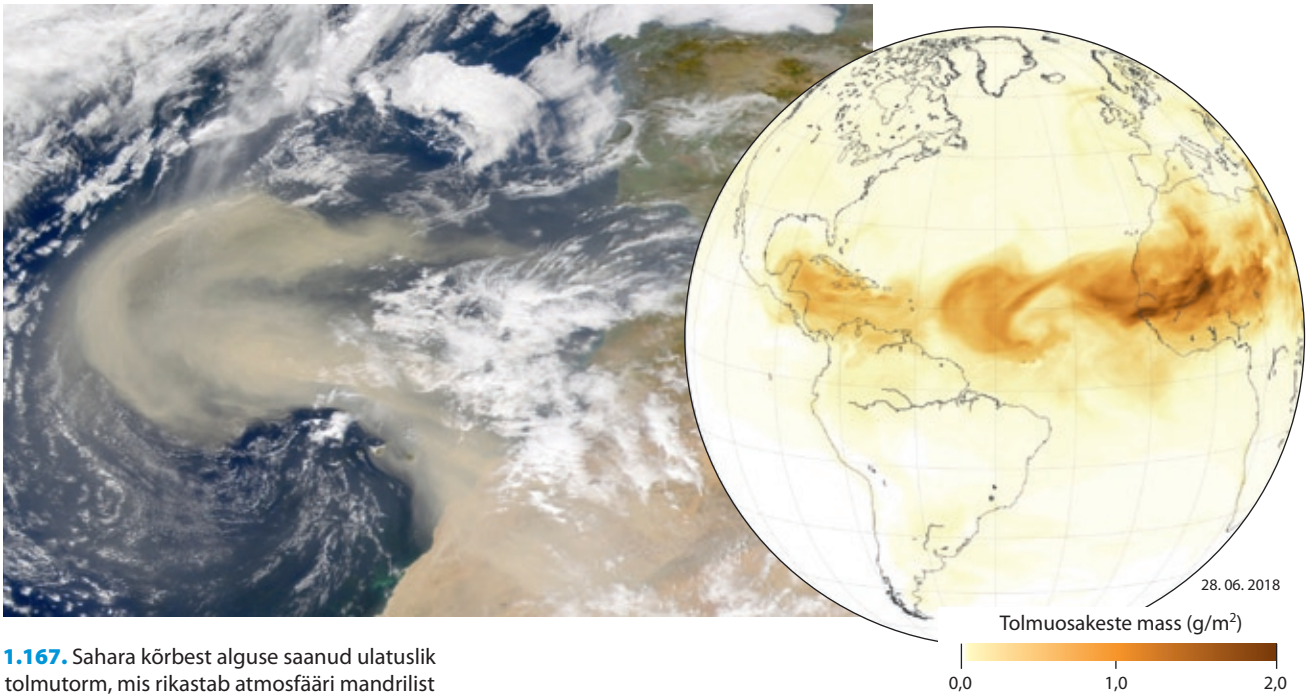
soolad ning soolakutest ja kuivanud soolajärvedest alguse saavad soolatormid. Need võivad järsult suurendada ümbruskonna järvede mineralisatsiooni.

**Mandriline aerosool** koosneb valdavalt pinnasetolmust ning on rikas $Al_2O_3$, $K^+$, $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, $Fe^{2+}$ ja $SiO_2$ poolest. Põhjus on selles, et litosfääri pealmine kiht, maakoor, sisaldab metallidest enim alumiiniumi – põhiliselt soolade (mitmesugused aluminaadid) ja oksiidina ($Al_2O_3$) – ning Ca- ja Mg-soolasid (lubjakivi, marmor, fosfaadid jt). Enamasti on mandrilises aerosoolis $SO_4^{2-}$ rohkem kui $Cl^-$-iooni ja $Ca^{2+}$+$Mg^{2+}$ rohkem kui $Na^+$-iooni. Pinnasetolmu kantakse aastas atmosfääri 100–150 miljonit tonni. Enamik sellest pärineb kõrbetest (joonis 1.167), kuid kolmandik on inimtekkeline ning seotud põllumaade ebaefektiivse kasutamise ja kunstlike kõrbeökosüsteemide loomisega.

**Põhilised gaasilised õhusaastajad** on atmosfääri paisatud vääveldioksiid ($SO_2$) ja lämmastikdioksiid ($NO_2$). Atmosfääris võivad nad muutuda hapeteks, kui reaktsioonis ei osale mõnd neutraliseerivat ainet, ja sel moel suurendada depositsiooni happesust. $SO_2$ tekib kõrvalsaadusena fossiilsete kütuste põletamisel. Kui suitsugaase ei puhastata, oleneb õhku paiskuva saaste kogus peaaegu täielikult kütteaine väävlisisaldusest. $SO_2$ võib reageerida otse veega, moodustades nõrga väävlishappe:

$$SO_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_3\,,$$

kuid sademetevaesel alal on võimalik ka kiire kuivsadenemine. Tahkete osakeste või aerosoolide juuresolekul




**1.167.** Sahara kõrbest alguse saanud ulatuslik tolmutorm, mis rikastab atmosfääri mandrilist päritolu aerosooliosakestega.

võib $SO_2$ reageerida õhuhapnikuga, nii et tekib vääveltrioksiid, mis edasisel reaktsioonil veega moodustab tugeva happe, väävelhappe:

$$2SO_2 + O_2 \rightarrow 2SO_3$$
$$SO_3 + 2H_2O \rightarrow H_3O^+ + HSO_4^-$$

Väävliühendid võivad atmosfääri paiskuda ka inimese abita. Olulisimad neist on $H_2S$ (vesiniksulfiid; sinivetikad märgaladel, pinnases, ookeanides; vulkaanid), $CH_3SCH_3$ (dimetüülsulfiid (DMS); mere fütoplankton ja suurtaimed), $SO_2$ (DMS-i ja $H_2S$-i oksüdeerumine, vulkaanid, orgaanilise aine põlemine), COS (karbonüülsulfiid; biomassi lagunemine, fossiilsete kütuste põlemine, $CS_2$ oksüdeerumine) ja $CS_2$ (biomassi lagunemine ja põlemine; fossiilsed kütused).

Õhulämmastik ja hapnik võivad omavahel reageerida ja moodustada NO, kuid endotermilisuse tõttu toimub reaktsioon iseeneslikult vaid kõrgel temperatuuril autode sisepõlemismootorites ja elektrijaamades:

$$N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$$

Lämmastikoksiid vees eriti ei lahustu, kuid oksüdeerub õhus lämmastikdioksiidiks:

$$2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$$

$NO_2$ reageerib veega, moodustades lämmastikhappe ja lämmastikoksiidi:

$$3NO_2 + 3H_2O \rightarrow 2H_3O^+ + 2NO_3^- + NO$$

■ **VÄLJAUHTUMINE PINNASEST** Otsese inimmõju puududes on järved oma valgala peegliks: vähetoitelised järved levivad graniitaluspõhjal või liivastel aladel ja on enamasti väikese valglaga; düstroofsed järved kujunevad rabamaastikus, kus turvas isoleerib mineraalse pinnase; kõrgema troofsusega järvede valgla on enamasti suur ja hõlmab rikka mineraalse koostisega pinnaseid. Seega määrab siseveekogude kemismi peamiselt valgala pinnakate ja maakasutus.

Suuremat osa maismaa pinnast katab mullakiht. Muld on kivimite murenemise ning taimestiku ja mikroorganismide elutegevuse saadus, kuid ühtlasi keerukas kasvusubstraat taimedele. Ta koosneb mineraalsest ja orgaanilisest tahkest ainest, veest ning õhust. Ligikaudu 45% mulla ruumalast moodustab mineraalne ja 5% orgaaniline tahke aine, 25% vesi ning 25% õhk. Samas võib orgaanilise aine sisaldus mullas tugevalt varieeruda. Nii moodustab turbamuldade tahkest fraktsioonist orgaaniline aine kuni 95%, kuid leidub ka muldi, milles orgaanilise aine sisaldus ei ületa 1% piiri. Orgaanilise aine poolest väga vaesed on troopiliste vihmametsade mullad.

Mulla massis on ülekaalus mineraalosa, mis moodustab 80–98%. Selle koostise määrab mulla lähtekivim, milleks võib olla kvarts, alumosilikaadid (päevakivid ja vilgud) või karbonaadid (kaltsiit, dolomiit). Mineraalid jaotatakse keemilise koostise järgi kuude klassi, kuid laialdase levikuga on neist kaks: **oksiidid** (kvarts ja maakmineraalid) ning hapnikku sisaldavate hapete

soolad (karbonaadid, silikaadid, alumosilikaadid ja fosfaadid). Kuigi ka nitraadid sisaldavad hapnikku, ei leidu neid mineraalidena mullas, sest maakoore lämmastik on biogeenset päritolu ja selle ringet reguleerivad peamiselt mikroorganismid.

Et kompaktsed kivimid ja mineraalid suudaksid mõjutada loodusvete keemilist koostist, peavad nad enne purustusprotsesside toimel muutuma purdseks massiks. Kivimite lagunemist ja keemilist muundumist pinna- ja põhjavee, atmosfäärinähtuste ja elusorganismide mõjul nimetatakse **murenemiseks**. Olenevalt mõjuritest eristatakse füüsikalist murenemist ehk **rabenemist** ja keemilist murenemist ehk **porsumist**.

Rabenemine seisneb kivimi purunemises ja peenestumises, kuid sellega ei kaasne kivimi keemilise ega mineraalse koostise muutumist. **Termiline rabenemine** on iseloomulik kuiva kliimaga piirkondadele, kus valitsevad lühikest aega kestvad suure amplituudiga õhutemperatuuri kõikumised ning sademete hulk pole märkimisväärne. Et kivimi koostises olevate mineraalide joonpaisumistegur on erinev, viivad temperatuurikõikumised kivimite halva soojusjuhtivuse tõttu mikrolõhede tekkeni ja lõpuks kivimi purunemiseni (joonis 1.168). Parasvöötmetes ja neist pooluste poole jäävatel aladel ning kõrgmäestikes mõjutab rabenemist kivimite lõhedes jäätuv vesi. **Jäätumisrabenemise** purustav jõud on väga suur, sest jäätumisel suureneb vee maht 9% võrra ning sellest tulenev rõhk võib olla kuni 6000 kg/cm$^2$. Kivimite rabenemises osalevad ka elusorganismid bakteritest selgrootuteni, kuid enim aitab sellele kaasa taimede (eelkõige nende juurestiku) tungimine kivimite lõhedesse.

**1.168.** Lõhenenud kivi Islandil. Sellise rabenemise põhjuseks on madal temperatuur.

**Porsumise** käigus muutub kivimi mineraalide keemiline koostis ja kivim laguneb keemilisteks komponentideks, mis on keskkonnaga tasakaalus või sellele lähedases seisundis. Porsumine toimub rabenemisega üheaegselt, kuid selle osatähtsus kasvab sedamööda, kuidas lähtekivim peenestub. Porsumisprotsesside aluseks on tard-, moonde- ja paljude settekivimite koostismineraalide termodünaamiline labiilsus. Oma osa on ka sellel, et koostismineraalid on vihma-, pinna- ja mullavees alaküllastatud.

Porsumisprotsesside olulisimaks teguriks on reaktsioonide toimumise keskkond – vaba vesi, mis on tugev ja universaalne lahusti ning sisaldab tihti reaktiivsust suurendavaid komponente (näiteks $SO_2$, $CO_2$). Porsumisel võib eristada nelja protsessi: lahustumist, oksüdeerumist, hüdrolüüsi ja hüdratatsiooni.

**Lahustumise** puhul on tegemist lähtemineraalide lihtsa ionisatsiooniga vesilahuses. Selle peamiseks tingimuseks on mineraalide alaküllastatus nendega kontaktis olevas lahuses. Lahustumist soodustab soe ja niiske kliima. Kergesti lahustuvad halogeniidid, sulfaadid ja mõned karbonaadid. Lahustumisega kaasnevat kerglahustuvate ühendite väljakannet nimetatakse **leostumiseks**. Tavaliselt on loodusvetel lahustunud gaasidest ($CO_2$, $SO_2$) tingituna nõrk happeline reaktsioon ning võime ioniseerida ka raskesti lahustuvaid ühendeid, nagu oksiidid, silikaadid ja karbonaadid:

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \rightarrow Ca^{2+} + 2(HCO_3)^-$$

Valdav osa mineraale lahustub suuremal või vähemal määral neutraalses ja mõõdukalt happelises või aluselises keskkonnas (pH = 4–9). Lahustuvus sõltub suuresti keemiliste ühendite mineraalvormide kristalliseeritusest. Näiteks kristalse kvartsi ($SiO_2$) lahustuvus on u 20 korda väiksem kui kristalliseerumata räniainesel. Normaaltingimustes on peaaegu lahustumatud alumiiniumoksiidid ja $Fe^{3+}$-oksühüdraadid.

**Oksüdeerumine** toimub õhuhapniku või vees lahustunud hapniku osalusel redoksreaktsioonides, mida reguleerib keskkonna redokspotentsiaal. Peale hapniku võivad oksüdeerumises osaleda ka teised elektronide aktseptorid. Tüüpiliseks näiteks on raua (Fe) oksüdeerumine, kus Fe loovutab elektrone hapnikule ning seejuures kasvab Fe valents ($Fe \rightarrow Fe^{2+}$, $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$). Eelkõige oksüdeeruvad mineraalid, mis on sulfiidse koostisega ja sisaldavad muutuva valentsiga katioone (Fe, Mn, Cu). Üks sulfiidide oksüdatsiooni saadusi on $H_2SO_4$, mis omakorda toimib lähtekivimeid lagundavalt:

$$2FeS_2 + H_2O + 9O_2 \rightarrow Fe_2O_3 + 4SO_4^{2-} + 2H^+$$

**Hüdrolüüsi** käigus lagunevad mineraalid vesilahuste mõjul lihtsamateks ühenditeks ja annavad reageerides uusi keemilisi ühendeid. Vee autoionisatsioonil

tekkivad $H^+$-ioonid asendavad kristallistruktuuris sisalduvad katioonid, mille tagajärjel hakkab kristallistruktuur ja mineraal lagunema. Looduslikes tingimustes osalevad selles reaktsioonis ka mitmed vees lahustunud ioonid ($HCO_3^-$, $SO_4^{2-}$, $Cl^-$, $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, $K^+$), mis võivad samuti kristallistruktuuri komponente asendada. Hüdrolüütiliselt lagunevad näiteks soolad. Hüdrolüüs on põhiline protsess silikaatide porsumisel ning selle peamisteks saadusteks on sekundaarsed savimineraalid. Selle käigus rikastuvad näiteks siseveekogud räniühendite ja mineraalse süsinikuga:

$$2KAl_2Si_3O_8 + 2H_2CO_3 + H_2O \rightarrow$$
$$\rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2K^+ + 2HCO_3^- + 4SiO_2$$

$$2CaAl_2Si_2O_8 + 2H_2CO_3 + H_2O \rightarrow$$
$$\rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + Ca(HCO_3)_2$$

Globaalses plaanis on sellised reaktsioonid väga tähtsad, sest neelatav $CO_2$ võetakse atmosfäärist.

**Hüdratatsiooni** käigus seovad mineraalid vee molekule ning moodustuvad uued, kristallvett sisaldavad mineraalid (hüdrosilikaadid, oksühüdraadid). Eriti kergesti on hüdratiseeritavad mitmesugused soolad, näiteks anhüdriit:

$$CaSO_4 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O$$

Keemiliste murenemisprotsesside kõrval on suur tähtsus ka mitmesuguste organismide elutegevusel. Näiteks taimed soodustavad murenemist orgaaniliste hapetega, mida nad eritavad nii oma elutegevuse käigus kui ka hilisemal lagunemisel. Taimse materjali lagunemisel tekkivad humiinained (humiin- ja fulvohapped) on silikaatsete mineraalide põhilised lahustajad.

Mulla toime pinnavee keemilisele koostisele on peale mulla enda keemilise koostise seotud ka mulla mehaanilise koostisega. Ioonvahetusprotsesside kandjaks mullas on kõige väiksemad osakesed – mulla kolloidid suurusega 1–100 nm, mis jagunevad mineraalseteks (ibeosakesed), orgaanilisteks (humifikatsiooni saadused) ja orgaanilis-mineraalseteks. Mullakolloidid on tavaliselt negatiivselt laetud, mistõttu neile saavad kinnituda positiivselt laetud katioonid.

Mulla pinnale langenud sademed ja neis sisalduvad ained teevad mullas läbi mitmesuguseid muutusi, muutes ühtlasi mulda. Neid muutusi võib käsitada mulla neelamisvõime ja mullavee väljauhtumisvõime koostoime tulemusena.

**Mulla neelamisvõime** on mulla omadus pidada kinni tahkeid ja vedelaid aineid ning gaase, mis satuvad mullaga kokkupuutesse temas ringleva vee ja õhu kaudu. Lihtsaim neelamisviis on **mehaaniline neelamine**, kui muld käitub piltlikult öeldes filtrina. **Füüsikalise neelamise** käigus neelduvad tervete molekulidena pindaktiivsed ained, mis vähendavad pindpinevust. Mitmed mineraalsoolad (näiteks nitraadid) suurendavad pindpinevust. Mulla kolloidid ei pea kinni negatiivse laenguga $NO_3^-$-iooni ning kui nitraatväetisi lisatakse mulda rohkem, kui taim vajab, uhutakse ülejääk mullast välja. **Keemiline neelamine** põhineb vees mittelahustuvate ühendite moodustumisel. Kui muld sisaldab palju alumiiniumi, rauda või kaltsiumi, tekivad fosforväetistega väetamisel mittelahustuvad fosfaadid. Eraldi tuleb mainida **bioloogilist neelamist**, mis seisneb ainete sidumises bioloogilisse ringesse. Ning lõpuks **füüsikalis-keemiline** ehk **asendusneelamine** kujutab endast mullakolloididel olevate katioonide võrdväärset vahetust lahuse katioonide vastu. Ioonvahetus on seda intensiivsem, mida suurem on osalevate ioonide valents. Sama valentsi korral on aktiivsemad need ioonid, mille aatommass on suurem (näiteks Ca→Mg ja K→Na). Erandiks on $H^+$, mis asub aktiivsuselt kahe- ja kolmevalentsete katioonide vahel. Tegelikult ei esine vesinik mullas mitte $H^+$-ioonina, vaid hüdroksooniumioonina $H_3O^+$. Asendusneelamisel on äärmiselt tähtis roll taimede mineraaltoitumisel, sest taimede happelised juureeritised vahetavad mullakolloidide katioone vesinikioonide vastu.

**Mineraalainete väljauhtumine** mullast toimub põhiliselt neljal viisil. **Lahustuvus** on tähtsal kohal settekivimites, mis sisaldavad lahustuvaid sooli, peamiselt karbonaate. Lahustuvate soolade väljauhtumine mullast kannab nimetust **leostumine**. **Redoksprotsessid** mõjutavad raua (Fe), mangaani (Mn), räni (Si), lämmastiku (N), fosfori (P) ja süsiniku (C) ringet mullas. Enamikku neid protsesse vahendavad mikroorganismid. Redutseeritud raua väljauhtumist pinnasest nimetatakse **gleistumiseks.** Osa redutseeritud rauda reageerib mulla mineraalosaga, moodustades nn gleimineraale (sekundaarseid ferro-alumosilikaate).

**Vesinikioonide mõju ja ioonvahetus.** Peamine $H^+$ allikas mullas on süsihape, mis moodustub $CO_2$ lahustumisel sademe- ja mullavees. Metsamuldades on olulisel kohal huumushapped. Õhusaastatusest pärinevad tugevad happed lisavad sellele oma osa. Mulla mineraalosa lagunemist ja väljauhtumist happelise vee mõjul nimetatakse **leetumiseks.** Lagunemata jääb vaid kvarts. Ühe- ja kahevalentsete katioonide vahetus mullakolloidides sõltub nende ioonide suhtest mullavees. $Ca^{2+}$ ja $Mg^{2+}$ on peamised asendatavad katioonid neutraalses ja aluselises mullas. Kaaliumväetise üledoseerimisel muutuvad nad liikuvaks ja uhutakse välja. **Kompleksühendite moodustumise** mõju mineraalainete liikuvusele on suhteliselt vähe uuritud. Paljud orgaanilised molekulid võivad siduda ioone, kõrvaldades nad sel teel keemilistest reaktsioonidest. Teatud tingimustes muutuvad kompleksid taas lahustuvaks.

## 1.8.4. Enamusioonid siseveekogudes

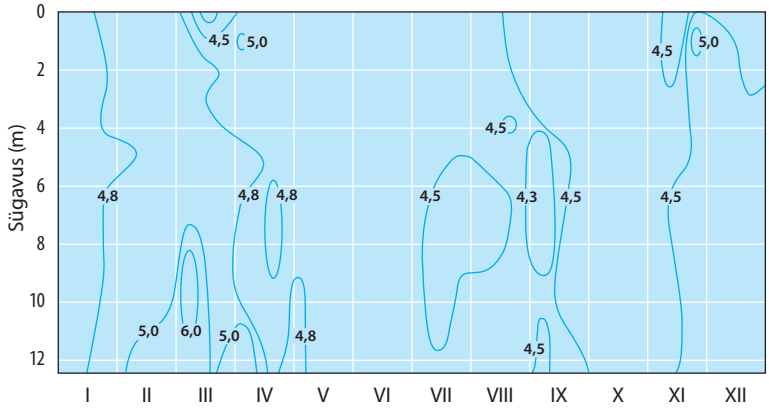
**NAATRIUM JA KAALIUM** Naatrium (Na) on sisalduselt maakoores kuuendal kohal ja vees leiduvate elementide seas teisel kohal. Kaalium (K) on siseveekogudes katioonidest neljandal kohal. Tardkivimeis – katioonide lähteallikas – on Na ja K sisaldus peaaegu ühesugune. Seevastu loodusvetes moodustab K hulk Na kogusest väikese mineraalainete sisalduse juures mõnikümmend protsenti, suurema soolsuse juures vaid paar protsenti. Põhjuseks on K tugevam neeldumisvõime kolloididel ja ulatuslikum tarbimine taimede poolt. Na- ja K-soolad lahustuvad hästi ning nende sesoonne muutlikkus tuleneb vaid reostuskoormusest ja füüsikalistest teguritest, nagu jää teke ja sulamine ning aurustumine (joonis 1.169). Siseveekogudest võivad Na ja K domineerida pehmeveelistes järvedes mereliste sademete mõjualal ning merega otseselt seotud järvedes ja soolajärvedes.

Kui põllumaadel võib K kättesaadavus taimede kasvu limiteerida, siis veekogudes ületab K sisaldus enamasti tunduvalt tema bioloogilist tarvet. Vaid väga tiheda veesisese taimestikuga kaldavööndis võib K sisaldus väheneda tema bioloogilise sidumise tagajärjel (joonis 1.170).

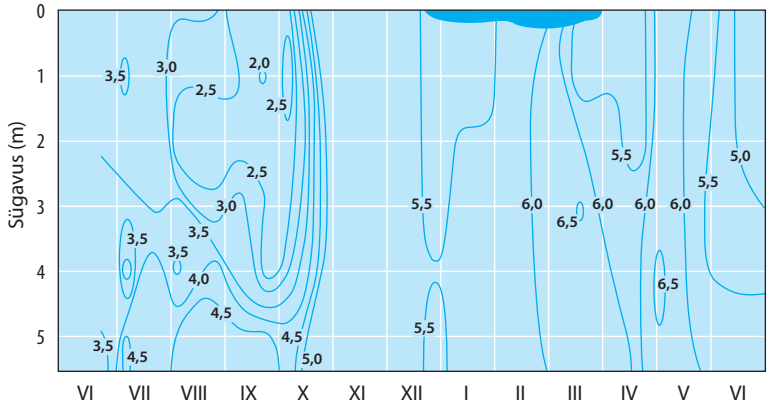
Monovalentsete katioonidena on naatriumil ja kaaliumil rakkudes peamiselt ioontranspordi ja ioonivahetuse roll, kuid otsene naatriumivajadus on tõestatud vaid vähestel taimedel. Nimetamisväärne on see mõnedel sinivetikatel, kes vajavad naatriumi fotosünteesiks, karbonaatide transpordiks, rakusisese pH reguleerimiseks, lämmastiku fikseerimiseks ja fosfaatide omastamiseks. Kaalium ega teised leelismetallid (Li, Rb, Cs) ei suuda naatriumi selles rollis asendada. Paljude sinivetikate naatriuminõudluse alampiir on 4 mg $Na^+$/l. Koos suurenenud fosforisisaldusega loob Na soodsad tingimused sinivetikaõitsenguks. Naatriumi leidub rohkesti olmereovees, mistõttu teda võib koos $Cl^-$-, $PO_4^{3-}$- ja $SO_4^{2-}$-ioonidega pidada „inimkaaslejaks“ iooniks.

**KALTSIUM** Kaltsium (Ca) osaleb aktiivselt paljudes bioloogilistes protsessides. Ca kui mikroelementi vajavad oma ainevahetuses kõrgemad taimed ja vetikad. Ca on vajalik element rakumembraanide struktuuris ja talitluses. Loomadest sõltuvad kaltsiumist näiteks kalad, vähid ja limused, kes vajavad seda oma skeleti ülesehitamiseks. Nii taimede kui ka loomade hulgas võib kohata liike, kelle jaotumine veekogudes on seotud kas suure või väikese kaltsiumikontsentratsiooniga. Enamasti on sellise seaduspärasuse põhjused kaudsed ja otsest sõltuvust Ca-sisaldusest on õnnestunud tõestada vaid üksikjuhtudel.

Siseveekogude elustiku kaltsiumivajadus on samas nii väike, et ei mõjuta Ca kontsentratsiooni isegi pehmeveelistes järvedes, kus selle elemendi sisaldus on tundu-



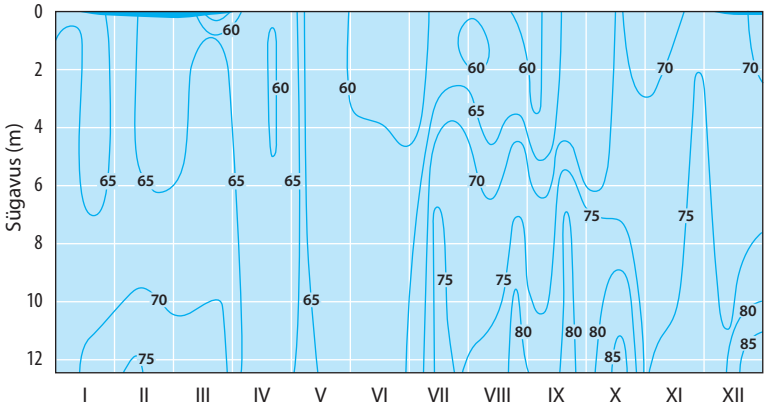

**1.169.** Naatriumisisalduse sesoonne dünaamika oligotroofses Lawrence'i järves.



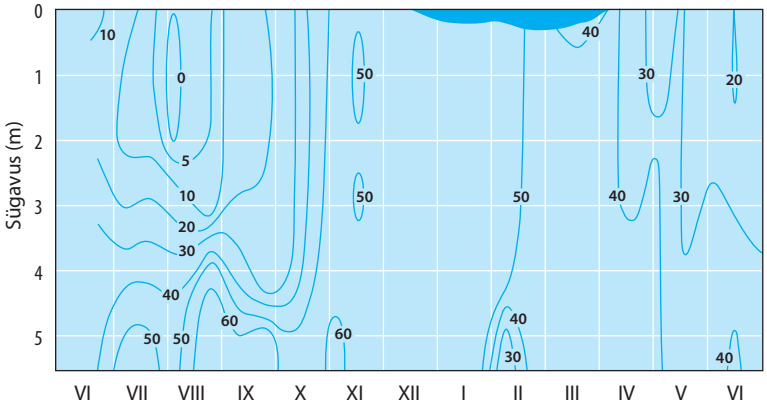

**1.170.** Kaaliumisisalduse sesoonset dünaamikat hüpertroofses Wintergreeni järves USAs mõjutab elustik.

valt allpool tema küllastustaset ja püsib sesoonselt vähemuutuvana (joonis 1.171). Seevastu kalgiveelistes järvedes ilmneb kaltsiumil tugev sesoonne muutlikkus, mis on seotud tema suvise väljasadenemisega (peenike valge sade) $CaCO_3$ kujul nn **järvelubjana** (joonis 1.172). Väljasadenemise põhjuseks on vetikate fotosünteesist tingitud pH tõus ja karbonaatse puhversüsteemi rakendumine. Ca väljasadenemise mõju ei piirdu üksnes pH stabiliseerimisega. Koos $CaCO_3$-ga sadeneb välja $Ca_3(PO_4)_2$ ja osa orgaanilisi aineid (peamiselt humiinained), mis adsorbeeruvad kaltsiidikristallidele. Vee erijuhtivuse sesoonne muutlikkus ühe veekogu piires peegeldab peamiselt $Ca^{2+}$ ja $HCO_3^{2-}$ sisalduse muutusi, sest ülejäänud ioonid on bioloogiliselt vähem mõjutatavad.

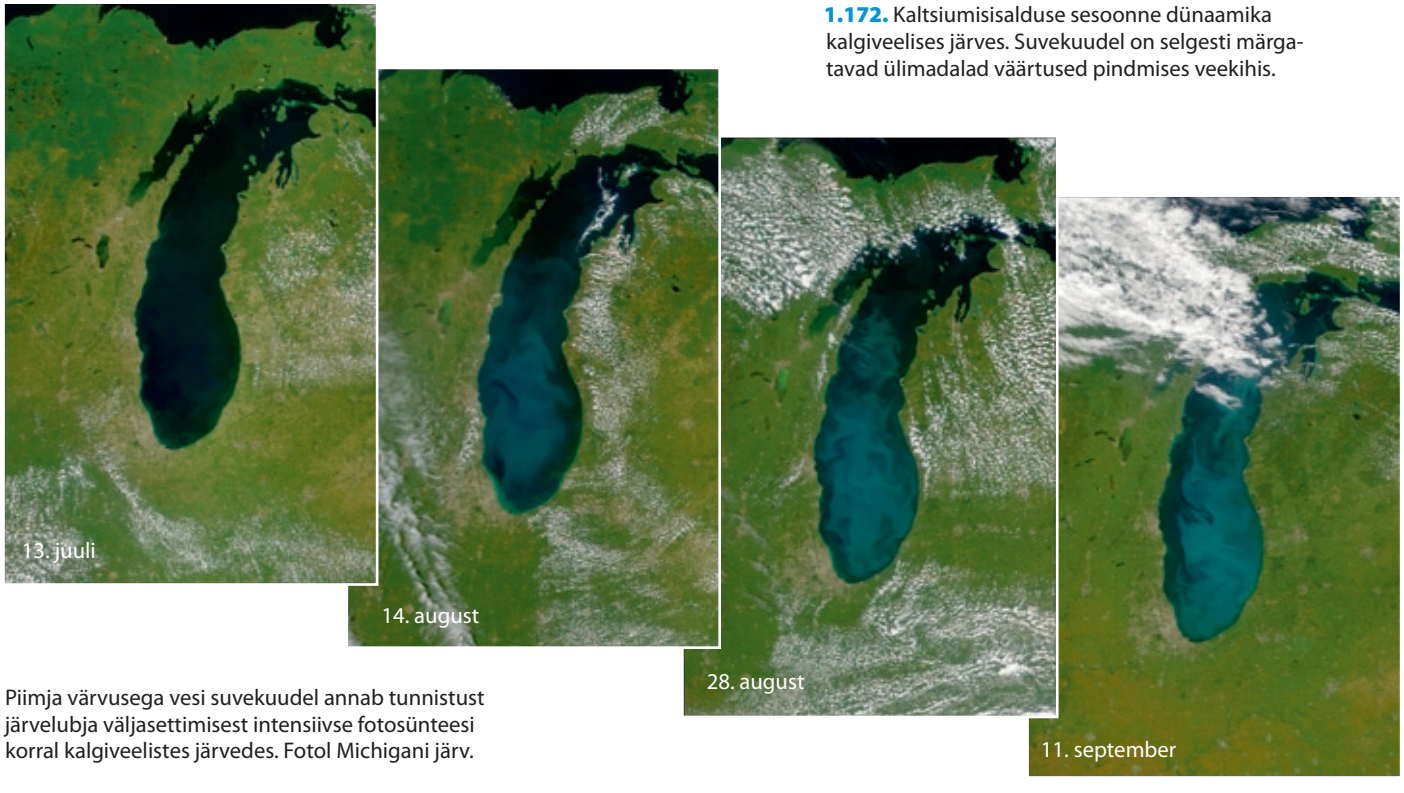
Inimmõju Ca dünaamikale võib avalduda otseselt – põldude lupjamise kaudu järve valgalal – ja kaudselt – sademete happesuse tõusu kaudu, mille tagajärjel suureneb Ca väljauhtumine pinnasest. Samasuguse toimega on ka K-väetiste liigtarvitamine, mis ioonivahetuse kaudu suurendab mullakolloididele kinnitunud $Ca^{2+}$ liikuvust. Järvede puhverdusvõime suurendamiseks lubjatakse neid seal, kus pinnas on karbonaatide poolest vaene, näiteks graniitsel aluspõhjal paiknevad Põhja-Euroopa järved.




**1.171.** Kaltsiumisisalduse sesoonne dünaamika Lawrence'i järves.




**1.172.** Kaltsiumisisalduse sesoonne dünaamika kalgiveelises järves. Suvekuudel on selgesti märgatavad ülimadalad väärtused pindmises veekihis.




Piimja värvusega vesi suvekuudel annab tunnistust järvelubja väljasettimisest intensiivse fotosünteesi korral kalgiveelistes järvedes. Fotol Michigani järv.

**MAGNEESIUM** Magneesium (Mg) sarnaneb keemiliste omaduste poolest kaltsiumiga, kuid tema bioloogiline aktiivsus on väiksem. Magneesiumi vajavad kõik klorofülli sisaldavad taimed ja bakterid. Mg aatom on kesksel kohal klorofülli molekuli porfüriini tuumas. Klorofüll on tüüpiline **kelaat** – metalli tsükliline sisekompleksühend. Mg-sisaldus vees ületab enamasti tunduvalt tema bioloogilist tarvet, mistõttu elustik mõjutab tema sisaldust vähe. Ca-ühenditega võrreldes on Mg-ühendite lahustuvus suurem ja nad sadenevad harva massiliselt. Sadenenud karbonaatidest moodustab $CaCO_3$ üle 95%. $MgCO_3$ ja $Mg(OH)_2$ väljasadenemine suureneb alles väga kõrge pH juures (> 10). Pinnases leidub Mg tavaliselt **dolomiidina** ($CaMg(CO_3)_2$). Magneesiumisisaldus võib olla väga suur soolajärvedes. Eespool loetletud omaduste tõttu on Mg kontsentratsioon veekogus väga püsiv (joonis 1.173), koguni nii püsiv, et selle erinevuse järgi järve sisse- ja väljavoolus on arvutatud põhjaveelise toite osatähtsust järve veebilansis. Magneesiumisisalduse sesoonne muutlikkus on tingitud peamiselt füüsikalistest teguritest – vee aurumisest ja külmumisest-sulamisest. Inimtegevus mõjutab Mg dünaamikat samade kaudsete mehhanismide teel nagu Ca dünaamikat.

$Ca^{2+}$ ja $Mg^{2+}$ sisaldus määrab vee olulise tehnilise omaduse – **üldkareduse**. Meres ja soolajärvedes lisanduvad neile veel baarium (Ba) ja strontsium (Sr). Karedas vees seep ei vahuta ning moodustab rasklahustuvaid sooli. Köögiviljad keevad näiteks karedas vees kauem ning torudesse ja kateldesse ladestuvad vees leiduvad karbonaadid ja vesinikkarbonaadid katlakivina.

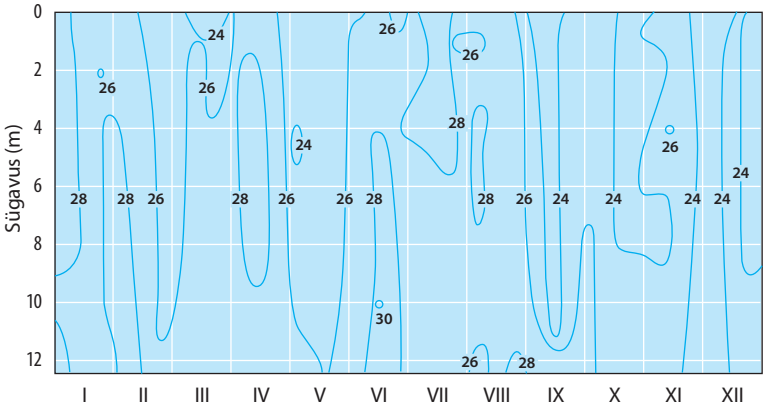
Karedust on kahte liiki. **Mööduva** ehk **karbonaatse kareduse** põhjustavad Ca ja Mg süsihappesoolad, mis sadenevad vee keetmisel välja. **Püsiva** ehk **mittekarbonaatse kareduse** põhjustavad Ca ja Mg kloriidid ja sulfaadid ning vähesel määral ka nitraadid ja fosfaadid, mis keetmisel ei sadene.

Vee karedust võib väljendada kahel viisil: esiteks **milligramm-ekvivalentides** või **millimoolides** ühe liitri vee kohta ja teiseks **kareduskraadides** (**dH**; 1° = 17,5 mg $CaCO_3$/l vees).

Üldkareduse järgi jaotatakse vesi pehmeks veeks (üldkaredus kuni 3,5 mg-ekv/l), keskmise karedusega veeks (3,5–7 mg-ekv/l) ja karedaks veeks (7–10 mg-ekv/l).

**KLORIIDID** Kloriidioonid on väga liikuvad. Nad ei moodusta raskesti lahustuvaid mineraale, ei adsorbeeru kolloidsüsteemidele (erandiks niiske troopilise ala punamullad) ega akumuleeru bioloogilisel teel. Kloriidioonide naatriumi-, magneesiumi- ja kaltsiumisoolade lahustuvus on väga suur. Kloriidioonide peamisteks allikateks on kivimites ja mullas leiduvad mineraalid haliit (kivisool, NaCl) ja sülviin (KCl), samuti atmosfäärsed sademed, vulkaaniline materjal ning tööstus- ja olmereovesi. Kloriidid mõjutavad organismide osmoregulatsiooni, kuid ainevahetuslik tarve nende järele on tühine ega muuda kloriidide füüsikaliselt määratud sesoonset dünaamikat. Suurema mineralisatsiooniga vetes (soolajärved, mered) on kloriidioonid massi poolest esimesel või teisel kohal. Nõrgalt ja mõõdukalt mineraliseerunud vetes (siseveekogud) on kloriidioonid tavaliselt kolmandal kohal. Parasvöötme siseveekogudes kloriidid enamasti ei domineeri, v.a mõnes merelise tekkega järves. Kloriidsed veed on levinud suurel alal Kaukaasias ja Kesk-Aasias. Kloriide leidub rohkesti olmereovees ja intensiivse põllumajandusega piirkondade valgvees ning enamasti viitab kloriidide leidumine inimtekkelisele reostusele. Viimase 30 aastaga on kloriidide sisaldus paljudes parasvöötme järvedes kasvanud 3–5 korda.

**SULFAADID** Sulfaadid on kõige oksüdeeritumad väävliühendid, mis võivad omakorda kombineeruda metallide ja mittemetallidega. Ka sulfaatioonidel on suur migratsioonivõime, kuid looduslikes vetes piiravad $SO_4^{2-}$ sisaldust vees $Ca^{2+}$-ioonid, mis moodustavad $SO_4^{2-}$-ga vähelahustuva $CaSO_4$. Kui $Ca^{2+}$ sisaldus pole suur, võib $SO_4^{2-}$ kontsentratsioon ulatuda kümnete grammideni liitri vee kohta. Hapniku puududes (anaeroobses keskkonnas) pole sulfaatioonid püsivad ja redutseeruvad vesiniksulfiidiks. Selles protsessis mängivad põhilist rolli sulfaate redutseerivad bakterid (orgaanilise aine juuresolekul). Desulfatsiooni ehk sulfaatse hingamise käigus rikastub vesi $H_2S$-i ja $CO_2$-ga; $SO_4^{2-}$ sisaldus vees väheneb. Taimed omastavad väävlit sulfaatses




**1.173.** Magneesiumisisalduse sesoonne dünaamika järves pole kuigi muutlik.

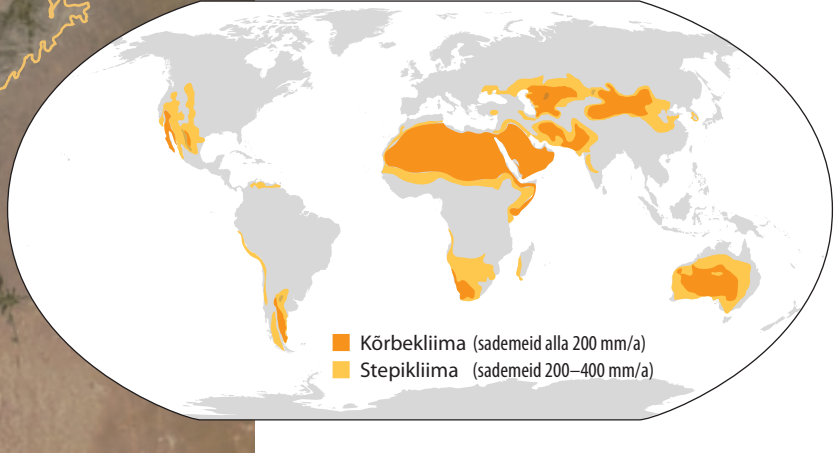
vormis. Sulfaatioonid on ülekaalus mõõdukalt mineraliseerunud jõgedes ja järvedes, olles karbonaatide järel teisel kohal, kuid väga soolastes veekogudes võivad kloriidid sulfaatide hulka ületada. Põhilisteks allikateks, kust sulfaate vette tuleb, on settekivimid, mille koostisse kuuluvad kips ja anhüdriit, samuti sulfiidide oksüdeerumisprotsessid. Suurel hulgal võib sulfaate pinnavette sattuda ka tööstusest (söe põletamine, vase sulatamine, paberitööstus) ja olmeheitveega.

## 1.8.5. Soolajärved

Soolajärved ehk mineraaljärved on suure soolasisaldusega järved. Arvamuse, et järved on enamasti mageveelised, on kujundanud järvede suur paiknemistihedus ja arv parasvöötmes, kus järvevesi sisaldab niiske kliima tõttu võrdlemisi vähe mineraalaineid. Veemahtu arvestades on aga pool maailma järveveest mage ja pool soolane. Põhjuseks on asjaolu, et mitmed maailma suurimate järvede hulka kuuluvad veekogud (esmajoones Kaspia meri) on soolased. Araali mere (joonis 1.174) ning mitme teisegi soolajärve pindala ja veemahu pidev vähenemine võib seda vahekorda siiski muuta. Soolajärved on pälvinud vähe avalikkuse tähelepanu ja paljusid neist ei peeta majanduslikult kuigi tähtsateks veekogudeks. Teisalt on soolajärved laialt levinud kuiva kliimaga piirkondades, kus nende ökoloogiline ja ühiskondlik roll on väga suur.

**SOOLAJÄRVEDE PAIKNEMINE** Enamik soolajärvi on tektoonilise tekkega ja paikneb kõrgusvahemikus 400–1500 m üle merepinna. Mõned soolajärved on vulkaanilise tekkeviisiga ja mõned kujunenud glatsiaalsel teel. Tõelised soolajärved paiknevad peamiselt kuivas kliimavöötmes, kus aastane sajuhulk jääb alla 400 mm (joonis 1.175). See hõlmab laiuskraade 53° N kuni 30° N põhjapoolkeral ja 3° N kuni 42° S lõunapoolkeral, kus aurumine ületab sademete hulga. Selliste järvede valgala on hüdroloogiliselt suletud ning sinna langevad sademed kuivavad enne maailmamerre jõudmist, infiltreeruvad pinnasesse või voolavad äravooluta soolajärve. Mõned soolajärved, mis paiknevad mere läheduses, sarnanevad ioonkoostiselt ja elustikult pigem merega kui sisemaa soolajärvedega. Niisuguste järvede hulka võib liigitada ka osa Eesti rannajärvi. Vesi jõuab soolajärvedesse sademete, põhjavee ja jõgede kaudu. Umbes kümnendikku maismaast katavad just säärased hüdroloogiliselt suletud ning soolajärvede kujunemiseks sobivad valgalad.

**1.174.** Araali mere jäänused nähtuna kosmosest 2018. a.




**1.175.** Kuiva kliimavöötme paiknemine maakeral (Köppeni klassifikatsiooni järgi). Vöötme sees eristatakse omakorda kahte kliimatüüpi: kõrbekliimat ja stepikliimat.

**Lõuna-Ameerika soolajärved**. Lõuna-Ameerika soolajärved on koondunud peamiselt kahte suurde piirkonda. Esimene neist on Altiplano platoo Boliivias ja selle põhjapoolne jätkuosa Peruus. Seal leidub palju madalaid, kuid püsivaid soolajärvi ning ka ajutisi väga soolase veega järvikuid. Selle regiooni soolajärved paiknevad ühtlasi merepinnast kõige kõrgemal (4000–4500 m). Sealsetest järvedest tuntuim on enamiku aastast soolaväljana eksisteeriv Salar de Uyuni, mille pindala võib ulatuda 10 582 km²-ni (joonis 1.176) ja kus paiknevad maailma suurimad liitiumivarud (kuni 70%).

Teise piirkonna moodustavad Argentina rohtlates (pampades) ja Patagoonia põhjaosas paiknevad soolajärved. Sealne suurim soolane veekogu on Mar Chiquita järv, mille pindala kõigub ilmastikust olenevalt 2000 ja 4500 km² vahel (joonis 1.177). Ka selle veekogu soolsus varieerub, olles kuivadel aastatel 250 g/l ja väga niisketel vaid 40 g/l. Samas piirkonnas paikneb maailma suurim soolajärvede kompleks Salinas Grandes pindalaga 8290 km².

Veel leidub soolajärvi Brasiilia kaguosas paikneval troopilisel märgalal Pantanal. Tekkelt on sealsed veekogud soodid ja soolajärvede olemasolust hoolimata on tegu ikkagi mageveelise märgalaga (joonis 1.178). Vähemal määral leidub soolajärvi ka Brasiilia ja Tšiili ida- ning lõunarannikul.

**Põhja-Ameerika soolajärved**. Põhja-Ameerikas on soolajärved levinud ühtlase vööna piki kontinendi lääneserva, kus võib eristada kuut piirkonda: Suur tasandik (Great Plains), looderegioon, keskregioon, Suur nõgu (Great Basin), kaguregioon ja Chihuahua piirkond Põhja-Mehhikos (joonis 1.179).

Kõige paremini on tuntud Suur tasandik ehk nn Prairie Pothole'i regioon. Mitte kusagil mujal maailmas pole soolajärvede paiknemistihedus ja mitmekesisus nii suur. Arvatav soolajärvede hulk selles piirkonnas kõigub miljonist kümne miljonini ning paiknemistihedus võib olla isegi kuni 120 järve ruutkilomeetri kohta. Hüdrokeemiline mitmekesisus on suur ja esindatud on kõikvõimalikud soolade akumuleerumistüübid; eri tüüpi järvesetteid on leitud üle 40. Varieeruv on ka järvede morfomeetria. Leidub suuri ja väga madalaid järvi, mis on ajutise iseloomuga (nt Muskiki järv) ning jätavad põuaperioodil endast maha soolaväljad. Kuid leidub ka püsivaid veekogusid, kus sügavus võib olla üle 60 meetri (nt Deadmoose).

Suures nõos, mis hõlmab Nevada, Utah' lääneosa, Oregoni kaguosa ja suure ala Kagu-Californiast, asuvad ilmselt kõige tuntumad Põhja-Ameerika soolajärved, nagu Mono, Pyramid, Walker, Suur Soolajärv ja Salton Sea (joonis 1.180).

**1.176.** Salar de Uyuni soolajärv Boliivias püsib enamiku aastast soolaväljana.

**1.178.** Üks Pantanali soolajärvi, mille kuju reedab, et tegu on tõenäoliselt soodijärvega.

**1.177.** Argentina suurima loodusliku soolajärve Mar Chiquita veetase ja ühes sellega pindala kõigub suurtes piirides.

**1.179.** Põhja-Ameerika soolajärvede regionaalne jaotus.

**1.180.** Loodusliku väljavooluta Salton Sea soolajärv USAs Californias on aasta aastalt aina soolasemaks muutunud.

**Aafrika soolajärved**. Aafrika soolajärved paiknevad neljas suuremas regioonis, mis võtavad enda alla mandri põhjaosa (Sahara kõrb ja Vahemerega piirnev kuiva stepikliimaga ala), Ida-Aafrika, Ida-Aafrika riftivööndi ja Lõuna-Aafrika.

Ilmselt kõige tuntumad soolased veekogud on Ida-Aafrika soodajärved. Need peamiselt naatriumkarbonaati sisaldavad järved paiknevad kitsal alal, mis algab Punasest merest ning kulgeb läbi Etioopia ja Keenia Tansaania keskosani. Nende hulgas on niihästi väikesi ja sügavaid kui ka madalaid, pigem soolaväljasid meenutavaid veekogusid. Soolsus jääb üldjuhul vahemikku 3000–300 000 mg/l. Osa neist järvedest (nt Nakuru ja Magadi) on roosade flamingode kogunemis- ja toitumispaigad (joonis 1.181).

Vähem teatakse soolase veega rannajärvi, mis on levinud Lõuna-Aafrikas (nt Swartvlei järv; joonis 1.182). Need järved kujunevad piki kallast liikuvate hoovuste abil, kui uhtliivad isoleerivad laguune või estuaare. Viimased võivad uuesti avaneda, kui veetase järves muutub kõrgeks ja ülevoolu käigus lõhutakse liivabarjäär. Vahel teevad kohalikud inimesed seda ka sihilikult, kui kõrge veetase hakkab ohustama järve kaldal paiknevaid elamuid või häirima majandustegevust. Mingil osal aastast on järvede pindmine veekiht mage, sest sissevoolavate jõgede vesi valgub laiali mööda suurema tihedusega soolast vett. Selline mageda vee akumuleerumine kestab seni, kuni toimub läbimurre liivabarjäärist. Järve põhjas olev veekiht jääb aga soolaseks kogu aasta vältel, välja arvatud erakordsete hüdroloogiliste või klimaatiliste tingimuste korral. Sääraseid rannajärvi võib peale Aafrika kohata ka Jaapanis, Austraalias ja Koreas.

**1.181.** Flamingod ja hüään Nakuru soolajärve kaldal Keenias. Flamingosid meelitab siia järve vetikarohkus.

**1.182.** Swartvlei järv Aafrika lõunatipus on kuus kuud aastas merega ühenduses, enne kui kuhjuv liiv ta järgmiseks pooleks aastaks merest ära lõikab.

**1.183.** Tengizi järv Kasahstanis veevaesel aastal. Järv on koduks vähemalt 318 linnuliigile, kellest 22 on ohustatud.

**1.184.** Nam Co järv Tiibeti platool paikneb 4718 m kõrgusel.

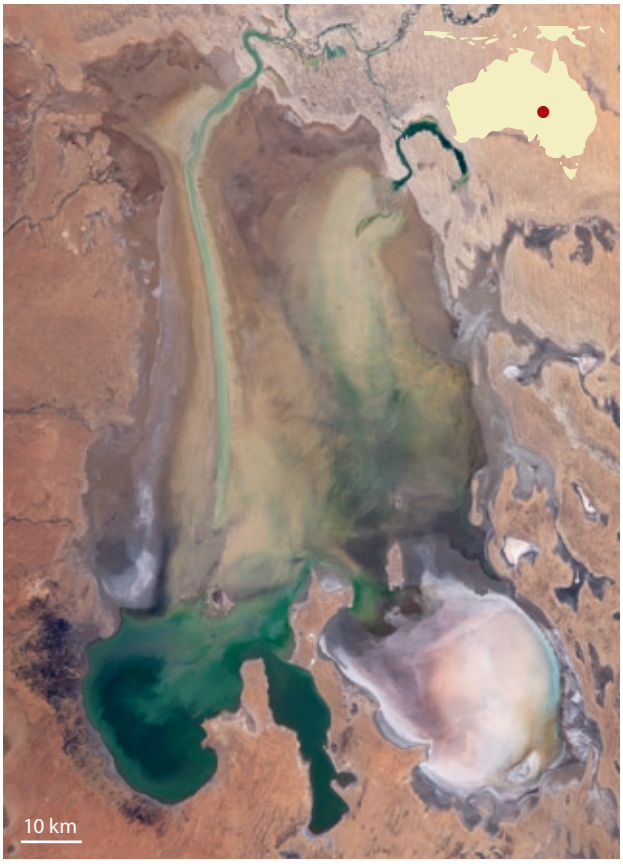
**1.185.** Haliidi- ehk kivisoolalasund Surnumere läänekaldal.

**Aasia soolajärved**. Lõuna-Venemaal ja Kesk-Aasias on suured piirkonnad hüdroloogiliselt suletud ehk endoreilised. Sealsed soolajärvede paiknemisalad on tihedalt seotud Musta ja Kaspia mere madalikuga. Kaspia madalikul (nimetatud ka tasandikuks) paikneb kaks maailma suurimat soolajärve: Kaspia meri ja nüüdseks tugevalt vähenenud pindalaga Araali meri. Neist kirdes, Baraba-Kulunda stepis paikneb Tengizi järv (joonis 1.183), mis on heleflamingode (*Phoenicopterus roseus*) peamine elupaik. Tengizi järvest kagusse jääb Balkaši soolajärvede ala, kus tähtsaim järv ongi Balkaš (pindala 16 996 km²). Järve läänepoolne osa on mage, idapoolne aga soolane. Lõunas, Tianshani mäestikus paikneb suur soolajärv Õsõk-Köl (6236 km²). See on maailma vanim järv (u 25 mln a) ja veemahu poolest 11. kohal.

Hiinas võtavad soolajärved enda alla 55% kõigi järvede pindalast. Sinna kuulub ka Hiina suurim järv Kukunor (Qinghai Hu), mis ühtlasi on suuruselt maailma seitsmes soolajärv (4186 km²). Hiinas võib eristada viit suuremat soolajärvede piirkonda: Sise-Mongoolia, Qaidami nõgu, Qinghai Hu, Tiibeti platoo (millel on merepinnast kõige kõrgemal paiknev soolajärv Nam Co; joonis 1.184) ja Tarimi nõgu. Suuruselt maailma kuues soolajärv Urmia paikneb Iraani platool ja on samuti väga oluline elupaik flamingodele. Lähis-Ida suurim ja tuntuim soolajärv on Surnumeri (joonis 1.185), mis asub rohkem kui 420 m allpool maailmamere taset, olles ühtlasi maakera madalaim punkt. Surnumeri on üks maailma soolasemaid veekogusid, mida toidab Jordani jõgi põhjast ning mõned väikesed allikad idast ja läänest. Paraku on Jordani jõe vesi nüüdseks järvest mööda juhitud ja Surnumerd ähvardab aeglane kadumine. Järve pindala ongi juba vähenenud kolmandiku võrra.

**Soolajärved teistel kontinentidel**. Austraalia soolased veekogud on koondunud kolme regiooni: mandri keskosa ning kagu- ja edelapiirkond. Soolajärvedes domineerib harilikult NaCl ja bioloogiline mitmekesisus on väga suur. Kesk-Austraalia suurim järv on Eyre (joonis 1.186) ning kaguregioonis Corangamite ja Bullen Merri.

Euroopat iseloomustab võrdlemisi niiske kliima ja seetõttu pole siin kuigi soodsad tingimused soolajärvede kujunemiseks. Sobivaid hüdroloogiliselt suletud valgalasid leidub vaid Hispaanias ja Kagu-Euroopas. Kõige sagedasemad ongi soolajärved just Hispaanias, kus aurumine ületab sademete hulga ja suurim püsiv




**1.186.** Eyre'i järv Austraalias.

**1.187.** Gallocanta järv on üks Hispaania linnurikkamaid veekogusid.

**1.188.** Don Juani järv Antarktikas on maailma soolaseim veekogu. Järve pindala on alla 3 hektari ja keskmine sügavus vaid 40 cm.

järv on Gallocanta (joonis 1.187). Mingil määral leidub soolajärvi ka Austrias, Ungaris, Rumeenias, Kreekas ja Küprosel. Enamasti toituvad need järved maa-alustest soolaallikatest.

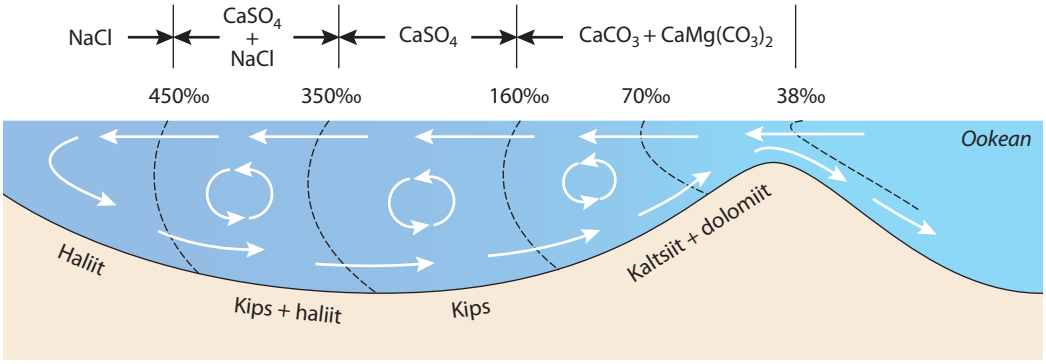
Paradoksaalsel kombel leidub soolajärvi isegi Antarktikas. Tuntuimad piirkonnad on Antarktika poolsaare lääneosa, Vestfoldi, Bungeri ja Larsemanni mäeahelikud ning McMurdo kuivad orud. Viimastes on väga väike õhuniiskus ning jää ja lumi peaaegu puuduvad. McMurdo orus paiknevad ka planeedi kõige soolasema veega järved (joonis 1.188), milles mineraalainete hulk on isegi suurem kui Surnumeres.

## ■ SOOLAJÄRVEDE SOOLSUS JA VEE IOONKOOSTIS

Järvi, mille TDS on üle 3000 mg/l (ehk üle 3‰ või 5500 µS/cm), peetakse soolajärvedeks. Sellest sisaldusest alates hakkab inimene tundma soolast maitset. Mageveeliigid hakkavad sellise soolsuse juures kaduma, kuid väiksema väärtuse juures ei leidu jälle soolase vee liike. Magevete TDS on alla 500 mg/l ja vahepealsetel (subsaliinsetel) järvedel jääb see vahemikku 500–3000 mg/l. Aafrikas ja Austraalias võib mõne järve vee elektrijuhtivus olla kuni 270 µS/cm, mõnes Antarktika soolajärves isegi 790 µS/cm. Nii suur soolsus pole seotud mitte ainult vee aurumisega, vaid ka soolade väljakülmumisega jääst. Põhja-Ameerika parasvöötmes, kus järvi leidub väga arvukalt, on vee elektrijuhtivus keskmiselt vahemikus 20–600 µS/cm. Kuid näiteks Kanada kuivas stepikliimas paiknevates soolajärvedes on registreeritud elektrijuhtivuse väärtus isegi 72 µS/cm.

Kuigi soolsust mõjutavad ioonid võivad pärineda merelistest sademetest (näiteks rannajärvede puhul), on enamik tõeliste soolajärvede mineraalaineid siiski pärit valgala kivimitest ja pinnasest. Seetõttu on valgala geokeemiline iseloom üks tegureid, mis määrab, kas järvest saab soolajärv või mitte. Näiteks eelkambriumiaegsed moondekivimid, mis on iseloomulikud Skandinaaviale, Põhja-Ameerikale ja Venemaale, lahustuvad väga halvasti. Seetõttu on niisugustel valgaladel asuvad veekogud väikese soolsusega ja saavad enamiku mineraalaineid sademete kaudu. Pinnakate, mis moodustus pärast viimast jääaega, sisaldab palju lahustuvaid komponente ja sellise valgalaga järved on ka suurema soolsusega. Peale atmosfääri ja pinnavee kaudu levivate soolade võivad järved rikastuda ka põhjaallikate kaudu saabuvate mineraalainetega.

Soolajärvedes on vee ioonkoostis hoopis teistsugune kui sissevooludes või valgala pinnakattes. Selle põhjuseks on soolade erinev lahustumisvõime. Kuivas kliimas suureneb vee aurumine, kasvab soolade sisaldus ja need hakkavad järk-järgult välja sadestuma (joonis 1.189). Esimesena sadestub tavaliselt $CaCO_3$, rikastades allesjäävat lahust $Na^+$-, $Mg^{2+}$-, $Cl^-$- ja $SO_4^{2-}$-ioonidega. Järgmisena sadestub $MgCO_3$. Kui vees on palju kaltsiumi, toimub see dolomiidi kujul ($CaMg(CO_3)_2$), kui aga Ca-sisaldus on endiselt suur, sadestub see enne kipsina ($CaSO_4$). Pärast neid järjestikuseid settimisi jääb vesi küllastatuks $Na^+$- ja $Cl^-$-ioonidest, mis on ühtlasi põhjus, miks just neid ioone leidub soolajärvedes kõige sagedamini.




**1.189.** Mineraalainete väljasadenemise järjekord soolajärves.

## KÜSIMUSED JA PROBLEEMÜLESANDED

1. Rannikul asuvate vähetoiteliste järvede seireandmed näitavad aeg-ajalt, et nende vee ioonkoostis sarnaneb merevee omaga. Milliste protsesside tagajärjel võib selline ioonkoostis kujuneda?
2. Washingtoni osariigis asuv Soapi järv (Soap Lake e Seebijärv) on tuntud selle poolest, et tema vesi tundub katsudes libe ja litoraal on kaetud vahuga. Milline võiks olla selle järve ioonkoostis? Kui suur on karedus?
3. Kas mikroelemendid võivad kuuluda enamusioonide hulka? Kui jah, siis millistel tingimustel?
4. Kaalium on oluline toiteaine põllukultuuride kasvatamisel. Kas see element võib olla limiteeriv toiteaine ka veekogudes? Lisage seletus.
5. Miks kasutatakse mageveejärvede puhul soolsuse väljendamiseks ühikut mg/l, soolajärvede puhul aga g/kg?
6. Kihistunud ja kalgiveelistes järvedes on kaltsiumi hulk epilimnionis sageli väike, kuid kasvab hüpolimnionis. Kuidas võib selline olukord tekkida?
7. Selgitage, miks asenduvad soolsuse suurenedes $Ca^{2+}$-ioonid $Na^+$-ioonidega.
8. Aastaid juhiti ühte järve metallimaake töötleva ettevõtte heitveed, mis sisaldasid sulfaate. Selle tagajärjel muutus vesi happeliseks (pH 2). Pärast tehase sulgemist hakkas pH aeglaselt tõusma ja jõudis mõne aastaga 7-ni. Seletage reaktsioonivõrrandite varal toimunut.

## MÕISTED JA MÄRKSÕNAD

mineralisatsioon ja soolsus
milligramm-ekvivalent
promill
praktiline soolsuse skaala
enamus- ja vähemusioonid
mikroelemendid
konservatiivsed ja dünaamilised ioonid
ioonide suhteline vahekord
ühe- ja kahevalentsete ioonide suhe
ioonkoostisel põhinev klassifikatsioon
vesinikkarbonaatsed veekogud
karbonaatsed veekogud
sulfaatsed veekogud
kloriidsed veekogud
elektrijuhtivus
erijuhtivus
üldine lahustunud ainete sisaldus
tuhavaba orgaaniline aine
mittelenduv tahke jääk
väljapesemine atmosfäärist
väljauhtumine pinnasest
atmosfäär
aerosoolid
oksiidid
rabenemine e kivimite füüsikaline murenemine
porsumine e kivimite keemiline murenemine
mulla neelamisvõime
mineraalainete väljauhtumine
leostumine, gleistumine, leetumine
naatrium, kaalium, kaltsium, magneesium, kloriidid, sulfaadid
järvelubi
üldkaredus
mööduv e karbonaatne karedus
püsiv e mittekarbonaatne karedus
soolajärved

# 1.9. pH ja mineraalne süsinik

## 1.9.1. Vesinikueksponent ehk pH

pH on siseveekogudes oluline keskkonnategur, mis mõjutab paljude ainete lahustuvust ja omastamist elusorganismide poolt. Nende ainete hulka kuuluvad toiteained (lämmastik, fosfor ja süsinik) ning hulk raskmetalle (vask, kaadmium, plii jt). Näiteks määrab vee pH peale fosfori esinemisvormi ja hulga ka selle, kui suures ulatuses saavad organismid fosforit kasutada. Raskmetallide mürgisus sõltub otseselt lahustuvusest ja see on suurem just madala pH juures. Ühtlasi mõjutab keskkonna pH veeorganismide ensüümide tööd, membraantransporti ja membraane endid.

### pH KUI HAPPELIS-ALUSELISTE OMADUSTE MÕÕT

Puhas vesi on väga halb elektrijuht ja seega võiks oletada, et seal ei ole üldse ioone. Siiski võib tundlikku aparatuuri kasutades ka puhtast veest leida väikeses koguses vesinik- ja hüdroksiidioone. Nende ioonide esinemine on vee **autoionisatsiooni** tulemus ja seda kirjeldab alljärgnev võrrand:

$$2H_2O \leftrightarrow H_3O^+ + OH^-$$

Võrrandi vasakul poolel asuvad veemolekulid kujutavad endast tänu oma lihtsale ehitusele nõrka hapet ja alust ning paremal poolel on tegu juba tugeva happe ja alusega. Reaktsioon on pöörduv ja võib saavutada tasakaalu. Kuigi tasakaal on suunatud tugevalt vasakule, leidub puhtas vees vähesel määral oksoonium- ($H_3O^+$) (lihtsustatult vesinikioonid – $H^+$) ja hüdroksiidioone ($OH^-$).

Keemiliselt puhas vesi on äärmiselt nõrk elektrolüüt. Eksperimentaalselt on kindlaks tehtud, et kummagi iooni kontsentratsioon standardtemperatuuril 25 °C on $10^{-7}$ mol/l ja seega ioniseerub keskmiselt üks veemolekul 556 miljonist.

Vee ioonkorrutis

$$K_V = [H_3O^+] \cdot [OH^-]$$

on konstantne ning selle väärtus 25 °C juures on

$$K_V = [1{,}0 \cdot 10^{-7}] \cdot [1{,}0 \cdot 10^{-7}] = 1{,}0 \cdot 10^{-14},$$

mis kehtib kõigis vesilahustes. Kunagi ei saa teineteisest sõltumatult muuta $H_3O^+$- ja $OH^-$-ioonide kontsentratsiooni. Ühe suurenedes väheneb proportsionaalselt teine.

Praktikas on ioonide molaarkontsentratsiooni ebamugav kasutada ja seepärast väljendatakse kokkuleppeliselt $H_3O^+$-ioonide kontsentratsiooni logaritmilisel kujul. **pH** ehk **vesinikueksponent** on negatiivne kümnendlogaritm $H_3O^+$-ioonide aktiivsest kontsentratsioonist:

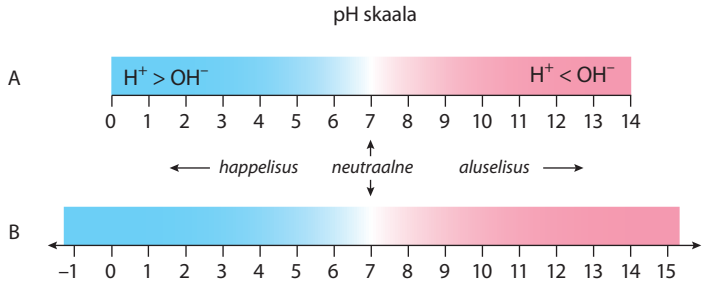
$$pH = -\log[H_3O^+]$$

Lahust, kus $H_3O^+$-ioonide sisaldus on võrdne $OH^-$-ioonide sisaldusega, nimetatakse neutraalseks lahuseks:

$$pH = -\log[1{,}0 \cdot 10^{-7}] = 7$$

Happelises lahuses ületab $H_3O^+$-ioonide sisaldus $OH^-$-ioonide oma (pH < 7) ja aluselises lahuses on $OH^-$-ioonide hulk suurem (pH > 7).

Tavaliselt kujutatakse pH väärtusi skaalal vahemikus 0–14, mille keskpunktis on 7 (joonis 1.190, A). See väärkäsitlus on levinud nii õpikutes kui ka käsiraamatutes. Tegelikult peaks pH skaala olema mõlemas suunas avatud, võimaldades väärtusi alla 0 ja üle 14 (joonis 1.190, B). Näiteks kontsentreeritud soolhappe (HCl) lahuse (37%) pH on ligikaudu –1,1 ja küllastunud NaOH lahusel umbes 15. Nullist madalamaid pH väärtusi esineb ka siseveekogudes.




**1.190.** Tüüpiline õpikutes ja käsiraamatutes esitatav pH skaala (A) ning korrektne, avatud pH skaala (B), mis sobib rakendamiseks pinnaveekogude puhul.

ÄÄREMÄRKUS 1.12

## pH MÕÕTMINE SISEVEEKOGUDES

Siseveekogude pH ja redokspotentsiaali määramisel tuleb arvestada, et sügavamate veekihtide temperatuur ja hapnikusisaldus on atmosfääriga võrreldes hoopis teistsugused. Veepinnale jõudnud veeproovis võivad näitajad soojenemise ja hapniku juurdepääsu tõttu kiiresti muutuda ning laboris saadud tulemused pole usaldusväärsed. Seepärast tuleb mõõtmised sooritada uuritaval sügavusel ning kasutada ei saa kolorimeetrilisi meetodeid, vaid näitajad tuleb määrata potentsiomeetriliselt pH-meetriga. pH-meeter on põhimõtteliselt millivoltmeeter, mis mõõdab tema külge ühendatud anduri elektroodisüsteemi elektromotoorjõudu ehk pinget elektroodide vahel. Elektroode on anduris kaks: pH-tundlik klaaselektrood (indikaatorelektrood) ja võrdluselektrood (vt foto paremal). Mõõtmisel tekib keemiline tasakaal veeproovist elektroodi klaaspinda tungivate vesinikioonide ja sealt väljuvate leelismetalliioonide vahel. Olenevalt vesinikioonide kontsentratsiooni muutumisest veeproovis toimub selle tasakaalu nihkumine ning koos sellega elektriliste omaduste muutus. Seadme kalibreerimise ajal salvestatakse pH-meetrisse kalibreerimisgraafik, mille järgi arvutab pH-meeter uuritava proovi mõõtmisel saadud pinge järgi pH. Et pH sõltub ka temperatuurist, on pH-meetritele lisatud temperatuuriandur. Esimene klaaselektroodiga tarbe-pH-meeter ilmus turule 1936. aastal ning sellest ajast alates muutus pH elektrokeemiline mõõtmine veekogudes rutiinseks tegevuseks.

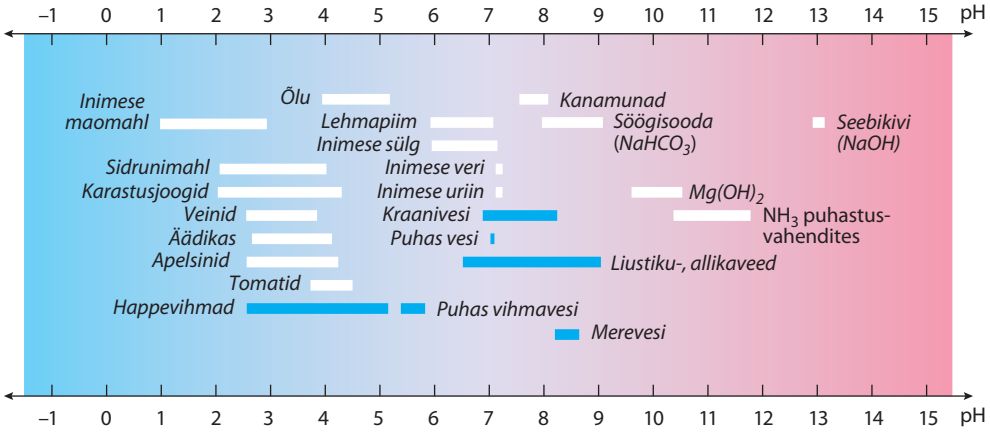
**YSI toodetav pH/ORP-andur. Parempoolne „klaasmuna“ on pH-tundlik indikaatorelektrood.**

pH skaala on logaritmiline. Lahuses pH väärtusega 6 on $H_3O^+$-ioone 10 korda vähem kui lahuses, mille pH on 7. Seetõttu ei piisa erineva pH-ga vedelike segamisel keskmise pH leidmiseks ainult pH väärtustest, vaid arvutustes tuleb kasutada $H_3O^+$-ioonide sisaldust. Loodusvete puhul on asi mõneti erandlik. Veeproovide segamisel ei anna arvutused nagunii õiget tulemust, sest puhversüsteemide mõju on segamisefektist suurem. Kui teisendame keskmise pH leidmiseks andmestiku $H_3O^+$ kujule, moonutavad äärmuslikud pH väärtused keskmist olulisel määral. pH väärtused sobituvad normaaljaotusse tunduvalt paremini kui teisendatud andmed ja seetõttu tuleks statistilisel andmetöötlusel kasutada just neid.

Vesinikueksponendi mõiste kõrval kasutatakse vahel ka **hüdroksiidieksponendi** mõistet: $pOH = -\log[OH^-]$

pH on üks tähtsamaid ja sagedamini mõõdetavaid näitajaid veekeemias (vt ääremärkus 1.12). See määrab paljude keemiliste ühendite esinemisvormi ja mõju elusorganismidele. Näiteks on paljud metallid madala pH juures vees lahustunult ioonses vormis, settivad kõrgema pH juures hüdroksiidide või oksiididena välja ning muutuvad väga suurte pH väärtuste juures taas lahustuvaks. pH-st sõltub vetikate kasutatava mineraalse süsiniku esinemisvorm. Vee hapestudes (happevihmad) muutub vetikakoosluse liigiline koosseis. Joonisel 1.191 on toodud pH skaala koos mõningate loodusvete pH väärtusega.

pH mõjutab paljudele veeorganismidele oluliste ühendite, näiteks ammooniumlämmastiku, vesiniksulfiidi ja vesiniktsüaniidi ioniseeritust ja toksilisust. Ioonsel kujul ammooniumlämmastik ($NH_4^+$), mis on madala pH juures tema põhivorm, on tunduvalt vähem mürgine kui kõrge pH juures esinev $NH_3$. Vesiniksulfiid ja vesiniktsüaniid käituvad aga ammooniumlämmastikuga võrreldes vastupidi ning nende vähemürgised ioonsed vormid ($S^{2-}$, $CN^-$) esinevad kõrge pH juures ja ioniseerumata toksilised vormid ($H_2S$, HCN) madala pH juures.




**1.191.** pH skaala ja mõnede ainete pH väärtused.

**SISEVEEKOGUDE pH** Siseveekogude vesi on oma olemuselt mitmekomponendiline süsteem ning seal toimuvad mitmesugused keemilised reaktsioonid, mis on $H^+$- ja $OH^-$-ioonide lisaallikaks. Näiteks mõjutab neid lahustunud $CO_2$ ning oma jälje võib jätta ka valgala geokeemiline iseloom. Seetõttu pole looduslike veekogude pH tavaliselt mitte 7, vaid varieerub laiades piirides. pH järgi jaotatakse siseveekogud tabelis 1.19 toodud rühmadesse.

Enamiku siseveekogude pH jääb vahemikku 6–9. Niiske kliimavöötme leostunud muldadega aladel paiknevate veekogude pH on enamasti madalam kui neis, mis paiknevad lubjakivi avamusaladel või kuivas kliimavöötmes. Põhjasetete pH ei tõuse tavaliselt üle 7.

Looduslikult väga happelised veekogud (pH < 3) paiknevad enamasti vulkaanilistes piirkondades ning on tugevate mineraalhapete mõju all. Enamasti on tegu vesinikkloriidhappega või püriidi oksüdeerumisel tekkiva väävelhappega. Nende hulka kuuluvad näiteks Indoneesias Florese saarel paikneva Kelimutu vulkaani kraatrijärved. Omapärane on sealsete järvede pidevalt muutuv vee värvus, mida seostatakse hapnikusisaldusega. Kui hapnikku on vähe, tundub vesi rohekat värvi ning kaldaservad on värvunud väävlist kollaseks. Hapnikurikka vee korral varieerub värvus tumepunasest peaaegu mustani. Tõenäoliselt kõige happelisem järv maailmas on samuti Indoneesias asuv Kawah Ijen, mille pH väärtuseks on mõõdetud 0,17 (joonis 1.192). 40 ha pindalaga ja ligi 200 m sügavuse kraatrijärve vesi sisaldab suurel hulgal kloriide (23 380 mg/l) ja sulfaate (64 750 mg/l).

Sageli on happelised (pH 3–4,5) veel lahustunud orgaanilise aine poolest rikkad sooveekogud ja järved, mille valgalal on ülekaalus okasmets või raba. Üle 50% sealsest orgaanilisest ainest moodustavad humiinainete orgaanilised happed. Hoolimata otsesest happelisusest on orgaanilistel hapetel siiski suur puhverdusvõime tugevate hapete suhtes ja nad stabiliseerivad happevihmadest tingitud veekogu pH kõikumist. Madal pH on eriti iseloomulik soodele ja soojärvedele, kus litoraalis domineerivad turbasamblad. Kuigi happelised sademed võivad langetada nõrga puhverdusvõimega järvede pH-d, ei ületa sel teel lisanduv $H^+$-ioonide hulk kolmandikku nende koguhulgast. Valkude lagundamine ja sulfaatide redutseerimine lisab samuti mingil määral $H^+$-ioone, kuid peamise osa annab siiski turbasammalde suur ioonivahetusvõime.

Väga suuri pH väärtusi esineb kõrbeveekogudes, kus vesi sisaldab suures koguses karbonaate (eriti $Na_2CO_3$; joonis 1.193). Aluselise veega on ka suure produktiivsusega järved ning madalad rannajärved ja laguunid.

Veekogud, mille vee pH väärtus jääb väljapoole optimaalset vahemikku (pH 6–8,5), on üldjuhul elustiku poolest vaesed ja vähese liigirikkusega. Seda ei põhjusta üldjuhul mitte pH ise, vaid selle näitajaga seotud teised füüsikalis-keemilised tegurid, nagu mürgiste metalliioonide ilmumine vette või fotosünteesiks sobiva mineraalse süsinikuallika puudumine.

Tabel 1.19. SISEVEEKOGUDE KLASSID pH ALUSEL

| Klass | pH vahemik |
|---|---|
| Tugevalt happelised veekogud | < 3 |
| Happelised veekogud | 3–5 |
| Nõrgalt happelised veekogud | 5–6,5 |
| Neutraalsed veekogud | 6,5–7,5 |
| Nõrgalt aluselised veekogud | 7,5–8,5 |
| Aluselised veekogud | 8,5–9,5 |
| Tugevalt aluselised veekogud | > 9,5 |

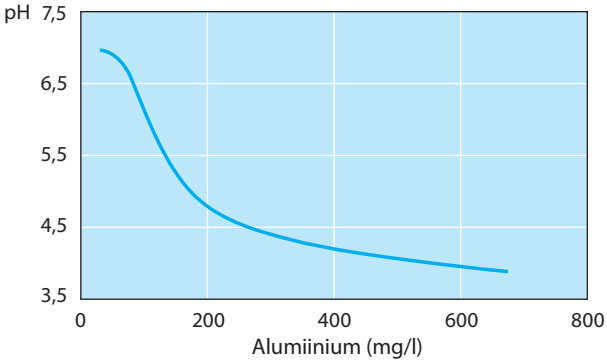
**1.192.** Kawah Ijeni kraatrijärv Jaava saarel on üks happelisemaid järvi maailmas.

**1.193.** Soap Lake ehk Seebijärv USAs on oma nime saanud suure soodasisalduse tõttu tekkiva vahu järgi. Meromiktilise ja mineraalainerikka järve vesi on katsudes libe, meenutades seebivett.

**HAPESTUMINE JA SISEVEEKOGUD** Happevihmad ja nende mõju veekogudele on tänapäeva ökoloogias olnud aktuaalne teema juba 1970. aastatest alates, mil Rootsi uurijad püstitasid hüpoteesi, et tegu on Skandinaavia järvede ja metsade hapestumise peamise põhjusega. Puhta ja lisanditeta vee pH on 7 ning sellest väiksema väärtusega vedelikke nimetatakse happelisteks. Selle jaotuse järgi oleks enamik sademeid happelised, sest atmosfääris ringleva vee normaalne pH on ligikaudu 5,6–5,8. Sellisele väärtusele vastava vesinikioonide kontsentratsiooni põhjuseks on atmosfääris leiduv süsihappegaas (~ 400 ppm):

$$H_2O + CO_2 \rightarrow H_2CO_3$$
$$H_2O + H_2CO_3 \leftrightarrow HCO_3^- + H_3O^+$$

Täiesti puhast sajuvett, kus pH väärtuse määraks vaid $CO_2$, on looduses raske leida. Geosfääride eri osadest (ookeanid, maakoor, taimkate jm) atmosfääri kandunud ained langetavad ka ilma saasteta aladel sajuvee pH vahemikku 5,2–5,6. pH langemine alla 5 on enamasti tingitud õhus leiduvatest väävli- ja lämmastikuühenditest ning siis tekivad keskkonnale juba väga ohtlikud happevihmad. Seega pole sajuvee pH üheselt mõistetav happesaaste mõõt ning happeliste sademete hindamisel tuleb peale vesinikioonide kontsentratsiooni määramise uurida ka ioonkoostist tervikuna. Ühtlasi pole **happevihma** mõiste päris korrektne tähistamaks keskkonna hapestumist ja sellest tulenevaid probleeme. Märkimisväärne osa hapestumist tingivatest ainetest ei lange maale mitte vihmana, vaid sadeneb just kuivades ilmastikutingimustes (joonis 1.194). Seepärast kasutataksegi väljendit **happeline depositsioon** ehk **happeline sadestumine**. Hapestavaid saasteaineid tasakaalustab aluseliste katioonide sadenemine. Olulised neutraliseerijad on mitmesugused leelised ja mullas leiduvad leelismetallid, nagu naatrium, kaalium ja kaltsium. Neutraliseerijateks pole aga mitte leelismetalliioonid ise, vaid osa nende ühendeid, eriti karbonaadid ja oksiidid. Näiteks $CaCO_3$ neutraliseerib happeid, kuid $CaSO_4$ ja NaCl mitte.

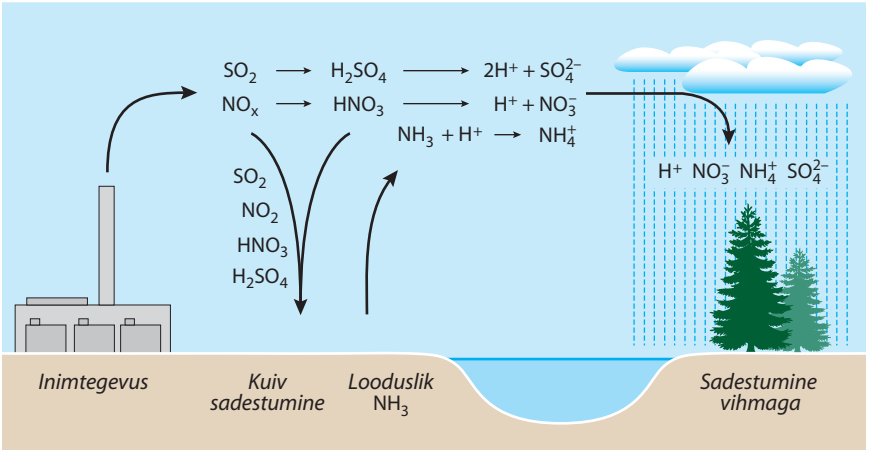


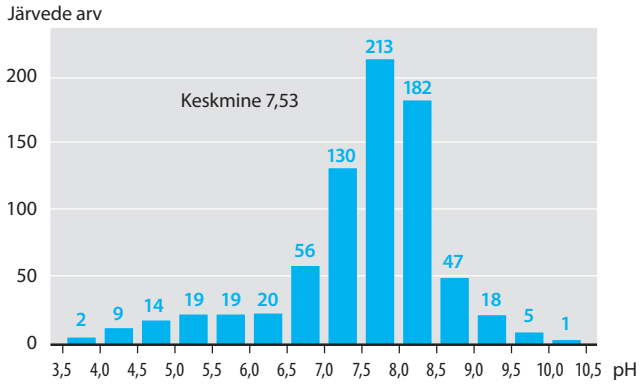

**1.195.** Seos pH ja alumiiniumi kontsentratsiooni vahel mõnedes heledaveelistes Rootsi järvedes.

Happeline depositsioon võib veekogusid mõjutada kas otseselt või kaudselt, valgala vahendusel. Kui valgala pinnakate on õhuke ja sel puuduvad neutraliseerivad ioonid, jõuab happeline vesi ka veekogusse endasse. Aluselise mullaga valgaladel jõutakse happelised sademed enne veekogusse jõudmist neutraliseerida. Piirkondades, kus aluseliste ioonide hulk vees pole pidevalt tagatud, hakkab seni stabiilsena püsinud pH vesinikkarbonaatide järkjärgulise vähenemise tõttu järsult langema ja veekogu muutub happeliseks.

Järvede hapestumine algab tavaliselt vee läbipaistvuse suurenemisega, mis on tingitud humiinainete settimisest. Et metallid muutuvad madala pH juures lahustuvaks, ilmub vette suures koguses raua ja alumiiniumi, mõnel juhul ka mangaani, tsingi, arseeni ja plii ioone (joonis 1.195). Tihti tekib terav fosforivaegus, mis omakorda vähendab veekogu produktiivsust. Üsna tavaline on happelise keskkonna ja metallide suhtes tolerantsete liikide mõjulepääs. Kuigi vetikate biomass jääb esialgu muutumatuks, väheneb nende liigiline mitmekesisus. Paljud mikrovetikate liigid kaovad ja levima hakkavad niitjad rohevetikad. Põhjuseks pole otseselt mitte pH, vaid sobiva süsinikuallika puudumine ja fosforivaegus. Näiteks räni leidub enamasti diatomeede arenguks piisavalt. Suurtaimede hulk väheneb, sest nad ei talu mürgiseid metalle, ning üldjuhul asenduvad nad turbasamblaga, mis võib rohelise vaibana katta ka veekogu põhja, sest valgustingimused on paranenud. Suurtaimed võivad metallide hulka vees kasvatada ka transpiratsiooni

**1.194.** Happelise depositsiooni peamised toimemehhanismid.



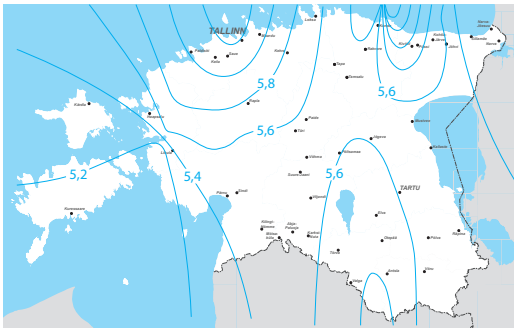



**1.196.** Eesti järvede pH sagedusjaotus.

teel. Kalade, limuste ja vähkide kadumine on hapestumise varajaseks signaaliks, sest nende toes ei suuda kuigi pikalt happelisele veele vastu seista. Paljud ühepäevikulised kaovad juba mõõduka hapestumise toimel. Seevastu paljude kiililiste ja surusääsklaste vastsed ning mardikalised ja lutikalised võivad oma arvukust oluliselt suurendada, kui neil vaenlased (kalad) puuduvad. Hapestumise mõju kaladele sõltub liigist. Mõjutatud on nii täiskasvanute sigimisvõime kui ka marja ja noorjärkude elujõulisus. Lõhe, forell ja särg on magevee hapestumise suhtes eriti tundlikud, kauem suudavad vastu pidada haug ja angerjas. Täiskasvanud isendite surm madala pH juures on tingitud peamiselt metallidest, näiteks alumiiniumist. Alumiinium on kõige mürgisem pH 5 juures, kus ta sadeneb hüdroksiidina kalade lõpustele.

**EESTI SISEVEEKOGUDE pH** Eesti järved on karbonaatse pinnakatte tõttu enamasti hea puhverdusvõimega ja nende pH nõrgalt aluseline (joonis 1.196). Erandiks on väga happelised atsidotroofsed ja düstroofsed järved (pH 3–5) ning hüpertroofsed ja rannajärved, kus pH võib kesksuvel olla isegi 9–10. Veekogude hapestumine atmosfäärireostuse tõttu pole Eestis kuigi aktuaalne (joonis 1.197), sest karbonaatne pinnakate neutraliseerib happelised sademed. Suuremat ohtu keskkonnale on pigem kujutanud aluseliste katioonide ülemäärane sisaldus sademetes, mis on suurendanud vihmavee aluselisust. Selle tagajärjel on näiteks kannatanud Kirde-Eesti rabaveekogude kooslused, kus laialdaselt on levima hakanud rabadele mitteomased liigid (joonis 1.198). Samas on paremate puhastusseadmete kasutuselevõtt kahandanud tahkete osakeste emissiooni ning sademed on taas muutumas happelisemaks.

Väga nõrga puhverdusvõimega oligo- ja semidüstroofsetes järvedes võivad toimuda ootamatud ja äkilised pH muutused, millel on ökosüsteemile katastroofilised tagajärjed. Näiteks toimus Kirde-Eestis Uljaste järves 1993. a augustis kalade massiline suremine. Järv on tüübilt semidüstroofne ja piirneb ühest küljest rabaga, mis reguleerib järve humiinainesisaldust ja vee reaktsiooni. 1993. a suvel jõudis järve tõenäoliselt vähem happelist rabavett kui tavaliselt ning vee pH hakkas kiiresti tõusma. Järv oli juba aastaid olnud mõjutatud ka inimtegevusest ning vees leidus arvestataval hulgal ammooniumlämmastikku, mis kõrge pH tõttu oli peamiselt ammoniaagi kujul ja põhjustaski kalade hukkumise.




**1.197.** Eesti ala 2017. aasta kaalutud keskmine sademete pH.

**1.198.** Martiska järv Puhatu soostikus. Seda huumustoitelist järve on tugevasti mõjutanud aluselised sademed. Esiplaanil rabaveekogudele mitteomane lopsakas kaldaveetaimestik.

### 1.9.2. Redokspotentsiaal

Paljud vesikeskkonnas toimuvad keemilised ja biokeemilised reaktsioonid on redoksreaktsioonid, mille käigus leiab aset valentselektronide ülekanne ja muutub aatomi oksüdatsiooniaste. **Elektronide doonoriks** on redutseerija ja **elektroni aktseptoriks** oksüdeerija. Seega oksüdeeritakse redoksreaktsiooni käigus redutseerija ja oksüdeerija ise redutseerub. Reaktsiooni suund ja kiirus sõltub vabaneva energia hulgast. Mida rohkem liigub tasakaal

$$redutseerija \leftrightarrow oksüdeerija + e^-$$

oksüdeerija poole, seda kõrgem on redokspotentsiaal. Loodusvetes on redoksreaktsioonid seotud paljude keemiliste elementidega, kuid tähtsaimad neist on C, N, S, Fe ja Mn. Redoksreaktsioone teostavad enamasti bakterid.

Kui vesinikueksponendi väärtus sõltub aluseliste ja happeliste ainete vahekorrast vees, siis **redokspotentsiaal** (*reduction potential* – ORP) sõltub muutuva valentsiga elementide esinemissagedusest vees. Nii nagu happe ja aluse tasakaalust, mida väljendab pH, saame rääkida ka redokstasakaalust, mida iseloomustab redokspotentsiaal. Kui pH on negatiivne logaritm vesinikioonide kontsentratsioonist, siis **pE** on negatiivne logaritm elektronide aktiivsusest ($a_{e^-}$). pE on mõõtühikuta suurus, mis iseloomustab mingi keemilise süsteemi elektronivahetuse võimet ja seal toimuvaid redoksreaktsioone, näidates, kui oksüdeerivad või redutseerivad on tingimused konkreetses keskkonnas. pE on negatiivne redutseerivates tingimustes (kõrge $a_{e^-}$) ja positiivne oksüdeerivates tingimustes (madal $a_{e^-}$). Redokspotentsiaali väljendatakse millivoltides ning selle tähiseks on $\boldsymbol{E_h}$ või lihtsalt **ε**. $E_h$ ja pE vaheline seos on järgmine:

$$E_h = 2{,}303\,RT/F \cdot \mathrm{pE},$$

kus $F$ on Faraday konstant (96,5 kJ/V), $R$ universaalne gaasikonstant ($8{,}3 \cdot 10^{-3}$ kJ/(K·mol)) ja $T$ temperatuur (K).

Redutseerivates tingimustes on $E_h$ väike (pE madal) ja oksüdeerivates tingimustes suur (pE kõrge). Temperatuur redokspotentsiaali oluliselt ei mõjuta, küll aga hapnikusisaldus ja pH, sest redoksreaktsioonid on sageli seotud $H^+$-ioonide liikumisega:

$$E_h = 1{,}234 - 0{,}058\,\mathrm{pH} + 0{,}0145 \log P_0,$$

kus $P_0$ on hapniku osarõhk. Praktikas arvutatakse seepärast tavaliselt $E_{h7}$ ehk redokspotentsiaal pH = 7 juures:

$$E_{h7} = E_h + 58(\mathrm{pH} - 7)$$

Hapnikurikkas vees on ülekaalus aeroobsed reaktsioonid, kuid anaeroobsuse kujunedes muutuvad orgaanilise aine lagundamisel oluliseks mitmesugused redoksreaktsioonid. Nende reaktsioonide kulg ja saadused on omakorda seotud veeökosüsteemi toitelisusega (tabel 1.20). Vähese hapnikusisalduse juures (näiteks kihistunud järvede hüpolimnionis) on redokspotentsiaal väike, settes isegi negatiivne, ning esinevad peamiselt redutseeritud vormid.

**REDOKSPOTENTSIAAL VOOLUVEEKOGUDES** Vooluveekogudele on iseloomulik püsiv hapniku lisandumine vee turbulentse voolamise ja pideva õhustamise tõttu. Seepärast on redokspotentsiaal kogu veesamba ulatuses ühtlaselt suur ning märgatavaid kihistumise ilminguid ei esine. Setete redokstingimused varieeruvad siiski eri tüüpi jõgedes ja jõelõikudes. Näiteks alamjooksu aeglase vooluga osades võivad redokstingimused sette ja vee piirpinnal sarnaneda järvede tingimustega. Redokspotentsiaali aastaajalist muutumist mõjutavad enim veetemperatuur ja voolu iseärasused. Suvine kõrgem veetemperatuur stimuleerib mikroorganismide elutegevust ja setete redokspotentsiaal on seetõttu väiksem. Selle tulemusena lahustuvad mangaani ja raua hüdroksiidid, suurendades ka lahustunud fosfori hulka. Jõesängialuses vööndis võib leiduda väikestes piirides muutuvaid redoksgradiente. Nende tähtsus seisneb toiteaineringete keemilises ja bioloogilises mõjutamises näiteks nitrifikatsiooni ja denitrifikatsiooni kaudu. Jõevee infiltreerumisel põhjavette mõjutab vee kvaliteeti ka muutuv redokspotentsiaal. Selle suvised väikesed väärtused loovad soodsad tingimused raua ja mangaani lahustumiseks bakterite kaasabil. Selle tulemusena võib nende elementide hulk põhjavees suureneda ja ühes sellega lahustunud fosfori hulk jõesängialuses põhjavees.

Tabel 1.20. JÄRVE TROOFSUSEST TINGITUD MUUTUSED REDOKSPOTENTSIAALIS ($E_h$) NING HAPNIKU- ($O_2$), RAUA- ($FE^{2+}$), VESINIKSULFIIDI- ($H_2S$) JA FOSFAADISISALDUSES ($PO_4^{3-}$) HÜPOLIMNIONIS

| Troofsusseisund | $O_2$ | $E_h$ (mV) | $Fe^{2+}$ | $H_2S$ | $PO_4^{3-}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Oligotroofne | palju | 400–500 | puudub | puudub | väga vähe |
| Mesotroofne | redutseeritud | 400–500 | puudub | puudub | väga vähe |
| Eutroofne | redutseeritud | 250 | rohkelt | puudub | palju |
| Hüpertroofne | redutseeritud | < 100 | väheneb | rohkelt | väga palju |

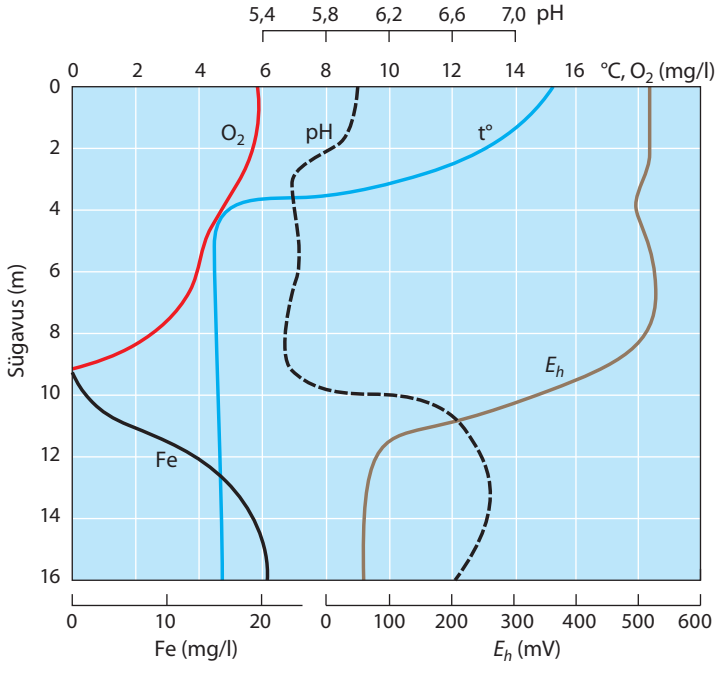
Vooluveekogude kaldavööndid ja lammialad paistavad vahel silma suurtaimede ohtruse poolest. Neid piirkondi iseloomustab aastaajaline ja aastane vooluhulga muutlikkus. Kõrgema veeseisu ja üleujutuste ajal tarbitakse hapnik kiiresti ära ja redokspotentsiaal väheneb, mõjutades oluliselt ka taimede kasvutingimusi. Märgadel lammialadel ja kaldavööndeis valitsevad suviti anaeroobsed tingimused koos väikese redokspotentsiaaliga. Kuivade piirkondade muld on seevastu aasta ringi aeroobne ning suure redokspotentsiaaliga.

**REDOKSPOTENTSIAAL JÄRVEDES** Järvedes on redokspotentsiaali seisukohalt tähtsaimad piirkonnad metalimnion ning sette ja veesamba piirpind. Parasvöötme sügavates järvedes kujuneb soojuskihistumus välja hiliskevadel ja kestab sügiseni, mil kogu veesammas saavutab ühtlase temperatuuri. Epi- ja hüpolimnioni vahel asetsevas metalimnionis tekib suvel temperatuuri-, hapniku- ja redoksgradient. Vähetoitelistes järvedes ei mõjuta kihistumus märkimisväärselt redokstingimusi, sest kogu veesammas on vähemal või rohkemal määral aereeritud (tabel 1.20). Seevastu rohketoitelistes järvedes, kus orgaanilise aine tootmine ja sellega seoses ka hapnikutarve on suurem, kujuneb hapniku kadudes välja selge redoksgradient (joonis 1.199). See on hästi märgatav, kui hapnikusisaldus langeb alla 1 mg/l. Hapnikusisaldusele 0,1 mg/l vastab redokspotentsiaal ~200 mV. Selle või veelgi väiksema väärtuse juures hakkab kiirelt kasvama redutseeritud ühendite hulk ($H_2S$, $NH_3$, $Fe^{2+}$ jt).

Kui hüpolimnionis ja setetes jätkub bakteriaalne lagunemine, kasvab redutseeritud mangaani- ja rauaühendite ning lõpuks ka sulfiidide hulk. Selliste ühendite akumuleerumise osakaal kajastab nende võimet elektrone neelata ja seeläbi ka iseloomustada redokstingimusi. Redutseeritud ühendite akumuleerumise kestuse ja ulatuse järve hüpolimnionis määrab orgaanilise aine mineraliseerumise ulatus ja veesamba redokspotentsiaal. Kuigi teoreetiliselt peaks redoksprotsesside järjestus olema kõigi järvede ja redokspaaride puhul sama, pole redokspotentsiaali vähenemine anoksia korral alati ühesugune. Põhjuseks on redokspaaride iseloom ja nende hulga erinevus järvedes.

Sügisese segunemisperioodi ajal lõhutakse soojuskihistumus ja hapnik jõuab taas hüpolimnioni. Redokspotentsiaali suurenedes oksüdeeritakse nüüd $Fe^{2+}$- ja $Mn^{2+}$-ioonid ning algab mangaanoksiidi ja raudhüdroksiidi settimine. Viimane mõjutab toiteainete kättesaadavust fütoplanktonile, sest koos rauaga settib välja ka fosfor. Polümiktilistes järvedes püsivat kihistumust ei teki ja suured ajalis-ruumilised hapnikusisalduse muutused kajastuvad omakorda redokstundlike elementide väga muutlikus settimises ja taaslahustumises.

Sügavate ja toiteainerikaste järvede kihistumisel kujuneb redoksgradient veekihis, kus hapnikusisaldus väheneb. Madalates ja segunevates järvedes ning sügavate järvede madalates osades, kus hapnikutingimused on head ja redokspotentsiaal pidevalt suur, võib redoksgradient kujuneda veesamba ja sette piirpinnale. Redoksgradiendi kuju ja paiknemissügavus sõltub orgaanilise aine koostisest ja hulgast. Näiteks rohketoitelistes järvedes on setete redoksgradient tunduvalt pinnapealsem kui vähetoitelistes.



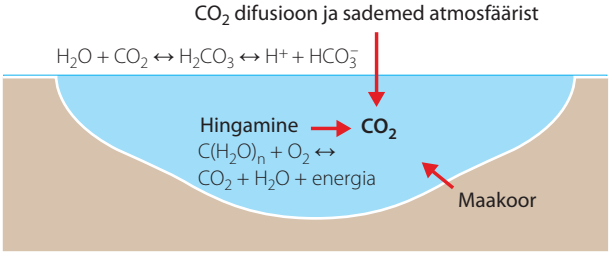

**1.199.** Veetemperatuuri, hapniku, pH, raua ja redokspotentsiaali vertikaalne jaotus meromiktilises Skjennungeni järves Norras.

## 1.9.3. Mineraalne süsinik sisevetes

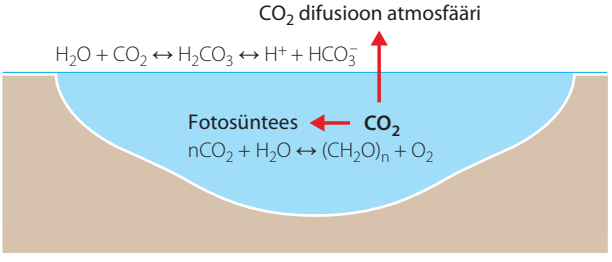
Anorgaaniline süsinik, enamasti vees lahustunud süsihappegaas või vesinikkarbonaadid, on peamine süsinikuallikas fotosünteesil ja orgaanilise aine tootmisel. Selles protsessis osalevad vetikad ja suurtaimed järvedes-jõgedes ning nende valglatel. Viimasel juhul transporditakse orgaaniline aine mitmesuguseid teid pidi veekogudesse. Tekkinud orgaanilisel süsinikul põhinevad ained on energia- ja ainevahetuse aluseks ökosüsteemis. Anorgaanilise süsiniku tarbimise kompenseerib organismide hingamisel vabanev süsihappegaas ning karbonaatide ja süsihappegaasi vood pinnasest, veest ja atmosfäärist. Peale primaarproduktsiooni süsinikuallika rolli täidab anorgaaniline süsinik siseveekogudes ka puhversüsteemi ülesannet, pehmendades pH kõikumist.

**SÜSIHAPPEGAAS** Süsinikdioksiidi ehk süsihappegaasi ($CO_2$) leidub atmosfääris keskmiselt 0,04 mahuprotsenti ehk 0,4 ml/l. Peamiselt inimtegevuse mõjul on süsihappegaasi hulk atmosfääris viimasel ajal kasvanud 2,1 ppm aastas. Õhu molekulmass (0,8 · (28 g/mol $N_2$) + 0,2 · (32 g/mol $O_2$)) on u 28,8 g/mol, süsihappegaasil seevastu 44 g/mol; seega on ta õhust raskem ja „voolab" enne hajumist mööda maapinda. Vees lahustub $CO_2$ väga hästi, u 200 korda paremini kui hapnik. Et süsihappegaas reageerib veega, siis Henry seadus siin ei kehti. Süsihappegaasi adsorptsioonikoefitsent vee suhtes on 1,713. Järelikult lahustub normaaltingimustes ühes liitris vees 0,4·1,713 = 0,685 ml $CO_2$. Hoolimata väikesest osakaalust atmosfääris on $CO_2$ siseveekogudes väga levinud gaas (vt ääremärkus1.13).

Süsihappegaasi allikaks (joonis 1.200) vees on eelkõige orgaaniliste ainete oksüdeerumine. Mõned põhjaveed rikastuvad süsihappegaasiga, mis pärineb Maa sisemusest. Süsihappegaasi neeldumisel atmosfäärist on oluline osa ainult mere ja ookeanide puhul. $CO_2$ osarõhk maismaavetes ületab enamasti tema osarõhu atmosfääris. Seetõttu on tasakaal suunatud $CO_2$ lendumisele veest õhku.




**1.200.** $CO_2$ allikad pinnaveekogudes.




**1.201.** $CO_2$ tarbijad pinnaveekogudes.

Põhiline süsihappegaasi tarbija (joonis 1.201) on fotosüntees. Seda kulub ka karbonaatide lahustumisel ja alumosilikaatide porsumisel. Loomadele on süsihappegaas suures koguses mürgine, kuid väikeses kontsentratsioonis vajalik ainevahetuse reguleerimiseks ja mitmesuguste orgaaniliste ainete sünteesiks. Sisevete $CO_2$-sisaldus on vahemikus 0,1 mg/l kuni 1 g/l. Kõige vähem sisaldavad süsihappegaasi mineraalainerikkad veekogud, nt soolajärved. Kõige rohkem leidub seda põhja- ja reovees.

$CO_2$ pole enamikule veeloomadest kuigi mürgine, ent näiteks kalade puhul on märgatud hoidumist piirkondadest, kus $CO_2$ on üle 10 mg/l. Kui hapnikku on piisavalt, talub suurem osa liike $CO_2$-sisaldust kuni 60 mg/l. Suur $CO_2$-sisaldus on kaladele narkootilise toimega.

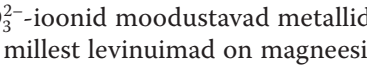
1.13 ÄÄREMÄRKUS

**FRANZ RUTTNER**

Franz Ruttner (1882–1961 oli Saksa-Austria teadlane. Suure osa oma teadlasekarjäärist veetis ta Lunzis sealset bioloogiajaama juhtides. Koos August Thienemanni ja Carl Wesenberg-Lundiga muutis ta Lunzi bioloogiajaama rahvusvaheliseks limnoloogiauuringute keskuseks, mille tuntus püsis kogu 20. sajandi jooksul. Ruttneri teadusloome sõlmpunktideks olid elutingimused vees, süsihappegaasi omastamine taimede poolt ja süsihappegaasi moodustumine troopilistes meredes.

Peale organisatoorse ja puhtteadusliku töö tegeles Ruttner väga edukalt ka teaduse populariseerimisega. Tema koostatud „Ülevaade limnoloogiast" („Grundriss der Limnologie", 1940) oli pikka aega omalaadne limnoloogiaalase kirjanduse klassika, milles kompaktses vormis (250 lk) on antud lühike ja konkreetne ülevaade järveteadusest, vooluvetest ja soodest. Raamatu väärtust näitab juba ainuüksi selle tõlkimine 11 keelde.

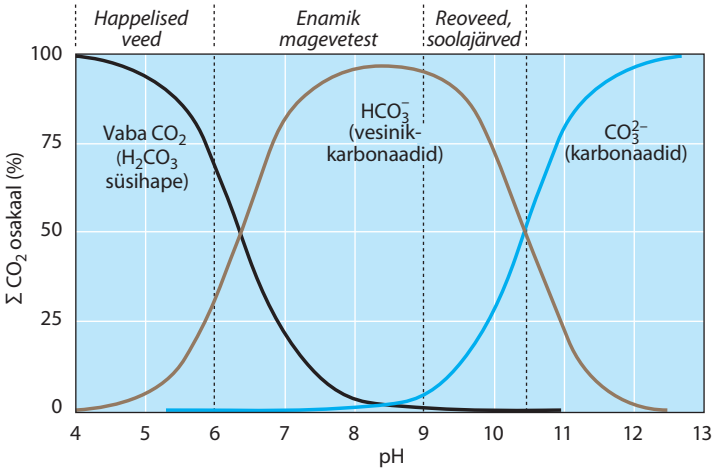
**KARBONAATNE PUHVERSÜSTEEM** Süsihappegaas esineb vees peamiselt lahustunud molekulidena. Neist ligikaudu 1% moodustab süsihappe ($H_2CO_3$), mis dissotsieerub:



$$H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^-$$
$$HCO_3^- \leftrightarrow H^+ + CO_3^{2-}$$

Sellises süsteemis sõltub komponentide omavaheline suhe vesinikioonide sisaldusest (joonis 1.202). $HCO_3^-$- ja $CO_3^{2-}$-ioonid moodustavad metallidega reageerides sooli, millest levinuimad on magneesium- ja eriti kaltsiumkarbonaat. $CaCO_3$ lahustub vees väga halvasti ning sadestub aluselise reaktsiooniga vees juba suhteliselt väikese $Ca^{2+}$ ja $CO_3^{2-}$ kontsentratsiooni juures. Kui vesi muutub happelisemaks ja süsihappe dissotsiatsioonil vabanenud $CO_3^{2-}$-ioonide hulk väheneb, kompenseeritakse nende kadu karbonaatide lahustumisel vabanevate $CO_3^{2-}$-ioonidega. Kui keskkonna pH jääb endiselt happeliseks, seotakse vesinikioonid ($H^+ + CO_3^{2-} \rightarrow HCO_3^-$) ning pH tõuseb. Vajalikud $CO_3^{2-}$-ioonid saadakse karbonaatide lahustumise teel. See protsess kestab, kuni jätkub karbonaate või pH tõuseb piisavalt kõrgele.

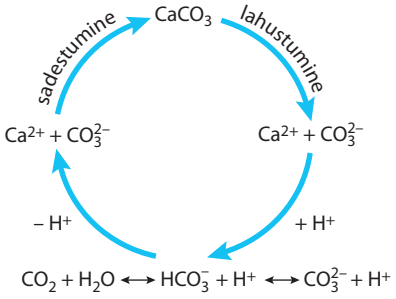
Vastupidine olukord tekib aluselises keskkonnas. $CO_3^{2-}$-ioonide hulga suurenedes seotakse nad $Ca^{2+}$-ioonidega ning $CaCO_3$ settib. Selle käigus vabanevad vesinikioonid ja keskkond muutub happelisemaks. Sellisel kujul toimib veekogudes **karbonaatne puhversüsteem**, mis hoiab ära keskkonna pH muutused niikaua, kui seal leidub karbonaate või säilib kontakt atmosfääriga (joonis 1.203). Üks karbonaatse puhversüsteemi töötamise omapärasemaid väljendusi on **järvelubja** moodustumine. Suure troofsusega järvedes tarbitakse fotosünteesil intensiivselt süsihappegaasi ning selle tulemusena sadeneb lahustunud $CaCO_3$. Settivad $CaCO_3$ osakesed muudavad järvevee häguseks ja halvendavad valgustingimusi (joonis 1.204).




**1.202.** Mineraalse süsiniku esinemisvormide seos vee pH-ga.

Karbonaatse puhversüsteemi kõrval leidub veekogudes ka muid, väiksema tähtsusega puhversüsteeme. Kõrbelistes soola- ja laguunijärvedes on võimalik boraatidel ($H_2BO_3^-$) põhinev puhversüsteem. Soojärvedes ja soovetest toituvates veekogudes täidavad puhvri rolli sageli hoopis orgaanilised ühendid – humaadid. Suure toiteainesisalduse korral saab rääkida ka nn fosfaatsest aluselisusest ($PO_4^{3-}$, $HPO_4^{2-}$, $H_2PO_4^-$)

Enamik karbonaatsest süsinikust esineb kaltsiumkarbonaadina kaltsiidi või aragoniidi kujul. Levinumad on veel magnesiit ($MgCO_3$) ja dolomiit [$CaMg(CO_3)_2$] ning strontsiumi ($SrCO_3$) ja baariumi karbonaadid ($BaCO_3$). Ka naatriumi karbonaadid on laialt levinud, näiteks naatronlubi ($Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$) ja troona [$Na_3(HCO_3)(CO_3) \cdot 2H_2O$]. Soodajärvedes on tavalised $Na_2CO_3$ ja halvemini lahustuv $NaHCO_3$. Karbonaadisisaldusest hoolimata on need järved pehmeveelised, sest puuduvad Ca ja Mg. Suvisel stagnatsiooniperioodil võib kihistunud järvede hüpolimnionis leiduda ka arvestataval hulgal $Fe(HCO_3)_2$ ja $NH_4HCO_3$.




**1.203.** Karbonaatse puhversüsteemi toimemehhanism.

**1.204.** Cruzi karstijärves Hispaanias toimub igal aastal fotosünteesi tõttu intensiivne järvelubja väljasettimine. Fotod on tehtud juulis (vasakul), kui vesi on veel läbipaistev, ja augustis (paremal).

Vee pH muutusi takistava puhverdusvõime iseloomustamiseks on kasutusele võetud mõiste **aluselisus**. See väljendab happe kogust, mis on vajalik pH langetamiseks kindla väärtuseni. See termin on siiski natuke eksitav, sest seost vee pH-ga tal alati pole. Üldjuhul iseloomustab aluselisus mineraalse süsiniku hulka vees. Tiitrimise tulemust mõjutavad ka $H_3SiO_4^-$, $H_2BO_3$, $NH_4^+$ ja $HS^-$, kuid nende osakaal on magevetes tavaliselt 1% ringis ja võib jääda arvestamata. Olenevalt kaasatavatest ühenditest on aluselisuse puhul kasutusel kolm näitajat, mida kajastab tabel 1.21.

Magevetes varieerub aluselisus vahemikus 5 mg/l (pehmeveelised) kuni 500 mg/l (kalgiveelised). Väärtus 200 mg/l näitab juba veekogu head puhverdusvõimet. Vee-elustikus endas toimuvad suuremad muutused, kui üldaluselisus ületab piiri 80 mg/l. Kui aluselisus jääb alla 30 mg/l, on veekogu väga tundlik väliste keskkonnamõjutuste suhtes ja ökosüsteem võib kergesti tasakaalust välja minna. Et Eesti pinnaveekogudes domineerivad $Ca^{2+}$- ja $HCO_3^-$-ioonid, võib nende põhjal küllaltki hästi hinnata üldist mineraalainete sisaldust. Kui vees oleksid vaid need ioonid, kehtiksid alljärgnevad seosed:

$$\Sigma i = 1{,}33\,HCO_3^-$$

$$\Sigma i = 4{,}04\,Ca^{2+}$$

Eesti väikejärvede hulgas on ülekaalus **mõõduka üldaluselisusega veekogud**; keskmiselt on nende üldaluselisus 136 mg/l (joonis 1.205). Viimase 50 aasta jooksul on üldaluselisus pidevalt suurenenud. Ühelt poolt on see ilmselt seotud vooluvetevõrgu muutmise ja ulatuslike maaparandustöödega, mille tõttu jõuab järvedesse rohkem karbonaadirikast vett. Teiselt poolt suureneb üldaluselisus järvedes ka troofsuse tõustes.

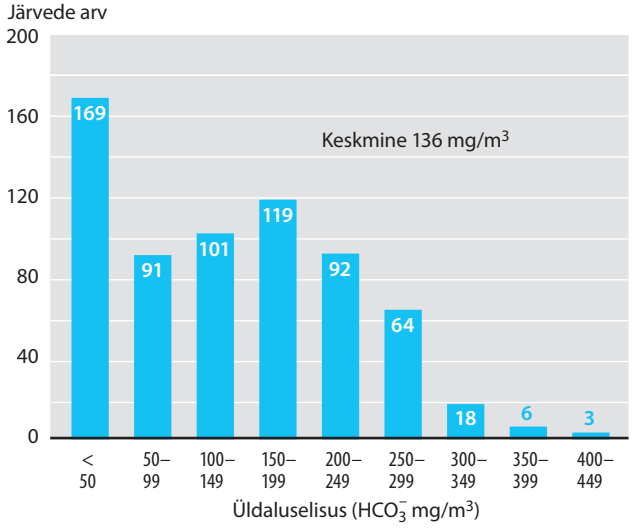
## Tabel 1.21. ALUSELISUSE VÄLJENDUSVIISID

| Mõõdetav näitaja | Tähis | Kaasatavad ioonid |
|---|---|---|
| Üldaluselisus | TA | $OH^- + CO_3^{2-} + HCO_3^-$ |
| Karbonaatne aluselisus | CA | $CO_3^{2-} + HCO_3^-$ |
| Aluselisus fenoolftaleiini järgi | PA | $OH^- + CO_3^{2-}$ |

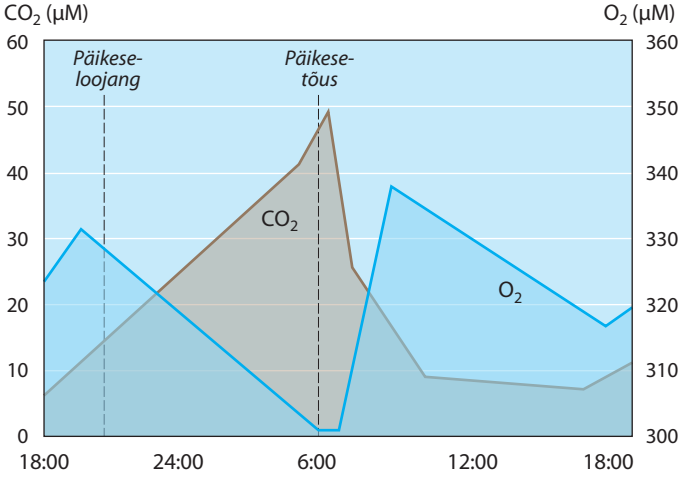
### MINERAALSE SÜSINIKU AJALIS-RUUMILINE JAOTUS

Mineraalse süsiniku ($\Sigma CO_2$) sisaldus järvevees on väga muutlik, sõltudes aastaajast ja järve toitelisusest. Väga tavalised on fotosünteesist tingitud ööpäevased süsihappegaasi hulga muutused epilimnionis ja litoraalis. Nagu eespool mainitud, on see seotud pH muutustega (joonis 1.206). Sesoonset muutust iseloomustab $CO_2$ kontsentratsiooni langus kevadel ja suvel ning tõus sügisel. Kõige rohkem on süsihappegaasi järvedes talvel. Sesoonse $CO_2$ sisalduse kõikumisega võrreldes on ööpäevase kõikumise amplituud suurem.

$\Sigma CO_2$ sügavusjaotus sõltub samuti tugevalt veekogu tüübist ja toitelisusest (joonis 1.207). Madalates järvedes ning di- ja monomiktiliste järvede segunemisperioodil on $\Sigma CO_2$ sisaldus kogu veesambas ühesugune ning sõltub tasakaalust atmosfääri süsihappegaasiga, karbonaatsest puhversüsteemist, väliskoormusest, hingamisest ja fotosünteesist. Järve termilisel kihistumisel toimuvad $\Sigma CO_2$ vertikaalses jaotuses aga mitmed silmatorkavad muutused. Oligotroofsetes järvedes, kus hapnikujaotus on ortograadne ning vesinikkarbonaatide ja karbonaatide sisaldus väike, on ka $\Sigma CO_2$ jaotus ortograadne. Soojemas epilimnionis on $CO_2$ hulk väiksem halvema lahustumise tõttu. pH ja $\Sigma CO_2$ vertikaalset



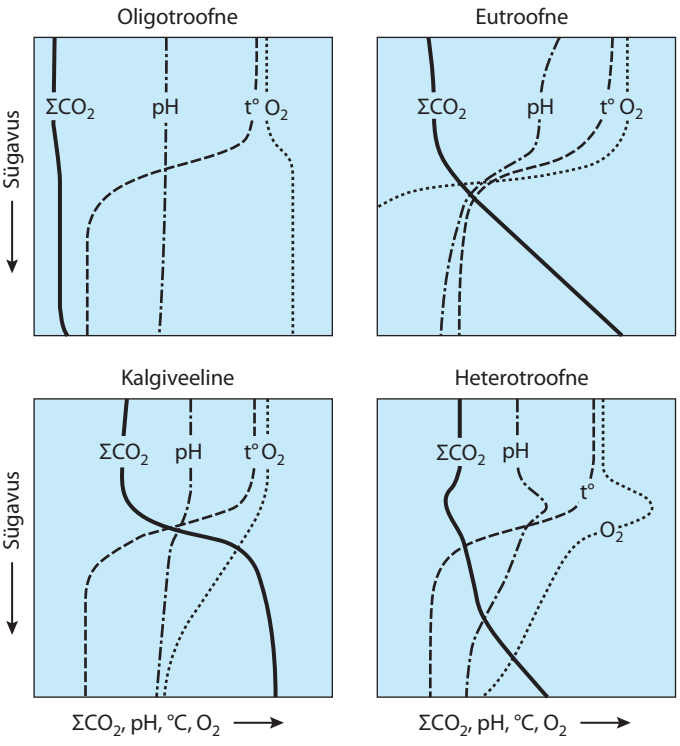

**1.205.** Eesti järvede üldaluselisuse sagedusjaotus.




**1.206.** Fotosünteesist tingitud ööpäevased muutused $CO_2$ ja $O_2$ sisalduses.

jaotust mõjutavad tugevasti bioloogilised redoksreaktsioonid. Kõige märgatavam on $CO_2$ fotosünteetiline tarbimine eutroofsete järvede trofogeenses tsoonis, millega kaasneb pH tõus. Seevastu hüpolimnionis orgaaniline aine laguneb, $\Sigma CO_2$ sisaldus kasvab ning pH langeb. Kalgiveeliste (alkalitroofsete) järvede hüpolimnionis lahustub osa epilimnionist settivat $CaCO_3$, sest hüpolimnioni vesi on jahedam ja happelisem. Selle tulemusena tõuseb seal $HCO_3^-$ kontsentratsioon. Lahustumist pidurdab orgaanilise aine adsorbeerumine $CaCO_3$ osakestele. Suure toitelisusega järvedes, kus metalimnionis toimuva intensiivse fotosünteesi tõttu esineb positiivne heterograadne hapnikujaotus, on enamasti ka negatiivne heterograadne $\Sigma CO_2$ jaotus.

Seega on süsihappegaasi akumuleerumine kihistunud järvedes suvisel stagnatsiooniperioodil ja talvel harilik nähtus. Gaas vabaneb enamasti kevadise või sügisese tsirkulatsiooni ajal. Maailmas on aga teada vähemalt kolm järve – Nyos ja Monoun Kamerunis ning Kivu Ida-Aafrikas –, kus süsihappegaasi (ja ka metaani) kontsentratsioon hüpolimnionis on väga suur. Tuntuim neist on kahtlemata Nyos, kus põhjavee kaudu järve jõudnud süsihappegaas suure rõhu tõttu (järv on üle 200 m sügav) akumuleerus ning 1986. aasta augustis plahvatuslikult vabanes. Mööda vulkaani külgi alla voolanud gaasipilves lämbus rohkem kui 1700 inimest. Järve segunemise ja süsihapegaasi vabanemise põhjuseks peetakse kliimamuutusi, sest 1986. aasta august oli varasemate aastatega võrreldes märksa jahedam ja vihmasem. Pärast augustikatastroofi hakkas gaaside hulk Nyosi hüpolimnionis taas kiirelt kasvama ning peatselt olnuks oodata uut katastroofi. Selle vältimiseks paigaldati järve sifoontoru, mis juhib süsihappegaasirikka vee pinnale. Gaaside suure surve tõttu töötab selline süsteem kõrvalise abita ning vee ja gaasisamba kõrgus ulatub umbes 20 meetrini. Sel viisil on gaaside sisaldust hüpolimnionis suudetud tõhusalt vähendada, kuid uueks probleemiks on aeglaselt murenevad kraatri seinad, mis ähvardavad järele anda. Nii pääseks liikuma suur osa veest ning vabaneksid jällegi kõik akumuleerunud gaasid. Tapvad gaasipilved on Aafrikas nii levinud, et neile on antud isegi oma nimetus: *mazuku* (tõlkes „kurjuse tuul“). Need vabanevad tavaliselt vulkaaniliste alade järvede segunemisel või jõuavad maale põhjaallikate avamusaladel ning liiguvad piki vooluveekogusid.




**1.207.** Mineraalse süsiniku ($\Sigma CO_2$) sügavusjaotuse iseärasused järvetüübiti.

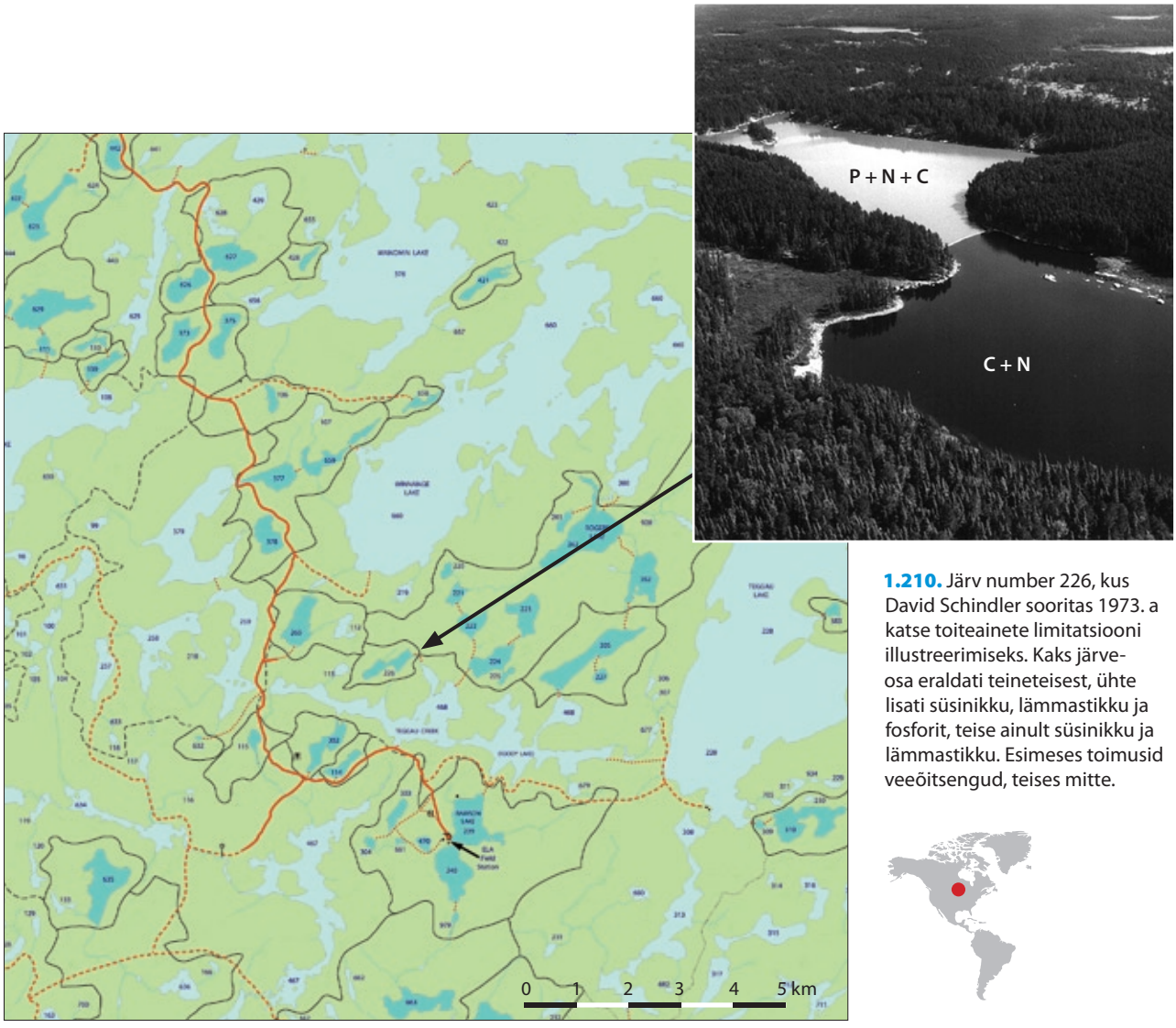
## KÜSIMUSED JA PROBLEEMÜLESANDED

1. Seasaba järv paistab silma suure toitelisuse ja üldaluselisusega. Kohalikud elanikud on mures, sest igal suvel muutub järvevesi piimjalt häguseks ning järvepõhi ja veesisene taimestik kattuvad valkjat värvi settega. Millise nähtusega on siin tegemist ja kas elanikel on põhjust muret tunda järve halva ökoloogilise seisundi pärast?
2. Paljud Rootsi järved on õhusaaste tagajärjel hapestunud. Selliste järvede keskmine pH on 5,1. Milline alljärgnevatest variantidest vastab sääraste järvede mineraalse süsiniku esinemisvormide jaotusele kahanevas järjekorras? Põhjendage vastust.
   (a) $H_2CO_3$, $HCO_3^-$, $CO_3^{2-}$
   (b) $HCO_3^-$, $CO_3^{2-}$, $H_2CO_3$
   (c) $CO_3^{2-}$, $HCO_3^-$, $H_2CO_3$
   (d) $HCO_3^-$, $H_2CO_3$, $CO_3^{2-}$

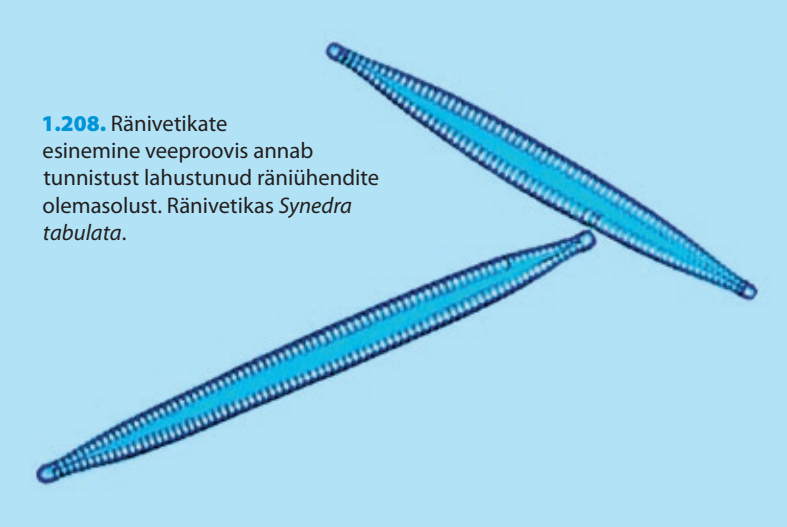
3. Miks on üldaluselisus enamasti suur järvedes, mille valgala aluspõhjas on ülekaalus lubjakivi?
4. Lubjakiviga ($CaCO_3$) tihedas kontaktis olevas põhjavees kasvab tugevate hapetega reostumise korral paradoksaalsel kombel üldaluselisus. Põhjendage toimuvat reaktsioonivõrrandite abil.
5. Miks tõuseb fotosünteesi käigus ajutiselt pH?
6. Kust pärineb jõevee üldaluselisus?

## MÕISTED JA MÄRKSÕNAD

pH e vesinikueksponent
pOH e hüdroksiidieksponent
happevihm
happeline depositsioon e sadestumine
redokspotentsiaal
pE
süsihappegaas sisevetes
karbonaatne puhversüsteem
järvelubja moodustumine
aluselisus
üldaluselisus




**1.210.** Järv number 226, kus David Schindler sooritas 1973. a katse toiteainete limitatsiooni illustreerimiseks. Kaks järveosa eraldati teineteisest, ühte lisati süsinikku, lämmastikku ja fosforit, teise ainult süsinikku ja lämmastikku. Esimeses toimusid veeõitsengud, teises mitte.



**1.208.** Ränivetikate esinemine veeproovis annab tunnistust lahustunud räniühendite olemasolust. Ränivetikas *Synedra tabulata*.

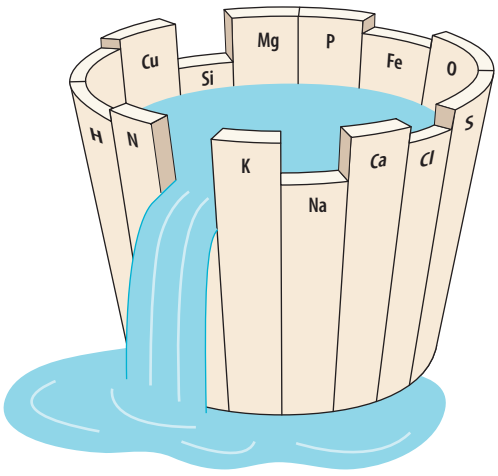
# 1.10. Toiteained

Toitumine on organismide eluavaldus, mille käigus hangitakse elutegevuseks vajalikke aineid väliskeskkonnast ja omastatakse neid (vt ka 2.5.1). Kõik organismid toodavad ja kasutavad orgaanilisi aineid. Globaalses mõttes on toitumine üks peamisi protsesse, mille kaudu toimub orgaanilise aine ringe Maal.

Orgaanilise aine tootmiseks vajatakse energiat ja mitmesuguseid aineid – toiteaineid ja/või toitaineid. Need sõnad on sarnased, kuid erineva tähendusega.

- **Toiteained** (ka taimetoiteained) on taimede kasvuks ja arenguks vajalikud keemilised elemendid, mida ei saa asendada teiste elementidega.
- **Toitained** on keerukamad keemilised ühendid (nii anorgaanilised kui ka orgaanilised), mida organismid kasutavad energiaallikana või vajavad ainevahetuses.

Elutegevust soodustavad omadused avalduvad paljude keemiliste elementide puhul (nt kaltsium, magneesium, kaalium jt), mida leidub looduslikes vetes. Eriti olulised on **lämmastik**, **fosfor** ja **räni**. Need katavad energiakulu, on tarvilikud ainevahetuses, tagavad kasvu ja arengu autotroofide elus ning nende leidumine määrab veekogu **toitelisuse** ehk **troofsuse** ehk „viljakuse“.




**1.209.** Liebigi miinimumiseadust illustreeritakse sageli tünniga, mille lauad on erinevatel kõrgustel. Tünni saab täita veega (produktsioon) vaid kuni kõige madalama lauani (mingi toiteaine).

Osakaalu järgi rakkudes jaotatakse toiteained **makrotoiteaineteks** (C, O, H, N, P, S, K, Mg, Ca, Na ja Cl) ja **mikrotoiteaineteks** (Fe, Mn, Cu, Zn, B, Si, Mo, V ja Co). Kokkuleppeliseks piiriks nende kahe rühma vahel on 0,1% sisaldus raku kuivkaalus.

Eluks vajalike ainete allikaks organismidele on suuresti nende elupaik. Ühe konkreetse liigi puudumine mingis piirkonnas võib seega näidata vajalike ainete puudumist. Liigi leidumine näitab samas talle olulise toiteaine olemasolu (joonis 1.208), kuigi see ei pruugi olla analüütiliste meetoditega avastatav, sest intensiivse aineringe korral tarbitakse see ära sama kiiresti, kui ta ilmub.

Vetikarakud vajavad toiteaineid kindlas vahekorras, mida kutsutakse **Redfieldi suhteks**:

$$C106\ H263\ O110\ N16\ P1$$

Selle tegi kindlaks Alfred C. Redfield (1958), mõõtes elementide sisaldust ookeani fütoplanktonis. Iga oluline toiteaine ei pruugi tingimata toimida **ökoloogilise tegurina**. Pideva ja piisavalt suure sisalduse korral on aine ökoloogiline tähtsus väike, kui tema kontsentratsioon ei saavuta just toksilist taset. **Limiteeriv toiteaine** on element, mille hulk mõjutab vetika- või suurtaimede asurkonna arvukust (joonis 1.209). Näiteks kui veekihis on N ja P suhe 5 : 1, siis on suure tõenäosusega limiteerivaks toiteaineks lämmastik. Kui aga suhe C : N : P on näiteks 500 : 16 : 1, siis on limiteerijateks nii fosfor kui ka lämmastik (joonis 1.210). Eluks vajalike ainete allikad on veekogusisesed protsessid; samuti lisandub neid pinnaveega, sademetega atmosfäärist ning tööstusliku, olme- ja põllumajandusliku reoveega.

Keskkonnas, kus toiteainete juurdevoolu kiirus on ühtlane, säilib enamasti nende püsiv sisaldus, mis kajastab tasakaalu toiteainete juurdevoolu või vabanemise ja ärakasutamise vahel. Tasakaalusisaldus on suur, kui vaadeldav toiteaine ei osutu limiteerivaks elemendiks, ja väike, kui tema kättesaadavus hakkab piirama koosluse juurdekasvu. Limiteeriva toiteaine sisaldus varieerub tavaliselt suurtes piirides olenevalt teda tarbiva koosluse füsioloogilisest seisundist. Hea näide on nitraatide ja fosfaatide sisaldus suviti, s.t vetikate intensiivse arengu perioodil. See jääb veekogu eufootilises kihis nullilähedaseks, kuid talviti võib olla suur. Vegetatsiooniperioodi jooksul võib limitatsioon ümber lülituda ühelt elemendilt teisele, näiteks lämmastikult fosforile. Olulise toiteaine leidumine keskkonnas ei tähenda alati, et see on organismidele kasutatav, sest seondumine kompleksidesse võib muuta ta kättesaamatuks. Nii võivad süsinikuühendid seonduda saviosakestega, polüsahhariidid kattuda ligniiniga ning raud ja mangaan esineda aluselistes veekogudes raskesti omastatavate kolmevalentsete ioonidena. Elutegevuse jätkumiseks on vajalik toiteainete juurdevool. See toimub põhiliselt nende regeneratsiooni kaudu. Seisuvetes lahkub suur osa vetikarakke fotosünteesipiirkonnast põhjasettimise teel ning toiteainete regeneratsioon toimub põhjakihtides. Eufootilisse veekihti toob toiteained tagasi temperatuuri mõjul tekkiv vertikaalne segunemine või tuule toimel kujunev **süvakerge** (*upwelling*).

Vooluvetes täieneb nii toite- kui ka toitainete hulk vooluga ülaltpoolt. Kohapeal lagunenud orgaanilisest materjalist tekkinud lahustunud ained toidavad enamasti allavoolu asuvaid jõelõike.

## 1.10.1. Lämmastik

Lämmastik on Maal ohtralt esinev element, kuid ainult 2% tema kogusest leidub organismidele kättesaadaval kujul. Reaktiivne lämmastik, mille aatomid on seotud süsiniku, hapniku ja vesinikuga anorgaaniliste ja orgaaniliste ühendite kujul, võib moodustuda mitmel viisil. Bioloogilisel fikseerimisel muudavad õhulämmastiku reaktiivseks mitmesugused bakterid ja sinivetikad nii vees kui ka mullas. Aastas muutub sel viisil kättesaadavaks 90–130 mln tonni lämmastikku. Välgu toimel fikseeritakse umbes 1% reaktiivsest lämmastikust aastas (joonis 1.211). Inimtegevuse tulemusena fikseeritakse igal aastal üle 150 mln tonni lämmastikku, peamiselt mineraalväetiste tootmisel, põllumajanduses (nt riisikasvatuses) ja energeetikas.

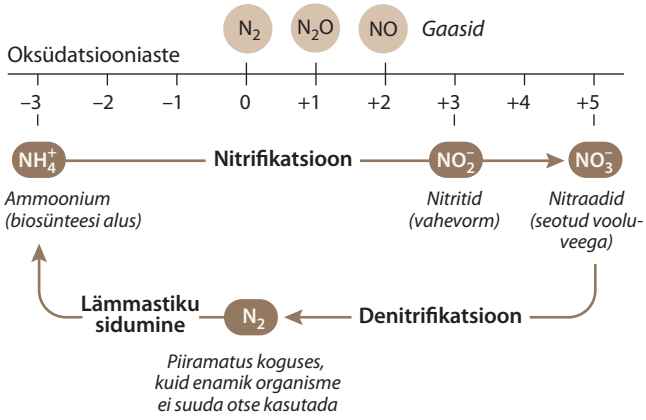
Inimese toodetud reaktiivse lämmastiku kadu ja akumuleerumine pole kuigi täpselt teada, kuid lämmastiku üha kasvav akumuleerumine keskkonnas on kinnitust leidnud. Inimkonna kasvu tõttu on suurenenud põllumajanduse tähtsus ning üha rohkem lämmastikku viiakse reaktiivsele kujule. Paraku satub suur osa reaktiivsest lämmastikust põhja- ja pinnavette ning mõjutab sealseid ökosüsteeme.

**LÄMMASTIKU PEAMISED OMADUSED JA LÄMMASTIKURINGE** Lämmastik esineb looduslikes vetes paljude mineraalsete ja orgaaniliste ühendite kujul.

- Anorgaaniliste lämmastikuühendite ehk mineraalse lämmastiku hulka kuuluvad ammoonium- ($NH_4^+$), nitrit- ($NO_2^-$) ja nitraatioonid ($NO_3^-$). Need on tekke poolest omavahel seotud ning võivad üksteiseks üle minna. Toiteainena on lämmastik muutlik anorgaaniliste vormide väga hea lahustuvuse tõttu, eriti nitraadina.
- Organismides leidub lämmastikku põhiliselt amino- ja nukleiinhapetes. Biomolekulides on lämmastik süsinikskeletti täiendav, mitmekesistav ja biomolekuli reaktiivsust suurendav element. Orgaanilised lämmastikuühendid esinevad vees kolloidide ja lahustunud molekulide koosseisus.

Enamasti on lämmastik järvedes laialt levinud ja pole siseveekogudes limiteeriv toiteaine. Erandiks on väga toiteainerikkad veekogud, väikese produktiivsusega järved lämmastikuvaesel pinnasel ja merega ühenduses olevad rannajärved. Erinevalt fosforist ei pärine lämmastik litosfäärist ning tal on hulk erineva oksüdatsiooniastmega ühendeid (joonis 1.212). Oksüdatsiooniastet muutvad oksüdeerumis-redutseerumisprotsessid toimuvad paljude organismide ainevahetuses ja biosünteesis. Seetõttu reguleerib lämmastikuringet suuresti elustik (joonis 1.213) .

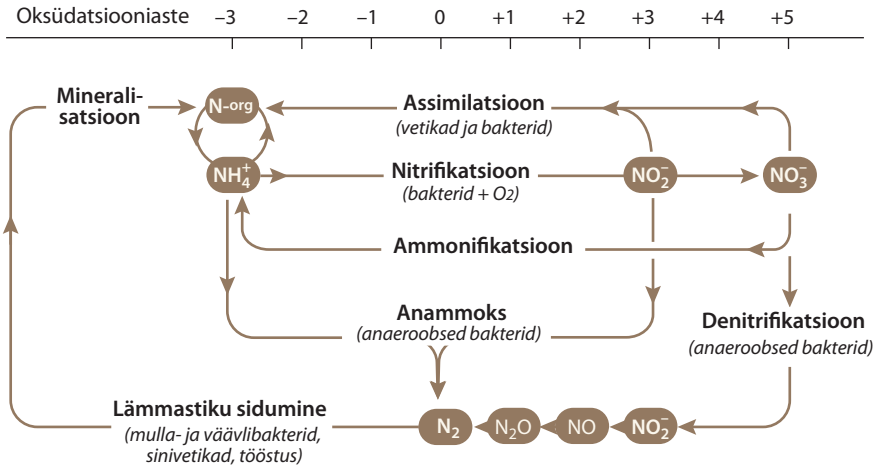
**1.211.** Atmosfääri elektrilahendused on üks reaktiivse lämmastiku tekkevõimalusi.



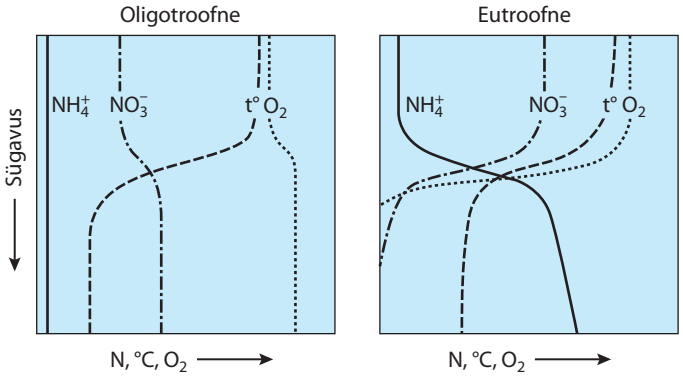

**1.212.** Sisevete lämmastikuvormid ja nende oksüdatsiooniastmed.

Lämmastiku allikateks veekogudes on sademed, atmosfäärilämmastiku fikseerimine ning sissekanne pinna- ja põhjavee kaudu. Lämmastik lahkub veekogudest väljavoolude kaudu, denitrifikatsiooni tulemusena (nitraatide redutseerimisel molekulaarse lämmastikuni) ning settides anorgaaniliste ja orgaaniliste ühendite koosseisus. Peale nende looduslike allikate omandab üha suuremat tähtsust lämmastikuühendite lisandumine tööstusliku ja olmereoveega. Tihti on looduslike vete suur nitraadisisaldus tingitud saastumisest anorgaaniliste väetistega. Saastumata põhjavees on nitraadisisaldus tavaliselt väljendatav kümnendike või sajandikega milligrammist, harvem mõne milligrammiga liitris. Põhjavesi on nitraatse reostuse suhtes tundlikum kui pinnavesi, sest nitraatide kasutamine elustiku poolt seal peaaegu puudub. Seepärast suureneb reostumise korral nitraatioonide sisaldus oluliselt ja nad võivad osutuda isegi domineerivaks aniooniks.

Mitte alati Maa ajaloos pole lämmastikuringe olnud selline nagu praegu. Erinevalt hapnikust ja süsinikust ei saa elusorganismid gaasilist lämmastikku tema inertsuse tõttu vahetult kasutada. Reaktiivse lämmastiku saamiseks on vajalik bioloogiline „sekkumine“. Seega on lämmastikuringe vajalik elusorganismidele, kes samas ise seda ringet ka reguleerivad. Nagu jooniselt 1.213 näha, on lämmastikuringe keeruline protsesside jada ning selle toimimiseks on vaja ka hapnikku. Ürgse Maa atmosfääris oli hapnikku väga vähe. Lämmastikuringe praegusel kujul siis talitleda ei saanud ja varajased lämmastikku fikseerivad bakterid pidid olema anaeroobid. Pärandina kunagisest keskkonnast saavad tänapäeva lämmastikku fikseerivad organismid eksisteerida vaid anaeroobses keskkonnas või on lämmastiku fikseerimine rakusisese hapniku eest hoolikalt varjatud. $NH_4^+$ oli ürgses atmosfääris intensiivse vulkaanilise tegevuse tõttu juba varem olemas. Hapniku kogunedes kuhjus hüdrosfääri üha rohkem nitraate ning kujunes nišš organismidele, kes redutseerivad nitraadid ammooniumiks (paljud kõrgemad taimed). Nitraatide muutumine molekulaarseks lämmastikuks on keerukas ja energeetiliselt kulukas protsess, mis arenes lämmastikuringe evolutsioonis välja viimasena.




**1.213.** Lämmastikuringe loodusvetes.




**1.214.** Lämmastikuvormide vertikaalne jaotus erineva toitelisusega kihistunud järvedes.

## ANORGAANILISED LÄMMASTIKUÜHENDID

**Ammooniumlämmastik.** Ammooniumlämmastik tekib veekogudes peamiselt heterotroofsete bakterite elutegevuse tulemusena, kes lagundavad valke ja teisi lämmastikku sisaldavaid orgaanilisi ühendeid. Seda protsessi kutsutakse **ammonifikatsiooniks**. Tugevalt redutseeritud ühendina leidub ammooniumlämmastikku peamiselt anaeroobses veekihis (joonis 1.214). Trofogeenses tsoonis ja üldse valgustatud veemassis tarvitavad ammooniumlämmastiku kiiresti ära planktonvetikad ja suurtaimed, sest energeetiliselt on redutseeritud lämmastikku kõige kasulikum omastada. Ammooniumlämmastikul on kalduvus adsorbeeruda heljumiosakestele. Palju leidub teda ka sette ja vee piirpinnal, kus adsorptsioon on väike, valitsevad anaeroobsed tingimused ja leidub ohtralt ammooniumirikkaid põhjaloomade väljaheiteid. Ammooniumlämmastiku sisaldus siseveekogudes on muutlik (enamasti 0–5 mg/l). Kõige rohkem leidub ammooniumi kihistunud eutroofsete järvede hüpolimnionis (vahel isegi üle 10 mg/l).

Ammooniumlämmastik esineb veekogudes ammoniaagina ($NH_3$) ja ammooniumioonina ($NH_4^+$). $NH_4^+$ ja $NH_3$ vahekord on pidevas dünaamilises tasakaalus. Seda mõjutavad pH ja temperatuur, mille tõustes suureneb $NH_3$ osakaal. Näiteks pH 9,5 juures leidub 20-kraadises vees rohkem kui pool ammooniumlämmastikust $NH_3$ kujul, mis on paljudele veeorganismidele mürgine. See on aktuaalne probleem vesiviljeluses ja järvemajanduses (vt ääremärkus 1.14). Kui $NH_3$-sisaldus oluliselt suureneb, väheneb kaladel tunduvalt selle eritamise võime ning see hakkab kehadesse kuhjuma. Paralleelselt $NH_3$-sisalduse suurenemisega tõuseb vere pH, mille tagajärjeks on häired ensüümide töös ja rakumembraanide talitluses. Kalade hapnikutarve suureneb, kuid häiritud on lõpuste töö ja hapnikutransport veres. Ammoniaagi mürgisust suurendab hapnikupuudus ja vee suur soolsus. Kuigi sisevetes kaasneb hapnikupuudusega enamasti ka suur süsihappegaasisisaldus, võib just viimane pH alandajana (lahustudes tekib süsihape) vähendada ammoniaagi mürgisust. Ammoniaagi 96 h $LC_{50}$ (kogus, mis tapab 50% isenditest 96 tunni jooksul) on enamiku kalade puhul vahemikus 0,5–3,8 mg/l.

Suure redokspotentsiaali tingimustes pole ammooniumlämmastik püsiv. Hapniku juuresolekul oksüdeerivad bakterid ta nitrititeks ja nitraatideks – toimub **nitrifikatsioon**. Esimene faas – $NH_4^+$ üleminek $NO_2^-$-vormi – leiab aset nitrifitseerivate bakterite (nt *Nitrosomonas* sp.) toimel:

$$2NH_4^+ + 3O_2 \rightarrow 2NO_2^- + 2H_2O + 4H^+$$

Nitritid on ebapüsivad ja oksüdeeruvad teiste bakterite (nt *Nitrobacter* sp.) elutegevuse tulemusena nitraatideks:

$$2NO_2^- + O_2 \rightarrow 2NO_3^-$$

1.14 ÄÄREMÄRKUS

### ULJASTE JÄRVE KATASTROOF

Uljaste järv on Ida- ja Lääne-Virumaa piiril asuv 64 ha suurune ning keskmiselt 2,2 m sügavune veekogu. Hüdroloogiliselt on tegu umbjärvega, mis saab oma vee sademetest ja Uljaste soost. Tüpoloogiliselt kuulub ta poolhuumustoiteliste järvede hulka. Kuni 1993. aasta augustini oli järv liigirikas ja rohke kalastikuga. Kuumadel suvepäevadel oli rand täidetud puhkajatega.

12. augustil 1993 suri ootamatult kogu järve kalastik. Surnud kalade koguhulgaks hinnati 4–5 tonni ning sama aasta sügisel tehtud katsepüükidel ei õnnestunud järvest enam tabada ühtki kala. Katastroofi põhjusena pakuti välja lõhkelaengute mõju, vesiniksulfiidimürgitust, vetikatoksiine jm. Üllatav oli järvevee väga kõrge pH – õnnetuse ajal 8,8, sama aasta septembris isegi 9,35. Järve paljuaastane keskmine pH oli seni olnud vahemikus 6,2–7,2. Lisaks sisaldas vesi suures koguses lämmastikuühendeid ($N_{üld}$ 1050 mg/m$^3$). Tõenäoliselt toimus selles halva puhverdusvõimega järves (üldaluselisus 12–18 mg/l) kõrge pH taustal tugev hapnikusisalduse kõikumine, millele lisandus kaladele otseselt mürgise ammoniaagi teke. Vee ammoniaagisisaldust katastroofi ajal ei mõõdetud, kuid veidi hiljem oli see suve kohta väga suur (ammooniumi 270 mg/m$^3$). Mida kõrgem on veetemperatuur ja pH, seda suurem osa ammooniumist muutub mürgiseks ammoniaagiks. Ilmselt nõrgestas kalu ka veeõitsengu mõju. Kalade hukkumise ajal oli järves massiliselt sinivetikat *Dolichospermum lemmermannii*, mis võib ka toksiine toota. Peale selle kutsub veeõitseng esile ulatuslikke hapnikusisalduse muutusi. Arvatavasti viiski kalade hukkumiseni nende tegurite koosmõju (kõrge pH ja selle kõikumine, veeõitseng, suur ammoniaagisisaldus, hapnikusisalduse kõikumine). Pärast katastroofi ilmusid esimesed kalaliigid looduslikul teel, hiljem kalahuviliste kaasabil. 2012. a puudusid katastroofieelsetest liikidest latikas ja inimeste sissetoodud peled.

Need reaktsioonid on mõlemad eksotermilised. Vabaneva energia kasutavad bakterid oma elutegevuseks. Nitrifikatsioon saab toimuda ainult aeroobsetes tingimustes; hapnikusisaldus peab olema vähemalt 0,3 mg/l. Tulemuseks on ammooniumisisalduse vähenemine veesambas.

**Nitritid ja nitraadid.** Reostumata looduslikes vetes on mineraalne lämmastik enamasti **nitraatses** vormis, sest see on redoksprotsessidele kõige vastupidavam. Magevetes on nitraatide hulk aastaajast ja sügavusest olenevalt väga varieeruv (0–10 mg/l). Vetikate intensiivse arengu korral võivad kõik lämmastiku mineraalsed vormid vees ammenduda.

**Nitriteid** leidub tunduvalt vähem kui nitraate. Nad on nitrifikatsiooni vaheproduktid ja akumuleeruvad harva. Nitritid paiknevad enamasti allpool fotosünteesitsooni ning nende sisaldus on suurusjärgus 0,1 mg/l. Rohkem leidub nitriteid eutroofsete järvede anaeroobses hüpolimnionis ning tugeva orgaanilise aine reostuse all kannatavates jõgedes ja järvedes.

Suure sisalduse korral on nitritid mürgised. Verre sattudes reageerivad nad hemoglobiiniga, muutes selle methemoglobiiniks. Põhiliseks reaktsiooniks on seejuures hemoglobiinis oleva $Fe^{2+}$ oksüdeerumine $Fe^{3+}$-ks, mille tagajärjel ei suuda hemoglobiin enam hapnikku siduda. Iseloomulik on vere värvuse muutumine punasest pruunikaks ning väikelastel naha värvumine sinakaks (nn sinise beebi sündroom). Sagedamini tuleb seda ette intensiivse põllumajandusega piirkondades, kus lämmastikväetised on reostanud joogiveena kasutatava põhjavee. Kaladele on nitritid magevees u 55 korda mürgisemad kui näiteks 16 PSU soolsusega merevees. Ka nitraadid põhjustavad methemoglobineemiat, kuid selleks peab nende sisaldus nitritite omast palju suurem olema. Nitraadid ise ei ole inimeste tervisele toiduga tavaliselt saadavas koguses ohtlikud. Probleem on pigem selles, et soolestikus võivad nad redutseeruda nitrititeks. Siis muudetakse nad organismis edasi kantserogeenseteks nitrosoamiinideks, mis võivad põhjustada seedetrakti vähki ja kilpnäärme hüpertrofeerumist.

Hapnikupuuduse korral leiab aset nitrifikatsioonile vastupidine protsess – **denitrifikatsioon** –, mille käigus eraldub vaba lämmastik:

$$C_6H_{12}O_6 + 12NO_3^- \rightarrow 12NO_2^- + 6CO_2 + 6H_2O$$

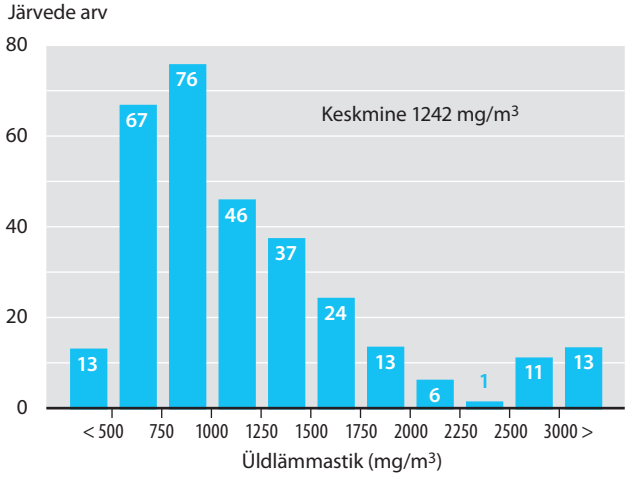
$$C_6H_{12}O_6 + 8NO_3^- \rightarrow 4N_2 + 2CO_2 + 4CO_3^{2-} + 6H_2O$$

Heterotroofsed bakterid kasutavad denitrifikatsiooni käigus nitraate elektronide aktseptorina. See on anaeroobne protsess, milleks on vaja ka kergesti lagundatavat orgaanilist ainet. Denitrifikatsiooni käigus läheb elustikule hädavajalik seotud lämmastik üle vabasse olekusse ja difundeerub atmosfääri. Protsess toimub settekihi pinnal või hüppekihis. Seda soodustab aeroobsete ja anaeroobsete tingimuste vaheldumine (nt tihedas taimestikus).

**Orgaaniline lämmastik.** Orgaanilised lämmastikuühendid esinevad vees kolloidide ja lahustunud molekulide koosseisus. Orgaaniliste ühendite lämmastik kuulub peamiselt valkude ja nende lagunemisproduktide koosseisu. Lämmastiku ja teiste biogeensete elementide muutumist keerukast orgaanilisest vormist uuesti lihtsateks anorgaanilisteks (mineraalseteks) vormideks nimetatakse biogeensete elementide regeneratsiooniks. Kõige kiiremini toimub see organismide eritatud ainete puhul (fekaalid, veeorganismide poolseeditud toit jms), aeglasemalt keerukate valguliste ühendite puhul (joonis 1.215). Regeneratsiooni lõppsaaduseks on ammooniumlämmastik. Järvede üldlämmastikust moodustab orgaaniline lämmastik aereeritud vees tihti üle 50%, kuid selle koostis ja kogus varieerub suuresti olenevalt looduslikest ja antropogeensetest allikatest.

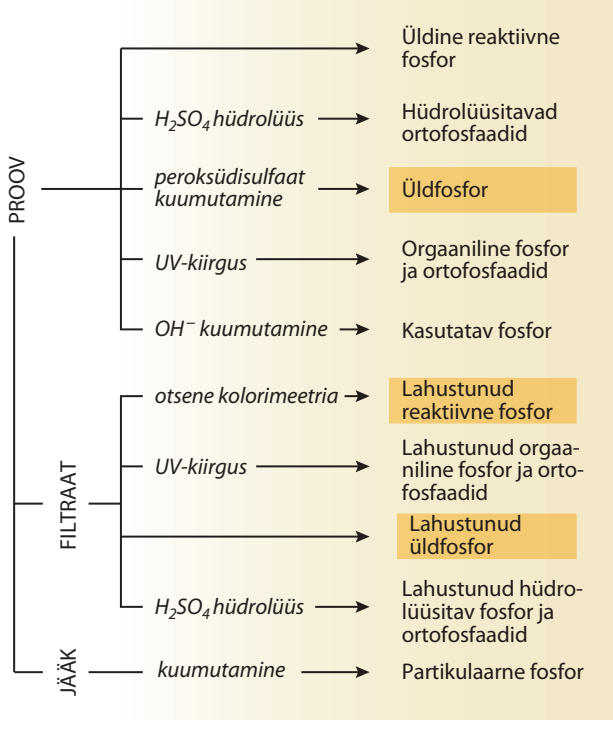
**1.215.** Zooplankteri väljaheide. Loomsel hõljumil on väga oluline roll veekogude toiteainete regeneratsioonis.

**Lämmastikuühendid Eesti järvedes.** Eesti järvedele oli pikka aega iseloomulik suur lämmastikusisaldus (üle 1300 mg/m$^3$), kuid viimasel paarikümnel aastal on see vähenenud. Siiski on mitmekümne aasta keskmine väärtus suhteliselt suur, millele vastab ka tasakaalustamata N : P suhe. Kui vaadata üldlämmastiku sagedusjaotust, siis on tähelepanuväärne selle väljavenitatus suuremate sisalduste poole (joonis 1.216). Põhja-Eestis Pandivere alamvesikonnas paiknevates järvedes võib üldlämmastikusisaldus ulatuda 2000–4000 mg-ni/m$^3$. Intensiivse põllumajanduse tõttu on sealne põhjavesi juba aastakümneid väga lämmastikurikas ning lämmastikuühendeid leidub rohkelt ka põhjaveest toituvates alkalitroofsetes järvedes. Samuti on palju lämmastikku




**1.216.** Eesti järvede üldlämmastikusisalduse sagedusjaotus.

kihistunud järvede hüpolimnionis. Eriti paistavad selle poolest silma meromiktilised järved. Kooraste Linajärves on suvekuudel üldlämmastikku veepinnal 600–1500 mg/m$^3$ ja hüpolimnionis 5000–7000 mg/m$^3$. Osaliselt meromiktilise Verevi järvi hüpolimnionis oli 2000. aasta suvel üldlämmastikku isegi 15 200 mg/m$^3$.




**1.217.** Siseveekogude fosforifraktsioonid.

## 1.10.2. Fosfor

Huvi fosfori vastu on tingitud tema tähtsusest organismide ainevahetuses ja samas vähesest leidumisest hüdrosfääris. Võrreldes teiste elusorganismidele vajalike toiteainete ja rakkude ülesehitamiseks vajalike komponentidega leidub sisevetes fosforit kõige vähem. Järvedes on enamasti just fosfor bioloogilise produktiivsuse limiteerija.

Fosfor osaleb makroergiliste sidemete moodustamises (nt ATP). Seetõttu on tal oluline koht energiavahetuses. Biomolekulidest leidub fosforit nukleotiidides ja nukleiinhapetes, fosfolipiidides, süsivesikute fosfoderivaatides ja paljudes koensüümides. Fosfori oksüdeerimine pole energiaallikas, sest enamik temast on nagunii oksüdeeritud. Sisevetes puuduvad fosforil toksilised vormid, kuigi lihtainena on ta äärmiselt mürgine. Tavatingimustes pole fosforil ka gaasilisi vorme.

**FOSFORI ESINEMISVORMID** Looduslikes vetes leidub fosforit nii anorgaaniliste kui ka orgaaniliste ühendite kujul ja orgaanilisi ühendeid omakorda nii lahustunud kui ka kolloidses vormis. Peale selle leidub fosforit vees anorgaanilise ja orgaanilise heljumina. Üld- ehk kogufosforis on lahustunud ja partikulaarse fosfori fraktsiooni piiriks kokkuleppeliselt 0,45 µm. Kumbki fraktsioon jaotub omakorda orgaaniliseks ja anorgaaniliseks. Olenevalt analüüsimeetodist ja uurija eesmärkidest võib fosforifraktsioonide arv olla väga suur (joonis 1.217).

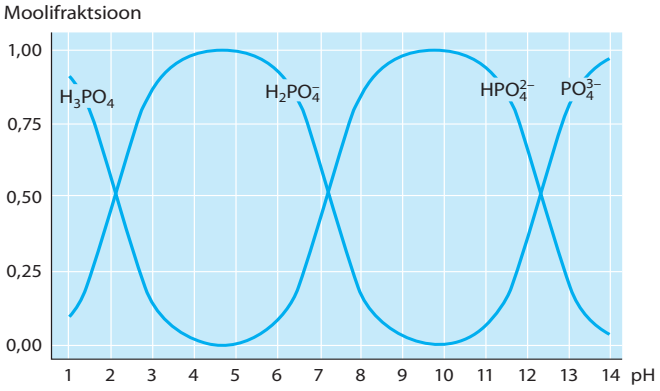
**Lahustunud anorgaaniline fosfor** (*dissolved inorganic phosphorus* – DIP) on fosforifraktsioonidest ainukesena otse organismide poolt kasutatav. Erinevalt arvukaist mineraalsetest lämmastikuvormidest esineb anorgaaniline fosfor veekogudes **ortofosfaatidena** ($HPO_4^{2-}$, $H_2PO_4^-$), mis on fosforhappe dissotsiatsiooniproduktid:

$$H_3PO_4 \leftrightarrow H^+ + H_2PO_4^- \leftrightarrow H^+ + HPO_4^{2-} \leftrightarrow H^+ + PO_4^{3-}$$

Nende vahekord sõltub pH-st: pH > 7 juures on ülekaalus ioon $HPO_4^{2-}$ (umbes 90%), kui aga pH < 7, esineb anorgaaniline fosfor ülekaalukalt kujul $H_2PO_4$ (joonis 1.218). Enamiku metallide vesinikfosfaadid ja fosfaadid lahustuvad vees halvasti. Seetõttu on fosfori levik hüdrosfääris ja pinnases lämmastiku levikust märksa piiratum.

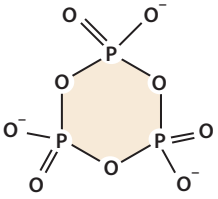
Sisevetes võib leiduda ka **metafosfaate**, mis on ortofosfaatide tsüklilised kondensatsioonisaadused, näiteks trimetafosfaat (joonis 1.219). Varem kasutati metafosfaate paljudes pesuvahendites, kuid tugeva väetava toime tõttu on sellest loobutud. Pesupulbrites kasutatakse tänapäeval nende asemel tseoliite (alumosilikaatide hulka kuuluvad mineraalid).

Ortofosfaatide lineaarsed kondensatsioonisaadused on **polüfosfaadid**. Naatriumpolüfosfaati ($Na_5P_3O_{10}$)




**1.218.** Fosforhappe dissotsiatsiooniproduktide ja pH seos.

**1.220.** Apatiidikristallid.



**1.219.** Trimetafosfaadi struktuur.

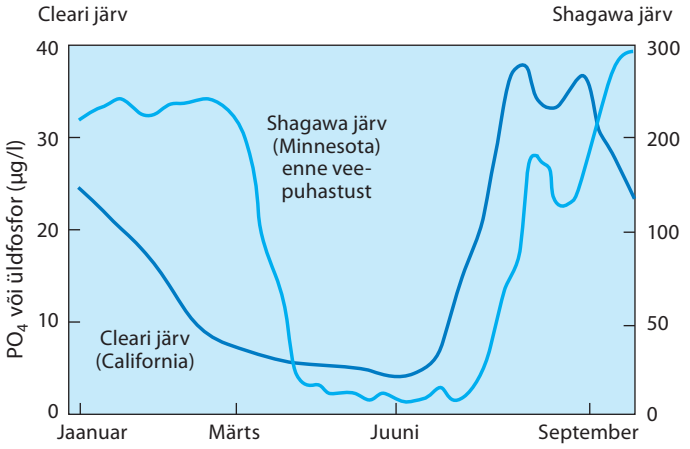
kasutati samuti pikka aega vee pehmendajana pesuvahendites, kuid sellestki on tema eutrofeeriva toime tõttu loobuma hakatud. Olemuselt on orgaaniline polüfosfaat ka adenosiintrifosfaat (ATP).

**Lahustunud orgaanilise fosfori** (*dissolved organic phosphorus* – DOP) fraktsiooni moodustavad nukleiinhapped, nukleotiidid, fosfolipiidid ja mitmesugused fosforirikkad madalmolekulaarsed ainevahetuse jääkproduktid. Kuna see fraktsioon on paljudele veeorganismidele kergesti omastatav, kasutatakse ta ära sama kiirelt, kui ta tekib. **Partikulaarse orgaanilise fosfori** alla kuuluvad üksikud rakud (bakterid, vetikad), terved organismid (zooplankterid) ja detriit. Selle fraktsiooni kasutamiseks tuleb orgaaniline aine, millega fosfor on seotud, esmalt lagundada. **Partikulaarne anorgaaniline fosfor** on fraktsioon, mille moodustavad pinnaseosakesed ja neile (eriti saviosakestele) adsorbeerunud ortofosfaadid.

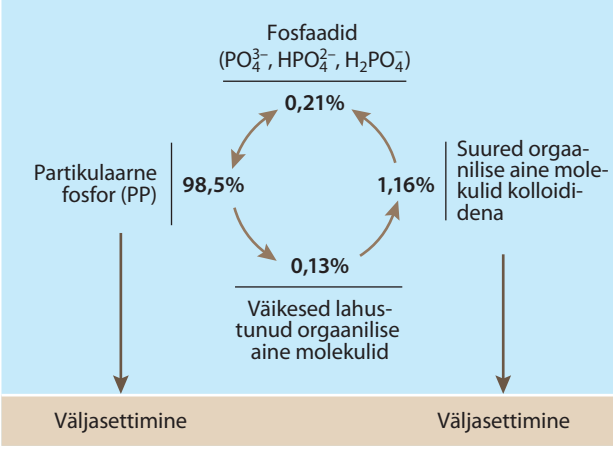
Suurem osa (rohkem kui 90%) sisevetes leiduvast fosforist esineb orgaanilises vormis, mis pole autotroofidele üldjuhul tarbitav. Mineraalne osa on napp ja väga suure ringekiirusega. Mageveeanalüüsides piirdutakse enamasti **üldfosfori** (*total phosphorus*) ja anorgaanilise lahustuva fosfori (ortofosfaadid, $PO_4^{3-}$) määramisega. Sageli nimetatakse lahustunud fosfori analüüsil saadavat fosforit **lahustuvaks reaktiivseks fosforiks** (*soluble reactive phosphorus* – SRP). Selle moodustavad lahustuva fosfori mineraalsed ja orgaanilised vormid, mis analüüsis kasutatava molübdeeniga annavad värvusreaktsiooni. Varem räägiti veeanalüüside puhul ka **fosfaatsest fosforist** (*phosphate phosphorus*). Selle all mõisteti lahustunud fosforit, mis jäi filtreerimisel filtraati. Tegelikult on osa lahustunud fosforist seotud lahustunud orgaanilistesse ühenditesse ja pole seega taimedele eksoensüüme kasutamata kättesaadav.

■ **FOSFORI ALLIKAD JA HULK** Looduslikes vetes on anorgaanilise fosfori peamised allikad mitmesugused apatiidi vormid ($Ca_5(PO_4)_3Cl$ ja $Ca_5(PO_4)_3P$), mis on laialt levinud nii tard- kui ka settekivimites (joonis 1.220). Olulise osa veekogu fosforibilansist moodustab sadenemine atmosfäärist, kui tolmu- ja pinnaseosakestele adsorbeerunud fosforit kantakse tuule abil edasi. Sadenenud partikulaarne fosfor lahustub vees siiski alles veekogusse jõudes. Märkimisväärne fosforiallikas võib olla seisuveekogu ise. Näiteks anaeroobses keskkonnas muutub setteisse mattunud raud(III)fosfaat lahustuvaks, kui $Fe^{3+}$ redutseerub hapnikuta keskkonnas ning vabanevad $Fe^{2+}$ ja $PO_4^{3-}$. Ka orgaaniline aine (organismide väljaheited, detriit) on veekogule oluline fosforiallikas.

Looduslikes järvedes on fosforit enamasti tühises koguses, sest tema ühendid on vähelahustuvad ja vee-elustik tarbib teda intensiivselt. Üldfosfori hulk varieerub vahemikus 1 µg/l – 200 mg/l. Tavaliselt sõltub see konkreetse piirkonna geoloogilistest iseärasustest. Väga vähe on fosforit graniitsel aluspõhjal asuvates oligotroofsetes järvedes. Fosforirikas on seevastu fosfaatsete kivimite avamusalal paiknevate järvede ja soolajärvede vesi. Reostumata järvedes on üldfosfori sisaldus vees enamasti 10–50 µg/l. Seisuveekogudesse jõuab fosfor peamiselt vooluvete kaudu, eriti reostuse korral või siis, kui edasi kantakse suures koguses erosiooniga vabanenud materjali (nt mulla ärakanne põldudelt). Enamikus vooluvetes seetõttu fosforipuudust polegi. Iseasi, et vooluga liikuvat „ülearust“ fosforit kantakse edasi nii kiiresti, et ta ei jõua kohapealsesse aineringesse lülituda. Põhjavees on fosfori hulk väike (alla 20 µg/l), sest enamik lahustunud fosforist seotakse kivimikihtide läbimisel. Seetõttu on põhjaveetoitega järved suhteliselt fosforivaesed.



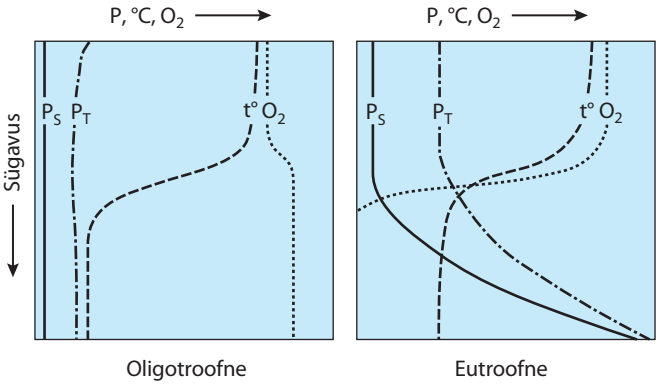

**1.221.** Fosforisisalduse sesoonne muutus kahes eutroofses järves. Cleari järv on looduslikult eutroofne, kuid Shagawa järve troofsus on kasvanud reovete sissevoolu tõttu.




**1.223.** Fosforiringe ja fraktsioonide ligikaudne suurus kihistunud järve epilimnionis.

Järvede üldfosforist moodustab tavaliselt suurema osa orgaaniline fosfor (85–95%), millest umbes 70% on osakestega seotud (sestoni koostises) ja ülejäänu lahustunud kolloidsel kujul. Anorgaanilise fosfori osakaal on tavaliselt alla 5% ja see ringleb väga kiiresti. Parasvöötme järvedes vabanevad fosfaadid talviti jää all vette orgaanilise materjali lagunemise tagajärjel. Seepärast moodustab talve lõpul ja varakevadel suurema osa üldfosforist enamasti anorgaaniline fosfor (joonis 1.221).

Kihistunud järvede fosfori vertikaalne jaotus võib olenevalt toitelisusest, järvetüübist, elustikust jm teguritest tugevasti varieeruda. Ortograadse hapnikukõveraga oligotroofsetes järvedes on fosforisisaldus sügavuti kogu veemassi ulatuses üsna ühesugune (joonis 1.222), samuti kevadisel ja sügisesel vee segunemise perioodil. Klinograadse hapnikukõveraga järvedes on fosfori vertikaalne jaotus varieeruv. Enamasti on seal fosforit hüpolimnionis palju rohkem kui epilimnionis, eriti settelähedast lahustunud fosforit. Sestoni fosforisisaldus sõltub sügavusest. Epilimnionis mõjutavad seda fütoplankton ja juurdevool litoraalist, meta- ja hüpolimnionis protsessid sette kohal ja settes.

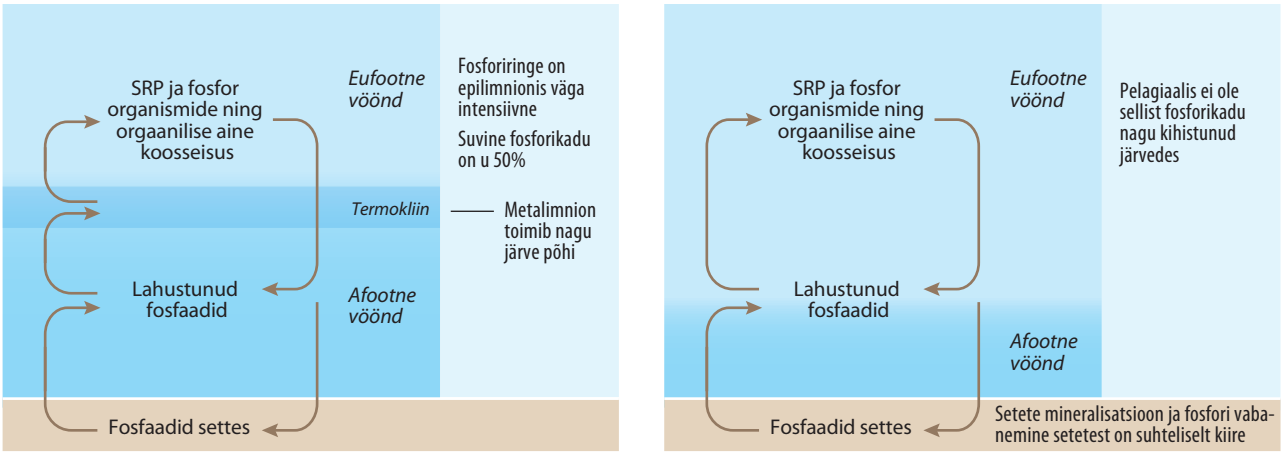



**1.222.** Fosfori vertikaalne jaotus kihistunud oligotroofses ja eutroofses järves. $P_S$ –lahustunud fosfor, $P_T$ – kogufosfor.

**FOSFORIRINGE EPILIMNIONIS JA MADALATE JÄRVEDE PELAGIAALIS** Enamik kihistunud järvede epilimnionis ja madalate järvede pelagiaalis olevast fosforist on partikulaarsel kujul (joonis 1.223). Kõige kiiremini ringlevad ortofosfaadid. Peamine protsess on fosfaatide ja partikulaarse fosfori pidev vaheldumine. Mingi osa fosforist eritavad mikroorganismid ka madalmolekulaarses orgaanilises vormis. Nende polükondensatsioonil tekivad kõrgmolekulaarsed kolloidsed ühendid. Mõlemad fraktsioonid annavad lõpuks fosfaatse fosfori, mis on fütoplanktonile ja suurtaimedele omastatav.

Sügavates järvedes toimub suvisel stagnatsiooniperioodil pidev fosfori väljasettimine epilimnionist hüpolimnioni (joonis 1.224). Ehkki toiteainete ringlus epilimnioni elustikus on väga efektiivne, settib osa sestonist läbi metalimnioni veekogu põhja. Seetõttu võib suvine fosforikadu kihistunud järve epilimnionis olla 50% või isegi rohkem. Settinud fosfor saab uuesti ringesse minna alles sügisel, kui kogu järve veemass jälle seguneb.

Madalate järvede pelagiaalis sellist fosfori kadu ei toimu (joonis 1.224), sest sette ja vee intensiivne kontakt tagab settinud aine kiire tagasipöördumise veesambasse. Ka sette suhteliselt kõrge suvise temperatuuri tõttu on mineralisatsioon ja toiteainete vabanemine sellest kiire. Niisiis on madalate kihistumata ja sügavate kihistunud järvede fosforisisalduse sesoonne käik vastupidine ning madalates järvedes avaldub sisekoormuse (*internal loading*) pikaajaline mõju.




**1.224.** Fosforiühendite dünaamika kihistunud (vasakul) ja madalas (paremal) järves.

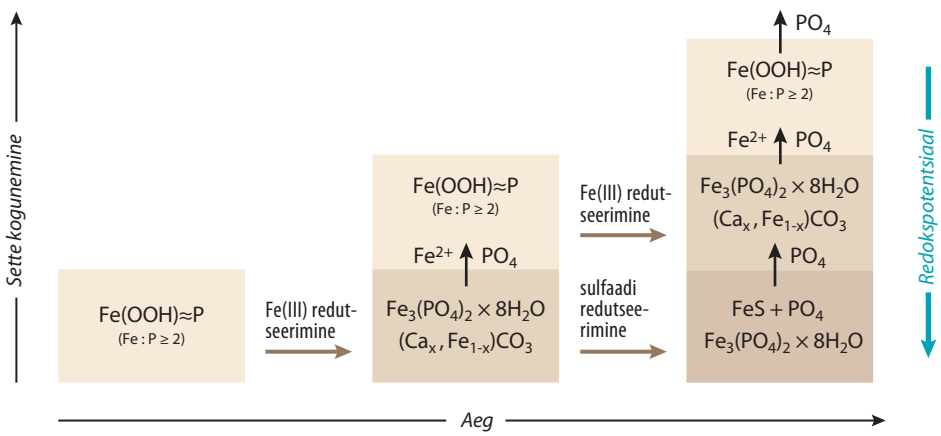
■ **FOSFOR HÜPOLIMNIONIS** Kihistunud järvedes on fosforivoog suunatud epilimnionist hüpolimnioni poole osakestega seotud fosfori settimise kaudu. Hüpolimnioni jõudnud fosforiühendid akumuleeruvad põhjasetetes järgmise segunemisperioodini.

Sette ja veesamba vaheline fosforivahetus on loodus-likus vees toimuva fosforiringe tähtsaim lüli. Setete fosforisidumise tõhusus sõltub paljudest füüsikalistest, keemilistest ja bioloogilistest teguritest. Olulisimad neist on setete võime fosforit kinni pidada, tingimused setete kohal olevas vees ja elustik, mis muudab settes toiteainete tasakaalu ning mõjutab fosfori transporti settest vette.

Fosfori ladestumine settesse toimub mitmel viisil. Mineraalne fosfor settib ja tema adsorptsioon või sadestumine anorgaaniliste ühenditega võib toimuda raua, mangaani, savi ning amorfsete oksühüdroksiidide ja karbonaatide kaasabil. Fosfor võib settida koos allohtoonse või autohtoonse orgaanilise materjaliga. Teda omastavad veesambast ka põhjavetikad ja -bakterid, vähemal määral veesisene taimestik.

Fosforisisaldus veekihis oleneb hüdrodünaamilistest ja bioloogilistest teguritest, mis mõjutavad fosfori transporti settest vette. Et põhjasette ja veekihi fosforisisalduse vahel on järsk gradient, on molekulaarne difusioon peamine mehhanism, mis sette poorivees lahustunud fosfori vette viib. Teised mehhanismid on vee segunemine tuule mõjul, sette segamine loomade poolt (selgrootud, kalad), gaasimullide eraldumine, gaaside teke mikroobide elutegevuse käigus ning taimestiku ja bentiliste vetikate elutegevus.

Oluline tegur fosfori dünaamikas on ka hüpolimnioni redokspotentsiaal (joonis 1.225). Aeroobsetes tingimustes on $Fe^{3+}$-ioonid võimelised fosforit siduma, moodustades lahustumatu sette. Anaeroobsetes tingimustes vabaneb fosfor, mis on seotud $Fe^{3+}$- ja $Mn^{4+}$-oksiidiga (juhul kui settes on juba ära kasutatud nitraadid ($NO_3^-$)), bakterite anaeroobsel hingamisel.




**1.225.** Fosforiühendite settimine ja vabanemine setteist sõltuvalt redokspotentsiaalist.

### 1.10.3. Räni

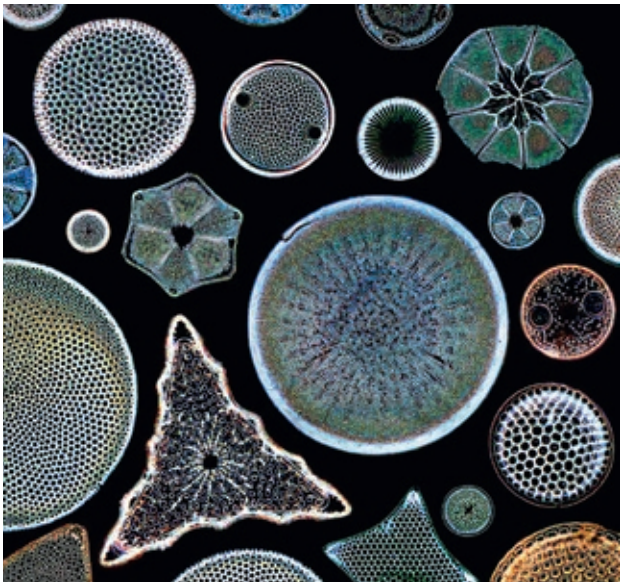
Räni on levikult hapniku järel teine element maakoores. Ta on looduslike vete püsikomponent, kuid silikaatsete mineraalide **väga nõrga lahustuvuse** tõttu, samuti seoses sellega, et räni tarvitavad mõned organismirühmad (nt ränivetikad oma skeleti ehitamiseks), on räni sisaldus pinnavetes väike. Elusorganismides on ränil eelkõige toestav ja kaitsev funktsioon. Räni esineb vees tõelise lahusena ränihappe ($H_4SiO_4$) ja metaränihappe ($H_2SiO_3$) kujul ning kolloididena $x\,SiO_2 \cdot y\,H_2O$. Dissotsieerudes moodustab ränihape derivaate, millest sisevetes on oluline ioon $H_3SiO_4^-$:

$$H_4SiO_4 \leftrightarrow H^+ + H_3SiO_4^-$$

$H_4SiO_4$ ja $H_3SiO_4^-$ vahekorra vees määrab pH. Selle vahemikus 6,5–8, mis on iseloomulik suuremale osale sisevetele, moodustab $H_4SiO_4$ 98,6–100%. Alles pH 10 juures muutub valdavaks (58,5%) ioonne vorm. Räni parema lahustuvusega vorm naatriumsilikaat $Na_2SiO_3$ moodustub reaktsioonil

$$SiO_2 + 2NaOH \rightarrow Na_2SiO_3 + H_2O$$

$SiO_2$ lahustuvus vees on 125 mg/l. Lahustunud räni leidub tavaliselt märksa vähem, sest teda kasutavad veeorganismid (eriti ränivetikad). Magevetes leidub räni u 13 mg/l. Humiinainerikkas vees võib räni hulk jääda alla 0,5 mg/l, sest räni moodustab humiinainetega väga tugevaid komplekse. Veekogudes on ränisisalduse sesoonne dünaamika seotud eelkõige ränivetikate kasvu ja väljasettimisega (joonis 1.226). Põhjasettesse maetud vetikakestades sisalduv räni võib ringest lahkuda. Veemassis vabastab räni zooplankton, tarbides ränivetikaid. Madalate järvede resuspendeeruvatest setetest vabaneb räni vette üsna kiiresti.



**1.226.** Ränivetikad on peamised lahustunud räni dünaamika mõjutajad veekogudes.

#### KÜSIMUSED JA PROBLEEMÜLESANDED

1. Milliste sisaldusvahekordade juures on siseveekogudes primaarproduktsiooni limiteerivaks elemendiks lämmastik ja milliste juures fosfor?
2. Millised elustikurühmad suudavad siduda õhulämmastikku?
3. Miks on kasvuperioodil kihistunud eutroofsete järvede hüpolimnionis ammooniumisisaldus suurem kui epilimnionis?
4. Milline on fosforiühendite sisalduse jaotus oligotroofse ja kihistunud eutroofse järve veesambas ning millised ökoloogilised protsessid seda mõjutavad?
5. Miks on lahustunud räni sisaldus rabajärvedes väike?

#### MÕISTED JA MÄRKSÕNAD

toiteained
toitained
lämmastik
makrotoiteained
mikrotoiteained
Redfieldi suhe
ökoloogiline tegur
limiteeriv toiteaine
anorgaanilised lämmastikuühendid
ammooniumlämmastik
ammonifikatsioon
nitrifikatsioon
nitritid
nitraadid
denitrifikatsioon
orgaanilised lämmastikuühendid
fosfor
lahustunud anorgaaniline fosfor
ortofosfaadid
metafosfaadid
polüfosfaadid
lahustunud orgaaniline fosfor
partikulaarne orgaaniline fosfor
partikulaarne anorgaaniline fosfor
üldfosfor
lahustuv reaktiivne fosfor
fosfaatne fosfor
fosfori allikad
fosforiringe
räni

# 1.11. Orgaaniline aine

## 1.11.1. Orgaanilise aine jaotus

Päritolu järgi jagatakse orgaaniline aine veekogudes kahte rühma*. **Allohtoonne orgaaniline aine** (*allochtonous organic matter*) on valglalt sisse kantud. Selle moodustavad peamiselt humiinained ning töötuslikku ja elukondlikku päritolu ained. **Autohtoonse orgaanilise aine** (*autochtonous organic matter*) moodustavad veekogus endas elavad organismid, nende eritised ja lagunemisel tekkivad ained. Vooluveekogudes on ülekaalus allohtoonsed ja suurtes järvedes autohtoonsed orgaanilised ained. Väikeste järvede orgaanilise aine päritolu sõltub nende toitelisuse tüübist. Rabaveekogudes domineerib allohtoonne, oligo- ja eutroofsetes veekogudes aga pigem autohtoonne komponent.

Oleku järgi võib orgaanilise aine sisevetes jagada samuti kaheks: **lahustunud orgaaniline aine** (*dissolved organic matter* – DOM) ning **lahustumata** ehk **partikulaarne orgaaniline aine** (*particulate organic matter* – POM). DOMi ja POMi eraldamiseks kasutatakse mitmesuguseid meetodeid (setitamine, tsentrifuugimine, filtreerimine). Enamikus uurimustes on nende kahe fraktsiooni piiriks võetud osakeste suurus 0,5 µm. Seega sisaldab DOM suurel hulgal kolloide ega ole käsitatav tõelise lahusena.

Tihti väljendatakse orgaanilise aine hulka ümberarvutatult puhta süsiniku kohta – **orgaanilise süsiniku koguhulk** (*total organic carbon* – TOC). Enamik orgaanilisest ainest on sisevetes lahustunud kujul. DOMi on vees tavaliselt kümme korda rohkem kui POMi ja seda omakorda viis korda rohkem kui planktonit. Kõige rohkem POMi on vooluvetes (tabel 1.22).

Orgaanilise aine poolest kõige rikkamad on naftaga kokkupuutuvad veed ja reoveed. Tavalistest sisevetest on orgaanikarikkaimad sooveed ja nendest toituvad jõed (joonis 1.227). Orgaanilise aine sisaldus võib seal ulatuda 50 mg-ni C/l.

**1.227.** Orgaanilise aine poolest on väga rikkad metsade ja soode vooluveekogud.

## 1.11.2. Orgaanilise aine koostis

Siseveekogude orgaanilises aines on esindatud peaaegu kõik tavaliste orgaaniliste ainete rühmad. Pinnases ja vees leiduv orgaaniline aine on taimset, loomset ja mikroobset päritolu mitmesuguses lagunemisastmes orgaaniliste ainete segu. Selle võib jagada humiinaineteks ja mittehumiinaineteks.

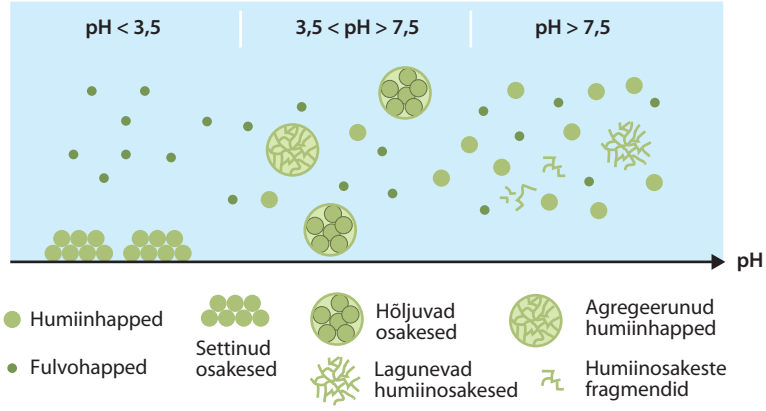
**Mittehumiinained** (suhkrud, aminohapped, lühikese ahelaga rasvhapped, valgud, vahad) moodustavad väikese osa orgaanilisest ainest (0,1 mg C/l), on kergesti lagundatavad ja kasutatakse ära sama kiiresti, kui nad tekivad. Selle POMi fraktsiooni sisaldus vees püsib väike olenemata tekkimise intensiivsusest. Kergesti lagundatav DOM satub vette nii autotroofide kui ka heterotroofide elutegevuse tulemusel. Ligi 15% fotosünteesiprotsessis tekkinud orgaanilisest ainest eraldub kohe vette DOMi kujul (aminohapped, lühikese ahelaga rasvhapped, glütserool, süsivesikud, polüsahhariidid). Näiteks zooplankton vabastab DOMi kujul 15–20% oma toidus sisalduvast süsinikust. 30% süsinikust vabaneb sel viisil pärast vetikarakkude surma.

Tabel 1.22. ORGAANILISE AINE HULK JA VORMIDE VAHEKORD LOODUSVETES

| | TOC (mg/l) | DOM (mg/l) | POM (mg/l) | DOM : POM |
|---|---|---|---|---|
| Avaookean | 0,5 | 0,45 | 0,05 | 9 : 1 |
| Põhjavesi | 0,7 | 0,65 | 0,05 | 13 : 1 |
| Sademed | | 1,0 | 0,1 | 10 : 1 |
| Oligotroofsed järved | 2,2 | 2,0 | 0,2 | 10 : 1 |
| Jõed | 7,0 | 5,0 | 2,0 | 3 : 1 |
| Eutroofsed järved | 12,0 | 10,3 | 1,7 | 6 : 1 |
| Märgalad | 17,0 | 15,3 | 1,7 | 9 : 1 |
| Soovesi | 33,0 | 30,3 | 2,7 | 11 : 1 |
| Maailma pinnaveekogude keskmine | – | 6,5 | 0,6 | 10 : 1 |

* Vt ka lk 254–255.

**1.228.** Näiteid humiinainete tõttu värvunud loodusvetest.




**1.229.** Humiinainete omadused vesikeskkonnas.

Tunduvalt suurem osa orgaanilisest ainest (70–80%) on sisevetes raskesti lagundatavate kõrgmolekulaarsete polümeeridena (fulvohapped, humiinhapped, ligniin, proteiinid) ehk **humiinainetena** (*humic material*). Nende lagunemine on tihti nii aeglane, et DOMi vanus võib ulatuda tuhandete aastateni. Humiinained on suure molekulmassiga (700–5000 D) tumedat värvi (kollased, pruunid või mustad) amorfsed ühendid (joonis 1.228), mis tekivad taimejäänuste (peamiselt ligniini ja tselluloosi) mikroobse lagunemise vahesaaduste polümerisatsioonil. Humiinainete sisaldus sisevetes varieerub tugevasti (tabel 1.23).

Iseloomu järgi jagatakse humiinained kolmeks rühmaks, mis sarnanevad üksteisega struktuurilt, kuid erinevad funktsionaalsete rühmade ja molekulmassi poolest (joonis 1.229). **Humiinhapped** (*humic acids*) on ülekaalus mustmullast toituvates vetes ja settivad happelises, kuid lahustuvad aluselises keskkonnas. **Fulvohapped** (*fulvic acids*) on iseloomulikud leedemullast toituvatele vetele ning lahustuvad nii alustes kui ka hapetes. Nad on teistest humiinainetest väiksema molekulmassiga ning neil on kõige rohkem hapnikku sisaldavaid rühmi. **Humiinid** vees ei lahustu.

Humiinainetel on fenoolsete ühendite tõttu tugevalt **antiseptilised omadused** (joonis 1.230). Nad akumuleeruvad soodes ja järvesetetes väikese redokspotentsiaali juures ning sadenevad koos kaltsiidiga karbonaatses vees. Iseloomulikeks omadusteks on veel helvestumine ehk flokulatsioon lainetuse ja fotooksüdatsioon ultraviolettkiirguse toimel. Viimane protsess paneb aluse düstroofsete ja atsidotroofsete järvede toiduahelatele, mis saavad alguse just humiinaineid lagundavatest bakteritest. Humiinained seovad väga hästi mitmesuguseid anorgaanilisi ja orgaanilisi ühendeid. Näiteks raua, fosfori, kaltsiumi ja paljude teiste ioonide dünaamika on tugevasti mõjutatud humiinainetest. Paljude mürgiste metallide ja orgaaniliste ühendite mõju, transport ja akumuleerumine on humiinainerikkas vees tavapärasest oluliselt erinev.

Veeökosüsteemide jaoks on tähtis orgaanilises aines talletuvate toiteainete hulk. Süsinikku leidub seal enamasti suurusjärgu võrra rohkem kui lämmastikku. Orgaa-

Tabel 1.23. HUMIINAINETE KOGUS ERI TÜÜPI SISEVEEKOGUDES

| Sisevee tüüp | | Sisaldus (mg C /l) |
|---|---|---|
| Põhjavesi | | 0,03–0,10 |
| Meri | | 0,06–0,60 |
| Järved | | 0,5–30,0 |
| | Oligotroofsed | 0,50–1,00 |
| | Mesotroofsed | 1,00–1,50 |
| | Eutroofsed | 1,50–5,00 |
| | Düstroofsed | 10,0–30,0 |

**1.230.** Tollundi mees (Taani). Varasest rauaajast pärit surnukeha säilis rabas kaua tänu humiinainete antiseptilistele omadustele.

niliste ainete segu lagundatakse lõpptulemusena mineraalseks süsinikuks (enamasti $CO_2$) ja anorgaanilisteks lämmastikuühenditeks. Seente ja bakterite proteolüütiline ainevahetus vabastab rohkem lämmastikku kui süsinikku ning põhjustab enamasti suhte C : N kasvu.

Maismaalt ja soodest saabuv orgaaniline aine teeb transpordil jõgedesse ja järvedesse läbi muutusi. Selle käigus lagundatakse enamik orgaanilisest lämmastikust. Üldjuhul on allohtoonses orgaanilises aines valke umbes 6% ja suhe C : N 45 : 1 – 50 : 1. Põhjus on selles, et DOM sisaldab suures koguses humiinaineid, mille lämmastikusisaldus on väike. Autohtoonne orgaaniline aine, mis tekib järvedes planktoni lagunemisel, on palju lämmastikurikkam. Selles on valke 24% ja suhe C : N ligikaudu 12 : 1. Muutused valkude, süsivesikute ja lipiidide suhtes muudavad fosfori või lämmastiku limitatsiooni tõttu ka suhet C : N. See suhe ei näita mitte ainult toiteainete olemasolu, vaid selle põhjal saab ühtlasi hinnata valgulise ja mittevalgulise osa suurust orgaanilises aines. Planktonis moodustab valguline lämmastik isegi kuni 85%. Toiteainete suhe on oluline regulaator ka fütoplanktoni koosluse liigilise koosseisu ja hulga määrajana. Kui suhe C : N ületab 14,6 piiri, on tegemist lämmastiku limitatsiooniga. Suhe vahemikus 14,6–8,3 näitab mõõdukat lämmastiku defitsiiti ja kui suhe on alla 8,3, pole lämmastik enam limiteeriv element.

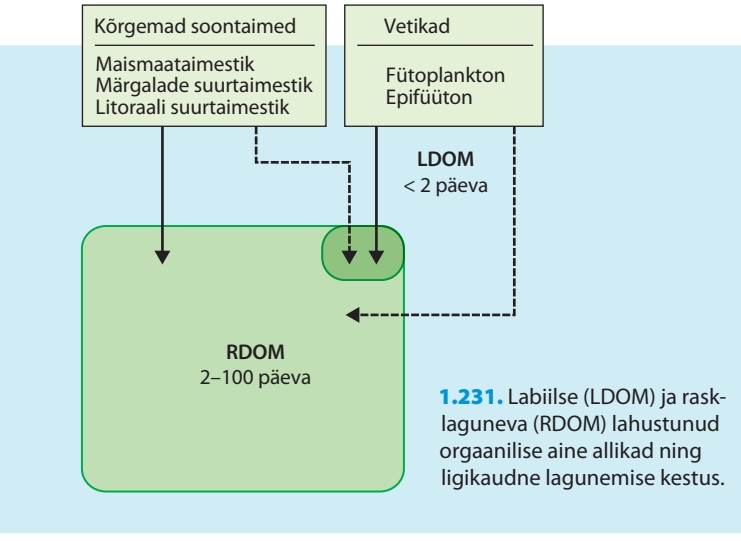
## 1.11.3. Lahustunud orgaaniline aine

Lahustunud orgaanilise aine (DOMi) tarbimine algab veekogus kohe pärast selle tekkimist, kuid tarbimise kiirus sõltub DOMi koostisest. Labiilne DOM (LDOM; joonis 1.231) moodustub peamiselt fütoplanktonist ja epifüütonist ning lagundatakse väga kiiresti. Rasklagunev DOM (RDOM) koosneb humiinainetest ja on seetõttu pikema lagunemisajaga. Vees lahustunud orgaanilist ainet suudavad kasutada nii bakterid kui ka vetikad. Bakterite puhul on see seotud rakumembraani läbilaskvusega ning algab sisalduse juures 5 µg/l. Rakku sisenemise kiirus stabiliseerub 500 µg/l juures. DOMi omastamise seisukohalt on veebakterid põhiliselt generalistid: nad on võimelised kasutama enamikku kergesti lagundatavaid substraate. Vetikarakkudesse (nt *Chlamydomonas*) liigub DOM peamiselt difusiooniseaduste kohaselt ning selle kiirus suureneb võrdeliselt sisalduse kasvuga (joonis 1.232). Vetikate transpordisüsteemi afiinsus DOMi suhtes on suurusjärgu võrra väiksem kui bakteritel. Vetikate toitumine ainult heterotroofsel viisil pole siiski tõenäoline, sest nad ei suuda bakteritega DOMi pärast konkureerida. Heterotroofia on vetikatel ilmselt ellujäämist toetava iseloomuga. Sellel võib olla oluline osa näiteks väga reostunud veekogudes. Põhilisteks DOMi tarbijateks ja lagundajateks puhtas vees on ikkagi bakterid.

Varem arvati, et humiinainete osakaal järvede toiduahelates on tühine, sest neid on bakteriaalsel teel raske lagundada. UV-kiirguse toimel lagunevad aga pikad humiinainete molekulid märksa väiksemateks üksusteks, millega bakterid kergemini toime tulevad. Lagundamine on küll aeglane (0,5–2% päevas), kuid võib kiireneda temperatuuri tõustes.

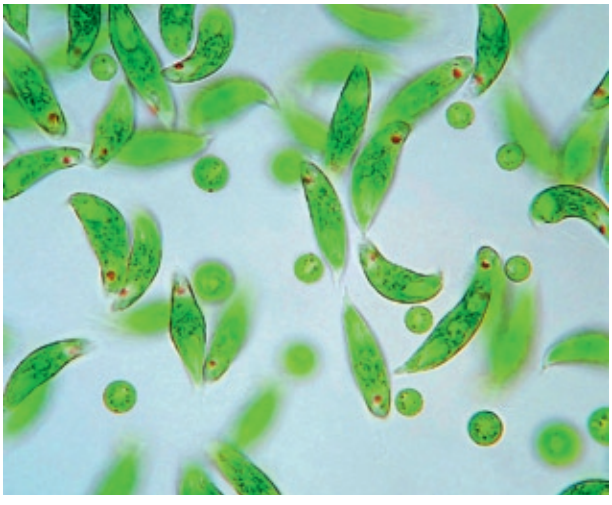
Orgaanilised ained akumuleeruvad eriti seisuvetes, kus peamised DOMi allikad on

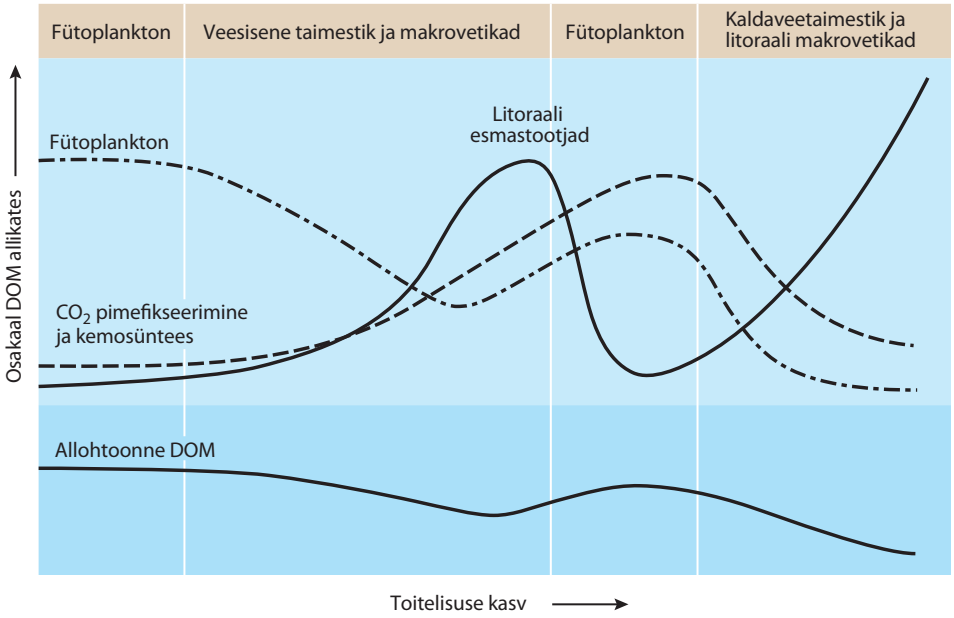
1) fotosünteesiproduktid (vabanevad fütoplanktoni või suurtaimede rakkudest ning tarvitatakse kiirelt bakterite poolt),
2) allohtoonne DOM (koosneb peamiselt humiinainetest, mis on tekkinud maismaataimestikust ja on vastupidav kiirele bakteriaalsele lagundamisele),




**1.231.** Labiilse (LDOM) ja rasklaguneva (RDOM) lahustunud orgaanilise aine allikad ning ligikaudne lagunemise kestus.

**1.232.** *Euglena viridis* on protistide hulgas üks tuntumaid heterotroofe.





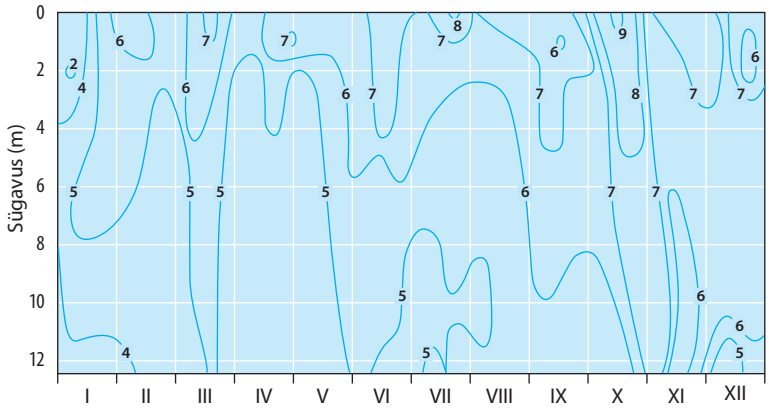

**1.233.** Peamiste DOMi tootjate (fütoplankton, kaldavee- ja veesisene taimestik, litoraalivetikad) osakaalu muutumine toitelisuse kasvades.

3) DOM, mille sünteesivad bakterid või mis on bakteriaalse lagunemise vahelüli,
4) heterotroofide, nt zooplanktoni ja kalade ainevahetusjäägid.

Vähetoitelistes järvedes on peamine DOMi allikas fütoplankton ja valglalt saabuv allohtoonne orgaaniline aine. Keskmine DOMi hulk on ligikaudu 1,5 mg C/l (düstroofsetes järvedes võib see siiski olla üle 20–30 mg C/l). Suurtes veekogudes toodab enamiku DOMist fotosünteetiliselt fütoplankton. Suure toitelisuse korral muutub peamiste esmastootjate (fütoplankton, kaldavee- ja veesisene taimestik, litoraalivetikad) omavaheline proportsioon DOMi tootmisel, suureneb litoraali osakaal ja väheneb pelagiaali oma (joonis 1.233). Kui valgla pole inimtegevuse mõjul tugevasti muutunud, jääb saabuva allohtoonse orgaanilise aine osakaal samaks. Selle osakaal järves endas toodetava orgaanilise ainega võrreldes aga väheneb. Tugeva läbivooluga düstroofsetes järvedes jääb allohtoonse komponendi osa suureks ka toitelisuse tugeva kasvu korral.

DOMi vertikaalses jaotuses puuduvad tugev kihistumine ja sisaldusgradiendid (joonis 1.234) hoolimata veesamba soojuskihistumisest ja seal leiduvatest tiheduskgradiendist. Ka sesoonsed muutused DOMi sisalduses pole märkimisväärsed. DOM koosneb peamiselt süsinikuühenditest, mis on kiirele bakteriaalsele lagundamisele vastupidavad. Nende sisaldus on suurim suvise kihistumise ajal epilimnionis ja järelikult on nende sisalduse kõikumine samuti suurim veepinna lähedal. See on seotud rakuvälise DOMiga, mille vabastavad fütoplankton, fütobentos ja litoraali suurtaimestik ning mis lagundatakse kiiresti (vähem kui 48 tunni jooksul).

**1.234.** DOMi sesoonne dünaamika kihistunud oligotroofses dimiktilises järves (mg C/l).



**1.235.** Puulehed jões on üks POMi allikaid. Jõed transpordivad suure osa POMist ning selle koostis varieerub aastaajati.

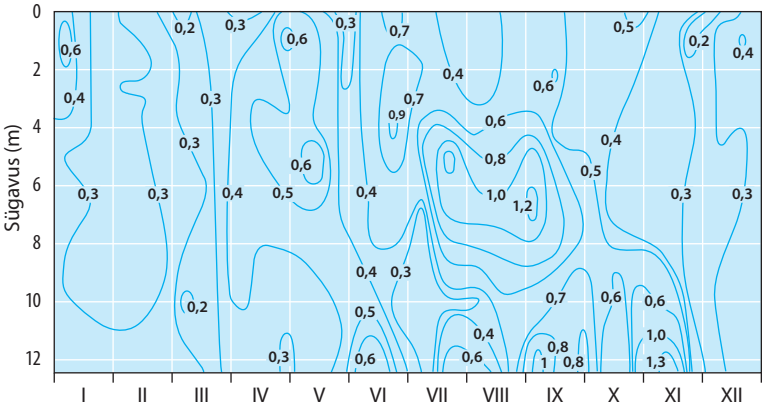
**1.236.** Liigtoitelise järve litoraalis toodetakse palju POMi. Pildil Neitsijärv Otepää vallas.

## 1.11.4. Lahustumata orgaaniline aine

Seisuvete hõljuv orgaaniline aine (POM) koosneb planktonis ja detriidis leiduvatest orgaanilistest ühenditest, mis moodustavad 10–20% orgaanilise aine koguhulgast. POMis sisalduvad nii organismide jäänused kui ka orgaaniliste ühendite agregeerumisel või helvestumisel tekkinud osakesed. **Helvestumine** ehk flokulatsioon (pH, soolade, füüsikaliste tegurite jm mõjul) on oluline näiteks humiinainete puhul.

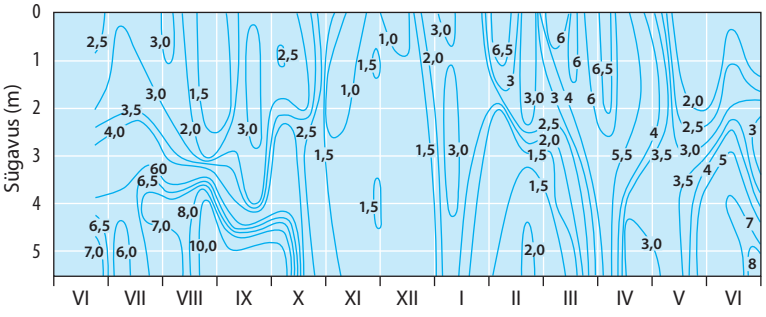
POMi allikaid sisevetes on mitu. Vooluveekogudesse ja järvede litoraali langeb palju materjali kaldal kasvavatelt puudelt (lehed, oksad, viljad). Seisuvetesse saabub suur osa lahustumata ainest jõevooluga ja atmosfääri kaudu (joonis 1.235). Tavaliselt laguneb selline POM aeglaselt (puulehed lagunevad nädalaid, puit aastaid) ning pärineb ümbritsevalt valglalt. Arvestatav osa POMist toodetakse autohtoonselt kas pelagiaalis või litoraalis (joonis 1.236). Et enamik järvi on väikesed ja madalad, on POMi koostises ülekaalus suurtaimedest ja pealiskasvust pärinev orgaanika. Paisjärvedes on autohtoonse ja allohtoonse POMi osakaal enamasti võrdne.

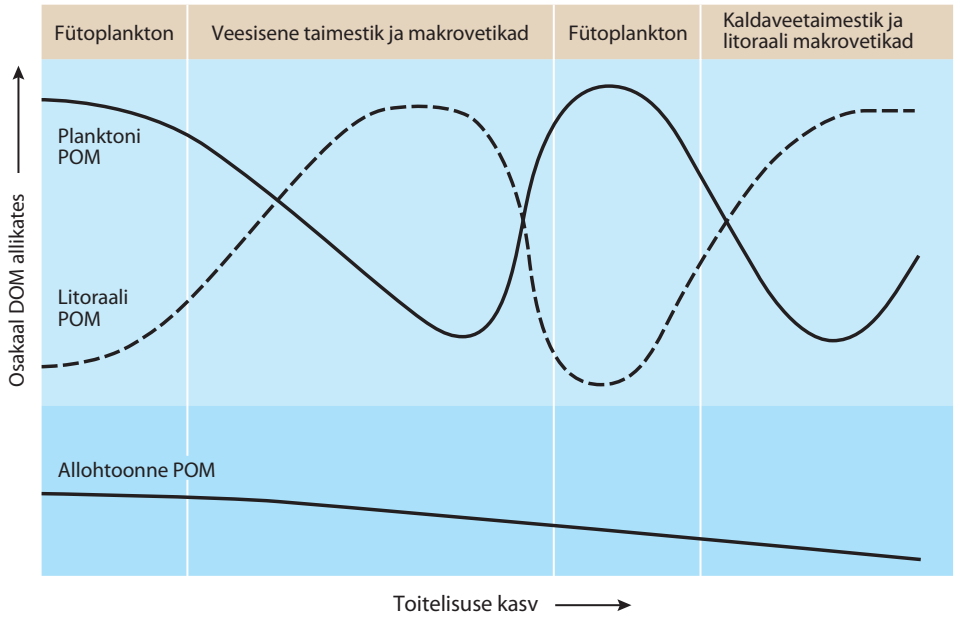
POMi vertikaalne jaotus järvedes pole erinevalt DOMi omast ühtlane. Oligotroofsetes ja mõõduka toitelisusega järvedes järgib POMi sisaldus primaarproduktsiooni ja fütoplanktoni jaotust ning peamise osa temast moodustavad elusrakud (joonis 1.237). Tihedusgradientide suure erinevuse tõttu kogunevad väiksemad osakesed metalimnioni. Talviti on POMi kogus väike, sest enamik temast settib põhja ja valglalt saabub vähe materjali. Kevadisel ja sügisesel segunemisperioodil on POMi sisaldus suurem, sest põhjasetted keerutatakse lainetusega üles. Väga suurtes ja madalates järvedes (nt Võrtsjärves) sõltub POMi hulk eriti palju tuule tugevusest. POMi tarbivad avavees zooplankton ja kalad ning nende lagundamises on oluline osa kinnitunud heterotroofsetel bakteritel. Sügavates järvedes lagundatakse enamik POMi veemassis ja põhja sadeneb vaid 1–2% fotosünteesiprotsessis fikseeritud süsinikust. Mida madalam on veekogu, seda rohkem materjali põhja jõuab ning seda rikkalikum on põhjaelustik. Madalates eutroofsetes järvedes võib akumuleeruda 10–20% esmasproduktsioonist.




**1.237.** POMi sesoonne jaotus oligotroofses Lawrence'i järves (mg C/l).

**1.238.** POMi sesoonne jaotus hüpertroofses Wintergreeni järves (mgC/l).

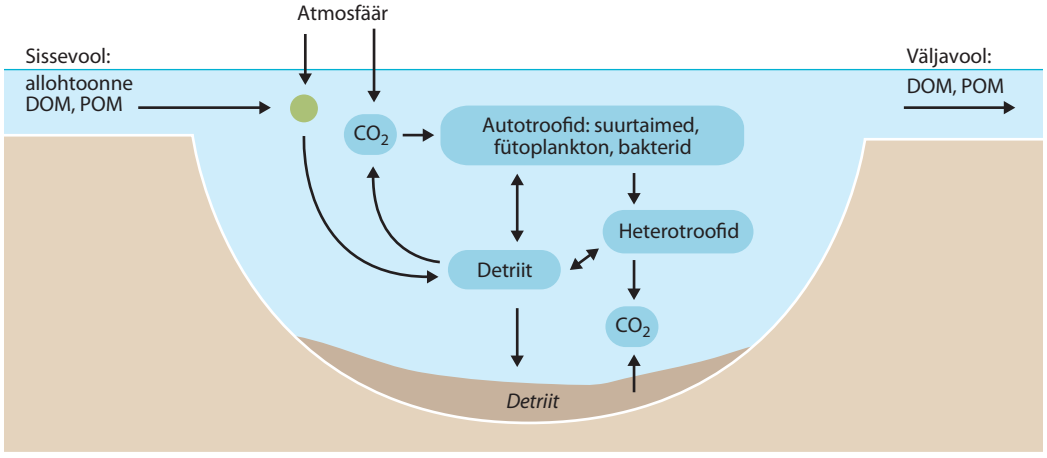




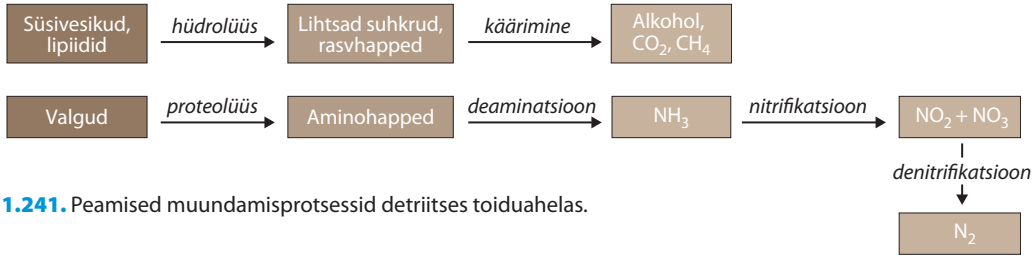

**1.239.** POMi allikate osakaalu muutus toitelisuse kasvades.

POMi sesoonne jaotus on vähe- ja rohketoitelistes järvedes enam-vähem ühesugune, ehkki rohketoitelised sisaldavad palju planktilist ja litoraalist pärinevat hõljuvat orgaanilist ainet (joonis 1.238). Hüpolimnion muutub neis kiiresti anaeroobseks ning bakteriaalne produktsioon suurendab oluliselt POMi hulka. Järve suktsessiooni käigus muutub ka peamine POMi allikas (joonis 1.239).

POMil põhineb suuresti **detriitne toiduahel**. See on veeökosüsteemi energia- ja aineringe osa, milles orgaanilise aine keemiliste sidemete energia muutub elusorganismidele kättesaadavaks (joonis 1.240). Detriitses toiduahelas omastavad elusorganismid nii lahustunud kui ka partikulaarset detriitset süsinikku. Ahela käivitavad heterotroofsed bakterid, kes kasutavad detriitset substraati (joonis 1.241).




**1.240.** Detriitne toiduahel.




**1.241.** Peamised muundamisprotsessid detriitses toiduahelas.

## 1.11.5. Mürgised orgaanilised ühendid

Suur hulk orgaanilisi aineid väärib tähelepanu seetõttu, et nad on vee-elustikule rohkem või vähem mürgised. Enamasti on need inimeste toodetud ja sisevetesse sattunud hooletuse tõttu.

**Õlisid ja rasvu** leidub siseveekogudes emulsioonina või väikeste hõljuvate osakestena. Nende allikaks võivad olla tööstusheitmed, määrdeõlid, naftasaadused ning vetikate ja kalakasvatuses kasutatavate söötade lagunemine. Osa õlisid ja rasvu lahustub detergentide toimel, kuid enamik jääb lahustumatuks ka tugeval töötlemisel. Peale otsese mürgisuse ummistavad need orgaanilised ühendid veeloomade lõpuseid, mille tagajärjeks on lämbumine. Õhukese kihina veepinda kattes takistab õli gaasivahetust vee ja atmosfääri vahel. Veekogude põhja kattev rasvade ja õlide kiht hävitab põhjaloomastiku ja -taimestiku.

**Fenoolseid ühendeid** tekib tihti benseenist, mis on tugev kantserogeen. Sageli on fenoolsed ühendid söe- ja naftatööstuse kõrvalsaadused. Neid vabaneb vette ka puidu utmisel. Tuntuimad esindajad on fenool, kreosoot ja resortsinool. Fenoolsete ühendite mürgisus varieerub liigiti ja sõltub keskkonnatingimustest. Tihti on reostus diagnoositav vaid siseorganite histopatoloogia põhjal.

**Polüklooritud difenüülid** (PCB) on keemiliselt stabiilsed ühendid, mida kasutatakse määrdeainetena, märgumatute materjalide tootmisel, soojusvahetites, hüdraulikavedelikena jm. Lisaks benseenituumale sisaldavad nad 1–10 kloori aatomit. Nad on kahjulikud nii akuutse mürgisuse kui ka akumuleerumise tõttu (joonis 1.242). Peale selle võivad polüklooritud difenüülid muuta mürgiseks ka muid orgaanilisi ühendeid.

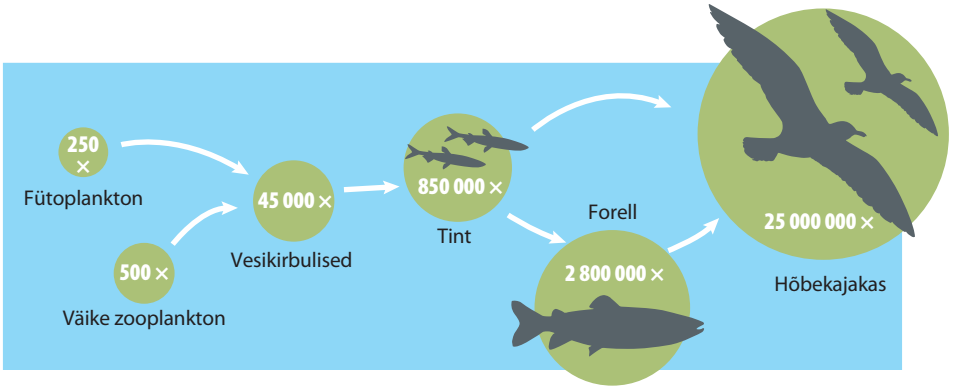
Akumuleeruvad mürgid on mitmesugused detergendid, mida kasutatakse puhastusvahendites. Kudedes ja keskkonnas mitteakumuleeruvad biolagunevad detergendid on tavalistega võrreldes veelgi mürgisemad. Veekogudele on probleemiks ka polüvinüülkloriidi sisaldavad ftaleiinid ja fosfaatestrid.

## 1.11.6. Orgaaniliste ainete sisalduse mõõtmine

Orgaaniliste ainete hulka vees väljendatakse ümberarvutatult puhta süsiniku kohta (mg C/l) või hapnikutarbena. Ainete täpse molekulaarstruktuuri määramiseks kasutatakse mitmesuguseid kromatograafilisi meetodeid.

**BIOKEEMILINE HAPNIKUTARVE** **Biokeemiline hapnikutarve BHT** (*biochemical oxygen demand* – BOD) väljendab hapniku hulka, mis kulub vees leiduvate organismide elutegevuseks. Seda mõõdetakse pimedas 20 °C juures kas 5, 7 või 20 ööpäeva jooksul (vastavalt $BHT_5$, $BHT_7$, $BHT_{20}$). BHT näitab kergesti laguneva orgaanilise aine hulka vees ja seda kasutatakse orgaanilise reostuse hindamiseks. BHT väärtus üle 2,0 mg $O_2$/l võib viidata vee reostumisele antropogeenset päritolu orgaanilise ainega. **Primaarne BHT** väljendab vette sattunud allohtoonsest orgaanilisest ainest tingitud hapnikutarvet (nt reovee sisselaskme või jõesuudme ümbruses). **Sekundaarne BHT** tähistab hapniku kulu autohtoonse (veekogus endas tekkinud) orgaanilise aine lagundamiseks. BHT ei sobi mürkaineid sisaldavate vete hindamiseks, sest bioloogiline tegevus on seal pärsitud.

**KEEMILINE HAPNIKUTARVE** **Keemiline hapnikutarve KHT** (*chemical oxygen demand* – COD) väljendab vees olevate keemiliselt oksüdeeritavate ainete hulka. Anaeroobsest keskkonnast võetud proovide puhul põhjustavad keemilist hapnikutarvet peale orgaaniliste ainete ka mõned redutseerunud anorgaanilised ühendid. Oksüdantidena kasutatakse peamiselt kaaliumpermanganaati ($KMnO_4$) ja kaaliumdikromaati ($K_2Cr_2O_7$) ning vastavaid tunnuseid nimetatakse **permanganaatseks** ($KHT_{Mn}$) ja **dikromaatseks hapnikutarbeks** ($KHT_{Cr}$). Permanganaatne oksüdeeritavus viitab eelkõige kergesti laguneva, hiljuti moodustunud orgaanilise aine olemasolule vees. Dikromaatse oksüdeeritavuse põhjal hinnatakse orgaanilise aine üldist sisaldust, sest $K_2Cr_2O_7$




**1.242.** Polüklooritud difenüülide akumuleerumine Ontario järve toiduahelates.

oksüdeerib 85–95% kogu orgaanilisest ainest. Oksüdeerumata jäänud osa orgaanilisest ainest koosneb peamiselt aromaatsetest ühenditest. Pinnavee oksüdeeritavus on suurem kui põhjavee oma, sest pinnavesi puutub kokku pinnase ja turbaga, mis sisaldavad taimejäänuseid, humiinaineid ning mitmesuguseid lagunemise ja humifikatsiooni vaheprodukte.

Kogu orgaanilise süsiniku (TOC) analüüsil hinnatakse orgaanilises aines oleva süsiniku hulka, arvestamata selle funktsionaalseid rühmi või lagundatavust. Kasutatakse spetsiaalseid analüsaatoreid, kus aine oksüdeeritakse süsihappegaasini väga kõrgel temperatuuril. Kogu orgaaniline aine viiakse lõpptulemusena süsihappegaasi kujule, mille hulk mõõdetakse ära. Orgaanilise aine koostist hinnatakse järgmise tasakaaluvõrrandi järgi:

$$C_aH_bN_cO_d + (a + \frac{b}{4} - \frac{d}{2})O_2 = aCO_2 + \frac{b}{2}H_2O + \frac{c}{2}N_2$$

TOCil on hapnikutarbega vaid ligikaudne seos ning ta sobib pigem rasklagunevate ja spetsiifiliste orgaaniliste ainete, näiteks naftasaaduste määramiseks.

**SPEKTROFOTOMEETRIA** Kuigi humiinainetel on sisevetes väga suur tähtsus, pole nende otsene määramine lihtne. Samas on humiinainetel omadus muuta vee värvust, mistõttu nende kogust saab hinnata ka visuaalselt. Täpsemaks määramiseks kasutatakse spetsiaalseid mõõteseadmeid – spektrofotomeetreid. Humiinaineid sisaldavat vett läbides valgus neeldub neis ja seda on võimalik täpselt mõõta. Seejuures tuleb arvestada humiinainete suurt heterogeensust: neil võib olla nii karboksüülhapetele, fenoolidele, alkoholidele, amiinidele, amididele, ketoonidele kui ka estritele iseloomulikke tunnuseid. Seetõttu pole võimalik kasutada nende määramiseks ühte kindlat lainepikkust. Enamasti kasutatakse nn UV-Vis-spektrofotomeetreid, mis mõõdavad neeldumist vahemikus 190–800 nm. Katsetega on kindlaks tehtud, millise lainepikkusega valgus ühes või teises humiinainerühmas neeldub. Selle põhjal saabki hinnata orgaaniliste ühendite kvantitatiivset ja kvalitatiivset sisaldust vees (tabel 1.24). Spektrofotomeetrilise analüüsi eelisteks on kiirus, vajalike eeltööde puudumine, väikesed proovikogused, kemikaalide tarbetus ning võimalus määrata orgaaniliste ainete sisaldust nii kvalitatiivselt kui ka kvantitatiivselt.

**Tabel 1.24. ORGAANILISE AINE ISELOOMUSTAMISEKS SOBIVAD LAINEPIKKUSED**

| Lainepikkus | Näitaja |
|---|---|
| 250 nm, 330 nm, 350 nm | TOC, DOC, DOM |
| 285 nm | DOC |
| 254 nm | DOC, TOC, BHT, KHT |
| 272 nm, 280 nm | Aromaatsed rühmad, molaarmass |
| 250nm / 365 nm | Aromaatsed rühmad, molaarmass |
| 465 nm / 665 nm | Humifikatsioon, molaarmass, aromaatsed rühmad |

## KÜSIMUSED JA PROBLEEMÜLESANDED

1. Teie töörühma ülesanne on hinnata orgaanilise aine hulka jões, mis on tugevalt reostunud sõnniku, silomahla ja pestitsiididega. Teie kolleegi arvates on kõige sobivam näitaja $BHT_7$. Kas nõustute temaga või soovitate kasutada mõnd teist meetodit? Põhjendage vastust.
2. Ühest orgaanilise ainega reostunud pinnaveekogust võetud veeproovis mõõdeti orgaanilise süsiniku koguhulk ja biokeemiline hapnikutarve. Süsiniku hulk järvevees oli suur, hapnikutarve seevastu väga väike. Mida võiksid saadud tulemused ütelda orgaanilise aine päritolu ja iseloomu kohta?
3. Põldude väetamisel lisatakse mulda peamiselt lämmastikku, fosforit ja kaaliumi. Kuidas nende toiteainete ärakanne veekogudesse võib suurendada biokeemilist hapnikutarvet?
4. Kas keemiline hapnikutarve võiks olla sobiv üksiknäitaja Eesti järvede klassifitseerimisel? Põhjendage vastust.
5. Humiinained ja karbonaatne puhversüsteem suurendavad veekogude puhverdusvõimet. Kas näiteks rabavee lupjamine võiks puhverdusvõimet veelgi suurendada?

## MÕISTED JA MÄRKSÕNAD

allohtoonne orgaaniline aine
autohtoonne orgaaniline aine
lahustunud orgaaniline aine (DOM)
labiilne DOM (LDOM)
rasklagunev DOM (RDOM)
lahustumata e partikulaarne orgaaniline aine (POM)
orgaanilise süsiniku koguhulk (TOC)
mittehumiinained
humiinained
humiinhapped
fulvohapped
humiinid
helvestumine e flokulatsioon
detriitne toiduahel
fenoolsed ühendid
polüklooritud difenüülid
biokeemiline hapnikutarve (BHT)
primaarne BHT
sekundaarne BHT
keemiline hapnikutarve (KHT)
permanganaatne hapnikutarve
dikromaatne hapnikutarve
spektrofotomeeter

**1.243.** Kooraste Linajärve setted on reostunud, sest järve kasutati varem linaleotuseks. Seetõttu on põhjakihtide toiteainesisaldus äärmiselt suur (kogufosfor üle 1000 mg/m$^3$ ja kogulämmastik üle 5000 mg/m$^3$) ning järve vesi värvub juba aastakümneid igal aastal kasvuperioodil roheliseks.

# 1.12. Järvesetted

Siin käsitleme järvesetteid, sest järved on vooluvetega võrreldes olulisemad setete kogunemise kohad.

Järvenõgudesse settib valdavalt orgaanilisest ainest koosnev materjal, mis on kujunenud peamiselt kolmel teel: (1) organismide elutegevus, (2) valglalt pärinevate kivimite murenemissaaduste sissekanne, (3) vees lahustunud ainete geokeemiline sadenemine. Sageli mõjuvad need kolm tegurit korraga. Setted kuhjuvad eriti järve sügavamates osades, kuhu ei ulatu lainetuse mõju. Nende horisontaalne levik järves sõltub valitsevate tuulte suunast ja järve morfomeetriast. Enamasti on settekiht paksem tuulepealse kalda pool, samuti kitsastes järvesoppides, kus vesi vähem liigub. Selliseid järveosi nimetatakse **akumulatsioonipiirkondadeks**. Järve tuultele avatud osad on **erosioonipiirkonnad**, kuhu setteid ei kogune.

Järvesetetes on kolm põhilist komponenti: orgaaniline aine (pärit bioproduktsioonist või allohtoonne), autogeenne mineraalne komponent ($CaCO_3$, $Fe^{2+}$- ja $Mn^{4+}$-ühendid, ränivetikate kojad jm) ning terrigeenne komponent (savi, liiv, kruus).

Järvesetteid klassifitseeritakse kas koostise või tekkeviisi järgi. Üks võimalus on jagada nad jütjaks ja düüks. Järvemuda ehk **jütja** on aeroobses keskkonnas moodustunud sete, milles süsiniku ja lämmastiku atomaarne suhe (C : N) on alla 10. Kui jütja koosneb valdavalt ränivetikate kodadest, nimetatakse seda **diatomiidiks**. **Düü** on valdavalt soojärvedes moodustuv tume sete, mille orgaaniline komponent sisaldab rohkesti huumusaineid ja suhe C : N on 10–20.

20. sajandi alguses võttis Saksa teadlane Robert Lauterborn kasutusele mõiste **sapropeel**, mille all esialgu mõisteti eutroofsetes järvedes moodustuvaid anaeroobseid setteid. Hiljem laienes see nimetus kõigile rohke orgaanilise aine sisaldusega järvesetetele.

Jõgede sissekantud, kallaste abrasioonil tekkinud või järves moodustunud autogeenseid mineraalseid setteid ehk **purdsetteid** jaotatakse nende granulomeetrilise

koosseisu järgi rahvusvaheliselt tunnustatud Krumbeini φ-skaala alusel järgmiselt:

- kruus 2–64 mm,
- liiv 63 µm – 2 mm,
- aleuriit 2–63 µm,
- saviosakesed < 2 µm.

Kui $CaCO_3$ sisaldus purdsetetes ületab 50%, nimetatakse selliseid setteid **järvelubjaks** („kriit" ja „mergel" ei ole soovitatavad terminid).

Järvesetteid on kasutatud allikmaterjalina geoloogias ja paleolimnoloogias. Viimasel ajal on setete analüüsi üha enam hakatud rakendama keskkonnakontrollis, sest setetes akumuleeruvad nii kantserogeensed ained (kloororgaanilised ühendid, polütsüklilised aromaatsed süsivesinikud), raskmetallid (nt Hg, Cu, Pb, Cd, Zn jt) kui ka biogeensed ained. Suurt tähelepanu pööratakse setetes leiduvale fosforile ja selle setetest vabanemise mehhanismile.

### 1.12.1. Setete fosfor

Põhjasetete osa järvede aineringes hakkas 1920. aastatel põhjalikumalt uurima Rootsi limnoloog Einar Naumann (vt ääremärkus 1.15). Ta jõudis arusaamisele, et aktiivses ainevahetuses veega on umbes 10 cm paksune settekiht, millest sügavamale jäävad osad moodustavad stabiliseerunud sette, mis ainevahetuses ei osale. 1940. aastatel näitasid Wilhelm Einsele Saksamaal ja Clifford H. Mortimer USAs, et kihistunud järvedes lahustub fosfor setetest juhul, kui hüpolimnionis tekib hapnikupuudus. Seda seostati raua redutseerumisega anaeroobses keskkonnas ja $Fe^{2+}$-fosfaadi lahustuvusega. Mitme järve taastamisprojekti luhtumine 1970. aastatel näitas, et fosfori väliskoormuse vähendamine ei too alati kaasa fosforisisalduse vähenemist ka madalates aeroobse põhjaga järvedes. Järelikult peab fosfor vabanema setetest ka neis tingimustes. Fosfori hulk settes võib sadu kordi ületada tema hulka vees. Seepärast võib vähimgi leke põhjustada järvele kestva suure sisekoormuse. Fosfori hulk settes ei näita siiski tema vabanemise potentsiaali. On oluline, millistesse ühenditesse on ta seotud. Fosfor koguneb setetesse mitmel viisil, millest peamised on

1) ortofosfaadi settimine raud-, kaltsium- ja alumiiniumfosfaadina;
2) fosfaadi adsorptsioon ja settimine järve kantud mineraalosakeste pinnal;
3) fosfaadi adsorptsioon ja settimine autogeense $CaCO_3$ osakestel;
4) komplekside moodustamine ja settimine allohtoonse orgaanilise ainega (humiinainega);
5) settimine autohtoonse orgaanilise aine koosseisus;
6) assimilatsioon põhjaelustiku poolt (fütobentos, bakterid);
7) vähesel määral adsorptsioon küllastumata põhjasetetele.

Väetamiskatsed oligotroofsetes järvedes (nt Kanadas nn eksperimentaalses järvepiirkonnas) on näidanud, et väikese fosforisisaldusega lubja-, savi- ja huumusainerikkad setted seovad tõhusalt fosforit. Fosfori sisekoormuse tekkeks peavad setted olema **fosforist küllastunud**. Fosforivormide kindlakstegemiseks ekstraheeritakse need settest mitmesuguste lahustitega, näiteks hapete, aluste ja soolade lahustega. Iga lahusti lahustab fosforit paljudest ühenditest, kuid vastava fosforifraktsiooni kirjelduses nimetatakse tavaliselt vaid kõige olulisemaid ühendeid.

1) $NH_4Cl$-lahusega ekstraheerimisel vabaneb **seotud fosfor** (*loosely bound P*), mille moodustab peamiselt lahustunud või osakeste pinnale adsorbeerunud ortofosfaat.
2) NaOH-ga ekstraheerimisel vabaneb raua ja alumiiniumiga **keemiliselt seotud fosfor**. NaOH ekstraktis on ka lahustumata orgaanilist fosforit, mis leitakse selle ekstrakti üldfosforianalüüsi abil.
3) HCl-ga ekstraheerimisel vabaneb **kaltsiumiga seotud fosfor** (*calcium-bound P*).
4) Üldfosfori ja ülalnimetatud fraktsioonide vahe annab **orgaanilise ainega seotud fosfori**.

1.15 ÄÄREMÄRKUS

**EINAR NAUMANN**

Einar Christian Leonard Naumann (1891–1934) oli Rootsi limnoloog. Ta asutas 1929. aastal Lundi Ülikooli juurde limnoloogiainstituudi, kus oli ise botaanika ja limnoloogia dotsent. Tema põhiline huviobjekt oli fütoplankton. Naumann jõudis oma uurimustes järeldusele, et järves leiduva fütoplanktoni hulk (produktsioon) sõltub peamiselt fosfori ja lämmastiku hulgast. Planktonirikastes veekogudes peab toiteaineid palju olema ja planktonivaestes, vastupidi, vähe.

Järvede toitelisuse iseloomustamiseks tõi ta limnoloogiasse mõisted „troofsus", „oligotroofne" ja „eutroofne". Järvede vetikaproduktsioon on omakorda seotud valgla geoloogiliste iseärasustega. Nii on põllumajanduspiirkondade karbonaatsel mullal asuvad järved „rohelisemad" kui graniitsel aluspõhjal paiknevad metsajärved. Eri tüüpi järvede vahel valitseb Naumanni arvates ontogeneetiline seos: vananedes järvede troofsus kasvab. See pani aluse hilisemale looduslikul akumulatsioonil põhinevale järvetüpoloogiale.

Oma lühikese elu jooksul suutis Naumann avaldada 297 publikatsiooni, nende hulgas mitu raamatut, millest tuntuim on 1931. aastal ilmunud „Limnoloogia terminoloogia" („Limnologische Terminologie").

Peale loetletute on veel terve hulk fraktsioneerimismeetodeid, mille puhul kasutatakse teisi lahusteid ja seega saadakse ka teistsuguseid fosforifraktsioone (näiteks apatiitne fosfor, mitteapatiitne fosfor).

Varem räägiti veeanalüüside puhul üldfosforist (*total P*) ja fosfaatsest fosforist (*phosphate P*). Viimase all mõisteti lahustunud fosforit, mis filtreerimisel jäi filtraati. Tegelikult on teatud osa lahustunud fosforist seotud lahustunud orgaanilistesse ühenditesse ja seega taimedele eksoensüüme kasutamata kättesaamatu.

Tänapäeval nimetatakse lahustunud fosfori analüüsil saadavat fosforit **lahustuvaks reaktiivseks fosforiks** (*soluble reactive phosphorus* – SRP), mille moodustavad lahustuva fosfori mineraalsed ja orgaanilised vormid, mis analüüsis kasutatava molübdeeniga annavad värvusreaktsiooni.

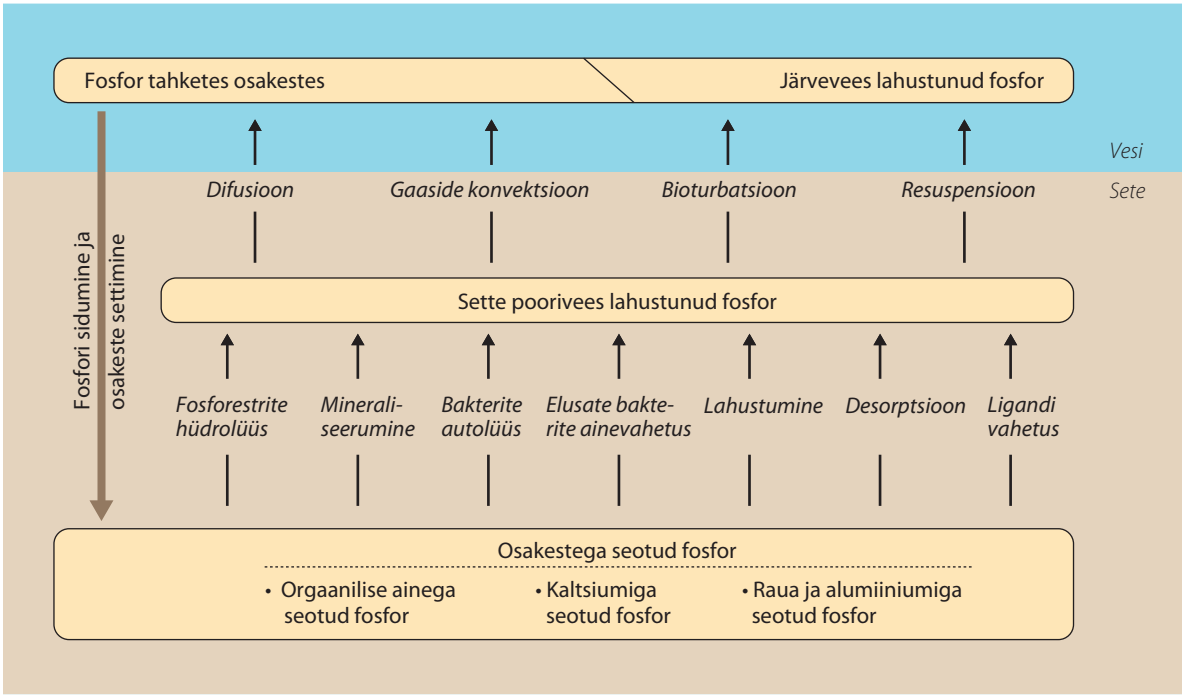
## 1.12.2. Setete poorivesi

Sette pindmises kihis, nn lendmudas, on vett kuni 95% või rohkemgi. Vaid osa sellest on keemiliselt seotud. Ülejäänud on vaba vesi ehk poorivesi. Madalates järvedes võib oluline osa järve veest kuuluda poorivee koosseisu. Setete ainevahetus järve veemassiga toimubki poorivee vahendusel. Oligotroofsetes järvedes on sette poorivee fosforisisaldus 0,01–0,5 mg/l, eutroofsetes järvedes 0,1–15 mg/l. Fosforisisalduse gradient järvevee ja sette poorivee vahel on suur (sisaldus erineb kümneid kordi) ning sesoonselt muutlik.

Settes akumuleerunud fosfori vabanemine poorivette toimub mitmesuguste keemiliste, füüsikaliste ja bioloogiliste protsesside tulemusena. Neid protsesse mõjutavad temperatuur, kelaatide olemasolu, pH ja redokspotentsiaal.

Fosfori liikumist sette ja vee vahel on kujutatud joonisel joonisel 1.244.

1) Desorptsioon on molekulaarjõududega või keemiliselt seotud fosfaatide minek lahusesse.
2) Lahustumine toimub ioonivahetuse teel fosfaadi ja hüdroksüüliooni vahel.
3) Lahustumine toimub **ligandi** vahetamise teel kelaatide vastu. Ligand on kompleksi moodustajaga seotud molekul (analoogne iooni või radikaaliga). **Kelaadid** on metallide tsüklilised kompleksühendid (sageli bioloogilist päritolu, ka näiteks klorofüll ja hemoglobiin). Bakterid ja vetikad on võimelised tootma kelaate, mis tõrjuvad fosfori välja Ca-, Fe-, Mn- ja Al-kompleksühenditest.
4) Fosforestrite hüdrolüüs. Bakterid ja vetikad toodavad ensüüme (nn aluselisi fosfataase ja polüfosfaadi esteraase), mille abil hüdrolüüsivad orgaanilisi polüfosfaate.
5) Lahustumine bakterite autolüüsil elukeskkonna muutudes (nt üleminekul aeroobselt keskkonnalt anaeroobsele).
6) Elusate bakterite ainevahetuse kaudu.
7) Vabanemine orgaanilise aine mineraliseerumisel.




**1.244.** Fosfori liikumine settest järvevette (selgitus tekstis).

Peamiste keskkonnategurite mõju poorivee koostise kujunemisele on järgmine.

**Temperatuuril** on kahepoolne mõju. Temperatuuri tõus aktiveerib bakterite tegevust, mistõttu suureneb hapniku tarbimine. Hapnikuvaru vähenemine alandab redokspotentsiaali, mis omakorda mõjutab bakterite tegevust, sest määrab keskkonna aeroobsuse või anaeroobsuse. Anaeroobsetes tingimustes kasutavad bakterid alternatiivseid elektronide aktseptoreid, nagu $Fe^{3+}$, $NO_3^-$ või $SO_4^{2-}$, mis muudab oluliselt keskkonna kemismi. Temperatuuri tõus hapnikurikkas keskkonnas suurendab ka põhjaloomastiku aktiivsust. Nende setteid segav tegevus (bioturbatsioon) aitab kaasa poorivee transpordile.

**pH**. Vegetatsiooniperioodil tõstab vetikate fotosüntees pH-d. Eutroofsetes järvedes võib see kerkida 9–10-ni. See vähendab raua ja alumiiniumi kompleksühendite võimet siduda fosfaate. Nende adsorptsioonivõime on suurim nõrgalt happelises keskkonnas pH 6 juures. Kõrgema pH korral tõrjub $OH^-$-ioon fosfaadi metallikompleksist välja. See toimub eriti intensiivselt setetes, mis on fosforist küllastunud. Sel viisil saab võimalikuks fosfori vabanemine ka aeroobsesse järvevette. Vastupidine mehhanism on seotud $CaCO_3$-ga, mis pH tõustes sadestub välja, viies endaga kaasa ka adsorbeerunud fosfaate. Samal ajal toimub setetes intensiivne orgaanilise aine lagunemine, mille tagajärjel pH langeb ja osa settinud fosforist läheb taas lahusesse.

**Redokspotentsiaal**. Klassikalise keemilise mudeli järgi seob $Fe^{3+}$ aeroobses keskkonnas tõhusalt fosfaatioone. Kui redokspotentsiaal langeb alla 200 mV, redutseerub raud $Fe^{2+}$-ks ja seotud fosfor läheb lahusesse. Paralleelselt toimib teine mehhanism: anaeroobsetes tingimustes kasutavad bakterid elektronide aktseptorina $NO_3^-$, $Fe^{3+}$ või $SO_4^{2-}$, kusjuures kõigepealt redutseeritakse nitraadid. Sel moel võiks nitraatide rohkus järves pidurdada fosfori vabanemist, mis jääks seotuks rauaga. Kõik need anaeroobse hingamise viisid on aga seotud orgaanilise aine lagundamisega. Nitraatide rohkus kiirendaks mineralisatsiooni ja seeläbi orgaanilise ainega seotud fosfori vabanemist. Kui bakterite elutegevuse tulemusena redutseeritakse sulfaadid $H_2S$-ks, seob see endaga raua, moodustades musta värvi raudsulfiidi. Setete süsimust värvus anaeroobse põhjaga kihistunud järvedes annabki tunnistust raua seotusest raudsulfiidina ja seetõttu tugevast fosfori lekkest.

Poorivee transport toimub peamiselt viiel moel.

1) *Difusioon*. Et fosfori sisaldusgradient järvevee ja poorivee vahel on suur, liigub fosfor ülespoole. Kui ta ei kohta piirpinnal suurt redokspotentsiaali hüpet, võib ta kergesti difundeeruda vabasse vette. Difusiooni kiirus sõltub sisaldusgradiendist.
2) *Vee liikumine*. Et settest difundeerunud fosfor kantakse turbulentsete vooludega sette pinnalt ära, jääb gradient püsima, mis soodustab difusiooni. Vee intensiivse liikumise korral resuspendeerub pindmine settekiht ja poorivesi seguneb järveveega.
3) *Bioturbatsioon* on setete segamine veeloomade elutegevuse tulemusena. Olulist osa bioturbatsioonis etendavad zoobentos ja bentostoidulised kalad.
4) *Gaaside eraldumine setete üleküllastumisel*. Tekivad $N_2$, $CO_2$, $CH_4$ ja $H_2S$ mullid, mis üles tõustes põhjustavad settes konvektsioonivoolusid.
5) Kõrgemad *veetaimed talitlevad toiteainete pumbana*, tuues neid sügavamatest settekihtidest ülespoole.

## KÜSIMUSED JA PROBLEEMÜLESANDED

1. Paljudes Eesti järvedes on järvelubjalasundid. Miks on need tekkinud ja kas tulevikus võib neid veel tekkida?
2. Nimetage põhilised protsessid, mille tulemusena lahustub fosfor settest vette.
3. Kuidas mõjutab redokspotentsiaal fosfori vabanemist settest?
4. Kui suur on erinevus settes, poorivees ja järvevees oleva fosfori koguse vahel?

## MÕISTED JA MÄRKSÕNAD

akumulatsioonipiirkond
erosioonipiirkond
jütja e järvemuda
düü
diatomiit
sapropeel
purdsetted
järvelubi
fosfori sisekoormus
lahustuv reaktiivne fosfor
sette poorivesi
ligand
kelaadid

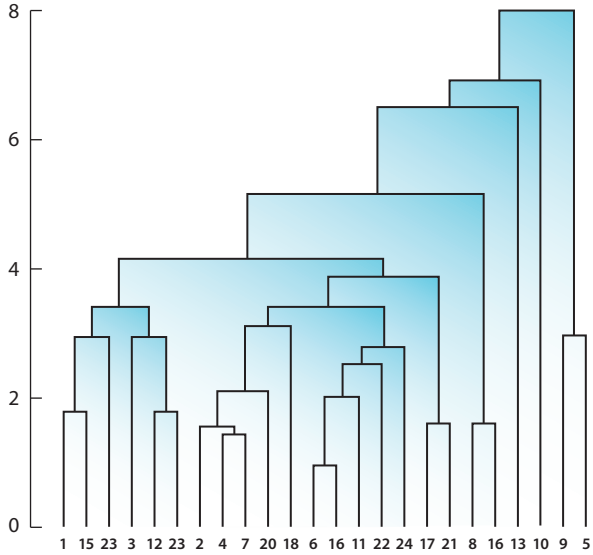
# 1.13. Siseveekogude tüübid

## 1.13.1. Klassifitseerimise alused

Klassifitseerimine on loogika valdkonda kuuluv tegevus, mille käigus koondatakse mingid objektid või nähtused rühmadesse, andes moodustatud rühmadele ka nimetused. Näiteks Eesti järved on oma tekkeviisi ja valgala iseärasuste tõttu väga eripalgelised ning nõuavad ülevaate saamiseks rühmitamist. Klassifitseerimine lähtub seoste olemasolust objektide vahel. Seega saavad ühte rühma kuuluda vaid järved, millel on sarnased tunnusjooned. Klassifitseerimine on suhtlemisvahend inimeste vahel. Arvukad üksikobjektid ühendatakse omavahel või jaotatakse objektide kogumid väiksemaks arvuks rühmadeks. Sel viisil on neist lihtsam ülevaadet saada ja informatsiooni summeerida (joonis 1.245). Klassifitseerimise aluseks on üldjuhul mingi paradigma (teooriate, vaadete ja tõekspidamiste süsteemne kogum) ning inimeste praktiline vajadus.

Klassifikatsioon peab olema maksimaalse võimaliku infosisaldusega ning talletatud info peab olema lihtsalt ja moonutusteta kättesaadav. Klassifikatsioon peab pakkuma võimalust teaduslikult prognoosida ühte klassi kuuluvate või klassidesse lisatavate objektide omadusi. Ta peab andma võimaluse määratleda nii tuntud kui ka uusi objekte. Ja lõpuks on oluline näidata objektide ajalist seost või ajaloolist kujunemist.

**1.245.** Seire käigus kogutud veeproovid. Neist ülevaate saamiseks tuleb neid mingite põhimõtete järgi klassifitseerida.




**1.246.** Kuhjavat ehk aglomeratiivset klasterdamist kujutav diagramm. Numbritega on tähistatud veeproovid, mis sarnasuste põhjal ühendatakse suurematesse üksustesse ehk klastritesse.

Limnoloogias on klassifitseerimisel enamasti esikohal veekogude ühendamine klassideks sel moel, et igal veekogul oleks süsteemis oma kindel koht (joonis 1.246). Säärast klassifitseerimisviisi kutsutakse aglomeratiivseks ehk **kuhjavaks meetodiks**. Tekitatav süsteem võib oma olemuselt olla kunstlik või loomulik. *Kunstlikus süsteemis* on liigitamise alus kokkuleppeline: näiteks tähestikuline või süsteemil põhinev raamatute paigutus raamatukogus (joonis 1.247). *Loomulikus süsteemis* on aluseks üks või mitu olemuslikku tunnust. Siseveekogude süstematiseerimisel tehakse neil kahel selgelt vahet. Loomulikul süsteemil põhinevat rühmitamist nimetatakse **tüpiseerimiseks** ja sel juhul tegeldakse veekogude jaotamisega looduslike tüüpide vahel (nt looduslikul akumulatsioonitüübil põhinevad järvetüübid). Kunstliku süsteemi puhul räägitakse **klassifitseerimisest**. See puudutab näiteks veepoliitika raamdirektiiviga kehtestatud kvaliteedikategooriaid ehk seda, kui kaugele on veekogu inimmõju toimel kaldunud oma looduslikust seisundist.

**1.247.** Tähestikuline paigutussüsteem raamatukogus kui kunstliku süsteemi näide.

### 1.13.2. Üksiknäitajatel põhinevad klassifikatsioonid

Üksiknäitajate põhjal on loodud kõige lihtsamad ja algelisemad klassifikatsioonid. Põhimõtteliselt võib siseveekogude klassifitseerimisel kasutada enamikku füüsikalis-keemilistest ja bioloogilistest üksiknäitajatest ning rakendust leiavad nii pidevad, diskreetsed kui ka mittearvulised tunnused.

Üksiknäitajatel põhinevaid klassifikatsioone kirjeldades sobib alustada eelkõige geograafilis-geoloogilistest tunnustest, mis määravad järvenõo või jõesängi kuju ja iseärasused. Väga laialt kasutatavad on näiteks veekogude kujunemisviisil (ptk 3.4) ja morfomeetrilistel näitajatel (ptk 3.5) põhinevad süsteemid. Veekogude geograafiline asend on samuti hea alus klassifitseerimiseks, sest sellest sõltuvad omakorda klimaatilised ja hüdroloogilised tingimused, mis lõppkokkuvõttes määravad kihistumise, elustiku iseärasused ja produktiivsuse.

Järgmise üksiknäitajate rühma moodustavad vee füüsikalis-keemilisi omadusi iseloomustavad näitajad. Järvede puhul on siin väga heaks tüpoloogia näiteks jaotus segunemismustri põhjal (ptk 1.5.4) ja jõelõikude klassifitseerimine suuruse järgi. Sobivad näitajad on veel lahustunud gaaside hulk ja jaotus, mineraal- ja orgaanilised ained, pH ja paljud teised parameetrid.

Hoolimata kirjeldatud meetodi näilisest universaalsusest on tõsiseks takistuseks mingi konkreetse üksiknäitaja kasutamine kõigi loodusvete puhul (järv, jõgi, põhjavesi, sademed jne). Näiteks on üsna mõttetu kasutada hapnikusisaldust kõigi loodusvete omavaheliseks võrdlemiseks. Põhjavees puudub hapnik sootuks, sest ta pole kontaktis atmosfääriga. Soolajärvedes on lahustunud gaaside kontsentratsioon pöördvõrdelises sõltuvuses soolsusest, rabavetes on see väike humiinainete suure sisalduse tõttu ja suure toitelisusega järvedes võib see ööpäeva jooksul intensiivse primaarproduktsiooni ja hingamise vaheldumise tõttu väga suurtes piirides muutuda. Seepärast kasutatakse üksiknäitajaid pigem eri tüüpi pinna-, põhja- ja sajuvete eristamisel üksteisest või tüübisisesel klassifitseerimisel.

### 1.13.3. Troofsusklassifikatsioonid

Hoolimata oma suhteliselt väikesest sisaldusest enamusioonidega võrreldes on toiteained sisevetes väga olulised ühendid, millest sõltub veekogu elustiku hulk, liigiline koosseis ja produktiivsus. See viis mõttele liigitada veekogusid toiteainesisalduse järgi troofsusklassidesse. Veekogude troofsuse ja sellega seotud mõisted (nt terminid „oligotroofne“ ja „eutroofne“) võtsid kasutusele August Thienemann ja Einar Naumann (vt ääremärkus 1.15, lk 162) juba 20. sajandi alguses, järgides analoogseid termineid pruukivate soouurijate eeskuju (Thienemann 1920). Esmalt kasutati troofsusklasse eelkõige järvede puhul, sest seal on toiteainete akumuleerumine ja järve toitelisuse kasv selle tagajärjel kõige selgemini näha. Selliseid klasse on neli.

- **Oligotroofsetes** ehk **vähetoitelistes** järvedes on toiteainete (ja üldse mineraalainete) sisaldus väga väike ja neist on bioproduktsioonil alati puudus (joonis 1.248). Seetõttu on elustik väikese biomassiga ning orgaanilise aine tootmine ja akumuleerumine järvenõo põhja väga

**1.249.** Lahepera järv on kunagine Peipsi järve laht, mis nüüdseks on eraldunud ja muutunud iseseisvaks eutroofseks veekoguks.

**1.248.** Kuigi Nohipalo Valgõjärv on aja jooksul ka inimmõju tunda saanud, on ta siiani säilitanud vähetoitelisele järvele iseloomulikke tunnusjooni, nagu suure läbipaistvusega vesi ja vähene kaldataimestik.

aeglane. Järved ise on võrdlemisi sügavad ja kitsa taimestikuvööndiga. Planktonorganisme on vähe ja vesi väga läbipaistev. Hapnikuolud on aasta ringi head. Tihti leidub neis mitmesuguseid taim- ja loomharuldusi, liigirikkus võib, kuid ei pruugi olla suur. Samas on sellised ökosüsteemid väga tundlikud inimmõju suhtes.

- **Eutroofsete** ehk **rohketoiteliste** järvede omadused on oligotroofsetega võrreldes vastupidised. Tihti on nad madalad ja nende nõgu on suurel määral täitunud setetega. Neis on rikkalikult toiteaineid ning tänu sellele on nad palju produktiivsemad (joonis 1.249). Elustik on liigirikas ja suure biomassiga. Talvised hapnikuolud võivad olla halvad ning põhjakihtidesse koguneb süsihappegaasi, vesiniksulfiidi ja metaani.

- **Mesotroofsed** ehk **kesktoitelised** järved jäävad kahe eelmise rühma vahele. Oligotroofsete järvedega võrreldes on neis rohkem toiteaineid ja seetõttu on suurem ka liigirikkus ja biomass. Samas on gaasirežiim järves endiselt hea.

- **Hüpertroofsed** ehk **liigtoitelised** järved on kunstlikud süsteemid, sest looduslikult pole toiteainete akumuleerumine nii suures hulgas ja nii lühikese aja jooksul võimalik. Edasist produktsiooni kasvu hakkab piirama valgus, sest suure vetika- või taimemassi tõttu ei jõua see sügavamatesse veekihtidesse. Gaasirežiim on aasta ringi halb, esineb nii talviseid kui ka suviseid ummuksisse jäämisi. Liigirikkus väheneb kiiresti ja sageli moodustuvad monodominantsed kooslused.

Et peamised bioproduktsiooni limiteerivad elemendid on fosfor ja lämmastik, kasutatakse klassifikatsiooni loomisel tihti just nende kahe sisaldust. Samas võib leida ka ränil põhinevaid troofsusklassifikatsioone. Samasuguseid troofsusklasse nagu järvede puhul kasutatakse ka merevee ja jõgede puhul, kuigi toiteainete akumuleerumisest on nende puhul märksa keerulisem rääkida. Tabelites 1.25 ja 1.26 on toodud näiteid Eesti järvede ja jõgede troofsusklassidest, mis on välja töötatud peamiselt 1970.–1990. aastate andmete põhjal.

Hoolimata suurest populaarsusest on nüüdseks sellisest ülimalt lihtsustatud troofsussüsteemist loobuma hakatud. Põhjus iseenesest on väga lihtne. Sellise skaala juures, kus arvestatakse vaid mingi konkreetse toiteaine sisaldust, saavad näiteks vähetoitelised järved oma seisundile automaatselt väga hea hinnangu ja rohketoitelised tihti halva, sest ei arvestata valgala, toitumistüüpi, elustikku ega paljusid muid tegureid.

Näiteks Äntu Sinijärv on Väike-Maarja lähedal paiknev allikajärv, milles piirkonna geoloogiliste ja põllumajanduslike iseärasuste tõttu on üldlämmastikusisaldus väga suur (kuni 5000 mg/m$^3$). Eutroofsuse ja hüpertroofsuse piir on troofsusklassifikatsiooni järgi 1200 mg/m$^3$ (tabel 1.26). Järve vesi on aga põhjani läbipaistev ja liigivaene elustik meenutab biomassi poolest vähetoitelise veekogu oma. Et järv toitub peamiselt karbonaadirikkast allikaveest, seovad lubiained fosfori ning fütoplankton ja veetaimed pole võimelised seda kasutama. Seega annab vaid ühe-kahe näitaja kasutamine veekogu seisundist väära ettekujutuse.

## 1.13.4. Eesti siseveekogude tüpoloogiad

Eesti sisevete tüpiseerimisega tehti algust juba 20. sajandi esimestel kümnenditel, kui algas intensiivsem elustiku ja hüdrokeemilise materjali kogumine. Sel perioodil uuritud veekogude arv oli nende korralikuks tüpiseerimiseks veel väike. Materjali hakkas kogunema rohkem sajandi teisel poolel, kui toimunud olid suuremad komplekseksped itsioonid.

**VOOLUVETE TÜPOLOOGIA** Järvedega võrreldes on Eesti vooluveekogusid tunduvalt vähem uuritud. Eesti hüdrokeemik Helle Simm koostas oma väitekirja põhjal ülevaate pinnaveekogude hüdrokeemilistest iseärasustest (1975). Otsest vooluveekogude tüpoloogiat seal küll pole, kuid jõevee mineraal- ja orgaaniliste ainete sisalduse ning ioonkoostise järgi on jõed jaotatud kolme hüdrokeemilisse rajooni kuue allrajooniga.

Orgaanilise aine tähtsust rõhutas oma tüpoloogias ka Arvi Järvekülg (1994, 2001), kes vee toitelisuse ja humiinainesisalduse järgi jaotas vooluveed kaheksasse tüüpi:

- oligohumoossed-oligotroofsed (vähetoitelised orgaanilise aine vaesed jõed)
- polühumoossed-oligotroofsed (vähetoitelised orgaanilise aine küllased)
- oligohumoossed-mesotroofsed (kesktoitelised orgaanilise aine vaesed)
- polühumoossed-mesotroofsed (kesktoitelised orgaanilise aine küllased)
- oligohumoossed-eutroofsed (rohketoitelised orgaanilise aine vaesed)

Tabel 1.25. EESTI JÕGEDE TROOFSUSSKAALA

| Troofsusklass | üldN (mg/m$^3$) | üldP (mg/m$^3$) |
|---|---|---|
| Oligotroofne | < 400 | < 10 |
| Mesotroofne | 405–600 | 11–50 |
| Eutroofne | 605–1500 | 51–100 |
| Hüpertroofne | > 1500 | > 100 |

(Järvekülg 2001)

Tabel 1.26. EESTI JÄRVEDE TROOFSUSSKAALA

| Troofsusklass | üldN (mg/m$^3$) | üldP (mg/m$^3$) |
|---|---|---|
| Oligotroofne | < 450 | < 30 |
| Mesotroofne | 450–730 | 30–50 |
| Eutroofne | > 730–1200 | > 50–100 |
| Hüpertroofne | > 1200 | > 100 |

- polühumoossed-eutroofsed (rohketoitelised orgaanilise aine küllased)
- oligohumoossed-hüpertroofsed (liigtoitelised orgaanilise aine vaesed)
- polühumoossed-hüpertroofsed (liigtoitelised orgaanilise aine küllased)

Selle süsteemi kohaselt on Mandri-Eesti vesikondades ülekaalus oligohumoossed-mesotroofsed jõed, Hiiu- ja Saaremaal aga polühumoossed-mesotroofsed jõed. Oligohumoossete-oligotroofsete ja polühumoossete-oligotroofsete jõgede osakaal on suurim Hiiumaal, seevastu Liivi lahe ja Väinamere vesikonnas selliseid jõgesid teada ei ole. Oligohumoosseid-hüpertroofseid jõgesid on palju Väinamere vesikonnas, kuid neid ei ole Hiiumaal ega Saaremaal. Järvekülje süsteem tugineb paraku ainult hüdrokeemilistele tunnustele ega arvesta ei jõe suurust ega voolukiirust.

Vooluveekogusid võib tüpiseerida mitmeti olenevalt sellest, milliseid jõge iseloomustavaid tunnuseid oluliseks peetakse. Nendeks võivad olla näiteks elupaigad, jõe lang, vooluhulk, voolukiirus, looklevus, põhja omadused, valgusolud, jõesängi kuju ja morfomeetria, vee temperatuur jm. ELi veepoliitika raamdirektiivile vastavat Eesti jõgede tüpoloogiat, mis arvestab keskkonnatingimusi ja on aluseks veekogude majandamisel, käsitletakse alapeatükis 1.13.5. Selles on tüpiseerimise aluseks võetud valgala suurus ja huumusainete sisaldus.

**JÄRVEDE TÜPOLOOGIA** Esimesed Eesti järvede tüpoloogiad töötati välja juba enne Teist maailmasõda (Mölder 1943), kuid need olid rajatud vähestele näitajatele. Alates 1950. aastatest võeti kasutusele rohkem tunnuseid, seostades ühtlasi järvetüüpe nende ontogeneesiga. Helle Simm (1975) lähtus eelkõige valgla omadustest, sest valglad ja veevahetus reguleerivad tema arvates läbivoolu- ja infiltratsioonitingimusi, mis määravad kõige enam pinnavee omadusi. Viis Simmi eristatud põhitüüpi on järgmised:

A *Läbivoolujärved karbonaatse mullaga moreensetel valgaladel.* Nende järvede keemiline koostis kujuneb karbonaadirikkal muldpinnasel, mistõttu prevaleerivad vesinikkarbonaat- ja kaltsiumioonid. Mineraalsus on 100–500 mg/l ja sõltub läbivoolutingimustest. Allohtoonseid orgaanilisi aineid on vähe, peamine on autohtoonne komponent. Seetõttu on ka vesi võrdlemisi hele. Autohtoonsete orgaaniliste ainete akumuleerumine toob kaasa põhjamuda kiire kogunemise. Toiteaineid on rohkesti ja järved on produktiivsed.

B *Läbivoolujärved soostunud valgaladel.* Sarnased A-rühma järvedega, kuid vesi on mõjutatud humiinainetest, mis pärinevad rabadest ja soostunud valgalalt. Orgaanilisi aineid on rohkesti ja vesi tumedat värvi. Et mineraalaineid on palju, ei pääse humiinainete tekitatud madala pH mõju esile. Kohati on järved ebastabiilse gaasirežiimiga ja mudased ning kiiresti kadumas.

C *Läbivoolujärved sanduritasandikel.* Iseloomulik on väga väike mineraal- ja orgaaniliste ainete sisaldus. Vee kemismi mõjutavad sademed ja pinnasevesi. Toiteainete puudus takistab veeorganismide arengut ning autohtoonse orgaanilise aine moodustamist. Sellest johtuvalt on aga vesi hapnikurikas. Puhverdusvõime on vähene ja inimtegevuse survel on seda tüüpi järvede arv kahanemas.

D *Läbivooluta järved karbonaatse mullaga alvaritel.* Järved toituvad kevadisest veest, mille koostis kujuneb karbonaadirikka loomullaga valgalal. Iseloomulik on karbonaatide settimine ja ladestumine. Orgaanilisi aineid on vähe, sest need settivad lubiainetega välja. Ka elustik on vaene.

E *Läbivooluta rabajärved.* Rabades paiknevad autonoomsed veekogud, kuhu koguneb sademevesi. Mineraalaineid leidub äärmiselt vähe. Väga palju on orgaanilist ainet ja vee värvus on väga tume. Vesi on happelise reaktsiooniga. Väike produktiivsus viitab vähesele toiteainesisaldusele.

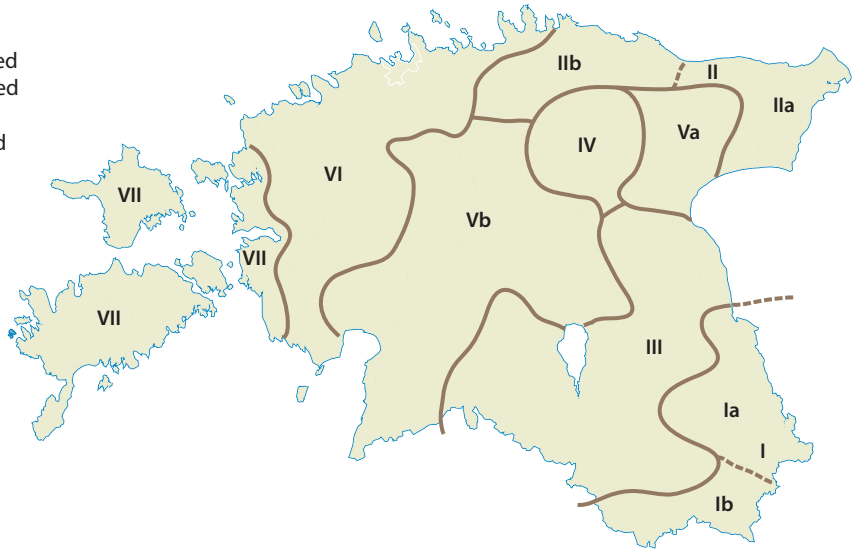
1.16 ÄÄREMÄRKUS

**AARE MÄEMETS**

Aare Mäemets (1929–2002) oli Eesti järveteadlane, hüdrobioloog ja loodusfotograaf. Pärast Tartu Riikliku Ülikooli lõpetamist bioloog-zooloogina 1954. aastal asus ta tööle Teaduste Akadeemia Zooloogia ja Botaanika Instituudi Võrtsjärve limnoloogiajaama, kus ta töötas selle loomisest alates. Kogu elu tegeles Aare Mäemets zooplanktoni, eriti vesikirbuliste ja aerjalaliste süstemaatika uurimisega. Ta tegutses ka limnoloogina, uurides mitmesuguste teadusteemade raames paljusid Eesti väikejärvi. 1968. aastal ilmus tema toimetamisel koguteos „Eesti järved" ning 1977. aastal monograafia „Eesti NSV järved ja nende kaitse", mida illustreerisid autori enda fotod. Mõlemad raamatud on olnud populaarsed aastakümneid ning leiavad veidi vananenud sisust hoolimata kasutust tänapäevani. Ekspeditsioonidel kogutud andmestik oli piisav Eesti järvede tüpoloogia loomiseks, mis põhineb osalt Thienemanni-Naumanni akumulatsioonitüüpide süsteemil. Paraku jäi see NSV Liidu teaduse isoleerituse tõttu muust maailmast pikaks ajaks vaid kohalike spetsialistide pruukida. Teadustöö kõrvalt tegeles Aare Mäemets ka looduskaitse edendamise ja teaduse populariseerimisega. Selle tunnistuseks on ajalehtedes ja ajakirjas Eesti Loodus ilmunud arvukad artiklid, milles ta tundis muret Eesti järvede olukorra ja saatuse pärast, samuti hulk matkajuhte ja raamatuid Eesti järvedest, koduloolised trükised ning paljud artiklid „Eesti entsüklopeedias". Mäemetsa algatusel loodi mitu järvekaitseala ning tema kaitsealast tegevust tunnustati 1990. aastal Eerik Kumari nimelise looduskaitsepreemiaga.

**1.250.** Eesti limnoloogilised valdkonnad Aare Mäemetsa järgi.

I – Kagu-Eesti vähe- ja huumustoitelised
II – Kirde-Eesti vähe- ja huumustoitelised
III – Kõrg-Eesti rohketoitelised
IV – Pandivere kõrgustiku lubjatoitelised
V – Vahe-Eesti huumustoitelised
VI – Madal-Eesti segatoitelised
VII – Lääne-Eesti soolatoitelised




Eesti järveuurija Aare Mäemets (vt ääremärkus 1.16) on jaotanud Eesti järved toitumistüübi, suuruse, sügavuse, vee kihistumuse, mineraal- ja orgaaniliste ainete sisalduse, hapnikurežiimi ning elustiku järgi kaheksasse põhi- ja 27 alltüüpi. Põhitüübid on järgmised:

1) oligotroofsed ehk vähetoitelised
2) semidüstroofsed ehk poolhuumustoitelised
3) düstroofsed ehk huumustoitelised
4) eutroofsed ehk rohketoitelised
5) alkalitroofsed ehk lubjatoitelised
6) düseutroofsed ehk segatoitelised
7) siderotroofsed ehk rauatoitelised
8) halotroofsed ehk soolatoitelised

Tüpoloogia oli aluseks ka Eesti territooriumi jaotamisele limnoloogilisteks valdkondadeks (joonis 1.250). Hoolimata suurest läbitöötatud materjali hulgast (üle 750 järve) ja põhjalikkusest oli see süsteem praktilisteks rakendusteks liiga detailne ja kohmakas. Liiatigi kujunes 1970.–1980. aastatel olukord, kus tugeva inimmõju tagajärjel mitu järvetüüpi muutusid või lakkasid üldse olemast. Näiteks pole nüüdseks enam säilinud ühtegi tõeliselt oligotroofset järve. Seda arvestades tegid Ingmar Ott ja Toomas Kõiv oma raamatus „Eesti väikejärvede eripära ja muutused“ (1999) Mäemetsa tüpoloogiat lihtsamaks ja ajakohasemaks, lisades sinna ka uued inimmõju toimel tekkinud tüübid. Järgnev ülevaade käsitlebki juba Mäemetsa modifitseeritud tüpoloogiat.

**OLIGOTROOFSED JÄRVED** Oma tekkeajal oli suur osa Eesti praeguse ala järvedest **vähetoitelised** ehk **oligotroofsed**. Pikaajalist inimmõju arvestades peetakse praegu sellesse rühma kuuluvaks järvi, mis olid vähetoitelised veel 1950. aastatel ja on praeguseks säilitanud vähemalt osa oma iseloomulikust elustikust.

Oligotroofsete järvede heleroheline või sinakasroheline vesi on suure läbipaistvusega (üle 5 m) ning seal leidub väga vähesel hulgal orgaanilisi ja mineraalaineid (joonis 1.251). Seetõttu on vee puhverdusvõime nõrk ning järve ökosüsteem võib juba väikese inimmõju korral kergesti tasakaalust välja minna. Enamasti on kogu veesammas aasta ringi hapnikuga varustatud, kuid viimastel aastakümnetel võib hüpolimnionis täheldada hapnikupuudust. Toiteainete, eriti fosfori sisaldus on väike.

**1.251.** Oligotroofse Paukjärve vee läbipaistvus on 4,1–6,2 m.

Fütoplanktonit iseloomustab vähene biomass ja väike liikide arv ning vesi on seetõttu hea läbipaistvusega. Domineerivad rohevetikad, krüsofüüdid ja dinofüüdid. Litoraalis võib arvukamalt leida ikkesvetikaid, mis avavette satuvad juhuslikult. Mitmes järves esineb ohtralt tativetikat (*Gonyostomum semen*), mis on oma eestikeelse nimetuse saanud selle järgi, et muudab ujujate naha libedaks. Vähetoitelistes vetes kasvavad haruldased veetaimed vesilobeelia (*Lobelia dortmanna*) ja järv-lahnarohi (*Isoetes lacustris*).

Järvede väikese produktiivsuse tõttu on kalastik napp. Kalade vähese arvukuse ja aeglase kasvutempo põhjuseks on ka kehvad varje- ja kudemisvõimalused ning muutlik zooplanktoni biomass.

**SEMIDÜSTROOFSED JÄRVED** **Poolhuumustoitelised** ehk **semidüstroofsed** järved on kujunenud vähetoitelistest järvedest humiinainete vähese või mõõduka lisandumise tulemusena (joonis 1.252). Neid leidub eriti liivastel ja toiteainevaestel valgaladel Kagu-Eestis.

Kollakas või helepruun vesi on mõõduka läbipaistvusega, keskmise orgaanilise aine sisaldusega, vähese mineraalsusega ja väga väikese puhverdusvõimega. Poolhuumustoiteliste järvede ökosüsteem on sama õrn kui vähetoiteliste oma. Hoolimata eutrofeerumisest on nad säilitanud enamiku oma mitmekesisest ja huvitavast elustikust. Vähetoiteliste järvedega võrreldes on neis parem hapnikurežiim, suurem orgaanilise aine sisaldus ning liigirikkam fütoplankton ja suurtaimestik.

Fütoplanktoni biomass on väike ning ülekaalus on enamasti tativetikas ja rohevetikad. Ikkesvetikate liikide arv proovi kohta on teiste tüüpidega võrreldes suurim. Tüüpiliste poolhuumustoiteliste järvede suurtaimestik sarnaneb vähetoiteliste omaga ning selles leidub mitmeid haruldusi. Kalastik on siiski suhteliselt liigivaene.

**1.252.** Semidüstroofne Tänavjärv.

**1.253.** Düstroofne Meenikunno Suur Soojärv.

**DÜSTROOFSED JÄRVED** **Huumustoitelised** ehk **düstroofsed** järved on moodustunud soostumise käigus või humiinainete rohke lisandumise tulemusena. Nende vesi on väga mineraalainevaene, tumeda värvuse, happelise reaktsiooni ja vähese läbipaistvusega (joonis 1.253). Tüüpiliste rabaveekogudena võib neid leida väga suurel osal Madal-Eestist. Üldjuhul on need madalad järved ja hapnikutingimused on seepärast isegi põhjakihtides aasta ringi head.

Huumustoitelised järved on äärmiselt elustikuvaesed, sest toiteained on seotud raskesti omastatavate humiinainetega ja mineraalaineid napib. Fütoplanktoni biomass ja klorofüllisisaldus on keskmine, kuid liike on vähe. Suurtaimestik puudub kas täiesti või on väga hõre ja liigivaene. Ka kalastik on äärmiselt liigivaene või puuduvad kalad sootuks.

**ATSIDOTROOFSED JÄRVED** **Atsidotroofsed** järved on oma olemuselt väga sarnased huumustoiteliste järvedega. Tüübi nimetus tuleneb järvede väga happelisest (pH < 4) veest hoolimata nende paiknemisest mineraalmaal. Siiski on atsidotroofsete järvede happeline vesi üks selle ökosüsteemi loomulikke iseärasusi ning neid järvi ei tohiks segamini ajada Skandinaavia heledaveeliste järvedega, mis kannatavad happeliste sademete käes. Atsidotroofsed järved on kõige tumedama veega järved Eestis (joonis 1.254). Tume- või punakaspruun värvus on tingitud intensiivsest veevahetusest metsa- ja soorikaste aladega ning suurest humiinainesisaldusest. Selliste järvede tüüpilisimad esindajad paiknevad Kagu-Eesti lavamaal mattunud orgude säilinud nõgudes. Nende järvede pehmeveelisus ja vähetoitelisus on tingitud valgala väiksusest ja selles piirkonnas valitsevast liivakast moreenpinnasest. Atsidotroofsed järved on teravalt kihistunud

**1.254.** Atsidotroofse Nohipalo Mustjärve litoraal.

ja hüpolimnionis hapnik enamasti puudub. Nad erinevad huumustoitelistest järvedest suurema fütoplanktoni biomassi ja klorofülli hulga poolest.

Liikide arv on kõigi järvetüüpide seas üks väiksemaid, eelkõige just neis järvedes, kus esineb ohtralt tativetikat, mis tihti annab ka suure fütoplanktoni biomassi. Suurtaimed veesiseses taimestikus puuduvad. Tavaliselt ulatub turbasammal kaldalt vette, kattes üksikute järveosade või isegi kogu järve põhja. Tähtsaimaks vööndiks on ujulehtedega taimestik, millest suure osa moodustavad kollane ja väike vesikupp. Tõeline kaldaveetaimestikuvöönd puudub ka selles tüübis. Domineerivad soovõhk ja soopihl koos turbasambla ja tarnadega. Kalastik on liigivaene. Peamiselt esineb ahvenat ja haugi, üksikutel juhtudel ka kokre.

**1.255.** Eutroofne Pangodi järv.

**EUTROOFSED JÄRVED** **Rohketoitelised** ehk **eutroofsed** järved esindavad atsido- ja huumustoitelistele järvedele vastupidist arengusuunda. Sellised järved on tekkinud vähetoitelistest järvedest mineraalainete lisandumise tõttu. Võrreldes teiste tüüpidega on see rühm kõige eripalgelisem. Peamisteks tunnusjoonteks on heledat värvi vesi ja mõõdukalt suur toiteainesisaldus (joonis 1.255).

Mineraalainesisalduse põhjal jagatakse rohketoitelised järved pehmeveelisteks ja kareda- ehk kalgiveelisteks. Neid eristavaks kokkuleppeliseks piiriks on üldaluselisus 80 mg/l, sest näiteks sellest piirist alates muutub oluliselt suurtaimede ja ränivetikate liigiline koosseis. *Kalgiveelised järved* paiknevad peamiselt põllumajanduspiirkondades, näiteks Sakala kõrgustikul ja Vooremaal, olles mõõtmetelt väga erinevad ja suure valgalaga. Nende hulgas on suuri ja madalaid hea hapnikurežiimiga järvi ning väikseid ja väga sügavaid veekogusid, kus hapnik suuremas osas veesambast puudub. *Pehmeveelised järved* on kujunenud vähetoitelistest, mida on tugevalt mõjutanud inimtegevus. Need väikese valgala ja vähese veevahetusega pisikesed veekogud paiknevad maastikus hajusalt, kuid sagedamini võib neid leida Lõuna-Eestist.

Taimse hõljumi biomass on kalgiveelistes järvedes mõõdukas ja liigirikkus suur. Tegelikult on see rühm ka taimse hõljumi poolest heterogeenne, hõlmates mitmeid mesotroofsete joontega järvi, suurt hulka sügavaid ja tugevalt kihistunud ning madalaid väga rikkaliku fütoplanktoniga veekogusid. Biomassis annavad tooni sinivetikad, ränivetikad ja vaguviburvetikad. Pehmeveelistes järvedes on taimse hõljumi biomass ligi kaks korda suurem, kuid liikide arv väiksem ja liigiline koosseis küllaltki erinev. Biomassis domineerivad sinivetikad (enamasti niitjad vormid), olulisel kohal on ka vaguviburvetikad ja väikesed rohevetikad. Kalgiveeliste rohketoiteliste järvede veesisene taimestik on üldiselt liigirikas, kuid ainult sellele tüübile omaseid liike on vähe. Pehmeveelistes järvedes on suurtaimestik, eriti veesisene, vähene ja liigivaene. Kõige levinum on kanada vesikatk ning ujulehtedega taimedest kollane vesikupp. Mineraalsuse kasvades lisanduvad ujuv penikeel ja vesi-kirburohi. Kaldaveetaimestik on samuti liigivaene või puudub sageli sootuks.

Rohketoiteliste järvede hulka kuuluvad meie parimad kalajärved, eriti kehtib see suurte kalgiveeliste järvede kohta. Väikestes ja tugeva inimmõju all olevates järvedes on kalastiku koosseis siiski tunduvalt vaesem.

**HÜPERTROOFSED JÄRVED** **Liigtoitelised** ehk **hüpertroofsed** järved on varieeruvate morfomeetriliste näitajatega veekogud, mis asuvad loodusliku arengurea – *oligotroofne* → *mesotroofne* → *eutroofne* – lõpus. Inimmõju tulemusena on neis suur esmasproduktsioon. Toitelisuse kasv pole enamasti tingitud mitte mineraalsete toiteainete lisandumisest hajureostuse tagajärjel, vaid bioloogiliselt kergesti laguneva orgaanilise aine sattumisest järve punktreostusallikatest. Sellised järved paiknevad peamiselt Kõrg-Eestis, eriti Otepää, Sakala ja Vooremaa kõrgustiku ürgorgudes, moreenkõrgendikel ja voortega külgnevates orgudes (joonis 1.256). Enamasti on naabruses põllumajandusmaastik või asulad.

Vesi on vähese läbipaistvusega ja rohekaskollast värvi. Liigtoitelisi järvi eristab rohketoitelistest suur orgaanilise aine ja toiteainete sisaldus ning tugevad veeõitsengud. Suur orgaanilise aine sisaldus pole aga tingitud mitte humiinainetest, vaid allohtoonsest, bioloogiliselt kergesti lagunevast orgaanilisest ainest ja autohtoonsest orgaanilisest ainest. Terava suvise kihistumuse tingimustes kaob hapnik juba 2–3 meetri sügavusel. Sagedane on vesiniksulfiidi esinemine hüpolimnionis ning tihti ka talvised ja suvised ummuksisse jäämised. Nende veekogude seisund on viimase kümne-viieteistkümne aasta jooksul märgatavalt paranenud, kuid sellest hoolimata on nad väga ebastabiilse ökosüsteemiga, kus on sagedased veeõitsengud ja kalade suremised. Toiteainete allikaks on sissevoolud ja õhureostus, tugevalt kihistunud järvede puhul on olulisel kohal ka toiteainete vabanemine põhjasetetest.

Taimse hõljumi biomass ja klorofülli hulk on suurem kui üheski teises tüübis. Märkimisväärselt suur on ka liikide keskmine arv (60–80 liiki proovis); ainult mõnes järves on liigiline koosseis hüpertrofeerumise tagajärjel vaesunud. Suure biomassiga järvedes annavad tooni sinivetikad, mõõduka biomassi korral väikeste mõõtmetega rohevetikad. Suurtaimestik on liigivaene, sest ülitugev rikastumine toiteainetega, eriti pikemaajaline, võib viia isegi kalgi veega liigtoiteliste järvede suurtaimestiku taandumiseni. Halva gaasirežiimi tõttu on põhjaloomastik ja kalastik tugevalt vaesunud.

**ALKALITROOFSED JÄRVED** **Lubjatoitelisi** ehk **alkalitroofseid** järvi on kujundanud kaltsiumiühendite poolest väga rikka allikavee juurdevool või karbonaatse pinnakatte ja tugevalt karstunud aluspõhja mõju. Kuigi praegu leidub neid järvi üsna vähe, on paljud Eesti väikejärved oma varasema arengu käigus läbinud lubjatoitelise staadiumi. Tihti on sellised järvekesed ajutise iseloomuga ning veega täidetud vaid kevadisel suurveeperioodil, jäädes suve lõpuks kuivaks.

Alkalitroofsetele järvedele on iseloomulik suur lämmastikuühendite sisaldus, millest põhilise osa moodustavad nitraadid. See on seotud põhjaveelise toitumise ja selle kaudu leviva põllumajandusliku hajureostusega. Hoolimata suurest lämmastikusisaldusest jääb esmasproduktsioon siiski vähetoiteliste järvede tasemele, sest teise olulise toiteaine, fosfori hulk on lubiainetega seotuse tõttu väike. Seetõttu on ka hele- või sinakasroheline vesi väga suure läbipaistvusega (joonis 1.257). Karbonaadirikkast veest tingitud suur puhverdusvõime on intensiivsest inimmõjust hoolimata taganud nende

**1.256.** Hüpertroofne Kokora Mustjärv.

**1.257.** Alkalitroofne Äntu Sinijärv.

järvede stabiilse seisundi, mistõttu elustikus pole olulisi muutusi toimunud.

Elustik on liigivaene, kuid huvipakkuv, eriti ajutistes järvedes, mille planktonis leidub palju haruldusi. Fütoplanktoni biomass ja klorofülli hulk on väga väike. Läbipaistva vee tõttu on lubjatoitelistes järvedes head tingimused suurtaimestiku arenguks. Alalistes järvedes on esikohal rikkalik, kuid liigivaene, peamiselt mändvetikatest koosnev põhjataimestik. Kalastik on liigivaene ja ajutistes järvedes kalad puuduvad.

**MIKSOTROOFSED JÄRVED** **Segatoitelised** ehk **miksotroofsed** järved kujutavad endast Eesti oludes järve arengu lõppjärku (joonis 1.258). Neid järvi ühendab intensiivne mineraal- ja humiinainete kuhjumine ning mõõdukas troofsuse kasv, millega seletatakse suurt liigirikkust. Nii nagu rohketoiteliste järvede puhul on ka siin otstarbekas käsitleda pehme- ja kalgiveelisi järvi eraldi.

*Kalgiveelistes* segatoitelistes järvedes on fütoplanktoni biomass keskmine, kuid liigirikkus teiste tüüpidega võrreldes suurem. Koosseisult sarnaneb selle rühma fütoplankton kalgiveeliste rohketoiteliste järvede omaga, kuid on suurema biomassi ja suurema liikide arvuga. Sini- ja ränivetikad moodustavad ligi 75% biomassist, ülejäänud osas on kõige arvukamad vaguviburvetikad ja koldvetikad. *Pehmeveelistes* järvedes oli veel 1960. aastatel väga rikkalik ikkesvetikate floora, mis praeguseks on vaesunud. Keskmine fütoplanktoni biomass on mõõdukas ja selle moodustavad peamiselt sinivetikad, väiksema osa tativetikas ja ränivetikad ning samuti on märkimisväärne rohevetikate arv. Ka suurtaimestikus avalduvad sarnased jooned kalgiveeliste eutroofsete järvedega, kuid veesisene taimestik on tumeda vee tõttu liigivaesem.

Paljud kalgiveelised segatoitelised järved on rikkaliku kalastikuga. Pehmeveeliste järvede kalastik on sagedase ummuksisse jäämise tõttu vaene ning enamasti leidub neis ainult kokre.

**MAKROFÜÜDIJÄRVED** **Makrofüüdijärvede** ehk **suurtaimestikurikaste järvede** hulgas leidub nii rohketoitelisi kui ka segatoitelisi veekogusid (joonis 1.259), kuid morfomeetriliste ja hüdrokeemiliste parameetrite poolest on see järvetüüp küllaltki selgesti piiritletav. Selliseid järvi leidub peaaegu igas Eesti piirkonnas. Sageli on nad kujunenud inimtegevuse tulemusena, kui veetaseme alandamisega püüti järvede või nendega piirnevate soode arvel juurde saada põllumaad.

Rühma ühiseks jooneks on suurtaimede kui peamiste produtsentide suur katvus (üle ¾ järve pindalast). Sellist tüüpi järvede põhilisteks tunnusteks on väike keskmine sügavus, suur mineraalsus, pidev vaba $CO_2$ puudumine suvel ja tugevalt aluselise reaktsiooniga vesi. Suurtaimed tarbivad enamiku toiteainetest, mis-

**1.258.** Miksotroofne Kalli järv.
**1.259.** Suurtaimestikurikas Elistvere järv.

tõttu fütoplanktoni areng on pärsitud ja vesi suhteliselt suure läbipaistvusega. Peamise osa fütoplanktoni biomassist moodustavad ränivetikad, koldvetikad, neelvetikad ja vaguviburvetikad. Heade valgustingimustega madalates järvedes, kus veetaimestik on hõivanud peaaegu kogu veekogu, domineerivad veesiseses taimestikus karbonaadirikast vett eelistavad mändvetikad, kardhein, tähkjas vesikuusk ja vesikarikas.

Ulatusliku vööndina esineva (või tervet järve katva) ujulehtedega taimestiku seas on levinuimad keskkonnatingimuste suhtes leplik kollane vesikupp, ujuv penikeel ja vesi-kirburohi. Niitvetikate massilise arengu korral veesisene taimestik taandareneb ja seda võimsamalt areneb ujulehtedega taimestik. Kalastiku rohkus oleneb suuresti järve sügavusest. Väga madalad ja taimerikkad järved jäävad tihti ummuksisse ja kujunevad kogre-linaskijärvedeks. Suuremad ja sügavamad järved on tunduvalt rikkalikuma kalastikuga.

**HALOTROOFSED JÄRVED** **Soolatoitelised** ehk **halotroofsed** järved on eespool kirjeldatud tüüpidega võrreldes erilised, sest kujutavad endast merest eraldunud kunagisi lahesoppe (joonis 1.260). Pindala on neil varieeruv, kuid sügavus ei küüni enamasti üle meetri ning suvel võivad nad väga madalaks jääda või hoopis kuivada. Suviti soojenevad need järved tugevasti – veetemperatuur tõuseb tihti 25–30 kraadini –, pH on sageli üle 9. Olenevalt arengustaadiumist varieerub ka vee kloriidi- ja sulfaadisisaldus ning elustiku koosseis. Talvel sisaldab vesi tihti suurel hulgal vesiniksulfiidi. Järved on tihti väärtuslikud oma ravimudavarude ja rikkaliku linnustiku tõttu.

**1.260.** Halotroofne Nonni järv.

Fütoplanktonit iseloomustab – eriti ränivetikate hulgas – soolalembeste vetikate rohkus ning tõeliste planktoniliikide vähesus või puudumine. Liikide arv küünib sajani, kuid biomass on väike, olles võrreldav oligo- ja mesotroofsete vetega. Suurtaimestiku poolest on soolatoitelised järved üsna liigivaesed. Keskmiselt on järve kohta 10–11 liiki, kuid ohtrus ja katvus on tihti suured. Tooni annavad samad liigid mis riimveelistes või magestunud merelahtedes. Kalastik on küllaltki eripalgeline. Madalates ja merega ühenduse kaotanud järvedes on see liigivaene ja vähearvukas. Suurtes ja merega hästi ühendatud järvedes on kalastik märksa liigirikkam, kuid koosseis väga muutlik. See kujuneb igal kevadel sisserändavatest kaladest uuesti, sest talvised hapnikutingimused on enamasti ebasoodsad.

## 1.13.5. Veepoliitika raamdirektiivil põhinevad tüpoloogiad ja klassifikatsioonid

Ainete akumulatsioonil ja üksiknäitajatel põhinevad pinnavete tüpoloogiad on küll väga informatiivsed, kuid oma detailsuse ja suure mahu tõttu praktiliseks kasutamiseks keerulised ning õiguslike nüanssidega raskesti seostatavad. Euroopa Liidus käsitleb veega seotud küsimusi ja problemaatikat veepoliitika raamdirektiiv (VRD). Tegemist on alusdokumendiga, mis määrab kindlaks tegevuse üldsuunad, põhimõtted ja tegevuskavad. Siseveekogude puhul seab VRD põhieesmärgiks kaitsta veeökosüsteeme ja parandada nende seisundit. Selleks seati direktiivi vastuvõtul üsna konkreetne eesmärk: 15 aasta jooksul pärast direktiivi jõustumist peavad kõik pinnaveekogud olema vähemalt heas ökoloogilises seisundis.

**■ VEEKOGUDE RÜHMITAMINE VEEPOLIITIKA RAAMDIREKTIIVI JÄRGI** Veekogude seisundi hindamisel VRD järgi on kaks edumeelset uuendust.

Esimene põhimõte on bioloogiliste näitajate ülimuslikkus. Veekogust, kus kõik füüsikalis-keemilised näitajad vastavad normile, kuid keskkonnatingimuste suhtes tundlikud taimed või loomad elada ei suuda, pole kellelegi kasu. Seires pruugitavad füüsikalis-keemilised näitajad ei hõlma aga kaugeltki kõiki reo- ega mürkaineid. Nende analüüsimine oleks tavaseire jaoks liiga kallis. Seepärast soovitatakse seisundit hinnata vee-elustiku järgi, mis on märksa praktilisem indikaator. Veekogude füüsikalis-keemilised ja morfoloogilised näitajad on endiselt kasutusel, kuid nende ülesanne on üksnes toetada elustiku seisundist lähtuvat hinnangut või luua sellele taust.

Teine oluline põhimõte seisneb arusaamas, et pinnaveekogud on juba looduslikult erinevad. Vee omadused sõltuvad valgla geokeemilistest iseärasustest ja seda asustavatest kooslustest. See põhimõte on tähelepanuta jäänud enamikus varasemates klassifikatsioonides ja tüpoloogiates. Neist võis jääda mulje, et vähetoitelised veekogud on alati heas ja rohketoitelised alati halvas seisundis.

VRD puhul ei tohi segi ajada **tüüpe**, mis tähistavad veekogude looduslikke kategooriaid (näiteks kiirevoolulised väikesed jõed või pehmeveelised järved), ning **ökoloogilisi klasse** ehk kvaliteedikategooriaid, mis näitavad, kui palju on veekogu inimmõju tagajärjel oma looduslikust seisundist hälbinud. Pinnaveekogu seisundi ehk ökoloogilise kvaliteedi hindamiseks tuleb kõige-

## Tabel 1.27. SÜSTEEMI A PUHUL KASUTATAVAD TUNNUSED JÕGEDES JA JÄRVEDES

| | Jõgede tunnused | | Järvede tunnused | |
|---|---|---|---|---|
| Ökopiirkond | XI lisa kaardil A | | XI lisa kaardil A | |
| Tüüp | Geograafiline kõrgus: | kõrge: > 800 m<br>keskmise kõrgusega: 200–800 m<br>madalik: < 200 m | Geograafiline kõrgus: | kõrge: > 800 m<br>keskmise kõrgusega: 200–800 m<br>madalik: < 200 m |
| | Valgla geoloogia: | lubjarikas<br>ränirikas<br>orgaaniline | Valgla geoloogia: | lubjarikas<br>ränirikas<br>orgaaniline |
| | Valgla pindala: | väike: 10–100 km$^2$<br>keskmine: 100–1000 km$^2$<br>suur: 1000–10 000 km$^2$<br>väga suur: > 10 000 km$^2$ | Järve pindala: | väike: 0,5–1 km$^2$<br>keskmine: 1–10 km$^2$<br>suur: 10–100 km$^2$<br>väga suur: > 100 km$^2$ |
| | | | Sügavus: | madal: < 3 m<br>keskmine: 3–15 m<br>sügav: > 15 m |

## Tabel 1.28. SÜSTEEMI B PUHUL KASUTATAVAD JÕGEDE JA JÄRVEDE KOHUSTUSLIKUD JA LISATUNNUSED

| Alternatiivne kirjeldus | Füüsikalised ja keemilised tunnused, mis määravad jõe (või jõeosa) või järve iseloomu ning seega tema elustiku koosseisu ja struktuuri | |
|---|---|---|
| | **Jõed** | **Järved** |
| Kohustuslikud tunnused | geograafiline kõrgus, geograafiline laius, geograafiline pikkus, valgla geoloogia, valgla pindala | geograafiline kõrgus, geograafiline laius, geograafiline pikkus, valgla geoloogia, pindala, sügavus |
| Lisatunnused | kaugus jõelähtest, vooluhulk, voolu energia, keskmine laius, sügavus ja lang, jõesängi ja -oru kuju, vee puhverdusvõime, kloriidide ja heljumi sisaldus, põhjasetete koostis, õhutemperatuur (vahemik ja keskmine), sademed | keskmine sügavus, järve kuju, segunemistüüp, veevahetus, vee puhverdusvõime, toiteainete foonikontsentratsioon, veetaseme kõikumine, põhjasubstraat, õhutemperatuur (vahemik ja keskmine) |

## Tabel 1.29. ÖKOLOOGILISE SEISUNDI KLASSIDE NORMMÄÄRATLUSED

| Seisund | Normmääratlus |
|---|---|
| Väga hea | Pinnaveekogutüübi füüsikalis-keemiliste ega hüdromorfoloogiliste kvaliteedielementide väärtuses ei ole inimtekkelisi muutusi või on need tühised võrreldes kõnealuse tüübi normaalsete näitajatega häirimatus olekus. Pinnaveekogu bioloogiliste kvaliteedielementide väärtused vastavad kõnealuse tüübi normaalsetele näitajatele häirimatus olekus ega ilmuta mingeid või ilmutavad üksnes tühiseid kõrvalekaldeid. Need on tüübispetsiifilised tingimused ja kooslused. |
| Hea | Pinnaveekogutüübi bioloogiliste kvaliteedielementide väärtused näitavad väheses ulatuses inimtegevusest tulenevaid kõrvalekaldeid, kuid erinevad vastava pinnaveekogutüübi normaalsetest näitajatest häirimatus olekus üksnes vähesel määral. |
| Kesine | Pinnaveekogutüübi bioloogiliste kvaliteedielementide väärtused erinevad vastava pinnaveekogutüübi normaalsetest näitajatest häirimatus olekus mõõdukas ulatuses. Need väärtused ilmutavad mõõdukal määral inimtegevusest tulenevaid kõrvalekaldeid ning on märksa rohkem häiritud kui hea seisundi tingimustes. |
| Halb | Veekogud, millel ilmneb suuremaid kõrvalekaldeid vastava pinnaveekogutüübi bioloogiliste kvaliteedielementide väärtuses ja mille bioloogiliste koosluste näitajad erinevad oluliselt vastava pinnaveekogutüübi näitajatest häirimatus olekus. |
| Väga halb | Veekogud, millel ilmneb tõsiseid kõrvalekaldeid vastava pinnaveekogutüübi bioloogiliste kvaliteedielementide väärtuses ja milles suur osa tavaliselt vastava pinnaveekogutüübiga häirimatus olekus seotud bioloogilisi kooslusi puudub. |

pealt määrata tema tüpoloogiline kuuluvus. Tüpoloogia peab seejuures olema piisavalt paindlik, et seda saaks ühtviisi rakendada kõigis Euroopa Liidu liikmesmaades. Neis piirkondades, kus veekogusid tuntakse halvasti, tuleb pruukida jäika tüpoloogiat ehk süsteemi A (tabel 1.27). Iga ökopiirkonna sees (neid on 25) määravad siseveekogu tüübi selle suurus, geograafiline kõrgus ja valgla geoloogiline iseloom. Piirkondades, kus veekogudest on hea ülevaade juba olemas (näiteks Eestis), võib kasutada paindlikumat süsteemi B (tabel 1.28), mis võimaldab pruukida juba olemasolevaid tüpoloogiaid ja asetada need etteantud raamidesse. Eestis on selleks näiteks Aare Mäemetsa järvetüpoloogia.

**Ökoloogilisi klasse** on viis (tabel 1.29). **Väga hea** kvaliteedi klass hõlmab pinnaveekogusid, millele inimmõju peaaegu puudub ja kus seetõttu nii elustik kui ka hüdrokeemilised ja -morfoloogilised näitajad vastavad looduslikule seisundile. Eri tüüpide väga hea ökoloogilise kvaliteediga esindajad moodustavad tüübiomaste foonitingimuste etalonid. Kui mõne tüübi puhul pole selliseid veekogusid looduses enam säilinud, tuleb foonitingimused määrata teisiti, näiteks paleolimnoloogiliste meetodite või modelleerimise abil või eksperdihinnangute järgi. Igale tüübile tuleb koostada oma klassifikatsioon. **Heas** seisundis veekogus on lubatud väikesed bioloogiliste näitajate kõrvalekalded. **Kesise** kvaliteedi klassi satuvad veekogud, kus bioloogilised muutused on mõõdukad. Kui muutused on ületanud mõõdukuse piiri, tuleb veekogu ökoloogilist kvaliteeti pidada **halvaks** või **väga halvaks**.

Tabel 1.30. EESTI JÄRVEDE TÜPOLOOGIA KUJUNEMINE VRD JÄRGI.
OL – oligotroofne, MK – miksotroofne, SD – semidüstroofne, AL – alkalitroofne, EU – eutroofne, AT – atsidotroofne, DÜ – düstroofne, HA – halotroofne

| Mineraalainete hulk | Värvus | Valgla | Sügavus | Limnoloogiline tüüp | VRD tüüp |
|---|---|---|---|---|---|
| Kare | tume | lubjarikas | madal | puudub | – |
| | | | sügav | puudub | – |
| | | orgaaniline | madal | puudub | – |
| | | | sügav | puudub | – |
| | hele | lubjarikas | madal | AL | **I** |
| | | | sügav | AL | **I** |
| | | orgaaniline | madal | puudub | – |
| | | | sügav | puudub | – |
| Keskmiselt kare | tume | lubjarikas | madal | puudub | – |
| | | | sügav | puudub | – |
| | | orgaaniline | madal | puudub | – |
| | | | sügav | puudub | – |
| | hele | lubjarikas | madal | EU, HA | **II** |
| | | | sügav | EU | **III** |
| | | orgaaniline | madal | MK, EU, HA | **II** |
| | | | sügav | MK, EU | **III** |
| Pehme | tume | lubjarikas | madal | puudub | – |
| | | | sügav | puudub | – |
| | | orgaaniline | madal | DÜ | **IV** |
| | | | sügav | AT | **IV** |
| | hele | lubjarikas | madal | OL, SD | **V** |
| | | | sügav | OL, SD | **V** |
| | | orgaaniline | madal | puudub | – |
| | | | sügav | puudub | – |

## EESTI JÄRVEDE TÜÜBID VRD JÄRGI

Eesti väikese pindala ja suhteliselt tasase pinnamoe tõttu (valdavalt alla 200 m merepinnast) tuleb järvetüüpide moodustamisel arvestada pindala, sügavust ja valgla iseloomu. Viimane on seotud järve toitumistüübiga ning käsitletav vee kareduse ja värvuse kaudu. Seega on kasutusel neli tegurit (mineraalsus, värvus, valgala iseloom ja sügavus), mis kokku annavad 24 erinevat kombinatsiooni (tabel 1.30). Enamikul neist esindajad looduses siiski puuduvad. Samas ei kajasta see tüpoloogia kuigi hästi meie suurjärvi Peipsit ja Võrtsjärve, mis oma erandlikkuse tõttu on paigutatud eraldi tüüpidesse. Ka soolatoitelised järved sellesse tüübistikku etteantud kategooriate järgi päris hästi ei sobi.

### I tüüp: KAREDA VEEGA JÄRVED

Selle tüübi esindajad on väikesed (alla 10 km$^2$) allikatoitelised järved, mida võib kõige sagedamini leida Pandivere kõrgustikuga piirnevatelt aladelt. Vee keemilistelt omadustelt on nad karedaveelised (üldaluselisus üle 240 $HCO_3^-$ mg/l, elektrijuhtivus üle 400 µS/cm), sest järvevesi on otseses kontaktis paekiviga. Seetõttu on puhverdusvõime suur ning fosfor seotud lubiainetega. Veetemperatuur on madal isegi suvel, vesi ei kihistu ning on suure läbipaistvusega. Järved on kloriidivaesed (kloriide kuni 25 mg/l), elustik vähese liikide arvu ja väikese produktiivsusega.

### II tüüp: KESKMISE KAREDUSEGA KIHISTUMATA VEEGA JÄRVED

Siia kuuluvad väikesed (alla 10 km$^2$), kihistumata vee ja keskmise mineraalainesisaldusega järved (üldaluselisus 80–240 $HCO_3^-$ mg/l, elektrijuhtivus 165–400 µS/cm). Kloriide on vähe (kuni 25 mg/l). Vee värvus varieerub heledatest toonidest pruunideni, mis tähendab, et see tüüp hõlmab Eesti tüpoloogia mõttes nii rohke- ja segatoitelisi kui ka makrofüüdijärvi. See muudab II tüübi piirid üsna ähmaseks. Siia kuuluvad nii head kalajärved kui ka madalad karedaveelised makrofüüdijärved.

### III tüüp: KESKMISE KAREDUSEGA KIHISTUNUD VEEGA JÄRVED

III tüüp on vee füüsikalis-keemiliste parameetrite ja värvuse poolest identne II tüübiga (pindala alla 10 km$^2$, üldaluselisus 80–240 $HCO_3^-$ mg/l, elektrijuhtivus 165–400 µS/cm, kloriide alla 25 mg/l). Erinevuseks on suvine temperatuurikihistumine, mis muudab olulisel määral

geokeemilisi ja bioloogilisi aineringeid. Litoraalis paikneb rikkalik taimestik ja avavees domineerivad planktonvetikad. Paljude järvede sügavamates veekihtides võib ette tulla suvist ja talvist hapnikupuudust.

### IV tüüp: PEHME JA TUMEDA VEEGA JÄRVED

IV tüüp on kolmest eelmisest tunduvalt eriilmelisem, sest siia kuuluvad väikesed (alla 10 $km^2$) rabajärved ja muud humiinainerikkad veekogud. Nad on pehmeveelised (üldaluselisus alla 80 $HCO_3^-$ mg/l, elektrijuhtivus alla 165 µS/cm), kloriidivaesed (alla 25 mg/l) ja kihistumata tumeda veega (neeldumiskoefitsient 400 nm juures ≥ 4 $m^{-1}$, värvus ≥ 100° Pt-Co skaalal). Elustik on vaene ja vähene, sest vesi on happeline ja toiteainevaene ning valgustingimused tumeda vee tõttu kehvad.

### V tüüp: PEHME JA HELEDA VEEGA JÄRVED

V tüüpi kuuluvad inimmõju suhtes kõige tundlikumad järved. Need väikese pindala ja valgalaga veekogud on pehme (üldaluselisus alla 80 $HCO_3^-$ mg/l, elektrijuhtivus alla 165 µS/cm, kloriide alla 25 mg/l) ja heleda veega (neeldumiskoefitsient 400 nm juures alla 4 $m^{-1}$, värvus alla 100° Pt-Co skaalal), millel puhverdusvõime peaaegu puudub. Vähimgi reostus võib selliste järvede ökosüsteemis viia pöördumatute tagajärgedeni.

### VI tüüp: VÕRTSJÄRV
### VII tüüp: PEIPSI JÄRV

Võrtsjärv ja Peipsi järv on paigutatud eraldi tüüpidesse. Suure pindala tõttu (vastavalt 269 ja 3583 $km^2$) ei kajasta väikejärvede puhul kasutatavad kvaliteedinäitajad nende seisundit kuigi hästi. Mõlemad on keskmiselt kareda (üldaluselisus 80–240 $HCO_3^-$ mg/l, elektrijuhtivus 165–400 µS/cm), kloriidivaese (alla 25 mg/l), kihistumata ja heleda veega (neeldumiskoefitsient 400 nm juures alla 4 $m^{-1}$, värvus alla 100° Pt-Co skaalal). Võrtsjärve madaluse tõttu (keskmine sügavus alla 3 m) põhjustab lainetus seal toiteainete regulaarset resuspensiooni vette, vähendab setteid üles keerutades vee läbipaistvust ning pärsib veesisese taimestiku arengut. Kaldanõlva väikese kalde tõttu kõigub Võrtsjärve veetase suurtes piirides. Peipsi järv on tunduvalt sügavam (keskmiselt 7 m) ja pindalalt suurem ning tema eripäraks on piiriveekogu staatus.

### VIII tüüp: RANNIKUJÄRVED

Mere taandumise käigus kujunenud, merest kuni 5 km kaugusel asuvad rannikujärved on kloriidirikkad (üle 25 mg/l) ja varieeruvad palju nii pindala kui ka vee kareduse ja värvuse poolest. Osaline soolase vee sissetung määrab elustiku iseärasused ja hüdrokeemilise režiimi.

## EESTI JÕGEDE TÜÜBID

Eesti, Läti ja Leedu siseveekogusid käsitatakse Euroopas omaette Balti ökopiirkonnana. Kõige rohkem sarnanevad sellega edelas Keskta-sandik (Põhja-Belgia, Holland, Taani, Põhja-Saksamaa, Põhja-Poola) ning idas Idatasandik (Ida-Poola, Valgevene, Põhja-Ukraina, Lääne-Venemaa).

Et valgala (nii nagu pikkuski) ülalt allapoole suureneb, võib tüüp sama jõe piirides muutuda, kui jõgi on piisavalt suur. Kõige väiksemaid vooluveekogusid, mille valgala jääb suudmes alla 10 $km^2$, ei käsitleta. Meenutame siiski, et selliseid osi leidub eranditult kõigis jõestikes, ka kõige suuremates.

Eesti pinnaveekogude tüpiseerimisel on Eesti jõed jagatud tüüpidesse valgala suuruse ja orgaanilise aine sisalduse järgi. Hüdrokeemilises mõttes puudub vajadus tüpiseerimiseks voolukiiruse järgi, kuid elustiku, näiteks kalade ja põhjaselgrootute seisukohast on see väga tähtis tunnus, mida tuleb tüübisiseselt kindlasti arvestada. Enamasti varieerub voolukiirus sama jõe piirides oluliselt, nii et kogu jõe liigitamine kiire- või aeglasevooluliseks pole võimalik. Aluskivimite mõttes paikneb Eesti lubja- ja liivakividel. Lubjarikka pinnakatte tõttu suuri erinevusi vooluvete aluselisuses ei ole. Väga allikaliste veekogude elustik erineb siiski märgatavalt muude piirkondade omast.

VRD vooluveekogude tüpoloogia järgi jaotuvad Eesti jõed valgala suuruse põhjal nelja tüüpi (tabel 1.31). IV tüüp on mõneti erandlik, sest sinna kuulub vaid Narva jõgi. Orgaanilise aine sisalduse järgi (keemiline hapnikutarve – $KHT_{Mn}$) on Tallinna Tehnikaülikooli hüdrokeemik Enn Loigu jaotanud jõed kaheks tüübiks (A ja B; piirväärtus 25 mg O/l). Mõnedes jõgedes võib hapnikutarve mõnel aastal olla üle 25 mg O/l ja mõnel aastal alla selle väärtuse. Sellistel puhkudel tuleb otsustamisel abiks võtta vee värvus, mis on heas korrelatsioonis humiinainete hulgaga.

Lõpetuseks võime nentida, et veekogutüübid on ikkagi kõigest inimeste väljamõeldud kategooriad oma mõtlemise ja majandustegevuse hõlbustamiseks. Ühegi veekogu ükski liik seevastu ei tea, millisesse „tüüpi“ ta kuulub. Veekogud (ka need, mis on looduslikus seisundis) ei lähe hüppeliselt üle ühest tüübist teise, vaid muutuvad pidevalt ja sujuvalt koos kliima, elukoosluste ja inimtegevuse muutumisega. See tähendab, et ka kirjeldatud tüübid ajas muutuvad, võivad üksteiseks üle minna või päris uusi variante moodustada.

### Tabel 1.31. EESTI VOOLUVEEKOGUDE TÜÜBID VRD KRITEERIUMIDE JÄRGI

A – vee permanganaatse hapnikutarbe 90% väärtus > 25 mg O/l
B – vee permanganaatse hapnikutarbe 90% väärtus < 25 mg O/l

| | |
|---|---|
| **I A** | tumedaveelised ja humiinainerikkad, valgala 10–100 km$^2$ |
| **I B** | heledaveelised ja vähese orgaanilise aine sisaldusega, valgala 10–100 km$^2$ |
| **II A** | tumedaveelised ja humiinainerikkad, valgala > 100–1000 km$^2$ |
| **II B** | heledaveelised ja vähese orgaanilise aine sisaldusega, valgala > 100–1000 km$^2$ |
| **III A** | tumedaveelised ja humiinainerikkad, valgala > 1000–10 000 km$^2$ |
| **III B** | heledaveelised ja vähese orgaanilise aine sisaldusega, valgala > 1000–10 000 km$^2$ |
| **IV** | valgala > 10 000 km$^2$ (Narva jõgi) |

## KÜSIMUSED JA PROBLEEMÜLESANDED

1. Troofsusklassifikatsioon on klassikalise limnoloogia osa olnud pikka aega. Miks tuleks sellest loobuda hoolimata tema lihtsusest ja arusaadavusest?
2. Veepoliitika raamdirektiivil põhinevas tüpoloogias sisalduvad muu hulgas sellised veekogutüübid nagu rannajärved ja rannikuveed. Kuidas neid kahte eristada?
3. Millised on limnoloogilise tüpoloogia eelised võrreldes veepoliitika raamdirektiivi tüpoloogiaga?
4. Milline on tehisveekogude staatus olemasolevates tüpoloogiates ja klassifikatsioonides? Kas mingi konkreetse vanuse juures võiks tehisveekogu võrdsustada juba looduslikuga?
5. Miks arvestavad üksiknäitajatel põhinevad klassifikatsioonid enamasti ainult abiootilisi parameetreid, mitte elustikku?

## MÕISTED JA MÄRKSÕNAD

tüpiseerimine
klassifitseerimine
Eesti vooluveekogude tüpoloogia
Eesti järvede tüpoloogia
oligotroofsed e vähetoitelised järved
eutroofsed e rohketoitelised järved
mesotroofsed e kesktoitelised järved
hüpertroofsed e liigtoitelised järved
poolhuumustoitelised e semidüstroofsed järved
huumustoitelised e düstroofsed järved
atsidotroofsed järved
lubjatoitelised e alkalitroofsed järved
segatoitelised e miksotroofsed järved
suurtaimestikurikkad e makrofüüdijärved
soolatoitelised e halotroofsed järved
veepoliitika raamdirektiiv
ökoloogilise seisundi klassid (väga hea, hea, kesine, halb, väga halb)
Eesti järvede tüübid VRD järgi
Eesti vooluveekogude tüübid VRD järgi

# 1.14. Siseveekogude ontogenees

Ökosüsteemides leiavad pidevalt aset muutused. Osa neist on perioodilised, näiteks aastaajalised muutused. Teised on seotud koosluste vahetumise ja teisenemisega ökosüsteemi enda arengu käigus. Selliseid muutusi nimetatakse koosluste järgnevuseks ehk suktsessiooniks. Nende lõppjärguks on koosluste ökoloogiline tasakaal ehk kliimaks. Veekogude looduslikku tekkimist, vananemist ja kadumist nimetatakse ontogeneesiks. Arengubioloogias on ontogenees üksiku organismi areng sünnist küpsuseni või surmani. Limnoloogias on ontogenees ühe konkreetse veekogu arenguprotsess.

**1.261.** Finke jõge Austraalias peetakse üheks maailma vanimaks. Mõned selle jõe harud olid olemas juba 300–400 miljonit aastat tagasi.

## 1.14.1. Vooluveekogude ontogenees

Voolusängid tekivad sajuvee äravoolu või maapinnale tungiva põhjavee uuristava tegevuse tulemusena. Alguses toimub esmase sängi uuristamine ning siis selle süvendamine põhja- ja külgsuunas. Mõnikord liigub säng Coriolisi jõu mõjul oma esialgsest asupaigast kõrvale. Sademete vähenedes võivad jõed kas ajutiselt või lõplikult kuivada.

Et vooluveekogude ja kulutusprotsesside vahel on tihe seos, tekib paratamatult küsimus, kui vanad võivad vooluveekogud üldse olla. Jõgede vanuse määramine on keerukas ja kohati vastuoluline ülesanne. Peamiselt määratakse jõgede vanust mäestike järgi, millest nad alguse saavad. Mida vanemad on mäed, seda vanemad saavad olla jõed. Ükski suur jõgi ei saa kujuneda ilma arvukate lisajõgedeta ja seetõttu on mõistlik rääkida hoopis jõestike, mitte üksikute jõgede vanusest. Jõestike vanus võib küündida sadadest tuhandetest sadade miljonite aastateni. Suudmeveekogude vanust ei peeta vooluveekogude vanuse määramisel oluliseks. Näiteks hakkas Atlandi ookean kujunema 180 mln aastat tagasi, olles noorem sinna praegu suubuvatest jõgedest. Seega on jõgede asendi ja voolusuuna puhul määravateks teguriteks tektoonika ja tektoonilised liikumised ning suured jõed paiknevad üldjuhul vajuvate maakoore osade kohal, kuhu saab koguneda pinnavesi.

Maailma vanimad jõed (kuni 400 miljonit aastat) asuvad Austraalias (joonis 1.261). Et mäestikud, kust

*Eelkambriumi* ajal (4,55–0,5 mld a tagasi) tekkinud kivimid on enamasti juba moondunud ning säilinud kivististe arv neis on väga väike. Toonast paleogeograafiat on väga keeruline rekonstrueerida, kuigi juba sellest perioodist on leitud madalatele vooluveekogudele iseloomulikke põimkihilisi liivasetteid.

*Krüogeeni* ajastul (850–630 mln a tagasi) toimusid suurimad jäätumised Maa ajaloos ning pole tõenäoline, et sel perioodil vooluveekogusid leidus.

*Kambriumi* ajastul setteid kinnipidav maismaataimestik puudus, mistõttu vooluveekogudega edasikantava settematerjali hulk ületas tänapäevase mitu korda. Jõed olid valdavalt madalad ja paljude harudega ning täitsid orge servast servani. Sageli tuli ette üleujutusi, mille taandudes jäi kuivale palju erineva suurusega kive.

*Devonis* algas taimede invasioon maismaale. Esimesena taimestusid rannikutasandikud ja sajurohkete piirkondade orud. Tihe taimestik vähendas erosiooni, edasikantavate setete hulka ja jõesetete terasuurust. Taimkatte ilmudes suurenes ka kliima mõju. Siiski tekitas rahutu maakoor reljeefis suuri kontraste ning rohked üleujutused ja purdmaterjali juurdevool katmata nõlvadelt põhjustasid endiselt voolusängide asendi muutumist ja jõesetete perioodilist kuhjumist. Eriti hästi kajastub see karboni kivisöelasundites, kus jõesetete osakaal on suur.

*Kriidi* ja *paleogeeni* ajaks oli taimestik jõudnud katta ka veelahkmealad ning jõgede tegevus oli juba sarnane tänapäevasega.

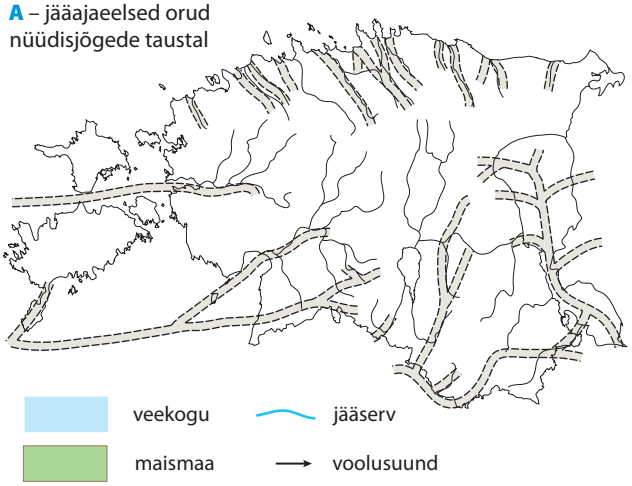
need jõed alguse said, on vanad, on loodusjõud nad tänapäevaks suurel määral kulutanud. Kuid merede vanus, kuhu jõed suubuvad, võib isegi väiksem olla. Näiteks mõned Põhja-Ameerika Apalatši mägede idanõlvade jõed arvatakse olevat vanemad (vanus 130 miljonit aastat) kui Atlandi ookean, millesse nad suubuvad (joonis 1.262). Maailma suurim jõgi Amazonas Lõuna-Ameerikas voolab tänapäeval läänest itta: ta algab Andide mäestikust ja suubub Atlandi ookeani. Kuid see pole alati nii olnud. Kriidiajastu keskel (ligikaudu 100 miljonit aastat tagasi) lahknesid tänapäeva Aafrika ja Lõuna-Ameerika. Viimase idaserva tekkis selle tagajärjel kõrgendik, mistõttu Amazonas voolas mõnda aega läände tagasi. Kriidiajastu lõpuks oli Andide mäeahelik mandri lääneservas kõrgeks kasvanud. Sealt lähtunud jõed täitsid mandri keskosa orundi setetega niipalju, et kogu jõestiku voolusuund vahetus uuesti. Idapoolne kõrgendik uhuti minema ja vesi voolas nüüd juba tekkinud Atlandi ookeani.

Lääne- ja Ida-Euroopa jõed ei kuulu küll maailma suurimate hulka, kuid on üsna vanad. Näiteks Reini ja Maasi jõgi kujunesid miotseeni ajal 20 mln a tagasi. Doni alged pärinevad 30–40 mln a tagusest ajast. Elbe on seevastu võrdlemisi noor vooluveekogu: tal on vanust kõigest 3–4 mln a. Põhjapoolkeral on jõesüsteemide arengut ja paiknemist märkimisväärselt mõjutanud kvaternaari ajastul toimunud mandrijäätumised.

Praegused Eesti jõed on kujunenud pärast viimast jääaega ning seega on nad keskmiselt ainult mõne aastatuhande vanused. Eesti vanimad jõeorud (Piusa, Võhandu, Ahja) asuvad Lõuna-Eestis. Mandrijää taandudes umbes 12 600 aastat tagasi langes praeguse Peipsi järve lõunaosas liustiku serva ees olnud jääjärve tase 70–75 meetrini üle merepinna. Liustiku edasisel taandumisel moodustusid sügavad (33–45 m) orud. Esialgu toimus väljavool Peipsi jääjärvest Väikese Emajõe kaudu lõunasse, hiljem aga Emajõe, Viljandi ja Navesti oru kaudu läände (joonis 1.263). Seega on need orud Kagu-Eesti omadest isegi nooremad. Mõne oru põhi paikneb Peipsi ja Võrtsjärve praegusest veetasemest kuni 16 m allpool. Ebaühtlase maatõusu tõttu, mis oli kõige suurem loodes, hakkas Võrtsjärve ja Peipsi pind taas tõusma. Ülesüvenenud orgudes algas jõe- ja järvesetete kuhjumine ning soostumine (turba paksus jõgede alamjooksul oli kuni 10 m). Selline jõgede areng jätkub Lõuna-Eestis praegugi.

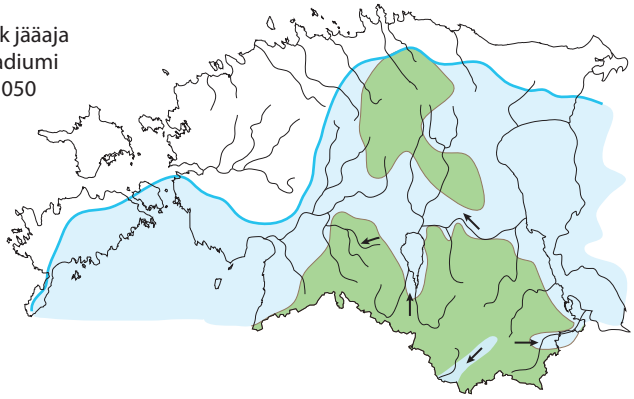
**1.262.** Susquehanna jõgi on üks Apalatši mäestiku vanimaid vooluveekogusid.

**A** – jääajaeelsed orud nüüdisjõgede taustal

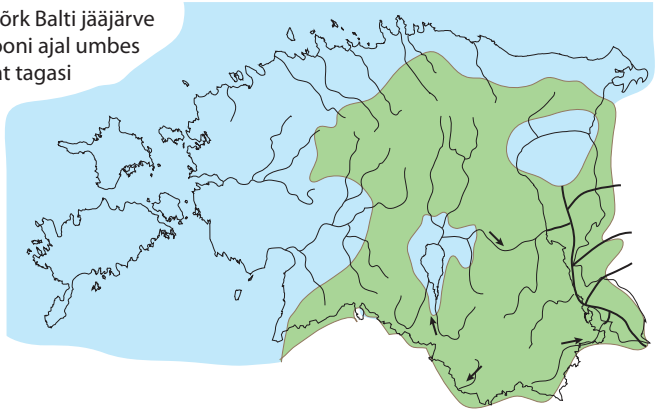



**1.263.** Eesti jõgede areng.

Põhja-Eesti jõed hakkasid tekkima mõni tuhat aastat hiljem kui Lõuna-Eestis. Esmalt tekkisid Tallinnast idas paiknevates klindilahtedes liustikujõedeltad. Järgnes klindi tõus merest, mis toimub tänini. Selle tulemusena on kujunenud kuni 35 m sügavused orud (joonis 1.264). Hoolimata sellest et Lääne-Eestis oli maatõus kiirem, kerkis Ida-Eestis klint varem kui Lääne-Eesti rannik. Idas kerkis maa Balti jääpaisjärve, läänes peamiselt Antsülusjärve taandumise ajal. Kõige varem hakkasid klinti uuristama Selja jõgi, Valgejõgi jt idapoolsed jõed. Läänepoolsed jõed (Pirita, Jägala) uuristasid oma sängi Antsülusjärve, veelgi läänepoolsemad aga Litoriina- ja Limneamere taandudes. Seega toimus Põhja- ja Lääne-Eesti jõgede areng koos üldise mere taandumisega, mistõttu arengu käigus suurenes pidevalt ka nende pikkus. See on hästi märgatav tasase pinnamoega Kasari ja Pärnu jõgikonnas. Põhja-Eestis on klint koos jugadega jaganud jõed kaheks erinevalt arenevaks osaks. Eraldusjoone on tekitanud järsaku ülemise osa uuristusele vastupidavad karbonaatsed kivimid. Klindist ülalpool paiknevale alale ei ole Läänemere veetaseme muutused mõju avaldanud. Põhja-Eestis jõeorud pidevalt süvene-



**B** – jõgedevõrk jääaja Pandivere staadiumi ajal umbes 12 050 aastat tagasi



**C** – jõgedevõrk Balti jääjärve transgressiooni ajal umbes 10 800 aastat tagasi

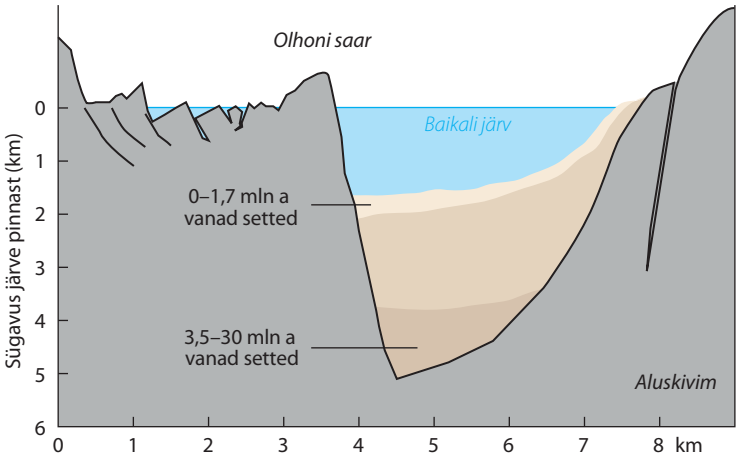
**1.264.** Sügava oru uuristanud Toolse jõgi.

sid, sest maa seal tõusis ja meri alanes. Balti jääpaisjärve rannajoone samatõusujooned näitavad, et loodesse voolavate jõgede alamjooksuala on sellest ajast tänapäevani (umbes 10 200 aasta jooksul) kerkinud 20–30 m rohkem kui ülemjooksuala. Edelasse ja läände suunduvate jõgede alam- ja ülemjooksualal on maatõusu erinevus väiksem. Loodesse suunduvate jõgede alal kallutas maatõus maapinda kagusse, mis koos muude geoloogiliste teguritega põhjustas keskjooksudel madalate soiste lammorgude tekke. Ka Pärnu jõe vasakpoolsete lisajõgede (Navesti jt) vool on takistatud, sest nad voolavad vastu maatõusu.

## 1.14.2. Järvede ontogenees

Järved nagu jõedki on geoloogiliselt ajutised nähtused. Kord tekkinud järvenõgu hävineb järk-järgult geoloogilis-geograafiliste ja bioloogiliste protsesside tagajärjel (joonis 1.265). Neist esimese puhul kulutatakse väljavoolavate jõgede säng nii madalaks, et järv jookseb tühjaks, või kannavad sissevoolavad jõed järvenõo setteid täis. Teisel juhul täitub järvenõgu orgaaniliste setetega, mis pärinevad fütoplanktonist ja suurtaimedest, või on järvenõo täitumise või vee kadumise põhjuseks inimtegevus. Järve saatus on muutuda aja jooksul veeökosüsteemist maismaaks.

**1.265.** Surmaorg USAs Californias kujutab endast luidetest ümbritsetud kunagise järve põhja. Järv eksisteeris siis, kui kliima oli niiskem.




**1.266.** Baikali järve nõo läbilõige. Üksnes tänu väga suurele sügavusele ja väikesele settimiskiirusele on Baikal ka tänapäeval oma kõrgest vanusest hoolimata veel järv.

Järve eluea määravad paljud tunnused, eriti keskmine sügavus, geoloogiline vanus, pinnase koostis ja erosiooni intensiivsus valglal, hüdroloogiline viibeaeg, sademete hulk, keskmine õhutemperatuur ja toiteainete sissekanne õhust. Elueale ja vananemiskiirusele avaldavad esmalt mõju morfomeetrilised näitajad ja järvenõo geoloogiline vanus (joonis 1.266). Keskmisest sügavusest sõltub, kui suur on järvenõo võime vastu võtta setteid, mis pärinevad valgalalt või toodetakse järves endas. Suurte ja sügavate järvede puhul tuleb arvestada sellega, et järvenõo võib hävitada hoopis uus mandrijää pealetung või laamade liikumine, vastastikmõju ja hävimine. Väike keskmine sügavus annab suurtaimedele võimaluse järv vallutada, ja kuna suurtaimestik on väga tõhus orgaanilise aine tootja, täitub järvenõgu kiiresti (joonis 1.267). Mida vanem on järvenõgu, seda lühem on tema prognoositav eluiga. Valgala mõju avaldub erosiooni käigus transporditavate ainehulkade kaudu (joonis 1.268). Pinnase koostis omakorda määrab saabuvate ainete iseloomu ja toiteainete hulga. Lõplikult paneb otseselt või kaudselt järve täitvate ainete hulga paika hüdroloogi-

**1.267.** Korduvalt alandatud veetasemega Endla järv. Järve keskmine sügavus on väike ja võimust võtab veetaimestik, tagajärjeks on kiire vananemine.

**1.268.** Obinitsa oja liivakarva sogane vesi. Vooluveekogud on väga tõhusad ainete transportijad.

**1.269.** Sademetest tingitud kõrge veeseis ja suur vooluhulk hõlbustavad oluliselt ainete ärakannet (Ubesoo oja).

line viibeaeg. Sademed valgalal kujundavad või muudavad hüdroloogilist režiimi ja viibeaega (joonis 1.269). Temperatuur määrab bioproduktsiooni intensiivsuse nii veekogus kui ka valgalal. Kuiv- ja märgdepositsioon sõltuvad samuti kliimateguritest. Setete akumuleerumine võib kulgeda väga erinevas tempos. Näiteks Baikali setted on kogunenud ligi 30 miljonit aastat ja settekihi paksus on mõõdetav kilomeetrites (joonis 1.266). Keskmine settimiskiirus on aga olnud vaid 0,04–0,17 mm aastas.

Võrreldes looduslike järvedega on inimeste rajatud tehis- ja paisjärved ebapüsivamad. Näiteks jõgedele loodud paisjärved kujutavad endast lihtsaid ja kiirelt täituvaid settebasseine (joonis 1.270), kus vee aeglasema liikumise tõttu settivad osakesed, mida jõevool edasi kannaks. Tihtipeale on nad ka liiga väikese sügavusega, et nende eluiga oleks võrreldav looduslike järvede omaga, ning sageli on nad rajatud toiteainerikkale valgalale (nt põllumajandusmaastiku ilmestamiseks), paiknevad asulate ja suuremate punktreostusallikate lähedal või majandatakse neid väga intensiivselt (nt kalakasvatustiigid).

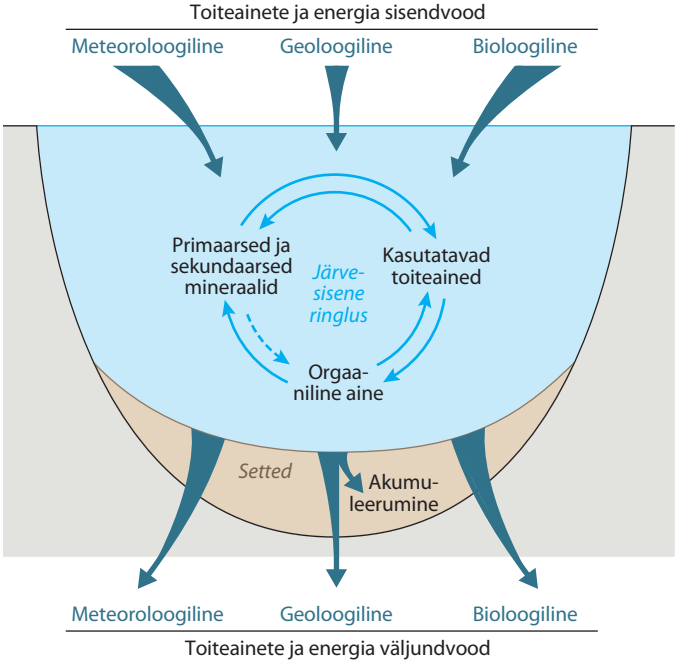
**1.270.** Jõgedele rajatud paisjärved vajavad setete kiire kogunemise tõttu regulaarset hooldust. Tühjakslastud Hellenurme paisjärv.

■ **AKUMULATSIOON JÄRVEDES** Järvenõo täitumist võib vaadelda energia ja ainete akumulatsioonina järve. See toimub peamiselt kolmest allikast: meteoroloogilisest, bioloogilisest ja geoloogilisest (joonis 1.271).

Meteoroloogilise allika moodustab ainete sissekanne tuule ja sademetega ning energia pärineb peamiselt päikesekiirgusest. *Geoloogilised* aine- ja energiavood avalduvad nii lahustunud kui ka tahke aine sissekandes ümbritsevatelt aladelt, kus energia on peamiselt orgaanilise aine kujul.

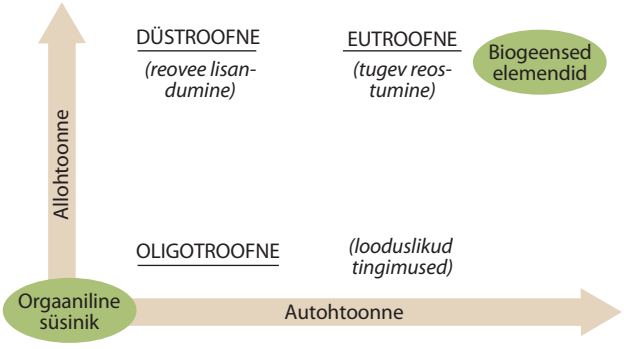
Bioloogiline voog avaldub loomade liikumises ühest ökosüsteemist teise. Eesti järvede väikese pindala tõttu on sademete otsene mõju tühine, kuid see võib olla oluline kaudselt, valgala kaudu. Ka bioloogiline mõju pole märkimisväärne, kui mitte arvestada veelindude mõju mõnedele madalatele rannajärvedele. Seega on Eesti järvedes peamine energia lisandumise viis geoloogiline ning avaldub orgaaniliste ja mineraalainete lisandumisena.

**1.271.** Aine- ja energiavood järvenõo täitjatena.




■ **ALLO- JA AUTOTROOFIA** Olenevalt sissekantavate ainete ja energia iseloomust, hulgast ja kasutamisest võib järved Åbergi ja Rodhe (1942) järgi jagada kahte suurde rühma: autotroofsed ja allotroofsed.

**Autotroofsed järved** täituvad nende endi toodetud orgaanilise ainega. Seega on ülekaalus mineraalainete sissekanne ja päikeseenergia otsene kasutamine. Allotroofsete järvede puhul prevaleerib täitumine valgalalt saabuva orgaanilise ainega, mida kasutatakse ka peamise energiaallikana. Enamasti on esiplaanil üks akumuleerumistüüp. Autotroofsetes järvedes sünteesitakse akumuleeruv orgaaniline aine sissevoolavatest mineraalainetest ja biogeensetest elementidest.




**1.272.** Allotroofia ja autotroofia seosed peamiste akumulatsioonitüüpidega.

**Allotroofsed järved** täituvad sissevoolava orgaanilise ainega, millest väike osa lülitub järve toiduahelatesse. Nii moodustuvad ürgsest oligotroofsest tüübist vastavalt eutroofne ja düstroofne tüüp. Düstroofse tüübi skeemi on täiendanud Gene Likens (vt ääremärkus 1.17), lisades sellele orgaanilise süsiniku ja biogeensete elementide autohtoonsed ja allohtoonsed vood (joonis 1.272).

Protsessi, kus seni domineerinud süsiniku või biogeensete elementide akumulatsiooniviisile lisandub alternatiivne viis (orgaanilise aine juurdevool), mis annab ligikaudu poole koguakumulatsioonist, nimetatakse **miksotroofiaks**. Selle termini võttis 1920. aastatel kasutusele Heikki Järnefelt, kuid see pole limnoloogide hulgas kuigi laialt kasutusel. Põhjus on selles, et orgaanilisi aineid kasutavaid vetikaid nimetatakse samuti miksotroofseteks ning ühe termini kasutamist mitme nähtuse kirjeldamisel peetakse segadust tekitavaks.

1.17 ÄÄREMÄRKUS

### GENE ELDEN LIKENS

Gene Elden Likens (1935) on USA ökoloog ja limnoloog. Ta on olnud pikka aega juhtiv teadlane multidistsiplinaarsete ökoloogiliste uuringute vallas, keskendudes metsade ja veeökosüsteemide ökoloogiale ja biogeokeemiale. Tuntuks on saanud tema nüüdseks juba rohkem kui 50 aastat kestnud eksperimentide seeria Hubbard Brooki katsemetsas, kus uuritakse ökosüsteemi toimimist ja maakasutustüüpide vahelisi seoseid. Gene Likens koos kolleegidega avastas Põhja-Ameerikas happevihmad ning kirjeldas seoseid fossiilkütuste põletamise ja sademete hapestumise vahel. Tema uurimused on mõjutanud poliitikute otsuseid, olnud eeskujuks paljudele teistele teadustöödele ja kasvatanud avalikkuse teadlikkust inimkonna põhjustatud keskkonnaprobleemidest.

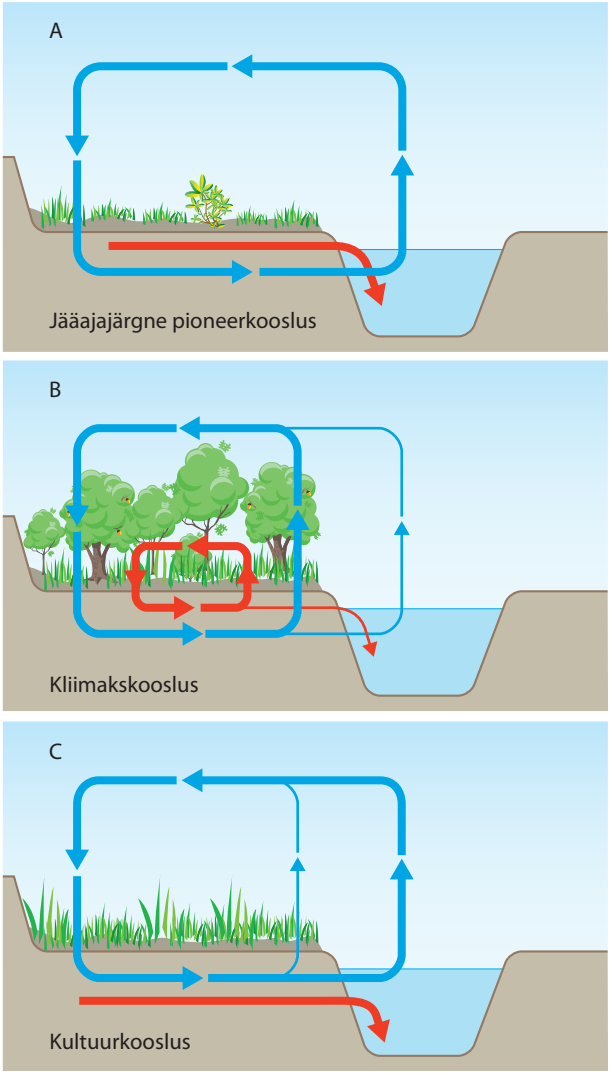
### PARASVÖÖTME JÄRVEDE ARENG

Paljud põhjapoolkera parasvöötme järved tekkisid pärast mandrijää taandumist 10 000–15 000 aastat tagasi. Uued järved ja jääpaisjärved olid valdavalt vähetoitelised ning jaheda veega. Samas oli nende valgalal moreen väga toiteainerikas. Taimkatte puudumise ja rohke veevahetuse tõttu uhuti toiteained pinnasest intensiivselt välja ja kanti järvedesse (joonis 1.273, A). Selle tagajärjel algas planktonvetikate massiline areng, mida kajastab tolleaegsete järvesetete üleminek mineraalsest orgaanilisemaks.

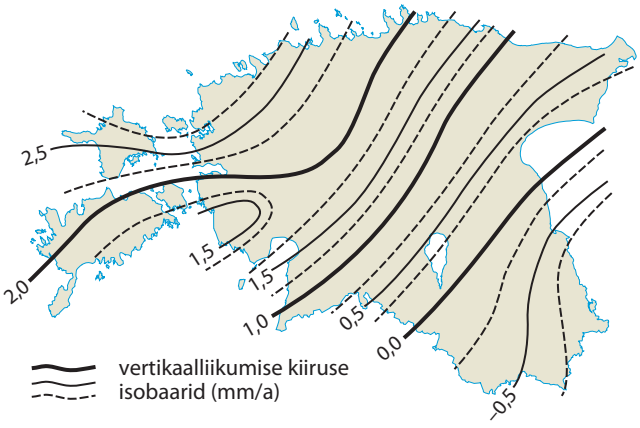
Pärast esialgset suure produktiivsuse faasi järvede toitelisus kahanes, sest toiteainete juurdevool maismaataimestiku arengu tõttu vähenes. Ökosüsteemide aineringete tõhusus kasvas, ainekaod vähenesid ja välja kujunesid kliimakskooslused (joonis 1.273, B). Põhja-Euroopas püsisid ökosüsteemid muutumatuna umbes 1500. aastani eKr. Metsaraie ja ülemineku tõttu paiksele põllumajandusele suurenesid ainekaod valgalalt märgatavalt (tabel 1.33). Sedamööda, kuidas levis alepõllundus ja põllumaade väetamine, hakkas jõgedesse ja järvedesse jõudma üha rohkem toiteaineid (joonis 1.273, C). Selline inimtekkeline eutrofeerumine oli Põhjamaades märgatav juba varajasel rauaajal. Suurenenud toiteainevoo kasutas esialgu ära järvede ja jõgede valgala- ja kaldaveetaimestik, mis toimis puhversüsteemina. Nii püsisid toiteained taimses biomassis ning setete kuhjumine ja toiteainete sisaldus oli enamikus veekogudes ikka veel väike. Enne märgatava inimmõju tekkimist oli elektrijuhtivus veekogudes väga tagasihoidlik, 10–40 µS/cm ehk võrreldav sajuvee omaga. Fosfori hulk oli vooluvetes 10 µg/l piirimail ning lämmastiku hulk 50–300 µg/l. Et järvede toitelisus oli väike, oli esmasprodutsente vähe ja vee pH püsis ligikaudu neutraalne. Veetaseme alandamine järvedes inimeste poolt kiirendas pinnase mineraliseerumist, mistõttu veest küllastumata pinnasekihis tekkisid ainekaod. Seda, et eutrofeerumine ületas tunduvalt looduslikku taset, kinnitab setete ladestumise kiire kasv. Algul tõusis vee elektrijuhtivus suurenenud nõrgumise tõttu läbi mulla tõenäoliselt 150–250 µS-ni/cm. See tulenes viiekordsest lämmastiku ja fosfori hulga suurenemisest. Toiteainevarud kahanesid mullas kiiresti ja põllumaade väetamine muutus hädavajalikuks.

Tabel 1.33. ELEKTRIJUHTIVUSE, pH JA TOITEAINETE ÄRAKANDE DÜNAAMIKA HOLOTSEENI JÄRVEDE VALGLATES

| Periood | pH | Elektrijuhtivus (µS/cm) | Toiteainekao tegur |
|---|---|---|---|
| 12 000–9000 eKr | 6,5–8 | 20–200 | 2–10 |
| 9000–1500 eKr | 6,5–8 | 10–40 | 1 |
| 1500 eKr – 1850 | 4–9 | 30–300 | 5–100 |
| 1850–2000 | 3–11 | 50–1000 | 10–1000 |
| 2000 – | 4–10 | vähenemine | vähenemine |




**1.273.** Põhja-Euroopa järvede areng pärast viimast jääaega (selgitus tekstis).




**1.274.** Maakoore vertikaalliikumine Eestis.

## 1.14.3. Eesti järvede arenguteed

Eesti ala järvede teket ja ontogeneesi on kõige rohkem mõjutanud jääaeg. Kvaternaariajastul (viimased 1,5 mln a) on jääaegu olnud mitu. Viimane neist oli Weichseli jäätumine, mis algas 114 000 aastat tagasi, kui Skandinaavia mägedest valgus aegapidi alla mitme kilomeetri paksune jääkilp, ja saavutas oma haripunkti 22 000–20 000 aasta eest, kattes suuremat osa Põhja-Euroopast.

Eesti mandriala oli enne jääaega merepinnast kõrgemal kui praegu ning Läänemere kohal paiknes hiiglaslik jõesüsteem. Soome lahe kohal voolas Ürg-Neeva, kuhu suubusid omakorda Põhja-Eestis voolanud jõed. Jäätumise tagajärjel tekkinud kilomeetritepaksune jääkiht rikkus laialdastel aladel maakoore ja vahevöö kivimimasside ligikaudse tasakaalu. Sellise koorma all hakkas maapind vajuma ning jää taandudes kiiresti kerkima. Pärast jää lõplikku sulamist kerkis maa Põhja-Eestis ligikaudu 75 meetrit. Kerkimise tõttu vabanesid Läänemere nõos üha uued alad, jõed pikenesid ning merelahed muutusid algul järvedeks ja hiljem soodeks. Maakerge jätkub ka praegu – Hiiumaal Kõpu poolsaarel 3 millimeetrit ja Kirde-Eestis ligikaudu millimeeter aastas (joonis 1.274).

**EESTI VÄIKEJÄRVEDE LOODUSLIK ARENG** Väikejärvede ja teiste maastikuelementide kujunemine algas pärast mandrijää taandumist 14 000 – 10 000 a tagasi. Peamiselt paiknesid noored järved moreeni sisse jäänud hiiglaslike jääpankade sulamislohkudes. Paljude järvede teke on seotud ka jääsulamisvee uuristava tegevusega ning osa paikneb jääkünni tagajärjel moodustunud nõgudes.

Esimesena tekkisid eelkõige glatsiodepressioonilistesse nõgudesse kohalikud jääpaisjärved, millest hiljem arenesid omakorda iseseisvad järvelised veekogud. Glatsiokarstilised järvenõod tekkisid hiljem, pärast setteisse mattunud jääpankade lõplikku sulamist. Enamik uusi järvi olid vähetoitelised ja paiknesid toiteainevaestel liivikutel, olles seetõttu enamasti ka pehme veega (joonis 1.275). Kuid paljudel lubjarikka pinnakattega aladel (nt Pandivere kõrgustikul) oli järvede vesi juba siis üsna mineraalainerikas ja järved lubjatoitelise iseloomuga (joonis 1.276).

Soolatoiteliste ranna- ehk laguunijärvede areng algas hiljem, preboreaalis, Joldiamere taandumise ajal umbes 9400–9300 a tagasi ja kestab tänini (joonis 1.277). Nimetatud kolm algtüüpi panid aluse peaaegu kõigile hilisematele, väga eriilmelistele tüüpidele. Arvestatavate tekkeviisidena tuleks neile veel lisada laugasjärvede teke rabades ja tehisjärvede loomine.

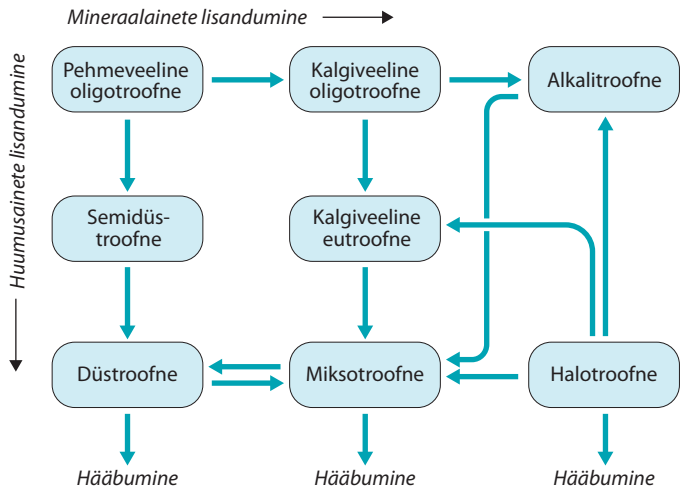
Liustikutekkelised järved pole enamasti suutnud säilitada sarnasust oma eellastega, kuid rannajärvede

hulgast võib leida igas arengustaadiumis olevaid veekogusid. Lähtetüüpide kujunemine tänapäevasteks algas koos vananemisprotsessidega, mis väljenduvad järvenõo täitumises setetega. Setete kuhjumine algas enamikus Eesti järvedes ühel ajal järvenõgude moodustumisega. Lõuna-Eestis said need protsessid alguse 12 000–11 800 a tagasi, Põhja-Eestis 11 800–11 000 a tagasi. Esimesena settisid pruunikashallid või hallid aleuriidid ja aleuriitpeliidid, mis lasuvad kas limnoglatsiaalsetel või fluvioglatsiaalsetel setetel, harva ka moreenil.

Setete kuhjumises toimusid suured muutused holotseenis, kui taimkatte hoogsa arengu, järvede bioproduktsiooni kasvu ja kliima soojenemise tõttu algas järvedes peale mineraalainete kuhjumise ka ohter orgaanilise aine settimine. Lubjarikka pinnakatte või põhjaveega aladel asuvates väikejärvedes algas preboreaalis järvelubja kuhjumine, mis oli intensiivne Pandivere kõrgustiku, Saadjärve voorestiku ja Võrtsjärve nõo väikejärvedes. Juba väljakujunenud sügavamates, liivase valgalaga järvedes algas järvemuda teke. Kliima paranemise ja igikeltsa sulamisega kaasnes intensiivne metsastumine. Sel perioodil kujunesid välja peamised järvede arenguteed (joonis 1.278).

Põhilisteks lähtetüüpe muutvateks protsessideks said düstrofeerumine ehk rikastumine humiinainetega ning toiteainete akumuleerumisest tingitud eutrofeerumine. Boreaalis jätkus endiselt järvelubja settimine. Lääne-Eestis ja Saaremaal see protsess isegi laienes, hõlmates ka neid rohkem või vähem vähetoitelisi järvi, mis vabanesid Antsülusjärve järkjärgulisel taandumisel. Sügavates järvedes jätkus järvemuda kuhjumine, kuid mõnes nooremas järves see alles algas.

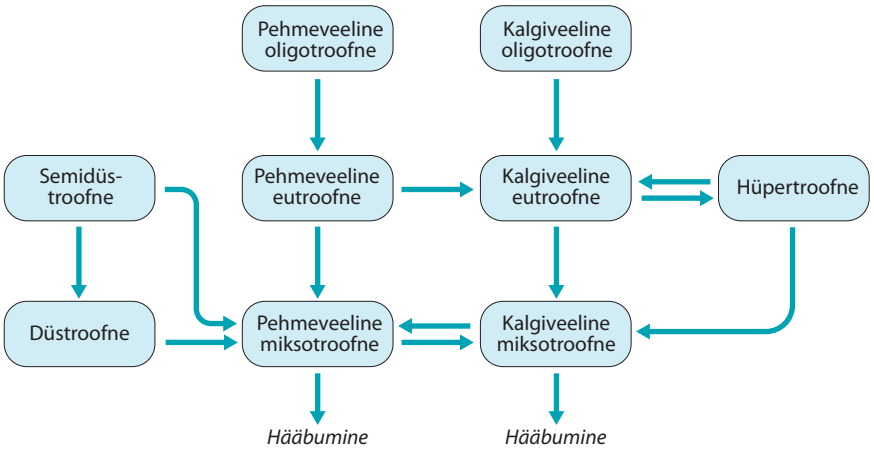
**1.275.** Läbipaistva vee ja vähese toitelisusega Paukjärv on säilitanud oma esialgsed oligotroofsed jooned ka tänapäeval.




**1.278.** Eesti järvede peamised looduslikud arenguteed.

**1.276.** Äntu Sinijärv annab ettekujutuse meie järvede kunagisest alkalitroofsest arengujärgust.

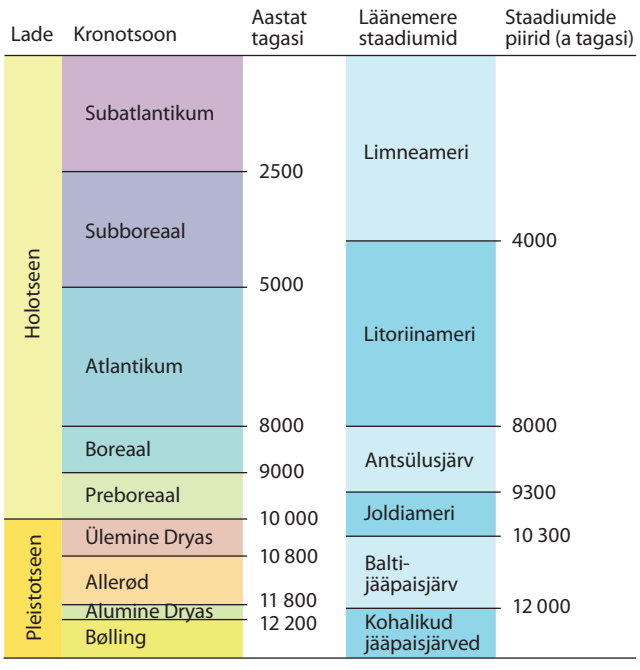
**1.277.** Kooru järv on võrdlemisi hiljuti merest eraldunud madalaveeline lahesopp.




**1.280.** Inimmõju tagajärjel muutunud Eesti järvede arenguteed.

Holotseeni kliimaoptimumi ajal atlantikumis (joonis 1.279) järvelubja kuhjumise intensiivsus vähenes ja subboreaalis sisuliselt lõppes. Vaid vähesed järved säilitasid oma lubjatoitelise iseloomu (näiteks Äntu Sinijärv ja Valgejärv). Põhjuseks oli Läänemere jätkuv taandumine, jõgede erosioonibaasi alanemine ja intensiivne soostumine. Tooni hakkas andma orgaanilise aine settimine, eriti huumusainete lisandumine, ning semidüstroofsete ja düstroofsete järvede teke, mis on siinsele piirkonnale kõige iseloomulikum arenguliin. Soodsad setete kujunemise tingimused vähendasid jõudsalt järvede arvu. Arvatakse, et holotseeni algusest on seetõttu järvede pindala vähenenud ligi kolm korda. Looduslike tegurite kõrval avaldas üha suuremat mõju inimtegevus, mille tagajärjel hakkas arengurida *oligotroofne* → *semidüstroofne* → *düstroofne* asenduma arengureaga *oligotroofne* → *mesotroofne* → *eutroofne* → *hüpertroofne* (joonis 1.280).

Vaadeldes järvede arengut detailsemalt, tuleks esile tuua mitmeid olulisi erinevusi võrreldes esitatud klassikaliste arenguteedega. Enamik Eesti järvi ei lõpeta arengut mitte eutroofses (hüpertroofses) ega düstroofses, vaid düseutroofses staadiumis. Osa madalaid huumustoitelisi järvi võib siiski oma arengu ka samas staadiumis lõpetada, olles eelnevalt täitunud turbasamblaga. Üksikutel juhtudel võivad sügavad segatoitelised järved muutuda düstroofseks, kui kuhjuvad põhjasetted isoleerivad järve põhjaveest või väheneb märkimisväärselt sissevoolude osa. Mineraalainete kuhjumine ja lubjatoiteliste järvede osakaal on meie järvede puhul praegu väike, kuid varem on paljud järved läbinud lühema või pikema kestusega lubjatoitelise staadiumi. Soolatoitelised rannajärved lõpetavad enamjaolt oma eksistentsi madalaveelise laguuni staadiumis ja muutuvad rannaniitudeks. Suuremad ja sügavamad neist lõpetavad oma arengu segatoitelises arengustaadiumis, olles mõnel juhul läbinud rohketoitelise staadiumi.




**1.279.** Pleistotseeni ja holotseeni setete stratigraafiline liigestus.

## KÜSIMUSED JA PROBLEEMÜLESANDED

1. Teadlased prognoosivad, et järgmise 100 aasta jooksul tõuseb Eestis õhutemperatuur kuni 5 °C ja sademete hulk suureneb 5–30%. Kas ja millisel viisil võiksid sellised kliimamuutused mõjutada Eesti järvede arenguteid?
2. Limnoloogiaalases kirjanduses võib eutrofeerumise mõiste kõrval kohata ka mõistet „oligotrofeerumine“, mille all mõeldakse toiteainete hulga ja sellega seoses ka produktiivsuse vähenemist veekogus. Kas oligotrofeerumine võiks muuta Eesti järvede ontogeneesi suunda ja viia nad taas lähtetüüpideni?
3. Mandrilises riftivööndis asuv Maa sügavaim järv Baikal on aastamiljonite jooksul kogunud endasse väga paksu settekihi. Milline on selle järve tulevik? Kas ta täitub kunagi täielikult setetega või hääbub mingil muul viisil?
4. Eesti territooriumil kadus holotseeni kliimaoptimumi ajal ehk atlantilisel perioodil arvukalt järvi setete kiire kuhjumise tagajärjel. Kui pikalt suudavad praegused järved eksisteerida, kui looduslikus seisundis olevates järvedes on setete akumuleerumiskiirus 0,5–10 mm/a?
5. Terminit „miksotroofne järv“ ei peeta limnoloogide seas kuigi õnnestunuks, sest see kattub algoloogias kasutatava terminiga, millel on teine tähendus. Pakkuge mõni uus termin, mis kajastaks orgaaniliste ja mineraalainete akumuleerumist järvedesse.

## MÕISTED JA MÄRKSÕNAD

autotroofsed järved | allotroofsed järved | miksotroofia

■ Vastavalt litsentsilepingule on foto elektrooniline avaldamine keelatud. Fotot saab näha sellelt lingilt: http://www.roggo.ch/review/U25-125.jpg

# 2.

# Siseveekogude elupaigad ja elustik

■ Kesk-Siberis paiknev Baikali järv on maailma vanim (25 miljonit aastat), sügavaim (1642 m) ja suurima mahuga (23 600 km$^3$) mageveejärv, mille vesi moodustab Maa vedela magevee varust ühe viiendiku. Järve vesi on väga selge ja ülemine 250-meetrine veekiht üsna hästi segunenud.

Järves elab üle 2600 tuntud taime- ja loomaliigi, kellest ligikaudu pooled (960 looma- ja 400 taimeliiki) on endeemsed ehk elavad ainult Baikali järves. Endeemne *Lubomirskia baikalensis* (fotol) on järves enim levinud mageveekäsn, kes elab kivistel pindadel 1–120 meetri sügavusel ja võib kasvada kuni 1,2 meetri pikkuseks.

Järve valglale on rajatud tselluloosi- ja keemiatehaseid ning soojuselektrijaamu, mis on seda suurt, kuid õrna ökosüsteemi tugevasti kahjustanud. Vähenenud on kalasaak ja hävinud suur osa põhjaelustikust.

# 2.1 Vesikeskkonna erinevused maismaast ja nende mõju elustikule

Kõik Maa elusorganismid sisaldavad vett. Erinevalt maismaaelustikust pole vee-elustikul oma keskkonna tõttu enamasti kuivamist karta. Iseasi, et paljud veekogud või nende osad ise sageli looduslikel põhjustel kuivavad. Väga soolaste veekogude vesi pole elustikule siiski talutav. Siin vaatleme vee- ja maismaaelustiku iseärasusi, mis tulenevad peamiselt vee ja õhu kui elukeskkondade erinevustest. Paljudel elustikurühmadel on vees oma asendi säilitamiseks ja kulgemiseks lisakohastumusi, mida käsitleme põhjalikumalt elupaikade ja -vormide juures (vt ptk 2.2 ja 2.3).

## 2.1.1. Tihedus, rõhk ja pindpinevus

Vee tihedus +4 °C juures on 1000 kg/m$^3$, õhu tihedus aga ligikaudu 1,3 kg/m$^3$. See tähendab, et seisvas vees on edasiliikumiseks vaja palju suuremat jõupingutust kui õhus. Enamik vee-elanikke on veest raskemad, ehkki suurema osa nende kehast moodustab vesi. Samas võimaldab vee suur tihedus suhteliselt kergesti põhja vajumata paigal hõljuda võrreldes pingutusega, mida tuleks teha õhus, et mitte alla kukkuda. Paljud liigid veedavadki suurema osa elust vees hõljudes. Ehkki suurenduseta nähtamatut seisuvee-elustikku peetakse liikumise mõttes passiivseks (planktoniks ehk hõljumiks), suudab ka suur osa mikroobe oma kaugust veepinnast või põhjast siiski kuigivõrd reguleerida. Hulkraksed planktoniloomad võivad peale selle edukalt liikuda ka horisontaalsuunas. See-eest vooluvetes on pärivoolu liikumine väga kerge, vastuvoolu aga eriti raske. Selle asemel et vooluga kaasa triivida, püüab vooluvee-elustik enamasti paigale jääda või isegi vastuvoolu liikuda. Kehakujult on mõned vee-elanikud, eriti kalad, voolujoonelised (kohastunud veekihis kulgemiseks), mida maismaaolendite seas ei esine. Siiski elab vees ka pikajalgseid, ussitaolisi või koorikja kehakujuga loomi. Mõned veeloomad võivad ajuti väga kiiresti liikuda, teised püsivad alati paigal.

Tavaline õhurõhk veepinnal on 1013 mbar (760 mm Hg) ning iga meeter sügavust annab sellele vees

1/10 juurde. Seega kahekordistub veepinnal olev rõhk ligikaudu 10 m sügavusel. Koos rõhu suurenemisega süvitsi muutuvad aga sisevetes kiiresti ka mõned teised elustikule väga olulised elutingimused (valgus, temperatuur, hapnikusisaldus), mistõttu rõhu enda mõju jääb sageli teisejärguliseks.

Pindpinevus on nähtus, kus gaasiga kontaktis oleva vedeliku pind toimib nagu õhuke elastne kile. Paljud mittemärguvad olendid (eriti bakterid jt mikroobid) püsivad niiviisi veepindkiles ega vaju põhja.

## 2.1.2. Temperatuur

Temperatuur kõigub kõige rohkem madalates ja ajutistes, kõige vähem suurtes ja sügavates vetes. Mida suurem on veemass, seda aeglasemalt see soojeneb ja jahtub. Sügaval, kuhu päikesekiirgus ei jõua, jahtub vesi +4 °C-ni. Maa alt allikatena väljuv vesi on aasta läbi stabiilse temperatuuriga, kuid sõltuvalt oludest on muudest pinnavetest tavaliselt kas külmem või soojem (kuumaveeallikates) (joonis 2.1).

Õhuga võrreldes on vee soojusmahtuvus ligikaudu neli korda suurem. Seepärast soojeneb ja jahtub vesi õhust märksa aeglasemalt, mis pehmendab oluliselt nii temperatuuri ööpäevast kui ka aastaajalist kõikumist. Veekogudes saabuvad suvi ja talv hiljem kui maismaal. Kui õhutemperatuur langeb alla 0 °C, hakkavad mageveekogud külmuma. Soolaste sisevete külmumistemperatuur on madalam kui magevetes ja sõltub soolsusest. Et jää tihedus on väiksem kui vee tihedus 4 °C juures, jääb jää veepinnale ega vaju põhja. Kui veekogu ei külmu põhjani, säilib temas osa elukeskkonda vedelas olekus. Seisuvetes võib jää märkimisväärselt takistada õhuhapniku ligipääsu veele, nii et jääalune elustik lämbub. Samas kaitseb jää suurte järvede madalas vees elavaid õrnu organisme tugeva lainetuse eest ja tema alumine külg on pisielustikule kinnituskohaks.

Nii nagu maismaalgi elavdab temperatuuri mõõdukas tõus vees suurema osa elustiku tegevust. Siiski leidub vees ka külmalembesi elustikurühmi, näiteks putukatest kevikulised (*Plecoptera*), kellest mõned söövad ja kasvavad just talviti. Kalade seas on nii rühmi, kes armastavad külma vett (näiteks enamik lõhilasi), kui ka neid, kes eelistavad sooja vett (enamik karpkalalasi). Väga kõrge temperatuur mõjub suuremale osale elustikust siiski pärssivalt ja kuumaveeallikates (alates +37 °C) leidub ainult üksikuid liike.

**2.1** Paljud pinnaveekogud saavad alguse allikast, kus põhjavesi voolab maapinnale. Eesti allikad on aasta ringi külmaveelised ja vähese hapnikusisaldusega. Neis on küll palju lahustunud mineraale, kuid väga vähe toiteaineid, mistõttu vee-elustik on neis liigivaene. Oostriku allikas Järvamaal.

## 2.1.3. Hapnikusisaldus

Vesi sisaldab õhuga võrreldes märksa vähem hapnikku (vt ptk 1.7.2). Õhus on hapnikku 21%, seega *ca* 270 g/m$^3$. Hapnikurikkas vees (näiteks kiirevoolulises jõelõigus) on hapnikusisaldus suurusjärgus 10 mg/l (10 g/m$^3$), väga hapnikuvaeses vees aga 1 mg/l (1 g/m$^3$). Seega jääb hapnikusisaldus vees õhule palju kordi alla isegi seal, kus vesi pidevalt seguneb ning õhuhapnikuga rikastub. Looduslikku tugevat hapnikupuudust võib täheldada seisuvete sügavamates kihtides ning rohke lahustunud orgaanilise ainega vees. Hapniku lahustuvus vees väheneb temperatuuri tõustes. Pinnaveega võrreldes on hapnikuvaesed ka põhja- ja allikavesi, kuhu hapnik pääseb alles pärast õhuga kokkupuutumist (joonis 2.1).

Paljud veeloomad hingavad peamiselt või osaliselt difusiooni teel läbi kehapinna või vesikeskkonnale iseloomulike õhukeseseinaliste hingamiselundite (lõpuste) abil. Mõned veeputukad hingavad atmosfääriõhku veest väljaulatuvate jätkete kaudu või võtavad õhu mullidena vee alla kaasa (joonis 2.2).

**2.2** Elutegevuseks vajalikku hapnikku saab kiililise punasilmliidriku (*Erythromma najas*) vastne läbi keha tagaotsas olevate lõpuste (ülal). Lutikaline vesihark (*Nepa cinerea*) võtab seda veepinnal otse õhust spetsiaalse toru kaudu (all).

### 2.1.4. Soolsus ja elektrijuhtivus

Õhus soolad peaaegu puuduvad, vees aga lahustuvad paljud soolad hästi. See avaldab vee-elustikule otsest ja olulist mõju (vt ptk 1.8). Magevee soolasisaldus (< 3 g/l) on enamasti väiksem kui mageveeolendite rakkudes või kehavedelikus. Imetajate vere soolsus on näiteks 5–8 g/l. Seetõttu tungib rakkudesse osmootsel teel pidevalt vett, mida tuleb välja tõrjuda. Mõned veetaimed on lahendanud selle probleemi tugevate rakuseinte abil, mis ei lase vedelikke kergesti läbi. Õhukese rakuseinaga loomad on sunnitud veesisalduse vähendamiseks pidevalt energiat kulutama. Vastupidine olukord on soolajärvedes, kus vett tuleb organismis kinni hoida, sooli aga eritada. Seepärast mageveeloomad erinevalt soolaste vete ja maismaaloomadest ei joo ning neid ei ähvarda veepuudus, välja arvatud veekogu kuivades. Paljudel veeloomadel ongi mõned kehapiirkonnad või elundid ette nähtud soolasisalduse reguleerimiseks (näiteks lõpused, kloorirakud või anaalpapillid). Loomaliigid, kes rändavad soolasest veest magedasse või vastupidi (näiteks siirdekalad), peavad oma soolavahetuse selleks ajaks ümber korraldama.

Soolsusega on otseses seoses elektrijuhtivus. Kuiv õhk ei juhi elektrit peaaegu üldse, seevastu vee elektrijuhtivus on seda suurem, mida rohkem leidub temas lahustunud aineid. Selle tunnuse väärtus võib looduses erineda mitukümmend korda. Näiteks loodusliku vihmavee elektrijuhtivus Eestis on tavaliselt 10–20 µS/cm, põhjavees aga üle 500 µS/cm.

Mõned kalad saadavad sogases vees toitu otsides välja nõrku elektrilisi signaale, mille eesmärk on veealuse elektrivälja muutuste tajumine kuni 0,5 m kauguselt. Tugevaid impulsse saagi uimastamiseks või vaenlase ehmatamiseks suudavad tekitada näiteks elektrisäga (*Malapterurus electricus*) Aafrikas ja elektriangerjas (*Electrophorus electricus*) Lõuna-Ameerikas (joonis 2.3). Neil on pehmes vees, mis juhib elektrit halvasti, raskem orienteeruda ja saaki surmata kui karedas vees.

### 2.1.5. Nägemine, kuulmine ja haistmine vees

Magevee läbipaistvus on õhu läbipaistvusest palju väiksem (suurusjärk vastavalt meetrites ja kilomeetrites). Kalad näevad teravalt ainult mõne sentimeetri kaugusele, ehkki tajuvad vaatlusobjekti liikumist ka kaugemalt. Suurem osa vee-elustikust on pigem kaitsevärvi kui kirev. Paljud liigid ongi aktiivsed pimedas, kui värvused ei eristu ning nägemisest pole kasu. See-eest levib heli vees peaaegu viis korda kiiremini (ligi 1,5 km/s) kui õhus (0,33 km/s). Paljud veeloomad (kalad, vähid, putukad) suudavad ise heli tekitada ja muidugi ka kuulda.

Nii nagu hingamine toimub ka haistmine, maitsmine ja kompimine vees rohkem „kogu kehaga“ kui õhus. Vooluvetes kannab vesi pidevalt allavoolu lõhnu ja maitseid. Maismaaga võrreldes on jões tegu otsekui vahetpidamata ühest suunast puhuva tuulega.

### 2.1.6. Vesi- ja maismaakeskkonna vaheldumine

Vesikeskkonna püsivus on vee-elustikule üks tähtsamaid looduslikke mõjureid. Mõned liigid on kuivamisega kohastunud, kuid paljudele mõjub vee kadumine või isegi vähene alanemine hävitavalt. Üks suurimaid keskkonnamuutusi, mis võib vee-elanikke tabada, on veekogu kuivamine. Enamik maailma mageveekogusid (nired ja lombid) kuivabki looduslikult igal aastal. Ka alaliste veekogude veetase kõigub, jättes osa põhjast ajutiselt kuivale. Kuivamisohtu sattunud olendid peavad seejärel kas hukkuma, põgenema või veetma veevaba aja mingis vormis, mida kuivus ei kahjusta (näiteks püsimunad). Põgeneda võib näiteks pehmesse settesse (mutta), jõesängi maa-alusesse ossa või naaberveekogusse. Veeputukad saavad kuiva aja maismaal mööda saata ka valmikutena. Mõned keriloomade (*Rotifera*) ja loimurite (*Tardigrada*) liigid on võimelised vees mõne minutiga taastuma isegi pärast paariküm-

**2.3** Elektriangerjas *(Electrophorus electricus)* suudab anda laenguid pingega kuni 600 volti, voolutugevusega kuni 1 amper ja võimsusega kuni 500 vatti.

neaastast kuivust. Mõne karpvähi (*Ostracoda*) munad lausa vajavad vahepealset kuivust hilisemaks edukaks arenguks. Kihulaste (*Simuliidae*) emased munevad kuivadesse jõesängidesse, otsekui teades, et need hiljem vee alla jäävad.

Paljud loomaliigid on kohastunud siirdumiseks kuivalt maalt vette või vastupidi. Näiteks koevad kõik konnad vees, ehkki muidu tegutsevad maismaal. Paljude putukate vastsed elavad vees, valmikud aga kuival. Mõned linnud ja imetajad saavad veekogudest toitu (näiteks saarmas, pardid) või ehitavad sinna pesa (kobras).

### 2.1.7. Vee-elustiku iseärasusi maismaaelustikuga võrreldes

Erinevalt maismaast on suur osa paljude veekogude põhjast ilma fotosünteesijateta. Isegi madalas vees ulatub nende katvus ainult 20–40%-ni. Kuid veetaimedel pole see-eest kunagi veepuudust ja nad saavad toitu (fosfaate ja nitraate) võtta otse veest. Ka orgaanilise aine põhilist ehitusmaterjali süsinikdioksiidi leidub vees tavaliselt rohkem kui õhus. Eriti soodsalt paiknevad kaldataimed, sest neil on alati piisavalt nii vett kui ka valgust. Varjutatus mõjutab elustikku eelkõige kitsastes veekogudes (ojades ja tiikides), kus puude lehestik võib peatada suurema osa valgusest. See puudutab eelkõige fotosünteesijaid, vähem detriidist või loomadest toitujaid.

Vee suur tihedus võimaldab paljudel veesisestel taimedel piirduda õrnade (peaaegu tugikoeta) lehtede ja vartega. Tugikoe asemel saavad nad seega kasvatada rohkem pehmet kudet. Siiski pole veetaimedel tekkinud vees liikuvate sugurakkudega viljastamistüüpi, nagu see toimub sõnajalgtaimedel ja sammaldel vihmavees.

Avavee peamised fotosünteesijad on sageli mikroskoopilised. Selliseid fotosünteesijaid leidub palju vähem maismaal ja vastupidi: vees ei kasva enamasti väga suuri taimi, näiteks puid. Lühikese eluea tõttu ei suuda fütoplankton oma elukeskkonda ise nii pidevalt mõjutada, nagu seda teeb mets maismaal. Ühtlasi tähendab kellegi toitumine üherakulistest vetikatest enamasti nende surma. Suurtel puudel võivad aga elada tuhanded toitujad neid oluliselt kahjustamata.

Et veeloomadel on erinevalt maismaaloomadest viljastamine enamasti väline, võib veeloomade suhteline viljakus (suguproduktide kaal ühe emaslooma kohta) olla väga suur (näiteks kaladel ja konnadel).

## 2.2. Siseveekogude elupaigad

Siseveekogud varieeruvad suuruse, vee voolukiiruse, sügavuse, lahustunud ainete hulga ja iseloomu, põhja iseloomu, vee temperatuuri, alalisuse jpt tunnuste poolest. Nende tunnuste kombinatsioonid moodustavad väga erinevaid elupaiku, mida asustavad erinevad eluvormid ja liigid.

Lõuna-Aasias voolava Gangese jõe delta paljude saartega. Siin leidub väga mitmekesiseid elupaiku, sest vahelduvad nii voolukiirus, sügavus kui ka põhja iseloom. Regulaarselt ujutab jõgi madalamad alad üle ning jätab siis jälle kuivale. Ka sellega on paljud vee-elanikud suurepäraselt kohastunud. Pildil Gangese suurim deltaharu Padma jõgi.

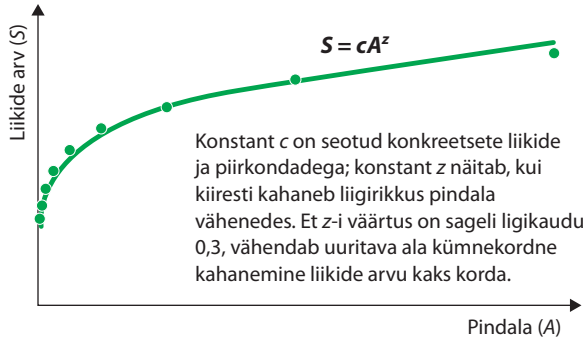
Maapinna kallakusest tuleneva veevoolu olemasolu või puudumise järgi jagatakse pinnaveekogud voolu- ehk lootilisteks ja seisu- ehk lentilisteks veteks (vt ka ptk 1.3.1). Nende kõrval leidub looduses arvukalt üleminekuveekogusid pinna- ja põhjavete vahel (allikad, koopaveekogud) ning veekogude ja maismaa vahel (sood, ajutised veekogud).

Euroopa Liidu veepoliitika raamdirektiivis (Veepoliitika... 2002) kasutatakse voolu- ja seisuveekogude tähistamiseks sõnu „jõgi" ja „järv", kuid need on tegelikult kitsamad mõisted. Paisjärved ei ole järved, vaid vooluvete hüdromorfoloogiliselt rikutud osad. Sood on üleminekualad veekogude ja maismaa vahel. Neid ei peeta tervikuna veekogudeks, vaid piiritletakse nendes sisalduvad seisu-, voolu- või väikeveekogud (tabel 2.1).

Omavahel looduslikult ühendatud siseveekogusid on nende asupaiga järgi mugav rühmitada jõestikeks. **Jõestikud** on üksteisest looduslikult eraldatud veelahmetega (kõrgemad maismaa-alad), moodustades nõnda maismaasiseseid „saari", mille pindala on neid ümbritsevast maismaast tavaliselt väiksem. Neid asustab aga vee-elustik, mitte maismaaelustik nagu veekogudes asuvaid päris saari.

Jõestiku moodustab peajõgi koos temasse suubuvate lisajõgede, temast lahknevate ja temasse taassuubuvate harujõgede ning kõigi temaga ühenduses olevate järvedega. **Peajõgi** on jõestiku suurim, s.t veerohkeim ja/või pikim osa. Jõe kõrgeimal asuvat osa nimetatakse lähteks ja madalaimal asuvat osa suudmeks. Iga peajõgi kas suubub merre või lõpeb väljavooluta järves või soos. Jõestikke nimetatakse peajõe järgi. Järvede väljavoolud on järvedesse suubuvate jõgede suhtes peajõed. Erikategooria moodustavad umbjärved, millesse ei suubu ning millest ei lähtu ühtki nähtava sängiga jõge.

Jõestike kunstlike ühendusteede (kanalite) rajamine toob tavaliselt kaasa uute liikide kiire leviku seni hõivamata aladele. **Saarte biogeograafia teooria** järgi sõltub meresaare liigirikkus ($S$) tema pindalast ($A$) astmeliselt: $S = cA^z$, kus c ja z konstandid.




Ka veekogudes suureneb liikide arv tavaliselt koos veekogu valgala või pindala suurenemisega. Suuri veekogusid on asustajatel lihtsam leida või suurem tõenäosus sinna passiivselt sattuda. Pindalalt suuremad veekogud sisaldavad tõenäoliselt ka rohkem elupaiku, mis suurendab mitmekesisust. Veekogu väiksus ei pruugi siiski

## Tabel 2.1. MAASTIKUÜÜKSUSED MAISMAAL JA NEILE VASTAVAD ELUPAIGAD SISEVETES

| Kategooria või tunnus | Maismaa | Vooluveekogu | Seisuveekogu | Soo | Väikeveekogu |
|---|---|---|---|---|---|
| Paigastik | Org, nõgu, nõostik | Jõestik, mille peajõgi suubub merre | Järv või tiik (järvestik, kui moodustab piiritletava üksuse) | Soostik | — |
| Allpaigastik | Lisaorg | Ülemjooks, keskjooks, alamjooks | Järv, tiik või järveosa (kui on mitmeks liigestunud) | Soo | — |
| Paigas | Perv, nõlv, põhi | Vööde (ripaal, mediaal), pole oluline väga madalatel jõgedel | Vööde (pelagiaal, bentaal), pole oluline väga madalatel järvedel ja tiikidel | Serv, keskosa | — |
| Paik | Taimestiku ja mulla järgi | Ritraal, potamaal, marginaal | *Pelagiaal*: epilimnion, metalimnion, hüpolimnion. *Bentaal*: litoraal, sublitoraal, profundaal | *Seisuveed*: laugas, mättavahe, älves, märe *Vooluveed*: nire | *Seisuveed*: lomp *Vooluveed*: nire |
| Tüüp aluskivimi järgi* | Minero- või organogeenne | Tumeda- või heledaveeline[1] | Kalgiveeline, keskmise karedusega, pehmeveeline (heleda- või tumedaveeline), rannajärv[1] | Allikasoo, madalsoo, siirdesoo, raba[2] | — |
| Varjutatus kaldapuudega | Mets või avamaastik | Mets või avamaastik | Mets või avamaastik (pole oluline pelagiaalis ja profundaalis) | Mets või avamaastik | Mets või avamaastik |
| Veetemperatuur (°C ) suvel[3] | | Külm (< 13), jahe (13–17), paras (17–21) või soe (> 21) | Külm, jahe, paras või soe | Külm, jahe, paras või soe | Külm, jahe, paras või soe |
| Vesikeskkonna püsivus | | Alaline või ajutine | Alaline või ajutine | Alaline või ajutine (nt luhasood) | Alaline või ajutine |

* Eesti veekogude hüdrokeemiline tüüp sõltub pigem pinnakattest (turvas, moreen) kui aluskivimist

[1] Pinnaveekogumite... 2009 järgi; [2] Valk 1988 järgi; [3] Järvekülg 2001 järgi

(Maastikuüksused maismaal Arold, 2001 järgi)

tähendada veel liigivaesust, sest liigirikkus ei sõltu ainult pindalast. Seda kujundavad peale suuruse ka vee temperatuur, vee sügavus, kõrgus merepinnast, põhja iseloom ja veetaseme stabiilsus. Kõige rohkem liike leidub tavaliselt stabiilse tasemega madalas mõõdukalt soojas veekogus või selle osas, mis ei asu kõrgel mägedes ja kus on mitmekesine põhi. Paljud liigid asustavad meelsasti **ökotoni** – vee ja maismaa piiri.

Kaudsemad mõjurid on geoloogiline vanus ja eraldatuse määr teistest veekogudest. Nii nagu saari lahutab merevesi, on ka maismaanõgudes paiknevad veekogud (jõeorud ja järvenõod) üksteisest eraldatud kuiva maaga. See tähendab sageli liigilise koosseisu olulist erinevust juba naaberveekogude vahel, rääkimata kaugematest. Isegi kui rida järvi on jõega ühendatud, ei pruugi alumiste järvede liigid suuta vastuvoolu liikuda, eriti kui jõesängis leidub järske langusi. Suure kõrguste vahe korral võivad ülemised järved olla alumiste järvede asukatele elamiseks kõlbmatud ja vastupidi. Näiteks paljud mägijärved on kaladeta, kui inimesed pole neid sinna ise asustanud. Jõgedes endis suureneb liikide arv koos vooluhulga suurenemise ja **voolu vanusega** (ajaga, mille jooksul vesi on saanud voolata). Eestis on kõik siseveekogud tekkinud alles pärast uusaegkonna noorima ajastu (kvaternaari) viimase (Weichseli) jäätumise lõppu. Meresaartel asuvad mageveekogud on teistest eraldatud soolase veega.

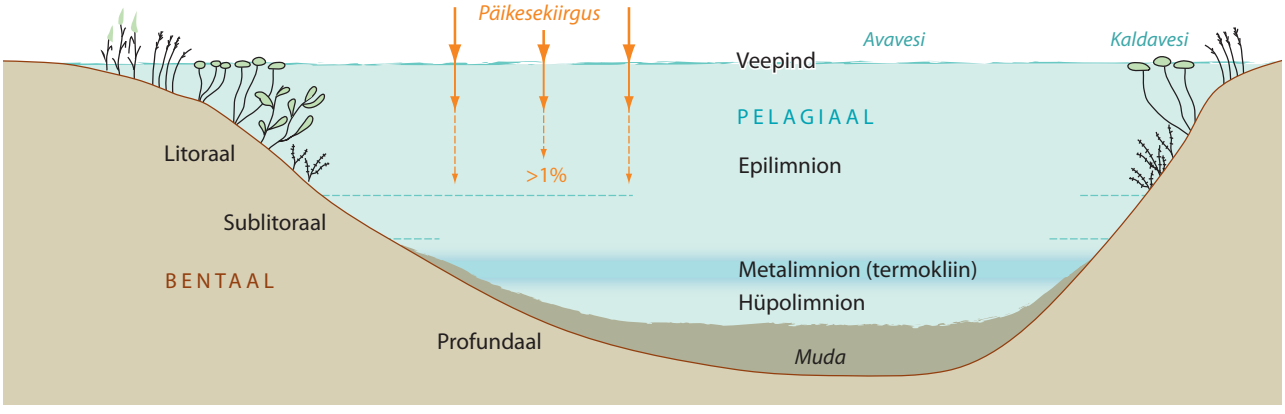
Veekogudele on iseloomulik, et ainult vähesed liigid on neis tavalised, enamik aga haruldased. Et neis leidub alati korraga rohkem kui üks elupaik, ei asusta enamasti ükski liik korraga kogu veekogu, vaid ainult mingit osa sellest.

Vertikaalmõõtmes koosnevad veekogud veekihist (seisuvetes **pelagiaal**) ja põhjast (**bentaal**). Need sõnad tulenevad kreekakeelsetest sõnadest *pelagios* (avamere-) ja *benthos* (meresügavus). Seisu- ja vooluvete veekihi ja põhja elupaigad on erinevate nimetustega (tabel 2.2, joonised 2.4 ja 2.8). Elupaigad erinevad vooluvetes ka veel piki voolusängi. Seisuvetes on erinevus suurim serva ja keskosa vahel. Väikeveekogudeks peame siin niisuguseid veekogusid, mille servad ja keskosa (nii seisu- kui ka vooluvetel) ning lähe ja suue (vooluvetel) moodustavad ühtse elupaiga.

**Tabel 2.2. PELAGIAALI PEAMISED ELUVORMID**

| Veekogu tüüp | Elupaik | Eluvorm | Eluvormi tüüp |
|---|---|---|---|
| Seisuveed | Veepind | Neuston | Epineuston, hüponeuston |
| | Epilimnion | Plankton | Bakterplankton, fütoplankton, zooplankton |
| | | Nekton | Kalad |
| | Metalimnion | Plankton | Bakterplankton, fütoplankton, zooplankton |
| | | Nekton | Kalad |
| | Hüpolimnion | Plankton | Bakterplankton |
| Vooluveed | Veepind | Neuston | Epineuston |
| | Veekiht | Plankton | Bakterplankton, fütoplankton, zooplankton (ainult väga aeglases voolus) |
| | | Nekton | Kalad |
| Sood ja väikeveekogud | Veepind | Neuston | Epineuston, hüponeuston |
| | Epilimnion | Plankton | Bakterplankton, fütoplankton, zooplankton |

**2.4.** Pelagiaali ja bentaali ökoloogilised sügavusvööndid seisuvetes.



### 2.2.1. Seisuvete elupaigad

Seisuveekogud võib jagada järvedeks ja tiikideks nii tekkeviisi (looduslik või tehislik), pindala kui ka selle järgi, kas vee segunemine toimub peamiselt tuule või õhutemperatuuri muutuste mõjul. See jaotus võib sõltuda nii seisuvete üldisest arvukusest vaadeldavas piirkonnas, inimmõju tugevusest kui ka traditsioonist.

**SEISUVETE PELAGIAAL** Seisuveekogude pelagiaali võib horisontaalsuunas jaotada kaldalähedaseks (kaldaveeks) ning kaldast eemal asuvaks avaveeks. Kui tegu on väga kitsa, madala või saarterohke seisuveekoguga, siis tüüpilist avavett ei olegi. Pelagiaali mõjutavad looduslikest teguritest kõige rohkem tuul ja päike.

Vee pealmine kiht ehk **epilimnion** on tavaliselt hapnikurikas tänu otsesele kokkupuutele õhuga, lainetusele ning hapnikku tootvale fotosünteesile (joonis 2.4). Kui vesi on kihistunud, tekib epilimnioni alla hapnikuvaene ja külm veekiht (**hüpolimnion**). Neid eraldab hüppekiht ehk **metalimnion**. Hüpolimnionis liigub vesi väga vähe ega segune.

**Veepinda** on elustiku mõttes vähem uuritud kui muid pelagiaali osi või pole teda muust veekihist eraldi esile toodud. Pinnaelustiku kujundab suures osas vee pindpinevus, mis ei lase sinna sattunud pisielanikke enam kergesti lahti. Mõned putukad ja mikroobid aga ongi kohastunud eluga just veepinnal (joonis 2.5, vt ptk 2.3). Pindkile on ligikaudu 0,1 mm ulatuses muust veekihist ka keemiliselt erinev, sisaldades palju rohkem humiin- ja fulvohappeid, lipiide, metalle ja toitaineid. Sealne elustik peab veesisese elustikuga võrreldes taluma märksa tugevamat valgust, sealhulgas ultraviolettkiirgust, mis võib suurtes kogustes olla surmav.

**SEISUVETE BENTAAL** Seisuveekogude põhja kõige väiksema sügavusega osa, kuhu küünib vähemalt 1% fotosünteetiliselt aktiivset valgust (lainepikkusega 400–700 nm), nii et seal saavad kasvada taimed, nimetatakse **litoraaliks** (joonis 2.4). Sõna ise tuleb ladina keelest (*litus*, om *litoralis*) ja tähendab rannikut. Mõnikord käsitatakse litoraalina ainult seda ala, kus kasvavad veest väljaulatuvad või ujulehtedega taimed. Suurtaimedeta piirkondades võib litoraaliks pidada ka madalaveelisi (kuni 1 m sügavusi) kaldalähedasi alasid. Tervenisti väga madalate veekogude põhi võib niisiis koosneda ainult litoraalist (joonis 2.6). Mere puhul mõistetakse litoraali all tõusu ja mõõna mõjualust põhja.

Enamik Maa veekogusid on väikesed ja seepärast moodustab litoraal suurema osa nende kogupindalast. Seisuvete ja maismaa vaheline ainevahetus toimub peamiselt just litoraalis nii orgaanilise aine otsese sissekandena kui ka allikate ja sissevoolude kaudu. Peale selle on litoraal seisuvetes kõige produktiivsem elupaik suurtaimedele, perifüütonile (pealiskasvule) ja selgrootutele.

Sügavamate aladega võrreldes iseloomustab litoraali valguse ja hapniku küllus. Põhja struktuur võib varieeruda mudast kivideni. Taimestik võib esineda või puududa; rohkem on teda tavaliselt tugeva lainetuse eest varjatud piirkondades. Võrreldes sügavate, pimedate ja mudaga kaetud aladega on litoraal tänu taimedele ja kõvemale põhjale enamasti ka tunduvalt loomarikkam. See seos ei kehti tugeva lainetusega alade kohta liivasel põhjal. Taimed on muule elustikule nii varjeks kiskjate eest kui ka toiduleidmise kohaks. Toiduks on peamiselt taimede pinnale koonduv pealiskasv. Taimede juured rikastavad põhjasetteid hapnikuga.

Mida madalam, keerulisema kaldajoonega, vaheldu-vama sügavusega ning aeglasema süvenemisega on järv,

**2.5.** Liuskurlased (*Gerridae*) on kohastunud elama veepinnal. Nad liiguvad mööda vee pindkilet ja toituvad peamiselt sellest, mis õhust vette kukub.

**2.6.** Elistvere järve põhi koosneb peamiselt litoraalist. Taimed hõlmavad suure osa nii põhjast, veekihist kui ka veepinnast.

seda suurem osakaal on litoraalil. Madalates järvedes tungib valgus peaaegu igal pool põhjani. Ka veekogu kuju ja suurus mõjutavad suuresti põhja iseloomu litoraalis. Näiteks tuulepealsetel (tuule mõju all olevatel) järvekallastel leidub kaldaäärses vees sageli kive. Tuul surub litoraali pelagiaali pinnakihi selget vett, põhja lähedal valgub aga järve keskosa poole muda- ja liivaosakestest küllastatud vesi. Mida pikem on lainete tee, seda suuremat mõju saab lainetus avaldada. Aeglaselt süvenevad ja/või väikesed järved ning tuulealused (tuule eest kaitstud) kaldad on pigem mudase või liivase litoraaliga. Seal ei kanna lainetus mudaosakesi sügavamatesse järveosadesse, vaid nad kogunevad kalda äärde, eriti taimestikku. See aitab muda kinnistada, nii et ta ei pääse enam kergesti liikuma. Vähe mudastunud järvedes on vesi selge kõigis kihtides, väga mudastes ja madalates järvedes pole aga litoraali ja avavee-aluste alade vahel nagunii erilist vahet.

Litoraalist sügavamal asuvat mudastumata ning taimedeta (liivast, savist, turbast) põhja nimetatakse **sublitoraaliks**. Mõnikord kasutatakse seda sõna ka mudase, kuid kihistumata vee all asuva põhja kohta. Kõva põhi näitab, et sealgi mudaosakesed ei setti, vaid vesi kannab nad sügavamale.

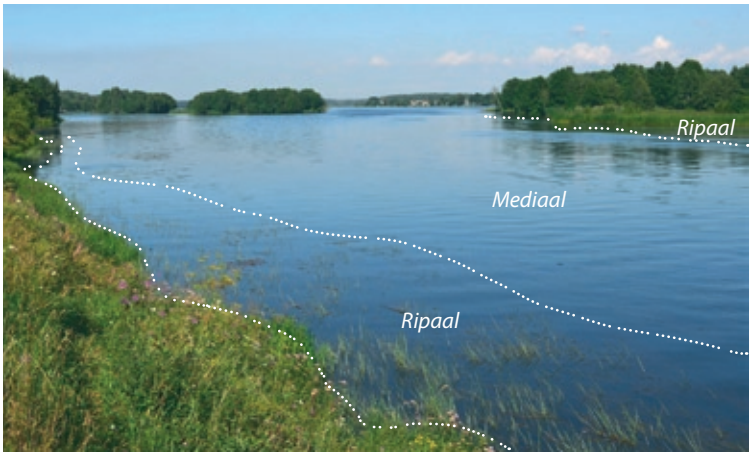
Järvepõhja kõige sügavamat taimedeta ala nimetatakse **profundaaliks**. See on peamine piirkond, kuhu muda koguneb. Muda koosneb nii valglalt tulnud mineraalsest ja orgaanilisest ainest kui ka vee-elanike, peamiselt vetikate jäänustest. Muda lähteaine tekib kogu järvepõhja kohal, kuid madalast veest kandub ta vee liikumise käigus sügavamale. Mõnikord nimetatakse profundaaliks ainult seda osa mudasest põhjast, mille kohal on vesi kihistunud.

## 2.2.2. Vooluvete elupaigad

Vooluvee uuristatud nõgu, milles ta voolab, nimetatakse voolu- ehk **jõesängiks** (vt ptk 1.3.4). Sügavamate vooluvete veekihti võib liigitada keskel asuvaks **mediaaliks** ja kaldaäärseks **ripaaliks** (joonis 2.7), millele suurvee ajal lisandub üleujutatud lauge kaldapiirkond – **lamm** ehk luht.

**Vooluvete suurus.** Seisuvetega võrreldes on vooluvetel üks lisamõõde: nende suurus muutub oluliselt sama veekogu piires lähtest suudmeni. Suurust mõõdetakse vooluhulga, valgala (maa-ala, millelt vesi jõkke voolab), sängi pikkuse või järgu järgi, mis kõik on omavahel positiivses seoses. Mida pikem on jõgi, seda suurem on muutus lähte ja suudme vahel.

**Vooluhulk** (sängi ristlõiget läbiv veehulk ajaühikus) on suhteliselt suur näiteks troopilistes vihmametsades, samuti Kanada lääneranniku, Lõuna-Alaska ja Läänе-Norra vooluvetes. Vooluhulga vähenemine enne suuet




**2.7.** Vooluveekogude bentaali ökoloogilised sügavusvööndid: ripaal, mis ulatub kalda veepiirist põhjataimestikuga kaetud ala lõpuni, ja mediaal, mis hõlmab jõepõhja sügavamaid alasid, kus põhjataimestik puudub. Pildil Narva jõgi.

iseloomustab kõrbes lõppevaid või kõrbeid läbivaid jõgesid (näiteks Okavango ja Niilus Aafrikas).

**Jõe järk** (Strahleri süsteemi järgi) väljendab seda, mitu korda on samasuurused lisajõed vaadeldavast kohast ülalpool omavahel ühinenud. Kogu jõestiku järku hinnatakse peajõe suudmes (vt joonis 1.34, lk 41). Näiteks Mississippi ja Niilus on 10. järku, Eesti suurim, Narva jõgi tõenäoliselt 8. järku. Mida suurem on järgunumber, seda vähem leidub selliseid vooluveekogusid. Kõige rohkem leidub tervenisti 1. järku jõgesid, kuid 1. järku on alguses ka kõik muud jõed.

Vooluvete jagamisel suurematеks jõgedeks ja väiksemateks ojadeks pole kindlat piiri. Kohanimede puhul sõltub see sageli traditsioonist.

Kui vooluveekogu on piisavalt suur, võib teda pikisuunas jagada lähtele järgnevaks ülemjooksuks, suudmele eelnevaks alamjooksuks ja nendevaheliseks keskjooksuks. Klassikaline ülemjooks on kiirevooluline ja kivine oja, keskjooksu iseloomustab vahelduv voolukiirus ja mitmekesine põhi. Merre suubuv alamjooks on veerohke, aeglase vooluga ja mudase põhjaga. Väikeste või vähese langusega vooluvete puhul ei vasta seesugune üldistus tegelikkusele. Soiste jõgede voolukiirus võib olla kogu jõesängis ühtlane või alamjooksul isegi kiirem kui ülal. Kõrbejõgedes võib vooluhulk alamjooksul hoopis väheneda, kuni vesi kaob sootuks.

**Voolukiirus ja põhi.** Jõe lähte ja suudme kõrguste vahet meetrites nimetetakse **languseks**. Voolukiirust maapinna kõrguse muutuse järgi hinnatakse langu järgi. **Languks** nimetatakse mingi jõelõigu pikkuse ja languse suhet (m/km). Keskmine lang on kogu jõe pikkuse ja jõe languse (jõe lähte ja suudme kõrguste vahe) suhe. Näiteks Lõuna-Eesti kiirevooluliste jõgede lang ületab 2 m/km, aeglasevoolulistel jääb see aga alla 0,5 m/km.

Vee otsene liikumiskiirus (m/s) ei pruugi languga alati kokku langeda. Väikese languga jõelõigus võib vool inertsi mõjul ikkagi kiire olla, juhul kui vahetult ülalpool seda asub suure languga piirkondi. Vool on vee hõõrdumise tõttu vastu põhja ja kaldaid pinnal kiirem kui põhja lähedal ja sängi keskel kiirem kui servades. See põhjustab vooluvetes muda kogunemist pigem kalda äärde kui keskele. Seisuvetes koguneb muda pigem kallastest kaugemale.

Põhja iseloom sõltub suuresti voolukiirusest. Et viimane sesoonselt tugevasti varieerub, võib voolukiiruse üle otsustada ka põhja iseloomu järgi. Kiireks vooluks, mille tagajärjel tekib tavaliselt kivine või vähemalt kruusane põhi, peetakse voolu kiirusega ligikaudu 0,5 m/s (tabel 2.3).

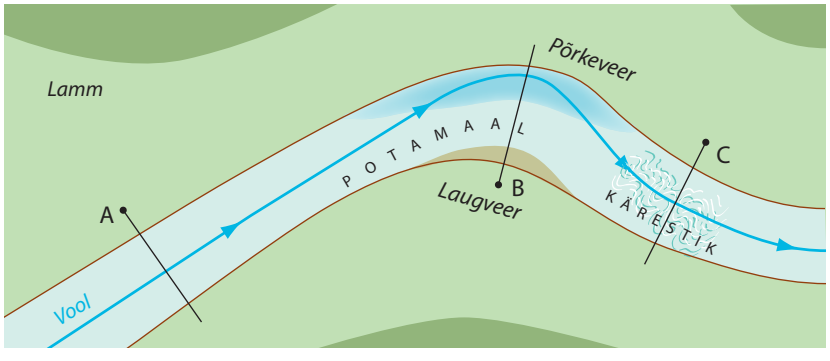
**VOOLUVETE VEEKIHT** Erinevalt seisuvetest on vooluvete vesi enamasti pidevas ühesuunalises liikumises. See segab vett piisavalt ka vertikaalsuunas, nii et veekihist kaovad kõik muud gradiendid peale valguse.

### Tabel 2.3. SEOS VOOLUKIIRUSE JA PÕHJA ISELOOMU VAHEL

| Põhja tüüp | Setteosakese suurus (mm) | Voolukiirus (cm/s) |
|---|---|---|
| Muda | 0,02–0,06 | 3–20 |
| Liiv | 0,06–2 | 20–40 |
| Kruus | 2–64 | 40–60 |
| Kivid | 64–256 | 60–120 |
| Rahnud | > 256 | > 120 |

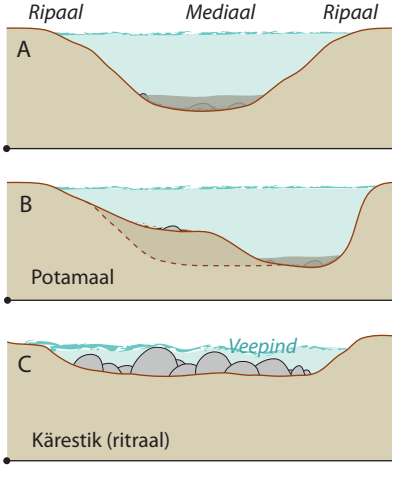
(Dodds 2002 ja Lampert, Sommer 2007 järgi)

Ka valguse järgi ei jagune veekiht enamasti kuigi teravalt, sest vooluveed on valdavalt madalad. Pealegi võib tugev vool, mis haarab maismaalt kaasa palju lahtisi peeni osakesi, vee läbipaistvust tublisti vähendada. Seepärast – tugeva segunemise, suhtelise madaluse (seisuvetega võrreldes) ja väikese laiuse tõttu – ei jagata vooluvete veekihti eraldi nimetustega osadeks (vt tabel 2.2, lk 195). Veepind saab vooluvetes omaette elupaigana toimida ainult väga aeglase vooluga lõikudes.




**2.8.** Vooluvete bentaali võib jagada aeglasevooluliseks potamaaliks ja kiirevooluliseks kärestikuks ehk ritraaliks.

**2.9.** Kärestik Isère'i jõel Prantsusmaal.




Potamaal (Reiu jõgi Pärnumaal).

**VOOLUVETE BENTAAL** Väga mitmekesine elupaik on vooluvete bentaal. Vooluvete põhja võib jagada kiirevooluliseks ja kiviseks **ritraaliks** ehk kärestikuks ning aeglasevooluliseks, liivase, savise, turbase või mudase põhjaga **potamaaliks** (joonis 2.8). Sõna „võrendik" kasutatakse mõnikord küll aeglase vooluga jõelõikude üldnimetusena, kuid see tähistab pigem süvikuid kalade elupaigana. Enamasti paikneb potamaal (ingl *pool*) põrkeveeru ääres sängisüvikus. Voolukiirus on seal väiksem kui ritraalis, mistõttu sinna koguneb liiva ja muda (vt ka joonis 1.39, lk 43).

Kärestikel (ingl *riffle*) on sügavus väiksem ja lang suurem kui mujal jõesängis ning põhi kivisem (joonis 2.9). Eesti keeles puudub sõna, mis tähistaks ritraali ja potamaali vahepealseid olusid, s.t jõelõike, kus vool on kiire, kuid ühtlane (ingl *run*).

**Kosed** on kärestikega võrreldes veel suurema languga jõelõigud ning jugadest langeb vesi otse alla (vt joonis 2.17). Kõigis neis on vee hapnikusisaldus lähedane küllastusele või isegi ületab seda. Seisuvetes on veevoolu analoogiks lainetus, mille olemasolu või puudumine ja tugevus kujundavad põhja samasuguse loogika järgi. Kivisem põhi asub valdavatele tuultele avatud, mudasem aga varjatud kaldas.

Kaldaservad ehk **marginaal** on tüüpiline elupaik sügavatele aeglase vooluga lõikudele ja väga suurtele jõgedele. Põhi on seal pehmem ja võib kasvada suuri veetaimi, mida sängi keskel ei ole. Sinna võib kaldalt kergesti langeda puutüvesid ja oksi.

Äärmist ülemjooksu, kui see on allikaline, võib nimetada krenaaliks (kr *krēnē* allikas). Väga paljud vooluveed siiski ei alga allikatest ega ole ülemjooksul külmaveelised. Illies (1967) peab oma klassikalises vooluvete tsoneerimise käsitluses põhiliseks teguriks hoopis vee temperatuuri. See peaks ritraalses keskkonnas olema alla +20 °C ja potamaalses üle +20 °C. Seega saaksid troopikaveed olla voolukiirusest olenemata peamiselt potamaalsed, suurte laiuskraadide veekogud aga ritraalsed.

Ritraalsete ja potamaalsete lõikude paigutus võib olla korrapärane. Kärestikud asuvad tavaliselt käärude vahel sirgetel osadel, käärudes endis on vool aeglasem. Kärestiku pikkus on tüüpiliselt 5–7 jõesängi laiust, seega tuleb kaks kärestikku iga kääru ühe „lainepikkuse" kohta. Viimane sõltub jõesängi laiusest, kuid on tavaliselt keskmiselt 10–14 laiust pikk. Suurtel ja väikestel jõgedel on käärude proportsioonid sarnased.

**Jõesängi looklemine ja veetaseme muutumine.** Looduslik jõesäng on harva sirge. See tuleneb nii jõeoru põhja ebaühtlasest kõvadusest kui ka langu ebaühtlusest piki sängi. Tulemuseks on sängi looklev kuju (vt joonis 1.39, lk 43). Niisuguseid lookeid ehk käärusid nimetatakse **meandriteks** (joonis 2.10) Väike-Aasia jõe Maiandrose järgi (praegu Büyük Menderes Türgis).

Kui käärud on muutunud juba väga suureks, võib jõgi kitsa maakaela läbi murda, lühendades nii oma teekonda ja ka pikkust. Mahajäetud käärudest kujunevad pikapeale seisuveelised **soodid** ehk vanajõed (joonis 2.10).

Ehkki veetase kõigub looduslikult ka seisuvetes, avalduvad selle muutused vooluvetes eriti ilmekalt. Tavaliselt eristatakse sängi ristlõikes kolme tüüpilist veetaset: madalvesi (katab ainult sängi põhja), kõrgvesi (täidab sängi kuni servaala ehk lammini; joonis 2.11) ja üleujutus (katab ka sängi ümbritseva lammi). Kõigil kolmel juhul voolab vesi ühtlasi ka maa all.

**2.10.** Meandrid kujunevad peamiselt laiades lammorgudes. Vanajõed (soodid) ja meandrid Emajõel.

**2.11.** Madal- ja kõrgvesi samas Rõngu jõe kohas.

### 2.2.3. Üleminekuelupaigad

■ **PINNAVEEKOGU JA PÕHJAVEE ÜLEMINEK** Voolusängi või karstijärve nõo osa, mis asub allpool veekihti, nimetatakse hüporeiliseks piirkonnaks ehk **hüporeaaliks**. See tuleneb kreeka sõnadest *hypo* (all) ja *rheos* (vool). Hüporeaal võib asuda nii nähtava veepeegli all kui ka kahel pool kallaste all. Vett mitteläbilaskva põhja, näiteks savi all hüporeaali ei ole, palju sügavamal asuvaid eraldi põhjaveekihte aga nii ei nimetata. Et hüporeaal pole silmaga nähtav, on tema tähtsust veekogude talitluses enamasti alahinnatud. Tegelikult võib hüporeaalis asuv veehulk maapinnal olevat mitu korda ületada. Ühtlasi liigub seal koos veega ohtralt lahustunud ja peent orgaanilist ainet. Kui maapealne veekiht kuivab, saab veekogu hüporeaalis edasi toimida ning sinna võib põua eest varjuda suur osa elustikust.

■ **JÕGEDE JA JÄRVEDE ÜLEMINEKUD** Kuigi veevool tundub kindla tunnusena, mis jagab veekogud seisu- ja vooluveteks, leidub palju nendevahelisi vorme või üleminekuid. Kui näiteks jõgi läbib järve, aeglustub ta vool tavaliselt enne järve jõudmist. Samas on ka järves jõesuudme ligidal jõelisem keskkond kui mujal. Järvest väljuv jõgi koosneb mõnda aega järveveest, mis omakorda muudab oluliselt jõe enda elustikku selles piirkonnas. Vesi on väljavooludes soojem ja sisaldab jõeveele ebatüüpiliselt palju planktonit, kuid veetase on järve reguleeriva mõju tõttu stabiilsem kui tavaliselt. Mida suurem on vooluhulk, seda pikemalt püsib selline olukord allavoolu. Näiteks Emajõe Võrtsjärvest tingitud loodusliku sogane vesi hakkab selgima alles mitukümmend kilomeetrit allpool.

Mõned jõed voolavadki ainult väikese osa aastast, olles suurema osa ajast seisva veega või taandunud väikeste järvede reaks. Väga suured jõed või nende aeglased osad meenutavad tunnustelt ja elustikult sageli hoopis madalaid järvi (joonis 2.12). Ka paisjärvedes on elutingimused jõgede ja järvede vahepealsed. See on siiski erandlik olukord, kus voolukiirust on muudetud ajutiselt, olgu paisud siis rajatud inimeste või kobraste poolt.

Vanajõed kuuluvad samuti üleminekuveekogude hulka, milles vooluvesi asendub seisuveega. Algul aeglase vooluga haru otsad vähehaaval ummistuvad, mis viib lõpuks seisuveekogu tekkeni. Suurvee ajal võib vanajõgi ajutiselt jälle voolava haruna toimida.

■ **SOOD** **Sood** tekivad seal, kus taimestik ja pehmed setted koguvad ja talletavad palju vett. Sood ongi järvede loodusliku kinnikasvamise normaalne lõpptulemus, hõlmates algul nende madalaid osi ja kattes hiljem kogu veepeegli. Samamoodi ääristavad või katavad sood väikese langusega jõelõikudes vooluveekogusid.

**2.12.** Perävalla jõe alamjooks Emajõe Suursoos on väga väikese langusega. Vesi voolab siin ainult osa aastast.

**2.13.** Rabalaugas Kuresoos Soomaal.

Niisugused sood piki jõgesid on tavalised näiteks Malaisias, Indoneesias, Uus-Guineal ja Tais. Turvas tekib seal kaldapuude lehtedest. Parasvöötme tüüpiline soo on turbasamblasoo ehk raba, kus vihmavesi talletub turbasamblasse. Rabastuda võib ka algselt mõnda muud tüüpi soo. Rabaveekogude elustik on kohastunud väga happelise veega (pH < 5) ning suvise kõrge temperatuuriga (joonis 2.13). Mereäärsed ja kõrbesood võivad olla ka soolased.

Tegelik vee-elustik soodes asustab maismaataimestikuga vaheldumisi paiknevaid seisu-, voolu- ja väikeveekogusid. Viimased võivad moodustada niihästi tiheda võrgustiku kui ka asetseda üksteisest hästi eristatavate üksustena. Soodele on iseloomulik stabiilne veetase. Nii nagu järved ja allikad või mägedes liustikud aitavad ka sood ühtlustada vooluhulka seal, kuhu suubuvad nende väljavoolud.

**2.14.** Lomp Matsalu luhas Lääne-Eestis.

**2.15.** Allikanire Viidumäel Saaremaal.

**2.16.** Porijõe lamm Lõuna-Eestis.

■ **VÄIKEVEEKOGUD** Ehkki sood koosnevad sageli väikeste veekogude võrgustikust, ei asu väikeveekogud sugugi alati soodes. Ainult suuruse (pindala või vooluhulga) järgi on väikeste ja suurte veekogude vahele raske piiri tõmmata. Teine võimalus on defineerida väikeveekogusid elupaikade mitmekesisuse järgi. Näiteks võib väikeveekogudeks pidada objekte, mille pelagiaal on alati ühekihiline ja bentaal kõigis osades ühesugune. Teisisõnu, nende keskosa ei erine oluliselt servaaladest (joonis 2.14, tabel 2.1). Väikeste seisuvete üldnimetus on **lombid**. Väikeste vooluvete ehk **nirede** puhul ei erine keskosa kuigivõrd servadest ega lähe suudmest. See tähendab, et nire suubub kuhugi või ühineb teise nirega enne, kui tema suurus jõuab oluliselt muutuda. Sellised on paljud väikesed allikad (joonis 2.15).

Väikeveekogudes on tavaliselt vähe liike ja nad on olude sunnil (ajutisus või tugev allikalisus) vähenõudlikud. See-eest võib mõni neist liikidest väga arvukas olla. Tavalisteks asukateks on ajutised vee-elanikud, kes suudavad vee kadumist taluda või kiiresti lahkuda (nt kahepaiksed).

Omaette kategooria moodustavad suurte taimede küljes asuvad „veekogud“: puuõõned, lehekaenlad ja suured õied, mida asustab vee-elustik. Paljud väikesed loomad (loimurid, keriloomad jt) elavadki peamiselt maismaataimestikku katvas ja perioodiliselt kuivavas vihmaveekiles. Sellist, limnoterrestrilist elustikku me siin põhjalikumalt ei käsitle.

■ **AJUTISED VEEKOGUD** Siia kuulub suurem osa väikeveekogudest, seega ühtlasi suurem osa maailma veekogudest, sest veekogude suurus ja arv on pöördvõrdelises seoses. Ajutised veekogud võivad kuival ajal siiski hüporeaalis osaliselt säilida. Ajutised on ka suuremate veekogude servaalad (**lammid**). Nende asukate eeliseks väikeveekogude elanikega võrreldes on võimalus veetaseme alanemise korral taanduda sinna, kus vesi on veel alles (joonis 2.16). Erinevalt soodest kõigub lammide veetase märgatavalt.

Lammidel on sageli jõesängist erinev omaette elustik, kuhu näiteks troopikas võivad kuuluda seesugused suured loomad nagu jõedelfiinid ja krokodillid. Lammielustik peab suutma järgida veetaseme kõikumist ning vaheldub kiiresti olenevalt sellest, kas tegu on vooluveelise, seisuveelise või kuiva perioodiga.

### 2.2.4. Erilised elupaigad vooluvetes

**Allikates** on tavaliselt vähe liike, sest neis valitsevad võrdlemisi karmid tingimused. Suuremate jõeosade suhtes, kust saaksid tulla uued liigid, asuvad nad vastuvoolu. Allikates võib ette tulla nii toidu- kui ka veepuudust. Vesi võib seal olla suubumisveekogust märksa külmem või kuumem. Enamik loomi ei suuda elada veetemperatuuril üle +40 °C. Mõned vesilestad ja karpvähid taluvad siiski ka üle 50-kraadist vett, rekordiks on +61,3 °C.

**Jugadel** on väga suur voolukiirus (kuni 6 m/s). Seetõttu on need piirkonnad enamasti kivised, sest kõik lahtised osad kannab veevool minema (joonis 2.17). Selliste paikade elustik peab suutma tugeva voolu eest varjuda või seda taluda.

Omaette elupaik on **hügropetraal** („märjad kivid"), mis koosneb väga õhukesest veekihist ja sellealusest vetika- või samblakihist (joonis 2.18). Madaluse ja seega ka kuivamisohu tõttu ei asusta hügropetraali kuigi palju liike.

Väga külmades ja/või kõrgetes kohtades (krüaalis) leidub vähe toitu ja soojust. Kogu toit saab tulla ainult tolmust, mida kannab liustikele tuul. Vesi pärineb sulavast jääst, kuid võib samas olla sogane. Mõned surusääsklaste (*Chironomidae*) vastsed suudavad asustada veekogusid rohkem kui 5000 m kõrgusel, kus nad toituvad jää all bakteritest. Ka suvel jääb sellistes kohtades vee temperatuur alla +10 °C. Vooluvetes lisab stressi ebastabiilne säng muutliku vooluhulga tõttu, mis omakorda on tingitud sulamise ja külmumise ööpäevasest ja sesoonsest vaheldumisest. Näiteks Antarktika ojades kestab jäävaba aeg ainult 1–2 kuud. Kuid väikesed loomad (ainuraksed, nematoodid, loimurid) taluvad isegi külmemat talve kui –55 °C. Jää alaküljele kinnitunud vetikad võivad seejuures anda suurema osa orgaanilise aine produktsioonist.

**2.18.** Hügropetraal Vasaristi ojas Põhja-Eestis.

**2.17.** Juga Mägara ojal Kirde-Eestis.

Kõrbetes võivad peale järvede soolased olla ka vooluveed kas suure aurumise või ümbritseva maa soolsuse tõttu.

Troopilistes vooluvetes on jahedamate aladega võrreldes selgrootutest palju suurte vähkide (sh krevetid ja krabid), tigude ning kalade liike. Putukatest on eriti liigirikkad kiililised, lutikalised ja ehmestiivalised. Vähe leidub külma vett armastavaid kevikulisi.

### 2.2.5. Elupaigad substraadi järgi

Siseveekogude bentaali võib täpsemalt liigitada põhjatüüpide ja taimestiku järgi. Põhjatüüpidest on tavalised kivid (nii sile kaljupind kui ka mitmesuguse suurusega kivid), kruus, liiv, jäme detriit (sh puit, kamar, turvas, õõtsikserv), muda, limuste tühjad kojad.

Kivist põhja nimetatakse **litaaliks**, kruusast **akaaliks**, liivast **psammaaliks**, savist **argillaaliks** ja mudast **pelaaliks**; veealuseid taimi tähistab mõiste **fütaal**, uppunud puitu **ksülaal** ning liiva- ja kruusaterade vahelist ruumi **interstitsiaal**.

Nii vette kukkunud puit kui ka puulehed kuuluvad jämeda orgaanilise aine hulka (CPOM; vt lk 254–255). Mõlemad kujundavad vee-elustiku elupaika, sest on veeselgrootutest ja enamikust kaladest suuremad. Kui vettelangenud puulehed igal aastal lagunevad, siis puit võib olenevalt jämedusest ja liigist vee all säilida aastasadu (joonis 2.19).

Omaette sõna puudub elupaiga kohta, mille moodustavad suured sessiilsed veeloomad, näiteks limused või käsnade ja sammalloomade kolooniad. Samuti ei käsitata eraldi hüdrobioloogilise elupaigana parasiitide vaheperemehi ega suuremaid organisme, kes on väiksematega muudes suhetes. Sellisel juhul arvatakse mõlema

liigi elupaigaks suurema organismi tüüpiline asuala. Veeputukate parasiidid ei pruugi peremehest lahkuda isegi siis, kui see pärast moonet veekogu maha jätab.

Kui vesi ja põhi on kõigi veekogude lahutamatud osad, siis nende alajaotustest võib sama veekogu piires olla esindatud ainult mõni. Näiteks ei pruugi järved olla kihistunud, mistõttu kogu pelagiaal koosneb ainult epilimnionist. Vooluvetes võib puududa kas ritraal või potamaal. Noortes järvedes, kus muda pole jõudnud koguneda, võib puududa profundaal. Väga järsult süvenevates väikestes järvedes võivad sublitoraal ja litoraal mudastumise või veetaseme alanemise käigus kaduda, nii et kogu põhi koosneb profundaalist.

**2.19.** Uppunud puutüve külge saavad kinnituda need eluvormid, kellele ei sobi pehme põhi. Paukjärv Põhja-Eestis.

## KÜSIMUSED

1. Kas karbid saaksid veekogudes elada, kui jää oleks veest raskem?
2. Kui palju vett joob jões elav poolekilone ahven keskmiselt ööpäevas?
3. Millised kohastumused lubavad veeloomadel taluda kuivamist?
4. Mis on pelagiaal ja bentaal?
5. Mis on epilimnion, metalimnion ja hüpolimnion?
6. Mis on litoraal ja profundaal?
7. Kui vesi langeb jões üle paeastangu, kas hüppekihiks nimetatakse siis
   a) seda vett, mis jääb astangust ülespoole, b) seda, mis jääb astangust allapoole, c) mitte kumbagi?
8. Kas suurem Strahleri järk tähendab suuremat jõge?
9. Miks jõed looklevad?
9. Mis on hüporeaal?
10. Kas Eestis leidub rohkem alalisi või ajutisi veekogusid?
11. Kas allikad on liigirikkamad kui muud jõeosad?
12. Mis on interstitsiaal?

## MÕISTED JA MÄRKSÕNAD

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| jõestik | hüpolimnion | lamm | marginaal | litaal | ksülaal |
| ökoton | litoraal | langus | meander | akaal | interstitsiaal |
| pelagiaal | sublitoraal | lang | allikas | psammaal | |
| bentaal | profundaal | jõe järk | kosk | argillaal | |
| epilimnion | ripaal | ritraal | juga | pelaal | |
| metalimnion | mediaal | potamaal | hügropetraal | fütaal | |

# 2.3. Eluvormid

Vee-elustik jagatakse eluvormideks peamiselt elupaiga (nt pelagiaal, bentaal), elustiku üldise süstemaatilise kuuluvuse (nt taimed, loomad), suuruse või liikuvuse järgi. Elustiku käsitlemine vormide kaupa on kasulik siis, kui liigini määramine pole võimalik või vajalik. Sageli on tegemist üleminekutega eri vormide vahel. Näiteks võib mõni liik kuuluda ühes arengustaadiumis ühte ja teises teise eluvormi. Jaotus on tinglik ka seepärast, et paljud liigid moodustavad omavahel terviku (nt sümbiondid). Teiste vee-elanike sees või küljes kasvavad parasiidid (sh viirused) arvatakse peremeesorganismiga samasse eluvormi. Eluvormidest veel täpsemad jaotised on taksonoomiline kuuluvus (vt ptk 2.4) ja toitumistüübid (ptk 2.5.1).

Eluvormide üldisel liigitamisel on kasulik lähtuda järgmistest mõistetest.

- Keskkonnamõju organismidele on **biootiline**, kui mõjutajad on teised organismid, ning **abiootiline**, kui mõjutajad on eluta tegurid.
- **Mikroobid** on palja silmaga nähtamatud (mikroskoopilised) olendid.
- **-fiilia** tähendab mingi mõju eelistust (näiteks termofiilia on soojalembesus), **-foobia** aga vältimist.
- Väga tugevat eelistust, mille korral organism ei suuda ilma ühe või teise mõjuta üldse elada, tähistatakse liitega **-biont** (näiteks vee-elanik on hüdrobiont). **Stenobiondid** on võimelised elama mingi teguri kitsas, **eurübiondid** aga laias vahemikus.
- Eriti vähenõudlikke eurübionte, kes sageli on tulnukad või lepivad väga vähese veega, nimetatakse **ubikvistideks**.
- **Amfibiondid** viibivad vees kas ajuti (konnad, mudahüpikud, koprad, linnud) või pidevalt, kuid osa kehast asub neil veest väljas (kaldaveetaimed).
- **Heterotoopsetel** olenditel toimub osa elutsüklist vees, osa maismaal (paljud putukad).

## 2.3.1. Pelagiaali eluvormid

Pelagiaali väheliikuvaid ja/või mikroskoopilisi elanikke nimetatakse **planktoniks** ehk hõljumiks (kr *planktos* hulkuv, triiviv), planktoni üksikisendeid aga **plankteriteks**. Planktoni hulka arvatakse ka makroskoopilised meduusid, kes ei suuda ujuda vastu veevoolu (näiteks hoovusi). Makroskoopilisi (palja silmaga nähtavaid) ja ühtlasi hea liikumisvõimega organisme nimetatakse **nektoniks** (kr *nēktos* ujuv; vt tabel 2.2, lk 199). Veepinnaelustikku nimetatakse **neustoniks**.

Plankton jagatakse eluviisi järgi kolmeks suureks rühmaks: orgaanilist ainet tootev **fütoplankton**; fütoplanktonit, baktereid ja iseennast tarbiv **zooplankton** ning neid mõlemaid ja iseenda jäänuseid lagundav **bakterplankton**.

Pelaagilised fotosünteesivad tsüanobakterid (vanemas kirjanduses sinivetikad) arvatakse ökoloogilises mõttes samuti fütoplanktoni koosseisu. Nii nagu muu fütoplankton suudavad ka nemad oma kaugust veepinnast või põhjast reguleerida. Üks põhilisi fütoplanktoni liikumise mõjureid on valgus, zooplanktonil toidu ja vaenlaste (kalade) asukoht. Päeviti asub zooplankton tavaliselt sügaval vees kalade eest peidus, öösiti tõuseb aga pinnakihti toituma. Ka paljud bakterid nagu zooplankteridki kasutavad sobivamasse keskkonda liikumiseks vibureid või kollektiivseid liikumisviise. Bakterid ja arhed on mõlemad veekogude planktoni olulised üherakulised eeltuumsed elanikud. Väliskujult ja ainevahetustüübilt on nad omavahel sarnased ning nende uurimismeetodid põhiosas samuti samad. Molekulaargeneetilisi meetodeid kasutamata pole baktereid võimalik arhedest eristada. Seetõttu hinnatakse enamasti nii nende arvukust, aktiivsust kui ka produktsiooni koos. Mageveekogude planktonis on ülekaalus bakterid.

**Holoplankton** on planktiline kogu oma elutsükli jooksul, **meroplankton** asub aga veekihis ainult mõne lühikese perioodi kestel (nt mõnede limuste vastsed).

Pelagiaali elanike erikaal (mahuühiku kaal vee mahuühiku suhtes) on tavaliselt vee omast suurem (magevees 1,01–1,02). Seepärast on paljudel neist kohastumusi, mis aitavad põhjavajumist aeglustada. Ujuvus väheneb vee soojenedes, kuid suureneb koos sügavuse ja soolsuse suurenemisega. Ujuvuse parandamiseks tuleb kas vähendada mõõtmeid, vähendada erikaalu või suurendada eripinda (välise pindala suhet kehakaalu). Erikaalu vähendavad ka kerged varuained, näiteks rasv kalamarjal. Ränivetikatel ja tsüanobakteritel on varuaineks rasv või õli (rohevetikatel ja soontaimedel see-eest tärklis). Tsüanobakteritel on suured gaasivakuoolid (joonis 2.20).

Eripinna suurendamine on aktuaalne soojemates ja magedamates vetes. Suur eripind on lamenenud, lülistunud või jätketega kehadel, samuti lihtsalt väikeste mõõtmete korral. Piisab ka kinnitumisest parema ujuvusega esemete või organismide külge, kui see on võimalik. Klassikaliseks näiteks on zooplanktoni vesikirbuliste sesoonne **tsüklomorfoos**: soojal ajal suureneb isendite eripind väljakasvude tõttu (vt joonis 1.18, lk 29).

Plankterite keha on enamasti seda suurem, mida kõrgemal toiduahelas nad asuvad.

**BAKTERPLANKTON** Bakterirakkude diameeter jääb enamasti vahemikku 0,4–50 µm, autotroofid võivad olla ka suuremad. Bakterite (välja arvatud tsüanobakterid) ja arhede keskmine pikkus veekogudes jääb alla 2 µm. Sageli on toitainete poolest vaesemates veekogudes väiksemad, hapnikuta veekihtides suuremad rakud. Keskmine rakkude asustustihedus seisuveekogudes on tavaliselt 2–7 miljonit rakku/ml (kuni 18 miljonit rakku/ml). Ühtlasi on nende arvukus parasvöötme seisuvetes otseselt seotud fütoplanktoni arenguga ning vooluvetes puulehtede langemise perioodiga. Veekogude isepuhastusvõime tuginebki peamiselt bakterite võimele kiiresti orgaanilisi aineid lagundada. Mõned vee-elulised bakterid on veetaimede ja -loomade, samuti inimeste haigustekitajad.

Väliskujult on bakterite ja arhede rühmad mitmekesised: kerajad, pulkjad, niitjad, filamentsed, keeritsjad jne. Rakud võivad olla vees üksikult või omavahel agregaatideks kokku kleepunud. Bakterite ja arhede liigiline koosseis on seisu- ja vooluvetes mitmekesine ning muutub vastavalt elutingimustele. Arvukus ja aktiivsus muutub nii ööpäeva jooksul kui ka aastaajati: talvel on see väiksem, suvel-sügisel suurem.

Mitmekesisest ainevahetusest tulenevalt on bakteritel ja arhedel täita veekogudes väga mitut laadi ülesanded. Nad teostavad olulisi biokeemilisi reaktsioone aineringetes ja neil on kindel koht toiduahelas. Näiteks toimib lämmastikuringe ainult tänu bakteritele. Ka süsinikuringes on bakterid ja arhed väga tähtsad. Nende hulgas leidub nii primaarprodutsente kui ka teiste ja endi toodetud orgaanilise aine lagundajaid. Eelistatult kasutavad bakterid väikese molekulmassiga ühendeid. Täielik mineraliseerimine toimub erineva ainevahetusega rühmade koostöös.

Bakteritest toituvad keriloomad, vähilaadsed, ripsloomad ja heterotroofsed viburloomad.

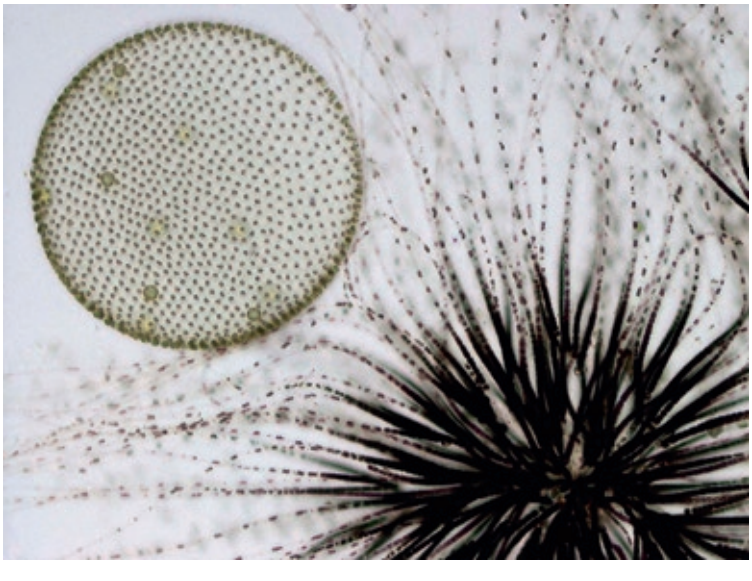
Pelagiaalis elab ka seeni (mükoplankton) ja viirusi (viroplankton), keda on palju vähem uuritud kui füto- ja bakterplanktonit. Seente hulgas on nii lagundajaid kui ka parasiite. Viirusi leidub ühes milliliitris vees tavaliselt kuni 10 miljonit, vahel isegi kuni 100 miljonit. Nende funktsioonidest on veel väga vähe teada. Nad on võimelised reguleerima bakterite, füto- ja zooplanktoni arvukust samaväärselt nende rühmade ärasöömisega toiduahelas.

**FÜTOPLANKTON** Fütoplanktonisse (kr *phyton* taim) kuuluvad tavaliselt üksikud rakud, niidid või nende kolooniad suurusega 0,5 µm – 1 cm (näiteks perekonnad *Gloeotrichia* ja *Microcystis*, joonis 2.21). Fütoplankton ei sisalda ei kõrgemaid taimi, puna- ega pruunvetikaid. Kõik ta rühmad tarbivad toiteaineid (fosfor, lämmastik, süsinik jne) läbi rakupinna.

Mõõtmete järgi jagatakse järvede fütoplankton megalo- (pikkus üle 1 m), makro- (1 cm – 1 m), meso- (1 mm – 1 cm), mikro- (0,05–1 mm) ja nanoplanktoniks (< 0,05 mm).

Mereteaduses käibivad veidi teistsugused mõõdud: meso- (0,2–2 mm), mikro- (0,02–0,2 mm), nano- (0,002–0,02 mm) ja pikoplankton (0,0002–0,002 mm).

**2.20** Gaasivakuoolidega koloonialine tsüanobakter *Limnothrix brachynema*.



**2.21** Tsüanobakter *Gloeotrichia echinulata* (paremal) ja rohevetikas perekonnast *Volvox* (vasakul). 100-kordne suurendus.

**2.22.** Paksu mitmekihilise limaümbrisega tsüanobakter *Chroococcus turgidus* (vasakul) ja desmidieede hulka kuuluv pikkade kidadega *Staurastrum ophiura* (paremal). Fotodel 400-kordne suurendus.

Rakud ja kolooniad võivad olla pulga-, ellipsi-, kera-, koonuse- või rööptahukakujulised või moodustada nende kombinatsioone (*Ceratium*, *Campylodiscus*, *Staurastrum*). Sageli leidub rakkude pinnal ogasid ja lima (joonis 2.22).

Talviti on fütoplanktoni arvukus parasvöötme järvede veekihis kõige väiksem. Kevadel ilmuvad esimesena tavaliselt ränivetikad, millele järgneb rohevetikate ja tsüanobakterite maksimum. Viimased suudavad eluks vajalikku lämmastikku võtta ka otse õhust, mis annab neile vetikate ees eelise. Sügisel võib olla ränivetikate arvukuse teine maksimum.

Fütoplanktoni arengut mõjutavad peamiselt valgus, toiteained, vee liikumine ja temperatuur. Fotosünteesijatena on nad konkurendid taimedele ja osale bakteritele. Hulk kohastumusi aitab neil olla veekogus edukad võitluses ressursside pärast, näiteks passiivne ja aktiivne liikumine, allelokeemia, võime toota mürke, miksotroofne toitumine, õhulämmastiku fikseerimine, kohastumused ärasöömise vastu. Fütoplankton on väga laia levikuga ökoloogiline rühm ja tema levik ei sõltu mitte niivõrd geograafilisest piirkonnast, kui just toitumisoludest.

Vooluvetes koosneb suurem osa veekihis hõljuvast füto- ja bakterplanktonist vooluga põhjast või taimedelt lahtirebitud ja triivivatest plankteritest. Kui jõgi väljub järvest, kannab vool mõnda aega kaasas järve fütoplanktonit, mis settib põhja või tarbitakse juba veekihis. „Päris“ fütoplankton saab tekkida vooluvete seisuveelistes osades (vanajõed, luhad), kust see võib veetaseme tõustes samuti veevoolu sattuda. Sellises materjalis leidub tavaliselt palju tsüanobaktereid ja ränivetikaid. Vooluvetes triivivate vetikate hulk ja koosseis sõltub nagu seisuveteski kõige rohkem valgusest ja temperatuurist, kuid seisuvetega võrreldes vähem toiteainetest, sest neid lisandub valglalt enamasti piisavalt. Pärssivateks mõjuriteks on veevool ja veepeegli kitsuse tõttu kaldataimede vari. Veetaseme tõus kiirendab tavaliselt voolu ning võib uhtuda jõkke lisaplanktonit ümberkaudsetest väikeveekogudest või järvedest.

Kui seisuvete pelagiaalis kuuluvad fütoplankton ja zooplankton mõlemad põhiliste eluvormide hulka, siis vooluvetes on nad pigem triiviv materjal. See-eest elab vooluvete põhjas sageli palju filtreerivat zoobentost, näiteks karpe ja putukavastseid, kelle põhitoiduks on mitmekesine peen triiviv orgaaniline aine.

**■ ZOOPLANKTON** Magevetes leidub merega võrreldes üsna vähe zooplanktoni liike. Paljud neist, näiteks vesikirbulised ja keriloomad, on võimelised sigima viljastamata munade abil (**partenogenees**). See lubab neil taluda ka väga karme elutingimusi, näiteks kuivamist.

Laias mõttes moodustavad metazooplanktoni hulkraksed loomad (*Metazoa*) ning protozooplanktoni üherakulised protistid, keda uuemal ajal enam loomadeks ei peeta. Zooplanktonit võib jagada makro- (> 2 cm), meso- (0,2 mm – 2 cm), mikro- (20 µm – 0,2 mm), nano- (2–20 µm) ja pikoplanktoniks (< 2 µm).

Arvukuselt leidub zooplanktonis tavaliselt kõige rohkem üherakulisi liike (algloomi). Neist väikseimate mõõtmed on mõni kuni mõnisada mikromeetrit (nt *Bursaria*, *Strombidium, Dileptus*). Hulkraksetest on kõige pisemad (0,06–0,4 mm pikad) keriloomad (nt *Polyarthra*, *Trichocerca*, *Asplanchna, Keratella*). Väikeste vähilaadsete (aerjalgsed ja vesikirbulised) tavaline pikkusvahemik on 0,1 mm – 1 cm. Neist vesikirbulised (*Cladocera*) on pelagiaalis peamised fütoplanktonist toitujad. Enamasti elab neid mitu liiki koos (nt *Daphnia, Diaphanosoma, Chydorus, Bosmina*).

Puudukilbilised vähid (*Anostraca*) elavad väikestes ajutistes veekogudes, soolajärvedes ja muudes kalavabades vetes, näiteks Arktikas ja kõrgmägedes. Sageli on selle rühma esindaja üldse ainus kohapealne planktonivähkide liik. Tavalised perekonnad on näiteks *Branchinecta*, *Chirocephalus* ja *Artemia* (pikkusega 0,5–9 mm; joonis 2.23).

Aerjalgsetest (*Copepoda*) on enamik hormikulisi (*Calanoida*) kogu elu tüüpilised herbivoorid (*Eudiaptomus*, *Eurytemora*, *Boeckella*, pikkus 0,8–3 mm). Sõudikuliste (*Cyclopoida*) täiskasvanud on enamasti kiskjad (*Cyclops*, *Eucyclops*, *Mesocyclops*; pikkus 0,5–3 mm; joonis 2.23).

Pigem kalda lähedal või põhjas elavad rullikulised (*Harpacticoida*) ja karpvähilised (*Ostracoda*). Osalt planktilise eluviisiga on ka lõhkjalalised (*Mysidacea*), kellest Euroopa järvedes on tuntud *Mysis relicta* (pikkus kuni 3 cm; joonis 2.24). Täiskasvanud lõhkjalalised kuuluvad pigem bentose või isegi nektoni hulka.

Peale vähilaadsete kuulub zooplanktonisse veel meduuse (*Craspedacusta*), lameusse (*Mesostoma*), rips-

kõhtseid (*Gastrotricha*), putukaid (nt klaasiksääsklane *Chaoborus*, lutikaline *Trichocorixa*) ning vesilesti. Viimased on nii mitmekesised, et mõned neist sobivad ka bentose või isegi nektoni esindajateks. Planktilised on ka rändkarpide (*Dreissena*) ja mõnede kalade vastsed.

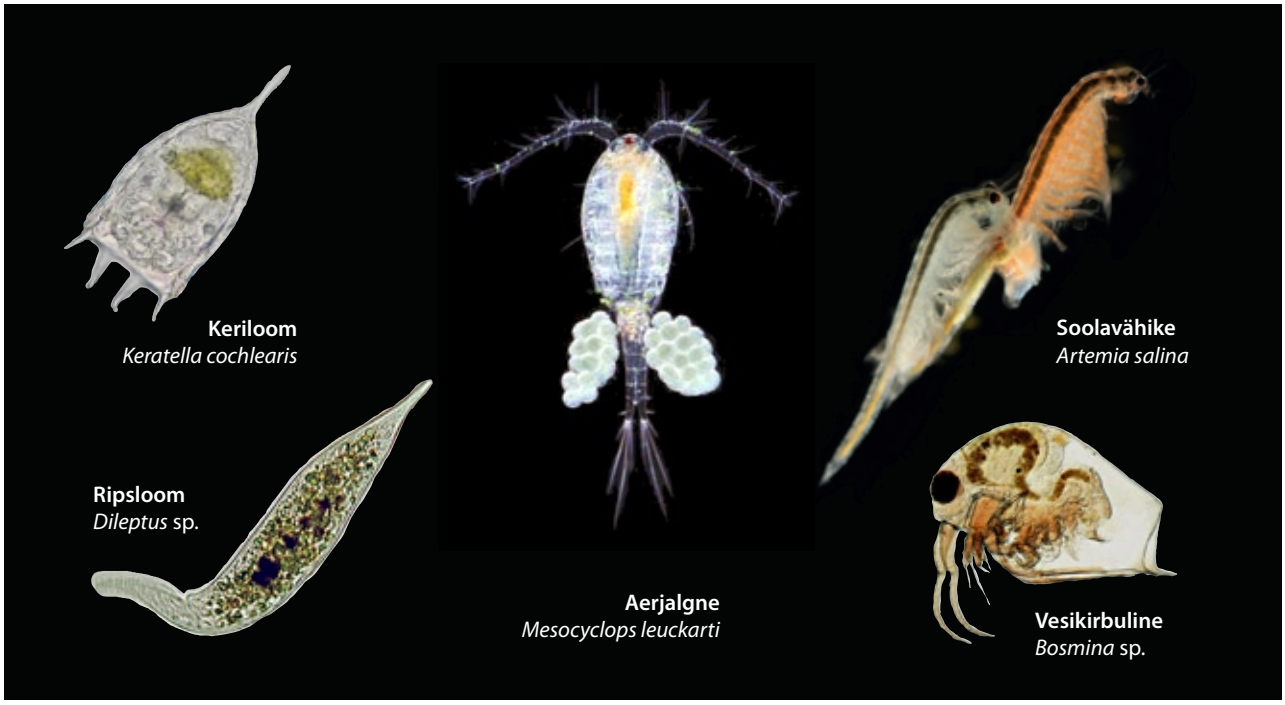
Zooplanktoni arvukus on parasvöötme järvedes sageli suurim suvel. Teistest varasemad on kevaditi keriloomad.

Kihistunud järvede zooplankterid jaotuvad vertikaalselt ebaühtlaselt: nende maksimum asub kõige toidurikkamas kohas (hüppekihi kohal). Zooplanktoni vertikaalse liikumise ulatus on võrdeline vee läbipaistvusega. Sogases vees liigutakse vähem. Kihistumata järvedes võib vertikaalne migratsioon üldse puududa. Tüüpiline on sesoonne ja vanuseline migratsioon. Talveks laskuvad loomad sügavamale, suveks tõusevad jälle pinnakihti. Mõnel taksonil (nt *Mesocyclops*) võib kihistunud järvedes olla ka suvine puhkeperiood veekogu põhjas. Noorjärgud asustavad peamiselt pinnakihti.

Mikrozooplanktoni liikumiselunditeks on väga väikesed ripsmed või keha suurusega võrreldava pikkusega viburid. Ripsmeline liikumine on kõige energiasäästlikum, sellele kulub ainult 0,1% hingamisel saadud energiast. Viburid teevad sekundis 10–40 pööret, andes kehale kiiruse 0,03–0,3 mm ehk 2–7 kehapikkust sekundis. Mida suurem on loom, seda vähem kehapikkusi sekundis suudab ta läbida.

Keriloomad ujuvad tavaliselt kiirusega kuni 0,25 mm/s, kuid üksikute hüpete kiirus võib olla kuni 18 mm/s (30–35 kehapikkust). Juba 1,5–2 mm pikkustel pelaagilistel olenditel pole suure kehamassi tõttu enam efektiivne ripsmeid ega vibureid kasutada.

**NEKTON** Nektonisse võib arvata enamiku vee-elulistest selgroogsetest ja paljud selgrootud. Nagu nimigi ütleb, iseloomustab nektoni esindajaid hea liikumisvõime. Nende taksonoomilisi rühmi sisevetes käsitleme peatükis 2.4.7 (lk 226 jj).




**2.23.** Näiteid magevee-kogude zooplankteritest.

**2.24.** Lõhkjalaline *Mysis relicta*.

1 – angerjas (*Anguilla anguilla*)
2 – rääbis (*Coregonus albula*)
3 – nurg (*Blicca bjoerkna*)
4 – võldas (*Cottus gobio*)

**2.25.** Nektoni esindajaid Eesti sisevetes.

Selle eluvormi kõige tüüpilisemad ja arvukamad esindajad on kalad, kelle liikumine toimub kas lihasjõul või erikaalu muutmise teel (ujupõie abil). Aeglasel horisontaalsel kulgemisel kasutatakse uimi, kiirematel sööstudel kogu keha jõudu. Liikumist soodustab voolujooneline kehakuju ja kere limane libe pind, mis vähendab veetakistust. Olenevalt eluviisist võivad kehakuju ja ujumisliigutused suuresti varieeruda (joonis 2.25). Näiteks pelaagilised lõhelised on valdavalt kiired ujujad ja sihvaka kehaga, põhjalähedase eluviisiga nurg aga kõrge keha ja aeglase liikumisega. Samuti pigem bentilise angerja keha meenutab madu ning ta liigub loogeldes. Suure pea ja väikese kehaga võldas püsib enamiku aega kivi varjus paigal ning liigub vaid harvade sööstudega.

Head liikujad on võimelised läbima pikki vahemaid, näiteks toidu otsimiseks või sigimisrändeks. Lõhilastel võib sigimisränne ulatuda üle 3000 km (näiteks Yukoni jões). Tšavõõtša (*Oncorhynchus tshawytscha*) maksimaalne kiirus vee all on 3,5 m/s, hüpetel veest välja isegi üle 6 m/s. Kalade aktiivset levikut võivad takistada looduslikud tõkked, näiteks astangud jõgedel või veeühenduse puudumine.

Kahepaiksed, roomajad, linnud ja imetajad on ujupõieta ning pruugivad ujumiseks selleks kohastunud jäsemeid. Konnadel ja veelindudel on lestjalad, mõnel imetajal (kobras, saarmas jt) varvaste vahel ujunahad. Lindudest asuvad kauridel ja püttidel jalad päris keha tagaosas nagu laevadel sõukruvid. Seetõttu on nad kuival maal abitud. Sukeldumisel saavad pardid kopsud kokku suruda, et sügavale vette jõuda. Sukeldujatel on ühtlasi väga suur süda. Kahlajatel (haigrud, kurvitsalised) on pikad jalad ning pikk kael ja nokk. Pardinokad on toidu filtreerimiseks harjaselise servaga. Kiskjatel on terav nokk, kosklate nokal seespool ka hambad. Partlaste tibud suudavad ujuda juba mõni tund pärast koorumist.

Linnud ja imetajad ning enamik roomajaid ja kahepaikseid on amfibiontsed, s.t veedavad osa aega veest väljas. Nad suudavad liikuda ka maismaal, suurem osa linde peale selle veel lennata. Vaalalised seevastu ei lahku kunagi veest. Kaladest suudavad maismaal roo-

ÄÄREMÄRKUS 2.1

**HEINRICH RIIKOJA • Esimese eestikeelse selgrootute loomade süstemaatilise nimestiku autor**

Heinrich Riikoja (1891–1988) oli eesti zooloog ja hüdrobioloog, Eesti hüdrobioloogia rajajaid, bioloogiadoktor (1942), Tartu Ülikooli rektor (1940). Aastatel 1930–1932 ja 1935–1940 juhatas Tartu Ülikooli zooloogia instituuti ja zooloogiamuuseumi. 1942–1944 oli põllutöödirektooriumi kalandusosakonna teadusnõunik, 1945. aasta maist selgrootute zooloogia ja hüdroloogia kateedri juhataja-professor. Töötas ülikoolis 1959. aastani. 1922–1943 oli Eesti esindaja rahvusvahelises limnoloogiaühingus (SIL), 1929–1935 Eesti Loodusuurijate Seltsi esimees, 1944–1958 Eesti NSV Teaduste Akadeemia bioloogia instituudi hüdrobioloogia sektori juhataja.

Alates 1920. aastaist juhtis Eesti siseveekogude uurimise töid, tegi ekspeditsioone Matsalu lahele, Saadjärvele, Tamulale, Vagulale, Emajõele, Võrtsjärvele. 1934. aastal valmis Eesti järvede nimestik, 1940 monograafia Ida-Eesti järvede keemilisest koostisest ning 1927 ja 1950 raamatud Eesti kalastikust.

**2.26.** Epineustoni esindajad vesiläätsed (*Spirodela* sp., üleval) ja liuskur (*Gerris* sp., paremal) elavad vee pindkilel.

**2.27.** Labatigu (*Planorbis* sp.) pindkilel ujumas.

mata niiskete mangroovisoode jõgesid asustavad mudahüpiklased (*Periophthalmidae*).

Selgrootutest kuuluvad suurte kümnejalaliste vähkide vastsed bentosesse, kuid täiskasvanud loomad on nii suured ja head ujujad, et neid võib käsitada ka nektilisena. Samas võib väikesi väheliikuvaid kalu ja silmude vastseid pidada nende eluviisi järgi pigem bentoseks kui nektoniks.

**NEUSTON** Neustonile sobib seisev või aeglase vooluga vesi ja tuulevarjuline kallas. Ta suudab taluda tugevat päikesekiirgust. Veepind tagab hea varustatuse hapniku ja toiduga. Veepinnal tegutsevat elustikku nimetatakse **epineustoniks**. Sellesse kuuluvad näiteks mõned lutikaliste sugukonnad (*Gerridae*, *Veliidae*), ujutaimedest lemlelised (*Lemnaceae*; joonis 2.26). Pindurid (*Velia* spp.) kaitsevad end kalade eest sel teel, et lisavad vette detergenti (vedelikku, mis järsult vähendab pindpinevust) ja saavad nii põgenedes teha kiireid sööste. **Hüponeuston** ehk pleuston „ripub“ veepinna all (nt lutikalistest röövtoidulised selgsõudurid *Notonecta*). Toitumise ajal käitub nii ka filtreeriv vesikirbuline *Scapholeberis mucronata*. Mõned teod kasutavad pindkilet hingamise ajal veepinnal püsimiseks (joonis 2.27).

## 2.3.2. Bentaali eluvormid

Veekogu põhjas (bentaalis), veetaimedel või vettelangenud puudel asuvat elustikku nimetatakse **bentoseks**. Vooluvete bentaal ja bentose meeliselupaik järvedes (litoraal) on sageli väga liigestatud põhjaga ning tihedas seoses maismaaga. Bentos asustab nii seisvaid kui ka kiiresti voolavaid veekogusid. Ta jagatakse päritolu ja suuruse järgi tavaliselt kolmeks:

- taimne (tingliku nimetusega **fütobentos**), kuhu kuuluvad tsüanobakterid, kõik vetikahõimkonnad, samblad ja õistaimed;
- bakteriaalne (**bakterbentos**), mille moodustavad settes elavad bakterid ja rohkearvulised arhed ning
- loomne (**zoobentos**; tabel 2.4), kuhu kuuluvad kõik loomad ning sinna võib traditsiooni järgides liigitada ka osa protiste (“ainuraksed”).

Bentilisi seeni tuleks niisiis kutsuda mükobentoseks, kuid seente vähema uurituse tõttu pole see sõna levinud. **Biofilmiks** nimetatakse mikroorganismide kooslust, mis tekib piirpindadele – kas vee ja tahke faasi piirile, veepinnale või isegi õlitilgakestele vees.

Tabel 2.4. BENTAALI PEAMISED ELUVORMID

| Veekogu tüüp | Elupaik | Eluvorm | Eluvormi tüüp |
|---|---|---|---|
| Seisuveed | Litoraal | Bentos | Bakterbentos, fütobentos (makrofüüdid, perifüüton), zoobentos |
| | Sublitoraal | Bentos | Bakterbentos, zoobentos |
| | Profundaal | Bentos | Bakterbentos, zoobentos |
| Vooluveed, sood ja väikeveekogud | | Bentos | Bakterbentos, fütobentos (makrofüüdid, perifüüton), zoobentos |

Olenevalt põhja iseloomust nimetatakse bentost kas **pelo-** (mudal), **psammo-** (liival) või **litobentoseks** (kividel). **Epibentos** tähendab põhja peal, **endobentos** põhja sees asuvat elustikku. Loomade puhul kasutatakse ka väljendeid „epifauna" ja „infauna". **Nektobentilised** loomad püsivad vahel põhjas, vahel ujuvad.

Liikumise järgi võib bentos olla kinnitunud ehk **sessiilne** või liikuv ehk **vagiilne**. Äärmuslike elupaikade elustikul on erilised nimetused: **pagon** (jää alaküljel), **krüon** (väga külmas vees), **stügon** (hüporeaalis).

Enamik bentose rühmi hingab vees lahustunud hapnikku. Mõned rühmad (kaldataimed, mitmed putukad ja teod) hingavad atmosfääriõhku, mõned aga viivad seda endaga vee alla kaasa.

Profundaalis ja sublitoraalis saavad elada ainult tarbijad, sest seal pole küllalt valgust. Toit langeb sinna pelagiaalist või kandub litoraalist. Suur osa sellestki toidust on juba lagunenud, seega suhteliselt väheväärtuslik. Vooluvetes see-eest tavaliselt toitu jätkub, kui tegu pole just jää või lume sulaveega.

Kui endobentos on põhjasetetes välismõjude eest varjul, siis epibentos peab oma positsiooni säilitamiseks suutma end kaitsta nii veevoolu kui ka pehmete setete alla mattumise eest. Bentose erikaal on küll enamasti üle 1, kuid tugeva voolu korral sellest ei piisa. Seepärast on paljudel vooluvete zoobentose esindajatel välja kujunenud mitmesugused kinnitumisviisid kividele või taimedele. Näiteks teod kinnituvad kleepuva lihaselise jala abil, kaanid iminappadega. Rändkarbid eritavad büssust (erilisi kleepuvaid ja kiiresti tarduvaid niite; joonis 2.28), kihulaste vastsed lima. Kiires voolus on mõne looma keha tugevasti lamenenud ning pikkade lisajätketega, jäsemed aga tugevate küünistega, et veetakistust vähendada (joonis 2.28). Mõned putukad ehitavad kaitseks vaenlaste vastu varjeid, mis vähendavad ühtlasi tugeva voolu mõju (joonis 2.28).

Fütobentos jagatakse omakorda suuruse järgi **suurtaimedeks** ehk makrofüütideks ehk makrofütobentoseks, mille üksikisendid on suurenduse abita eristatavad. **Perifüütoni** ehk mikrofütobentose hulka paigutatakse peale mikroskoopiliste taimede tavaliselt ka seened ja bakterid eraldi nimetust kasutamata, sest nad on omavahel tihedalt põimunud.

**■ SUURTAIMED** Suurtaimede esindajad veekogudes on õistaimed, samblad ja maksasamblad. Nende sekka arvatakse eluvormi mõttes ka suured vetikad: mändvetikad ning suured koloonialised puna- ja rohevetikad.

Veesisestel taimedel on kõik osad vee all, kaldataimedel on vee all ainult juured ja varre alumine osa, lehed ja õied aga veest väljas (joonis 2.29). Ujulehtedega taimede juured ja varred on vee all, lehed lebavad lapiti veepinnal (joonis 2.30). Ujutaimed ei juurdu ning hõljuvad veepinnal (joonis 2.26). Seetõttu võiks nad paigutada ka neustoni, mitte bentose hulka, ehkki enamasti käsitletakse neid koos bentiliste suurtaimedega.

Olenevalt tingimustest (nt vees või kuival, voolus või seisvas vees) võivad ka sama liiki taimede lehed suuruselt ja kujult märkimisväärselt varieeruda (joonis 2.31).

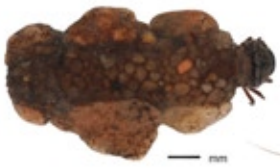
Niitjate rohevetikate (*Cladophora*) liigid võivad erinevates voolutingimustes kujult väga erinevaid kasvuvorme moodustada. Vooluvetes on nad enamasti kividele kinnitunud pikkade niitide või klompidena (vt joonis 2.34). Liivaste järvede madalal põhjal võib aga järvepall (*Aegagropila linnaei*) moodustada veerevaid kerakujulisi kolooniaid (joonis 2.32).

Veesiseste taimede levikut mõjutavad kõige rohkem vee läbipaistvus ja värvus. Kalda- ja ujulehtedega taimed sõltuvad valguse puudusest vähem, sest nende peamised fotosünteesivad osad asuvad veest väljas. Siiski piirab kaldataimede levikut vee sügavus. Ujutaimi ei sega ei varjutatus ega sügavus, kuid neid häirib jällegi tugev vool või lainetus.

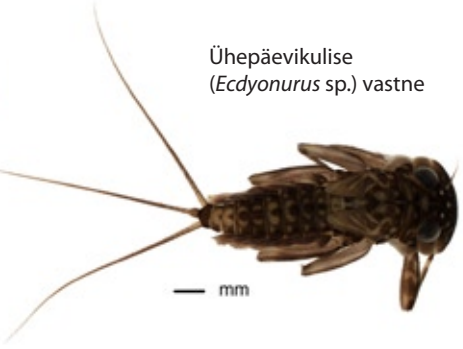
Vooluvetes asustavad suurtaimed eriti lamme ja aeglase vooluga suudmealasid. Nii nagu mõned õistaimed ei saa ka veesamblad otse kasutada vesinikkarbonaatiooni ($HCO_3^-$). Nad vajavad vaba süsinikdioksiidi, mida leidub vooluvetes tavaliselt palju. Ülemjooksult alamjooksule on suurtaimerühmade tüüpiline järjestus selline: *samblad → kiire voolu õistaimed → aeglase voolu õistaimed → kaldavee- ja ujutaimed*.

Järvedes asustavad suurtaimed enamasti kaldapiirkondi. Läbipaistvas vees, näiteks Baikalis ja Armeenia suurimas järves Sevanis, võivad niitvetikad (*Cladophora*), mändvetikad (*Chara*) ja vesisamblad (*Fontinalis*) kasvada kuni 50 m sügavusel.

Rändkarp
(*Dreissena polymorpha*)

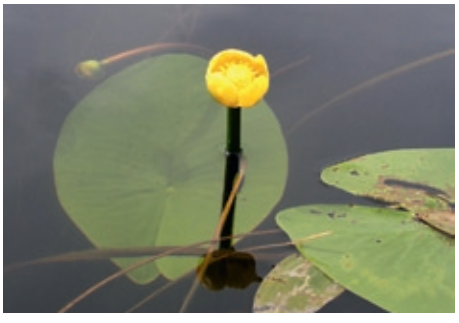



Ehmestiivalise
*Silo pallipes* vastne




Ühepäevikulise
(*Ecdyonurus* sp.) vastne

**2.28.** Näiteid epibentose loomade kohastumustest (selgitus tekstis).



**2.29.** (1) Harilik vesisammal (*Fontinalis antipyretica*) kasvab üleni vee all; (2) kaldataimel pillirool (*Phragmites australis*) on vee all juured ja varre alumine osa.

**2.30.** Kollase vesikupu (*Nuphar lutea*) lehed ujuvad veepinnal, juured ja varred on vee all.

**2.31.** Kõõluslehe (*Sagittaria sagittifolia*) veealused lintjad (1) ning veepealsed odajad (2) lehed.

**2.32.** Järvepallid Õisu järvest.

**2.33.** *Wolffia* spp.

Suurtaimed võivad olla mitme meetri pikkused. Amasoonase viktooria (*Victoria amazonica*) ujulehtede läbimõõt ulatub kolme meetrini ja veesisese varre pikkus on 7–8 m. Harilik pilliroog kasvab Eestiski 4 m kõrguseks. Lemlikute (*Wolffia* spp.) läbimõõt on samas alla 0,5 mm (joonis 2.33).

Suurtaimed võivad oma suurte mõõtmete tõttu ise elupaiku moodustada. Paljud perifüütoni, selgrootute ja kalade liigid ei saa ilma nendeta elada. Perifüüton vajab kinnituskohti, milleks suurtaimed sobivad oma jäikuse ja suure pindala tõttu. Loomadele on taimestik nii varje-, kinnitus- kui ka toitumiskoht. Mõned putukad (näiteks ujurlased ja taolistiivalised kiilid) munevad taimevarte õõnsustesse, kus nende vastsed saavad hingata. Ka taimtoidulised roomardikate vastsed hingavad varresisest õhku. Taimed ise on oma tarbijatest tavaliselt suuremad ja üldjuhul ei sööda neid tervenisti ära. Paljud kaldataimed (nt pilliroog, tarnad) on nii kõva kestaga, et ei kõlbagi süüa. Ka pehmemate suurtaimede massist tarbitakse enamasti ainult mõni protsent, nii et taimesööjaid võiks seetõttu nimetada pigem parasiitideks. Kaldaveetaimi söövad maismaaloomad, veesiseseid taimi aga partlased, meriveislased (jõemanaati) ja taimtoidulised kalad (nt valgeamuur). Ondatra ja kobras kasutavad kaldataimi ka pesaehituseks.

Suurtaimed võistlevad valguse ja toidu pärast nii fütoplanktoni kui ka neile endile kinnitunud perifüütoniga. Suurtaimede jäänused on toiduks detriidisööjatele (putukad, ussid, vähid) ja lagundajatele (bakterid, seened). Nad vähendavad voolukiirust ja lainetusest tingitud vee liikumist, kogudes ühtlasi enda ümber muda. Mudastumine on eeldus edaspidiseks soostumiseks.

Ehkki enamik suurtaimi on põhja kinnitunud, võivad veevool, tugev lainetus ja sulav jää neid suurte tükkidena lahti rebida ning kaasa viia. Ujutaimed pole nagunii kinnitunud ja liiguvad ringi eriti suurveeperioodil. Troopikas kinnituvad ujutaimede külge omakorda pisikesed juurtega taimed, kasutades neid levimiseks. Paljude taimede tõhusaimaks liikumisviisiks on seemnete või viljade levimine tuule või loomade abil. Külmal aastaajal, eriti siis, kui vesi külmub, viibib enamik suurtaimi puhkeolekus.

**PERIFÜÜTON** Kui mikrofütobentose kinnituskohaks on taimed või vetikad, siis võib teda nimetada **epifüütoniks**; kui liiv või muda, siis **epipsammoniks** või **epipeloniks**. Perifüütoni liigiline koosseis ei sõltu siiski niipalju substraadi materjalist, kui voolukiirusest, vee pH-st ja toidurohkusest.

Perifüütoni asukad on ehituselt suurtaimedest lihtsamad, kuid fütoplanktonist enamasti keerulisemad. Perifüütonit leidub madalas vees peaaegu igal pool, kus on sobivat põhja ja piisavalt valgust. Rabavetes on tema leviku sügavuspiiriks ligikaudu 1 m. Kasvuvormilt on perifüüton kas kilejas, sagarjas või niitjas. Suuruselt varieerub ta üherakulistest ränivetikatest 1 m pikkuste niitjate rohe- ja punavetikateni (joonis 2.34). Rohevetikatest elavad näiteks perekonnad *Cladophora* ja *Ulothrix* nii voolu- kui ka seisuvees, *Chaetophora* ja *Draparnaldia* aga tugevas voolus, sest vajavad palju hapnikku ja ainevahetusjääkide pidevat eemaldamist.

Seisuvetes elavad perifüütonis mõned rühmad, mis ühtlasi kuuluvad planktoni koosseisu, näiteks paljud ränivetikad ja tsüanobakter *Microcystis*. Talvest varasuveni domineerivad ränivetikad (nii nagu planktoniski), muud rühmad on ülekaalus suviti. Väikestes vooluvetes varjavad kaldapuude lehed suvel perifüütoni eest valguse.

Seisuvetes on perifüüton põhja lähedal eriti oluline hapnikutootja, andes toitu ja hingamisvõimalust loomadele. Samas blokeerib ta lahustunud fosfori liikumist settest vette. Tema esmastoodangu osakaal kogu veekogu primaarproduktsioonis on suurim läbipaistvates, toiduvaestes ja/või madalates vetes (näiteks mägedes või suurtel laiuskraadidel), kus valgus jõuab enamasti põhjani. Seal võib perifüüton toota kuni 80% primaarproduktsioonist.

Uute pindade hõivamisel on esmaasukateks bakterid ja ränivetikad, kes kleebivad end sinna, et vältida minemakandumist või ärasöömist. Vetikatest järgnevad neile harunenud ja rosetjad, lõpuks niitjad vormid, mis jäävad lõpuks domineerima.

Perifüütonit söövad ja lagundavad väga paljud veeelanikud, sealhulgas tema enda osad (algloomad, väikesed hulkraksed ja seened). Suurematest vaenlastest on tüüpilised näiteks teod ning ehmestiivaliste ja ühepäevikuliste vastsed, kes tarbivad nii perifüütoni vetikaid kui ka nende küljes olevaid pisiloomi ja seeni.

Vooluvetes liiguvad perifüütoni lahtitulnud osad vooluga kaasa ning jõgede „fütoplankton“ koosnebki peamiselt nendest. Seisuvetes levib ta kõige kiiremini lainetuse või loomade kaasabil. Ajutiste veekogude perifüütoni puhkevormid levivad kuival ajal tuule toimel koos muu tolmuga.

**ZOOBENTOS** Erinevalt suurtaimedest ja fütobentosest leidub zoobentost ka sügavas vees ning muudes valguse eest varjatud kohtades.

Suuruse järgi jagatakse zoobentos **makro-** (jääb 0,5 mm silmaga sõelale) ja **meiozoobentoseks** (0,05–0,5 mm). Veel väiksemaid loomi ehk **mikrozoobentost** on väga vähe uuritud ja neid ei eristata enamasti pisikestest planktoniloomadest. Mitme sentimeetri pikkusi limuseid ja vähke võib nimetada ka **megazoobentoseks** (joonis 2.35).

**Suurselgrootuteks** nimetatakse palja silmaga nähtavaid selgrootuid loomi olenemata sellest, kas nad asuvad veekogu põhjas, ujuvad aktiivselt ringi või kõnnivad veepinnal.

Kiirevoolulist elupaika eelistavad **reofiilid**. Kivist põhja asustavad **litofiilid** (näiteks napptigu *Ancylus fluviatilis*, lõpusehmeslased – *Rhyacophila*), taimerikast

**2.34.** Rohevetika niitjas vorm (karevetikas, *Cladophora* sp., vasakul) ja vooluvetes elav punavetikas (*Batrachospermum* sp.).

**fütofiilid** (voolutaklased – *Elmidae*, käppvanad – *Brachycentrus*), liivast **psammofiilid** (jõekarbid – *Unio*, ühepäevikud – *Ephemera*) ning mudast **pelofiilid** (mudatuplased *Tubificidae*). Mikrobentilised olendid (näiteks paljud algloomad, keriloomad, ripskõhtsed ja ümarussid) võivad olla **interstitsiaalsed**: asustada kitsast ruumi liivaterade vahel.

Mitmekesisuselt ületab zoobentos kõiki teisi sisevete eluvorme. Suurimatel loomadel (karbid, vähid) võib ühe isendi mass ületada 100 g kuivkaalus, mida on suurusjärgus miljard korda rohkem kui näiteks keriloomadel või ripskõhtsetel. Kui kõige pisemate loomade eluiga mõõdetakse päevades, siis suurte karpide oma aastakümnetes.

Zoobentos kujundab aktiivselt oma elukeskkonda, segades ja paigutades ümber põhjasetteid. Näiteks väheharjasussid neelavad muda sügavamaid kihte, kuid jätavad väljaheited muda pinnale. Ühepäevikulised ja surusääsklased õhustavad liiva ja muda, kaevates neisse käike. Selline tegevus soodustab lahustunud toiteainete sattumist vette ning ühtlasi võimalike mürkainete mattumist setetesse. Rändkarbid (*Dreissena*) on võimelised veekihi enda kohal paiknevast planktonist peaaegu täielikult puhastama. Limused omastavad veest kodade ehitamiseks ohtralt lupja. Nii elusad loomad kui ka nende tühjad kojad on soodsaks elupaigaks (kinnitus- ja varjekohaks) väiksematele põhjaloomadele.

Enne talve või kuivaperioodi saabumist kaevuvad paljud liigid sügavamale. Hulk loomi suudab ebasobiva aja üle elada või kergesti levida väikeste vastupidavate vormidena (näiteks käsnade gemmulid, sammalloomade statoblastid, vesikirbuliste sadulakesed (ld *ephippium*)). Paljud putukad lendavad veekogust hoopis välja. Nii litoraali kui ka profundaali veeputukate (kahetiivalised, ühepäevikulised, kiililised, kevikulised, ehmestiivalised) valmikud ongi enamasti kuivamaa-elulised. Paljudel mardikalistel ja lutikalistel elavad vees nii vastsed kui ka valmikud, mõnel mardikalisel ainult vastsed.

Mitmel rühmal on erikohastumusi hapnikupuuduse puhuks, näiteks hingamisliigutused surusääsklastel ja ühepäevikulistel ning hemoglobiin veres kirpvähkidel, surusääsklastel ja tigudel. Paljude rühmade esindajad suudavad viibida isegi hapnikuta profundaalis (nt ümarussid, keriloomad, ripskõhtsed, rõngussid, aerjalgsed, karpvähid, surusääsklased). Seda võimaldab neil anaeroobne ainevahetus glükogeeni kaudu või puhkeseisund (diapaus). Mõne klaasiksääsklase vastsed käivad profundaalist öösiti ülemistes veekihtides hingamas. Päris madalas vees ei hinga paljud selgrootud mitte lahustunud, vaid atmosfäärihapnikku.

Seisuvete zoobentose biomass ja liigirikkus korreleeruvad positiivselt fütoplanktoni biomassiga, välja arvatud juhul, kui see muutub nii suureks, et hakkab põhjaelustikku juba lämmatama. Madalas vees on seisuvete zoobentose biomass ja liigirikkus suurem kui sügavas vees ning taimestikuga alal suurem kui taimevabal alal. Ühe järve zoobentoses võib olla sadu liike 12–15 hõimkonnast. Litoraalis on peaaegu kogu maailma sisevetes levinud ühepäevikulistest sugukond ühepäeviklased (*Ephemeridae*); limustest jõekarplased (*Unionidae*), keraskarplased (*Sphaeriidae*), mudatigulased (*Lymnaeidae*) ja labatigulased (*Planorbidae*); pisivähkidest lestiklased (*Chydoridae*) ja sõudiklased (*Cyclopidae*); rullikulistest *Canthocamptidae* ning ripskõhtsetest *Chaetonotidae*.

Ainult põhjapoolkeral elavad vähkidest kuulmiksabalased (*Mysidae*) ja kirpvähklased (*Gammaridae*), ainult lõunapoolkeral jõekarbiliste sugukond *Hyriidae*.

**2.35.** Psammofiilse filtreeriva megabentose esindaja paks jõekarp (*Unio crassus*) Halliste jõest.

**2.36.** Mudatuplased (*Tubificidae*) asustavad meelsasti mudast põhja. Tugevas orgaanilises reostuses, kus nende vaenlased vastu ei pea, võivad nad katta ka kõva põhja.

Sügavas vees mudasel põhjal on sageli kõige arvukamad mudatuplased (*Tubificidae;* joonis 2.36) ning surusääsklaste (*Chironomidae*) ja klaasiksääskede (*Chaoborus* spp.) vastsed. Meiozoobentoses on enamasti arvukaimad ümarussid, mõnikord ka ripskõhtsed, keriloomad või vähid. Sõudikulised elavad tavaliselt planktonis, kuid täiskasvanud loomad veedavad puhkeperioodi profundaali mudas.

Avaveebentos on kaldaga ja madalveealadega väikestes järvedes rohkem seotud kui suurtes. Avavee filtreerijad (vesikirbulised ja karbid) saavad litoraali fütoplanktonist osa lainetuse tagajärjel.

Ka toitumistüüpidelt on zoobentos väga kirev. Aktiivsete fütoplanktonist toituvate filtreerijate hulka kuuluvad seisuvetes karbid ja mõned surusääsklased, põhjasettepealseid ja -siseseid baktereid püüavad herneskarbid (*Pisidium*). Põhjavetikaid söövad näiteks teod ja mõned keriloomad, setet neelavad paljud väheharjasussid. Teisi põhjaloomi ründavad näiteks kiilide ja paljude mardiklaste vastsed. Zooplanktonist toituvad klaasiksääskede vastsed.

Vooluvete zoobentose loomad on sageli segatoidulised. Spetsialiseerunutest võib mainida lehesööjaid (mõned vähid ja mardikalised) ning detriidisööjaid (vesikakand *Asellus aquaticus* ja paljude ehmestiivaliste vastsed). Passiivsed filtreerijad on näiteks ehmestiivalistest jõgiehmeslaste (*Hydropsychidae*) ning kahetiivalistest kihulaste (*Simuliidae*) vastsed.

Meiozoobentos võib makrozoobentosega võrreldes samas piirkonnas moodustada 95% isenditest, 25% biomassist, 50% ainevahetusest ja üle 50% liikide arvust. Makrozoobentose asustustiheduse suurusjärk järvedes on 1000–10 000 isendit ühel ruutmeetril, meiozoobentosel aga miljon. Makrozoobentose biomass megazoobentoseta on kuivkaalus 0,2–100 g/m$^2$. Megazoobentos (eriti suured karbid) võib makrozoobentost seejuures biomassilt mitu korda ületada.

## KÜSIMUSED

1. Selgitage mõisteid “plankton”, “nekton”, “bentos”, “neuston”.
2. Mille poolest erinevad ja mille poolest sarnanevad neuston ja bentos?
3. Kas kalade rasvasisalduse suurenemine tõstab nende erikaalu? Põhjendage vastust.
4. Miks muutuvad tsüanobakterid fütoplanktonis suve jooksul arvukaks hiljem kui räni- või rohevetikad?
5. Kas taimeliike on rohkem litoraalis või profundaalis?
6. Kes söövad kaldaveetaimi?
7. Miks ei leidu suurtaimi ega fütobentost sügavas vees ning muudes valguse eest varjatud kohtades?
8. Kuidas on reofiilid seotud vee reostustasemega?

## MÕISTED JA MÄRKSÕNAD

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| plankton | tsüklomorfoos | zoobentos | makrofüüdid | litofiilid |
| nekton, | partenogenees | epibentos | perifüüton | fütofiilid |
| neuston | protozooplankton | endobentos | epifüüton | psammofiilid |
| fütoplankton | metazooplankton | sessiilne | epipsammon | pelofiilid |
| zooplankton | epineuston | vagiilne | epipelon | |
| bakterplankton | hüponeuston | pagon | makrozoobentos | |
| holoplankton | bakterbentos | krüon | meiozoobentos | |
| meroplankton | fütobentos | stügon | reofiilid | |

# 2.4. Taksonoomilised rühmad

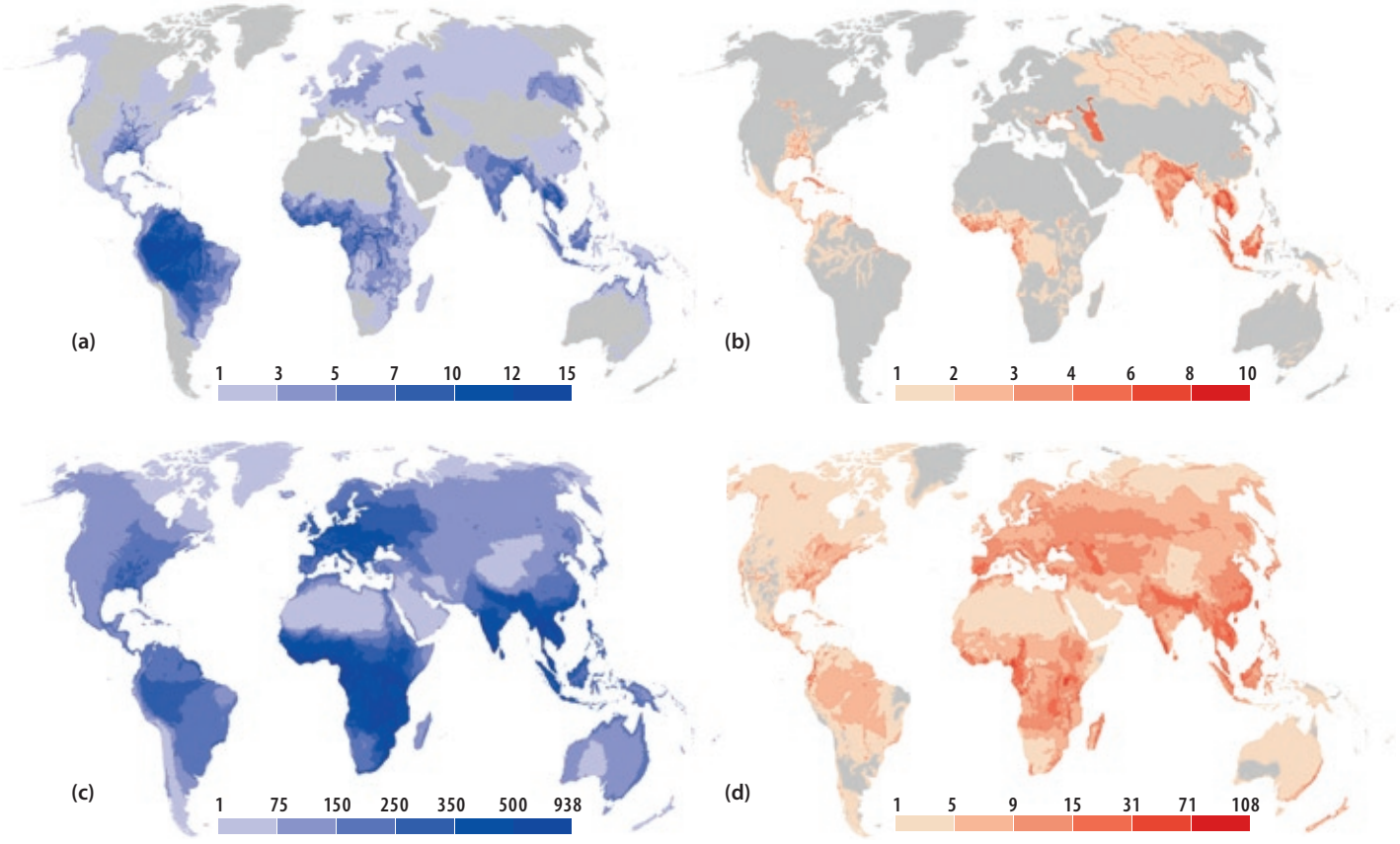
## 2.4.1. Leviku ja liigirikkuse seaduspäradest sisevetes

Iga liiki iseloomustab tema **areaal** ehk levila. **Kosmopoliitseteks** nimetatakse paljude mandrite paljudes siseveekogudes levinud liike (näiteks järvekäsn, mudatigu ja pilliroog). **Endeemid** on ainult ühes veekogus või selle kitsamas piirkonnas levinud liigid. Näiteks maailma veerikkaima, Kesk-Siberis asuva Baikali järve hulkraksetest loomadest ja taimedest on ligikaudu pooled endeemsed. Vooluvete endeemsete surusääsklaste ja ühepäevikuliste, samuti veetaimede liikide järgi on võimalik jälgida isegi väga ammu toimunud mandrite lahknemist.

Enamik sisevete elustikust pärineb maismaalt. Voolu- ja seisuveekogusid asustavad võrdlemisi sarnased taime- ja loomaliigid. Elustiku taksonoomiline mitmekesisus sõltub nagu eluvormidegi mitmekesisus elupaikade erinevusest, nende asustamisajaloost, inimmõjust jm teguritest. Näiteks voolu olemasolu teeb võimalikuks vooluveeliikide elu, kuid jõgede aeglasevoolulistes osades saavad elada ka n-ö järveliigid. Kõige suurema liigirikkusega siseveekogud Maal paiknevad 40. laiuskraadidel ja ekvaatoril, kõige vähem on liike väga külmades piirkondades (joonis 2.37). Näiteks Kagu-USA suhteliselt sooja veega Tennessee ja Cumberlandi jões on 250 liiki kalu, Kanadas ja Alaskas kokku aga ainult 180 liiki.

Tuulega levivad väga kaugele nii taimede eosed ja seemned kui ka loomade munad (nt vesikirbulised, karpvähid), samuti putukate kerged valmikud (surusääsklased, kihulased). Kiilide valmikud suudavad tuule toel lausa üle ookeani lennata.

Väga vanade saarte siseveekogusid asustavad enamasti liigid, kes elasid seal juba enne mandrist eraldumist, geoloogiliselt noortel saartel aga pigem head levijad. Kui mõni rühm saarel puudub, hõivab tema tüüpilise toitumisniši mõni teine. Näiteks Kariibi mere saarte madalike vooluvetes on sellisele elupaigale tavaliselt




**2.37.** Suurte mageveeasukate (kalad, limused, kiilid, taimed, krabid, vähid, krevetid, kilpkonnad, imetajad, linnud ja kahepaiksed) liigirikkus (a) ja ohustatud liikide rikkus (b). Väikeste mageveeasukate (v.a ülalnimetatud) liigirikkus (c) ja ohustatud liikide rikkus (d). Hallidel aladel ei ela siin käsitletud suuri ohustatud liike.

iseloomulike kevikuliste lihatoiduliste vastsete asemel krevettide sugukond *Palaemonidae* ja mitmesugused krabid; mägiojades asendab aga filtreerivate ehmestiivaliste ja kihulaste vastseid krevettide sugukond *Atyidae*.

## 2.4.2. Liikide arv sisevetes

Sisevetes on absoluutarvudes kokku vähem liike kui maismaal või meres. Maismaal elab välistunnuste järgi eristatavaid loomaliike suurusjärgus 1,5 miljonit (protiste arvestamata), meres 280 000. Sisevetes on selgrootuid üle 107 000 liigi, sh 76 000 liiki putukaid, ja selgroogseid üle 18 000; kalaliike on selgroogsete seas üle 15 000. Õistaimi on sisevetes üle 2600 liigi, maismaal aga suurusjärgus 300 000 liiki. Kuid siseveekogude üldpindala hõlmab seejuures ainult 3,5% maismaast ja ligikaudu 1% kogu Maa pinnast. Eriti liigirikkad on siseveekogude kalad (*ca* 46% kõigist kalaliikidest). Meredes on üks kalaliik iga 105 km$^3$, sisevetes iga 15 km$^3$ veehulga kohta. Taimede ega seente seas pole hõimkondi, mida leiduks ainult sisevetes. Loomade seas on niisuguseks rühmaks pisikesed (0,1–1,5 mm pikkused) loimurid (*Tardigrada*).

Isegi väikese veekogulõigu tegeliku liigirikkuse kindlakstegemine on väga töömahukas ülesanne. Enamasti ei üritata määrata kõiki rühmi, sest mikroskoopilised vormid (bakterid, seened, protistid) on veel vähe tuntud. Pealegi vaheldub liigiline koosseis nii aastaajati kui ka aastati. Tavaliselt hinnatakse välistunnuste järgi hästi eristatavate rühmade mitmekesisust kindlal aastaajal standardse meetodiga kogutud proovis. Teistsugune proovimeetod või harjumuspärasest erinev aeg tõenäoliselt pikendaks leitud liikide nimekirja. Liikide arv proovis on enamasti alla poole tegelikust. Mida väiksem on tegelik liikide arv, seda suurem on tõenäosus enamikku neist tabada. Väga paljud veeliigid (eriti selgrootute hulgas) on haruldased või juhukülalised. Tulemusi mõjutavad ka uurijate kogemused ja võimalused.

Omaette teema on liikide eristamine rakkude pärilikkusaine järgi, mis tõenäoliselt seniseid liigirikkuse hinnanguid tublisti suurendaks. Näiteks ühe Pennsylvania (USA) oja selgrootute liikide arv oli geneetilise analüüsi järgi 70% suurem kui tippekspertide hinnatud välistunnuste järgi. Määrajates esitatud liigid koosnesid DNA järgi keskmiselt 2–11 liigist. Ka need olid enamasti haruldased (1–2 isendit proovi kohta). Saksamaalt Breitenbachi ojast (vt ääremärkus 2.2) on aastatepikkuse seire tulemusena leitud üle 800 putukaliigi, sealhulgas 476 kahetiivalist, 70 mardikalist ja 57 ehmestiivalist. Muid selgrootute liike on saadud üle 400, millest suurema osa moodustavad mikroskoopilised ümarussid, keriloomad, rõng- ja lameussid. Väga paljud on ilmselt juhukülalised ja paljud pärit seisuvetest.

**BREITENBACHI OJA** **ÄÄREMÄRKUS 2.2**

Breitenbach on väike, ainult 8,3 km$^2$ suuruse valgalaga oja Saksamaal Weseri jõestikus. Seni on temast u 50 aastase regulaarse seire käigus leitud üle 2000 loomaliigi, sealhulgas putukaid üle 800. See näitab, et tavapärased, standardsed proovid alahindavad oluliselt kogu liigistikku. Loomulikult pole kõik liigid korraga kogu aeg esindatud ning suurem osa neist on juhukülalised või haruldased. Paljusid rühmi suudavad määrata ainult eriteadlased ning tavapärases töös neid ei eristatagi. Kuid dominantliigid (väikesed ehmestiivalised) on aastate jooksul samad püsinud, tugevasti on muutunud ainult nende asustustihedus. Tõenäoliselt on Breitenbach maailma kõige paremini uuritud oja.

Alljärgnevas ülevaates elusloodusest käsitleme rakulist elu, jättes rakuta elu (viirused ja nendesarnased) kõrvale. Siseveekogusid asustavad nii eeltuumsed organismid ehk **prokarüoodid** (arhed ja bakterid) kui ka päristuumsed ehk **eukarüoodid**. Viimased jagatakse nelja riiki: protistid, seened, taimed ja loomad. Seejuures pole protistid riik samas tähenduses mis ülejäänud, vaid pigem fülogeneetiline arengutase (vt 2.4.2).

## 2.4.3. Bakterid ja arhed

Kaks eeltuumsete organismide rühma (bakterid ja arhed) on morfoloogiliselt sarnased, kuid pole omavahel lähemalt suguluses kui eukarüootidega. Vanemas kirjanduses kasutatakse ka termineid „eubakterid“ ja „arhebakterid“. Erinevalt eukarüootidest pole neil tuuma, mitokondreid, Golgi aparaati, membraaniga ümbritsetud vakuoole ega endoplasmaatilist retiikulumi. Prokarüootide liigilist kuuluvust uuritakse molekulaargeneetiliste meetoditega, sest nende välised tunnused varieeruvad vähe. Liik on defineeritud kui lähedaste tüvede kogum (ühest rakust pärit rakkude populatsioon), mis on oluliselt erinev teistest tüvedest ja nende rühmadest. Prokarüootseid liike defineeritakse ka nende ribosoomi väikese allüksuse (16S) RNA nukleotiidse järjestuse alusel. Prokarüoodid, kelle 16S ribosomaalse RNA järjestused on enam kui 97% ulatuses identsed, kuuluvad tõenäoliselt samasse liiki.

DNA ja RNA nukleotiidide järjestamise põhjal on baktereid võimalik jaotada vähemalt 80 hõimkonda. Rohkem on levinud 18 hõimkonna süsteem. See koondab neid taksoneid, mille kohta on laborikatsetes teada saadud kõik liigi määramiseks vajalikud tunnused (sh morfoloogilised ja füsioloogilis-metaboolsed). Iga hõimkond sisaldab klasse, seltse, sugukondi ja perekondi, mille esindajatel võib olla erinev ainevahetustüüp ja keskonnanõuded. Allpool on toodud nende hõimkondade iseloomulikud tunnused, mille esindajaid leidub ka mageveekogudes.

## BAKTERID (EUBACTERIA)

**Firmikuudid (*Firmicutes*), *Mollicutes* ja aktinobakterid (*Actinobacteria*).** Suur rühm, millesse kuuluvad erineva morfoloogiaga bakterid (ebakorrapärased pulgad, väikesed ümarad, filamentsed, mütseeliga või rakukestata). Nende hulgas on liike, mis lagundavad ensüümide abil orgaanilist ainet ja toodavad teiste bakterite vastu antibiootikume.

**Proteobakterid (*Proteobacteria*).** Suurim bakterite rühm, mis jaguneb kuude alarühma. Võib nimetada ka purpurbakterite rühmaks, sest nende esindajad kuuluvad mitmesse proteobakterite alarühma. Nende seas on lihtsaid ümarbaktereid ja pulki, punguvaid ja jätketega või viljakehi moodustavaid vorme. Toitumistüübilt kuulub siia fotoautotroofe, kemolitotroofe ja kemoheterotroofe.

**Alfaproteobakterid (*Alphaproteobacteria*).** Ainevahetustüübilt väga mitmekesine rühm. Siia kuulub fotosünteesijaid, metülotroofe, nitrifitseerijaid ja $N_2$ fikseerijaid. Neid leidub palju eriti meredes.

- Purpursete mittevääviibakerite hulka kuuluva perekonna *Rhodospirillium* liigid kasutavad anaeroobsetes tingimustes valgusenergiat fotosünteesiks, hapniku juuresolekul aga hoopis oksüdeerivad orgaanilisi ühendeid.
- Perekonda *Caulobacter* kuuluvad aeroobsed heterotroofid, kes elavad mage- ja merevees ning mullas. Nad kinnituvad teistele bakteritele, vetikatele ja detriidile. Rakukestal on selleks spetsiaalne kinnitusplaadikesega jätke. Raku jagunemisel moodustub üks liikuv viburiga rakk ja teine liikumatu kinnitusjätkega rakk.
- Perekonda *Nitrobacter* kuuluvad liikumatud kemolitotroofsed pulkbakterid, kes kasutavad teise perekonna (*Nitrosomonas*) toodetud nitriteid, muutes need nitraatideks.

**Beetaproteobakterid (*Betaproteobacteria*).** Domineerivad magevee mikroobikooslustes.

- Perekonda *Leptothrix* kuuluvad aeroobses keskkonnas elavad viburiga kemoheterotroofid, kes oksüdeerivad mangaani. Võivad moodustada rakkude kette. Eelistavad aeglase vooluga puhtaid rauarikkaid vooluveekogusid.
- Perekonda *Nitrosomonas* kuuluvad aeroobsed kemoautotroofid. Nad elavad mere- ja magevees, kus leidub ammooniumi; ainevahetuse vaheproduktiks on neil nitritid.
- Perekonda *Spirillum* kuuluvad kemoheterotroofid, kes elavad orgaanikarikkas mere- ja magevees vähese hapnikuga või anaeroobsetes veekihtides.

**2.38.** Pulkbakterite (*Sphaerotilus natans*) makroskoopilised kolooniad Pääsküla jõe põhjas.

- Perekonna *Gallionella* liigid on kemolitotroofid, kes elavad külmas rauarikkas vees aeroobse ja anaeroobse tsooni piiril. Seal leidub nii redutseeritud väävlikui ka rauaühendeid. *Sphaerotilus natans* asustab reostunud vooluveekogusid (joonis 2.38).

**Gammaproteobakterid (*Gammaproteobacteria*).** Selle rühma osakaal mere- ja magevee bakterikooslustes on väike.

- Perekonda *Beggiatoa* kuuluvad kemoautotroofid. Energia saamiseks oksüdeerivad nad vesiniksulfiidi, süsinikuallikana kasutavad $CO_2$. Valguse käes suudavad fotosünteesida. Elavad põhjasetetes aeroobse ja anaeroobse kihi vahel. Osalevad süsiniku- ja lämmastikuringes.

**Deltaproteobakterid (*Deltaproteobacteria*).** Samuti väikese tähtsusega rühm.

- Perekonna *Desulfovibrio* anaeroobid redutseerivad sulfaate, nii et tekib $H_2S$.
- Perekond *Vampirovibrio* elab rohevetika klorella (*Chlorella*) niitidel.

**Epsilon- ja dzeetaproteobakterid (*Epsilonbacteria, Zetaproteobacteria*).** Üsna hiljuti määratletud proteobakterite rühm.

- Perekondade *Sulfurospirillum* ja *Thiovulum* liigid elavad nii mage- kui ka merevees. *Thiovulum* eelistab sulfiidirikast settepinda, kus oksüdeerib sulfaate redutseerivate bakterite toodetud vesiniksulfiidi. Nende rakkudel on külgmised viburid ja nad on võimelised ujuma kuni 0,6 mm/s.

**Planktomütseedid (*Planctomycetes*).** Rühm ebatavalisi baktereid nii fülogeneetiliselt kui ka morfoloogia (kinnitumisplaadiga jätke) ja eluviisi poolest (paljunevad pungudes).

- Perekonda *Planctomyces* kuuluvad aeroobsed heterotroofid, kes kinnituvad valguliste jätketega teistele organismidele, näiteks niitjatele sinivetikatele. Madalaveeliste eutroofsete järvede planktonis moodustavad rosette, mille keskele võivad ladestuda raua- ja mangaaniühendid.
- Perekond *Piruella* kinnitub teistele organismidele.

***Verrucomicrobium* ja *Prosthecobacter*.** Neile on iseloomulik valguline jätke nagu eelmiselgi rühmal. Tegu on obligatoorsete või fakultatiivsete aeroobidega, kes on võimelised lagundama suhkruid. Nad on looduses laialt levinud nii magevetes kui ka meres.

**Flavobakterid ja atsidobakterid (*Flavobacteria, Acidobacteria*).** Nende peamiselt heterotroofse eluviisiga bakterite hulgas on nii aeroobe kui ka anaeroobe. Osalevad orgaanilise aine lagundamises. Mitmed liigid on kalade patogeenid.

**Tsütofaagid (*Cytophaga*).** Levinud pinnases ja veekogudes, sageli väga arvukad.

- Perekonna *Cytophaga* liigid on aeroobsed ja lagundavad tselluloosi. Nende hulgas on kalade patogeene, kes põhjustavad näiteks kolumnarioosi.
- Perekonna *Flexibacter* liigid on mageveekogudes elavad heterotroofid.

***Nitrospira*.** Perekonna *Nitrospira* bakterid oksüdeerivad nitriteid nitraatideks, nagu seda teevad ka nitrifitseerijad perekonnast *Nitrobacter*, kuid *Nitrospira* esindajad on arvukamad. Arvatakse, et nad on omavahel vahetanud füsioloogilisi omadusi määravaid geene.

**Rohelised väävlibakterid (*Chlorobia*).** Kõik laboris kasvatatavad rohelised väävlibakterid on liikumatud anoksügeensed fotosünteesijad, kes elavad anaeroobsetes veekihtides. Kasutavad elektronide doonorina vesiniksulfiidi, oksüdeerides selle algul molekulaarseks väävliks ja siis sulfaatideks. Väävlit ladestavad varuainena väljapoole rakku. Peamised perekonnad on *Chlorobium* ja *Chlorobaculum*.

**Spiroheedid (*Spirochetes*).** Neile annavad keeritsja kuju sisemised viburid.

- Perekonna *Spirochaeta* liigid on vabalt elavad aeroobsed ja fakultatiivselt aeroobsed magevee- ja setete asukad.
- Perekonna *Cristispira* liigid asuvad mageveelimuste seedetraktis, kus tarbivad nendega sama toitu.

**Rohelised mittevääviibakterid (*Chloroflexi*).** Niitja kehakujuga ja libisevalt liikuvad anaeroobsed fotosünteesivad fotoheterotroofid. Ei ole evolutsiooniliselt seotud teiste fotosünteesivate prokarüootide ega roheliste väävlibakteritega. Neil on $CO_2$ fikseerimiseks eriline rada, mida teistel fotosünteesivatel bakteritel pole.

- Perekonna *Chloroflexus* liikmed on kõige ürgsemad fotosünteesivad bakterid. Nad elavad aluselistes kuumaveeallikates.
- Perekonnad *Oscillochloris* ja *Chloronema* asustavad järvede $H_2S$-i-rikkaid kihte.

***Deferribacter*.** Eriline rühm anaeroobseid baktereid, kes saavad elektronide aktseptorina kasutada paljusid ühendeid: nitraate, rauda, mangaani, väävlit ja vesiniksulfiidi.

**Tsüanobakterid (*Cyanobacteria*).** Suurim ja mitmekesiseim fotosünteesivate bakterite rühm. Enamik neist on hapnikku tootvad fotosünteesijad, kuid mõned suudavad kasvada ka pimedas, orgaaniliste ühendite arvel. Osa neist on võimelised siduma õhulämmastikku. Tsüanobaktereid leidub igasugustes vetes. Nagu arhedki võivad mõned neist asustada väga külmi, väga kuumi või väga soolaseid elupaiku. Eluvormi mõttes moodustavad nad fütoplanktoni tähtsa koostisosa.

Tsüanobakterite taksonoomia on muude bakterirühmadega võrreldes paremini arenenud tänu lihtsale morfoloogiale. Ka rakud ise on teiste rühmade esindajate omadest suuremad (1–100 µm). Elu kõige varajasemad fossiilsed vormid sarnanevad tsüanobakteritega. Rakkude kuju varieerub ümarast haruliseni, nad võivad olla eraldi või kolooniatena. Spetsialiseerunud rakud on **akeniidid** (puhkevormid) ja niitjatel vormidel paksuseinalised **heterotsüstid** (lämmastiku fikseerimiseks vähese $O_2$ tingimustes). Erinevalt „pärisvetikatest“ puuduvad tsüanobakteritel kloroplastid, mida asendab avatud lamellaarne süsteem. Pigment fükobiliin annab neile sinaka värvusvarjundi. Enamik eluvorme on niitjad (sh paljud tuntud veeõitsengu põhjustajad, nagu perekond *Aphanizomenon*). Perekonna *Microcystis* esindajad võivad olla nii üherakulised kui ka koloonialised.

Tsüanobakterid võivad õige temperatuuri ja küllaldase toidu korral moodustada väga kiiresti uusi põlvkondi. Suurem osa veekogu tsüanobakteritest on passiivses olekus, sest kõigile korraga ei jätku ressursse. Rakkude gaasivakuoolid võimaldavad mõnel liigil veepinnale tõusta ja seal kuni 1 m paksusi matte moodustada. Eluvormi mõttes kuuluvad sellised tsüanobakterid neustoni hulka, mõnikord arvatakse nad isegi suurtaimede koosseisu. Veepinda kattes varjavad nad valguse ülejäänud fütoplanktoni eest. Kui valguse asemel hakkab kasvu piirama toidupuudus, lõpetatakse vakuoolide tootmine ja laskutakse sügavamale, toidurikkamasse vette. Fükobiliinide abil suudavad tsüanobakterid valgust püüda ka sügaval vees.

Paljud tsüanobakterid on rakkude pinda katva lima tõttu söödamatud või mürgised. Need mürgid mõjutavad vee-elanikke (sealhulgas kalu) ka vees lahustumise tagajärjel. Läbipaistvates, ajutistes ja vooluvetes asustavad tsüanobakterid sageli hoopis bentaali. Vooluvetes, hämaras kivide all elavad näiteks perekonna *Schizothrix* esindajad.

Liikide koguarv sisevetes küünib 2500-ni (tabel 2.5), kuid molekulaargeneetiliste kriteeriumide järgi võib see märksa suurem olla.

- Seltsi *Chroococcales* kuuluvad liikumatud üherakulised pulkja või ümara kujuga bakterid, kes paljunevad pooldumise või pungumise teel. Erandlikud on perekonnad *Prochloron* ja *Prochlorococcus*, kellel leidub pigmentidest nii Chl *a* kui ka Chl *b*, kuid puuduvad fükobiliinid, mistõttu nad on rohurohelised.
- Seltsi *Oscillatoriales* kuuluvad hargnemata niitidega tsüanobakterid. Paljud neist põhjustavad veeõitsengut rohketoitelistes järvedes. Siia kuuluvad perekonnad *Planktothrix* ja *Oscillatoria*.
- Seltsi *Nostocales* kuuluvad hargnemata karvadega bakterid, kellest mõned moodustavad sültjaid kolooniaid ja võivad sisaldada gaasivakuoole. Nende hulgas on liike, kes fikseerivad aeroobses keskkonnas õhulämmastikku. Selleks on spetsiaalsed rakud – heterotsüstid. Perekonnad *Anabaena*, *Aphanizomenon* ja *Gloeotrichia* on planktilised ning põhjustavad parasvöötme mageveekogudes veeõitsengut.
- Seltsi *Stigonematales* esindajad on morfoloogiliselt keerukamad kui teised tsüanobakterid ja moodustavad samuti sültjaid kolooniaid. Neid leidub kuumaveeallikates (alla +58 °C), veidi happelistes vähetoitelistes järvedes ja kiirevoolulistes ojades.

**ARHED (ARCHAEA)** Arhed on üherakulised eeltuumsed organismid. Bakteritest ja eukarüootidest eristusid nad väga varasel evolutsioonietapil. Veekogudes on nad sageli levinud äärmuslikes tingimustes (hapnikupuudus, kuumaveeallikad, soolajärved). Metaani tootvad arhed elavad soodes, kus neil on globaalne tähtsus, samuti veekogude settes. Arhede määramine põhineb nende ainevahetuse iseärasustel ja molekulaargeneetilisel analüüsil. Väliskujult sarnanevad nad pärisbakteritega, kuid erinevad neist nii geneetiliselt (ribosomaalse RNA poolest) kui ka biokeemiliselt. Arhed jaotatakse kahte hõimkonda: *Crenarchaeota* ja *Euryarchaeota*.

***Crenarchaeota.*** Siia kuuluvad aeroobsed ja anaeroobsed äärmuslikud termofiilid, kes kõik kasutavad elementaarväävlit. Ainevahetustüübilt on nad kemoheterotroofid või kemoautotroofid. Energiat saavad nad anorgaaniliste ühendite (väävli-, raua-, vesinikuühendite, sulfiidide) oksüdatsioonist (näiteks perekond *Sulfolobus*). *Pyrolobus fumarii* elab Põhja-Ameerikas Yellowstone'i kuumaveeallikates +113 °C juures, kusjuures +90 °C on talle liiga külm.

***Euryarchaeota.*** Selles hõimkonnas on äärmuslikud halofiilid, väga hapnikukartlikud metanogeenid ja hüpertermofiilid. Neid leidub ka mageveekogude põhjakihtides ja settes. Metaani moodustumist pidurdab järvedes nitraatide, sulfaatide ja $Fe^{3+}$ esinemine.

Tabel 2.5. SISEVETE TSÜANOBAKTERITE JA PROTISTIDE RÜHMADE TUNNUSEID

| Rühm | Peamised pigmendid | Rakuseina materjal (kui on olemas) | Elupaigad sisevetes | Ligikaudne liikide koguarv ja sisevee-liste osa sellest (%) | Ökoloogiline tähtsus |
|---|---|---|---|---|---|
| Tsüanobakterid (*Cyanobacteria*) | Chl *a*, fükobiliinid | Peptidoglükaan | Seisu- ja vooluveed, oligotroofsest eutroofseni | 1200–5000 (50%) | Mõned seovad õhulämmastikku, mõned on mürgised. Toiteainerikastes järvedes moodustavad suuri ujuvaid matte |
| Punavetikad (*Rhodophyceae*) | Chl *a*, fükobiliinid | Tselluloos | Vooluveed, rabad | 1500–5000 (5%) | Sisevetes peamiselt *Batrachospermum* |
| Koldvetikad (*Chrysophyceae*) | Chl *a*, Chl *c*, karotinoidid | | Parasvöötme plankton | 300–1000 (80%) | *Dinobryon* on fütoplanktonis tavaline. Mõned on fagotroofid |
| Ränivetikad (*Bacillariophyceae*) | Chl *a*, Chl *c*, karotinoidid | Opaal | Plankton ja bentos | 5000–12 000 (20%) | Üks peamisi esmastootjaid nii sisevetes kui ka meredes |
| Vaguviburilised (*Dinoflagellata*) | Chl *a*, Chl *c*, karotinoidid | Tselluloos | Peamiselt plankton | 2000 (7%) | Mõned on mürgised, mõned fagotroofid. Palju sümbiontseid seoseid |
| Eugleniidid (*Euglenoidea*) | Chl *a*, Chl *b* | Valgud | Eutroofsed veed | 400–1000 | Võivad olla fagotroofid. Toidurikaste setete indikaatorid |
| Rohevetikad (*Chlorophyceae*) | Chl *a*, Chl *b* | Tselluloos või kest puudub | Seisu- ja vooluveed, oligotroofsest eutroofseni | 6500–20 000 (87%) | Olulised esmastootjad. Väga mitmesuguse kujuga (planktonis üherakulised, bentoses niitjad) |
| Mändvetikad (*Charophyceae*) | Chl *a*, Chl *b* | Tselluloos | Bentos, seisuvesi või aeglane vool | 315 (95%) | Sageli lubjarikastel setetel |
| Algloomad | | | | 2392* | |

* Balian jt 2008 järgi

(Allikas: Dodds 2002 järgi, täiendatud)

## 2.4.4. Protistid

Protistideks kutsutakse kõiki eukarüoote, kes ei kuulu loomade, taimede ega seente hulka. Nad on lihtsad organismid ning valdavalt üherakulised. Neid võib jagada ka ainurakseteks vetikateks, algloomadeks ja algseenteks. Hulkraksetel protistidel puuduvad eristunud koed. Hoolimata sellest on protistid nii geneetiliselt kui ka morfoloogiliselt tunduvalt mitmekesisemad kui „päris“ taimed, loomad ja seened. Nende hulka kuulub eri autorite järgi 30–40 erineva toitumisviisi, liikumisviisi, rakukesta ja elutsükliga hõimkonda.

Toitumise järgi jagati protiste varem autotroofseteks **vetikateks** (kellel on kloroplastid) ja heterotroofseteks **algloomadeks** (kel neid pole). Kuid ka mõned kloroplastidega „viburvetikad“ suudavad neelata detriiti ja bakterid. Ehkki toitumisviisilt sarnanevad vetikad taimede ja algloomad pärisloomadega, erinevad nad neist oluliselt päritolu poolest, mistõttu selline liigitus on omajagu eksitav.

Esmalt kirjeldame sisevetele tüüpiliste protistide tähtsamaid rühmi nende traditsiooniliste nimetuste järgi, seejärel fülogeneetilistes seostes (lk 223).

Allpool kasutatav traditsiooniline termin „vetikad“ on üldnimetus ühe- või mitmerakuliste pro- ja eukarüootide kohta, kes suudavad fotosünteesida ja sisaldavad Chl *a*-d. Perifüütoni vetikatest moodustavad suure osa räni- ja rohevetikad. Muude tunnuste kõrval on oluline klassifitseerimise alus rakuseina materjal (tabel 2.5). Pehmekestalised vetikad imavad toiteaineid otse läbi rakukesta, ränivetikad läbi pantsri pooride. Enamik paljuneb sugutult rakkude pooldumise teel. Mõnel juhul tekib uus rakk või koloonia (autospoor) eelmise sees (nt rohevetikatel *Scenedesmus*).

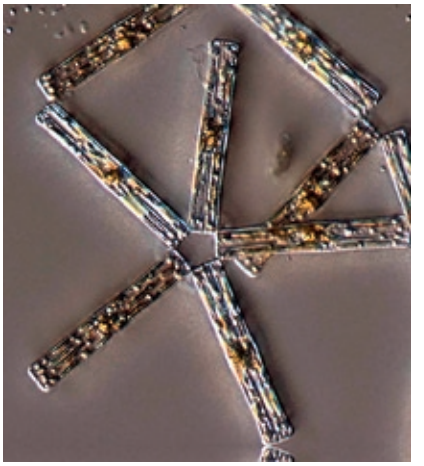
■ **PUNAVETIKAD (RHODOPHYCEAE)** Perekonna *Batrachospermum* esindajaid leidub vooluvetes ja allikates üle maailma. Lühikeste harudega tallus on nii tugevasti limastunud, et meenutab konnakudu (vt joonis 2.34). Nad sisaldavad lähedasi pigmente tsüanobakteritega, kuid teistsuguses vahekorras.

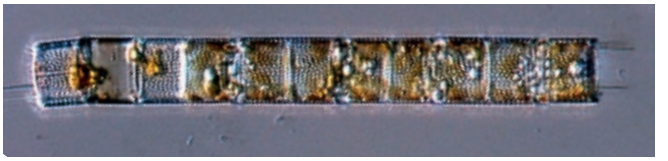
■ **KOLDVETIKAD (CHRYSOPHYCEAE)** Koldvetikad on tavalised puhtaveeliste järvede planktonis. Enamik neist on üherakulised, mõne liigi rakkudel on ränisoomused. Neil on viburid ja mõned suudavad toituda tahketest osakestest (fagotroofia). Kuldpruun värvus tuleneb karotinoidpigmentidest. Üks tavaline perekond on *Dinobryon* (elab ka koloonialiselt). Rakud asuvad vaasikujulistes kodades, mis on lehvikjalt ühendatud (joonis 2.39). Kolooniate suured mõõtmed raskendavad zooplanktonil neist toitumast. Puhkevormid on kõva ränikattega ning võivad setetes kaua soodsaid elutingimusi oodata.

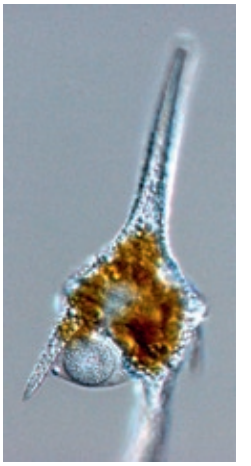
■ **RÄNIVETIKAD ehk DIATOMEED (BACILLARIOPHYCEAE)** Diatomeed on väga olulised orgaanilise aine tootjad nii järvedes, jõgedes kui ka soodes. Puhaste järvede planktonis domineerivad nad sageli kevadel, bentoses aasta ringi. Samas moodustavad nad väga suure osa perifüütonist, eriti vooluvetes. Ränivetikatele annab nime nende rakke ümbritsev läbipaistev kahepoolmeline ränikest ehk pantser. Üks poolmetest katab teise nagu kaas. Rakkude suurus jagunemise käigus järjest väheneb. Kui see on juba liiga väike, lõpeb jagunemine ning sugulise paljunemise käigus tekivad auksospoorid. Neist arenevad jälle normaalse suurusega rakud. Teine viis rakkude suurust taastada on puhkespooride abil.

**2.39.** Koldvetikas *Dinobryon sertularia* (vasakul). Fotol 400-kordne suurendus.

**2.40.** Sulgränivetikas *Tabellaria fenestrata* (paremal) on kitsaste rakkude ja koloonialise vormi tõttu võimeline vees hõljuma. Ketasränivetikas *Aulacoseira granulata* võib moodustada niitjaid vorme (all). Fotodel 400-kordne suurendus.







**2.41.** *Ceratium hirundinella*. 400-kordne suurendus.

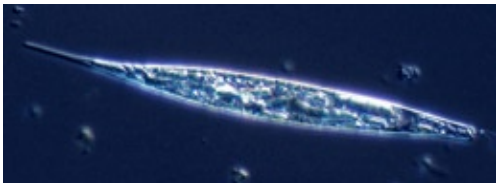
Ränivetikate planktoniliigid on sagedamini ümarad (peamiselt ketasränivetikad), bentoseliigid pikliku kujuga (sulgränivetikad). Mõnikord võivad rakud moodustada ahel- või niitjaid kolooniaid (joonis 2.40). Pantsrid säilivad põhjasetetes kaua ning nende järgi saab otsustada, missugune vetikakooslus asustas veekogusid varem. Diatomeed väldivad madala pH-ga vett.

**■ VAGUVIBURILISED (DINOFLAGELLATA)** See rühm elab enamasti seisuvetes (järved, tiigid, sood). Nad on üherakulised ja liiguvad fütoplanktonis vabalt. Rakukest võib olla kõva ja tselluloosist (*Ceratium*, joonis 2.41; *Peridinium*) või puududa (*Gymnodinium*). Eesmine vibur liigub horisontaalselt ümber kogu raku (tavaliselt spetsiaalses vaos), tagumine pikisuunas. Paljud vaguviburilised on võimelised toituma teistest organismidest. Paljudel pole isegi fotosünteesivat pigmenti, kuid mõned (*Dinophysis*) neelavad väikesi üherakulisi vetikaid, kes talitlevad neis kloroplastidena. Mõnel liigil on keeruline elutsükkel, mis sisaldab nii eoselist, amöboidset kui ka viburitega staadiumi. Kõigi nende omaduste tõttu ei saa vaguviburilisi ühemõtteliselt pidada ei taime- ega loomalaadseks.

**■ EUGLENIIDID (EUGLENOIDEA)** Eugleniidide pigmendid sarnanevad rohevetikate omadega. Eugleniidid on alati üherakulised, liiguvad tavaliselt aktiivselt ja asustavad enamasti eutroofseid veekogusid, sealhulgas põhjasetteid. Neid leidub ka humiinainerikastes vetes. Nad suudavad neelata tahkeid osakesi (baktereid ja detriiti). Rakke ümbritseb painduv valguline kest. Eugleniidid liiguvad kas amööbide kombel keha sopistades ja painutades või viburite abil. Neil on kaks eesmist viburit, millest üks on eriti pikk. Igal rakul on punane valgustundlik „silm“ ning palju kloroplaste. Tavalised perekonnad on *Phacus* ja *Euglena* (silmviburlane; joonis 2.42). Neist viimane elab ka orgaaniliselt reostunud vetes.

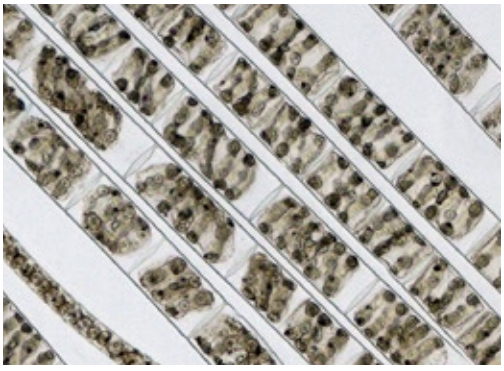
**■ ROHEVETIKAD (CHLOROPHYCEAE)** Rohevetikad varieeruvad lihtsatest üherakulistest organismidest (planktonis, nt koppvetikas – *Chlamydomonas*) suurte kolooniateni bentoses. Limaseid vorme esindab näiteks perekond *Sphaerocystis*, niitjaid keermikvetikas (*Spirogyra*; joonis 2.43). Rohevetikaid leidub kõigis pinnavetes: nii märjas mullas, kiirevoolulistes jõgedes kui ka suurte järvede planktonis. Suured niitvetikakolooniad on iseloomulikud toidurohketele veekogudele. Paljudel liikidel on kõva tselluloosist rakukest, eredad kloroplastid ja põhiline pigment Chl *a*. Suuri kolooniaid moodustavad perekonnad *Cladophora* (joonis 2.44) ja *Enteromorpha*.

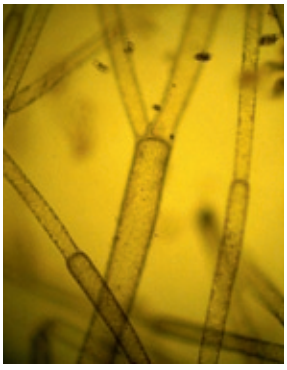
**■ MÄNDVETIKAD (CHAROPHYCEAE)** Mändvetikad on rohevetikate lähedased sugulased. Suurem osa neist on välja surnud. Välimuse järgi tundub, nagu oleksid neil varred ja oksad. Talluse pikkus kõigub vahemikus 5 cm – 1 m. Tallus on haploidne (ühekordse kromosoomistikuga) nagu sammaldelgi. Neil puuduvad juhtkoed, kuid nende erisugulised paljunemisorganid (oogoonid ja anteriidid) sarnanevad pigem päristaimede kui muude vetikate omadega. Mändvetikaid leidub nii järvedes kui ka karedaveelistes soodes. Nad võivad elada mitmekümne meetri sügavusel. Enamik neist on puhta vee indikaatorid. Esindajatena võiks siin mainida perekondi *Nitella* ja *Chara* (joonis 2.45).



**2.42.** *Euglena acus*. 400-kordne suurendus.

**2.43.** *Spirogyra*. 200-kordne suurendus.

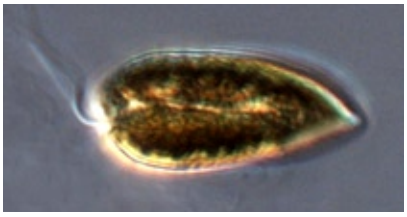




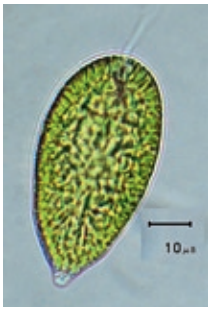
**2.44.** Karevetika (*Cladophora*) niidid harunevad. Suure toitelisusega järvedes paljuneb ta massiliselt ja levitab kaldale uhutult ebameeldivat lehka.

**2.45.** Mändvetikad (*Chara* sp.).

**MUUD VETIKARÜHMAD** Meres tavaliste pruunvetikate (*Phaeophyceae*) esindajaid on sisevetes vähe ja nende kolooniad väikesed (alla 1 cm). Eriviburvetikate (*Xanthophyceae*) hulka kuulub näiteks suuri kolooniaid moodustav perekond *Vaucheria*. Sisevetes leidub veel neelvetikate ehk krüptomonaadide ehk krüptofüütide (*Cryptophyceae*; joonis 2.46) esindajaid. Rafidiofüütide (*Raphidiophyceae*) hulka kuulub pehmeveeliste järvede tavaline liik tativetikas (*Gonyostomum semen*; joonis 2.47).



**2.46.** Neelvetikas *Cryptomonas*. 400-kordne suurendus.




**2.47** Tativetikas *Gonyostomum semen*.

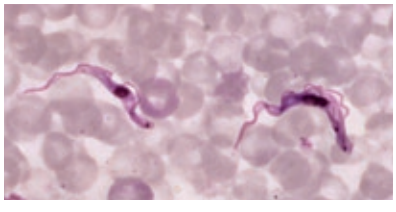
**ALGLOOMAD** Traditsiooniliselt algloomadeks nimetatud rühm hõlmab mikroskoopilisi üherakulisi või koloonialisi eukarüoote, kes pole ei loomad, taimed ega seened. Erinevalt enamikust vetikatest on nad heterotroofsed nagu loomadki. Päritolult on algloomad väga erinevad, kuid sageli sarnase käitumise ja eluviisiga. Liikide arv sisevetes on ligi 2500 (tabel 2.5).

Fülogeneetiliselt kuuluvad algloomad paljudesse hõimkondadesse. Nad eelistavad rohkete setetega seisuveekogusid ning interstitsiaali (liiva- ja kruusateradevahelisi ruume). Algloomad on kosmopoliitsed: ühe veekogu ühest proovist võib leida kuni 8% kogu maakera liikidest. Nad suudavad kiiresti uusi alasid asustada ja paljuneda. Optimaalsetes tingimustes võivad mõne liigi esindajad uuesti poolduda juba mõne tunni pärast. Suguline sigimine on tavaline, kuigi mitte kõigil liikidel. Paljud moodustavad vastupidavaid tsüste. Algloomad suudavad viburite ja/või ripsmete abil vees kulgeda 0,1–1 mm/s. Paljud toituvad bakteritest ja vetikatest, kuid leidub ka kiskjaid ja parasiite. Mõned on ise vaevu bakteritest suuremad. Algloomad võivad olla väikeste rõngusside ja surusääsklaste vastsete põhitoit. Pehme keha tõttu säilib neist pärast ärasöömist vähe.

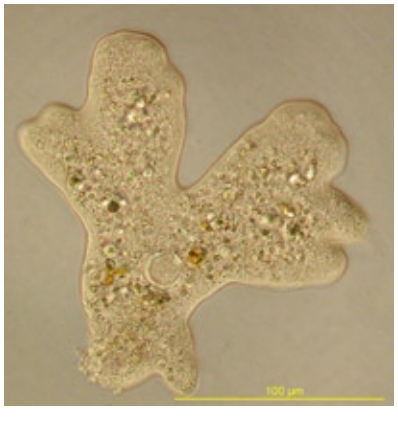
Liikumistüübi järgi on algloomi kolme sorti. Esimesel rühmal (varasema nimetusega viburloomad) on üks või mitu kehast pikemat viburit. Siia kuulub nii vabalt elavaid baktertoidulisi vorme kui ka siseparasiite, kes võivad nakatada inimest (*Trypanosoma*, *Leishmania*; joonis 2.48). Eugleniididest on pooled vetikad, pooled algloomad. Viimased on üherakulised ja enamasti 15–40 µm pikad.

Rakusopististe ehk kulenditega taksonitel (varasema nimetusega juurjalgsed) rakukest puudub (joonis 2.49). Nad liiguvad protoplasmat ja ebajalgu (pseudopoode) sopistades, elavad bentaalis või settes ning on kiskjad (saak kleepub kas ise raku pinnale või haaratakse pseudopoodidega). Tüüpilised esindajad on amööbid. Neist kaks liiki võivad põhjustada vees ujuvatel inimestel meningiiti.

Ripsloomadel (*Ciliophora* ehk *Ciliata*; joonis 2.50) on rohkem kui neli ripset, mida liigutades nad kulgevad. Nende seas on nii endo- kui ka ektosümbionte, samuti parasiitse eluviisiga vorme. Mõõtmetelt kõige suuremad esindajad (1000 µm) on kingloomad (*Paramecium*),

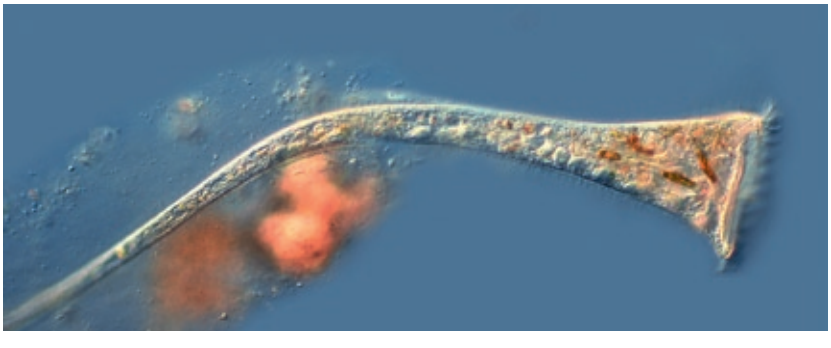


**2.48.** Viburitega protist *Trypanosoma brucei*. 1000-kordne suurendus.



**2.49.** Kulenditega protist *Polychaos fasciculatum*.

**2.50.** Kingloom *Paramecium bursaria* (paremal) ja tõrilane *Stentor polymorphus* (all).



vesikellukesed (*Vorticella*) ja tõrilased (*Stentor*; joonis 2.50). Enamiku pikkus jääb siiski vahemikku 20–200 µm. Ripsloomad söövad baktereid ja viburloomi, kuid üksikud (näiteks mereline *Mesodinium rubrum*) suudavad ka fotosünteesida. Paljud ripsloomad taluvad väikest hapnikusisaldust (näiteks reovees). Järvedes on ripsloomad oluliseks toiduallikaks planktontoidulistele kalavastsetele.

### SISEVETE ELUSTIKU FÜLOGENEETILINE JAOTUS

Fülogeneetilises taksonoomias, mis järgib Cavalier-Smithi (2003) eeskuju, jagatakse sisevete protistid koos taimede, loomade ja seentega järgmistesse suurematesse rühmadesse.

I **Kromalveolaadid** (*Chromalveolata*):
   a) heterokondid (*Heterokontophyta*) – koldvetikad, ränivetikad, rafidiofüüdid, eriviburvetikad, pruunvetikad;
   b) krüptomonaadid (*Cryptophyta*);
   c) alveolaadid (*Alveolata*) – vaguviburvetikad ja ripsloomad.

II **Ekskavaadid** (*Excavata*) – paljud viburitega protistid (*Euglenozoa*).

III **Taimed laias mõttes** (*Archaeplastida*) – puna- ja rohevetikad ning kõrgemad taimed. Kõigi nende kloroplastid on ümbritsetud kahest membraanist, mis näitab nende otsest pärinemist endosümbiontsetest tsüanobakteritest. Kõigi muude protistide plastiididel on kolm või isegi neli membraani, mis tuleneb nende sekundaarsest ülevõtmisest puna- või rohevetikatelt.

IV **Unikondid** (*Unikonta*) – paljud ühe viburiga või amööbjad vormid (*Amoebozoa*) ning loomad ja seened.

Protistide fülogeneetiline süsteem areneb väga kiiresti ning on õpiku ilmumise ajaks tõenäoliselt juba muutunud. Hüdrobioloogiliste protsesside kirjeldamisel kasutame seepärast ülevaatlikkuse mõttes traditsioonilisi taksonoomilisi termineid.

## 2.4.5. Taimed

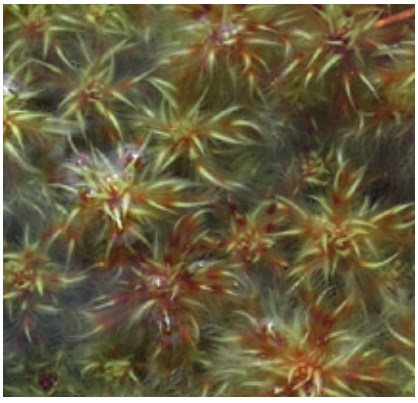
Taimedeks nimetatakse päristuumseid organisme, kellel on organid ja koed (juured, varred, lehed), kes elavad autotroofselt ning toodavad kasvamiseks ja eluks vajalikke orgaanilisi aineid päikesevalguse abil fotosünteesi teel. Erandiks on mõned parasiidid. Taimede rakukest koosneb tselluloosist. Kõigil taimedel vaheldub diploidse (kahekordse kromosoomistikuga) sporofüüdi staadium haploidse (ühekordse kromosoomistikuga) gametofüüdi staadiumiga. Õistaimedel moodustab sporofüüdifaas taimede elutsükli peamise osa, sammaltaimede sporofüüt on lühiealine. Juhtkudede ehk soonte olemasolu või puudumise järgi jagunevad taimed soontaimedeks (kold-, sõnajalg- ja seemnetaimed; viimaste hulgas ka õistaimed) ning mittesoontaimedeks (sammal- ja helviksammaltaimed). Tallofüüdid ehk rakistaimed on hulkraksed alamad taimed. Nende hulka kuuluvad mitmesugused vetikad (eriti rohevetikad) ja helviksammaltaimed. Rakistaimede keha on kudedeks diferentseerumata ja koosneb rakisest ehk tallusest.

**MITTESOONTAIMED** Sammaltaimede (*Bryophyta*) ja helviksammaltaimede (*Marchantiophyta*) roheline ja kõige väljapaistvam osa on haploidne gametofüüt. Diploidne (sporofüüt) on ainult eoskupar ja selle vars. Sammaldel pole juuri ega sooni. Maailmas on üle 200 liigi mageveelisi samblaid ja maksasamblaid (tabel 2.6). Veesamblad kuuluvad kolme seltsi: turbasamblalaadsed (*Sphagnales*), mis sisaldab ainult turbasammalde perekonda (*Sphagnum*), pungsamblalaadsed (*Bryales*) ja *Andreales*. Esimeses kahes on palju veeliike, viimases ainult üksikuid.

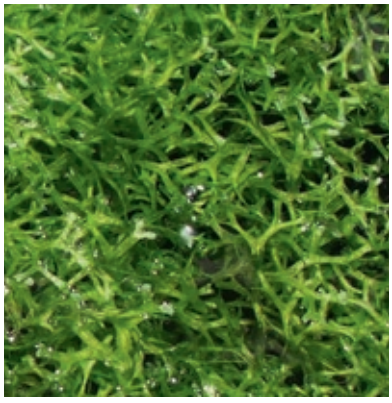
Turbasamblad (*Sphagnum*) on suurima biomassiga samblaperekond Maal. Nad domineerivad rabade pehmeveelistes vetes, eriti suurtel laiuskraadidel (joonis 2.51). Vee happelisus aeglustab surnud osade lagundamist, mistõttu need moodustavad turba. Seega on turbasammaldel üldises süsinikuringes tähtis osa.

Samblad taluvad teistest taimedest paremini vähest valgust (vähese läbipaistvusega vett ja suurt sügavust). Paljud liigid on poolveelised. Vesisamblad (*Fontinalis*; vt joonis 2.29) ja tiivikud (*Fissidens*) võivad USA järvedes elada kuni 120 m sügavusel. Väga tüüpilised on veesamblad suurte laiuskraadide veekogudele. Nad on selgrootutele olulised elupaigana ning perifüütonile elupaigana ja sestoni kogujatena. Veeliste helviksammaltaimede näitena võib nimetada ka Eesti seisuveekogusid asustavat riktsiat (joonis 2.52).

**2.51.** Turbasammal (*Sphagnum* sp.)



**2.52** Riktsia (*Riccia fluitans*).



## Tabel 2.6. MAAILMA TAIMEDE, SEENTE JA LOOMADE LIIGIRIKKUS SISEVETES

| Rühm | Liikide arv sisevetes ja osakaal kõigi liikide hulgas (%) | | Allikas |
|---|---|---|---|
| **Taimed** | | | |
| Samblad ja maksasamblad | 200–250 | (0,5%) | Chambers jt 2008 |
| Soontaimed | 2 614 | (< 1% koos ajutise vee liikidega) | Chambers jt 2008 |
| sh sõnajalgtaimed | 171 | (1–2%) | |
| õistaimed | 2443 | | |
| **Seened** | > 2000 | | Balian jt 2008, tsit. Shearer jt 2007 |
| **Loomad** | 125 530 | | Balian jt 2008 |
| Käsnad | 219 | | Manconi, Pronzato 2008 |
| Ainuõõssed | < 40 | | Jankowski jt 2008 |
| Ripsussid | 1303 | | Schockaert jt 2008 |
| Kärssussid | 22 | (< 2%) | Sundberg, Gibson 2008 |
| Ümarussid | > 1800 | (< 7%) | Abebe jt 2008 |
| Jõhvussid | 326 | (16%) | Poinar 2008 |
| Harjasköhtsed | 318 | (46%) | Balsamo jt 2008 |
| Keriloomad | 2031 | (koos poolveelistega) | Segers 2008 |
| sh vappkerilised | 1488 | | |
| usskerilised | 460 | | |
| Rõngussid | 1761 | | Balian jt 2008 |
| sh hulkharjasussid | 168 | | Glasby, Timm 2008 |
| väheharjasussid | 1100 | | Martin jt 2008 |
| kaanid | 480 | | Sket, Trontelj 2008 |
| Limused | 4998 | | Balian jt 2008 |
| sh karbid | 1026 | | Bogan 2008 |
| teod | 4000 | (5%) | Strong jt 2008 |
| Sammalloomad | 88 | | Massard, Geimer 2008 |
| Loimurid | 62 | (< 7%) | Garey jt 2008 |
| Lülijalgsed | | | |
| ↳ Ämblikulaadsed | > 6000 | | Balian jt 2008 |
| sh vesilestad | 6149 | | Di Sabatino jt 2008 |
| ↳ Vähid | 11 990 | | Balian jt 2008 |
| sh karpvähilised | 1936 | | Martens 2008 |
| aerjalgsed | 2814 | | Boxshall, Defaye 2008 |
| lehtjalgsed | 120 | | Brendonck jt 2008 |
| sh vesikirbulised | 620 | | Forró jt 2008 |
| lõpushännalised | 113 | | Poly 2008 |
| kirpvähilised | 1870 | (20%) | Väinölä jt 2008 |
| lõhkjalalised | 72 | (< 7%) | Porter jt 2008 |
| kakandilised | 942 | (9%) | Wilson 2008 |
| kümnejalalised | > 2834 | | Balian jt 2008 |
| sh kõduhännalised | 63 | | Bond-Buckup jt 2008 |
| krabid | 1476 | (< 20%) | Yeo jt 2008 |
| krevetid | 655 | (25%) | De Grave jt 2008; Crandall, Buhay 2008 |
| pärisvähid | > 640 | | |
| ↳ Hooghännalised | 525 | (koos soolase vee liikidega), 103 (ainult magevetes) | Deharveng jt 2008 |
| ↳ Putukad | 75 874 | | Balian jt 2008 |
| sh ühepäevikulised | 3046 | | Barber-James jt 2008 |
| kiililised | 5680 | | Kalkman jt 2008 |
| kevikulised | 3497 | | Fochetti, Tierno de Figueroa 2008 |
| ehmestiivalised | 12 627 | | Moor, Ivanov 2008 |
| suurtiivalised | 328 | | Cover, Resh 2008 |
| võrktiivalised | 118 | | Cover, Resh 2008 |
| lutikalised | 4 656 | (ainult mageveeliigid) | Polhemus, Polhemus 2008 |
| liblikalised | 747 | | Mey, Speidel 2008 |
| mardikalised | 12 600 | (3,2%) | Jäch, Balke 2008 |
| kiletiivalised | 150 | (0,3%) | Bennett 2008 |
| sihktiivalised | 188 | | Amédégnato, Devriese 2008 |
| kahetiivalised | > 30 000 | | Dodds 2002 |
| sh kihulased | 2000 | | Currie, Adler 2008 |
| surusääsklased | 4147 | | Ferrington 2008 |
| pistesääsklased | 3492 | | Rueda 2008 |
| Selgroogsed | 18 235 | | Balian jt 2008 |
| ↳ Kalad laias mõttes (silmud, kõhrkalad ja luukalad) | 12 740 | (15 062 koos riimveeliikidega) | |
| ↳ Kahepaiksed | 4117 | | Lévêque jt 2008 |
| ↳ Roomajad | 500 | | |
| sh sisalikud | 73 | | Vences, Köhler 2008 |
| krokodillid | 24 | | Balian jt 2008 |
| kilpkonnad | 250 | | Bauer, Jackman 2008 |
| maod | 153 | (5%) | Martin 2008; Bour 2008; Pauwels jt 2008 |
| ↳ Linnud | 566 | (5% ainult mageveeliigid) | Dehorter, Guillemain 2008 |
| ↳ Imetajad | > 124 | | Veron jt 2008 |

**SOONTAIMED (TRACHEOPHYTA)** Erinevalt sammaldest on soontaimede peamine ja kõige märgatavam staadium diploidne (kahekordse liigiomase kromosoomikomplektiga). Veetaimede hulgas leidub sõnajalgtaimi ja õistaimi. Üheidulehelisi õistaimi on vees suhteliselt rohkem kui maismaal, kuid paljasseemnetaimi pole üldse. Maailmas on koos ajutiste vete liikidega 2614 liiki mageveelisi soontaimi, sealhulgas 171 liiki sõnajalgtaimi (tabel 2.6).

Sõnajalgtaimedel (*Pteridophyta*) puuduvad seemned. Eoslates ehk sporangiumides asuvad haploidsed eosed. Neist arenevad kõigepealt rohkem kui 1 cm läbimõõduga üherakulised rohelised gametofüüdid ehk eellehed. Need toodavad sugurakke, mis ühinevad viljastatud munarakuks (sügoodiks). See moodustab jagunedes uue diploidses staadiumis vormi (sporofüüdi). Vee-sõnajalgtaimede tüüpilised esindajad on osjad, lahnarohud ja salviiniad (joonis 2.53).

Õistaimedel (*Magnoliophyta*) asuvad seemned sigimikus, millest areneb vili.

Veesisesed taimed kuuluvadki enamasti kõik veetaimede hulka. Kaldataimede perekondadel on palju sugulasi ka maismaal. Mõned pikaealised liigid, näiteks pilliroog, võivad hõivata laialdasi alasid, mida enamik ülejäänud taimi enam asustada ei saa. Ka tulnukad võivad uutes asupaikades massiliselt vohada. Head levijad paljunevad peamiselt vegetatiivselt. Seemnetega paljunemine on veetaimedel vähem levinud, kuid seemned võivad setetes kaua püsida.

Vooluvetes asustavad soontaimed enamasti aeglase vooluga lõike, kus põhja sadeneb muda, kuid vesi on piisavalt madal või läbipaistev. Veesisestele taimedele on vaja palju valgust, seega ei tohi kalda ääres kasvada jõesängi või litoraali varjutavat metsa. Veetaimede endi liigiline mitmekesisus pole kuigi suur, kuid veekogude kaldaid asustab enamasti rikas liigistik. Seda võimaldavad niihästi niiske muld, mitmekesisust soosiv ökoton kui ka üleujutustega kallastele kanduv lisatoit.

Maailmas on kõige rohkem veesoontaimi Neotroopises – 984 liiki, eriti kaheiduleheliste taimede sugukonnast *Podostemaceae* (188; joonis 2.54). Need samblataolised taimed elavad vooluvetes, kusjuures iga jõestikku asustavad ise liigid. Neo- ja Afrotroopise liikidest ongi üle 60% nende endeemid.

Lõikheinalised (*Cyperaceae*) ja kõrrelised (*Poaceae*) on tavalised kogu maailma kaldataimestikus. Konnarohulised (*Alismataceae*) on eriti liigirikkad Nearktises, võhalised (*Araceae*) Kagu-Aasias, vesikuuselised (*Haloragaceae*) Australaasias ja penikeelelised (*Potamogetonaceae*) Palearktises. Liigirikkaimad perekonnad maailma veetaimede hulgas on penikeel (*Potamogeton*) 99 ning lahnarohi (*Isoetes*) ja alss (*Eleocharis*) mõlemad 70 liigiga.

Mõned liigid suudavad taluda äärmuslikke tingimusi. Näiteks võivad haneheinad Andide veekogudes kasvada kuni 5400 m, vesitähed kuni 4000 m kõrgusel (joonis 2.55).

Paljude endeemiliste loomaliikide poolest tuntud Baikali järves pole ühtki ainult sellele järvele iseloomulikku veetaimeliiki.

Veetaimed seovad muda ja on väiksematele olenditele substraadiks. Veetaimi endid söövad toorelt üsna vähesed selgrootud, näiteks ehmestiivaliste ja liblikaliste vastsed, küll aga toituvad neist paljud selgroogsed (nii kalad, linnud kui ka imetajad).

**2.53.** Järv-lahnarohi (*Isoetes lacustris*, all) ja suur salviinia (*Salvinia molesta*, paremal).

**2.54.** *Rhyncholacis penicillata.*

**2.55.** Vesitäht *Callitriche heterophylla.*

## 2.4.6. Seened

Seente rakukest koosneb kitiinist, mitte tselluloosist nagu taimedel. Erinevalt taimedest seened ei fotosünteesi. Nad paljunevad nii sugutult eoste ehk spooride abil kui ka suguliselt. Kõige tuntumad ja olulisemad veeseened on tillukesed hüfomütseedid (*Hyphomycetes*; ingliskeelses kirjanduses ka *Ingoldian fungi* ehk Ingoldi seened), millest enamik kuulub kottseente (*Ascomycota*) hulka. Nende tavalised perekonnad on näiteks *Aniptodera*, *Annulatascus*, *Massarina*, *Ophioceras* ja *Pseudohalonectria*. On palju liike, mille sugulise paljunemise faasi ei tunta ja mida seetõttu enne molekulaargeneetilise analüüsi ilmumist ei õnnestunud liigitada teisiti kui kunstlikku teisseente rühma – *Deuteromycetes*. Sinna kuulusid näiteks uppunud puidul levinud perekonnad *Cancellidium*, *Dactylaria*, *Dictyosporium* ja *Helicomyces*.

Liikide arv vees on tõenäoliselt üle 2000 (tabel 2.6). Eriti palju veesiseseid seeni leidub troopilistes vetes. Pooleldi lagundatud vetikad ja suurtaimede osad ning seened ise on toiduks detriiditoidulistele selgrootutele, kes elusatele või äsja surnud taimedele eelistavad just sellist toitu. Samuti süüakse sedasi ära seente eosed, mis saavad sel teel laialt levida. Happelistes vetes on vähe seeneliike ja neil on kehvem lagundamisvõime kui tavaoludes. See tuleneb aga pigem seeni pärssiva alumiiniumi paremast lahustuvusest vees kui lihtsalt madalast pH-st. Seeni leidub vähe ka põhja- ja allikavees, kus pole neile küllalt toitu.

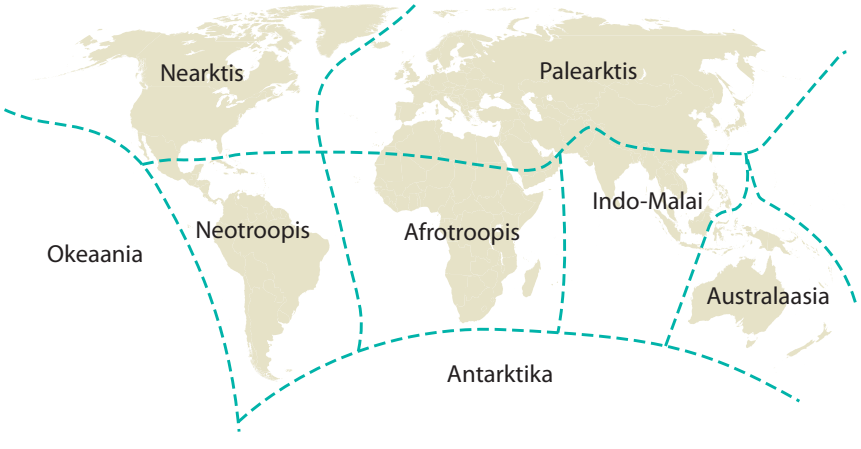
Enamik kottseeni (sh pärmid) suudab reostunud vees kasutada lihtsaid süsivesikuid, kuid nende niitjad vormid on võimelised lagundama ka tselluloosi, hemitselluloosi ja ligniini. Varem omaette elurühmaks arvatud samblikke peetakse tänapäeval üheks kottseente osaks, mille esindajad on rohevetikate või tsüanobakteritega kas sümbioosis või nende parasiidid. Mõned neist elavad sisevete perifüütonis (nt Eestistki leitud jõgi-nahksamblik; joonis 2.56).

Orgaanilisest ainest küllastunud vooluveekogusid asustav nn reoseen koosneb tegelikult peamiselt bakteritest. Varem seeneks peetud, tänapäeval protistide hõimkonda *Heterokontophyta* arvatud perekond *Saprolegnia* toitub nii kalade väljaheidetest kui ka parasiteerib kalade kehadel.

**2.56.** Jõgi-nahksamblik (*Dermatocarpon luridum*).

## 2.4.7. Loomad

Loomad on päristuumsed, hulkraksed ja liikumisvõimelised heterotroofse toitumisega organismid, kellel rakukest puudub. Tähtsamate veeloomarühmade liikide arvu hinnangud on esitatud tabelis 2.6. Kõige rohkem loomaliike (v.a selgrootud) on leitud Palearktise biogeograafilisest riikkonnast, mis hõlmab suurema osa Euraasiast ja Põhja-Aafrika (joonis 2.57). Tõenäoliselt pole suure liigirikkuse peapõhjuseks siiski mitte selle ala suur pindala, vaid uuringute ja ekspertide rohkus muude regioonidega võrreldes.




**2.57.** Maailma zoogeograafilised riikkonnad.

**KÄSNAD (PORIFERA)** Käsnad on koloonialised loomad, kes kinnituvad kõvale põhjale, taimedele või okstele. Kolooniate suurus on 1 cm – 1 m. Värvuselt on need pruunid, rohekad või kollased olenevalt nendega kooslevate vetikate liigist. Eriti tavalised on rohevetikate (*Chlorella*) liigid. Voolukiirusest ja valgusest sõltub, kas kolooniad on kasvuvormilt lamedad või sõrmjad (joonis 2.58).

Käsnade sisestruktuur koosneb kollageensest valgust ja räniokistest. Mitmerakulised organid puuduvad, kuid eristunud on siiski katterakud (epiteel), viburrakud, mis pumpavad vett läbi kanalite, ning seede- ja sugurakud. Sigimine on nii suguline kui ka sugutu (sh jagunemine ja puhkegemmulite moodustamine talveks). Käsnad on lahksugulised. Isasloomade sperma liigub veega emastesse, kelles arenevad vastsed. Need ujuvad hiljem laiali ja kinnituvad substraadile, kuni arenevad täiskasvanuks.

Käsnad taluvad hästi külma, kuuma, kuivust jm äärmuslikke tingimusi. Nad filtreerivad toiduks baktereid, vetikaid, algloomi ja peeneteralist detriiti ning suudavad mittesöödavaid osakesi eristada ja vältida.

Käsnade kolooniates elavad mõned algloomad, väheharjasussid, ümarussid, vesilestad ja putukavastsed (näiteks ehmestiivalised ja võrktiivalised). Erilist mõju see käsnadele ei avalda. Peamiste kiskjate eest kaitsevad neid okised ja mürgisus. Mõned kalad ja kahepaiksed isegi koevad käsnadesse, et vähendada oma järglaste suremust.

Enamik käsni elab meres, sisevetes on nende liike üle 200. Kõige rohkem leidub siseveekäsni – nii seisu- kui ka vooluvetes – Neotroopises (65 liiki) ja Palearktises (59). Kosmopoliitsete liikide näiteks on järvekäsn (*Spongilla lacustris*). Endeemseid sugukondi leidub Baikalis (*Lubomirskiidae*; vt lk 189) ja Kaspias (*Metschnikowiidae*) ning Aafrika suurtes järvedes (*Malawispongiidae*).

**AINUÕÕSSED (CNIDARIA)** Enamik liike elab meres. Sisevetest on teada kuni 40 liiki, keda esindavad hüdrad ja mõned väikesed meduusid. Hüdrad on sekundaarselt lihtsa ehitusega liigid, kellel on kadunud meduusistaadium. See-eest meduusidel on lihtne, kombitsateta hüdrataoline staadium säilinud. Nii hüdrad kui ka meduusid on radiaalsümmeetrilise (kiirjalt keskmest lähtuva) kehaehitusega. Enesekaitseks ja toitumiseks on neil kõrverakud ehk knidotsüüdid. Need paiskavad välja kleepuvaid ja kõrvetavaid niitjaid nematotsüste ehk knidoblaste, mis halvavad ohvri, kes seejärel tuuakse kombitsatega suhu. Mõned liigid eritavad suuava kaudu ka närvimürke. Sigimine on tavatingimustes sugutu (pungumine). Sugulisel sigimisel areneb viljastatud munast puhkevorm, mis võib taluda pikaajalist kuivust.

Hüdrade (*Hydra*) liike leidub nii vooluvetes, seisuvetes kui ka soodes. Eriti liigirikas on põhjaparasvööde. Isendi pikkus võib olla 1–20 mm, veniva toruja keha otsas on 10–12 kombitsat (joonis 2.59). Hüdrad võivad ujuda planktonis, kuid enamasti on nad kinnitunud taimedele või põhja. Nad saavad liikuda ka piki substraati vaksates. Hüdrad võivad olla sümbioosis rohevetikatega (*Chlorella*). Kuigi viimased pole neile hädavajalikud, on koos vetikatega kasv siiski kiirem. Hüdrad söövad, keda suudavad (väikesi vähke, putukaid, rõngusse). Vaenlasteks on mõned lameussid, vähid ja ripsloomad. Sugukonna *Cordylophorinae* esindajad on koloniaalsed.

Meduusidest elavad soolajärvedes näiteks perekondade *Australomedusa* ja *Moerisia* esindajad. Tuurlaste marjaterades parasiteerib omaette klassi *Polypodiozoa* perekond *Polypodium*. Parasvöötme järvedes elab meduus *Craspedacusta sowerbyi* läbimõõduga 2–2,5 cm ja asustustihedusega isegi üle 1000 isendi/m$^3$ (joonis 2.60). See liik on sage ka Põhja-Euroopas (Rootsi, Soome, Volga jõe ülemjooks). Mikroneesias ühel Belau

**2.58.** Järvekäsn (*Spongilla lacustris*).

**2.59.** Hüdrad (*Hydra* sp.).

**2.60.** Meduus *Craspedacusta sowerbii*.

saarel nimega Eil Malk elavad soolases kihistunud Ongeim'l Tketau järves merelist päritolu meduusid *Mastigias papua*. Öösel liiguvad loomad sügavamale, et süüa aerjalgseid, päeval naasevad veepinnale, et „laadida" päikesevalgusega oma sümbiontseid vaguviburvetikaid. Päevas võivad nad horisontaalselt liikuda kuni 1 km. Inimesi see liik ei kõrveta ning on seepärast populaarne turismiobjekt (joonis 2.61).

**2.61.** Meduus *Mastigias papua*.

**2.62.** Piimjas planaar (*Dendrocoelum lacteum*).

**■ LAMEUSSID (PLATYHELMINTHES) ja KÄRSSUSSID (NEMERTEA)** Lameusside hõimkonnas on kolm klassi: vabalt elavad ripsussid ehk turbellaarid (*Turbellaria*) ning parasiitsed imiussid (*Trematoda*) ja paelussid (*Cestoda*). Kõigil neil puudub pärak ja suletud soonestik, kehaõõs on ühe avaga.

Sisevete ripsussidest enamik (*ca* 300 liiki) on mikroskoopilised, ülejäänud (pikkusega 1–5 cm) moodustavad kolmehaarmeliste alamklassi (*Tricladida*). Viimaste mitteametlik nimetus on planaarid ja nad on maailmas üsna laialt levinud.

Planaaride keha on bilateraalselt ehk kahekülgselt sümmeetriline, lame, pehme ja lülistumata ning kaetud ripsmetega, mida liigutades kulgeb loom sujuvalt üle iseenda eritatud limaga kaetud substraadi (joonis 2.62). Planaarid on hermafrodiitsed ehk liitsugulised ja munevad kividele või taimedele. Mõned liigid võivad sigimiseks ka jaguneda. Nad suudavad taastada terve keha väga väikesest tükist, mida võimaldab suur spetsialiseerumata ehk tüvirakkude varu. Välimuse järgi tuleb lameusse määrata elusalt, sest muidu nende kehastruktuurid kaovad. Sageli asustavad planaarid külmaveelisi väikesi ojasid (nt *Crenobia alpina*, kelle temperatuurioptimum on +7 °C).

Kõik planaarid on kiskjad, kes orienteeruvad lõhna järgi. Nad toituvad elus või surnud selgrootutest, kuid ka surnud kaladest, kalamarjast jm. Elusaid loomi halvavad nad mürgise limaga. Suu asub kõhu all, seedimine on sageli kehaväline. Mõned (*Microstomum*) suudavad süüa isegi hüdrasid nii, et need ei saa kasutada kõrverakke, mis jäetakse seedimata. Ise on planaarid mürgised, ehkki mõned kalad neid arvatavasti toiduks tarbivad. Sugukondadel *Dalyelliidae* ja *Typhloplanidae* on leitud sümbiontseid vetikaid.

Mikroturbellaarid elavad kõikvõimalike veekogude põhjas ja vee pindkihis. Palju endeemseid liike leidub koobastes ja põhjavees.

Imi- ja paelussid on selgroogsete parasiidid, kelle vaheperemeesteks on selgrootud või väiksemad selgroogsed. Näiteks riisipõldudel elavate vereimiusside (*Schistosoma*) vaheperemeheks on teod. Tavalistest paelussidest parasiteerivad lindudes linnuroni (*Ligula intestinalis*) ja laiuss (*Diphyllobothrium latum*), kelle vaheperemeheks on kalad.

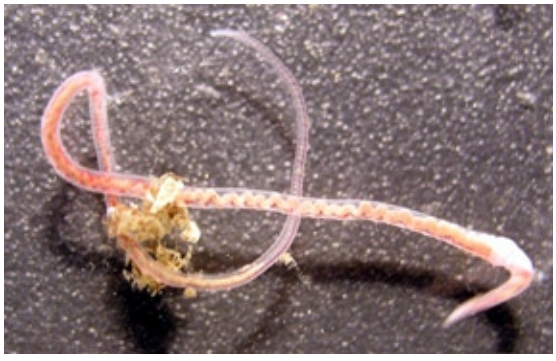
Kärssusside (*Nemertea*) hõimkond on sisevetes esindatud väheste liikidega. Eluviisilt on nad bentilised ja elavad vabalt. Nad on mõne millimeetri pikkused, pehme lülistumata kehaga. Neil on pärak ja suletud soonestik. Kärssussid toituvad väikestest põhjaselgrootutest, keda ründavad kärsa abil, või laipadest. Kärss võib olla tugevdatud nõeljate ogadega. Enamik liike on lahksugulised. Liigirikkaim perekond magevetes on *Prostoma*. *P. eilhardi* ja *P. graecense* on levinud mitmel mandril.

**■ ÜMARUSSID (NEMATODA) ja JÕHVUSSID (NEMATOMORPHA)** Ümarussid on tõenäoliselt arvukaim ja liigirikkaim loomarühm sisevete põhjasetetes. Nad on enamasti mikroskoopilised, lülistumata, saleda kehaga loomad. Hoolimata suurtest erinevustest toitumisviisis on neil suhteliselt sarnane kehaehitus. Hästi on arenenud seedekulgla (v.a parasiitsetel vormidel), kehaõõs, närvisüsteem, eritussüsteem ja lihased. Keha on tavaliselt üsna läbipaistev (joonis 2.63). Sigimine võib olla nii lahksuguline kui ka partenogeneetiline. Peale munade on neli vastsejärku. Ümarussid asustavad väga mitmesuguseid elupaiku (meri, maismaa, siseveed). Paljud neist on parasiidid, paljud elavad vabalt.

Sisevetest on teada üle 1800 liigi ümarusse, arvestamata parasiite. Eluviisilt on nad enamasti bentilised. Nad asustavad ka ekstreemseid elupaiku (kuumavee-

**2.63.** *Dorylaimida* sp.

**2.64.** Kiuduslane (*Mermithidae*).



**2.66.** Väheharjasuss harilik pehmetupp (*Potamothrix hammoniensis*).

**2.65.** Jõhvuslane (*Gordiidae*).

allikad, sulaveelombid). Ümarusside asustustihedus võib olla üle miljoni isendi ruutmeetril. Arvukaimad vabalt elavad seltsid on *Dorylaimida* ja *Mononchida* (joonis 2.63) ning arvukaim parasiitne selts *Mermithida* (joonis 2.64). Viimastel on nii munad kui ka valmikud mudas, vahepealsed staadiumid aga teistes loomades. Keha pikkus jääb enamasti vahemikku 0,2–2 mm. Kiduslaste (*Mermithidae*) ja sugukonna *Leptosomatidae* isendite pikkus võib olla märksa suurem.

Toiduks on liigist olenevalt kas detriit, sete, bakterid, vetikad, seened, veetaimed või teised loomad, sealhulgas teised ümarussid. Paljud parasiidid elavad kahetiivaliste vastsetes ja valmikutes. Üks kihulastes nugiv liik põhjustab inimestesse sattudes onkotsertsiaasi ehk jõepimedust, mida põeb 120 miljonit inimest (enamasti Aafrikas).

Jõhvussid on kõik parasiidid kas selgrootutes või selgroogsetes loomades. Sageli nakatavad nad näiteks rohutirtse, kuid ka paljusid veeputukaid. Nad pole lähedases suguluses ei ümarusside ega ühegi teise rühmaga. Magevetes esindab jõhvusse sugukond jõhvuslased (*Gordiidae*). Täiskasvanud loomad võivad olla 3 mm jämedused ja kuni 1 m pikkused, värvuselt pruunid kuni mustad (joonis 2.65). Jõhvussid sigivad suguliselt, munad satuvad peremeeslooma koos toiduga. Nad on oma eellastelt pärinud seedekulgla, kuid evolutsiooni käigus on see lakanud toimimast. Kogu eluks vajalik energia kogutakse vastseeas läbi keha välispinna. Täiskasvanud jõhvussid ei toitu.

**■ VÖÖUSSID (CLITELLATA) ja HULKHARJASUSSID (POLYCHAETA)** Need on rõngusside (*Annelida*) hõimkonda kuuluvad klassid. Vööussid on nime saanud iseloomuliku vöö järgi, mille eritistest tekib munadega kookon. Vööusside kolm alamklassi on väheharjasussid (*Oligochaeta*), kaanid (*Hirudinea*) ja vähikaanid (*Branchiobdellae*). Viimased on vähkide lõpustel elavad pisikesed parasiidid.

Kõik vööussid on usja kehaga, bilateraalselt sümmeetrilised ja ristisuunas segmentideks jagunenud. Neil on nii suu, pärak kui ka veri. Paljud liigid on liitsugulised, kuid mõned (näiteks klaasliimuklased – *Naididae*) sigivad ka jagunemise teel ja mõned partenogeneetiliselt. Vastseid neil pole.

Vee-elulised väheharjasussid elavad peamiselt põhjamudas või -liivas. Nad sarnanevad maismaal elavate vihmaussidega, kellest mõned on samuti poolveelise eluviisiga (joonis 2.66). Väheharjasussid on enamasti 1–2 mm pikkused; perekonna *Haplotaxis* niitjad esindajad küünivad 20 cm-ni. Mudaelanikel ulatub saba hingamiseks settest välja. Igal kehalülil on mitu harjast, millega hoitakse keha asendit urus. Paljud toituvad ümbritsevast settest koos bakteritega, kuid leidub ka vetikasööjaid (klaasliimuklased), kiskjaid (*Chaetogaster*) ja parasiite. Neid endid söövad paljud selgrootud ja kalad. Mõne liigi veres leidub hemoglobiini ja nad taluvad hästi hapnikupuudust (nt harilik mudatupp – *Tubifex tubifex*). Mõned on parasiitide vaheperemehed. Nelkussidega (*Caryophyllaeus*) nakatunud väheharjasusside söömine võib forellidel põhjustada pöörlemistõbe.

Liike on sisevetest teada u 1100, sh mudatuplasi (*Tubificidae*) 582. Baikali järve 192 liigist on koguni 70% endeemsed.

Kaanid (*Hirudinea*) on kiskjad, kes neelavad tervelt väiksemaid loomi või on endast suuremate loomade parasiidid. Keha on neil tugevate lihastega; sageli mitte ruljas, vaid lame. Kummaski otsas asub iminapp, harjased on kängunud. Kaanid elavad enamasti madalas soojas vees, vältides happelisi ja allikalisi veekogusid. Mõned liigid asustavad ka maismaad või suudavad seal mõnda aega edukalt ringi liikuda. Verd imevad kaanid võivad korraga palju süüa ning siis kuni kaks aastat nälgida. Vaenlasteks on kalad, linnud ja kiskjad selgrootud.

Kaanid on liitsugulised, munad asuvad kookonites. Lamekaanlastel on lõimetishoole: noored isendid paiknevad vanalooma kõhu all.

**2.67.** Harilik ahaskaan (*Erpobdella octoculata*).

**2.68.** Harjasliimukas (*Alitta succinea*).

**2.69.** Ripskõhtne *Chaetonotus bisacer*.

Liikide koguarv küünib peaaegu 500-ni. Tuntumate kaanide hulka kuulub imetajate parasiit kirjukaan (*Hirudo medicinalis*). Kultuuris kasvatatakse tegelikult hoopis tema lõunapoolset sugulasliiki apteegikaani (*H. verbana*). Muudest esindajatest võib nimetada hobukaani (*Haemopis sanguisuga*), ahaskaane (joonis 2.67) ja lamekaane (*Glossiphonia*). Amazonase liik *Haementeria ghilianii* võib kasvada rohkem kui 20 cm pikkuseks.

Hulkharjasusse on sisevetes kokku 168 liiki, enamik liike elab meres. Neil on selgelt eristunud pea ning palju harjastega ebajalgu (joonis 2.68). Mageveeliikide pikkus on ainult mõni millimeeter, meres see-eest kuni 3 m. Mõnda mageveerühma (sugukonnad *Aeolosomatidae* ja *Potamodrilidae*) peeti varem väheharjasussideks.

Riimveelisi liike (harjasliimukas, *Alitta succinea*) on viidud Kaspia ja Araali merre kalatoiduks. Ponto-Kaspia liik *Hypania invalida* on ise liikunud Kaspiast Volga jõkke ning Mustast merest Doonau jõge mööda kanalite kaudu Reini jõe vesikonda. Jaapani paloolo (*Tylorrhynchus heterochaetus*) on Jaapanis riisikahjur, kuid Lõuna-Hiinas hoopis inimtoit. *Manayunkia speciosa* on Loode-USAs lõhilaste parasiidi, algloomа *Ceratomyxa shasta* vaheperemees.

**■ RIPSKÕHTSED (GASTROTRICHA)** Need on vähe uuritud väikesed ja haprad loomad, kes võivad olla väga arvukad (10 000 – 100 000 isendit/m$^2$). Magevetest on teada üle 300 liigi. Enamik perekondi on kosmopoliitsed. Keha on kurikakujuline, kaetud plaatide või ogadega; pikkus 50–800 µm (joonis 2.69). Enamasti on tundejätketega pea selgelt eristunud. Kõige tavalisem ripskõhtsete elupaik on järvede litoraal. Nad taluvad pikka hapnikupuudust ja isegi vesiniksulfiidi olemasolu. Toituvad bakteritest, algloomadest, vetikatest ja detriidist.

**■ KERILOOMAD (ROTIFERA)** Keriloomad on järvede zooplanktonis koos algloomadega üks arvukamaid rühmi. Enamik neist on mikroskoopilised. Keha pikkus jääb vahemikku 50–2000 µm, olles enamasti 100 ja 250 µm vahel. Kuju varieerub vaasjast usjani. Kõigi keriloomade ühine tunnus on keriaparaat (*corona*): peapoolne liikumis- ja toitumiselund, mis liigutab vett ringiratast. Keriloomad suudavad tunnis filtreerida oma kehamahuga võrreldes kuni 1000 korda rohkem vett. Neil on väike aju ja silmad, samuti arenenud seedekulgla, mis koosneb lihaselisest neelust ehk mälumikust, maost, soolest ja pärakust. Mõnel võib olla ka kõhtmine liikumiselund, nn jalg koos „varvastega“. Enamik liike elab üksikisenditena, kuid leidub ka koloonialisi vorme (*Conochilus*), keda on isegi palja silmaga näha. Paljusid rühmi saab välimuse järgi määrata ainult elusalt (käitumise järgi). Nii nagu planktonivähid sooritavad ka keriloomad vertikaalseid ööpäevaseid rändeid, mis ei ulatu siiski rohkem kui mõne meetrini.

Keriloomad toituvad vetikatest, bakteritest ja väikestest ripsloomadest ning on ise toiduks suurematele loomadele. Paljud on kõigesööjad, paljud aktiivsed filtreerijad ja mõned bentilised liigid isegi varitsevad kiskjad. Näiteks *Asplanchna* perekonna liigid söövad nii teisi keriloomi, ripsloomi kui ka vetikaid. Toitumine on valikuline. Filtreerijad suudavad tarbida kuni 18 µm läbimõõduga, s.t väikeste vetikate suurusi osakesi. Mõnel liigil on pikad ogad, mõni suudab kiskjate vältimiseks kiireid hüppeid teha. Kalade toiduks on enamik keriloomi liiga väikesed, küll aga tarbivad neid pisikesed maimud.

Keriloomad asustavad kõiki vee-elupaiku, sh soolajärvi. Sisevetes elab *ca* 2000 liiki, mida on rohkemgi kui meres. Eriti meeldib keriloomadele pehmeveeliste, kergelt happeliste järvede litoraal, kuid sagedad on nad ka interstitsiaalvees. Paljud asustavad sammalde ja samblike pindmist vett, mis perioodiliselt kuivab. Sellised liigid taluvad hästi kuivamist ning elustuvad vees juba mõne minuti jooksul. Siseparasiitsete loomade rühm *Acanthocephala* (kidakärssed), mida varem peeti omaette hõimkonnaks, kuulub pärilikkusaine analüüsi põhjal samuti keriloomade hulka.

Vappkerilised (*Monogononta*) sigivad nii partenogeneetiliselt kui ka suguliselt. Suguline sigimine toimub puhketsüstide loomiseks ja on kohastumus ebasoodsate tingimuste talumiseks. Vappkeriliste liigirikkaim perekond on *Cephalodella*, mitmekesised on ka *Lecane* ja

**2.70.** Keriloom *Cephalodella* sp.

**2.71.** Labatigu (*Planorbis* sp.).

**2.72.** Ematigu (*Viviparus* sp.).

*Dicranophora*. Perekond *Brachionus* eelistab erandina karedat ja toidurikast vett. Usskerilised (*Bdelloidea*) on suurim sugulise sigimiseta loomarühm, mis on püsinud juba kümneid miljoneid aastaid (joonis 2.70).

Mõnes troopilises järves võib olla kokku kuni 250 keriloomaliiki, seega *ca* 10% kogu maailma liikidest. Ühes liitris võib olla ligikaudu 20 000 isendit.

**2.73.** Napptigu (*Ancylus fluviatilis*).

**2.74.** Õuntigu (*Pomacea canaliculata*).

■ **LIMUSED (MOLLUSCA)** Limuste pehme keha on lülistumata. See koosneb lihaselisest jalast, sisikonnast ja seda ümbritsevast õhukesest pehmest mantlist, mis eritab enda ümber lubjast koja. Hädaohu korral tõmbub kogu keha kotta, mis sulgub tugevate lihastega. Sisevetes leidub kahe klassi, tigude (*Gastropoda*) ja karpide (*Bivalvia*) esindajaid.

**Tigude** koda koosneb enamasti ühest, karpide oma kahest suurest osast (poolmest). Tigudel on pea, kombitsad ja silmad ning suus viilitaoline kraapimiselund hõõrel (*radula*). Karpidel pea puudub, neil on kaks kõrvuti asetsevat ava vee sisse- ja väljalaskmiseks ning suured lõpused. Mõnel teol on kojasuudme sulgemiseks eraldi väike kaas. Et limused vajavad koja ehitamiseks lupja, elab enamik neist karedas vees. Limused on arvukad, hästi nähtavad ja hästi säilivate kõvade kodadega loomad, mistõttu neid on juba ammu püütud kasutada keskkonnaseisundi indikaatoritena.

Tigude koda võib olla väga mitmesuguse kujuga. Sisevete teod on bentilised, asustades nii voolu- kui ka seisuveekogusid (sh soolajärvi) ja erinevaid põhjatüüpe. Pelaagilisi ega parasiitseid tigusid sisevetes pole. Mõned, näiteks suured troopilised õuntigulased (*Ampullariidae*), on poolveelised, mõned taluvad kuivamist. Hingamine toimub kas lõpuse või kopsu abil (nendel, kes elavad madalas vees ja hingavad välisõhku). Ka mõned kopsteod on võimelised kasutama vees lahustunud hapnikku. Labatigulaste (*Planorbidae*; joonis 2.71) veres leidub hemoglobiini.

Enamik tigusid on liitsugulised, viljastades üksteist vastastikku. Mõne liigi sigimine võib olla ka partenogeneetiline. Sigimine toimub olenevalt kliimast ja liigist kas pidevalt (soojades vetes) või kord aastas (parasvöötmes). Munad paigutatakse kividele, taimedele või liigikaaslaste kodadele. Ematigude (*Viviparus*; joonis 2.72) munad kooruvad vanalooma kojas ning väljuvad sealt juba väikeste tigudena. Enamik teisi perekondi, näiteks nappteod (*Ancylus*; joonis 2.73), kinnitavad munakogumikud kividele või taimedele. Kopstigude eluiga on tavaliselt üks aasta, lõpusteod võivad elada mitu aastat.

Tigude toiduks on eelistatult perifüüton, detriit, elusad taimed ja raiped. Tõrikodalaste (*Buccinidae*) seas on röövloomi. Ematigulased (*Viviparidae*) ja keeristigulased (*Bithyniidae*) võivad toituda ka hõljuvast orgaanilisest ainest. Kuni 6 cm pikkused õuntigulased (joonis 2.74) söövad peamiselt suurtaimi, samuti sammalloomi ja teiste tigude kudu.

Enamik tigusid roomab piki substraati või püsib sellel paigal. Seetõttu on teod kehvad levijad. Tigude vaenlasteks on kalad (nt Põhja-Ameerikas pisike päikeseahven – *Lepomis gibbosus* –, kelle ingliskeelne nimetus on *pumpkinseed* ehk kõrvitsaseeme) ja vähid, kes suudavad koja purustada, samuti kaanid, lameussid ja mõned putukavastsed.

Eriti liigirikkad on troopilised veekogud. Väga palju endeeme leidub Kagu-Aasias: juba ainuüksi Mekongi jões on üle 110 *Stenothyridae* ja *Pomatiopsidae* liigi. Teistest liigirikkamatest aladest võib nimetada Kongo jõge Aafrikas, Mobile'i lahte suubuvaid jõgesid Põhja-

Ameerikas (Mississippi jõest idas) ning Uruguay ja La Plata jõge Lõuna-Ameerikas. Suhteliselt vähe teoliike on Amazonase jõestikus, mis paljude muude loomarühmade poolest on maailmas esikohal. Ohtralt on neid geoloogiliselt vanades järvedes (Baikal, Ohrid, Tanganjika) ning Indoneesias Sulawesi saare järvedes. Kokku on liikide arv suurusjärgus 4000. Täpsemat hinnangut andmast takistab kirjeldajate erinev arusaam sellest, mida pidada liigiks.

Kõige edukamad levijad kuuluvad kopstigude hulka – põistigulased (*Physidae*), mudatigulased (*Lymnaeidae*) ja labatigulased (*Planorbidae*) – või on partenogeneetilised (nt torn- ja rändtigu, vastavalt *Melanoides tuberculata* ja *Potamopyrgus antipodarum*; joonis 2.75). Rändteo kodumaa on Uus-Meremaa, kuid teda leidub isegi Eesti riimvetes ja merre suubuvates ojades. Vähemalt 40 miljonit inimest kannatab parasiitsete imiusside maksa- (*Opisthorchis*) ja kopsu-kakssuulaste (*Paragonimus*) tõttu ning üle 200 miljoni inimese vereimiusside (*Schistosoma*) tõttu. Kõigile neile on mageveeteod vaheperemeesteks, peamiselt troopikas.

**Karpidel** on suured niitjate ridadena paiknevad lõpused, mis talitlevad korraga nii pumpade kui ka filtritena. Toiduks on hõljum (fütoplankton, bakterid, detriit). Mittesöödavad osakesed ümbritsetakse limaga ning väljutatakse sisselaskeava kaudu. Niisugused pseudofekaalid suurendavad märgatavalt ümbritseva põhjasette orgaanilise aine sisaldust ja on ühtlasi toiduks teistele loomaliikidele. Karpide kui filtreerijate kudedesse koguneb ka metalle ja suuremolekulilisi orgaanilisi aineid. Väga tõhusate filtreerijatena võivad karbid veekihi aineringet oluliselt muuta, eriti rändkarbid (*Dreissena*) ja korvkarbid (*Corbicula*).

Paljud karbid elavad settesse mattunult või nii, et ainult sisse- ja väljalaskeava asub vabas vees (joonis 2.76). Rändkarbid kinnituvad kobaratena kividele või üksteise külge (joonis 2.77).

Jõekarplased ja nende lähemad sugulased on lahksugulised. Sperma eritatakse otse vette, kus see jõuab emasteni. Vastsed arenevad emaste lõpustel ja peavad algul parasiteerima kaladel, kus nad moonduvad väikesteks karpideks. Nõnda saavad väheliikuvad karbid koos kaladega levida. Emased võivad väljutada 0,2–17 miljonit vastset isendi kohta aastas. Perekonna *Lampsilis* emased peibutavad kalu vastsetega täidetud mantlijätketega. Kui kala seda haarab, siis vastsed vabanevad ja need, kes pääsesid neelamisest, kinnituvad tema lõpustele. Vastseid võidakse paisata ka lihtsalt veekogu põhja või vette ujuma, et nad seal peremeeslooma leiaksid. Väikesed (2–20 mm) keraskarplased (*Sphaeriidae*) on erinevalt jõekarplastest liitsugulised ja kasvatavad oma mune kojas, kust väljuvad juba väljaarenenud karbid. Rändkarpide sperma ja munad väljutatakse vette, kus viljastatud munadest arenevad planktilised vastsed, kes laskuvad põhja ja moonduvad seal karpideks.

Jõekarplastel, kes on suutnud suureks kasvada, on vähe vaenlasi. Siiski võivad neid hävitada imetajad (ondatra, kährik, metssiga). Väikesi karpe söövad meelsasti nii kalad, linnud, vähid kui ka kaanid. Sisevete loomadest pikima elueaga on ebapärlikarplased (üle 200 aasta) ja jõekarplased (kuni 100 aastat). Muud mageveekarbid elavad enamasti vaid kuni seitse aastat.

Karbiliikide arv ulatub üle 1000, kõige rohkem on neid Põhja-Ameerikas. Väga liigirikkad on väikesed keraskarplased, keskmise suurusega korvkarplased ja suuremõõtmelised jõekarbilised (*Unioniformes*).

**2.75.** Rändtigu (*Potamopyrgus antipodarum*).

cm

**2.76.** Järvekarbid liivasel põhjal ja harilik järvekarp (*Anodonta anatina*) külgvaates (vasakul).

**2.77.** Rändkarbid (*Dreissena polymorpha*).

**2.78.** Hariliku sammallase (*Plumatella fungosa*) koloonia.

**2.79.** Loimur.

**2.80.** Vesilest (*Piona* sp.).

**■ SAMMALLOOMAD (BRYOZOA)** Need on põhja või taimedele kinnitunud ja taimi või seeni meenutavad koloonialised loomad. Kolooniad koosnevad pungumise teel tekkinud geneetiliselt identsetest loomikutest. Neist igaühel on toruke, millesse puhkeolekus või häirimise korral tõmbuda, ning ripsmelised kombitsad. Sammalloomad elavad nii seisu- kui ka vooluvetes, kuid eelistavad sooja vett. Mõni liik, näiteks tutlane (*Cristatella mucedo*), suudab mööda substraati kuigivõrd ka liikuda. *Pectinatella magnifica* suurimad kolooniad võivad kasvada 2,5 m pikkuseks.

Sammalloomad toituvad ripsmeliste kombitsatega vett filtreerides. Enamik liike elab meres; kogu maailma magevetes on ainult 88 liiki. Nad on liitsugulised, kuid sigivad enamasti sugutult, pungumise ja puhkevormide (statoblastide) abil. Suguline sigimine toimub kord aastas. Erilisi vaenlasi neil ei ole. *Fredericella sultana* ja mõned sammallased (*Plumatella repens*, *P. emarginata*) on kosmopoliitsed.

*Lophopodella carteri* toodab aineid, mis võivad olla kaladele närvimürgiks. Magevete sammalloomad on mikroskoopilise ainuõõsse limaeoslooma *Tetracapsuloides bryosalmonae* vaheperemehed. See parasiit põhjustab lõhilaste neeruhaigust. Harilik sammallane (joonis 2.78) võib soojal suvel oma kolooniatega ummistada veetorusid ja -filtreid ning kalamõrdu.

**■ LOIMURID (TARDIGRADA)** Loimurid on kosmopoliitse levikuga mikroskoopilised loomad ja ainus veeloomarühm, mis elab peamiselt sisevetes. Siiski asustavad loimurid ka maismaad ja meresetteid. Loimurite keha on bilateraalsümmeetriline ning koosneb peast ja neljast lülist, millest igaühel on paar küünistega jalgu (joonis 2.79). Pikkus on neil enamasti 250–500 µm. Sigimisviisidest on esindatud nii liitsugulisus, lahksugulisus kui ka partenogenees.

Pärisveelisi liike on ainult 62, ülejäänud elavad taimedel tilkades või veekiles, kus nendega sageli seltsivad usskerilised, ümarussid ja protistid. Veekogudes asuvad loimurid taimedel või settes, kuid mitte planktonis. Pärisveeliste perekondade hulka kuuluvad näiteks *Carphania, Dactylobiotus, Macroversum, Pseudobiotus* ja *Thermozodium*. Loimurite arvukus võib olla väga suur märjas liivas ning maismaal sammalde ja maksasammalde veetilkades. Enamik liike talub hästi kuivamist. Nad on vähesed loomad, kes suudavad asustada polaaralade järvi ja liustikke. *Richtersius coronifer* ja *Milnesium tardigradum* olid võimelised sigima isegi pärast seda, kui olid puhkevormis viibinud kümme päeva 270 kilomeetri kõrgusel kaaluta olekus ülimadalal temperatuuril intensiivses ultraviolettkiirguses.

**■ LÜLIJALGSED (ARTHROPODA)** Lülijalgseid leidub sisuliselt kõigis siseveekogudes. Nad on väliskujult kahekülgselt (bilateraalselt) sümmeetrilised, mis on tüüpiline aktiivselt liikuvatele loomadele. Keha koosneb peast, rindmikust ja tagakehast. Mõnel rühmal (ämblikulaadsed, mõned vähid) on pea ja rindmik liitunud. Lülijalgsetel on kitiinist väliskest ning jäigad lülistunud kehaosad (jalad, suised ja tundlad). Sisevetes on kolme alamhõimkonna esindajaid: (1) lõugtundlased (*Chelicerata*), kelle hulka kuuluvad ämblikulaadsed (vesilestad ja vee-elulised ämblikud), (2) vähid (*Crustacea*) ning (3) üheharused (*Uniramia*), sealhulgas hooghännalised ja putukad.

**ÄMBLIKULAADSED (*Arachnida*)** Ämblikulaadsete liigirikkaim rühm on vesilestad (*Hydrachnidia*). Tegu on kokkuleppeliselt moodustatud rühmaga, mis koosneb ühesuguse eluviisi, kuid erineva süstemaatilise kuuluvusega loomadest. Vesilestadel nagu maismaalestadelgi on pea ja tagakeha kokku kasvanud (joonis 2.80). Pea küljes on paar lõugkobijaid ja imikoonus. Jalgu on täiskasvanud loomadel neli paari. Keha on tavaliselt ümar, kuid võib olla ka lamenenud või pikenenud. Pikkus on 0,5–1,5 (0,2–10) mm.

Enamik vesilesti elab bentoses, mõned planktonis. Paljud liigid on tundlikud vee reostamise ja põhjasette segamise suhtes. Toitumiselt on valmikud peamiselt kiskjad või putukate parasiidid, kuid tuleb ette ka laipade ja detriidi söömist. Perekonna *Unionicola* esindajad elutsevad karpide kehaõõnes.

Vastsed on parasiidid, sh veeputukate valmikutel (nt surusääsklastel). Esmasele vastsestaadiumile järgneb esimene puhkestaadium (protonümf), sellele kiskjastaadium (deutonümf), siis teine puhkestaadium (tritonümf) ja lõpuks kiskjast valmik.

Putukatest ründavad vesilestad lutikalisi (sõudurlased, liuskurlased, vesiharklased), mardikalisi (ujurlased), kiililisi (vesikiillased) ning kahetiivalisi (piste- ja surusääsklased). Putukad aitavad lestadel ühtlasi levida.

Kokku on maailmas teada üle 50 sugukonna, 420 perekonna ja 6000 liigi; Lõuna- ja Põhja-Ameerikas on kummaski üle 1000 liigi. Põhjaveeliike on seejuures väga puudulikult uuritud. Kõige endeemsemad on Austraalia liigid.

Merilestlased (*Halacaridae*) on mereliste lestade sugukond, keda ei arvata ülalkirjeldatud „päris“ vesilestade hulka, kuid kellest 56 liiki elab ka magevees. Nad on bentilised ja ujumisvõimeta ning neil puudub planktiline staadium. Pikkus on enamasti alla 0,5 mm, pehme keha on eredalt värvumata. Magevetes on nad peamiselt põhjaveelised.

Ka tüüpilistest mullalestadest (*Oribatida*) elab 90 liiki magevetes, peamiselt allikates, mererannal, ajutistes vetes ning veekogude servaaladel.

Ämblikulistest (*Araneae*) on parasvöötmes levinud veeliigiks vesiämblik (joonis 2.81), kes ehitab vee alla õhumullidest pesa ja toitub väiksematest veeloomadest. Hiidämblik (*Dolomedes fimbriatus*) peab mõnikord jahti veepinnal joostes ja võib ohu korral sukelduda, kuid on siiski pigem maismaa- kui veeloom.

**VÄHID (*Crustacea*)** Vähkidel on kaks paari tundlaid ning enamik kehalülisid kannab jäsemeid. Vähid hingavad lõpustega või läbi kehapinna. Sigimine on suguline, ehkki mõnel rühmal ilmuvad isased ainult lühikeseks ajaks aastas. Mõni rühm on veekogude toiduahelas võtmekohal, näiteks vesikirbulised ja aerjalgsed järvede planktonis, kümnejalalised litoraalis ja vooluvetes. Vähkide alamhõimkonnas on kokku ligi 12 000 mageveeliiki, klassidest on sisevetes olulised neli järgmist.

**Lõpusjalgsed (*Branchiopoda*)** Tuntuim selts on vesikirbulised (*Cladocera*). Nimetus tuleb sellest, et loomad liiguvad kiirete sööstudega nagu maismaaputukad kirbud. Nad on seisu- ja ajutiste veekogude asukad pikkusega 0,2–6 (18) mm. Neil on lapik keha, üks väike liitsilm ja kukla taga kehale kinnituv tugev kest (karapaks). See on läbipaistev ja kaheosaline ning toimib emastel ka haudekambrina. Rindmikul on 4–6 paari pidevalt töötavaid peenekarvalisi jalgu, mis filtreerivad veest vetikaid, algloomi ja detriiti. Planktoniliikide tagumine tundlapaar on väga suur ja kaheharuline ning talitleb ujumiselundina (joonis 2.82).

Vesikirbulised sigivad enamasti partenogeneetiliselt, munad kooruvad karapaksi sees. Ebasoodsate tingimuste saabudes munetakse osalt diploidseid isaseid, osalt haploidseid mune, mis vajavad viljastamist. Pärast viljastamist haudekambri seinad paksenevad, moodustades sadulakujulise kambri (*ephippium*), mis kaitseb mune kuivamise eest (joonis 2.82). Nendest munadest arenevad uued partenogeneetilised emased.

Kokku on maailma sisevetest teada 620 vesikirbuliste liiki. Tuntuimad pelaagilised perekonnad on kiivrikud (*Daphnia*) ja nokikud (*Bosmina*); bentilistest lestikud (*Chydorus*). Lombikiivriku (*Daphnia pulex*) genoom on täielikult kirjeldatud. Kuni 18 mm pikkused klaasikud (*Leptodora*; joonis 2.83) söövad keriloomi,

**2.81.** Vesiämblikud (*Argyroneta aquatica*).

**2.82.** Vesikirbuline *Daphnia longispina* ja vesikirbuliste haudekamber (paremal).

**2.83.** Klaasik (*Leptodora kindtii*).

algloomi ja pisemaid kopepoode. Ise on nad toiduks kaladele. Vesikirbulised ei armasta külma vett. Neid peaaegu pole maailma sügavaimas ja veemahukaimas Baikali järves. Suures Õsõk-Köli järves Kõrgõzstanis nad puuduvad.

Händurid (*Bythotrephes*) on Euroopa edukas tulnukperekond Ameerika Suures järvistus, kus ta võistleb kalamaimudega toidu (kiivrikute) pärast. Händurid ise on pika ogalise saba tõttu enamiku kalade eest kaitstud, kuid kalureid häirib nende komme kinnituda püünisvõrkudele (joonis 2.84).

Puudukilbilised (*Anostraca*), kilbikulised (*Notostraca*) ja kodavähilised (*Conchostraca*) on kõik enamasti suuremate mõõtmetega kui vesikirbulised. Nad elavad ajutistes või soolastes veekogudes, kus kalad neid ei ohusta. Toitumiselt on nad põhiliselt filtreerijad, mõned ka kiskjad (söövad keriloomi, aerjalalisi, vesikirbulisi jt väikeloomi) või kõigesööjad. Neil on elupaigast tulenevalt kuivakindlad munad. Iga uue vihmasaju ajal elustub seejuures ainult osa munadest, säilitades nii kogu asurkonna eluvõime pikaks ajaks. Sigimistüübid on liigiti väga erinevad. Tuntumatest liikidest asustab soolavähike (*Artemia salina*; vt joonis 2.23) väga soolaseid veekogusid. Neid ja kilbikuid (*Triops*) kasvatatakse ka akvaariumides kalatoiduks ja lemmikloomadena. Kilbikute sugulased perekonnast *Lepidurus* on selles rühmas ühed tavalisemad (joonis 2.85).

Mõne sentimeetri pikkused põnguskilbilised (*Cumacea*) ja mõne millimeetri pikkused sõrgkakandilised (*Tanaidacea*) elavad peamiselt meres. 25 liiki on neid kokku teada ka sisevetest. Neist enamik elab Kaspia meres, mille vee soolsus on kuni 13 promilli.

**Aerjalgsed (*Maxillopoda*)** Aerjalgsed on peamiselt mikroskoopiliste vähkide rühm, mis sisaldab nii järvede planktoni ja bentose kui ka vooluvete, soode ja põhjavee liike. Kõige liigirikkam alamklass on aerjalalised (*Copepoda*), mis omakorda jaguneb seltsideks hormikulised, sõudikulised ja rullikulised. Magevee-aerjalalisi on kokku üle 2800 liigi. Suurim sugukond on sõudiklased (*Cyclopidae*) 800 liigiga. Baikali järves üksi elab 120 liiki aerjalalisi, suurem osa neist endeemsed, Aafrikas Tanganjika järves 69 liiki, kellest pooled on endeemsed.

Aerjalalistel on 0,2–2 (5) mm pikkune silindriline lililine keha paljude lülistunud jalgadega nii pea kui ka tagakeha küljes. Hormikuliste esimene tundlapaar on väga pikk, sõudikulistel lühike, rullikulistel väga lühike (joonis 2.86). Pea eesotsas on kõigil üks suur lihtsilm.

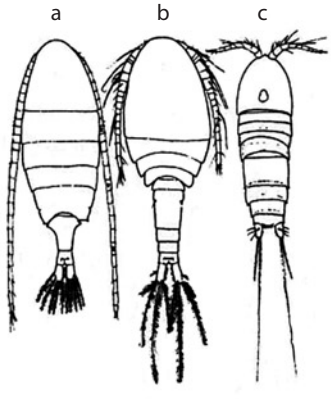
Aerjalaliste hulgas on nii detriidi-, taime- kui ka röövtoidulisi, samuti parasiite. Hormikulised on filtreerijad, rullikulised bentilised detriidisööjad, hüpetega liikuvad sõudikulised aga segatoidulised. Aerjalalised on ise toiduks paljudele muudele loomadele. Ligikaudu 330 liiki on neist kalade ja limuste parasiidid. Perekonna *Mesocyclops* liigid ründavad ajutistes vetes edukalt sääsevastseid.

Sigimine on harilikult suguline. Viljastatud munad asuvad kahes (sõudikulistel) või ühes kotis (muudel seltsidel). Neist arenevad vähikvastsed (naupliused), kelle edasises arengus on kuus staadiumi. Sellele järgneb veel kuus lisastaadiumi (kopepodiidid), millest viimane on täiskasvanud loom. Areng munast täiskasvanuni kestab temperatuurist olenevalt 10 päevast ühe kuuni. Aerjalalised võivad muneda ka püsimune, näiteks enne ebasoodsa sesooni saabumist.

Paljud aerjalalised on tulnukliigid, sealhulgas kalade parasiidid *Paraergasilus longidigitus*, *Neoergasilus japonicus*, *Lernaea cyprinacea* ja *Ergasilus sieboldi*. Tulnukad levivad veetaimede ja laevade ballastveega. Mõne perekonna esindajad (*Mesocyclops*, *Thermocyclops*) on troopikas inimese siseparasiidi, ümarusside hulka kuuluva mediina niitussi (*Dracunculus medinensis*) vaheperemehed. Ka laiussi (*Diphyllobothrium latum*) vastsed veedavad osa elust aerjalalistes.

**2.84.** Silesaba-händurid (*Bythotrephes longimanus*) võrguniidil.

**2.85.** Ajutiste lompide elanik *Lepidurus* sp.




**2.86.** Aerjalaliste alamklassid: a) hormikulised (*Calanoida*), b) sõudikulised (*Cyclopoida*), c) rullikulised (*Harpacticoida*).

**2.87.** Kalatäi (*Argulus foliaceus*).

**2.88.** Karpvähk (*Ostracoda*).

**2.90.** Jõe-kirpvähk (*Gammarus pulex*).

**2.89.** Vesikakand (*Asellus aquaticus*).

Lõpushännaliste (*Branchiura*) alamklassi kuulub 113 liiki, kellest suur osa elab Aafrikas ja Lõuna-Ameerikas. Tähtsaimad esindajad on kuni 3 cm pikkused kalade välisparasiidid kalatäilaste (*Argulidae*) sugukonnast. Eestis elab kalatäi (*Argulus foliaceus*). Ta on ümara lapiku kehaga, millel asub neli paari jalgu, kaks silma ja kaks iminappa (joonis 2.87). Paaritumine toimub kala kehal, siis lahkub emane veekogu põhja munema.

**Karpvähid (*Ostracoda*)** Karpvähid on väikesed, enamasti u 1 mm pikkused põhjaloomad, kellel on kahest jäigast poolmest (kitiinist või lubjast) koosnev koda – karapaks (joonis 2.88). Need kojad säilivad setetes väga hästi ja on paleolimnoogias indikaatoriks varasema elustiku kohta. Sisevetes elab ligi 2000 liiki karpvähke. Liigirikkaimad sugukonnad on *Cyprididae* (1000 liiki) ja *Candonidae* (550 liiki). Väga suur on endeemide osakaal. Palju liike leidub vanades järvedes, põhjavees ja Austraalia soolajärvedes. Muist elab lehekõdus või niiskes samblas, kuumades allikates, bromeelialiste taimede lehekaenaldes jm. Nad toituvad peamiselt detriidist ja vetikatest, vähesed liigid on laibasööjad või kiskjad. Sugukonna *Entocytheridae* esindajad parasiteerivad kakandite, kirpvähkide ja pärisvähkide lõpustel. Paljudel on kuivakindlad munad, mis levivad tuulega. Sigimisviisidest on esindatud nii lahksugulisus kui ka partenogenees. Hoolimata tagasihoidlikest kehamõõtmetest on karpvähkidel loomariigi suurimad isassugurakud, mis võivad looma enda kehapikkuse mitu korda ületada.

**Kõrgemad vähid (*Malacostraca*)** Neist on sisevetes olulised järgmised seltsid.

**Kakandilised** (*Isopoda*) elavad suurelt jaolt meres või maismaal, kuid tavalisi liike leidub ka magevetes üle 900. Neil on lame keha pikkusega 5–20 mm. Tüüpilist karapaksi pole, ainult pead katab tugevam kilp. Paljud asustavad põhjavett või allikaid. Hingamine toimub lõpusetaoliste pleopoodide abil. Toiduks on enamasti detriit või laibad. Kakandilised on tuntud kui lehekõdu lagundajad, kasutades seedimisel bakterite abi. Emased kannavad mune haudekambris (*marsupium*) kõhu all. Enamik liike ja paljud perekonnad on kitsalt endeemsed. See võib osalt tuleneda nende võrdlemisi kehvast liikumisvõimest.

Tavaline liik Euroopa veekogudes on harilik vesikakand (*Asellus aquaticus*; joonis 2.89). Väga palju kakandilisi elab Austraalia sise- ja põhjavetes.

**Kirpvähilised** (*Amphipoda*) on mõõtmetelt sama suured kui kakandilised – 5–15 (2–40) mm –, kuid külgedelt kokkusurutud kehaga. Karapaks neil puudub, hingamine toimub lõpustega. Eluviisilt on nad epi- ja nektobentilised. Noorjärgud asuvad samuti haudekambris nagu kakanditelgi. Erinevalt kakandilistest on kirpvähilistel sageli hästi arenenud silmad (v.a põhjaveelistel liikidel) ja nad on head ujujad. Toitumisviisilt on kirpvähilised kõigesööjad ja nad ise on kaladele tähtis toit. Kirpvähiliste arvukus võib ületada 10 000 isendit/m$^2$.

Maailma sisevetest on neid teada üle 1800 liigi. 45% kõigist mageveelistest liikidest on voolu-, külma- või põhjaveelised. Viimaste näiteks on Kesk- ja Lõuna-Euroopas sugukond *Niphargidae*, Põhja-Ameerikas *Crangonyctidae*, Austraalias *Paramelitidae*. Euroopa liigirikkaim sugukond on kirpvähklased (*Gammaridae*) 304 liigiga ning selles perekond kirpvähk (*Gammarus*) 204 liigiga (joonis 2.90). Endeeme leidub palju Lõuna-Euroopas, Ponto-Kaspia piirkonnas, Baikali järves, Lõuna-Austraalias (sh Tasmaania) ning Kagu-USAs. Mõned Siberi ja Ponto-Kaspia liigid on Euroopas sagedased tulnukad, näiteks *Gmelinoides fasciatus* Peipsi ja Laadoga järves ning *Pontogammarus robustoides* Kesk-Euroopa paljudes veekogudes. Troopikas on kirpvähklased vähem levinud.

**Lõhkjalalised** (*Mysidacea*) on õrnad, läbipaistvad ja nektobentilised või pelaagilised loomad. Nad on kiired ujujad ning toituvad enamasti zooplanktonist. Lõhkjalalistel pole õhukese kesta tõttu lõpuseid vaja. Sisevete loomad elavad sageli jahedas läbipaistvas vees. Paljud asustavad põhjavett. Järveliigid tõusevad öösiti pinna-

kihti zooplanktonit filtreerima, päevaks aga laskuvad sügavale kalade eest peitu. Pikkust on neil 3–22 mm. Kukkurloomi meenutava munakoti tõttu on lõhkjalaliste ingliskeelne nimetus *opossum shrimp*. Enamik neist elab meres, magevetes on 72 liiki. Liigirikkaimad alad on Palearktis (eriti Ponto-Kaspia) 39 ja Neotroopis 20 liigiga. Relikt-kuulmiksaba (*Mysis relicta*) elab Läänemeres ja mõnes järves, kus sügavamal leidub hapnikurikast vett. Mõni liik (*Paramysis lacustris*, *P. intermedia*) on Euroopasse tulnud Ponto-Kaspiast.

Seltsi ***Syncarida*** sugukonna *Bathynellaceae* esindajad elavad peamiselt põhjavees. Varjatud eluviisi tõttu tuntakse neid halvasti. Keha on neil silindriline, suurimad esindajad on üle 5 cm pikad. Enamik liike on värvuseta, kokku teatakse neid 240.

**Kümnejalaliste** selts (*Decapoda*) hõlmab suurimaid mageveeselgrootuid: krevette, krabisid ja pärisvähke pikkusega 15 cm ja rohkem. Enamik neist elab meres, kuid ka seisu- ja vooluvetes on kõik arvukalt esindatud. Mõned asustavad põhjavett ja isegi soid. Vähkide ja krevettide keha on silindriline ning lubjast ja kitiinist karapaksiga, mis katab vähemalt lõpusekambri. Krabiliste ja kõduhännaliste pea ja rindmik asuvad tervenisti karapaksi all, tagakeha on taandarenenud. Tugev kest kaitseb küll vaenlaste eest, kuid jääb keha kasvades perioodiliselt kitsaks ning tuleb siis välja vahetada. Iga jalapaar on spetsialiseerunud kindla ülesande täitmiseks: söömiseks, kõndimiseks, ujumiseks, hingamiseks, sigimiseks või kaitseks. Väga palju magevee vähiliike leidub Põhja-Ameerikas ja Austraalias, krabisid ja krevette aga eriti troopikas (sh Aafrikas). Kõik kolm rühma võivad olla taimekultuuride kahjurid (näiteks riisipõldudel).

Sisevete krevetid (*Caridea*) elavad nii mägiojades, põhjavetes kui ka poolsoolastes mülgastes. Nad on enamasti taim- või detriiditoidulised ja võivad suure arvukuse korral veekogu toiduvõrgustikku oluliselt mõjutada. Paljudes troopika vooluvetes (nt Puerto Rico jõgedes) elavad putukate asemel krevettide sugukonna *Atyidae* esindajad, sest putukad eelistavad jahedamat vett. Sugukonna *Palaemonidae* liikmetele meeldib aeglane vool. Kultuuris kasvatatakse eriti liiki *Macrobrachium rosenbergii* (joonis 2.91). Paljusid krevette püütakse loodusest toiduks või peetakse lemmikloomadena. Sisevete liike on teada üle 650.

**Krabiliste** (*Brachyura*) esijalad on muundunud tugevateks sõrgadeks. Krabilised on sagedad troopikas ja subtroopikas, paljud suudavad veeta pikka aega kuival. Enamasti on nad segatoidulised ning samal ajal ise selgroogsetele toiduks. Mõni liik on troopikas oluline inimtoit, mõnda peetakse lemmikloomana (nt *Pudaengon arnamicai*, *Terrapotamon abbotti*, *Demanietta khirikhan*; joonis 2.92).

Mõned krabilised on kopse kahjustava imiussi *Paragonimus* vaheperemehed; inimesed nakatuvad tooreid loomi süües. Troopilise ja Lõuna-Aafrika vooluvetes võib krabiliste biomass ületada kõigi ülejäänud bentoseliikide biomassi suurusjärgu võrra. Tavaliselt domineerib siis üksainus liik. Kõige liigirikkam on perekond *Potamonautes*. Sisevetest on kokku teada 1476 liiki.

**Kõduhännaliste** (*Anomura*) liigirikkaim sugukond on *Aeglidae* 63 liigiga. Erinevalt päriskrabidest on nende viies jalapaar kängunud. Karapaks on kuni 6 cm pikk. Kõik liigid elavad Lõuna-Ameerikas. Nad võivad Tšiili järvedes levida kuni 320 m sügavuseni ja mägedes kuni 3500 m kõrguseni. Kõduhännalised on segatoidulised, ise aga kalade, eriti forellide toit.

**Vähke** kitsas mõttes (sugukonnad *Astacidae, Cambaridae, Parastacidae*) on sisevetes 640 liiki, neist üle 80% elab Põhja-Ameerika kaguosas ja Austraalias. Euroopas on looduslikult ainult viis liiki ja Indias puuduvad nad üldse.

Vähkidel on viis paari jalgu, millest esimese moodustavad sõrad. Suur osa liike elab seisuvetes, kuid neid võib olla ka põhjavees ja isegi poolkuival. Enamasti on vähid öise eluviisiga. Suurem osa on kõigesööjad, seejuures on nad põhilised allohtoonse orgaanilise aine lagundajad ja taimesööjad (sh võimelised tarbima ka niitvetikaid). Vähkide vastseid söövad Euroopas edukalt näiteks ahven ja angerjas, täiskasvanud loomi püüavad saarmad ja inimesed. Eluiga on 2–20 aastat. Eriti vanaks elavad põhjaveeliigid, kel pole vaenlasi. Enamik on lahksugulised, kuid nii hermafrodiitsus kui ka

**2.91.** *Macrobrachium rosenbergii.*

**2.92.** *Demanietta khirikhan.*

**2.93.** Harilik jõevähk (*Astacus astacus*).

partenogenees on samuti esindatud. Sigimine toimub põhjaparasvöötmes sügisel, emane kannab mune talv läbi saba all. Pärast teist kestavahetust lahkuvad noored emase küljest.

Euroopa liikidest ohustab harilikku jõevähki (joonis 2.93) ja valgesõralist vähki (*Austropotamobius pallipes*) vähikatk, mida põhjustab parasiitseen *Aphanomyces astaci*. Ameerika tulnukas, signaalvähk *Pacifastacus leniusculus* on selle haiguse suhtes immuunne, kuid kannab teda edasi. Teised tähtsamad tulnukliigid Euroopas on *Orconectes rusticus* ja punane soovähk (*Procambarus clarkii*). Viimast kasvatatakse sageli ka kultuuris. Marmorvähk (*Procambarus fallax* f. *virginalis*) on võimeline sigima ilma isasteta ning seetõttu eriti hea levimisvõimega.

**HOOGHÄNNALISED (*Collembola*)** See on peamiselt maismaaloomade rühm, kellest mõned elavad seisuvete piiril või pinnal. Nende pikkus on 0,2–8 mm, enamasti alla 1 mm. Neil on kuus tagakehalüli, tagakeha lõpeb paljudel kaheharulise hüppeelundiga (joonis 2.94). Tiivad puuduvad. Nende kehakate ei märgu, mistõttu suurvesi annab neile hea levimisvõimaluse. Nad toituvad peenest detriidist, eluiga on mõni kuu. Paljud elavad põhjavees, lumel, jääl või mullavees. Vee-elulisi liike on 103. Hooghännalisi peeti varem primitiivseteks putukateks. Tänapäeval ühendatakse nad koos putukatega omaette üheharuste (*Uniramia*) rühmaks.

**2.94.** Hooghännaline (*Collembola*).

**PUTUKAD (*Insecta*)** Putukate keha koosneb peast, rindmikust ja tagakehast. Neil on üks paar tundlaid, liitsilmad ja sageli väga keerulised suised. Putukatel on kuus jalga (iga rindmikulüli küljes üks paar), mis koosnevad viiest osast. Et kitiinist kehakate on jäik, peavad putukad nagu vähidki perioodiliselt kestuma. Kestumiste arv oleneb liigist, ulatudes tavalisest 4–5 korrast mõnekümneni (ühepäevikulistel). Enamik veeputukaliike veedab vees suurema osa oma vastsejärgust. Valmikud tegutsevad maismaal, kus nende põhitegevuseks on sigimine ja levimine. Mõned liigid (osa lutikalisi ja mardikalisi) siiski ei lahku veest või on poolveelised. Vaegmoondega putukatel (ühepäevikulised, kevikulised, kiililised ja lutikalised) on ainult kolm arengustaadiumi: muna, vastne ja valmik. Täismoondega arenevad seltside ehmestiivalised, liblikalised, suurtiivalised, võrktiivalised, mardikalised ja kahetiivalised esindajad, kelle vastsed moonduvad enne valmikustaadiumi veel nukkudeks.

Enamik veeputukaid asustab litoraali (põhja või taimestikku madalas vees). Tüüpilised profundaali elanikud on mõned kahetiivalised: suru- ja klaasiksääsklased. Viimaste vastsed veedavad suure osa elust pelagiaalis. Neustilised rühmad on mõned lutikalised (*Gerridae*, *Veliidae*) ja mardikalistest kukriklaste valmikud.

Putukad on maailma liigirikkaim loomaklass. Sisevetes on neist mitmekesiseimad kahetiivalised (*Diptera*), mardikalised (*Coleoptera*) ja ehmestiivalised (*Trichoptera*), vastavalt 43%, 18% ja 15%-ga kokku 76 000 liigist. Muud liigirikkamad rühmad on kiililised (*Odonata*, 7%), lutikalised (*Heteroptera*, 6%), kevikulised (*Plecoptera*, 5%) ja ühepäevikulised (*Ephemeroptera*, 4%). Kõige rohkem liike on leitud Palearktisest (20%), Neotroopisest (18,5%) ja Kagu-Aasiast (18,3%).

Putukad ja vähid moodustavad veekogudes väga olulise lüli esmasproduktsiooni (mida paljud neist tarbivad) ja tippkiskjate (kalade) vahel.

**Ühepäevikulised (*Ephemeroptera*)** on kõige primitiivsema kehaehitusega ja vanim vee-putukate rühm (joonis 2.95). Enamik liike elab vooluvetes ja järvede litoraalis, mõned ka soodes või ajutistes vetes. Vastsete tüüpilisteks tunnusteks on kolm sabaniiti ja lõpused tagakehalülidel (joonis 2.96). Vastsed ronivad mööda põhja või ujuvad ringi. Enamik on detriidi- või vetikasööjad, mõned ka kiskjad (kaldapäeviklased – *Siphlonuridae*). Suuremõõtmelised (*ca* 2 cm) vastsed perekondadest *Ephemera* ja *Hexagenia* kaevavad liiva sisse urud, kus filtreerivad vett. Ühepäevikuliste eluiga parasvöötmes on 1–2 aastat, troopikas tuleb aga paljudel liikidel aasta kohta mitu põlvkonda. Vastsetel on 10–50 kestumist. Moondumiseks liiguvad vastsed pinnale ja kestuvad tiibadega eelvalmikuks (*subimago*). Eelvalmik lendab maismaale ja kestub veel korra enne valmikuks muutumist. See on putukate seas unikaalne tunnus. Valmikute lend toimub

**2.95.** Hariliku kivipäeviku (*Heptagenia sulphurea*) valmik.

**2.96.** Ühepäevikulise vastse tunnusteks on kolm sabaniiti ja lõpused tagakehal.

**2.97.** Eristiivalise kiililise hariliku läikkiili (*Somatochlora metallica*) vastne.

**2.98.** Eristiivalise kiililise hiilgekiili (*Cordulia aenea*) valmik vastsekestaga.

korraga lühikese ajavahemiku jooksul, mis peaks kindlustama, et vähemalt osal neist õnnestub sigida. Valmikud elavad mõnest tunnist mõne päevani ega toitu.

Liikide arv maailmas ületab 3000. Kehvade lendajatena on nad halvad levijad, mistõttu leidub palju endeemseid liike, näiteks Austraalias (90%), Aafrikas (77%) ja Lõuna-Ameerikas (72%).

Enamik ühepäevikuliste vastseid on keskkonnamuutuste suhtes tundlikud. Mõned taluvad looduslikult äärmuslikke tingimusi (näiteks pH < 4). Ühepäevikuliste vastsed ja valmikud on toiduks mitmesugustele vee- ja veeäärsetele loomadele (kalad, selgrootud, nahkhiired, linnud, ämblikud).

**Kiililiste (*Odonata*)** vastsed on nagu valmikudki kiskjad, seejuures enamasti varitsejad (vt 2.5.1.2). Peale selgrootute ründavad kiililised ka kulleseid ja kalamaime. Kõigile vastsetele on iseloomulik püünismask (pikk alahuul) saagi välkkiireks haaramiseks. Eristiivaliste (*Anisoptera*) alamseltsi esindajad hingavad sel teel, et pumpavad vett läbi päraku, mis on täis õhutorusid (joonis 2.97). Taolistiivaliste (*Zygoptera*) vastsetel on sabas kolm pikka lamedat lõpust, mis talitlevad kulgemisel ka sabauimedena (vt joonis 2.2). Vastsed kestuvad elu jooksul 10–15 korda. Vastseiga võib kesta mõnest nädalast seitsme aastani, ehkki tavaline eluiga on siiski 1–3 aastat.

Kaks kolmandikku kiililiikide vastseid asustab seisuveekogusid, ülejäänud on voolulembesed. Eriti leidub viimaseid Austraalias ja Malaisias. Veekogudes, kus pole kalu (nt rabalaukad), võivad kiilivastsed olla tippkiskjad. Kaks liiki taluvad isegi täiesti soolast vett mangroovisoodes, mõned elavad ka puuõõntes ja lehekaenaldes. Vastsed on enamasti kaitsevärvi (joonis 2.97), valmikud seevastu kirevad.

Liigirikkaimad sugukonnad maailmas on liidriklased (*Coenagrionidae*) ja vesikiillased (*Libellulidae*). Kokku on liike üle 5500. Liikide arv on eriti suur troopilistel saartel: Uus-Guineal, Sulawesil, Sri Lankal ja Madagaskaril. Valmikud on head lendajad (25–35 km/h). Tõenäoliselt panid vähesed kunagi Hawaii saarestikku sattunud sama liigi isendid seal aluse perekonna *Megalagrion* hilisemale rohkem kui 20 liigile. Nüüd ei asusta nad mitte ainult eri saari, vaid ka erinevaid elupaiku (vooluja seisuveekogusid, soid, rannavett). Kiililiste head levimisvõimet näitab ajutiste lompide liigi, vesikiillase *Pantala flavescens* valmikute iga-aastane sügisene ilmumine siseveteta Maldiivi saartele India ookeanis. Ränne algab 500–1000 km kauguselt Lõuna-Indiast ning kulgeb Seišelli saarte kaudu Ida-Aafrikasse. Kokku läbivad need kiilid ligikaudu 3500 km üle avamere.

**Kevikulised (*Plecoptera*)** asustavad peamiselt vooluveekogusid ja külmaveeliste järvede litoraali. Osa rühmi isegi kasvab talvel (nt talikevik – *Taeniopteryx nebulosa*). Vastsete iseloomulikuks välistunnuseks on kaks pikka sabaniiti (joonis 2.99). Lõpused on väikesed või puudu-vad. Vastsed võivad kestuda kuni 33 korda. Mõned liigid on partenogeneetilised või ovovivipaarsed.

**2.99.** Hariliku kollakeviku (*Isoperla grammatica*) vastne.

Vastsete hulgas leidub detriidisööjaid (spetsialiseeruvad sügisesele lehtede langemisele), kiskjaid (kahetiivaliste vastsetele) ja segatoidulisi. Elu jooksul võib detriidisööjast kiskja saada. Põhja-Ameerika perekonna *Pteronarcys* vastsed (eriti *P. californica*) võivad kasvada 5 cm pikkuseks ja elada mitu aastat. Vastsed ise on toiduks kaladele, lindudele ja lihatoidulistele selgrootutele. Enamik kevikuliste vastseid on inimtegevusest häirimata vooluvete indikaatorid. Samas taluvad paljud neist hästi happelist vett.

Valmikud (joonis 2.100) on üsna kehvad lendajad, seepärast on saarte vooluveed enamasti liigivaesed. Mõned valmikud söövad õietolmu, vetikaid, lehti või pungi, kuid enamik ei toitu. Sageli leidub lühitiivalisi või tiivutuid vorme. USA Tahoe järve endeemse liigi *Capnia lacustra* valmikud, kes asustavad veetaimestikku sügavamal kui 60 m, ei välju kunagi veest. Mõne liigi (nt *Zapada cinctipes*) emased valmikud suudavad jääda munemise ajal pikaks ajaks vee alla (20–60 min).

Partneri leidmiseks trummeldavad isased kevikuliste valmikud tagakehaga vastu rohukõrsi või oksi, millele emased vastavad. Tekitatavad helid on liigispetsiifilised. Kokku on teada ligi 3500 liiki, kõige rikkam piirkond on Põhja-Ameerika 650 liigiga.

**Suurtiivalised (*Megaloptera*)** Sellest seltsist elavad vees loidtiiblaste (*Sialidae*) ja *Corydalidae* sugukonna 328 liiki. Vastsed on algul detriidisööjad, hiljem kiskjad (toituvad teistest selgrootutest). Loidtiiblastel on 7–8 paari niitjaid lõpuseid ja tugevad lõuad. Nad elavad põhjasettes nii voolu- kui ka seisuvetes (joonis 2.101). Läbipaistvate sooniliste tiibadega valmikute eluiga on ligikaudu nädal ja nad ei toitu. Emased munevad vee kohal okstele, kividele vms, kust munad vette kukuvad. Sugukonna *Corydalidae* esindajad elavad kivisel põhjal või ajutistes vetes. Troopikas leidub liike, kes asustavad veega täitunud puuõõsi ja näpitslille (*Sarracenia purpurea*) õisi. Perekonna *Corydalus* vastsed võivad elada viieaastaseks ja kasvada üle 6 cm pikaks.

**Võrktiivaliste (*Neuroptera*)** seltsi kuuluvad vee-eluliste vastsetega sugukonnad suitsvõrklased (*Sisyridae*) ja *Nevrorthidae* kokku 73 liigiga. Suitsvõrklastel on pikad peened suised; nad elavad käsnades ja toituvad neist (joonis 2.102). Sugukonnast *Osmylidae* on veekogudega seotud 45 liiki. Vastsed elavad veepiiril detriidis ja mudas, kuid võivad käia vees saagijahil.

**Lutikalistest (*Heteroptera*)** elab enamik maismaal, kuid vee-elulisi liikegi on üle 4600. Neist suurem osa tegutseb vee all, ligikaudu kolmandik peamiselt veepinnal. Enamik liike on seisuveelised. Lutikaliste tüüpilisteks tunnusteks on valmikute tugevad kattetiivad (joonis 2.103), mille otsad üksteist katavad, pistmis-imemissuised ja vaegmoondega areng. See tähendab, et nende vastsed on (erinevalt mardikalistest) valmikutega välimuselt üsna sarnased. Osa vorme on tiivutud.

Lutikalised on võimelised asustama väga erinevaid elupaiku mererannast kõrgmägedeni (4700 m), millega kohastumiseks on neil väga varieeruv kehaehitus. Keha pikkus ulatub ühest millimeetrist sõudurlaste sugukonna (*Corixidae*) pisisõudurite perekonnal (*Micronecta*) 11 sentimeetrini hiidlutiklaste sugukonda (*Belostomatidae*) kuuluval perekonnal *Lethocerus*.

Mõned rühmad hingavad välisõhku, näiteks vesiharklased (*Nepidae*) tagakeha pika paarilise toruga (vt joonis 2.2), mõned võtavad õhumullid vee alla kaasa. Sõudurlastel paikneb suur õhumull tiibade all. Käres-

**2.100.** Kirjukeviku (*Perlodes dispar*) valmik.

**2.101.** Hariliku loidtiiva (*Sialis lutaria*) vastne.

**2.102.** Suitsvõrklase (*Sisyra* sp.) vastne.

**2.103.** Sõuduri (*Sigara* sp.) valmik.

tikulutikal (*Aphelocheirus aestivalis*) ja mõnel ujurlutiklasel (*Naucoridae*) moodustavad väga väikesed õhumullid mikroskoopilistel karvakestel erilise õhukihi (plastroni).

Paljudel on üks paar jalgu (keskmine või tagumine) teistest palju pikem, nii et need jalad talitlevad kulgemisel aerudena. Esijalad on röövvormidel (nt ujurlutikal *Ilyocoris cimicoides* ja vesihargil *Nepa cinerea*) kohastunud saagi haaramiseks, sõudurlastel aga detriidi sorteerimiseks.

Tüüpilised veepinnaelanikud on pikajalgsed liuskurlased (*Gerridae*; vt joonis 2.26) ja pindurlased (*Veliidae*). Vee all tegutsevad hiidlutiklased, vesiharklased, sõudurlased ja selgsõudurlased (*Notonectidae*). Viimased ujuvad tavaliselt selg alaspidi (joonis 2.104).

Enamik vee-elulisi lutikalisi on kiskjad, kelle saagiks on teised selgrootud, väikesed kalad või kullesed. Väikesed sõudurlased toituvad detriidist, vetikatest ja pisiloomadest. Veepinnavormid söövad peamiselt vette kukkunud maismaaputukaid ja ämblikke. Sageli esineb kannibalismi. Kalade puududes võivad lutikalised (eriti hiidlutiklased ja vesiharklased) olla tippkiskjad.

Eriti liigirikkad rühmad on pindurlased Neotroopises ja liuskurlased Kagu-Aasias. Euroopale iseloomulikud rannalutiklased (*Saldidae*) ja sõudurlased eelistavad pigem jahedat vett. Endeeme leidub kõige rohkem Madagaskaril, Uus-Gineal ja Indohiinas.

**Mardikaliste (*Coleoptera*)** kolmest alamseltsist on röövmardikaliste (*Adephaga*) ja *Myxophaga* hulgas suurem osa sugukondi ja liike veelise eluviisiga. Segatoiduliste (*Polyphaga*) seas on ülekaalus maismaaliigid. Ujurlased (*Dytiscidae*) ja kukriklased (*Gyrinidae*) on kiskjad, voolutaklased (*Elmidae*) perifüütoni sööjad, vesimardiklased (*Hydrophilidae*) kõigesööjad (nende vastsed aga kiskjad), kärsaklased (*Curculionidae*) ja roomardiklased (poilaste ehk *Chrysomelidae* alamsugukond *Donaciinae*) taimesööjad. Enamik teisi sugukondi on detriidi- või vetiktoidulised.

Valmikutel on tugeva väliskestaga kompaktne keha, mis koosneb peast, rindmikust ja tagakehast (joonis 2.105). Eestiivad on tugevad, paiknevad kõrvuti ja katavad puhkeolekus õrnu taga- ehk lennutiibu. Vastsete kehaehitus on valmikute omast väga erinev. Enamasti on neil tugevad lõuad, tagakeha sageli pehme (joonis 2.105). Väikseimad valmikud on alla 1 mm, suurimad üle 5 cm pikad.

Mardikaliste kehaehitus ja eluviis on väga mitmekesised. Ka kõige veelembesemas sugukonnas (ujurlased) leidub kolm täiesti kuival elavat perekonda. Samas on paljudel maismaasugukondadel vähemalt mõni veega seotud esindaja. Elupaik ei erine mitte ainult sama liigi vastsel, nukul ja valmikul, vaid võib muutuda ka vastsejärkude vahel. Mõnikord võivad isegi sama liigi eri asurkonnad elada kas vees või kuival. Sageli asustavad nad veepiirilähedasi alasid. Nukkumiseks lahkuvad kõik mardikalised (välja arvatud mõned põhjavee-elanikud) veest vähemalt mõneks tunniks.

Mardikalised eelistavad elupaigana väikesi taimerikkaid seisuveekogusid või suuremate veekogude soiseid servi. Enamik liike on bentilised. Kukriklaste valmikud ja mõned lühitiiblased asustavad meelsasti ka veepinda. Kukriklaste silmad on kaheks jagunenud, nii et kaks silma näevad üles, kaks allapoole (joonis 2.106). Mõned rühmad (osa saletaklastest – *Hydraenidae*, vesimardiklastest, jaanimardiklastest – *Lampyridae*) võivad „jalutada“ veepinna alumisel küljel, jalad ülespidi.

Välisõhu kasutamine võimaldab mardikalistel elada soode õhuvaestes veekogudes. Vooluveeliikidel (nt voolutaklaste ja saletaklaste valmikutel) on hingamiseks mikro-õhumullidest plastron, mis võimaldab neil asustada üle 10 m sügavusi piirkondi veest hingamiseks väljumata. Mõned roomardiklased ja kärsaklased elavad vee all taimedel, kus hingavad varte siseõhku. Mõned (sugukonnad *Nitidulidae* ja *Nosodendridae*)

**2.104.** Hariliku selgsõuduri (*Notonecta glauca)* valmik.

**2.105.** Hariliku kabeujuri (*Rhantus exsoletus*) vastne (ülal) ja valmik (paremal).

**2.106.** Kukriku (*Gyrinus* sp.) valmik.

elavad metsapuude vedelates lehe- ja õieeritistes, sageli koos kahetiivalistega. Maismaataimede sügavamatesse lohkudesse (lehekaenlad, õõned) kogunevad puude nõred ja vihmavesi moodustavad juba astme võrra suuremaid veekogusid, mida asustavad samuti paljud mardikalised.

Vesimardiklane *Ochthebius corrugatus* talub vee soolsust kuni 250‰. Siiski ei asusta mardikalised meresid, kuigi paljud elavad soolastes rannikutiikides. Ka suurte loomade sõnnik on eriti vesimardiklaste eelistatud elupaik. Tavaliselt loomade vedelaid ekskremente siiski veekogude hulka ei arvata.

Ehkki veekogudega seotud mardikaliste hulk moodustab kõigest 3% nende maismaa-liigirikkusest, on mardikalised 12 600 liigiga ka vees, eriti seisuvetes, üks mitmekesisemaid putukarühmi. Neist liigirikkaimad on ujurlased (üle 3900 liigi), saletaklased (1380), vesimardiklased (1800), voolutaklased (1330), varjejalglased (*Scirtidae*, 900) ja kukriklased (750). Maailma liigirikkaimad piirkonnad on Palearktis (3350), Neotroopis (2510) ja Afrotroopis (2700), seevastu Nearktises on ainult 1400 liiki.

Et röövtoidulised mardikad asustavad sääsevastsetega samu elupaiku, on mõned neist sääskede põhivaenlased. Paljud mardikalised on bioindikaatorid; näiteks heas seisundis vooluveekogusid iseloomustavad voolutaklased. Mõnda liiki kasutatakse vohavate veetaimede piiramiseks, näiteks Lõuna-Ameerika poilast *Agasicles hygrophila* kõlupea (*Alternanthera*) puhul, kärsaklasi *Cyrtobagous salviniae* salviinia puhul, *Neochetina* liike vesihüatsindi (*Eichhornia crassipes*) puhul, *Neohydronomus affinis*'t vesisalati (*Pistia stratiotes*) puhul. See-eest riisikärsakas (*Lissorhoptrus oryzophilus*; joonis 2.107) on maailma tähtsaim riisikahjur, eriti USAs Louisiana osariigis ja Jaapanis. Kahjustusi tekitavad vastsed vee all. Nad võivad toituda ka kõrrelistest ja lõikheinalistest riisipõldude lähedal, mistõttu nende hävitamine kultuurtaimedel ei vabasta põlde kahjuritest. Pealegi võib riisikärsakas sigida partenogeneetiliselt, mis märgatavalt suurendab tema võimet uusi alasid hõivata.

**Liblikaliste (*Lepidoptera*)** röövikud toituvad veetaimedest (seisuvetes) või perifüütonist (vooluvetes, nt perekond *Parargyractis*). Nad ehitavad endale lehetükkidest maju nagu ehmestiivaliste vastsedki. Vee-eluliste vastsetega liike leidub sugukondades leediklased (*Pyralidae*) ja karuslased (*Arctiidae*) kokku üle 700. Kõige rohkem on liike Kagu-Aasias ja Neotroopises.

Vesinäkkide (*Acentria*) lühitiivalised emased ei lahku veest ja munevadki vee all. Paaritumine toimub veepinnal, kui emane küünitab oma tagaosa veest välja. Kõik valmikud, kaasa arvatud isased ja lennuvõimelised emased, suudavad vee all ujuda. Ohu korral tõusevad lennuvõimelised isendid veepinnale ja põgenevad lennates. Aasias on mõned perekonna *Parapoynx* liigid riisikahjurid. Euroopas on selle perekonna esindajaks vesikarikaleedik (joonis 2.108).

**Ehmestiivalised (*Trichoptera*)** on liblikaliste sugulased ning väliselt nendega natuke sarnased, eriti valmikud. Tiibadel on karvad, mitte soomused nagu liblikalistel, siruulatus jääb vahemikku 3–100 mm (joonis 2.109). Valmikutel on ka pikad tundlad ja kobijad, kuid puudub imilont. Veekogudes on ehmestiivalised liblikalistest märksa arvukamad ja mitmekesisemad. Liikide arv maailmas ületab 12 600. Eriti liigirikkad on Kagu-Aasia, Neotroopis, Palearktis ja Austraalia. Ehmestiivalised asustavad väga erinevaid elupaiku, eriti vooluvetes. Mõned taluvad ka soolast vett, nt sugukond *Chathamiidae* mereäärsetes mõõnalompides Uus-Meremaal ja Austraalias. Mõned liigid elavad Euroopas riimvees, nt Läänemeres ja Valges meres.

Ehmestiivalised esindavad paljusid toitumistüüpe. Lõpusehmeslased (*Rhyacophila*) on kiskjad ja käppvanad (*Brachycentrus*) filtreerijad, klibuvanad (*Silo*) vetikasööjad, pisiehmeslased (*Hydroptilidae*) üksikute vetikarakkude tühjaksimejad, järvevanad (*Limnephilus*) lagunevate taimeosade närijad. Tunnelehmeslased (*Psychomyiidae*) kasvatavad vetikaid ja algloomi endale toiduks. Ehmestiivalised on ise kalade, lindude, röövselgrootute jt lihasööjate meelistoiduks.

**2.108.** Vesikarikaleediku (*Parapoynx stratiotata*) vastne.

**2.107.** Riisikärsakas (*Lissorhoptrus oryzophilus*).

**2.109.** Ehmestiivalise risuvana (*Chaetopteryx villosa*) valmik.

Kõigi ehmestiivaliste vastsed on võimelised tootma oma süljenäärmetest võrgendiniiti. Enamik neist kasutab seda kaitseotstarbeliste varjete (majade) või toitumispüüniste ehitamisel. Vastse tagakeha on enamasti pehme, pea ja rindmik see-eest kitiinkilpidega kaitstud. Tagakehal võivad asuda niitjad lõpused (joonis 2.110). Tagakeha lõpus on kaks konksjat jätket (anaaljalad), mis mõnel liigil talitlevadki neljanda jalapaarina. Maja kuju on sageli liigispetsiifiline, kuid leidub liike, kes ehitavad selle suhteliselt „vabas vormis“ olenevalt saadaolevast materjalist. Ehitusviis võib muutuda koos looma vanusega.

Enne nukkumist kestuvad vastsed 5–8 korda. Nukkumiseks koob vastne uue kesta või ehitab vastsemaja selleks ümber. Küps nukk närib ennast kestast välja, ujub kaldale või ronib taimele ja moondub seal valmikuks. Enamiku liikide valmikud ei toitu, mõned joovad siiski õienektarit. Vastsete eluiga on tavaliselt 1–2 aastat, valmikutel enamasti kuni üks kuu. Ehmestiivalised on veekogude hea seisundi tunnusrühm, sest nende vastsed on tundlikud vees lahustunud hapniku hulga suhtes.

**Kahetiivalised (*Diptera*)** on vee-eluliste putukate liigirikkaim selts rohkem kui 30 000 liigiga, mis moodustab neist ligikaudu 40%. Paljud vee-eluliste vastsetega kahetiivaliste valmikud on inimestele tüliks, näiteks sääsed, kihulased, habesääsed ja parmud. Peale vereimemise võivad nad selle käigus edasi kanda ka haigusi.

Selts on nime saanud valmikute ainsa tiivapaari järgi, sest tagatiivad on neil taandarenenud (joonis 2.111). Vastsetel pole lülistunud jalgu ning nad sarnanevad välimuselt „ussikestega“. Mõnel on selgelt eristunud kitiinkapslis pea, mõnel mitte. Kahetiivalistel on neli arengustaadiumi: muna, vastne, nukk ja valmik. Vees elavad ainult vastsed, valmikud võivad sünnikohast kaugele maismaale lennata. Lühikese elutsükli tõttu suudavad kahetiivalised edukalt asustada ajutisi veekogusid.

Paljude surusääsklaste vastsed on veres leiduva hemoglobiini tõttu punast värvi. Hemoglobiin võimaldab neil taluda hapnikupuudust ja asustada enamikule muudele loomadele sobimatuid elupaiku (näiteks järvede sügav mudane põhi).

Kahetiivalised jagunevad kaheks alamseltsiks: sääselised (*Nematocera*) ja kärbselised (*Brachycera*).

**Sääseliste** mitmekesiseim sugukond on surusääsklased (*Chironomidae*) rohkem kui 4000 liigiga, mis moodustab kõigist vee-kahetiivalistest ligikaudu kolmandiku. Eriti palju liike on troopikas. Surusääsklased asustavad kõikmõeldavaid elupaiku, levides Antarktikast (68. lõunalaiuskraad) Ellesmere'i maani Kanadas (81. põhjalaiuskraad). Himaalaja mägedes asustavad nad liustikuojasid kuni 5600 m kõrgusel, kuid võivad elada ka 60 m allpool merepinda asuvates vetes (Hövsgöli järv Mongoolias) ja kuni kilomeetrisügavuses vees (Baikali järves). Nad asustavad kuumaveeallikaid temperatuuriga kuni +38,8 °C (*Paratendipes thermophilus*) ning suudavad elustuda pärast külmumist –20 °C juures (*Diamesa mendotae* valmikud). Kõige sagedamini on neil 1–3 põlvkonda aastas, kuid eluiga võib varieeruda seitsmest päevast (*Apedilum elachistus* Brasiilia soojades kaljulompides) seitsme aastani (*Chironomus* sp. Alaska tundrajärvedes).

Vastsed on kõvakestalise pea ning usja kehaga (joonis 2.112). Nii ees- kui ka tagaotsas asub paar lühikesi ebajalgu. Vastsed hingavad läbi kehapinna. Mõned ehitavad endale torujaid varjeid, mõned punuvad varjete suu ette püünisvõrke (nt *Chironomus*, *Rheotanytarsus*). Mõne aja pärast süüakse võrk koos saagiga.

Paljud alamsugukondade *Orthocladiinae* ja *Diamesiinae* liigid on toitumistüübilt kraapijad, osa *Orthocladiinae* esindajaid ka taimesööjad või närijad. Mõni liik sööb uppunud puitu. Alamsugukonna *Tanypodinae* liigid on kiskjad. *Epoicocladius ephemerae* elab ühepäevikuliste vastsete seljas kommensaali või parasiidina, *Eukiefferiella ancyla* aga nappteo kojas. Valmikud ei toitu, neil pole suiseidki.

**2.110.** Risuvana *Chaetopteryx villosa* vastne.

**2.111.** Suure surusääse (*Chironomus plumosus*) valmik.

**2.112.** Suure surusääse (*Chironomus plumosus*) vastne.

**2.113.** Sääriksääsklase (*Tipulidae*) vastne (ülal) ja valmik (vasakul).

**2.114.** Kihulase vastse eesosa.

Surusääsklaste vastsed ja nukud on toiduks väga paljudele vee-elanikele, valmikud aga maismaakiskjatele (ämblikud, linnud, nahkhiired jpt).

Massilise lennu korral võivad surusääsklased mõjuda inimestele allergiliselt või koguni levitada haigustekitajaid. Vastsed võivad ummistada veevarustussüsteeme ja kahjustada riisikultuure. Suure liigirikkuse tõttu on surusääsklasi sageli püütud kasutada bioindikaatoritena. Üks võimalus nende taksonite kindlakstegemiseks on koguda veepinnal ujuvaid nukukesti, millest valmikud on juba välja lennanud.

Surusääsklastest veelgi liigirikkama sääriksääsklaste (*Tipulidae*) sugukonna vastsetest elavad päriselt vees siiski vähesed. Siia kuuluvad mõõtmetelt kahetiivaliste suurimad liigid (pikkus kuni 5 cm). Ka valmikud on suured ja pikajalgsed (joonis 2.113). Nad toituvad taimedetriidist, vetikatest ja seentest, mõned sammaldest. Leidub ka kiskjaid. Mõned hingavad läbi kehapinna, mõned tulevad hingamiseks veepinnale. Elupaigad võivad olla väga erinevad, sageli on nendeks väikesed veekogud (allikad, ojad, puuõõned, bromeelialiste ja liilialiste lehekaenlad). *Tipula aino* vastsed kahjustavad Jaapanis riisitõusmeid.

Nii nagu seisuvetes surusääsklased on vooluvetes kihulaste (*Simuliidae*) vastsed aineringes suure arvukuse tõttu üks võtmerühmi, mõjutades nii peeneteralise kui ka lahustunud orgaanilise aine transporti ja olles ise kiskjate toiduks. Nad on levinud peaaegu kõikjal, kus leidub vooluveekogusid. Liike on teada ligikaudu 2000, liigirikkus on suurim parasvöötmes. Vastsetel on vorstjas keha ning tugeva kestaga pea, mille kummalgi küljel on üks suur lehvik (muundunud tundel) ja kolm väikest lehvikut vee filtreerimiseks (joonis 2.114). Keha eesotsas on paaritu ebajalg ning tagaotsas iminapaks muundunud ebajalg.

Vastsete asustustihedus võib soodsates tingimustes ulatuda suurusjärgus miljoni isendini ruutmeetril. Selline hulk annab toitumisvõimaluse paljudele kihulaste vaenlastele (nt röövtoidulised kevikulised, ehmestiivalised ja kalad). Et kihulaste seedimistõhusus on väike, toodavad nad hiigelkoguses ekskremente, millest toituvad paljud teised selgrootud, kaasa arvatud nad ise. Nõnda muudavad kihulased muudele loomadele kättesaadavaks rohket vees hõljuvat või lahustunud orgaanilist ainet, mis muidu kanduks veevooluga minema.

Enne nukkumist koob vastne jäiga, tahapoole aheneva nukukesta. Nukul on kaks suurt harunevat lõpust. Valmikud on väikesed, jässaka keha ning sigarikujuliste tundlatega. Kõik valmikud tarbivad suhkruid (õie- või lehenestet). Enamiku liikide emased toituvad peale selle veel püsisoojaste selgroogsete (mõned ka inimeste) verest, mida on tarvis munade arenguks. Kihulaste massilised rünnakud põhjustavad nii mets- kui ka koduloomade ja -lindude haigusi ja surma nii otseselt kui kaudselt, takistades paljudes piirkondades ka inimtegevust. Troopika kihulased (Aafrikas eeskätt *Simulium damnosum*) kannavad edasi nematoode *Onchocerca volvulus*, kes tekitavad inimestel „jõepimedust“. Põhja-Ameerikas kahjustavad kihulased kalkunikasvatust lindudel parasiteerivate ainuraksete *Leucocytozoon* kaudu. Paljud liigid ründavad kariloomi (veised, hobused, lambad, sead), kes võivad surra ainuüksi vereimemisega kaasneva mürgituse tagajärjel. Ka turism on paljudes piirkondades häiritud just kihulaste tõttu.

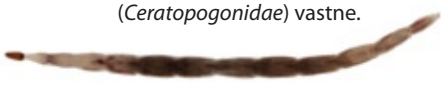
Kihulaste tõrjeks kasutatakse nüüdisajal keemiliste mürkide asemel neile surmavat bakterit *Bacillus thuringiensis* var. *israelensis*, kes on enamikule muudele veeelanikele ja inimestele ohutu.

Pistesääsklasi (*Culicidae*) on teada ligi 3500 liiki. Suurem osa neist (3000) kuulub laulusääsklaste (*Culicinae*), ülejäänud hallasääsklaste (*Anophelinae*) hulka. Tavalised perekonnad on metsasääsed (*Aedes*), laulusääsed (*Culex*) ja hallasääsed (*Anopheles*).

Vastsed elavad mitmesugustes väikestes seisuveekogudes või suuremate veekogude taimerohketes servades, kus nad on kaitstud kalade eest. Nad ei põlga ära kunstlikke veekogusid ega isegi anumaid. Vastsed on kõvakestalise pea ja pehme kehaga (joonis 2.115). Hingamas käivad nad veepinnal või kasutavad taimevartes sisalduvat õhku. Enamik toitub vett filtreerides. Mõned perekonnad (*Toxorhynchites*, *Lutzia*) on spetsialiseerunud teiste sääsevastsete söömisele, kuigi varases nooru-

**2.115.** Pistesääsklase (*Culicidae*) vastne.

**2.117.** Kibuna (*Chrysops*) vastne.




**2.116.** Habesääsklase (*Ceratopogonidae*) vastne.

ses on nemadki veel filtreerijad.

Nukud ujuvad, kuid ei toitu. Isased valmikud joovad õite nektarit, emased vajavad munade küpsemiseks teiste loomade, enamasti püsisoojaste selgroogsete verd. Leidub liike, kes ründavad isegi kalade veest väljas olevaid kehaosi, kahepaikseid ja teisi putukaid. Inimesi häirivad kõige rohkem perekondade *Anopheles*, *Aedes*, *Culex*, *Theobaldia* ja *Mansonia* emased. Ohvri leidmiseks kasutavad nad nii nägemist, haistmist kui ka soojataju.

Pistesääsklased kannavad verd imedes oma süljega edasi ohtlikke haigusi. Malaariat tekitavad protistid perekonnast *Plasmodium*, keda levitavad hallasääsed ja kes parasiteerivad erütrotsüütides. Troopilised metsasääskede liigid (*Aedes aegypti*, *A. albopictus*) levitavad paljusid viirushaigusi. Elefantiaasi (naha ja nahaaluste kudede paksenemine) põhjuseks on pistesääsklaste levitatavad nematoodid *Wuchereria bancrofti*, *Brugia malayi* ja *B. timori*.

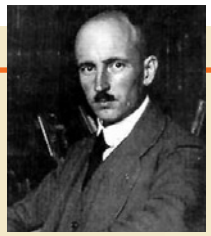
Klaasiksääsklased (*Chaoboridae*) on väike rühm (50 liiki) sääski, kelle vastsetel on omapäraseid kohastumusi eluks pelagiaalis (Wagner jt 2008). Läbipaistva keha kummaski otsas on paariline õhupõis (vt joonis 2.20). Enamiku liikide vastsed toituvad avavees väikestest selgrootutest ja/või vetikatest. Järvedes sooritavad nad ööpäevaseid vertikaalseid rändeid (õhtul pinna lähedale, hommikul põhja), et uuendada õhuvaru, toituda ja vältida vaenlasi. Mõni perekond (*Mochlonyx*, *Cryophila*) asustab väikeveekogusid. Valmikud ei toitu.

Habesääsklasi (*Ceratopogonidae*) on ligikaudu 6000 liiki. Suurem osa nende vastseid elab niiskes mullas, detriidis või sõnnikus, veekogusid asustavad vaid mõne perekonna vastsed. Vee-elulised vastsed on iseloomuliku peene, teravaotsalise ja jäiga kehaga (joonis 2.116). Valmikud on tillukesed ja sääseliste kohta võrdlemisi jässakad. Nelja perekonna emased valmikud on selgroogsete, ülejäänud 99 perekonna emased aga hoopis teiste putukate vereimejad. Välise sarnasuse, kuid peamiselt väikeste mõõtmete tõttu aetakse habesääsklaste valmikuid sageli segi kihulaste valmikutega, kelle vastsed saavad elada ainult vooluvetes.

**Kärbseliste** (*Brachycera*) hulgas on vee-elanikke palju vähem kui sääseliste seas. Nende tuntuim sugukond on parmlased (*Tabanidae*), kellest veekogude põhjas elavad kibunate vastsed (joonis 2.117). Mõne sirelase (*Syrphidae*, perekond *Eristalis*) vastsed elavad anaeroobses mudas ja hingavad välisõhku pika toru kaudu. Sirelaste ja enamiku ogakärblaste (*Stratiomyidae*) vastsed eelistavad väikesi seisuveekogusid. Sookärblaste (*Ephydridae*) vastsed võivad massiliselt asustada muudele loomadele kõlbmatuid veekogusid, nagu kuumaveeallikad ja soolajärved. Voolukärblased (*Athericidae*, perekond *Atherix*) ja päriskärblased (*Muscidae*, perekond *Limnophora*) eelistavad vooluvett.

**Kiletiivaliste (*Hymenoptera*)** 150 veega seotud liiki on kõik parasiidid. Näiteks võib tuua kivivanalaste (*Goeridae*) vastsetel nugiva liigi *Agriotypus armatus*.

Troopilistel veetaimedel elab ligi 200 liiki **sihktiivalisi (*Orthoptera*)**, kes munevad vee alla ja kelle vastsed on vee-elulised.



## AUGUST THIENEMANN

August Friedrich Thienemann (1882–1960) oli aastaid Euroopa tunnustatuim mageveeökoloog. Ta juhtis 40 aasta jooksul Saksamaal Plönis asunud Max Plancki limnoloogiainstituuti ning oli ajakirja *Archiv für Hydrobiologie* peatoimetaja. Eriti huvitus ta surusääsklastest ja võrdlevast limnoloogiast.

Koos Rootsi limnoloogi Einar Naumanniga asutas Thienemann 1922. a Rahvusvahelise Limnoloogiaühingu (*Societas Internationalis Limnologiae*). Tänini tegutsev ühing annab välja ajakirja *Fundamental and Applied Limnology* ning kolmeaastase vahega peetava kongressi materjale *Inland Waters*.

Thienemann ja Naumann arendasid koos välja parasvöötme järvede tüpoloogia. 1928–1929 töötasid nad 10 kuu jooksul Sunda saarte veekogudel. Kogutud materjal, mida aitasid määrata 100 spetsialisti, sisaldas 1100 uut liiki. Saadud info aitas paremini tõlgendada järvede talitlemist soojas kliimas.

Thienemann tegi järvede kohta kolm olulist ökoloogilist üldistust:

1) mida mitmekesisem on elupaik, seda suurem on liigirikkus;
2) mida rohkem erineb elupaik optimaalsest, seda vähem liike teda asustab, kuid seda suurem on olemasolevate liikide asustustihedus;
3) mida kauem on elupaik püsinud samades tingimustes, seda rikkam ja stabiilsem on tema elustik.

■ **KEELIKLOOMAD (CHORDATA)** Selle hõimkonna **selgroogsete** (*Vertebrata*) alamhõimkonnas on siseveekogusid asustavaid liike üle 18 000 seitsmest klassist. Silme, kõhrkalu ja luukalu käsitletakse sageli koos ühise nimetuse all „kalad“, lähtudes nende vee-eluviisist ning sarnasest suurusest ja kehakujust, mis erineb ülejäänud selgroogsete omast.

**SILMUD (*Cephalaspidomorphi*)** Silmude kehas pole luukudet, puuduvad paarisuimed ja lõuad (joonis 2.118). Suu on lehterjas, selles ja keelel leidub palju sarvhambaid. Keha kummalgi küljel on seitse lõpusekotti. Silmude vastsed asustavad vooluvete aeglasevoolulisi lõike, kus toituvad vett filtreerides. Kõik silmud sigivad magevees, kuid nende seas leidub ka suuri siirde-eluviisiga mereliike. Paljud liigid on täiskasvanult parasiitse eluviisiga, toitudes kalade verest ja lihast. Nad võivad kasvada kuni meetripikkuseks. Väikesed paiksed liigid (näiteks ojasilm) ei toitu täiskasvanuna üldse. Kokku teatakse maailmas 40 liiki.

**KÕHRKALAD (*Chondrichthyes*)** Kõhrkaladel ja kõigil teistel siseveteselgroogsetel (peale silmude) on lõuaaparaat ning paarilised jäsemed. Neil on kõhrene sisetoes, hambakujuliste soomustega kaetud nahk ja 5–7 paari lõpusepilusid. Lõpuselehed on plaatjad ja kogu pikkuses lõpusekaartele kinnitunud.

Enamik liike elab meres, mageveest on teada ainult 28 liiki. Hailaadsetest (*Selachomorpha*) on troopika soojades rannavetes ja jõgedes levinud tömpnina-hallhai (*Carcharhinus leucas*, joonis 2.119). Üks selle liigi asurkond (Nicaragua järves) ei lasku kunagi merre. Jõehaid (*Glyphis*) elavad Aasia ja Austraalia soojades jõgedes ning riimvees. Lameda kehaga railaadsetest (*Batomorpha*) asustavad Lõuna- ja Kesk-Ameerika Atlandi ookeani poolseid jõgesid mürgiste sabaasteldega jõerailased (*Potamotrygonidae*; joonis 2.120).

**LUUKALAD (*Osteichthyes*)** Erinevalt kõhrkaladest leidub luukalade toeses luukudet. Neil on ujupõis ning lõpusekoobas on kaetud luise kaanega. Lõpuselehed ripuvad lõpusekaarte küljes vabalt. Keha on kaetud plaatjate soomustega või paljas.

Luukalad on mage- ja riimveeselgroogsete liigirikkaim klass, kuhu kuulub üle 15 000 liigi. Meredes leidub küll veelgi rohkem kalaliike (ligikaudu 16 000), kuid merede pindala ületab sisevete oma 70 korda. Kui magevetest on leitud 170, siis riimvetest ainult kuue sugukonna esindajaid.

Kõige liigirikkamad seltsid sisevetes on ahvenalised (*Perciformes*), karpkalalised (*Cypriniformes*) ja sägalised (*Siluriformes*), igaühes üle 2000 liigi. Haratsiinilisi (*Characiformes*) on 1300 liiki, enamik neist Lõuna-Ameerikas; hammaskarbilisi (*Cyprinodontiformes*) üle 400 liigi. Populaarseid söögikalu lõhelisi (*Salmoniformes*) on koos siirdekaladega kokku kõigest 132 liiki, heeringalisi (*Clupeiformes*) 80, tindilisi (*Osmeriformes*) 71, angerjalisi (*Anguilliformes*) 26 ja haugilisi (*Esociformes*) 10 liiki.

Eriti palju kalaliike (8000) leidub Lõuna- ja Kesk-Ameerikas (25% kõigist maailma kalaliikidest), sealhulgas Amazonase jões endas vähemalt 2000. Aafrikas on Kongo jõest leitud 690 liiki, Nigeri jõest 211. Aasias on kõige liigirikkamad Mekongi jõgi ning Kalimantani ja Sumatra saare jõed. Suur liigirikkus iseloomustab vanu järvi (Baikal, Victoria, Tanganjika). Otse merre suubuvates ja saarte jõgedes võib olla palju mereliike (nt Puerto Rico vooluveed, kus õigeid mageveekalu polegi).

Luukalad on toiduahelates nektoni tähtsaim eluvorm. Osa liike (näiteks võldas ja trulling) on seejuures peamiselt bentilised. Maismaal kalu ei leidu, ehkki mõned neist, näiteks kopskalalaadsed (*Dipnoi*) ja kogred (*Carassius*), võivad ajutise kuiva aja edukalt üle elada.

Sisevete luukalade pikkus ulatub 8 millimeetrist (*Paedocypris progenetica* Sumatra saare soos, maailma

**2.118.** Ojasilm (*Lampetra planeri*).

**2.119.** Tömpnina-hallhai (*Carcharhinus leucas*).

**2.120.** Paabusilm-jõerai (*Potamotrygon motoro*).

**2.121.** Lõuna-Ameerika kalur püütud arapaimadega.

**2.122.** Mudillane *Sicydium plumieri*.

väikseim selgroogne) 5,6 meetrini (kaluuga – *Huso dauricus* – Amuuri jõgikonnas).

Enamik luukalu hingab vees lahustunud hapnikku lõpustega. Kopskalalaadsetel on peale lõpuste ka kopsud, millega nad saavad omastada õhuhapnikku. Elektriangerja suuõõnes on veresoonterikas kude, mis võimaldab ja ühtlasi sunnib teda õhuhapnikku hingama vähemalt korra 15 minuti jooksul. Kui see võimalus kaob, siis kala upub. Sama „häda" vaevab maailma suurimat mageveekala arapaimat (*Arapaima gigas*; joonis 2.121).

Luukalade tüüpiline kehakuju on voolujooneline. Enamikul rühmadel on soomused, kuid näiteks sägalistel ja angerjalistel mitte. Kiskjatel sõltub kehakuju toitumistüübist: jälitajad (lõhilased, zooplanktontoidulised karplased) on voolujoonelised, varitsejad seevastu pika keha ja suure sabauimega (hauglased, sägalased). Aeglaste ohvrite püüdjad taimestikus on kõrge keha ja hästi arenenud rinnauimedega, näiteks sinilõpuseline päikeseahven (*Lepomis macrochirus*) ja harilik ahven.

Paljud on segatoidulised või muudavad toidutüüpi elu jooksul. Näiteks ahven sööb algul zooplanktonit, siis zoobentost ja lõpuks teisi kalu. Avaveekalade suu on üla- või keskseisune, põhjakaladel alaseisune. Filtreerijatel on pikad lõpuseniidid, limusesööjatel tugevad neeluhambad. Esindatud on kõikmõeldavad toitumistüübid, muu hulgas suurtaimede sööjad, nagu valgeamuur (*Ctenopharyngodon idella*), ja teistel kaladel parasiteerivad parasiitsägalased (*Trichomycteridae*). Kalu endid söövad teised kalad, selgrootud, imetajad, linnud ja kahepaiksed; neil parasiteerivad paljud selgrootud.

Kalad kasvavad eluaeg, ehkki kasv vananedes aeglustub. Enamik liike on lahksugulised. Niisk ja mari koetakse vette, kus nad segunevad. Kudemine toimub kas otse vette või selleks ettevalmistatud pessa (näiteks lõhilased ja ogalikud). Mõni rühm sooritab väga pikki kudemisrändeid kas merest vooluvetesse (näiteks silmud, lõhilased) või vastupidi (angerlased).

Troopiline mudillane *Sicydium plumieri* suudab jugadest ja paisudest iminapa ja suu abil vastuvoolu üles ronida (joonis 2.122). Ka euroopa angerja maimud on võimelised isegi inimeste ehitatud paise ületama.

Klassikaline on Euroopa jõgede rajoneerimine ülalt allavoolu kalade tunnusliikide järgi: forell → harjus → pardkala → latikas. Kalad on ka veekogude seisundi bioindikaatorid nii voolu- kui seisuvetes. Väga paljusid kalu kasvatatakse kultuuris (eriti on see levinud Hiinas) ning akvaariumides lemmikloomadena.

**KAHEPAIKSED (*Amphibia*)** Kahepaikseid on teada üle 4100 liigi. Enamik neist on veekogudega seotud vähemalt vastsejärgus. Vähestel elavad pidevalt vees ka täiskasvanud loomad (joonis 2.123).

**2.123.** Rohelised konnad (*Rana* sp.).

Suurema osa neist moodustavad päriskonnalised (*Anura*), palju vähem on sabakonnalisi (*Caudata*) ja siugkonnalisi (*Apoda*). Kehvade levijatena on kahepaiksetel palju endeeme. Liigirikkaimad alad on Neotroopis, Kagu-Aasia ja Afrotroopis. Hiina ja Jaapani vooluvetes elavad hiidsalamandrid (*Andrias davidianus*, *A. japonicus*) võivad kasvada kuni 1,5 m pikkuseks.

Enamik kahepaikseid on seotud seisuvetega. Nii päris- kui sabakonnaliste seas leidub siiski ka vooluveeliike, näiteks händkonn (*Ascaphus truei*) ja hellbender (*Cryptobranchus alleganiensis*) Põhja-Ameerikas.

Maismaavormid võivad ebasoodsates tingimustes üle minna täielikule vee-eluviisile: väga kuivades piirkondades või tundras näiteks rabakonn (*Rana arvalis*).

Kahepaiksete vastsed hingavad naha ja lõpustega, vanaloomad naha ja kopsudega. Sigimiseks kogunevad isased madalasse vette, kus peibutavad emaseid liigispetsiifilise lauluga. Emased munevad veetaimedele või otse vette.

Päriskonnaliste vastsed (kullesed) filtreerivad toiduks detriiti ja vetikaid. Täiskasvanud on kõik kiskjad. Kullestel pole jalgu, kuid on saba ja lõpused. Sabakonnade vastsetel on jalad nagu vanaloomadelgi ja ühtlasi on nad algusest peale vanaloomade kombel loomtoidulised. Paljude liikide kullesed ei oska röövkalade eest hoiduda. Seepärast on nad kas mürgised (näiteks kärnkonnade kullesed) või asustavad väikesi veekogusid, kus pole kalu. Siiski ründavad neid sealgi näiteks kiililiste, selgsõudurlaste ja ujurlaste vastsed. Vanaloomad toituvad selgrootutest või teistest konnadest. Täiskasvanud kahepaikseid söövad kalad, teised kahepaiksed, roomajad, linnud ja imetajad.

Rikas kahepaiksete fauna on inimesest rikkumata veekogude tunnus.

**ROOMAJAD (*Reptilia*)** Roomajatest elab enamik kuival maal. Ka veega seotud loomad hingavad atmosfääriõhku ega mune vette, ehkki võivad seal veeta suure osa elust. Tähtsamaid veeroomajaid on 500 liiki ning nad kuuluvad krokodilliliste (*Crocodylia*), soomuseliste (*Squamata*) ja kilpkonnaliste (*Testudines*) seltsi.

Krokodillilisi on 24 liiki. Krokodillid (*Crocodylus*) ja alligaatorid (*Alligator*) on kiskjad, kes noorelt söövad selgrootuid, hiljem kalu, krokodillid ka imetajaid. Niiluse krokodill (*C. niloticus*) võib kasvada 6 m pikkuseks, 750 kg raskuseks ja elada 100 aastat vanaks. Kaimanid toituvad kaladest (joonis 2.124). Kõik nad sõltuvad veest ka seepärast, et ainult seal saavad nad paarituda. Kuivamisohus jõgedes kaevavad krokodillilised endale jõesängi süvendeid, kus vesi säilib. Sealsamas saavad kuiva aja mööda saata ka väiksemad loomad.

Soomuselistest toituvad vee-elulised maod (*Serpentes*) samuti selgrootutest ja kaladest, kuid ka kahepaiksetest. Neist 153 on mageveeliigid. Eriti liigirikkad on Kagu-Aasia ja Neotroopis. Lõuna-Ameerikas elav hiidanakonda (*Eunectes murinus*) on üks maailma suurimaid madusid (eri andmetel 8–11 m pikkune ja 100 kg raskune), kes võib vee alla jääda kuni 1,5 tunniks. Ta kütib veekogu äärde jooma tulnud imetajaid ja veelinde, veekilpkonni ja noori kaimaneid. Nastik (*Natrix natrix*) asustab ka Euroopa veekogusid. Hiinas kasutatakse toiduks liiki *Sinonatrix annularis* (joonis 2.125) ning perekondade *Enhydris* ja *Homalopsis* esindajaid.

Troopikas elab ka üle 70 liigi sisalikulisi (*Lacertilia*), kes on suuresti veega seotud. Lõuna-Ameerika basiliskide (*Basiliscus*) tagajalgade välispinnal on soomusjas ääris, mis võimaldab neil kahel jalal üle veepinna joosta.

Kilpkonnade (*Chelonii*) veeasukad, keda leidub kokku 250 liiki, on kõigesööjad. Eriti liigirikkad on Põhja-Ameerika kaguosa ja Kagu-Aasia. Põhja-Ameerikas on laialt levinud näiteks kaimankilpkonn (*Chelydra serpentina*). Kondorkilpkonn (*Macrochelys temminckii*) võib Texase ja Florida veekogudes kasvada rohkem kui 100 kg raskuseks. Lõuna- ja Kesk-Euroopas elab kuni 30 cm pikkune sookilpkonn (joonis 2.126). Kilpkonnad on tundlikud keskkonnamuutuste, kogumise ja küttimise suhtes. Paljusid vee-kilpkonni kasvatatakse liha või kilpide saamiseks.

**2.124.** Tõmmukaiman (*Melanosuchus niger*).

**2.125.** *Sinonatrix annularis.*

**2.126.** Sookilpkonn (*Emys orbicularis*).

**2.128.** Must-toonekurg (*Ciconia nigra*).

**2.127.** Punakurk-kaur (*Gavia stellata*).

**2.129.** Hüüp (*Botaurus stellaris*).

**LINNUD (*Aves*)** Lindudest on sisevetega seotud ligikaudu 5% nende liikide koguarvust, mis teeb kokku üle 550. Ehkki linnud hingavad välisõhku ega mune vette, on neist paljud siiski veekogudega vältimatult seotud. Suur hulk liike toitub ja/või pesitseb vees või selle lähedal ning moodustab märkimisväärse osa toiduahelast, hõlmates ka tippkiskjaid. Lennu- ja ujumisvõime lubavad neil kiiresti ühest veekogust teise liikuda. Lindude kehale kleepunud väiksemad vee-elanikud saavad koos nendega levida. Lindude massiline ränne võib väiksemaid veekogusid kiiresti ja tugevalt mõjutada, muu hulgas taimede ja selgrootute söömise ning vette roojamise kaudu. Näiteks toituvad arvukad haneliste hulka kuuluvad rändlinnud valdavalt maismaal, kuid ööbivad veekogudel, jättes sinna oma ainevahetusjäägid. Taimi, detriiti ja selgrootuid söövad pardid ja haned; kalu kotkad, kalakotkad, jäälinnud ja kajakalised. Veeputukate valmikuid söövad ka paljud need linnud, kes polegi veelulised. Vesipapp (*Cinclus cinclus*) ja mõned pardid (nt kirjuvart) otsivad toitu kärestikel sukeldudes).

Kaladest toituvad kaurilised (*Gaviiformes*; joonis 2.127) ja pütilised (*Podicipediformes*) veedavad vees suurema osa ajast. Pütilistel on isegi pesad ujuvad.

Pelikanilistest (*Pelecaniformes*) on kõige „veelisemad“ kormoranid (*Phalacrocorax*) ja madukaelad (*Anhinga*). Toonekurelistest (*Ciconiiformes*) toituvad madalas vees näiteks must-toonekurg (*Ciconia nigra*; joonis 2.128), haigrud (*Ardea*) ja iibised (*Platalea*), kes söövad kalu, vähke ja konni. Soolajärvedes söövad selgrootuid ja vetikaid flamingolised (*Phoenicopteriformes*).

Liigirikas selts on hanelised (*Anseriformes*), kelle hulka kuuluvad pardid, haned ja luiged. Nad söövad nii taimi, selgrootuid kui ka kalu (nt kosklad). Paljud neist on ühtlasi head lendajad.

Pistrikulistest (*Falconiformes*) on täiesti või osaliselt kalatoidulised näiteks kalakotkas (*Pandion haliaetus*), merikotkas (*Haliaeetus albicilla*) ja USA vapilind valgepea-merikotkas (*H. leucocephalus*).

Kurelistest (*Gruiformes*) tegutsevad kaldataimestikus ruiklased (*Rallidae*), näiteks rooruik (*Rallus aquaticus*), lauk (*Fulica atra*) ja hüüp (*Botaurus stellaris*; joonis 2.129). Nad on kõigesööjad.

Kurvitsalistest (*Charadriiformes*) elavad paljud kalatoidulised kajakad ja tiirud mere ligidal, kuid tegutsevad ka magevetes. Pikanokalised kahlajad hoiduvad riimvetesse ja soolajärvedesse, näiteks tildrid (*Tringa*), naaskelnokk (*Recurvirostra avosetta*) ja karkjalad (*Himantopus*). Väiksemad kajakalised, nagu mustviires (*Chlidonias nigra*) ja väikekajakas (*Larus minutus*), söövad veeputukate valmikuid. Troopilised jakaanalased (*Jacanidae*) toituvad selgrootutest ja pesitsevad ujutaimestikul. Väga pikad varbad võimaldavad neil seal kõndida, ehkki nad on ka head sukeldujad ja lendajad.

Siniraalistest (*Coraciiformes*) elavad jõekallastel kalatoidulised jäälindlased (*Alcedinidae*), kelle tüüpiline esindaja on jäälind (*Alcedo atthis*). Eriti palju liike on troopikas.

Värvulistest (*Passeriformes*) on enamik mitteveelise eluviisiga, kuid paljud neist söövad veeputukate valmikuid (nt roolinnud – *Acrocephalus*). Erandiks on jõekärestike selgrootutest toituv vesipapp.

Veelindudest on kodustatud eeskätt parte ja hanesid.

**IMETAJAD (*Mammalia*)** Pärissiseveelisi või veekogudest suurel määral sõltuvaid imetajaliike leidub maailmas üle 120. Vaalaliste (*Cetacea*) ja meriveiseliste (*Sirenia*) esindajad ei välju kunagi veest, ehkki nemadki hingavad atmosfääriõhku, mitte vees lahustunud hapnikku nagu näiteks kalad.

Kuni 2,5 m pikkune jõevaalaline susu (*Platanista gangetica*) elab Lõuna-Aasia suurtes sogastes jõgedes (Indus, Ganges, Brahmaputra), kus toitub põhjaloomadest ja kaladest. Lõuna-Ameerikas on tema sugulasliigid *Inia geoffrensis*, kes sööb kalu ja krabisid, ning sini-nokisdelfiin (*Sotalia fluviatilis*). Järvevaal (*Lipotes vexillifer*) elas kunagi Hiinas Dongtingi järves Jangtse jõe suudmest 1000 km kaugusel, kuid on nüüdseks paisutamise ja reostamise tõttu tõenäoliselt välja surnud.

Meriveiselised on taimtoidulised. Magevees elavad neist vähesed sugukonna lamantiinlased (*Trichechidae*) esindajad. Manaati (joonis 2.130) elab jõgede alamjooksudel Floridast Brasiiliani, jõemanaati (*Trichechus inunguis*) Amazonase ja Orinoco vesikonnas. Lääne-Aafrika liik on lamantiin (*T. senegalensis*).

Paljud imetajaliigid elavad veekogude ääres ja saavad sealt toitu (näiteks kudevaid lõhilasi püüdvad karud). Vähesed neist oskavad sukelduda. Viimaste hulgas väärib mainimist Ida-Austraalia ja Tasmaania siseveekogusid asustav ning selgrootutest toituv nokkloom (joonis 2.131). Kukkurloomadest (*Marsupialia*) elab veeopossum (*Chironectes minimus*) Kesk- ja Lõuna-Ameerikas. Tema kukrul on tugev lihas, mis muudab selle vajaduse korral veekindlaks. Paksusabaline opossum (*Lutreolina crassicaudata*) on sooelanik ja samuti väga hea ujuja.

**2.130.** Manaati (*Trichechus manati*).

**2.131.** Nokkloom (*Ornithorhynchus anatinus*).

Putuktoidulistest oskavad Palearktise veekogudes hästi ujuda mutlaste sugukonda kuuluvad pürenee piisammutt ehk pürenee desman (*Galemys pyrenaica*), kes elab Pürenee poolsaare mägijõgedes, ning harilik piisammutt ehk harilik desman (*Desmana moschata*), kes asustab jõgede luhaveekogusid Dneprist Uraalini ja on peaaegu pime nagu harilik muttki. Karihiirlastest on tavaline harilik vesimutt (*Neomys fodiens*). Põhja-Ameerikas ja Kagu-Aasias leidub veel mitu veelise eluviisiga karihiirlaseliiki.

Käsitiivalistest (*Chiroptera*) söövad paljud liigid veeputukate valmikuid. Suur-jänesemokk Kesk- ja Lõuna-Ameerikas on kohastunud veepinnalt küünistega väikesi kalu haarama, kasutades ohvrite peilimisel veepinna võnkeid. Ta saab hakkama ka konnade ja vähkidega. Ühtlasi oskab ta ujuda ning suudab veest lendu tõusta. Ka lendlaste perekonna *Myotis* hulgas leidub mitmel pool maailmas kalatoidulisi liike.

Närilistest (*Rodentia*) on tuntuimad taimesööjad. Maailma suurim näriline on Lõuna-Ameerikas elav kapibaara (*Hydrochaeris hydrochaeris*); samast kandist pärinevad paka (*Cuniculus paca*) ja nutria (*Myocastor coypus*), keda on Euroopas kasvatatud kultuuris.

Parasvöötme populaarsed esindajad on koprad (Euroopas *Castor fiber*, Põhja-Ameerikas *C. canadensis*). Koprad elavad vooluvetel, mille vooluhulka nad paisudega reguleerivad. See tekitab soid ja suurendab maismaa orgaanilise aine sissetulekut vette. Koprad toituvad kalda- ja veetaimedest, kaldapuude koorest ja peentest okstest, langetades nende kättesaamiseks puid. Kui puud on eemaldatud, saab ka jões hakata kasvama veetaimestik.

Muudest taimetoitlastest võib nimetada veel Palearktises elavat mügrit (*Arvicola terrestris*) ja Lõuna-Ameerika ujuhamstreid (*Holochilus*). Segatoidulistest on tuntuimad ondatra (*Ondatra zibethicus*), keda tema looduslikult kodumaalt Põhja-Ameerikas on edukalt levitatud Palearktisesse ja florida ondatra (*Neofiber alleni*). Kaladest toituvad Kesk- ja Lõuna-Ameerika mägijõgedes udrashamstrid (*Ichthyomys*), põhjaloomadest, eriti limustest, aga vesihamstrikud (*Rheomys*).

Kiskjalistest (*Carnivora*) on veekogudega tihedalt seotud mõned kärplased. Saarmastest elab Palearktises harilik saarmas (*Lutra lutra*), Põhja-Ameerikas kanada saarmas (*L. canadensis*). Mitu liiki leidub Kesk- ja Lõuna-Ameerikas, Aafrikas ning Kagu-Aasias. Suurim neist on Lõuna-Ameerika loom hiidsaarmas (*Pteronura brasiliensis*) tüvepikkusega kuni 150 cm. Troopika jõgedes elab sõrmiksaarmaste (*Aonyx*) esindajaid. Kõik nad toituvad valdavalt kaladest ja muudest veeloomadest.

Naaritsad (Euroopas *Mustela lutreola*, Põhja-Ameerikas ja sealt Euraasiasse tunginud mink – *Neovison vison*) on väiksemad ja murravad saaki nii veekogudes kui ka nende ümbruses.

Loivalistest (*Pinnipedia*) elavad sisevetes mõnel pool hülged, näiteks baikali viigerhüljes (*Pusa sibirica*), kaspia viigerhüljes (*P. caspica*), viigerhülge (*P. hispida*) asurkonnad Laadoga ja Saimaa järves ning randali (*Phoca vitulina*) asurkonnad Newfoundlandil ja Ungava poolsaare veekogudes Kanadas. Kõik nad on kalatoidulised.

Sõraliste (*Artiodactyla*) vee-elulised esindajad on jõehobu (*Hippopotamus amphibius*) ja kääbusjõehobu (*Hexaprotodon liberiensis*), kes mõlemad on troopilise Aafrika päritolu (joonis 2.132). Nad söövad nii vee- kui ka kaldataimi. Jõehobude ekskremendid suurendavad tunduvalt veekogude produktiivsust, muu hulgas kalarikkust.

**2.132.** Jõehobu (*Hippopotamus amphibius*).

## KÜSIMUSED

1. Milliseid veeorganisme määratakse peamiselt ribosoomi allüksuse 16S RNA nukleotiidse järjestuse alusel?
2. Mille poolest on huvitavad vaguviburilised?
3. Millest koosneb taimede, seente ja loomade rakukest?
4. Millised taimed vajavad teistest vähem valgust?
5. Mis vahe on radiaalsel ja bilateraalsel sümmeetrial?
6. Kuidas toituvad jõhvussid?
7. Millised veeloomad Eestis ründavad inimesi?
8. Mis on keriaparaat ja kellel see on?
9. Miks elab enamik limuseid karedas vees?
10. Millised sisevete loomad on pikima elueaga?
11. Millised sisevete loomad on ellu jäänud pärast viibimist avakosmoses?
12. Millisesse loomarühma kuuluvad vesikirbulised ja kalatäi?
13. Kuidas ohustavad vähkide võõrliigid harilikku jõevähki?
14. Mille poolest on ühepäevikulised erilised kõigi teiste putukate seas?
15. Kes toituvad püünismaski abil?
16. Millised putukad tegutsevad peamiselt veepinnal?
17. Kuidas on seotud mardikalised ja riisipõllud?
18. Nimetage suurselgrootuid, kes on veekogude hea seisundi indikaatorid.
19. Millest toituvad surusääsklaste valmikud?
20. Kas kalad võivad uppuda?
21. Miks asustavad paljud kahepaiksed ajutisi veekogusid?

## MÕISTED JA MÄRKSÕNAD

areaal
kosmopoliitsed liigid
endeemsed liigid
rakuline elu
rakuta elu
eeltuumsed
päristuumsed
protistid
seened
taimed
loomad
bakterid
vetikad
algloomad
sporofüüt
gametofüüt
tallofüüt
radiaalsümmeetriline kehaehitus
bilateraalsümmeetriline kehaehitus
plastron

# 2.5. Vastastikused mõjutused veeelustiku rühmade vahel

Elupaikade piirides on veekogude eluvormid ja taksonoomilised üksused omavahel mitmesugustes suhetes nii nagu elustik maismaalgi (tabel 2.7).

Looduses on liike paarikaupa käsitledes kõige tavalisemad suhted kommensalism ja amensalism, millele järgnevad toitumine, konkurents ja mutualism. **Kommensalism** on olukord, kus üks liik saab suhtest kasu, teine mitte; **amensalism** aga suhe, kus üks liik saab kahju, teine mitte. Kõige rohkem on uuritud toitumist.

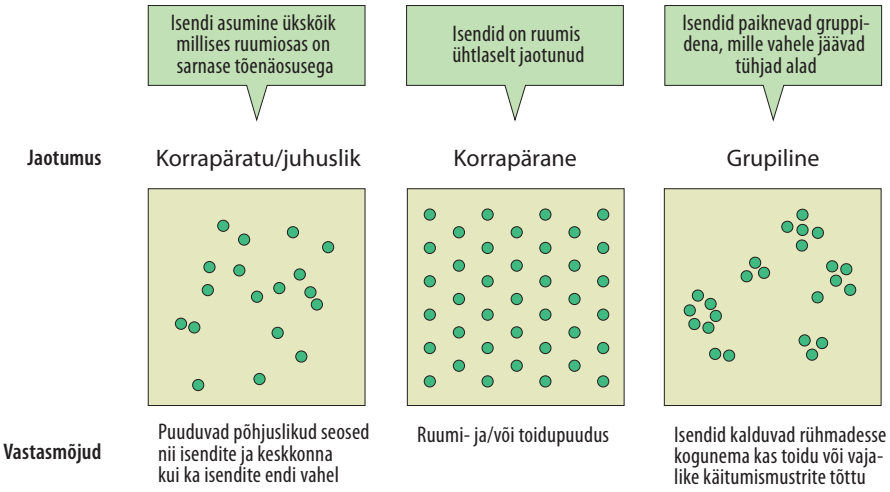
Igal liigil on oma **nišš** (keskkonnatingimuste kompleks või *n*-mõõtmeline ruum), kus ta on võimeline elama, kasvama ja sigima. Potentsiaalne nišš koosneb elupaigast endast, tegelik nišš aga nii sellest kui ka teistest liikidest. Paljude koos elavate liikide potentsiaalsed nišid kattuvad ja kui mingit ressurssi, näiteks toitu või ruumi ei jätku, erineb tegelik nišš potentsiaalsest märkimisväärselt. Üldjuhul ei saa eri liikidel olla täpselt samasuguseid nišše, vähemalt mitte pikka aega.

Peale keskkonnatingimuste mõjutab isendite paiknemist ruumis oluliselt nii liikide kui ka sama liigi isendite omavaheliste suhete iseloom. Jaotumus võib olla niihästi korrapäratu ehk ebaühtlane, korrapärane ehk ühtlane kui ka grupiline (joonis 2.133).

- **Korrapäratut** jaotumust tuleb ette harva, enamasti väga ühtlastes looduslikes tingimustes, näiteks väga sügavas järvepõhjas, mida asustavad vaid juhuslikud isendid. Sel juhul puuduvad isendite vahel olulised suhted.
- **Korrapärase** jaotumuse puhul on tüüpiliselt tegu tugeva konkurentsi või üksteisest toitumisega. See iseloomustab näiteks bentose sessiilseid liike.
- **Grupiline** jaotumus (ühtlane või ebaühtlane) on looduses kõige tavalisem. Eelkõige tuleneb see keskkonnatingimuste ebaühtlusest, samuti isenditevahelistest suhetest. Näiteks kogunevad kalad ja plankterid sageli parvedesse. See võib suurendada küll toidukonkurentsi, kuid seda kompenseerib kaitse vaenlaste eest, parem orienteerumisvõime ja väiksem veetakistus. Toidu jälitamiseks võivad parvedesse koguneda ka kiskjad. Sageli moodustavad parvi sama liigi lähedased vanusjärgud. Parvedes kehtib hierarhia: tugevamad kalad ujuvad keskel, nõrgemad äärtel, kus oht rünnaku ohvriks langeda on suurem.

Sigimiskoondiste mõte on üksteise kergem leidmine vajalikul perioodil.

Ruumiliselt piiratud (nt ühes veekogus), üksteist vastastikku mõjutavate liikide isendite ühendust, millel on püsiv aine- ja energiaringe, nimetatakse **kooslusekс** ehk biotsönoosiks. Kooslus on korrastatud, kindla ülesehitusega süsteem, mille struktuur sisaldab palju rohkem infot kui lihtsalt eri liiki isendite summa. Aine ja energia liiguvad ning muunduvad kooslustes toiduahelate kaudu. Koosluse organiseerituse mõõduks on tema aine ja energia muundamise astmete arv. Neid astmeid nimetatakse **troofilisteks tasemeteks** (vt lk 260 jj).




**2.133.** Üldistatud seoseid isendite ruumilise paigutuse ja vastasmõjude iseloomu vahel.

### 2.5.1. Toitumine

Autotroofidel on kasvu lähteväärtuseks saadav päikese- või kemoenergia hulk, heterotroofidel tarbitud toidu hulk. Mida väärtuslikum on toit, seda vähem on seda vaja juurdekasvu ühiku kohta.

**Kasvu ökoloogiline tõhusus** $K_1$ on keha juurdekasvu ($Q_1$) protsent tarbitud toidu hulgast ($Q$):

$$K_1 = \frac{Q_1}{Q} \times 100$$

**Troofiline koefitsient** $K_2$ on keha juurdekasvu ($Q_1$) protsent tarbitud toidu energia ($Q$) ja hajunud energia ehk **respiratsiooni** ($Q_R$) vahest:

$$K_2 = \frac{Q_1}{Q - Q_R} \times 100$$

$K_2$ on suhteliselt ühtlane väga erineva suurusega veeelanikel bakteritest selgroogseteni ja võib maksimaalselt ulatuda 70–80%-ni.

Nende tunnuste väärtused sõltuvad liigist, vanusest, füsioloogilisest seisundist, keskkonnatingimustest jne. Näiteks noored või pikka aega nälginud isendid kasutavad toitu tõhusamalt. Kiiretel liikujatel kulub palju energiat muudele eesmärkidele peale kasvu (hingamine, liikumine, soojusvahetus, eritusjäägid). Pidev häirimine toitumisel vähendab selle kasutamist kasvuks. Ebasobivat toitu kulub sama suure juurdekasvu saavutamiseks rohkem kui sobivat. Energiakadu ainevahetusel on pöördvõrdeline organismide mõõtmetega. Näiteks bakterid on väikesed, kuid nende osa energiaringes väga suur.

**TOIDU TÜÜBID** Toidu tüübi järgi jagatakse tarbijad üldistatult taimtoidulisteks (herbivoorid), detriiditoidulisteks (detrivoorid), kiskjateks ehk röövtoidulisteks (karnivoorid) ja segatoidulisteks (omnivoorid). Viimased kas ei vali toitu või vähemalt on võimelised tavatoidu puududes midagi muud sööma. Orgaanilise aine tootjaid endid (autotroofsed protistid, bakterid ja arhed ning suurtaimed) pole siin käsitletud mitte toitujatena, vaid toidu (plankton, perifüüton) või isegi elupaigana.

Autotroofsed protistid (vetikad) liigitatakse selles jaotuses taimedeks, heterotroofsed protistid (algloomad) aga loomadeks. Tarbijate rühmitamine toidu tüübi järgi on seega üsna tinglik. Näiteks võivad aerjalalistest planktonivähkidest hormikulised süüa nii vetikaid kui ka väikesi selgrootuid. Sõudikulised on noorelt taimtoidulised, kuid lähevad vananedes üle lihatoidule, säilitades siiski võime elada vetikatest. Filtreerijad sageli ei sorteeri, mida nad täpselt püüavad (kas elusaid vetikaid või detriiti), muutes seega nende toitumistüüpide eristamise küsitavaks. Fütoplankton erineb ka biokeemiliselt pärisloomadest vähem kui kõrgemad taimed. Ta sisaldab rohkem valke, kuid vähem polümeerseid tugikudesid (tselluloosi ja ligniini).

Toitumisega seotud tunnused võivad elu jooksul muutuda. Näiteks poolnäljas kasvanud kiivrikute filteraparaat on suurem kui ületoidetud loomadel. See võimaldab sesoonseid erinevusi paremini taluda.

Kiskjate hulka arvatakse teiste loomade sööjad, kuid mitte igasuguses tähenduses. Kalu peetakse röövkaladeks, kui nad toituvad muudest kaladest või selgroogsetest. Selgrootutest toitujad rühmitatakse hoopis lepiskaladeks ja ühendatakse pigem taim- või segatoidulistega. Sageli peetakse sarnase toidu puhul oluliseks hoopis seda, missugusel kujul teda hangitakse – näiteks kas tarbitavad vetikad on planktonis või perifüütonis ja kas nad on elusad või surnud. Parasiitide ja kiskjate tegelik erinevus ei seisne mitte niipalju toidu tüübis (loomne või taimne), vaid sööja liikumiskiiruses ja suuruses. Kui rünnatav (söödav) on ründajast (sööjast) palju suurem ega sure protsessi käigus, siis pole ta saak, vaid pigem peremees. Kuid näiteks putukates parasiteerivate jõhvusside ja suurte nematoodide mass võib pikapeale peremeeslooma massi ületada. Peremees on samas ise kunagi parasiidi väikesed munad või vastsed alla neelanud. Küll aga ei nimetata suurtest taimedest toitujaid enamasti parasiitideks, ehkki nad parasiitide tunnustele suurepäraselt vastavad.

Teisest küljest on veekogude „taimed“ sageli väga väikesed (üherakulised) ja neist toitumine toob kaasa ohvri surma. Seega sarnaneb selline “taimtoitlus” oma olemuselt pigem kiskluse kui parasiitlusega. Samuti on

Tabel 2.7. KAHE LIIGI VAHELISED ÜLDISTATUD VASTASMÕJUD

| Liigi 1 mõju liigile 2 | Liigi 2 mõju liigile 1 | Vastasmõju nimetus |
|---|---|---|
| Kasulik | Kasulik | Mutualism |
| Kasulik | Kahjulik | Toitumine (sh parasiitlus) või häirimine |
| Kasulik | Mõjuta | Kommensalism |
| Kahjulik | Kahjulik | Konkurents |
| Mõjuta | Kahjulik | Amensalism |
| Mõjuta | Mõjuta | Neutralism |

(Dodds 2002 järgi)

detriidisööjad ja filtreerijad, kes tarbivad lagunenud lehti, puitu või hõljuvat orgaanilist ainet, sisuliselt bakterite ja seente kiskjad.

**ORGAANILISE AINE TÜÜBID** Lagunenud orgaaniline aine jagatakse osakeste suuruse järgi järgmistesse rühmadesse:

- jäme: > 1 mm (ingliskeelse lühendiga CPOM, *coarse particulate organic matter*),
- peen: 0,5 µm – 1 mm (FPOM, *fine particulate organic matter*) ja
- lahustunud: < 0,5 µm (DOM, *dissolved organic matter*).

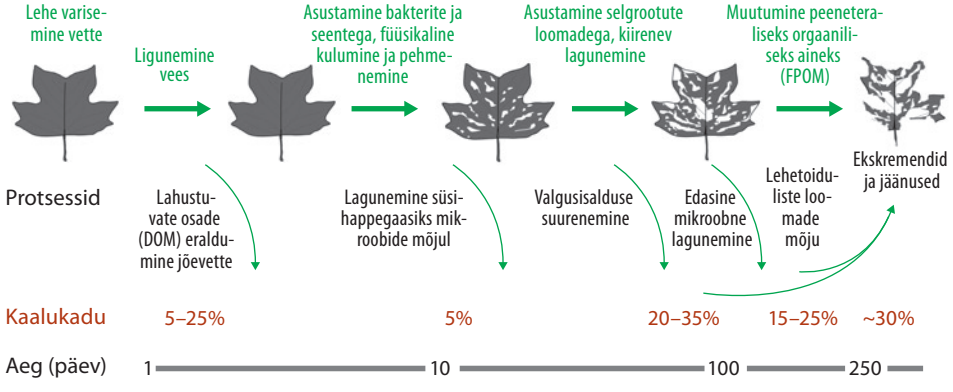
FPOM koosneb nii surnud mikroskoopilistest olenditest kui ka suuremate osade lagunemisel tekkinud peeneteralistest jäänustest. DOM on CPOMi ja FPOMi lahustumise tagajärg. DPOM on põhitoit bakteritele, kellest omakorda toituvad heterotroofsed protistid. Kõigi kolme allikaks on nii **autohtoonset** (veesiseste autotroofide loodud) kui ka **allohtoonset** päritolu (maismaalt veekogusse sattunud) materjal (vt ptk 1.11.1).

**CPOMi** moodustavad peamiselt puulehed, õied, viljad, õietolm, veetaimed ja veeloomad (joonis 2.134). Vooluvetes koguneb ta keeristesse ja kivide või taimede taha. Puit laguneb väga aeglaselt, tema süsiniku ja lämmastiku suhe (C/N) on 220–1340 : 1. Puit muudab ühtlasi vooluvete põhja struktuuri, kogudes enda külge peent materjali. CPOMi hulk muutub sesoonselt (lehtede langemine, tormid, kalade suremine pärast kudemist, suurte imetajate ja lindude laibad, jõehobude ja rändlindude väljaheited). Lehtede hulk vees sõltub kõige rohkem metsa hulgast 500–1000 m vaadeldavast kohast ülesvoolu. Kogu CPOMi sissekanne USA idaosa vooluvetes on keskmiselt 335 (40–700) g C/m$^2$ aastas. Mida väiksem on oja, seda suurem on see näitaja. Austraalia hõredates metsades on see kõigest 35, vihmametsades 480. CPOMi biomass võib olla kuni 14,5 kg C/m$^2$.

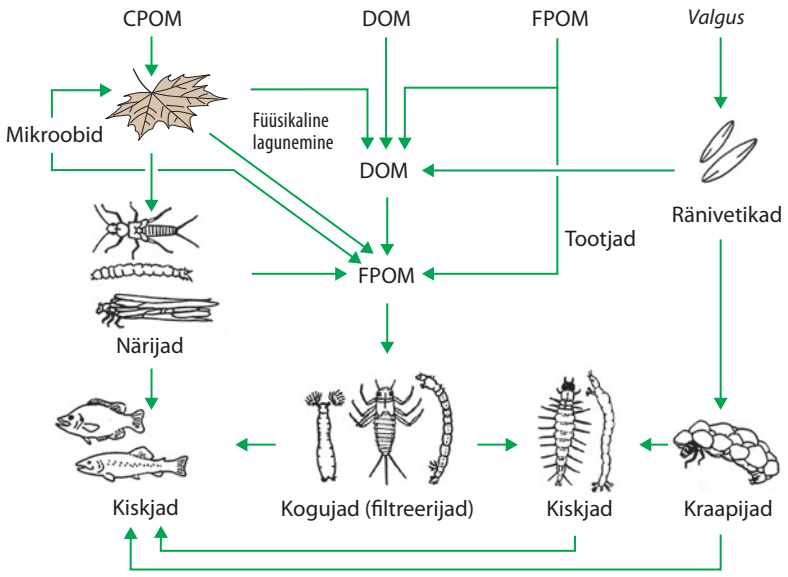
**FPOM** on seisuvetes fütoplanktoni lagunemise tavaline tagajärg. Vooluvetes tuleneb ta enamasti CPOMi lagunemisest voolu, selgrootute ja bakterite mõjul. Näiteks suured vähid „raiskavad“ kõdunenud lehtedest veerandi peene puruna. Et CPOM on kehva toiteväärtusega, tuleb närijatel palju süüa, mille tagajärjeks on ühtlasi ohtralt väljaheiteid. See võib kohati omakorda olla oluline FPOMi allikas. On ka vastupidine näide: kihulaste vastsed tarbivad nii FPOMi kui ka POMi, kuid tekkivad väljaheited kuuluvad suuruse poolest hoopis CPOMi. Et FPOM on peenemateraline kui CPOM, sisaldab ta märksa rohkem baktereid ja seeni, olles nii toiduna väärtuslikum. Vooluvetes koguneb see kitsalehiste taimede külge, (nt üle 1 kg FPOMi/m$^2$ ühes särjesilma puhmas). Veevoolus on tavaliselt ühes liitris ainult mõni mg FPOMi, rabajõgedes ja troopikas aga üle 10 mg/l. See hulk suureneb pärast üleujutusi. FPOM on filtreerivate ehmestiivaliste ja kihulaste vastsete peamine toit. Kogujad söövad selle põhjavajunud osa (muda). FPOMi maismaalist päritolu on kerge näidata $\delta^{13}C$ isotoobi suhtelise sisalduse järgi.

**DOMi** koosseisu kuuluvad näiteks suhkrud, lipiidid, aminohapped, valgud, humiinained, kolloidid. See kõik moodustab siiski alla 30% „kasulikust“ DOMist, sest ülejäänud osa (humiinained jms) ei kõlba süüa. Mida suurem on veekogu, seda vähem leidub vees söödavat DOMi. Suurem osa DOMi pärineb maismaalt, kuid kõige väärtuslikum osa sellest tekib just jões endas lagunedes. DOMi hulk jääb vooluvetes vahemikku 1–4 mg C/l, suurtes jõgedes 2–10 mg C/l, troopika tumedaveelistes jõgedes 10–30 mg C/l. Näiteks Euroopas Reini jões on see aasta ringi *ca* 3,6 mg C/l. Toiduahelasse saab DOM minna kas bakterite kaudu või uuesti tahkeid osakesi moodustades (flokuleerudes). Sel võib olla oluline tähtsus järvede väljavooludes.

Vooluvetesse satub eriti palju maismaal tekkinud orgaanilist ainet ja selle hulk võib autohtoonset materjali




**2.134.** Orgaanilise aine lagunemise etapid lehe näitel.




**2.135.** Vooluvete toiduvõrgustik metsaoja näitel.

palju kordi ületada. Peamiselt koosneb see puude lehtedest ja okastest, samuti allakukkunud okstest, viljadest jm. Väga palju maismaalt pärit materjali satub vooluvetesse suurveega. DOM moodustab vooluvetes suurima osa vees lahustunud orgaanilise aine sisaldusest.

Primaarseteks toiduallikateks on veekogudes niisiis kohapeal tekkinud autotroofid ise ja nende laguproduktid ning peale selle allohtoonsed CPOM, FPOM ja DOM. Kui vooluvetes liigub autohtoonne materjal allavoolu, on ta alumiste jõelõikude jaoks samuti allohtoonne.

**TOITUMISTÜÜBID** Toidu tüüp koos toitumisviisiga määrab organismi toitumistüübi. Toidu tüüp üksi seda hästi ei võimalda, sest enamik tarbijaid on nagunii segatoidulised. Näiteks peeneteralist orgaanilist ainet võidakse nii veest filtreerida kui ka põhjast koguda.

Herbi- ja detrivoorid võib rühmitada **filtreerijateks** ehk kurnajateks (*filtrators*); pehme materjali **kogujateks**, kes tavaliselt on võimelised ka filtreerima (*collectors*); perifüütoni **kraapijateks** (*scrapers*) ning (tavaliselt endast suuremate) kõdunevate taimeosade või loomalaipade **närijateks** (*shredders*) (joonis 2.135). Pehmes settes elavaid kogujaid võib nimetada ka **settesöö-jateks** (*sediment feeders*).

Filtreerijad koguvad vees pihustunud toitu näiteks rindmikujätkete (kiivrikud), lõpuste (karbid), tundlate (kihulased) või püünisvõrguga (mõned ehmestiivalised). Paljud neist asustavad vooluvett või tekitavad ise veevoolu. Kõige väiksemad neist (keriloomad, aerjalalised) püüavad hõljuvaid osakesi ükshaaval. Mida väiksem on loom, seda raskem on tal vee suure viskoossuse tõttu filtreerida. Ka kiskjaid võib liigitada selle järgi, kas nad ümbritsevad saagi kogu kehaga (protistid), imevad saagi tühjaks või rebivad selle küljest tükke.

Assimilatsiooni efektiivsus loomse toidu seedimisel on 70–95%, perifüütoni puhul 30–60 ja detriidi puhul 5–30%.

Bakterid, arhed ja paljud algloomad omastavad lahustunud toitaineid raku pinnaga **osmootselt**. Ained tungivad läbi mikroobiraku membraani kas lihtsa difusiooni, vahendatud difusiooni või aktiivtranspordi teel.

Difusioon on lisaenergiat mittenõudev aine liikumine läbi membraani rakku kuni selle aine sisalduse ühtlustumiseni rakus ja väliskeskkonnas. Nii pääsevad bakterite ja arhede rakkudesse lipiidides lahustuvad väikesed molekulid: süsivesinikud, alkoholid ja gaasid ($O_2$, $CO_2$, $NH^3$). Vahendatud difusiooni puhul osalevad ainete transpordis membraanis paiknevad spetsiifilised valgulised kandjad. Selline difusioon on ainete väikese sisalduse korral tõhusam. Vahendatud difusiooni teel tungib rakkudesse näiteks vesi. Aktiivtranspordiks vajatakse peale valguliste kandjate ka adenosiintrifosfaadist saadavat lisaenergiat.

Bakterid ja arhed elavad looduses enamasti lahjades lahustes. Ainete sisaldus rakkudes on sageli sadu ja tuhandeid kordi suurem kui väliskeskkonnas. Nii tuleb toit toimetada sinna aktiivtranspordi abil. Sel teel tõmmatakse rakku paljusid ioone (sulfaat, fosfaat, kaalium), samuti aminohappeid, suhkruid ja orgaanilisi happeid. Suured molekulid pääsevad rakku alles siis, kui ensüümid on nad väljaspool rakku hüdrolüüsinud väiksemateks osadeks, mis suudavad rakumembraani läbida. Väga suure molekulmassiga ühendeid, näiteks humiinaineid, hakatakse kasutama alles siis, kui kergemini transporditavad ühendid on ära kulutatud.

**HERBI- ja DETRIVOORID** Planktonis kuuluvad siia filtreerijad: vesikirbulised, aerjalalised, keriloomad, ripsloomad ning heterotroofsed viburloomad, kes tarbivad hõljuvaid planktoni vetikaid ja baktereid. Ühe isendi filtreerimiskiirus võib erineda teise omast rohkem kui tuhat korda; näiteks väikestel keriloomadel on see 0,02 ml päevas, kuid vesikirbulistest kiivrikutel üle 30 ml. Suurtes piirides varieerub ka tarbitavate osakeste läbimõõt; näiteks aerjalalised on selles suhtes märksa valivamad kui vesikirbulised.

Bentoses leidub väga erineva suurusega filtreerijaid alates üherakulistest loomadest kuni putukavastsete ja suurte karpideni. Seisuveekogu kui terviku seisukohast on olulised eelkõige viimased, sest nad suudavad suure arvukuse korral veest välja kurnata märkimisväärse osa hõljuvast või triivivast ainest. Väga palju bentilisi filtreerijaid (näiteks kihulaste vastseid) on järvede väljavoolu des. Kinnipeetavate osakeste läbimõõt on enamasti alla 0,01 mm.

Tahketel pindadel (veekogu põhjas või taimedel) toituvad taimedest näiteks heterotroofsed protistid, teod ja putukavastsed. Nende seas leidub nii kogujaid, kraapijaid kui ka närijaid. Ehmestiivaliste ja ühepäevikuliste hulgas on kõigi kolme rühma esindajaid. Ka siin ei saa tegelikult ühegi rühma puhul kindel olla, et tarbitav taimemass ei sisalda loomset osa. Näiteks teod kraabivad ja neelavad kogu perifüütonit järjest koos väikeste loomade, seente ja bakteritega, ehkki mõni osa sellest võib neile loomulikult paremini maitseda. Seda, kuidas sõudikulised või mõned amööbid (*Vampyrella*) söövad üherakulisi vetikaid, võib käsitada ka taimekisklusena, sest nad valivad ja ründavad üksikuid rakke.

Detrivooride toidus on bakterite ja seente toitevääritus palju kordi suurem kui lagundatavas detriidis endas, mass aga suurusjärgu võrra väiksem. Tselluloos, hemitselluloos ja pektiin lagundatakse selgrootute magudes osaliselt, pärast seda suudavad need ise edasi seedida. Mikroobide ja seente eksoensüümid jäävad magudes aktiivseks. Mõned teod, vähid ja rõngussid suudavad tselluloosi jt polüsahhariide piiratud ulatuses ka ilma bakteriteta seedida.

Head liikujad (vooluvetes näiteks kirpvähid) saavad toitu valida, halvad liikujad (näiteks sääriksääskede vastsed) suudavad see-eest seedida peaaegu kõike.

Settes elavad ja neelavad seda mõned väheharjasussid, kes lepivad vähese hapnikusisaldusega.

Elusad suurtaimed on fütoplanktoni ja perifüütoniga võrreldes väikestele tarbijatele vähem suupärased, sest neil on tugevamad rakuseinad ja suurem ligniinisisaldus. Filtreerijad kasutavad suurtaimi pigem kinnituskohana, kraapijad söövad nende pinnalt perifüütonit. Alles pärast taimede surma ründavad neid närijad. Mõned pisikesed ehmestiivalised (sugukond *Hydroptilidae*) imevad üksikuid rakke tühjaks. Taimedes parasiteerivad pisikesed ümarussid. Päris elusat kudet tarbivad meeleldi hoopis suured loomad, näiteks põdrad, luiged, haned, pardid ja laugud, selgrootutest kümnejalalised vähid. Viimased võivad veealuse taimestiku sisuliselt hävitada.

Herbivooride ohvrid kaitsevad end ärasöömise vastu mitmesuguste kohastumuste abil. Näiteks tsüanobakterid sisaldavad küll palju lämmastikku, kuid neil on samas tugevad rakuseinad. Filtreerijatele on ebamugav nende niitjas kasvuvorm (näiteks *Aphanizomenon*); paljud liigid on ka mürgised. Suurte mõõtmete ja ogade poolest paistavad silma näiteks vaguviburilised (*Ceratium*), ogade poolest rohevetikad (*Staurastrum*). Rohevetikad perekonnast *Sphaerocystis* on kaetud paksu limaga, mis võimaldab neil vaenlaste seedekulgla vigastamatult läbida. Et kaitsevahendite arendamine on energiakulukas, on mõne rühma (viburvetikad *Cryptomonas*, rohevetikad *Chlamydomonas*) ellujäämisstrateegia seotud pigem väikeste mõõtmete, kiire kasvu ja suure viljakusega.

Nektonist (kaladest) on tuntud taimesööjad valgeamuur ja mõned *Tilapia* liigid, kes vajavad eluks siiski ka loomset valku. Parasvöötme kaladest on kuigivõrd taimtoidulised särg ja roosärg.

Imetajatest on taimtoidulised meriveiselised (manaatid ja lamantiinid). Väikestest selgrootutest söövad suurtaimi mõnede mardikaliste, liblikaliste ja ehmestiivaliste vastsed. Taimede veeväliseid osi ründavad meelsasti maismaaputukad. Maksasamblaid ja samblaid elusalt ei sööda.

Jõgedes leidub palju lisatoitu suurvee ajal, kui vette satub maismaalt pärit materjali. Seetõttu on näiteks Amazonase jõestikus välja kujunenud isegi pähkleid purustada suutvaid kalu (*Colossoma macropomum*; joonis 2.136). Ka kiskjatena tuntud piraajad söövad suurvee ajal peamiselt metsast pärit toitu.

**2.136.** Must paku (*Colossoma macropomum*) võib kasvada rohkem kui 30 kg raskuseks. Ta toitub üleujutatud metsades peamiselt puuviljadest ja seemnetest.

**KARNIVOORID** Röövtoidulisi vorme leidub rohkem loomade, vähem taimede ja seente seas. Erinevalt herbi- ja detrivooridest kuulub sellise toitumise juurde peale otsingu, avastamise, neelamise ja seedimise mõnikord veel varitsemine, jälitamine ja tabamine. Karnivooridele ei piisa toidu avastamisest lõhna ja välimuse järgi, nad peavad suutma tajuda ka tema liikumist.

Varitsemine on energiasäästlik ja suure tabamisprotsendiga taktika, mis annab tulemusi liigendatud elupaigas, kus kiskja saab ennast peita. Otsingule kulub palju jõudu ning ka põgenema pääsenud saaki on siis tavaliselt rohkem. Sageli on võimalik kahte taktikat kombineerida.

Optimaalse toitumiskäitumise järgi ei pruugi parim toit olla eelistatud, kui teda leidub liiga harva. Alles siis, kui toidu hulk ise pole enam piirav mõjur, algab selle valimine. Mida arvukam on ohver, seda rohkem teda süüakse. Teiseks sõltub valik nii kiskja suu kui ka ohvri suurusest ja kiirusest ning ohvri kaitsevõimest. Osa kiskjaid suudab rünnata endast suuremaid ohvreid, keda nad ei neela tervenisti, vaid imevad vedelast sisust tühjaks või hammustavad neist suutäisi.

Valik varitsuse ja otsingu vahel sõltub omakorda riskist langeda ise veel suurema kiskja ohvriks. Kõik elusolendid, sealhulgas kiskjad ise, on potentsiaalsed ohvrid – mõni ainult noorelt, mõni eluaeg.

Kannibalism (toitumine sama liigi isenditest) säilitab liigi eluvõime tingimustes, kus teisiti elada pole võimalik. Näiteks rabajärvedes toituvad haugi ja ahvena noorjärgud algul zooplanktonist, kuid lähevad siis muu toidu puududes üle väiksemate liigikaaslaste söömisele. Sel juhul jääb ellu vähemalt osa asurkonnast.

**Planktonis** söövad baktereid väikesed protistid (orienteeruv pikkus 5 µm), kellest toituvad suuremad protistid. Neid söövad omakorda hulkraksed zooplankterid (aerjalalised ja keriloomad). Keskmine bakterirakk ise on alla 0,2 µm pikk. Nii väikesi kehi suudavad suurematest loomadest vooluvetes otse tarbida näiteks kihulaste vastsed (*Simuliidae*) ja korvkarbid (*Corbicula*). Hõljuvatel osakestel, biofilmis ja interstitsiaalis toituvad otse bakteritest ka mikroskoopilised väheharjasussid ja ümarussid. Biofilmis ja planktonis süüakse baktereid koos muu suurema toiduga.

Zooplanktilistest kiskjatest on tuntuimad vesikirbulised: klaasikud (*Leptodora*) ja händurid (*Bythotrephes*). Nende rindmikujätked moodustavad korvja ruumi, millesse nad püüavad peamiselt väiksemaid vesikirbulisi. Et kaladele nähtamatuks jääda, on klaasikud täiesti läbipaistvad; isegi nende silmad ja magu on väga väikesed, et vaenlane neid ei märkaks. Kaladeta tiikides on klaasikud värvunud.

Teine kiskeluviisiga vesikirbuliste perekond on silmik (*Polyphemus*). Ta asustab madalveealasid, kus moodustab suuri parvi ja orienteerub nägemise järgi.

Zooplanktonist toituvad ka klaasiksääskede (*Chaoborus*) vastsed. Paljud sõudikulised (*Cyclopoida*) lähevad neljandas ja viiendas vastsejärgus vetikatoidult üle keriloomade ja väikeste vähilaadsete söömisele. Klaaskerilased (*Asplanchna*) ründavad endast väiksemaid keriloomi. Pelaagilised kiskjad on ka paljud vesilestad (nt *Piona*), ehkki nad tegutsevad enamasti madalas vees.

**Bentose** kiskjatel on kompimine ja haistmine nägemisest enamasti olulisem, sest põhja ligidal on vähe valgust. Ka vooluvetes toimub saagi lõplik tuvastamine sageli mehaaniliselt, näiteks kevikulisel *Dinocras cephalotes* tundlate ja jäsemekarvadega, ehmestiivalistel *Hydropsyche* ja *Neureclipsis* püünisvõrgu liikumise järgi.

Sageli on tegemist varitsejatega. Näiteks hüdrad haaravad päikeseahvenate (*Lepomis macrochirus*) vastseid, kes puudutavad kogemata nende kõrverakke. Ujurlaste (*Dytiscidae*) vastsed püüavad saaki aktiivselt ning suudavad tappa endast mitu korda suuremaid ohvreid, halvates nad mürgiga. Ka voolukärbeste (*Atherix*) vastsed ja ripsussid mürgitavad oma saagi (näiteks kihulaste vastsed) enne söömist. Kaanid otsivad saaki aktiivselt. Taimedest on vesihernestel (*Utricularia*) püüniskambrid, millest väikesed selgrootud enam välja ei pääse.

Röövtoiduliste putukate vastseid on kerge ära tunda suurte lõugade (näiteks ujurlased, loidtiivad, ehmestiivalised perekonnast *Rhyacophila*) või iminoka järgi (paljud lutikalised). Kiililistel on saagi püüdmiseks spetsiaalne püünismask (joonis 2.137). Paljude veeputukate valmikud see-eest ei toitu üldse (ühepäevikulised, lühiealised kevikulised) või söövad õienektarit, -tolmu, lehetäide eritisi, vetikaid jms. Erandiks on kiskjad (kiililised, mardikalised, lutikalised), kes jätkavad teiste loomade ründamist ka valmikuna.

**2.137.** Tondihobu (*Aeshna* sp.) neelamas tiigipäevikut (*Cloeon dipterum*).

**Neustoni** kiskjatel on saagi leidmiseks vaja nii nägemist kui ka võimet tajuda vee võnkumist. Tavalised veepinnal tegutsejad on liuskurlased, pindurlased ja kukriklased. Veepinna all varitsevad selgsõudurid.

**Nektoni** arvukaimad kiskjad on kalad ja kahepaiksed, kuid neid leidub ka roomajate, lindude ja imetajate seas. Isegi planktontoidulised kalad orienteeruvad toitudes enamasti nägemise järgi, otsides suuremaid ja paremaid saakloomi. Niisugused on näiteks paljud siiglased (*Coregonidae*), tindid (*Osmerus*) ja aloosad (*Alosa*). Põhja-Ameerikas leidub ka tõeliselt filtreerivaid kalu, näiteks täiskasvanud puguheeringas (*Dorosoma cepedianum*) ning aloosad (*Alosa pseudoharengus*; joonis 2.138).

**2.138.** Aloosad ehk jõeheeringad on pärisheeringate sugulased. Mõned neist asustavad ka mageveekogusid.

Enamik kalu sööb põhjaselgrootuid, alles vananedes hakkavad mõned teisi kalu ründama. Paljud troopilised liigid närivad teiste kalade kehaosi (soomused, nahk, uimed, lõpused, silmad). Kalade saagiavastamistaju võib olla väga terav. Forellid näevad veepinnal ujuvaid putukaid isegi tähevalgel. Kalade küljejoon võimaldab neil tajuda väikese sagedusega võnkumisi ning leida zooplanktonit ka pimedas.

Salamandrid, pardid ja vesipapp söövad samuti peamiselt selgrootuid, pardid ka veetaimi. Nokkloomal on vee all silmad ja kõrvad suletud ning toidu (selgrootute) liigutusi tajub ta vurrukarvadega elektriliselt. Sogases vees elavad jõedelfiinid avastavad saaki kajaloodi põhimõttel.

Maismaaökoloogiast on teada kiskjate ja ohvrite arvukuse aastase kõikumise seos. Sageli järgib kiskjate arvukuse tõus ohvrite oma aastase hilinemisega. Sedasama on täheldatud veekogudes, näiteks forellide ja nende toidu, kihulaste vastsete puhul (Laxá jões Islandil). Vesipapi pesitsuspaaride hulk Walesi jõgedel sõltub toidu (selgrootute) hulgast: kui toidu hulk kasvab 10 korda, suureneb lindude arvukus 2–3 korda.

**KISKLUSE KAUDNE MÕJU** Peale otsese arvukuse või massi vähendamise sunnib kisklus ohvreid muutma oma käitumist, eluviisi ja elupaika. Looduslik valik muudab nii kiskjaid kui ka ohvreid. Ohvrite risk on suurem, sest kui kiskja, näiteks haug, ei taba särge, elab ta edasi ja võib järglasi anda, särg aga ohvriks langemise korral enam mitte. Et ohvrid on väiksemad ja lühema elueaga, toimib valik nende seas kiiremini. Kui oht kiskjaga kohtuda on sage, võib ohvri kasv pideva stressi mõjul kängu jääda ning viljakus väheneda.

Ohvritel on kiskjate rünnakutele siiski mitmekesiseid vastuseid. Vaenlasi võidakse tuvastada nii nägemise, vee võnkumise kui ka lõhna tajumise teel. Tavalised reaktsioonid on põgenemine, peitupugemine või lootmine varjevärvusele.

Klassikaline näide kiskjate vältimisest on zooplanktoni ööpäevane vertikaalne liikumine. Zooplankterid tulevad järvede pinnakihti öösiti, et vähendada nägemise järgi orienteeruvate kalade mõju endale. Enne päikesetõusu laskuvad nad uuesti sügavamale pimedamatesse kihtidesse. Laskumise võib esile kutsuda ka kiskjate (kalade) lõhn ja liigutused. Kiskja lõhnaainet nimetatakse **kairomooniks**, kiskja vigastatud ohvri lõhnaainet aga **alarmaineks**, mis võib mõjuda teistele potentsiaalsetele ohvritele samamoodi nagu kairomoongi. Seda on täheldatud näiteks lepamaimudel (*Phoxinus phoxinus*).

Kairomoonide pikemaajalise mõju tagajärjel suureneb keha kõrguse ja pikkuse suhe, mis vähendab tõenäosust röövkalade saagiks langeda (näiteks kogre puhul, kui samas veekogus leidub ka hauge). Samuti sõltub mõnede keriloomade ja vesikirbuliste kehakuju sellest, kas pikka aega on leidunud läheduses kiskjaid. Klassikaline näide on siin keriloomade hulka kuuluvad vappkerilane *Brachionus calyciflorus* ja ogakerilane *Keratella testudo*, kelle vaenlaseks on klaaskerilased *Asplanchna* sp. Tigu *Physella virgata* kasvab kiiremini, kuid sigib hiljem, kui pidevalt tunneb temast toituva vähi *Orconectes virilis* lõhna. See sunnib teda ruttu suureks kasvama, et vähk ei suudaks teda enam ohustada.

Passiivse peitumise tavaliseks näiteks on planktonibakterid, kes pääsevad neid jahtivate protistide eest orgaanilise aine tükikeste pinnal või sees. See ei päästa neid siiski suuremate kiskjate, nt vesikirpude eest, kui osakesed pole viimastele filtreerimiseks just liiga suured. Oma osa võib olla ka bakterite endi mõõtmetel, sest vaenlasi huvitab vähe liiga väike või liiga suur saak (niitjad jm koloonialised vormid).

Abiks võib olla ka paigale tardumine (näiteks kirpvähid või mõned kevikuliste vastsed kalade ilmudes) või surnu teesklemine. Ühe indiviidi riski langeda rünnaku ohvriks vähendab koondumine suurtesse rühmadese (näiteks kihulaste vastsed). Paljud ehmestiivaliste vastsed ehitavad endale kaitseks lausa kaasaskantavad majad. Kasuks tulevad teravad ogad (kaladest näiteks

ogalikel ja sägalistel, zooplanktonis händuritel) ja tugev väliskest (limustel). Harilik põistigu (*Physa fontinalis*) raputab ennast ägedalt, kui teda puudutab mõni kaan või lameuss. Kui jões leidub forelle, hoiduvad veepinnal jooksvad liuskurlased kalda äärde, kui aga mitte, siis hõivavad kogu veepinna.

Ründajat võib agressiivse poosi või isegi vasturünnakuga hirmutada, mida sageli edukalt teevad näiteks kümnejalalised vähid. Mõned (nt kukrikud) eritavad ebameeldivat lõhna. Paljud loomad (eriti mardikalised ja lutikalised) on lausa mürgised. Ohvrid võivad valida elupaigaks koha, mida kiskjad ei talu (nt soolavähike soolajärvedes või puudukilbilised vähid ajutistes vetes).

Üks kiskluse olulisi kaudseid mõjusid on eluga pääsenud ohvrite kehavigastused (nt tundlate, jalgade või lõpusteta õrnpäevikud – *Leptophlebia*, sabadeta väheharjasussid – *Oligochaeta*). Teiste kalade soomustest toituvad kalad tekitavad lahtisi haavu, mida omakorda võivad rünnata muud vaenlased ja haigused. Kiskjate endi asurkondi mõjutab toitumine iseenda järglastest (nt noored vähid, selgsõudurid, ahvenad, haugid).

Ja lõpuks võib kaudse mõjuna käsitada ka kiskjate puudumist aladel, mida nad ühel või teisel põhjusel ei saa asustada (näiteks kaladeta järved või jõelõigud ülalpool kõrgeid jugasid). Siis kujunevad välja teistsugused toiduahelad.

**PARASIIDID** Parasiidid ehk nugilised on seda tüüpi kiskjad, kes saavad toidu ohvritelt neid tapmata või aeglaselt tappes, kuid midagi kasulikku vastu andmata. Nad on enamasti ohvritest väiksemad ja neid leidub kõigil organismidel.

Suuruse järgi võib neid jagada mikro- ja makroparasiitideks. Mikroparasiidid on mikroskoopilised viirused, bakterid, seened ja protistid, kel on tavaliselt lühike eluiga ja kes paljunevad peremehe kehas. Nad on haigustekitajad või haiguste edasikandjad ning levivad enamasti sama liiki ohvrite isendite vahel. Makroparasiidid (pael-, imi- ja ümarussid, mõned vähilaadsed) vajavad levimiseks vaheperemehi. Nende elutsükkel võib olla väga keeruline ja sisaldada maismaafaase. Enamik nugilisi on siseparasiitsed, s.t elavad ohvri kehas; välisparasiidid elavad keha pinnal, näiteks kalade lõpustel. Paljud parasiidid on väga kitsalt spetsialiseerunud vormid, kes kindlat liiki peremehe puududes teisiti toituda ei saagi.

Alati pole kindel, kas tegu on parasiidi või hoopis kommensaaliga, kes elab „peremehe“ sees või pinnal, kuid ei kahjusta teda. Näiteks kirpvähiliste ja aerjalaliste kehale on sageli kinnitunud ränivetikaid ja ripsloomi, kuid nende mõju peremeesloomadele pole selge. Isegi kiivrikutes (*Daphnia*) elavatel imiussidel ei pruugi olla olulist mõju, kuni usside arv pole suurem kui kaks. 5 mm pikkuse nappteo kojas võib elada 10–15 väheharjasussi (*Chaetogaster limnaei*), kes söövad vetikaid nagu tigu isegi. Kiilivastsete seljale tiivatuppede vahele ning ühepäevikuliste lõpuste vahele armastavad kinnituda väikesed surusääsklaste vastsed, kes paremate kohtade pärast omavahel võistlevad. Ka veeputukate valmikutele kinnituvad vesilestade vastsed ei pruugi seal alati toituda, vaid kasutavad neid lihtsalt levimiseks.

Haiguslikud parasiidid võivad ohvrite seas suurt suremust põhjustada. Bakterid perekonnast *Aeromonas* võivad tappa suurema osa ahvenate asurkonnast. Heterotroofne protist, siseparasiit *Caullerya mesnili* võib hävitada suure osa vesikirbulisi *Daphnia galeata*. Põhja-Ameerikast pärit vähikatk (sugutu seen *Aphanomyces astaci*) ei mõjuta kuigivõrd kohalike vähkide elu, kuid mõjub surmavalt Euroopa jõevähile (*Astacus astacus*). Mõned silmud (*Lampetra*) on olulised jõekalade välisparasiidid, kutsudes esile nende surma.

Ka veeõitsengut põhjustavad vetikad ja tsüanobakterid kannatavad parasiitide (nii seente kui ka kiirikbakterite) surve all.

Filtreerivatel kiivrikutel on väga palju mikroparasiite (bakterid, seened), kes asustavad verd, rasva ja maoseina. Tüüpiline näide on pärmseen *Metschnikowia bicuspidata*. Kiivrikud neelavad seente nõeljaid eoseid, mis tungivad läbi maoseina ja alustavad arengut veres (hemolümfis). Seened võivad lõpuks täita kogu kehaõõne, nii et keha ei paista enam läbi. Surnud loomast vabanevad vette uued eosed.

Mõned parasiidid pole otseselt surmavad, kuid hävitavad kiivrikute sigimisvõime, näiteks bakter *Pasteuria ramosa.*

Konnadel leidub kõiki peamisi loomparasiite (protiste, imiusse, paelusse, kidakärsseid, ümarusse). Mõnel neist on väga keeruline elutsükkel; näiteks rohukonnal (*Rana temporaria*) nugiva imiussi *Gorgoderina vitelliloba* vastsed peavad mõnda aega elama hoopis herneskarpide (*Pisidium*) lõpustel.

Nakatumine võib muuta peremeeslooma käitumist, nii et see teeb ta kiskjatele märgatavamaks ja kättesaadavamaks. Ühtlasi soodustab see parasiidi enda levikut. Näiteks paelussiga *Schistocephalus solidus* nakatunud ogalike söögiisu kasvab nii palju, et nad ei vaevu enam röövkalade eest varjuma, sattudes seega ise kergemini saagiks. Linnuroniga (*Ligula intestinalis*) nakatunud särjed siirduvad madalasse vette, muutuvad loiuks ja ujuvad veepinna lähedal, kust lindudel on neid lihtne tabada.

Peremeesloomadel on kohastumusi, mis aitavad parasiitide mõju vähendada. Näiteks ogalikud ei söö parasiitidega nakatunud aerjalalisi. Konnad ei taha kudeda tiiki, kus leidub imiussidega nakatunud tigusid.

**TOIDUAHELAD** **Toiduahel** (*food chain*) on skeem, mis näitab, missugused organismid millest või kellest toituvad (joonis 2.139). Selle aluslüli on niisugused taimed, protistid ja bakterid, kes toodavad orgaanilist ainet ise. Neid nimetatakse **tootjateks** ehk produtsentideks ehk autotroofideks. Tootjatest otseselt või kaudselt toitujad on **tarbijad** ehk konsumendid ehk heterotroofid. Tarbijad võivad süüa taimi, teisi tarbijaid või nende lagunemisjäänuseid.

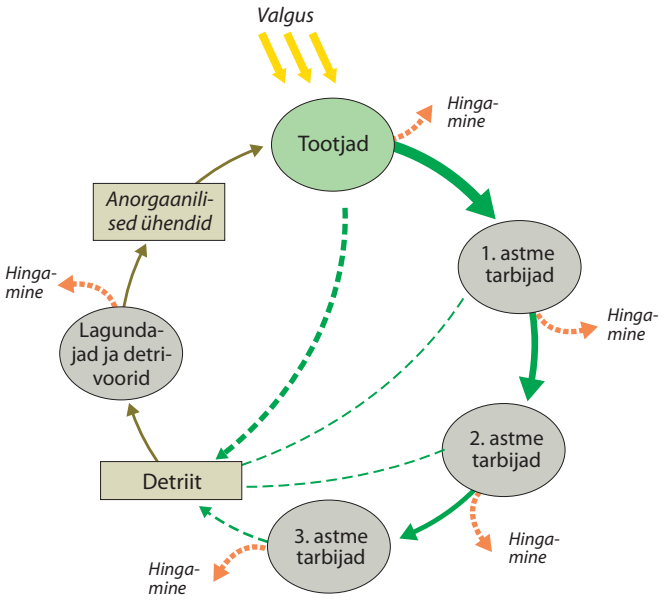
Tootjad moodustavad toiduahelas esimese **troofilise taseme**, tootjate sööjad (esmased tarbijad) teise, nendest toitujad (teisesed tarbijad) kolmanda jne. Näiteks on planktonvetikatest toituvad zooplankterid esmased tarbijad ja neid söövad kalamaimud teisesed tarbijad. Toiduahela kõrgeimatel tasemetel olevaid liike (suured röövkalad, röövlinnud, hülged) nimetatakse **tippkiskjateks**. Mõni toiduahel võib lõppeda sellise liigiga, mille täiskasvanud esindajad on mõõtmetelt suured, nii et enamasti ei sööda neid elusalt teisiti kui ainult noorjärkudena (nt suured limused, sammalloomad, pilliroog). Nende täiskasvanud isendeid tarbivad alles **redutsendid** ehk lagundajad (laiba- või detriidisööjad loomad, seened ja bakterid). See toiduahela osa on **laguahel**, mis koosneb surnud tootjate ja tarbijate sööjatest, esmastest lagundajatest ning lõpuks mikroobidest, kes lagundavad orgaanilise aine anorgaaniliseks (joonis 2.139).

Tootjate keskmine biomass on ligikaudu kümme korda suurem kui esmaste tarbijate oma. Tüüpiliselt läheb igale järgmisele tasemele *ca* 1/10 eelmisel tasemel salvestunud energiast. Tasemete arv ületab harva viit. Seega jõuab viiendale tasemele ainult 1/100 000 esmaste tootjate energiast. Ülejäänu kulub ainevahetusele ja liikumisele ning väljub ahelast seedimatute osade ja kaduma läinud isendite kujul. Ka esmaste tootjate endi ainevahetuskulud pole järgmistele tasemetele kättesaadavad.

Mida kõrgem on troofiline tase, seda suuremad on tavaliselt isendid (v.a suurtest taimedest toitujad ja parasiidid). Näiteks fütoplanktonist toituva zooplanktoni isendid on fütoplankteritest palju suuremad, väikesed kalad zooplankteritest suuremad jne. Koos isendi suurenemisega väheneb isendite arvukus.

Tegelikult on paljud liigid segatoidulised – korraga või vaheldumisi nii esmased, teisesed kui ka järgmiste tasemete tarbijad (nt pardid, suured vähid) või muudavad toitumistüüpi elu jooksul.

Enamasti on koosluses rohkem kui kaks troofilist taset. Pelagiaalis on toiduahelad sageli pikemad kui bentaalis, sest seal leidub rohkem esmastootjaid. Bentaalis võib elada liike, keda keegi peale lagundajate ei suuda hävitada (nt käsnad, sammalloomad, suured karbid).




**2.139.** Toidu- ja laguahela skeem koos aineringe ja energiavooga.

Troopilistes vetes on toiduahelad enamasti pikemad kui jahedamates vetes, sisaldades isegi 6–7 taset. Mida rohkem on tasemeid, seda rohkem liike saab osa samast lähteenergiast. Mida suurem on koosluse liikide biomass, seda lihtsam on tavaliselt tema troofiline ehitus (seda vähem on troofilisi tasemeid) ja seda suurem on ühe liigi osakaal.

Koosluse omavahel põimunud toiduahelate kogumit nimetatakse **toiduvõrgustikuks** (*food web*).

**TOIDUAHELAD PLANKTONIS JA NEKTONIS** Põhjalikult on uuritud planktoni-nektoni toiduahelat. Herbivoorne zooplankton toitub autotroofsetest protistidest neid kas fagotsütoosi teel ükshaaval endasse imedes (heterotroofsed protistid), neelates (aerjalalised) või filtreerides (vesikirbulised ja keriloomad).

Et vesikirbuliste, eriti kiivrikute osa selles protsessis on paljudes järvedes väga oluline, on toitumise iseloomustamiseks tähtis teada filtreerimiskiirust. Enamiku kiivrikuliikide tabatavate toiduosakeste alamsuurus on 1 µm, mis võimaldab nende eest pääseda sellest väiksemate mõõtmetega fütoplanktonil (pikoplankton) ja bakteritel. Küll aga toituvad just sellise suurusega osakestest meelsasti paljud protistid (rips- ja viburloomad). Aerjalalised söövad peamiselt suurematerialist toitu kui vesikirbulised ning suudavad seda paremini valida. Keriloomade toit on liigiti väga erinev.

Peale otseselt fütoplanktoni toodetud orgaanilise aine moodustab planktoni esmaste tarbijate toidust suure osa vees lahustunud orgaaniline aine, mis pärineb nii fütoplanktoni, zooplanktoni kui ka kalade ainevahetusjääkidest. See jõuab tarbijateni bakterite ja heterotroofsete protistide (rips- ja viburloomade) vahendusel:

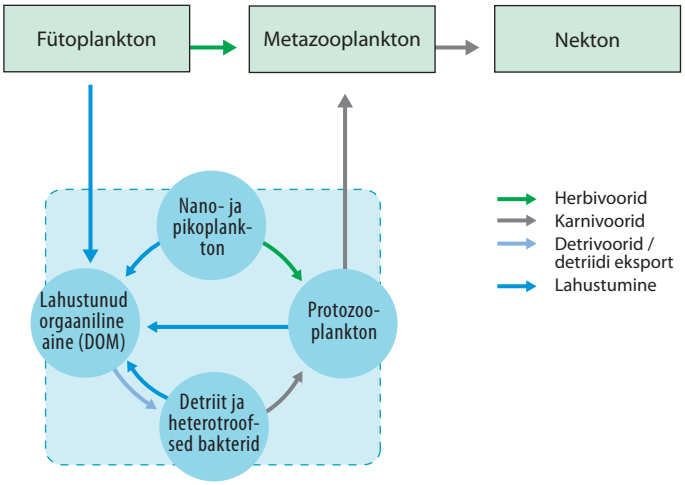
bakterid omastavad lahustunud aineid, väikesed protistid toituvad bakteritest, suured aga väikestest, muutes lahustunud aine nõnda kättesaadavaks suuremale zooplanktonile. Seda toiduahela osa planktonis nimetatakse **mikroobseks linguks** (*microbial loop*; joonis 2.140).

Toiduahela talitlemist planktonis reguleerib ühelt poolt kättesaadava algse toidu (lahustunud toiteainete) hulk, teiselt poolt tipptarbijate, eriti kalade toitumise intensiivsus.

Toiteainete hulk mõjutab positiivselt eelkõige tootjate biomassi. Kui eeldada, et troofilised tasemed on omavahel positiivses korrelatsioonis, saame järgmise rea: *rohkem lahustunud toiteaineid* → *rohkem fütoplanktonit* → *rohkem zooplanktonit* → *rohkem zooplanktonist toituvaid (lepis)kalu* → *rohkem röövkalu* (**ülenev mõjuahel**, *bottom-up control*; joonis 2.141).

Kui aga lähtuda troofiliste tasemete toitumise intensiivsusest, siis tundub, et kõrvuti asuvad troofilised tasemed peaksid olema omavahel negatiivses korrelatsioonis: *rohkem röövkalu* → *vähem lepiskalu* → *rohkem zooplanktonit* → *vähem fütoplanktonit* → *rohkem lahustunud toitaineid* (**alanev mõjuahel**, *top-down control*). Kui mõni ahelalüli on tasakaalust väljas, muutub kogu süsteem. Kui veekogus pole suuri röövkalu (need on näiteks valikuliselt välja püütud), siis puuduvad lepiskaladel vaenlased. Seega tekib olukord, kus zooplanktonit on vähe, kuid fütoplanktonit palju.

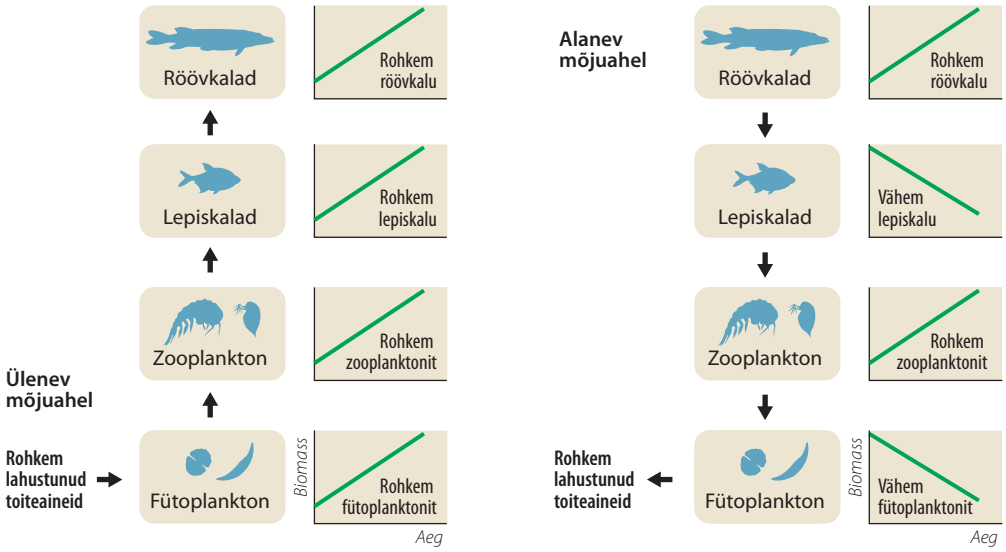
Mida kõrgem on troofiline tase, seda väiksem on selliste korrelatsioonide mõju. Näiteks kui vees leidub palju lahustunud toiteaineid, ei mõjuta kalad kuigivõrd fütoplanktonit. Pealegi võivad sellistes oludes kergesti areneda hoopis koloonialised tsüanobakterid, kellel puuduvad otsesed vaenlased ja millesse kogunev orgaaniline aine mööda toiduahelat enam edasi ei kandu.




**2.140.** Mikroobse lingu kaudu liigub toiduvõrgustikus selline orgaaniline aine, mis on juba korra lagunenud ning läheb "taaskasutusse".

Kalade mõju suureneb toiduvaestes järvedes. Pelagiaalis on röövkalade survel võrdlemisi tähtis osa. Järvevee omaduste reguleerimist kalastiku koosseisu kaudu nimetatakse biomanipulatsiooniks. Tavaliselt suurendatakse röövkalade ja/või vähendatakse lepiskalade hulka, et zooplankton saaks paremini fütoplanktonit tarbida ning vesi muutuks läbipaistvamaks. Lepiskalad mitte ainult ei vähenda zooplanktoni hulka, vaid suurendavad väljaheidete kaudu ka fütoplanktoni toidubaasi. Väikestes toidurikastes tiikides sõltub vee läbipaistvus sageli sellest, kas tiigis leidub lepiskalu, kes hävitavad fütoplanktonist toituvat zooplanktonit. Samas võivad rohke zooplanktoni korral vohama hakata hoopis suurtaimed.

**2.141.** Ülenev ja alanev mõjuahel



Üldjuhul ei sõltu seisuvete toiduahel ainult autohtoonsest esmasproduktsioonist, vaid alati lisandub ka allohtoonset orgaanikat – seda rohkem, mida tugevam on läbivool ja mida soisem valgla. Teiseks ei asu esmased tootjad mitte ainult planktonis, vaid ka bentoses ja perifüütonis. Vooluvete toiduahelas domineeribki allohtoonne orgaaniline aine ning fütoplanktoni asemel on peamine autohtoonne tootja hoopis fütobentos.

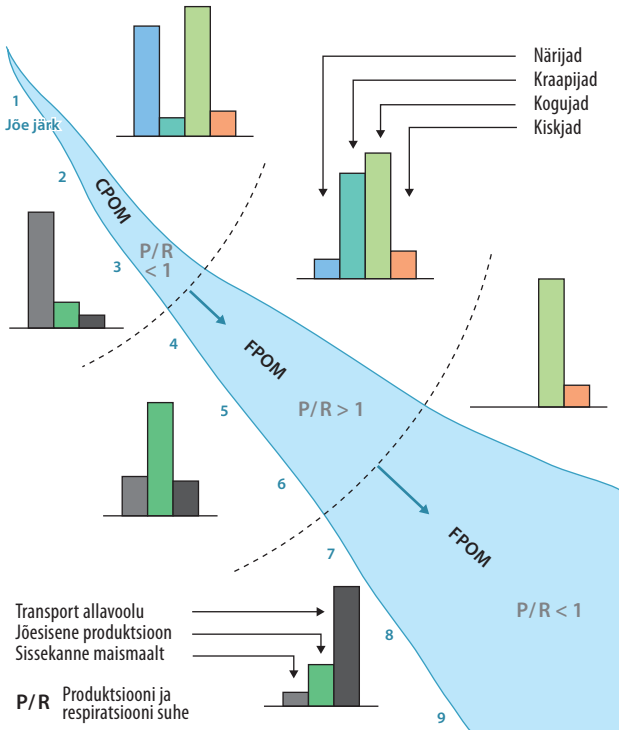
Alanev mõjuahel on levinud ka järvede bentoses. Näiteks mõned suurselgrootud (teod ja surusääsklased) toituvad perifüütonist, kalad aga suurselgrootutest. Kui kalad eemaldada, väheneb perifüütoni hulk oluliselt. Rootsis püüti eutroofsest Ringsjöni järvest välja latikad, kes toitusid peamiselt litoraali põhjaloomadest. Tulemuseks oli vee selginemine kogu järves ning põhjaloomade arvukuse tõus, mis ühtlasi suurendas neist toituvate partide arvukust järvel.

**TOIDU PÄRITOLU** Läbipaistvates järvedes on suurem osa lahustunud orgaanilisest ainest autohtoonne, tumedaveelistes aga allohtoonne. Vähene läbipaistvus takistab ühtlasi autohtoonse osa suurenemist. Vooluvetes on enamasti ülekaalus allohtoonne lahustunud orgaanika, sest neil on väga palju piirpinda maismaaga.

Tarbitava toidu päritolu saab otse hinnata seedimata toiduosakeste analüüsi teel. Varem kasutati selleks seeditud massis säilinud valkude elektroforeetilist määramist, viimasel ajal aga maosisu metagenoomikat. Maosisu uurimisel võib muidugi ette tulla ebamäärasusi: näiteks on magu tühi või on tarbitud sega- või asendustoitu.

Selle üle, kas uuritava olendi toit pärineb veekogust endast või maismaalt, saab otsustada süsiniku stabiilse isotoobi $^{13}C$ suhtelise sisalduse ($\delta^{13}C$) järgi maosisus või kehakudedes, sest see suhe muutub toiduahelas ülespoole liikudes vähe. Maismaal on see väiksem kui veekogudes. Lämmastiku stabiilse isotoobi $^{15}N$ suhteline sisaldus ($\delta^{15}N$) seevastu suureneb igal uuel troofilisel tasemel 3–4‰. Segatoidu korral jääb muutus alla 3‰. Näiteks on suurte põhjaeluliste vähkide $\delta^{15}N$ ligikaudu viis korda suurem kui pisematel põhjaloomadel. Kõige usaldusväärsem on isotoopanalüüsi kombineerimine toidutüüpide otsese uurimisega.

Orgaanilise aine tekkekoha ning osakeste suuruse muutumine võib toiduahelat oluliselt mõjutada. Näiteks väikestes metsas paiknevates vooluvetes tarbitav toit on enamikus pärit maismaalt, sest puud varjavad veetaimede eest valguse, kuid samas kukuvad vette puulehed, oksad ja viljad. Kui ojast puulehed eemaldada, väheneb märkimisväärselt nii neist toituvate selgrootute närijate kui ka selgrootutest toituvate kalade hulk. Metsaraie kaldalt suurendab aga veetaimestiku hulka. Suuremates jõgedes säilib suur autohtoonse peene ja lahustunud orgaanilise aine sisaldus, mis pärineb väikestest lisajõgedest.




**2.142.** Jõe pidevuse teooria kohaselt muutuvad peajões allavoolu nii toitumistüübid kui ka jõe füüsikalised näitajad.

**TOITUMISTÜÜPIDE MUUTUMINE VOOLUVETES PIKI SÄNGI** Ehkki vooluveed on struktuurilt ja talitluselt keerukad, sõltuvad nende kooslused siiski väga palju jõe suurusest. Seda seaduspära kirjeldab **jõe pidevuse teooria** (*river continuum concept*; joonis 2.142). Peajões ülalt allavoolu ning lisajõgedes peajõe suunas muutuvad nii valdavad toitumistüübid kui ka paljud muud iseloomulikud tunnused üldjuhul järgmiselt:

→ suureneb vooluhulk, vee sügavus ja sängi laius,
→ väheneb voolukiirus, põhi muutub kivisest pehmemaks,
→ tõuseb vee keskmine temperatuur, kuid väheneb selle kõikumisvahemik. Kalastik muutub külmaveelisest (lõhilased) soojaveeliseks (karplased).

Kõige väiksemates, Strahleri järgi 1.–3. järku ojades leidub kiire voolu ja suure varjutatuse tõttu vähe autotroofe. Esmastest tarbijatest on neis ülekaalus närijad, sest vette satub palju puulehti. Närijate töö tulemuseks olev FPOM toidab filtreerijaid. Selgrootute ja kalade liike on vähe. Jõgi tarbib rohkem energiat, kui ise toodab: produktsiooni ja respiratsiooni suhe (vt ptk 2.6.3) on enamasti väike.

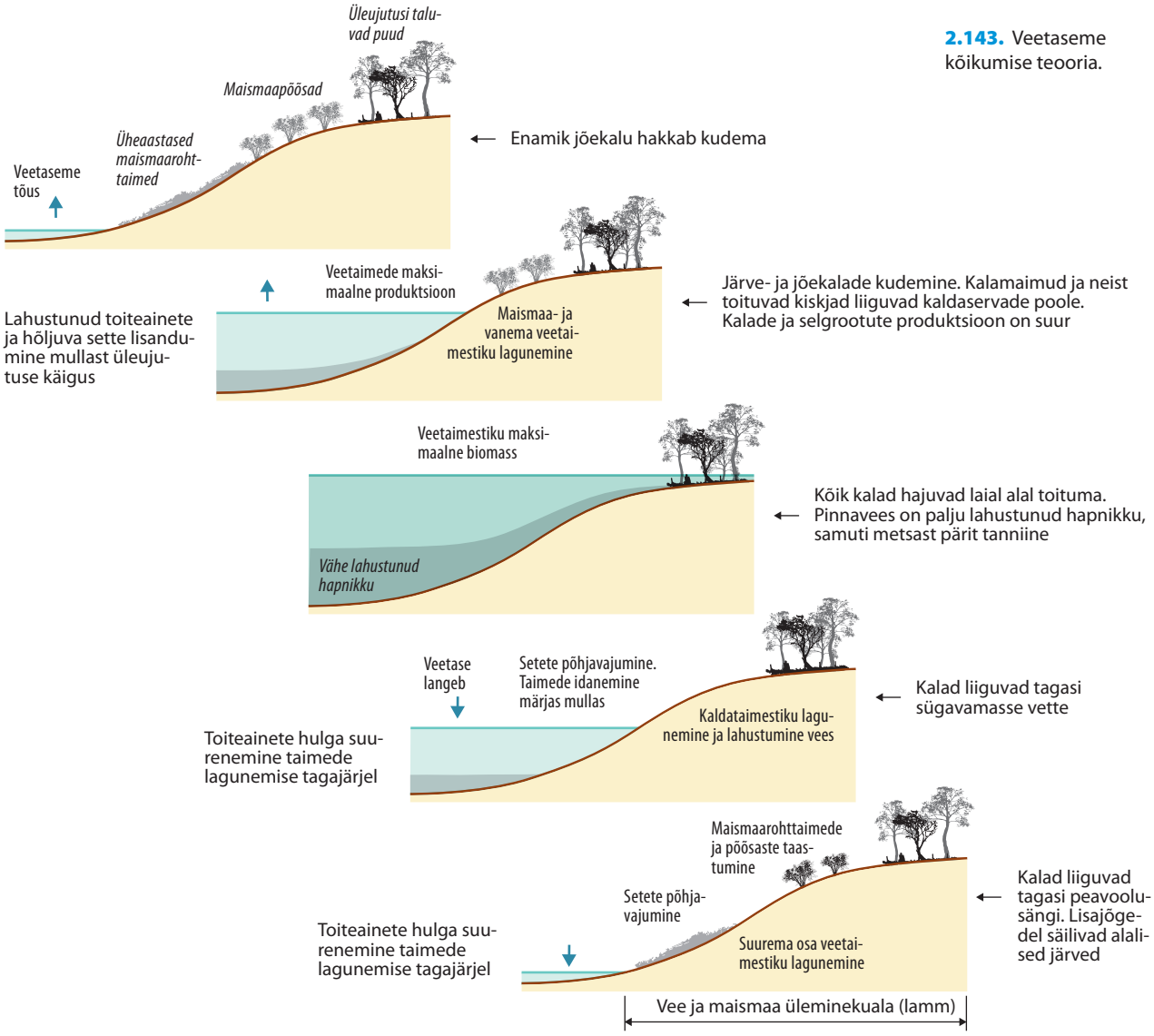
Keskmise suurusega, 4.–6. järku jõgedes on palju perifüütonist toituvaid kraapijaid, sest jõesäng on küll madal, kuid sinna pääseb suurema laiuse tõttu rohkem valgust kui ülemjooksul. Selgrootute liigirikkus on muude järkudega võrreldes suurim. Põhi on kõige

mitmekesisem, leidub nii kiviseid kui ka liivaseid alasid, samuti puitu ja veetaimi. Produktsioon ja respiratsioon on ligikaudu võrdsed, sest kohapealsete autotroofide panuse tasakaalustab FPOM ülaltpoolt.

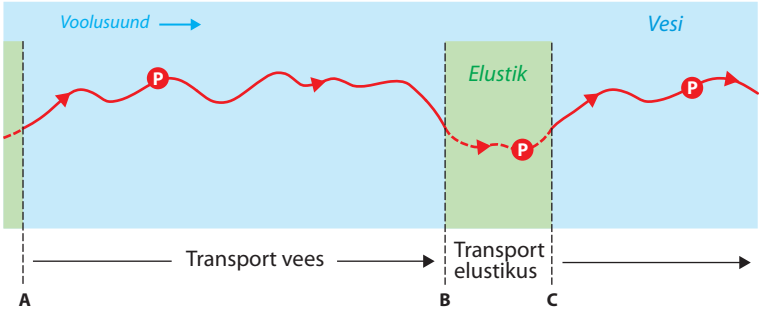
Suurtes, 7. ja suuremat järku jõgedes on säng tavaliselt lai ja sügav ning vesi vähese läbipaistvusega. Nii on valguskülluses hoolimata perifüütonit vähe. See-eest leidub palju FPOMi, mida kasutavad filtreerijad. Põhi on sageli ühtlaselt liivane või mudane, mis vähendab selgrootute liigirikkust. Produktsioon on taas respiratsioonist väiksem.

Jõe pidevuse teooria tugineb peamiselt parasvöötme mägedest algavatele jõgedele ega kehti igal pool. Näiteks metsatutes piirkondades (polaaraladel, kõrgmägedes või kõrbetes) ei satu puulehed toiduahelasse. Voolukiirus võib mõnikord olla suurim just alamjooksul (näiteks Põhja-Eesti jõgedel).

Aine- ja energiaringet jõgedes, kus pikkade üleujutuste tõttu püsib olulisel määral nii vooluveeline kui ka seisuveeline olukord (näiteks suurtes troopilistes jõgedes, nagu Amazonas või Niger), kirjeldab **veetaseme kõikumise teooria** (*flood pulse concept*; joonis 2.143). Üleujutust ei tule vaadelda mitte kõrvalekalde ega looduskatastroofina, vaid loomuliku ning paljudele liikidele hädavajaliku nähtusena. Suur veetaseme kõikumine on paljude jõgede iseloomulik tunnus, millest nende produktiivsus just sõltubki. Nende jõgede tippkiskjad (kalad ja krokodillid) suunduvad kõrgvee ajal lammidele ning saavad oma toidu sealt. Vee alanedes taanduvad nad uuesti jõesängi. Üleujutatud metsades variseb puudelt vette lehti, oksi, vilju ja puudel elavaid maismaaselgrootuid. Paljud kalad isegi koevad üleujutatud aladel, et kindlustada oma noorjärkudele järjepidev areng. Eesti kalaliikidest koeb suurvee ajal lammil näiteks haug.




**2.143.** Veetaseme kõikumise teooria.




**2.144.** Kõverjoon näitab orgaanilisest ainest vabanenud fosforiaatomi teekonda jões punktist A punkti B, kus ta satub taas elustiku koosseisu. Veevooluga võrreldes triivib elustik allavoolu tavaliselt palju vähem, mistõttu sama aatom satub uuesti vette juba punktis C. Ühe sellise perioodi pikkus koosneb niisiis vees ja elustikus kulgetud distantside summast.

■ **TOIDU KORDUVKASUTUS VOOLUVETES** Toitu mitte ainult ei tarbita, vaid ka vabastatakse. Seisuvetes ja maismaal saab üsna usaldusväärselt hinnata, kui palju on elustikule tarvis toiteelemente (lämmastikku, fosforit, räni jne). Neid tarbivad autotroofid anorgaanilisel kujul, nad kaasatakse biomassi ja lagundatakse pärast tootjate või nende tarbijate surma samas kohas jälle anorgaaniliseks tagasi. Vooluvete vastavas aineringes jõutakse kiire voolu tõttu tarbida ainult väikest osa sellest, mis ringesse siseneb. Ka tarbitav osa liigub tarbimise kestel allavoolu. Seega kasutatakse sama ainet lühikese aja ja vahemaa jooksul korduvalt (*spiraling*). Näiteks ühe fosforiaatomi teekonna pikkus alates jõkke sisenemisest kuni taaskasutuseni on keskmiselt 200 m, millest suurem osa möödub veevoolus (joonis 2.144). Ligikaudu 1/10 teekonnast on fosfor CPOMi ja FPOMi koosseisus ning ainult 1/100 tarbijates (tigudes).

Korduvkasutuse usaldusväärseks hindamiseks on vaja teada ka hüporeilise vee hulka, kuid seda on enamasti väga raske määrata. Spiraali ühe perioodi pikkus on võrdeline vooluhulga ja -kiirusega ning bentoseloomade aktiivsuse ja triiviga ning pöördvõrdeline elustiku ainevahetuse aktiivsusega. Limiteerivate toiteainete (fosfaadid, ammoonium) spiraali periood on lühem kui muudel ainetel.

Kihulaste vastsed ei suuda mitte ainult FPOMi fikseerida, vaid ka üksteise väljaheiteid tarbida. Neid on allavoolu asuvatel isenditel isegi kergem püüda ja süüa kui peent orgaanilist ainet. Süsinikuaatomi taaskasutuse perioodi pikkus võib sel juhul olla alla 6 m. Seega sõltub vooluvetes allavoolu paiknevate organismide elu suurel määral ülesvoolu asujatest (nt filtreerijate toidu hulk sõltub närijate toitumisaktiivsusest).

## 2.5.2. Konkurents

Konkurents – olukord, kus isendite või liikide vastastikused suhted on negatiivsed – tekib kõige tõenäolisemalt sama liigi isendite vahel või sarnaste funktsioonidega liikide vahel. Paljudel veeliikidel on sarnased vajadused, mille rahuldamise käigus tekib mõne vajaliku ressursi puudus või tuleb taluda võistlevate isendite kohalolekut. Tavaliste ressursside hulka kuuluvad näiteks toit, ruum, valgus, partnerid ja sigimisalad. Vastasmõju seisneb isendite käitumises, mis ei ole otsene ärasöömine ega parasiteerimine. See võib olla lihtsalt agressiivne käitumine, teiste liikide eest ressursside äravõtmine või neile ligipääsu piiramine. Vastasmõju näiteks võib tuua olukorra, kus suuremad kalad hirmutavad sama liigi väiksemaid isendeid kudemispaikadelt eemale. Konkurents muutub oluliseks siis, kui peamised olelustingimused on vähemalt rahuldavad.

**Ressursikonkurentsi** tagajärjeks on kahte tüüpi käitumine. Spetsialistid (k-strateegid) lepivad väga väikese ressursiga, generalistid (r-strateegid) seevastu kohastuvad ressursi suurele hulgale. Näiteks suurtaimedest on valguse suhtes generalistid vesihüatsint ja lemled, kes võimaluse korral katavad kogu veepinna.

**Ruumikonkurents** ilmneb sageli sessiilsete liikide vahel. Näiteks käsnad ja sammalloomad võivad hõivata perifüütonile sobiva ala ja vastupidi. Rändkarbid kinnituvad suurematele karpidele, kui pole piisavalt kõva põhja (joonis 2.145). See segab suurte karpide liikumist ning ühtlasi on tegu võistlusega toidu pärast.

**2.145.** Ruumikonkurents: järvekarbile kinnitunud rändkarpide kobar. Et elus püsida, peavad rändkarbid kinnituma kõvale substraadile: kividele, liigikaaslastele või muudele limustele.

Vooluvetes, kus häid kinnituskohti napib, on selgrootute võitlus ruumi pärast tavaline näiteks sessiilsete pisiehmeslaste (*Hydroptilidae*), tunnelehmeslaste (*Psychomyiidae*), jõgiehmeslaste (*Hydropsychidae*) ja kihulaste vastsete vahel.

Mikroobid mõjutavad üksteist mürgiste ainevahetusjääkidega (**allelopaatiline konkurents**). See mõjub ainult rakkude väga suure hulga korral (nt veeõitseng). Paljud niisugused ained on ka signaalained või lihtsalt jäägid. Eriti mõjusalt kasutavad selliseid mürke tsüanobakterid (*Microcystis, Anabaena, Aphanizomenon*). Suurtaimede kaitseained võivad pidurdada perifüütoni kasvu nendel.

Isendi konkurentsivõimet iseloomustabki see, kuidas ta tarbib ressursse ja talub võistlejaid. Suured isendid toituvad kiiremini ja on väikestest tugevamad, kuid surevad kergemini toidupuuduse korral. Liigi konkurentsivõimet näitab tema asurkonna algne suurus, sigimispotentsiaal (võime ennast taastoota piiramatute ressursside korral) ning keskkonnamahutavus (*K*), s.t isendite arv, mida konkreetne veekogu on võimeline ära toitma.

Liigi asurkond algul suureneb, sest sünnivad noored isendid. Ressursside ammendumise tõttu asurkonna suurus mingil tasemel tavaliselt stabiliseerub.

Asurkonna suuruse sõltuvust näitab **kasvukõver**

$$\frac{dN}{dt} = rN\frac{K-N}{K} \ ,$$

kus $N$ on asurkonna arvukus, $t$ aeg, $r$ asurkonna kasvukiirus ja $K$ keskkonnamahutavus.

Väikese arvukuse korral on $(K–N)/K$ ligikaudu 1 ning kasvukiirus seega lähedane eksponentsiaalsele. Väga suure arvukuse korra on $N$ ja $K$ peaaegu võrdsed ning asurkonna kasv ligineb nullile.

Kui arvestada konkurentsis rohkem kui üht liiki, nii nagu looduses ongi, siis tuleb hinnata ka liikidevahelist mõju, mis muudab võrrandid keerulisemaks ja suurendab nende arvu. Näiteks kahe liigi korral iseloomustab nendevahelist konkurentsi kaks võrrandit:

$$\frac{dN_1}{dt} = r_1N_1\frac{K_1 - N_1 - \alpha_{12}N_2}{K_1}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = r_2N_2\frac{K_2 - N_2 - \alpha_{21}N_1}{K_2} \ ,$$

kus lisaks eelnevale tuleb arvestada omavahelise konkurentsi tugevuskoefitsiente (vastavalt $\alpha_{12}$ ja $\alpha_{21}$).

Kui üks liik mõjutab teist rohkem kui teine esimest, siis on konkurents asümmeetriline. Kui aga ühe liigi nõudlus ressursi järele kattub teise omaga 100%, siis võidab tugevam liik, kes tõrjub nõrgema süsteemist välja.

Tegelikkuses tasakaal liikide vahel pidevalt muutub. Igas elupaigas on palju rohkem liike ja ressursse kui kaks. Teiseks pole ühegi liigi ühegi asurkonna vanuseline struktuur täpselt samasugune ega ruumis ühtlaselt jaotunud, seega on tegelikud seosed palju keerulisemad.

**Planktoni paradoks**. Teoreetiliselt peaks kõige tõhusam ressursitarbija kõik teised välja tõrjuma. Nii oleks näiteks fütoplanktonis ainult üks dominantliik. Tegelikult nii ei juhtu, sest ressursid pole ühtlaselt jaotunud ja konkurents pole ainus liikidevaheline mõju. Tõhusad ressursikasutajad on tavaliselt tundlikud muude keskkonnatingimuste ja vaenlaste suhtes, mis ei pruugi olla sama olulised r-strateegidele. Pealegi on enamik liike tavaliselt haruldased (kas juhuslikud, tulnukad või läbirändajad).

Et süsteem oleks stabiilne ja ajas püsiv, ei tohi keskkonnas toimuda suuri muutusi, mille tagajärjel hakkaks mõni liik ülearu domineerima. Mida rohkem on liike, seda vähem sõltub üks liik teise liigi hulga muutumisest. Väga suured muutused muudavad ka konkurentsisuhteid. Liik, mis varem oli eelisseisundis ja teel domineerimisele, võib seetõttu sattuda ebasoodsasse olukorda.

Stabiilsust väljendab **liigierisus**, mis on seda suurem, mida vähem isendeid kuulub samasse liiki. Üks tavalisemaid, Shannoni liigierisus, arvutatakse järgmise valemi järgi:

$$H' = -\sum_{i=1}^{s}\frac{n_i}{N} \times \log_2\frac{n_i}{N} \ ,$$

kus $n_i$ on $i$-nda taksoni arv, $N$ isendite koguarv ja $s$ taksonite koguarv. $H'$ on seda suurem, mida rohkem on proovis taksoneid ja mida väiksem osakaal on igal taksonil eraldi. Näiteks kui $n = N$, on kõik isendid samast liigist ja erisus võrdub nulliga.

Sama toitu tarbivad liigid asustavad konkurentsi vähendamiseks samas piirkonnas eri elupaiku või samu elupaiku eri aegadel. Näiteks leidub samas kohas eri aegadel erinevaid planktoniliike. Jõgedes sõltub sama voolukiiruse ja sügavuse juures taimestiku liigiline koosseis hoopis kaldapuude varjutusest. Jõgiehmeslaste (*Hydropsychidae*) vastsetel on samas jõelõigus korraga erinevate kehamõõtmete ja võrgusilmasuurusega liike. Eluviisilt lähedased liigid võivad jõgedes samu kohti asustada ka eri aastaaegadel (nt ühepäevikulised ja kevikulised). Samas tiigis võib nii klaasiksääskedel kui ka selgsõuduritel elada kummalgi üks liik kalda ääres, teine avavees. Jõekarplased jagavad elupaiku voolukiiruse järgi: üks liik järves, teine järve väljavoolus, kolmas jões. Lõhilased jõeforell (*Salmo trutta*) ja arktika paalia (*Salvelinus alpinus*) on eraldi elades mõlemad kõigesööjad, kuid sama järve asustades peab paalia piirduma peamiselt zooplanktoniga.

Valgust leidub järve veekihis rohkem kui põhjas, toitu aga põhjas rohkem kui veekihis. Seega on perifüütonil eelis madalas, fütoplanktonil aga sügavas vees.

Sama seos kehtib suurtaimede puhul. Erandiks on kaldaveetaimed, kes kasutavad paremat osa mõlemast ressursist. Ka nende seas toimub liikidevaheline võistlus: näiteks ahtalehisel hundinuial (*Typha angustifolia*) on jäme risoom ja kitsad lehed, laialehisel (*T. latifolia*) aga peen risoom ja laiad lehed.

### 2.5.3. Liikide arvu muutumine koosluses

Uute liikide ilmumine süsteemi võib olla looduslik ja toimuda kas liikumise (aktiivse või passiivse migratsiooni) või liigitekke teel. Sama kehtib ka liikide kadumise (väljasuremise või lahkumise) kohta. Inimese levitatud liike võib pidada „bioloogiliseks reostuseks“, ehkki pärast inimmõju kadumist alluvad sellised tulnukad edaspidi ikkagi looduslikele vastasmõjudele.

**AKTIIVNE JA PASSIIVNE LIIKUMINE** Kõige tavalisem viis, kuidas süsteemi liigiline koosseis muutub, on uute liikide lisandumine või liikide kadumine **aktiivse liikumise** teel. Tüüpiliseks näiteks on siin siirdekalad – paljud lõhilased ja angerjas, kelle kudemis- ja toitumisala asuvad teineteisest kaugel (meres ja magevees). Poolsiirdekalad (näiteks latikas) rändavad sisevete eri osade vahel (näiteks järvest jõkke või jõe alamjooksult ülemjooksule).

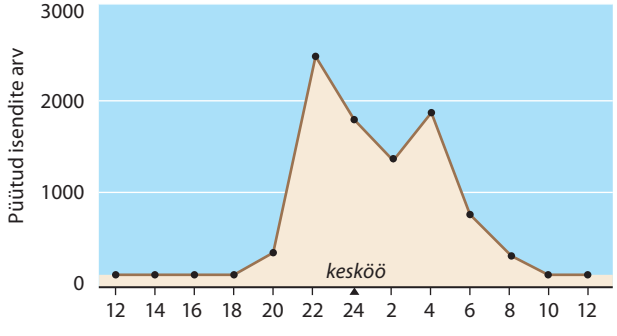
Planktoni ja bentose väiksem liikuvus nektoniga võrreldes ei tähenda nende liikumatust. Meenutagem kas või planktoni ööpäevast ja sesoonset vertikaalset migratsiooni, veeputukate lendu või paljude liikide pisikeste püsivormide **passiivset liikumist** kas tuule, jäätükkide, triivpuidu, ujuvate veetaimede või veelindude abil. Selgrootud võivad kinnituda suurematele loomadele ka tahtlikult (nt vesilestad) või siseparasiidina.

Passiivse levimise omaette viis on laevade ja paatidega. Et need ei järgi looduses pika aja jooksul väljakujunenud liikumisteid, satub harjumuspäratuid liike uutesse kohtadesse eriti just sel teel. Näiteks Euroopast on Põhja-Ameerika Suurde järvistusse „reisinud“ ja seal vohama hakanud planktonivähk silesaba-händur (*Bythotrephes longimanus*), rändkarbid *Dreissena polymorpha* ja *D. bugensis* ning kiisk (*Gymnocephalus cernuus*). Rändkarbid on samas ise Euroopas tulnukad kagu poolt. Peipsi järve litoraali asustab massiliselt meelega sissetoodud võõrliik, kirpvähiline *Gmelinoides fasciatus*.

Vooluvetes toimub passiivne pärivett **triivimine** vahetpidamata. See võimaldab seisuvetega võrreldes tavapärase liigilise koosseisu kiiret taastumist. Väga sagedad on triivis näiteks ojapäeviklaste (*Baetidae*), õrnpäeviklaste (*Leptophlebiidae*), kihulaste ja surusääsklaste vastsed ning kirpvähklased. Arvuliselt sisaldab triiv neist veel rohkem protiste ja muid mikroobe. Triivivad ka kalad ja kahepaiksed. Toitumistüüpide esindajatest leidub triivis rohkem närijaid, vähem kraapijaid ja filtreerijaid. Triivimine ise on ajutine, kuid regulaarne käitumine, näiteks uute toitumisalade hõivamiseks või vaenlaste eest põgenemiseks. Triiv toimub ööpäeva kestel korrapäraselt, paljudel suurselgrootutel eriti õhtul pärast päikeseloojangut ja hommikul enne päikesetõusu (joonis 2.146). Väga tugev triiv võib toimuda vastusena tugevale vihmahoole. See võib põhjaelustiku arvukust tunduvalt vähendada. Öist triivi pidurdab oluliselt tugev valgus, näiteks polaarsuvi või isegi tugev kuuvalgus. Üks öise liikumise põhjusi on sama mis planktonil seisuvetes: hoidumine kiskjate eest.

Et triivimine on ühesuunaline, liiguvad paljud liigid selle kompenseerimiseks vastuvoolu, kuigi see on energeetiliselt palju kulukam. Aktiivselt ujudes suudavad seda teha vähesed (kalad, kirpvähid, pindurid, mõned ehmestiivaliste vastsed). Putukate lennuvõimelised valmikud saavad vastuvoolu liikuda õhus. Juba vähesed edukalt munenud emased suudavad ülalpool asustust tublisti suurendada. Aktiivne vastuvoolu liikumine jääb siiski alati triivist väiksemaks.

Enamik invasioone ebaõnnestub ja nende kasutegurit on üldiselt raske hinnata. Ka suurem osa edukaid tulnukaid ei avalda senisele olukorrale kuigivõrd mõju. Märgatavaks muutuvad nad siis, kui suudavad uues kohas ülekaalu saavutada (nt rändkarbid Põhja-Ameerika Suures järvistus). Sageli on uued liigid head levijad, ehkki ei asusta kunagi eriti karme tingimusi (ajutised veed jms). See-eest päris ajutiste vete elustik saabki koosneda ainult „võõrliikidest“. Inimese levitatud liigid




**2.146.** Triivivõrguga püütud selgrootute ööpäevane arvukus Dartmoori jõgedes Edela-Inglismaal.

võivad just ise halvad levijad olla. Uue liigi püsimajäämine on tõenäolisem, kui endine süsteem oli juba mingil viisil häiritud, mida uustulnuk saab ära kasutada. Mida rohkem sama liigi isendeid üritab korraga levida, seda suurem on õnnestumise tõenäosus.

**LIIGITEKE** Teine suurem, aga aeglasem liigirikkuse muutuse põhjus on **liigiteke**, eriti isolatsiooni tingimustes, näiteks seni asustamata aladel (jõeorg, järvenõgu, saar) või nišis. Mõned vähesed isendid (partenogeneesi puhul ka ainult üks isend) võivad panna aluse sugulasliikidest kooslusele, kus liigitekke käigus hõivatakse kõik nišid filtreerijatest kiskjateni (nt kirevahvenlaste sugukond *Cichlidae* Aafrika järvedes).

**LAHKUMINE JA VÄLJASUREMINE** Liikide lahkumine kooslusest või **väljasuremine** on samuti loodusliik protsess, mida inimtegevus kiirendab, muutes seega oluliselt konkurentsisuhteid. Klassikaline näide on Victoria järv Aafrikas, kus 12 000 aasta jooksul tekkinud 300 kalaliigist hävitas ülepüük ja võõrliikide sissetoomine 20–30 aasta jooksul 200.

Et liike on palju ja igaühega neist võib konkreetsel liigil erinev seos olla, siis võib mingi liigi ilmumine või kadumine olla raskesti ennustatavate tagajärgedega. Eriti keeruline on ennustada süsteemi vastust arvuka segatoidulise liigi ilmumisele või kadumisele. Liikide vastus ebaregulaarsetele suurtele keskkonnamuutustele sõltub ka nende elueast. Üheaastase või lühema elueaga liigi asurkond hukkub, kui sigimine täielikult ebaõnnestub. Mitmeaastase elueaga liigid võivad sel juhul sigida järgmisel aastal või hiljem. Ehkki nende arvukus ühe aasta põlvkonna ärajäämise tõttu väheneb, ei tähenda see veel asurkonna hävimist. Teisest küljest on lühikese elueaga liigid sageli head levijad, nii et nende mujalt tulnud isendid võivad sama paiga kergesti uuesti asustada. Pikaealiste liikide puhul võib uute tulijate ilmumine ja suguküpseks saamine võtta aastaid (näiteks suurtel karpidel või mõnel kalaliigil).

**UUTE VEEKOGUDE ASUSTAMINE** Vooluvetes on päris uute veekogude esmasteks koloniseerijateks tavaliselt kahetiivalised (surusääsklased ja kihulased). Seda hõlbustab nii triiv kui ka putukate lend (niihästi passiivne – tuule abil – kui ka aktiivne levimine). Kliima soojenemise tõttu liustikust tekkinud uude ojasse Alaskal (USA) ilmus 13 aasta jooksul ainult kuus surusääsklaste liiki ja niitvetikaid. Ühepäevikulisi ja kevikulisi täheldati alles 20 aasta möödudes, ühtlasi hakkas siis muutuma surusääsklaste liigiline koosseis. Esimesed kalad (paaliad) ilmusid 23 aasta pärast ning veel kolm aastat hiljem kudes selles ojas juba 1000 lõhet. Selgrootutest ei jõudnud ojasse 30 aasta jooksul ühtki lennuvõimetut looma, tõenäoliselt levikubarjääride tõttu.

## 2.5.4. Mutualism

Paljudel liikidel on kasv kiirem, suremus väiksem ja sündimus suurem, kui nad elavad koos, mitte üksikult. Veekogudes on mutualismi maismaaga võrreldes vähe uuritud. Kõige lihtsamas mõttes võib mutualismina käsitada igasugust toiteainete ringet. Näiteks tekib närijate toitumise käigus detriidist palju peeneteralist orgaanilist ainet (FPOM), mis on toiduks filtreerijatele. Viimased suurendavad vee läbipaistvust, mis sobib hästi perifüütonile ja sellest toituvatele kraapijatele. Kõik nad eritavad ainevahetusjääke, mida vajavad bakterid, millest omakorda toituvad heterotroofsed protistid. Järgnevalt mõned näited mutualismi kohta.

- Enamiku veeloomad maos leidub baktereid (näiteks perekondadest *Vibrio*, *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Micrococcus*, *Aeromonas*), kes aitavad lagundada muidu seedimatut toitu ning konkureerivad haigusi põhjustavate bakteritega.
- Veesõnajalal *Azolla* on lehtedes erilised õõnsused, kus paiknevad lämmastikku fikseerivad tsüanobakterid *Anabaena azollae*. Taim saab peaaegu kogu vajaliku lämmastiku baktereilt.
- Surusääsklase *Cricotopus nostocicola* vastsed elavad tsüanobakterite *Nostoc parmelioides* kolooniates, neid ühtlasi väetades.
- Paljud vetikad asustavad mageveekäsnade sisemust, suurendades märgatavalt nende kasvukiirust.
- Autotroofsed tsüanobakterid võivad kombineeruda muude bakteritega, pakkudes neile lämmastikku ja orgaanilist ainet. Need omakorda tarbivad tekkivat hapnikku, mis muidu takistaks lämmastiku fikseerimist.
- Teod eemaldavad suurtaimedelt perifüütonit, mis nende eest valgust varjab, eritades samal ajal taimedele vajalikke lahustunud aineid.
- Tanganjika järve kirevahvenlastel on täheldatud mitme liigi koostööd järglaste eest hoolitsemisel.
- Sessiilsete liikide (nt pilliroog ja rändkarp) koloniseerimiskiirus on suurem, kui selles paigas juba leidub samast liigist isendeid.

## 2.5.5. Kommensalism ja amensalism

Kommensalismi tüüpiliseks näiteks on väikesemõõduliste isendite kinnitumine suuremate külge või peitumine nende vahele. Nii varjavad kalamaimud end veetaimestikus ja vetikad kinnituvad taimevartele. Teine põhiline kommensaalne käitumisviis on toitumine naaberliigile mittevajalikest eritistest (fekaalid, lima). Ühtlasi stimuleerivad loomade väljaheited taimede kasvu.

Amensalismi näiteks võib tuua veekogu põhja songivad ja selgrootuid otsivad kalad (näiteks karpkala), kes selle tegevuse käigus rikuvad suurtaimede elu (juurivad neid üles ja sogastavad vett).

## KÜSIMUSED

1. Miks kogunevad mõned veeorganismid parvedesse?
2. Mida söövad omnivoorid?
3. Mille või kellega tegelevad kraapijad?
4. Miks söövad mõned kalad oma liigikaaslasi?
5. Mis vahe on kommensaalil ja parasiidil?
6. Kes on tippkiskja?
7. Kelle kaudu jõuab planktoni esmaste tarbijateni vees lahustunud orgaaniline aine?
8. Kirjeldage jõe pidevuse teooriat.
9. Milles seisneb toidu korduvkasutus vooluvetes?
10. Miks triivivad selgrootud vooluvetes peamiselt öösiti?
11. Tooge näiteid ressursi-, ruumi- ja allelopaatilisest konkurentsist.
12. Kuidas lähedased liigid omavahelist konkurentsi pehmendavad?

## MÕISTED JA MÄRKSÕNAD

korrapäratu jaotumus
korrapärane jaotumus
kasvu ökoloogiline efektiivsus
troofiline koefitsient
respiratsioon
autohtoonne aine
allohtoonne aine
osmootne toitumine
herbivoorid
detrivoorid
karnivoorid
omnivoorid
parasiidid
filtreerijad
kraapijad
närijad
settesööjad
kannibalism
kairomoonid
alarmained
produtsendid
autotroofid
konsumendid
heterotroofid
redutsendid
toiduahel
toiduvõrgustik
laguahel
mikroobne ling
ülenev mõjuahel
alanev mõjuahel
jõe pidevuse teooria
veetaseme kõikumise teooria
konkurents
allelopaatiline konkurents
vastasmõju konkurents
planktoni paradoks
aktiivne liikumine
passiivne liikumine
triiv vooluvetes
liigiteke
väljasuremine
mutualism
kommensalism
amensalism

**2.147.** Nerka (*Oncorhynchus nerka*) kudemisränne Adamsi jões Kanadas.

# 2.6. Vee-elustiku asurkonnad ja nende muutumine

Isendite vastastikmõjude tõttu on asurkond nagu koosluski märksa keerulisem süsteem kui lihtsalt üksikisendite summa. Ta mitte ainult ei sõltu keskkonnast, vaid mõjutab seda ka ise.

Vee-elustiku puhul kehtivad samad ökoloogia põhimõisted mis maismaaelustiku puhul.

- **Asurkond** ehk populatsioon on samast liigist isendite rühm, mis (1) asustab oma levilas kindlalt piiritletud ruumiosa ning (2) kuulub kohapealse ökosüsteemi kooslustesse.
- **Ökosüsteemi** all mõistame tervikut, mille moodustavad toitumissuhete kaudu üksteisega seotud organismid koos neid ümbritseva keskkonnaga.

Asurkonna suurust iseloomustatakse sageli järgmiste tunnuste abil:

- **arvukus** – isendite koguarv,
- **asustustihedus** (*density*) – isendite arv pinna- või mahuühiku kohta,
- **ohtrus** (*abundance*) – liigi suhteline isendite arv proovis teiste liikidega võrreldes,
- **kohtamus** (*frequency*) – tõenäosus leida isendeid kindla suurusega alalt.

Aine- ja energiaühikutes väljendatud asustustihedus on kas **biomass** (elusaine hulk) või **energiasisaldus**. Asustustihedust ja biomassi teades saab arvutada isendi keskmise kaalu. Näiteks bakteritel on suur arvukus ja väike biomass, kuid väike veesisaldus ning seega suur energiasisaldus. Vetikaid on arvuliselt vähem kui baktereid, kuid nende biomass on suurem, sest ka isendid on suuremad. Mida väiksemad on organismid, seda suurem on nende eripind ja seda kiirem energiavahetus. Mida suuremad on organismid, seda väiksem on nende arvukus ja asustustihedus.

## 2.6.1. Sündimus ja suremus

**Sündimus** on uute isendite sündimise kiirus. Seda võib vaadelda absoluutväärtusena või protsentides asurkonna ülejäänud liikmete suhtes. Vee-elanikel on palju sigimisviise ning need võivad vahelduda isegi liigisiseselt. Suguline sigimine toimub enamasti ebasoodsamates elutingimustes ja võimaldab geneetiliselt varieeruvamaid järeltulijaid. Soodsates oludes eelistatakse suguta (nt pungumine) või partenogeneetilist sigimist. Siis on järglased vanematega väga sarnased, kuid sigimiskiirus suurem. **Monotsüklilise sigimise** korral on aastas üks, **polütsüklilise sigimise** korral rohkem sugulisi põlvkondi. Näiteks kiivrikud võivad soojemas vees anda rohkem põlvkondi kui külmemas. Partenogeneetiline sigimine võib muutuda suguliseks tingimuste halvenedes (näiteks üleasustus, soolasisalduse või valgusrežiimi muutus).

Ka **viljakust** võib väljendada nii absoluutse (kogu elu jooksul moodustunud suguproduktide hulk) kui ka suhtelise arvuna (absoluutse viljakuse ja emasisendi kehakaalu suhe). Keha suurusega on absoluutne viljakus positiivses, suhteline aga negatiivses korrelatsioonis. Et veeloomadel on viljastamine enamasti kehaväline, siis on neil suhteline viljakus sageli väga suur. Gonaadide mass võib kaladel ulatuda 20–30%-ni kehakaalust. Päris vanadel isenditel hakkab viljakus keha suurusest olenemata uuesti vähenema. Lõimetishoolde korral on järglaste arv väiksem ja nende keskmine mass suurem. Mida kehvemad on tingimused, seda hiljem saabub suguküpsus ja seda vähem on aastas põlvkondi. Paljud putukad, üheaastased veetaimed ja idalõhed (*Oncorhynchus*) sigivad ainult korra elu jooksul.

**Sigimisrütm** sõltub keskkonnatingimustest ja järgib teiste liikide elutsükleid, et saavutada parimat võima-

likku tulemust. Eriti oluline on rütmi paindlikkus olu-des, kus aastaajad üksteisest tugevasti erinevad. Lühikese elueaga liikidel mõjutavad sigimist peale aastaaegade ka ööpäevased muutused. Sageli on algussignaaliks veetemperatuuri muutus või toidu ilmumine. Näiteks zooplanktoni pelaagiliste vastsete ilmumine peab kokku langema piisava hulga fütoplanktoni tekkega, sest muidu ei jää nad ellu.

Asurkonna soolist koosseisu iseloomustab muu hulgas emaste ja isaste suhtarv ning suguliselt aktiivsete ja passiivsete isendite osakaal. Isendi sugulist seisundit väljendavad vastavad perioodid: enne suguküpsust, suguküps, pärast suguküpsust. Näiteks ühepäevikulised ja idalõhed on suguküpsed ainult mõne päeva, misjärel nad hukkuvad.

Mõnel selgrootul (aerjalgsed, vesikirbulised) võib sugu sõltuda vee temperatuurist: soojemas vees on rohkem isaseid. Mõnel rühmal võivad isased isendid ilmuda alles ebasoodsate tingimuste saabudes.

**Suremus** on isendite kadumise kiirus (need, kes surevad või süüakse ära). Absoluutset suremust väljendatakse ajaühiku, suhtelist asurkonna suuruse kohta.

Suremuse vähendamiseks on vee-elustikul hulk kohastumusi. Noorjärgud on ebasoodsate keskkonnatingimuste ja vaenlaste suhtes tavaliselt väga tundlikud, mistõttu asurkonnale on kasulik see periood võimalikult kiiresti läbida. Emased paigutavad munad nii, et need oleksid vaenlastele raskemini kättesaadavad, kleepides need näiteks kividele (ojapäevikud) või taimedele (paljud putukad ja kalad). Osa kiile, ujureid ja selgsõudureid muneb veealuste taimevarte õõnsustesse. Õhumullidest teevad veealuse pesa vesiämblikud ning mõned kalad (nt siiami tapluskala – *Betta splendens*). Pesa ehitavad ka ogalik ja luukarits. Jõekarplaste vastsed kinnituvad kalade lõpustele. Suur ellujäämus iseloomustab loomaliike, kes munemise asemel sünnitavad (näiteks emateod), kuigi sündivate järglaste arv on siis palju väiksem kui munade arv. Ebasoodsate tingimuste korral võib zooplanktoni areng seiskuda püsimunade staadiumis, mis taluvad kuivust ning kõrget ja madalat temperatuuri. Nende olukordade üleelamist soodustavad nii noortel kui ka täiskasvanud loomadel talveuni, suveuni ja **anabioos** (oluliselt aeglustunud ainevahetus).

Vaenlaste eest aitab pääseda näiteks läbipaistev keha, peiduline eluviis, tugev kest, teravad ogad, mürgisus, kiire liikumine, aktiivne kaitse jne.

Asurkonna vanuselise ja soolise koosseisu määravad nii konkreetne liik kui ka keskkonnatingimused. Soodsates oludes on tavaliselt palju järglasi, ebasoodsates võivad need üldse puududa. Väikeste mõõtmetega isendid on vaenlaste vastu tavaliselt kaitsetumad. Kalastikku mõjutab inimtegevus, mis hävitab valikuliselt suuremaid isendeid.

## 2.6.2. Kasv

Mida rutem saavutab isend lõplikud mõõtmed, seda suurem tõenäosus on tal ellu jääda. Suguküpsus saabub kiirema kasvu korral varem ning viljakus on suurem. Näiteks kalade suguküpsus sõltub sageli pigem kehamõõtmetest (kasvukiirusest) kui vanusest. Erandiks on kääbusvormid. Iseasi, et toidupuuduse korral pole kiire kasv mõeldav ning valida tuleb aeglase kasvu ja näljasurma vahel.

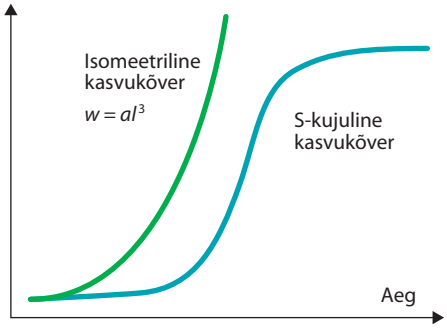
**Isendi kasv** on sesoonselt pidev kõigil püsisoojastel loomadel, kõigusoojastel aga troopilistes ja väga külmades vetes. Perioodiline kasv iseloomustab taimi ning kõigusoojaseid loomi vahelduvate aastaaegadega veekogudes. Tugeva kestaga loomad peavad kasvamiseks kestuma, näiteks suured vähid teevad seda aastas 1–3 korda.

Isomeetrilise kasvu korral $w = al^3$, kus $w$ on keha kaal, $l$ keha pikkus ja $a$ konstant. See tähendab, et kaal suureneb pikkusega võrreldes palju kiiremini (joonis 2.148).

S-kujulise ehk asümptootilise kasvu korral väheneb nii pikkus- kui ka kaalukasvukiirus isendi vananedes nullini või muutub isegi negatiivseks. Kasv väheneb ebasoodsates tingimustes, samuti pärast kudemist või munemist, mis tähendab emasloomale märgatavat kaalukadu. Enne talve saabumist võib kehakaal olla kogutud varuainete tõttu märksa suurem kui pärast talve. Külmades vetes on sama liigi isendid enamasti suuremad kui soojades.

**Asurkonna kasv** tähendab tema arvukuse taastootmist ning orgaanilise aine talletamist. Kasvukiirus näitab, kui palju sünnib uusi isendeid. S-kujulise kasvukõvera korral suureneb isendite arv algul aeglaselt, seejärel kiirenevalt ja siis jälle aeglaselt (joonis 2.148). Algul lisandub uusi isendeid palju vähem, kui tingimused lubaksid, sest üldine asustustihedus on liiga väike (näiteks fütoplanktoni puhul varakevadel). Hiljem hakkavad kasvu piirama toit, ruumipuudus või vaenlased.

Asurkonna looduslik arvukus sõltub põhiliselt toidust, vee hapnikusisaldusest ja temperatuurist, vaenlastest ning autotroofidel muidugi valgusest. Peale ööpäevase ja sesoonse olude muutuse mõjutavad arvukust




**2.148.** Isomeetriline ja S-kujuline kasvukõver.

pikaajalised muutused, näiteks Päikese aktiivsuse tsüklid, millest omakorda sõltuvad kliimat kujundavad merehoovused. Loomadel esineb eriomaseid, perioodiliselt korduvaid järske arvukuse langusi ja tõuse (populatsiooni- ehk elulained). Inimtegevus (näiteks vesiehitised, reostus, tulnukliigid) põhjustab vee-elustiku asurkondades mitteperioodilisi muutusi.

Mida lühem on isendi keskmine eluiga ja mida muutlikumad on tingimused, seda rohkem kõigub arvukus. Ühe liigi asustustiheduse muutus mõjutab paratamatult teiste liikide oma (vt 2.5). Ehkki suurem osa isenditest aja jooksul sureb, võib pikaealise liigi (näiteks kalade) asurkonna biomass ellujäänute kasvu arvel kokkuvõttes isegi suureneda.

Kitsas ruumis (näiteks laboritingimustes) võib kasvu piirata ka ainevahetusjääkide kogunemine. Lähedaste liikide lisandumine tavaliselt kasvu ei pärsi, vaid võib niššide erinevuse tõttu seda soodustada. Väga suur asustustihedus võib ligi meelitada kiskjaid või parasiite, kes hakkavad seda vähendama.

## 2.6.3. Produktsioon

Kogu elusloodus vajab talitlemiseks pidevat energia ja aine juurdevoolu. Üks orgaanilise aine põhilisi koostisosi on süsinik. Ökosüsteeme, sealhulgas veekogusid, on mugav kirjeldada süsiniku või energia hulga kaudu troofilistel tasemetel ning selle liikumiskiiruse kaudu nende tasemete vahel. Nagu juba teame, on veekogude peamiseks süsinikuallikaks fotosünteesil (kas veekogudes või maismaal) tekkinud biomass.

Kogu fikseeritud energiat pinna- ja ajaühiku kohta nimetatakse **brutoproduktsiooniks** ehk assimilatsiooniks. Osa energiat eraldub aga respiratsioonil, ainult kasv ja suguproduktid lähevad järgmisele troofilisele tasemele. Seega jõuab igale järgmisele troofilisele tasemele järjest vähem energiat. **Netoproduktsiooniks** nimetatakse seda osa brutoproduktsioonist, mis jääb järele, kui brutoproduktsioonist lahutada kulud ainevahetusele ja liikumisele (**respiratsioon**, ***R***). Sageli kasutatakse lühiduse mõttes produktsiooni mõistet netoproduktsiooni tähenduses.

Liigi **produktsioon** (***P***) on tema asurkonna biomassi muutus ajaühikus (näiteks aastas). See sisaldab nii uusi isendeid kui ka kõigi isendite juurdekasvu. Produktsioon ei võrdu biomassiga, sest viimast mõõdetakse massiühikutes (näiteks kg); produktsioon seevastu on oma olemuselt kiirus (näiteks kg/aastas).

Produktsiooni ja keskmise biomassi suhe (***P***/***B***) iseloomustab produktsiooni suhtelist efektiivsust, näidates, kui palju toodetakse orgaanilist ainet massiühiku kohta keskmiselt. Et see suhe on liigiti üsna konstantne, võimaldab tema teadmine produktsiooni ligikaudselt hinnata ka ainult biomassi andmete põhjal.

Mida lühema elueaga on olend, seda suurem on tema *P*/*B*. Troopikas võib *P*/*B* ulatuda isegi 100-ni, jahedamates vetes on see enamasti alla 10. Suurtel aeglase kasvuga vähkidel ja karpidel jääb ta alla 1.

**PRIMAAR- EHK ESMASPRODUKTSIOON** See on elusaine moodustamine anorgaanilisest süsinikust ja mineraalainetest. Esmastootjateks on fotoautotroofsed taimed, protistid ja bakterid. Kemoautotroofid ei ole elusaine moodustamise mõttes esmasprodutseerijad. Fotoautotroofid kuuluvad aeroobsete fotosünteesijate hulka, eraldades hapnikku. Protsess toimub kaheastmelise reaktsiooniahelana: algul foto-, siis biosüntees. Fotosüntees koosneb valgus- ja pimedusstaadiumist. Biosünteesil kasutatakse fotosünteesi lihtsaid produkte kõigi rakuainete tootmiseks. Energiat selleks saadakse fotosünteesil moodustunud adenosiintrifosfaadist (ATP, fotofosforüülumine) ning fotosünteesil tekkinud süsivesikute põletamisest (hingamine ehk oksüdatiivne fosforüülumine).

Peamistest fotosünteesivatest eluvormidest asustab fütoplankton seisu- või väga aeglase vooluga veekogusid. Perifüüton saab kasvada nii voolu- kui ka seisuvetes. Ta eelistab valgusele avatud veekogude madalat vett. Varjutatud veekogudes peab perifüüton kiiresti kasvama enne kaldapuude lehtimist. Suurtaimed kasvavad seisuvetes tavaliselt madalas vees, vooluvetes aga mõõdukas või aeglases voolus, kus leidub pehmeid setteid. Seisuvete toiduahelaid piirab oluliselt toitainete kättesaadavus. Seepärast koondub seal kasvuperioodil suur osa toitu fütoplanktonisse. Vooluvetes lisandub vooluga toiteaineid pidevalt juurde, ka talviti. Seepärast piirab neis primaarproduktsiooni pigem valgus. Ülemjooksudel varjab valguse jõesängi kohal olev kaldataimestik, alamjooksudel aga sügav ja sogane vesi.

**FÜTOPLANKTONI PRODUKTSIOON** Fütoplanktoni produktsiooni on põhjalikult uuritud järvedes. Seal mõjutavad seda kõige rohkem valgus, toiteainete hulk ja temperatuur. Valguskasutuse seisukohalt on kõige tõhusam niitjas eluvorm, mis on orienteeritud langeva valgusega risti. Vetikatel ja tsüanobakteritel leidub väga tõhusaid toiteainete (N, P) taastamise mehhanisme ($N_2$ fikseerimine, fosfataasid) ja rakusisese varumise võimalusi. Muudest mõjuritest on olulised vee segunemine ning vaenlaste (zooplanktoni) valikuline toitumine. Vee liikumisest tingitult võivad vetikad kanduda sügavale, kus neil pole võimalik kasvada.

Fütoplanktoni produktsiooni hindamiseks on mitu võimalust. Veekogudes kasutatakse neist sagedamini nelja: hapniku- ($O_2^-$) meetod, radioaktiivse süsiniku ($^{14}C$) meetod, hapniku stabiilsete isotoopide ($^{16}O$, $^{17}O$ ja $^{18}O$) meetod ning fluorestsentsi kineetika meetod. Kaks esimest põhinevad ainevahetuse otsesel mõõtmisel.

**Hapnikumeetodil** mõõdetakse fotosünteesi kiirust hapniku tootmise kiiruse järgi. Kontrollpudelis tehakse hapnikusisaldus (*A*) kindlaks kohe pärast veega täitmist. Heledas (läbipaistvas) ja tumedas (varjatud) pudelis eksponeeritakse uuritavat vett samal sügavusel (joonis 2.149), millest see koguti, kuid mitte sügavamal kui kolmekordne vee läbipaistvus Secchi ketta järgi. Eksponeerimisaeg võib ulatuda mõnest tunnist ööpäevani. Heledas pudelis toimuvad nii fotosüntees kui ka hingamine ja sealne hapniku lõppsisaldus (*H*) kujuneb nende koosmõjul. Tumedas pudelis kujuneb hapniku lõppsisaldus (*T*) ainult hingamise tulemusena. Tulemused arvutatakse järgmiselt:

$H–A$ = netoproduktsioon ($N$),

$A–T$ = respiratsioon ($R$),

$N+R = H–T$ = brutoproduktsioon e assimilatsioon

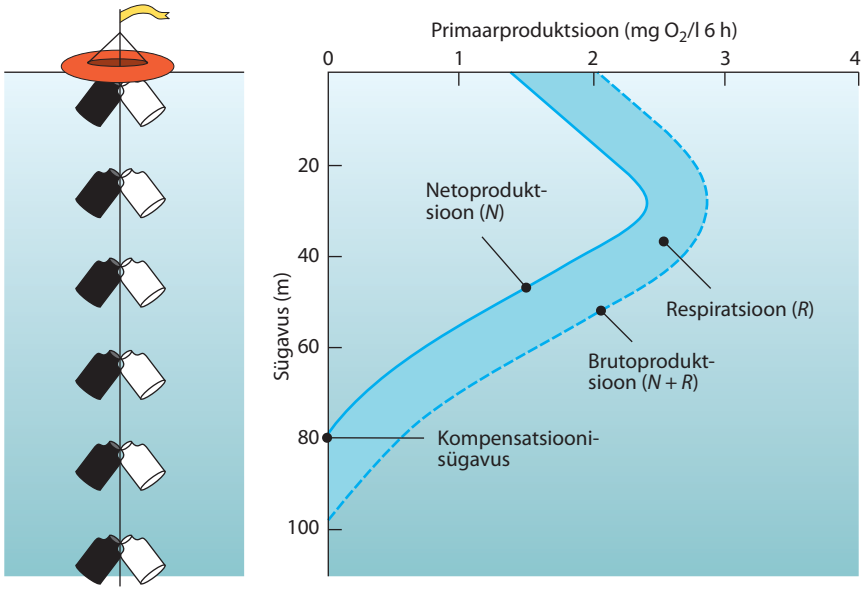
Tulemusel on konkreetne sisu (otsene mõõtmine), kuid ta sõltub vajaliku lämmastiku vormist veekogus. Näiteks nitraatide korral on produktsioon suurem kui ammooniumi korral. Teiseks, tume pudel mõõdab peale vetikate hingamise ka loomade ja bakterite hingamist. Kolmandaks eeldatakse, et hingamine on pimeduses ja valguses võrdne. Tegelikult lisandub valguse käes valguslik hingamine, millel on vaid väline sarnasus pimehingamisega. Meetod ei sobi suure $O_2$ algsisalduse korral, sest mullidena eraldunud hapnik ei ole mõõdetav. Samuti ei kõlba see meetod väheproduktiivsetes vetes, kus tulemused jäävad mõõtmisvea piiridesse.

**Radioaktiivse süsiniku** meetodil uuritakse rakkudesse lülitunud radioaktiivse süsiniku hulka. Kasutatakse samuti heledaid ja tumedaid pudeleid, kuid lühemat eksponeerimisaega. Igasse pudelisse lisatakse väike kogus radioaktiivse süsinikuga märgistatud söögisoodat (naatriumvesinikkarbonaati). Pärast eksponeerimist pudelites olev vesi filtreeritakse. Mõõdetakse filtritele jäänud vetikatesse lülitunud radioaktiivse märgise hulk (radioaktiivsete lagunemiste arv minutis). Heledas pudelis on süsiniku assimilatsioon lühikese ekspositsiooni korral lähedane brutoproduktsioonile ning pika ekspositsiooni korral netoproduktsioonile. Tume pudel mõõdab $CO_2$ heterotroofset ehk pimeassimilatsiooni vetikate ja bakterite poolt. Primaarproduktsiooni saamiseks lahutatakse heleda pudeli näidust tumeda pudeli näit. Selle meetodi suur tundlikkus võimaldab kasutada lühikest ekspositsiooniaega ja teha mõõtmisi ka väheproduktiivsetes vetes. Kuivatatud filtreid saab säilitada pikka aega. Tulemus ei sõltu lämmastiku vormist, kuid sõltub ekspositsiooni pikkusest. Osa assimileeritud süsinikku väljub rakkudest ega kajastu resultaadis.

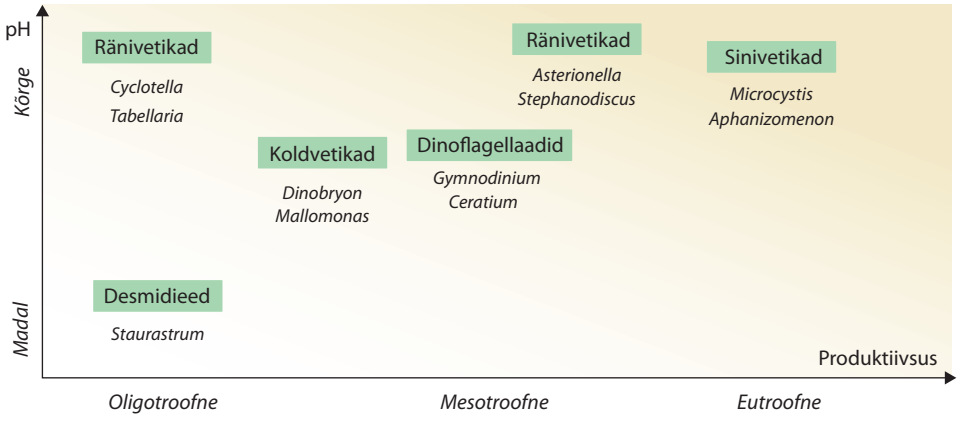
Nende kahe meetodi kasutamisel on ka ühiseid probleeme. Et protsess toimub mõlemal juhul kitsas pudelis, ei pruugi mõõtmistulemused vastata veekogus toimuvatele tegelikele protsessidele. Lühikese ekspositsiooniaja tõttu (< 24 h) pole kindel, kuivõrd on mõõtmistulemused laiendatavad valguspäeva teistele osadele.

Primaarproduktsiooni ühikuks on kas milligrammi süsinikku kuupmeetris (mg C/m$^3$) või milligrammi süsinikku ruutmeetril (mg C/m$^2$). Viimane näitab, kui palju toodetakse orgaanilist ainet terves veesambas.

Väikese produktiivsusega (oligotroofsetes) pehmeveelistes järvedes on fütoplanktonis ülekaalus rohevetikate hulka kuuluvad desmideed, karedaveelistes aga ränivetikad ehk diatomeed, näiteks perekonnad *Cyclotella* ja *Tabellaria* (joonis 2.150). Keskmise produktiivsusega (mesotroofsetes) oludes ja neutraalse pH korral võivad ülekaalus olla koldvetikad ja vaguviburilised,




**2.149.** Primaarproduktsiooni hindamine hapnikumeetodil erinevatele sügavustele asetatud heledate (läbipaistvate) ja tumedate (läbipaistmatute) pudelitega.




**2.150.** Eri vetikarühmade suhteline domineerimine olenevalt troofsustasemest ja pH-st.

kareda vee korral aga ränivetikad *Asterionella* sp. ja *Stephanodiscus* sp. Suure produktiivsusega (eutroofsetes) järvedes domineerivad enamasti tsüanobakterid.

Fütoplanktoni produktsioon järvedes väheneb troopikast pooluste suunas. Põhjuseks on nii kõrgem temperatuur kui ka rohkem valgust troopikas, mida pikk polaarpäev suurematel laiuskraadidel kokkuvõttes ei kompenseeri. Soojas vees lagundatakse ja tekitatakse orgaanilist ainet palju kiiremini kui külmas vees. Põhja-Ameerika ja Euroopa parasvöötme järvedes piirab fütoplanktoni produktsiooni vees lahustunud fosfori hulk, nii et need on omavahel statistiliselt olulises seoses. Sogase veega järvede puhul kasutatakse mõnikord fütoplanktoni produktsiooni kogu järve primaarproduktsiooni tähenduses, pidades muid primaarprodutsente (perifüüton, suurtaimed) ebaoluliseks. Oligotroofsetes külmaveelistes järvedes, mille vesi on hea läbipaistvusega, võivad hoopis põhjavetikad moodustada suurema osa produktsioonist.

Aastane primaarproduktsioon mõnes Eesti järves on olnud järgmine: Võrtsjärv – 208 g C/m$^2$ aastas; Verevi – 162 g/C m$^2$ aastas; Peipsi – 150 g C/m$^2$ vegetatsiooniperioodil (maist oktoobrini).

Maailma magevete koguprimaarproduktsioon – 0,58 × 10$^{15}$ g C aastas – moodustab kõigi veekogude produktsioonist kõigest ligikaudu 1,3%.

**PRIMAARPRODUKTSIOON VOOLUVETES** Vooluvete esmastoodang sõltub valgusest ja fosforist nagu seisuveteski. Sama toiteainete hulga juures on see enamasti väiksem kui järvedes.

Vooluveed on erinevalt seisuvetest avatud süsteemid, mida energia ja toiteained pidevalt läbivad. Väikestes ojades domineerib produktsioonis allohtoonne, keskmistes ja suurtes jõgedes siiski autohtoonne orgaaniline aine. Peamine energia ja aine muundumiskoht vooluvetes on perifüütoni biofilm (vetikad ja tsüanobakterid). Suurtaimedest on väheses valguses kõige sagedamad veesamblad.

Primaarproduktsiooni suurus ööpäevas sõltub vooluvetes oluliselt kohalikest tingimustest. Tavaoludes on maksimaalne toodang aastaajast olenevalt 1–6 g C/m$^2$ päevas, kõrbeojades 4–18 g C/m$^2$ päevas. Suurtes jõgedes on primaarproduktsioon ainult 0–2 g C/m$^2$ päevas. Neis pole eriti ka suurtaimi, sest vesi on sügav ja sogane. See-eest leidub suurtaimi servades ja lammidel.

Väga suur primaarproduktsioon on lammidel, kuhu settib viljakat FPOMi. Eriti suur on produktsioon siis, kui suurvesi kordub kindla perioodiga ja on pika kestusega. Põhiosa produktsioonist annavad lammidel siiski suurtaimed, mitte fütoplankton. Kaldataimedel on kõigi teiste (ka maismaa) taimedega võrreldes kõige rohkem vett ja valgust. Seepärast on kaldataimestik (roostikud, lodud) üks kõige produktiivsemaid taimestikke Maal, võrreldav vihmametsadega. Suurim on produktsioon keskmise suuruse ja ühtlase sügavusega läbipaistvates jõgedes. Kesk-Amazonase lammidel on peamised tootjad suured veetaimed (65%), puud (28%), perifüüton (5%) ja fütoplankton (2%). Perifüütoni ja fütoplanktoni osa veekogude toiduahelates on suhteliselt suurem nende tegeliku produktsiooniga võrreldes, sest märkimisväärne osa suurtaimede produktsioonist on halvasti kättesaadav.

Veesiseste suurtaimede produktsiooni maksimum troopikas on u 3 g C/m$^2$ päevas, kaldataimedel 10–20 g. Amazonase, Orinoco ja Paraguay jõe suurtaimede produktsioon võib ulatuda 50–100 tonnini hektari kohta aastas, biomassiga 4–23 t/ha. Üks kukehirsi liik (*Echinochloa polystachya*) katab Kesk-Amazonase lammist ligikaudu 20 000 km$^2$ ja tema produktsioon on võrreldav maisikultuuri omaga. Kõrreliste taimede, näiteks riisi (*Oryza*), kukehirsi ja keehirsi (*Paspalum*) isendid võivad ööpäevas kasvada 20 cm.

Autotroofsuse taset vooluvetes võib üldistatult hinnata produktsiooni (*P*) ja respiratsiooni (*R*) suhte põhjal (*P*/*R*). Hästi valgustatud vooluvetes ületab produktsioon päeval tavaliselt respiratsiooni, kuid ööpäeva keskmisena on sellest enamasti väiksem.

**SOODE PRIMAARPRODUKTSIOON** Paljudes troopilistes soodes on autohtoonsete veetaimede, näiteks papüüruse (*Papyrus*) produktsioon samuti väga suur. Turba teke rabades (1 mm aastas) on seotud pigem turbasammalde aeglase lagunemise, mitte kiire produktsiooniga.

Suurtaimede netoproduktsioon (kg/m$^2$ aastas, kuivkaal) mõnes sootüübis on järgmine (Moore 2008 järgi):

| | |
|---|---|
| arktilised madalsood | 0,1–0,3 |
| parasvöötme rabad | 0,3–0,7 |
| parasvöötme madalsood | 0,5–1 |
| parasvöötme lodud | 0,4–1,2 |
| parasvöötme roostikud | 0,5–2,5 |
| troopika papüüruseroostikud | 2–10 |

**SEKUNDAAR- EHK TEISPRODUKTSIOON** Tootjad on väga harva toiduahela ainsaks lüliks. Enamasti kuulub sinna ka tarbijaid, kelle kõigi produktsiooni kokku nimetatakse sekundaarseks ehk **teisproduktsiooniks**. Teisproduktsiooni on toiduahelaid läbiva energiavoo hindamisel hädavajalik teada. See sõltub nii keha suurusest, selle kasvukiirusest kui ka sigimiskordade sagedusest. Väikesemõõtmelistel vormidel on sigimine tavaliselt sage, suurtel harvem. Ka samal liigil võib lühikese suvega olla vähem põlvkondi kui pika suvega, sügavamas ja jahedamas vees vähem kui madalamas ja soojemas.

Liike, millel on igal aastal uus põlvkond, nimetatakse **univoltiinseteks**. Neid leidub alati kindlatel aastaaegadel ja neil puudub põlvkondade kattuvus. Näiteks võib tuua käsnad, kellel vahelduvad kasvu, puhkuse, suguta ja sugulise sigimise staadiumid. Univoltiinsed on ka mudateod (*Lymnaea*) ja põisteod (*Physa*), enamik kirpvähke ja kakandeid ning parasvöötme veeputukaid.

**Multivoltiinsetel** tarbijatel on aastas mitu põlvkonda. Siia kuuluvad paljud zooplankterid (protistid, keriloomad, vähilaadsed) ja troopilised teod. Putukatel sõltub põlvkondade arv kliimast. Troopikas ei pruugi sigimisperiood üldse aastaajast sõltuda või muutub koos üleujutustega. Väga pikaealised loomad, näiteks ebapärlikarbid, võivad sigima hakata alles 20-aastaselt. Mitmeaastaseks elavad ka kümnejalalised vähid, mõned kevikulised, ehmestiivalised, kililised ja ühepäevikulised.

Kaheaastase elueaga loomi nimetatakse **semivoltiinseteks** (näiteks pehmetuplased ja vesitigulased). Selgroogsetest on paljud väikesed kalad ja konnad üheaastased, suuremad loomad elavad kauem. Mida rohkem põlvkondi on aastas, seda suurem on produktsioon ja $P/B$ suhe. Väga suurtel loomadel (näiteks vaalalistel), kelle ainevahetus on aeglane ja eluiga pikk, on $P/B$ väga väike ning igal aastal nad järglasi ei annagi.

Pelaagiliste liikide produktsioon arvutatakse mahu-, bentiliste liikide oma pinnaühiku kohta.

Levinud produktsiooni hindamise viis on loomade asustustiheduse muutuse jälgimine nende eluea või muu pika perioodi, näiteks aasta jooksul. Keeruliseks teeb hindamise see, et mõni liik võib olla samal ajal esindatud mitme põlvkonnaga.

Kui põlvkonnad on eristatavad, saab iga põlvkonna produktsiooni mingi aja kestel hinnata vastavate juurdekasvude summeerimise teel:

$$P = \sum_{t_2 - t_1} (\ln w_2 - \ln w_1) / B,$$

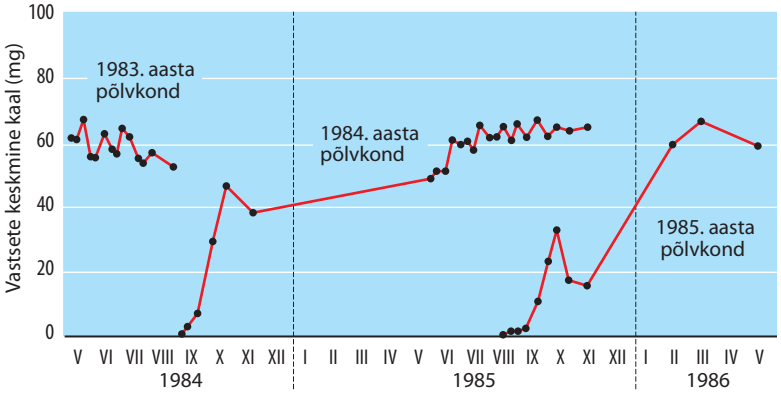
kus $P$ on produktsioon, $B$ keskmine biomass ning $w_1$ ja $w_2$ isendi keskmine kaal vaatlusperioodi algul ($t_1$) ja lõpul ($t_2$).

Kui põlvkondi eristada pole võimalik (näiteks troopilistes vetes, kus sigimine ja kasv toimub aasta ringi), jagatakse isendid suurusklassidesse ning võrreldakse nende sagedusi.

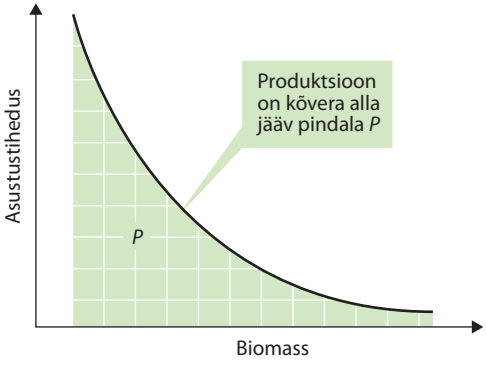
Isegi ühe põlvkonna produktsiooni täpne hindamine võib olla väga töömahukas. Selleks tuleb teada vastsündinute arvu, nende suremust, ellujäänute arvu ning suguküpseks saanute arvu. Iga põlvkonna isendite arvu ja kaalu hinnatakse eraldi lühikeste ajavahemike tagant. Eelmise mõõtmiskorraga võrreldes mõõdetakse vahepeal kaduma läinud (surnud või vaenlaste saagiks langenud) isendite arv ning allesjäänud isendite juurdekasv (joonis 2.151). Kokkuvõttes arvutatakse teisproduktsioon (energia või massi muutus ajas) harilikult aasta kohta. Teisproduktsiooni nagu primaarproduktsioonigi määravad veekogude elu põhilised tegurid: temperatuur, gaasi- ja soolsusrežiim, vee läbipaistvus, toit, toitumissuhted. Suure erinevuse võib anda valitud hindamismeetod, näiteks $P/B$ suhte kasutamine tegeliku mõõtmise asemel.

Teisproduktsioon ei saa olla suurem kui esmasproduktsioon; enamasti on ta sellest tunduvalt väiksem ning järgib seda ajalise nihkega. Mida rohkem on toiduahelas lülisid, seda väiksem on teistoodang ahela tipus. Et tarbijad söövad nii vetikaid, suurtaimi, teisi loomi, baktereid kui ka detriiti, reguleerivad nad sellega nende hulka. Näiteks filtreerijad (rändkarbid, käsnad ja vesikirbulised) võivad fütoplanktoni biomassi tublisti vähendada või muuta selle koosseisu. Zooplanktonist toituvad klaasiksääskede vastsed ja kuulmiksabad võivad oluliselt muuta selle hulka, mis omakorda mõjutab fütoplanktonit. Ka suurtaimedest toitujad võivad nende hulka märkimisväärselt mõjutada (nt tulnuktaimi piiravad putukaliigid). Suurem osa detriidiosakestest läbib enne settimist mõne tarbija keha.

Pelagiaali teistoodang on väga varieeruv, sest näiteks vesikirbuliste kui ühe selle elupaiga põhilise asuka arvukus võib ühe aasta kestel muutuda suurusjärgus sada korda.




**2.151.** Suure surusääse vastsete keskmise kaalu muutumine Peipsi järve profundaalis kolme põlvkonna jooksul.




Ühe põlvkonna produktsiooni mudel (Alleni kõver).

Järvede suurselgrootute produktsioon kuivkaalus moodustab aastas kuni 12% ja zooplanktonil kuni 22% sissetulevast orgaanilisest ainest (tabel 2.8). Meiozoobentose produktsiooni pole peaaegu uuritud, kuid see võib olla samas suurusjärgus. Suurema osa zoobentose produktsioonist tarbib ta ise või söövad selle ära kalad või maismaakiskjad (tabel 2.9). Peaaegu kõik järvekalad toituvad mingis staadiumis zoobentosest. Väljalendavatest veeputukatest toituvad ämblikud, nahkhiired ja linnud.

Vooluvete põhjaselgrootute produktsiooni on uuritud peamiselt väikestes ojades ja see on suurusjärgus 25–50 g C/m$^2$ aastas. Soojades vetes on see suurem kui külmades. Thamesi jõe zooplanktoni produktsioon (12 g C/m$^2$ aastas) moodustab *ca* 70% selle jõe zoobentose produktsioonist. Eriti suur on produktsioon allpool paise. Ühes Suurbritannia ojas oli ripsloomade produktsioon kuivkaalus 12 g/m$^2$ aastas. See oli enam-vähem võrdne kirpvähkide produktsiooniga, kuid suurem kihulaste vastsete ja kalade omast.

Tabel 2.8. MAKROZOOBENTOSE JA ZOOPLANKTONI PRODUKTSIOON MÕNEDES SEISUVEEKOGUDES VÄLJENDATUNA PROTSENTIDES SISSETULEVAST ORGAANILISEST AINEST (g C/M$^2$ AASTAS)

| Järv või muu veekogu | Keskmine sügavus (m) | Sissetuleva orgaanilise aine hulk (neto) | Zoobentose produktsioon (%) | Zooplanktoni produktsioon (%) |
|---|---|---|---|---|
| Tundratiik (Alaska, USA) | < 1 | 26 | 7 | 0,8 |
| Marion (Briti Columbia, Kanada) | 2 | 110 | 3 | 0,9 |
| Mývatn (Island) | 2 | 330 | 6 | 1,3 |
| Wingra (Wisconsin, USA) | 3 | 610 | 0,4 | 4 |
| Kiievi veehoidla (Ukraina) | 4 | 280 | 6 | 7 |
| Rõbinski veehoidla (Venemaa) | 6 | 93 | 0,3 | 2 |
| Mirror (New Hampshire, USA) | 6 | 49 | 12 | 5 |
| Krasnoje (Venemaa) | 7 | 140 | 1 | 7 |
| Findley (Washington, USA) | 8 | 12 | 6 | 2 |
| Naratš (Valgevene) | 9 | 160 | 0,8 | 5 |
| Mikołajskie (Poola) | 11 | 260 | 2 | 21 |
| Esrum (Taani) | 12 | 160 | 6 | 7 |
| Pääjärvi (Soome) | 14 | 60 | 3 | 12 |
| Dalnoje (Venemaa) | 32 | 260 | 1 | 22 |

(Likens 2010 järgi)

Tabel 2.9. ZOOBENTOSE PRODUKTSIOONI TARBIMINE (%) MÕNEDES JÄRVEDES

| Järv | Produktsioon (g C/m$^2$ aastas) | Suurselgrootute toit | Kalade toit | Lindude toit | Väljalend |
|---|---|---|---|---|---|
| Mývatn (Island) | 42 | 5–52 | 43 | 9 | 48 |
| Pääjärvi (Soome) | 3,8 | 50 | 40 | hindamata | 6 |
| Naratš (Valgevene) | 2,6 | 22 | 42 | hindamata | hindamata |
| Øvre Heimdalsvatn (Norra) | 2,4 | 25–28 | 70 | 2 | 3 |

(Likens 2010 järgi)

Mõnikord võib tunduda, et kõrgema taseme toitujate biomass on madalamate omast tublisti suurem. Uus-Meremaa Horokiwi jõest pärineb klassikaline näide, kus kalad tarbisid näiliselt sada korda rohkem toitu, kui jões tegelikult oli. Seda nimetatakse uurija järgi **Alleni paradoksiks**. Arvestamata jäeti, et forellid toituvad suuresti maismaaputukatest. Suurte aeglase kasvuga loomade biomass aga võibki võrdlemisi suur olla. Produktsiooni suhteline efektiivsus *P*/*B* on üldjuhul suurim tootjatel ja väheneb kiiresti püramiidi tipu suunas. Seepärast on toiduahelate kirjeldamisel parem võrrelda mitte biomasse, vaid eri tasemete produktsiooni, mis kajastab olukorda arusaadavamalt.

## BAKTERITE JA ARHEDE PRODUKTSIOON

Bakterite seas on nii orgaanilise aine lagundajaid (kemoheterotroofid), kemosünteesijaid (kemoautotroofid) kui ka fotosünteesijaid (fotoautotroofid ja fotoheterotroofid).

Igal rühmal on oma nõudmised elutingimustele ning seetõttu veekogust olenevalt ka erinev aktiivsus ja produktsioon. Meetodid bakterite ja arhede produktsiooni uurimiseks põhinevad ainevahetustüübil.

**Heterotroofsed bakterid ja arhed** on sekundaarprodutsendid. Enamik veebaktereid ja vähesed arhed on **kemoheterotroofsed**. Nad kasutavad nii energia saamiseks kui ka süsiniku allikana orgaanilisi ühendeid. Teistele organismidele, sealhulgas bakteritele, vabanevad orgaanilise aine lagundamise tulemusena mineraalsed ühendid.

**Fotoheterotroofid** on fotosünteesivad organismid, kes vajavad orgaanilisi ühendeid nii süsiniku allikana kui ka elektroni doonorina lisasüsiniku $CO_2$ redutseerimiseks. Energiat saavad nad valgusest, elavad aeroobsetes veekihtides ja fotosünteesi käigus hapnikku ei teki (anoksügeenne fotosüntees). Fotoheterotroofse eluviisiga on purpursed ja rohelised mittevääviibakterid, kes vajavad hapnikku ja taluvad ainult väikest vesiniksulfiidi kontsentratsiooni. Neid leidub hulgaliselt merevees, vähemal määral magevees. Arhedest on fotoheterotroofid kõik äärmuslikud halofiilid ehk keskkonnas suurt soolasisaldust vajavad liigid, elupaigaks soolajärvede aeroobne veekiht.

Enim kasutatavad heterotroofsete bakterite produktsiooni hindamise meetodid põhinevad rakkude peamiste biomolekulide – nukleiinhapete ja valkude sünteesi kiiruse mõõtmisel. Uuritavale veele lisatakse DNA, RNA ja valkude radioaktiivselt (nt $^{14}C$, $^{3}H$) märgistatud algosi, vastavalt nukleiinhappeid (nt tümidiini) ja aminohappeid (nt leutsiini), mida bakterid saavad rakkudesse lülitada. Produktsiooni väljendatakse enamasti süsiniku ühikutes mahu ja aja kohta (µg C/l h).

Heterotroofsete bakterite produktsioon võib vooluvetes ja metsaojades primaarproduktsiooni isegi ületada. Peamine bakterite toit on seal lahustunud orgaaniline aine. See pärineb detriidist, vetikatest ja taimedest, tarbijate eritistest, bakterite endi tegevusest ja lagunemisjäänustest. Vooluvete veekihis on keskmiselt 52 000 – 25 000 000 rakku/ml, setetes aga üle $10^7$ raku/ml. Aastane produktsioon Suurbritannia kriidiojades oli ligikaudu 70 g/m$^2$ kuivkaalus, samas oli ripsloomi 12 g/m$^2$. Saksamaal Breitenbachi ojas on bakterite produktsiooniks mõõdetud 750 g C/m$^2$ aastas. Rips- ja viburloomad võivad hävitada päevas suurema osa bakteriproduktsioonist.

**Autotroofsed bakterid ja arhed** on primaarprodutsendid. **Fotoautotroofide** rühm jaguneb kaheks: fotosünteesi käigus hapnikku tootvateks ehk oksügeenseteks ja mittetootvateks ehk anoksügeenseteks bakteriteks. Esimesse rühma kuulub bakterite hulgas ainult üks hõimkond – tsüanobakterid ehk sinivetikad.

**Oksügeensed fotosünteesijad** (taimed, fütoplankterid, tsüanobakterid) saavad elektronid $CO_2$ redutseerimiseks veest, mida nad valgusenergia arvel oksüdeerivad, ja vee fotolüüsil moodustubki hapnik. Tsüanobakterid on primaarprodutsendid ja sarnanevad ökoloogilises mõttes fütoplankteritega, mistõttu neid käsitatakse fütoplanktoni osana. Produktsiooni mõõdetakse samade meetoditega mis fütoplanktonil (täpsemat kirjeldust vt lk 271–273).

Fotoautotroofid, kes on **anoksügeensed fotosünteesijad**, ei tooda elutegevuse tulemusena hapnikku, sest saavad elektronide doonorina vee asemel kasutada väävliühendeid, molekulaarset väävlit, vesinikku ja isegi rauda. Paljud selle rühma esindajad suudavad taluda suurt vee vesiniksulfiidisisaldust ja neid kutsutakse üldnimetusega väävlibakterid. Nii heliobakterid kui ka purpursed ja rohelised väävlibakterid kasvavad ainult anaeroobses keskkonnas. Produktsiooni on võimalik mõõta radioaktiivse süsinikuga ($^{14}C$) märgistatud bikarbonaadi lülitamise abil rakkudesse.

**Kemoautotroofid** ehk **kemosünteesijad** ei vaja valgust. Energiaallikaks (elektronidoonoriks) on neil anorgaaniline aine ja süsinikuallikaks $CO_2$, mida nad redutseerivad. Sellise ainevahetustüübiga on vähesed bakterid ja paljud arhed. Tüüpilised kemoautotroofid on näiteks nitrifitseerijad, mis oksüdeerivad ammoniaaki või nitritit, tioonbakterid, mis saavad energiat anorgaaniliste väävlivormide oksüdatsioonist, ning raua-, mangaani- ja vesinikubakterid. Arhedest kuuluvad siia näiteks metaanitootjad. Elupaigaks on kemosünteesijatel anaeroobne või mikroaerofiilne veekiht: näiteks hüppekihi alumine osa, hüpolimnion või sette ja vee piirpind. Kemosünteesijate produktsiooni on veekogudes vähe uuritud, kuid seda saab mõõta näiteks pimedas $^{13}C$-märgistusega bikarbonaadi lülitamise abil fosfolipiidsetesse rasvhapetesse.

Enamiku orgaanilisest ainest nii seisu- kui ka vooluveekogudes sünteesivad päikeseenergia kaasabil fototroofid. Kemosünteesijad toodavad seda märksa väiksemas koguses. Anorgaanilised ained, mida kemosünteesi käigus oksüdeeritakse, on enamasti tekkinud orgaaniliste ühendite anaeroobsel lagunemisel. Selle orgaanilise aine on tootnud fotosünteesijad. Seega pole kemosünteesijate roll tähtis mitte niivõrd esmasprodutsentidena, vaid energia ülekandjatena: nad viivad uuesti ringlusse selle osa, mis teistele organismidele pole enam kättesaadav.

Kõigi bakterite puhul on võimalik hinnata rakkude arvukuse (või tiheduse) suurenemist ajas eeldusel, et on tagatud uuritavale rühmale sobivad elutingimused ja bakterirakkude ärasöömine on välistatud.

Bakterid on siseveekogudes, eriti seisuveekogudes, kõige arvukam planktiliste organismide rühm. Nad võivad muundada kogu esmasproduktsiooni. Järvedes võib bakterite hingamise arvele langeda ligikaudu 10–90% koguhingamisest. Bakterite arv ja produktsioon võivad siseveekogude avavees olla tugevas korrelatsioonis fütoplanktoni koguse ja produktsiooniga.

Bakterite aktiivsust ja produktsiooni mõjutavad peamiselt toiteainete kättesaadavus, vee hapnikusisaldus ja fotosünteesijate puhul valguse intensiivsus, samuti veeorgamismide omavahelised suhted. Olenevalt keskkonnatingimustest võib kooslus nii sügavuti kui ka horisontaalselt muutuda ning ühes veekogus olla esindatud erineva ainevahetustüübi ja aktiivsusega bakterid. Terava temperatuurikihistumusega järvedes on igal sügavusel isesuguse nõudlusega bakterid. Näiteks kihistunud Verevi järves võib heterotroofsete bakterite produktsioon muutuda sügavuti mõnetunniste vahedega, olenevalt toidubaasist ja ärasöömisest. Madalates järvedes ja vooluvetes on bakterite produktsioon kalda-aladel ja avavees väga erinev, sügavates järvedes avaldub erinevus ka sügavuti.

Fotosünteesipigmente on bakteritel mitmesuguseid, neist peamisi – bakteriklorofülle – tähistatakse tähtedega *a*, *b*, *c*, *d*, *e* ja *g*. Tänu erinevatele valgust neelavatele omadustele suudavad anoksügeensed fotosünteesivad bakterid elada samades ökoniššides omavahel konkureerimata. Näiteks purpurbakteritel on pigmendid *a* ja *b*, rohelistel bakteritel *c*, *d* või *e*, heliobakteritel *g*. Veekogu pinnakihi tsüanobakterid ja rohevetikad, kel on „tavaline“ klorofüll *a*, ei saa kasutada kaugpunast ega infrapunast valgust ja seetõttu purpur- ega rohebakteritega ei konkureeri.

Fotosünteesivate bakterite aktiivsus ja vahekord vetikate produktsiooniga on sesoonselt väga muutlik. Teravalt kihistunud järvedes võib hea valgustatuse korral bakterite fotosüntees vetikate oma ületada. Sellist olukorda on täheldatud näiteks Poola järvedes. Kuid kogu aasta produktsioonist moodustavad fotosünteesivad bakterid tavaliselt väikese osa.

## KÜSIMUSED

1. Millised kalad sigivad ainult korra elu jooksul?
2. Kas suhteline ellujäämus on suurem neil loomaliikidel, kes munevad, või neil, kes sünnitavad?
3. Kui liik võib sigida nii suguliselt kui ka sugutult, siis kumba viisi eelistab ta soodsates tingimustes?
4. Milline elustikurühm moodustab kõige suurema osa jõelammide primaarproduktsioonist?
5. Mida näitab produktsiooni ja biomassi suhe?
6. Milles seisneb Alleni paradoks?
7. Milles seisneb planktoni paradoks?

## MÕISTED JA MÄRKSÕNAD

asurkond
populatsioon
ökosüsteem
arvukus
asustustihedus
ohtrus
kohtamus
biomass
energiasisaldus
sündimus
suremus
mono- ja polütsükliline sigimine
viljakus
sigimisrütmid
kasv
brutoproduktsioon
netoproduktsioon
P/B koefitsient
primaarproduktsioon
sekundaarproduktsioon
uni-, multi- ja semivoltiinsed liigid
kemoheterotroofid
fotoheterotroofid
fotoautotroofid
oksügeensed fotosünteesijad
anoksügeensed fotosünteesijad
kemoautotroofid

# 3.

# Siseveekogude kaitse ja tervendamine

■ Pühajärv (tagaplaanil) on suhteliselt suur, liigestatud kaldajoonega, paljude elupaikadega ja elustikurikka ökosüsteemiga järv, mis on inimmõjutustele seni hästi vastu pidanud. Samas on tema eelvool, pildil esiplaanil olev Neitsijärv, väike, madal, setteid täis ja kinnikasvav veekogu. Järv on olnud väga oluline Pühajärve kalade kudeala, kuid jääb sageli talviti ummuksisse. Selliste järvede elupaigad asenduvad märgalalistega. Liigiline koosseis ja elustikurühmade vahekorrad muutuvad. Ala populaarsuse kasv ja kasutuse intensiivistumine toob endaga kaasa probleemid veekogude majandamise, kaitse ja tervendamisega.

# 3.1. Veepoliitika raamdirektiiv ja veemajanduskavad

Euroopa Liidu veemajandust reguleeriv veepoliitika raamdirektiiv (VRD) kehtestati 2000. aastal (Veepoliitika… 2002). VRD käsitleb maismaa pinnaveekogusid, siirdeveekogusid (alasid, kus vooluveekogud lähevad üle rannikumereks), rannikuvett ja põhjavett. Direktiivi esialgne eesmärk oli saavutada liikmesriikides kõigi veekogude hea seisund 2015. aastaks. Kui see jäi millegipärast saavutamata (tehnilised raskused, üle jõu käivad kulud, looduslikud tingimused), siis nähakse majanduskavades ette kohustused järgmisteks kuueaastasteks tsükliteks.

## 3.1.1. VRD põhimõtted ja veemajanduskavade koostamine

VRD vaatleb vesikonna tasandil kõiki veeressursse tervikuna. Ta käsitleb veekeskkonda, olmet, tervishoidu, majandustegevust, transporti, meelelahutust, sotsiaalseid hüvesid jne. See võimaldab ühildada veevaldkonda reguleerivad õigusaktid veemajanduse ühtse käsitlusega (nt hinnakujundus). Veemajanduskavade koostamisse kaasatakse avalikkus. VRD soodustab rahvusvahelist koostööd, sest hõlmab piiriüleseid vesikondi. Eriti aktuaalne on see teema Kesk-Euroopas Doonau vesikonnas.

VRD planeerimistegevus jaotub tsükliteks, millest esimene lõppes 2015. aastal. Edaspidi arvestatakse esimese tsükli kogemusi. Esimene tsükkel koosnes järgmistest etappidest: piirkonna kindlaksmääramine, seisundi hindamine, keskkonnaeesmärkide püstitamine, seirekavade koostamine, nende erinevuste analüüs, meetmekavade koostamine, vesikondade veemajanduskavade väljatöötamine, meetmekavade rakendamine ja avalikkuse teavitamine. Need etapid ei pea olema samas ajalises järjestuses, kuid veemajanduskavade esitamisel on kindlad tähtajad.

Eesti vesikonnad ja alamvesikonnad on esitatud joonisel 1.48 (lk 48). Eestil on ühiseid vesikondi Läti ja Venemaaga. Venemaa ei kuulu Euroopa Liitu ja seepärast pole ta VRDsse kaasatud. Küll aga tehakse Venemaaga koostööd Peipsi alamvesikonna kaitseks. VRD esimeses etapis koostati kõikide Eesti vesikondade veemajanduskava.

Põhieesmärgid, mida püütakse nende kavade rakendamisel täita, on sellised:

1) loodusliku pinnavee vähemalt hea *ökoloogilise* ja *keemilise seisundi* saavutamine ja hoidmine;
2) *tugevasti muudetud veekogude* ja *tehisveekogude* vähemalt hea *ökoloogilise potentsiaali* ja hea keemilise seisundi saavutamine ja hoidmine;
3) põhjavee vähemalt hea keemilise ja koguselise seisundi saavutamine ja hoidmine;
4) kõigi püstitatud kaitse-eesmärkide saavutamine veekogudel või veekogudega seotud kaitset vajavatel aladel.

VRD arvestab veemajanduskavade koostamisel looduskaitseseadust, veeseadust ja ELi loodusdirektiivi (Natura 2000). Tähelepanu pööratakse ka supluskohtadele ja veehaarete sanitaarkaitsealadele. Veemajanduskavades käsitatakse olulise inimmõjuna järgmisi tegevusi, mis mõjutavad pinnavee seisundit:

- heit- ja sademevee kogumine ning keskkonda juhtimine,
- ohtlike ainete sattumine veekeskkonda prügilatest ja muudelt reostunud aladelt,
- põllumajanduslik haju- ja punktkoormus,
- veekogude füüsiline muutmine (paisutamine, õgvendamine, valgla kuivendamine, laevateede süvendamine, pinnase kaevandamine veekogudest),
- maavarade kaevandamisega kaasnev mõju (heitvesi, veetaseme alanemine, veekogude kadumine, tehisveekogude teke),
- veevõtt olme ja tööstuse tarbeks.

VRD rakendamise käigus muudeti üle Euroopa riiklikke seireprogramme. Need on nüüd koostatud ühtsetel põhimõtetel ja tulemused varasemast paremini võrreldavad. Programmid annavad hinnangu veekogude ökoloogilisele seisundile (vt ptk 3.4) ja veemajanduskavades võetakse neid hinnanguid arvesse. Kui seisund on kesine või halvem, peavad riigid välja töötama meetmekava olukorra parandamiseks, näiteks ette võtma ökoloogilise tervendamise (vt ptk 3.5). Võimalike meetmete hulka kuuluvad ka punktreostusallikate ja hajukoormuse vähendamine, joogiveesüsteemide korrastamine ja arendamine, reovee kogumise süsteemide korrastamine ja arendamine, reostunud alade korrastamine, veemajanduskavade juhtimise ja rakendamise parandamine. Meetmete kavandamise protseduuri on rannajärvede näitel kirjeldatud joonisel 3.33 (lk 324).

## MÕISTED

**Ökoloogiline seisund** näitab veeökosüsteemide struktuuri ja talitlemise kvaliteeti.

**Keemiline seisund** näitab ohtlike mürkainete sisaldust pinnavees, setetes ja organismides.

**Tugevasti muudetud veekogudeks** nimetatakse inimtegevuse tagajärjel füüsiliselt oluliselt mõjutatud veekogusid (näiteks maaparandussüsteemide eesvoolud, paisutatud või tõkestatud vooluveekogud).

**Tehisveekogud** on inimtegevuse tulemusena loodud uued veekogud.

**Ökoloogiline potentsiaal** näitab tugevasti muudetud veekogumi ökosüsteemi kvaliteeti võrreldes sellele veekogule tüübi poolest kõige lähedasema loodusliku veekogu kvaliteediga.

**Pinnaveekogumid** on kokkuleppelised üksused majandamise hõlbustamiseks. Nad koosnevad kas terviklikest veekogudest või nende osadest, mis erinevad üksteisest oluliselt looduslike iseärasuste või neile avalduva inimmõju poolest. Näiteks Võhandu jõestik koosneb 20 kogumist. Peajõgi jaguneb seejuures seitsmeks kogumiks, ülejäänud 13 on suuremad lisajõed. Järved moodustavad tavaliselt igaüks ühe kogumi, kuid vajaduse korral võidakse ühte kogumisse arvata ka mitu väikest lähestikku asuvat järve.

VRD järgi kuuluvad oluliste kogumite hulka, mille seisundit tuleb regulaarselt jälgida, vooluveekogud suurema valgalaga kui 10 km² ning seisuveekogud suurema pindalaga kui 50 ha. Selliste kogumite hulk Eestis on esitatud tabelis 3.1. Veemajanduskavades arvestatakse looduskaitse-eesmärke silmas pidades ka väiksemaid veekogusid.

**Põhjaveekogumite** piiritlemisel on aluseks hüdrogeoloogilised tingimused, võetava vee kogus ja muud veemajanduslikud kaalutlused. Aluspõhja kivimikihtide põhja-lõunasuunalise kallakuse tõttu esineb näiteks Lääne-Eestis alasid, kus leidub vaid üks põhjaveekogum. Lääne-Eestis on piiritletud 10, Ida-Eestis 15 ja Koiva vesikonnas 1 põhjaveekogum. Põhjavesi on Eestis paljudes kohtades peamine joogiveeallikas. Tallinn ja Narva kasutavad suuremas osas pinnavett.

## EESTI VEEMAJANDUSKAVAD (VMK)

VMK **eesmärk**: kõikide vete vähemalt hea seisundi saavutamine.

Eesmärgi paremaks täitmiseks koostatakse meetmeprogrammi rakendamise tegevuskavad.

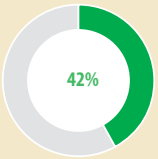
Veemajanduskavad koostatakse iga kuue aasta tagant, et saada põhjalik ülevaade Eesti veekogude seisundist ning planeerida tegevust jõgede, järvede ja rannikuvee ning mere seisundi parandamiseks.

Esimesed vesikondade VMKd 2009–2015 koos meetmeprogrammiga kinnitati 1.04.2010.

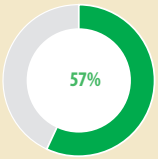
Praeguse perioodi 2015–2021 VMKd ja meetmeprogramm kinnitati 7.01.2016

Ettevalmistamisel on VMKd perioodiks 2021–2027.

Vooluveekogud




Seisuveekogud




42% Eesti jõgedest ja 57% järvedest on heas või väga heas seisundis.

(Keskkonnaministeeriumi andmed)

**2010–2015** Ellu viidi 396 projekti, sh 181 otseselt seisundit parandavat projekti:

- Ida-Eesti vesikonnas 140 , sh 52
- Lääne-Eesti vesikonnas 249, sh 129
- Koiva vesikonnas 7

Veemajanduskavade esimese perioodi lõpuks jäi väga paljudes veekogumites eesmärk saavutamata (ka ELis). Peamiseks põhjuseks olid raskused veekogumite hindamise metoodika väljatöötamisel ja ühtlustamisel teiste liikmesriikidega.

Paljude veekogude puhul ei suudetud välja selgitada mõjuvat survetegurit. Oluliseks osutus ka varasemast ajast setetes säilinud jääkreostus. Sellistel puhkudel võib loodus ise veekogu tervendada ja vahele segada ei ole otstarbekas. Sageli takistas tervendamist selle üle jõu käiv maksumus.

**2015–2021** Kavades loetletud meetmete maksumus on 363 miljonit eurot. Hõlmatud on kõik veega seotud valdkonnad, sh põllumajandus, regionaalareng, energeetika jm. Maksumus jaguneb järgmiselt:

158 miljonit reoveekäitlusse,
98 miljonit tegelemiseks jääkreostusega,
73 miljonit põllumajandusse,
28 miljonit vooluveekogudega seotud projektideks ja
6 miljonit muudeks veega seotud projektideks.

Meetmeid finantseeritakse nii riigieelarvest, kohalike omavalitsuste, Euroopa Liidu kui ka erasektori vahenditest.

Eraldi meetmeprogrammid on pinnaveekogumitele (750) ja põhjaveekogumitele (39)

### Tabel 3.1. EESTI VESIKONDADE PINNAVEEKOGUMID

| | | Looduslikud | Tugevasti muudetud | Tehis-veekogud |
|---|---|---|---|---|
| **Lääne-Eesti vesikond** | Vooluveekogud | 245 | 77 | 34 |
| | Seisuveekogud | 38 | 2 | 3 |
| **Ida-Eesti vesikond** | Vooluveekogud | 190 | 64 | 9 |
| | Seisuveekogud | 40 | 4 | 0 |
| **Koiva vesikond** | Vooluveekogud | 19 | 1 | 0 |
| | Seisuveekogud | 8 | 0 | 0 |

(Keskkonnaministeeriumi andmed)

## KÜSIMUSED

1. Mis on veepoliitika raamdirektiivi eesmärgid?
2. Mis on pinnaveekogumid?
3. Milles seisneb tugevasti muudetud ja tehisveekogude erinevus?
4. Millistest etappidest koosneb üks VRD planeerimistegevuse tsükkel?

**3.1.** Soitsjärve veetaset alandati 1930. ja 1956. aastal sooviga saada põllumajandusele maad juurde. Nüüd laiuvad kallastel tihedad rooväljad ja järve suuremast osast on eraldunud väiksem.

# 3.2. Siseveekogude seisundi halvenemine inimmõjul

## 3.2.1. Järved

Inimtekkelised muutused keskkonnas kajastuvad varem või hiljem talitlushäiretena järvedes, põhjustades sageli nende enneaegset vananemist. Maailmas on järvi teaduslikult uuritud pisut üle sajandi, Eestis põhjalikumalt veidi üle poole sajandi. Ka enne seda toimus paljude järvede valglas intensiivne metsaraie ja põllumajandus. Eesti järvedele avaldas eriti halba mõju linaleotus. Varasemaid mõjusid on tänapäeval võimalik uurida põhjasetetes säilinud ainete ning elustiku jäänuste abil. Paljusid järvi muutis tuntavalt 1960.–1980. aastate intensiivne põllumajandus koos väetiste kontrollimatu kasutusega, samuti asulate reovee sissevool. Mõnikord ei kasvanud selle tagajärjel mitte üksnes toitelisus, vaid muutus koguni järve tüüp. Alates 1990. aastate algusest võib täheldada mõnede järvede seisundi paranemist. Selle põhjuseks oli algul tõenäoliselt põllumajanduse ajutine allakäik, hiljem aga rangemaks muutunud reoveekäitluse nõuded.

Põhjasetete koostise järgi hakkas Eesti järvede seisund märgatavalt muutuma juba ammu enne 20. sajandit. 19. sajandi keskpaigas oli mõni järv sama reostunud kui 20. sajandi teisel poolel. Ei saa välistada, et oma osa järvede talitlushäiretes on olnud varieeruval kliimal. Juba holotseeni kliimaoptimumi ajal atlantilisel ja subboreaalsel perioodil (8000–5000 aastat tagasi) täitus hulk järvi setetega ning paljud neist soostusid või kasvasid kinni. Praegusaja kliima muutlikkus mõjutab samuti järvede füüsikalis-keemilisi omadusi. Näiteks on põhjapoolkera järvedel kliima üldise soojenemise taustal täheldatud lühemat jääkatet. Seeläbi pikeneb taimede kasvuperiood, suurenevad võimalused bioproduktsiooniks ning kiireneb järvede kinnikasvamine ja vananemine.

Inimmõju tagajärgede leevendamiseks järvi tervendatakse. Paljud järved jõuavad aga kinnikasvamise äärele loodusliku arengu tulemusena. Enne nende „kordategemist“ tuleb tõsiselt kaaluda, kas oodatav tulemus väärib elupaikade ja elustiku hävimist. Paljud kaitsealused liigid asustavad just soostuvaid, vähese veega taimerikkaid veekogusid. Peamiseks inimmõjuks Eesti järvedes on suur toiteainekoormus, veetaseme reguleerimine ja järvenõgude kiire täitumine setetega. Mujal maailmas laialt levinud vee hapestumine, tööstus- ja radioaktiivsed heitmed, intensiivne vesiviljelus jms pole Eestis kuigi aktuaalne.

**TOITEAINETE VÄLIS- JA SISEKOORMUS** Vee toiteainesisalduse suurenemisest tulenev eutrofeerumine võib olla nii looduslik kui ka inimtekkeline. Inimtegevusest tingitud veeõitseng on looduslikuga võrreldes tavaliselt kiirem ja ühekülgsem. Eutrofeerumine põhjustab planktonvetikate vohamist, suurtaimestiku kiiret ja massilist arengut ning lõpptulemusena mudastumist. Tagajärjeks on „haiged" järved, mis jäävad kergesti ummuksisse.

Eesti järvedesse jõudvad toiteained pärinevad nii haju- kui ka punktreostusallikatest. Linakasvatuse kõrgperiood oli 19. sajandi teisel poolel. Linaleotuseks kasutati enamasti pehmeveelisi väikejärvi, mis on igasuguse reostuse suhtes eriti tundlikud. Lagunev lina põhjustas kümnete järvede eutrofeerumist, planktonikoosluste muutumist ja veesisese taimestiku vähenemist või hävingut. Linaleotuse tagajärjed on neis järvedes märgatavad praeguseni. Näiteks Kooraste Linajärves (vt joonis 1.243, lk 161) lõpetati linaleotus ligi pool sajandit tagasi, kuid veeõitsengud kestavad seal endiselt aasta läbi ning põhjasetetest võib leida lagunemata linavarsi ja -kupraid.

Peamine tänapäevase hajureostuse allikas oli 1960. aastatel alguse saanud suurpõllundus. 1970. ja 1980. aastatel olid nii järved kui ka vooluveekogud tugevalt mõjutatud just väetistest. Mineraalväetisi kasutati lohakalt ning väetamine toimus sageli lennukitelt. Suured laudad ja muud põllumajandusehitised paiknesid tihti küngastel. Sealt jõudis kas otse või vooluvete kaudu järvedesse silomahla, virtsa ja sõnnikut. Orgaanilisi aineid ja fosforiühendeid lisandus ka punktreostusallikatest. Tavaline oli puhastusseadmeteta saunade ja suvilate ehitamine otse järve või jõe kaldale.

1990. aastate algul põllumajandus- ja tööstustootmine soikus, veepuhastussüsteeme tasapisi uuendati ning väikejärvede seisund hakkas paranema. Samas oli varem järvedesse talletunud nii palju toiteaineid, et neid eemaldamata või isoleerimata pole vähemalt sügavate ja kihistunud järvede seisundi paranemist loota. Põhjasetetest vabanevad fosforiühendid võimaldavad edasist intensiivset aineringet.

Atmosfäärireostuse mõju kohta Eesti väikejärvedele pole kuigi palju andmeid. See võib olla oluline väikese valgalaga vähetoiteliste järvede puhul.

**3.2.** Kurtna Martiska järve liivarand oli veel mõnikümmend aastat tagasi järvepõhi. Järve veetase langes 1972. aastal, kui võeti kasutusele Vasavere veehaare, mis varustab Kohtla-Järve ja Jõhvi elanikke joogiveega.

**VEETASEME MUUTMINE** Eesti järvede keskmine sügavus on väike ja see muudab nad tundlikuks veetasemega manipuleerimise suhtes. Peamiselt on nad kannatanud veetaseme alandamise käes, mida tehti massiliselt alates 19. sajandi keskpaigast ja mis jätkus ka 20. sajandi esimesel poolel. Põllumehed soovisid järvede arvelt juurde saada viljakat põllu- ja karjamaad või lihtsalt kuivendada liigniiskeid alasid. Paraku olid järvedelt juurdevõidetud alad põlluharimiseks enamasti liiga niisked ning kattusid peagi rooväljade ja võsaga. Madalates järvedes tõi veetaseme langus kaasa kiire kinnikasvamise. Mõne aastakümnega jäid järvedest järele mudased kaisla- ja tarnaväljad mõne üksiku allikakohaga. Üks selliste eksperimentide näiteid on Vooremaal asuv Soitsjärv (joonis 3.1).

Veetaseme alanemine järvedes võib seostuda ka põhjavee intensiivse tarbimisega. Mitme Kurtna järvestiku järve veetase on tugevalt alanenud põhjavee ammutamise tõttu Vasavere veehaardest. Vähetoiteliste Martiska, Kuradi- ja Ahnejärve veepind langes 1990. aastate alguseks 3–4 meetrit allapoole 1950. aastate taset. Martiska järve pindala kahanes seetõttu enam kui poole võrra (joonis 3.2). Vahepeal on nende järvede veetase nii tõusnud kui ka uuesti langenud. Eestis on praeguseks teada vähemalt 60 järve, mille veetaset on alandatud. See on nende järvede ökosüsteemi oluliselt mõjutanud.

Tehisjärvede rajamine algas hoogsalt 1960. aastatel, kuid need projekteeriti tihti väga madalana. Seetõttu on nende puhkemajanduslik potentsiaal sageli väike. Viimastel aastakümnetel on tehisjärvede halva olukorra põhjuseks olnud ka hooldamatus ja segased omandisuhted.

**JÄRVENÕGUDE TÄITUMINE SETETEGA** Oma loomuliku arengu käigus täitub järvenõgu valgalalt saabuvate või järves endas toodetud orgaaniliste ja mineraalsete setetega. Nende ladestumiskiirus sõltub valgla hüdroloogilistest ja geokeemilistest iseärasustest, järvenõo kujust, kliimast ja paljudest teistest teguritest. Vahetult pärast viimase jääaja lõppu (11 500 aastat tagasi) oli ainete settimiskiirus võrdlemisi suur. Stabiilse liikide arvu ja biomassiga püsikoosluste väljakujunemise järel see vähenes ning on normaalsetes vähetoitelistes järvedes 0,05–0,2 mm aastas. Inimtegevusliku eutrofeerumise tagajärjel võib settimiskiirus märgatavalt suureneda. Euroopa järvedes on see toimunud alates 1850. aastast umbes 70%-s uuritud järvedest. Jõesängide õgvendamise ja kaevandustööde tõttu suureneb peente setete ärakanne valglalt järvedesse. Näiteks Kurtna järvestikus paiknevasse Nõmmejärve juhiti pikka aega heljumirikast kaevandusvett. 30 aastaga moodustus sinna umbes 25 cm tüsedune settekiht. Suur hõljuvate setete hulk halvendab valgustingimusi ja vähendab veesisese taimestiku hulka. Kaovad kalade elupaigad ja kudemisvõimalused. Selline setete ladestumine vähendab ka järvede puhkemajanduslikku väärtust.

**SOOSTUMINE JA MAASTUMINE** Eesti järved on jagatud kümnesse tüüpi. Tüüpide rohkus kajastab järvede mitmekesiseid arenguteid ja nendega toimunud muutusi. Tekkeajal (mandrijää sulades) olid paljud Eesti järved tõenäoliselt pehmeveelised. Vähesed neist on peaaegu sellisena tänapäevani püsinud. Lubjarikka pinnakattega aladel lisandus vette mineraalaineid, mille tagajärjel kujunesid kareda- ehk kalgiveelised järved. Elustiku arenemise käigus koguneb järvedesse orgaanilist ainet. Seepärast lõpetavad paljud järved oma arengutee segatoitelisena, millele järgneb soostumine ja maastumine. Iseasi, et ka segatoitelised järved võivad erinevate ökoniššide poolest väga rikkad ja liigirohked olla.

## 3.2.2. Vooluveed

Esimesed tegevused, millega inimene vooluvetele olulist mõju avaldas, olid tõenäoliselt kalapüük ja vee reostamine. Hiljem järgnes kallaste kindlustamine ja jõeäärse maapinna tõstmine, et vältida suurvete purustavat mõju. Paisutamine, süvendamine, õgvendamine (jõesängi kaevamine sirgeks) ja jõestikke ühendavate kanalite rajamine sai hoo sisse eriti 20. sajandil. Kanalite kaudu said võimaluse levida võõrliigid. Inimtegevus avaldab vooluvetele tavaliselt mõju mitut moodi korraga.

**ÕGVENDAMINE** August Loopmanni (1979) andmeil on Eestis üle 7300 vooluveekogu. Keskkonnaregistris on neid kirjas ligikaudu 2000. Vooluvete kogupikkusest on looduslikus seisundis (õgvendamata ja paisutamata) ainult 27%. Muudetud veetasemega jõeosad moodustavad 11% ning inimeste rajatud voolusängid – suurem osa neist kraavid – 62%. Niisiis on õgvendamine ja kraavitamine kõige laiemalt levinud vooluveekogusid mõjutav inimtegevus Eestis. Isegi kui peajõe säng on puutumata, mõjutavad kraavid seda ikkagi, kandes sisse teistsuguste omadustega vett ja peeneid setteid. Õgvendamise mõte on tavaliselt veetaseme alandamine valglal, et luua juurde uusi maaviljeluseks sobivaid alasid. Selle mõju jõeelustikule on mitmene. Kõigepealt lõhutakse kaevetöödega jõepõhi, mis sunnib põgenema või surema kalastiku ning hävitab endise põhjaloomastiku ja -taimestiku. Enamasti kaasneb õgvendusega metsaraie kaldalt ning sageli muudetakse ümbritsevad alad kultuurmaistuks. Kui mets kaob, hakkavad vohama suured veetaimed, millele varem valgust ei jätkunud. Sama efekt avaldub metsaraie puhul ka ilma õgvenduseta. Olenevalt õgvenduse mahust (kas jõesängi tööldeldi kogu pikkuses või osaliselt, kas jäi puutumata mõni ülesvoolu asuv lisajõgi) võib looduslik taastumine sellest võtta aastaid. Õgvendatud jõesäng võib ise mõne aastaga moodustada uusi väikesi lookeid, kuid see pole võrreldav endiste looduslike oludega (joonis 3.3).

Enamasti on õgvendatud jõelõikude hüdrobioloogiline seisund looduslike lõikude seisundist mõõdukalt kehvem. Mida käänulisem on säng ja mida mitmekesisem jõepõhi, seda rikkalikum on ka elustik.

**3.3.** Õgvendatud jõesängi loogete looduslik taastumine Järvamaal Vahujõel. Uus säng tehti liiga suur, mistõttu vähene vesi on hakanud endale uusi kõverusi rajama selle „sisse".

**3.4.** Jõe paisutamisel suureneb voolukiirus paisu all tunduvalt ning jääb looduslikust kiiremaks ka mõnikümmend meetrit pärivoolu. Paisust ülalpool kujuneb peaaegu seisev vesi (paisjärv), kuhu hakkab kogunema muda, mida vool seni enam-vähem ühtlases tempos allavoolu kandis. Pildil Võisiku pais ja paisjärv.

**PAISUTAMINE** Paisude rajamisel võib olla mitu põhjust. Neid võidakse ehitada veejõu kasutamiseks (sealhulgas elektri tootmiseks), tarbevee võtmiseks, veetranspordi hõlbustamiseks, kalakasvatuseks või puhkemajanduseks. Tulemus on kõigil juhtudel enam-vähem sama: mingis jõelõigus väheneb oluliselt voolukiirus (joonis 3.4). Suur osa selle lõigu kaldaaladest ujutatakse üle ning tekkinud „järve“ põhja hakkab kogunema muda ja liiv, mis muidu oleks vähehaaval veevooluga allapoole liikunud.

Koos voolu aeglustumisega halveneb vee gaasirežiim. Hapnikuolud muutuvad loodusliku vooluveega võrreldes ebastabiilseks. Päeval vesi tihti üleküllastub hapnikust, öösel tekib defitsiit. Talvel võib väikese läbivooluga paisjärvedes tekkida jääkatte all hüpoksia või isegi anoksia. Paisjärvi kimbutab ka orgaaniline reostus, sest vooluvetes on seisuvetega võrreldes enamasti külluses toiteaineid (mineraalset fosforit ja lämmastikku). Kuni vesi voolab, ei lülitu nende ülearused kogused aineringesse, vaid mööduvad keskkonda mõjutamata. Voolu seiskudes tekib fütoplanktonil võimalus neid aineid kohapeal kasutama hakata. Fütoplanktoni lagunemine toob aga kaasa muda kogunemise ülalpool paisu.

Vahetult allpool paisu on voolukiirus vee vertikaalse langemise tõttu väga suur (joonis 3.4), kuid väheneb peagi tavapärasele tasemele. Kiirevoolulistes mägijõgedes (näiteks Doonau) koguneb paisude taha ka kruus ja kiviklibu, mis looduslikult oleks pidanud allavoolu liikuma. Selle tagajärjeks on muu hulgas see, et allpool paisu jõesäng järjest süveneb. Ühtlasi katkevad ühendused vanajõgedega.

Maailmas on üle 45 000 kõrge paisjärve (paisu kõrgus üle 15 m), mis talletavad pehmeid setteid; madalamate arv on ilmselt mitu korda suurem. Globaalses mõttes on paisude tõttu rikutud väga paljude jõgede settetasakaal, seda nii muda kogunemise tõttu paisjärvedesse endisse kui ka muda vähenemise tõttu neist allpool. Muda vähenemist tasakaalustavad erosioon jõekallastelt, metsaraie ja maaviljelus. Paisu ehitamine kokkuvõttes suurendab erosiooni, sest avab ümbritseva ala mitmesugusteks inimtegevusteks. Looduslikult suurendavad setete liikumist suurveed ja põlengud.

Eesti alalt on esimeste vesiveskite kohta teateid juba 13. sajandist. 19. sajandi algul tegutses neid ligikaudu 600. Enne II maailmasõda oli Eesti jõgedel ligi 750 veskipaisu. 2010. a seisuga oli Eestis registreeritud *ca* 900 paisu, millest elektri tootmiseks kasutati *ca* 50. Suurem osa neist on tänapäevaks aktiivse kasutuseta või lagunenud.

Enamasti ei suuda kalad, kes enne paisu ehitamist jões vabalt liikuda said, seda enam ületada. Nõnda ei pääse merest või allpool asuvatest jõeosadest vastuvoolu liikuvad kalad enam oma koelmutele. Jõe paisutamise ja paisjärve väära majandamise tõttu nõrgeneb või hävib paratamatult terviklik ja tugev kalaasurkond. Olukorra leevendamiseks oleks vaja kalatreppe või -pääse. Kui pais rajatakse suudmesse, blokeerib see jõe kogu ulatuses, kui kõrgemale või ainult mõnele lisajõele, siis jääb osa rändeteest ja võimalikest kudealadest avatuks. Need paisud, kus kogu vesi läbib ühtlasi elektriturbiine, on kaladele ohtlikud ka allavoolu liikudes, näiteks Narva elektrijaamas Narva jõel. Peale kalade liikumisteede tõkestamise mõjutavad paisud tugevalt ka muud jõeelustikku, vähendades voolukiirust ja mudastades põhja.

Allpool neid paise, mida kasutatakse elektri tootmiseks, kõigub veetase jõesängis sageli väga kiiresti (mõnepäevaste perioodidena). See mõjub hukatuslikult põhjaelustikule (selgrootud, kalamari, taimestik). Väikestes ojades vähendavad paisjärved jõe madalveeaegset vooluhulka aurumisega. Kui põua ajal säilib looduslikus voolusängis vooluhulk 10–15 l/s, siis on see jõeelustikule enamasti piisav, et ebasoodne aeg üle elada. Paisjärve tõttu aurub sellest suurem osa aga ära ning jõesäng allpool paisu võib põua ajal peaaegu kuivaks jääda.

Veepoliitika raamdirektiivi nõudeid järgides on Eesti vooluvetele viimastel aastatel rajatud palju uusi kalapääse ja uuritud nende tõhusust (vt lk 333 jj).

Paisutamise mõju selgrootutele loomadele on eriti tugev siis, kui jõepõhja on kogunenud palju muda. Selgrootute kui indikaatorite järgi on võimalik looduslikest jõelõikudest kindlalt eristada nii ülalpool paisu asuvaid aeglase vooluga kui ka allpool paisu asuvaid kiire vooluga lõike. Õgvendusega võrreldes on paisutuse mõju elustikule enamasti tugevam, kuid piiratuma leviku tõttu lokaalse iseloomuga.

**SETTE KOGUNEMINE** Pehme sette kogunemine jõepõhja tähendab seniste kiviste või kruusaste alade kattumist muda või liivaga. Kõige rohkem peent setet liigub suurvee ajal. Looduslikus jõesängis ujutab vesi üle kogu jõeoru koos luhaga ning suurem osa setet ja toitaineid ladestub sinna. Paisjärvede puhul jääb muda paisu taha lõksu. Kui pais vähemalt kord aastas avada, ei ole tema settehulga mõju jõe ökosüsteemile hävitav. Statsionaarse veetasemega paisjärved suurtel jõgedel on märksa keskkonnavaenulikumad (joonis 3.5).

Õgvendatud sängi korral on jõesäng luhast eraldatud ning suurem osa mudast settib sängi endasse. Mudastumine avaldab põhjaelustikule negatiivset mõju mitut moodi. Väheliikuvad organismid, sealhulgas põhjavetikad ja veetaimed, hävivad, sest neile ei jätku enam valgust. Hapnikunõudlikud organismid, eriti need, kes ei ela päris kivide pinnal, vaid kruusakihi sees, võivad lämbuda. Niisuguseks näiteks on väljasuremisohus oleva ebapärlikarbi (*Margaritifera margaritifera*) noored isendid. Muda- ja roosteosakesed võivad õrnemate loomade lõpused ka lihtsalt ummistada. Mudaga tuleb tavaliselt kaasa vees lahustunud ebasoovitavaid aineid. Ja lõpuks võib muda elustikku mõjutada kaudselt, organismide toiduobjektide kaudu, kellele uus olukord ei pruugi vastuvõetav olla.

Muda koguneb jõgedesse ka looduslikult. Aeglase vooluga jõelõigud, sealhulgas vanajõed, ongi mudased. Inimmõjul hakkab muda paraku settima seal, kus seda ei tohiks juhtuda.

**VEE REOSTUS** Vee reostus oli Eesti jõgedes nagu järvedeski suur 1970.–1980. aastatel peamiselt intensiivse loomakasvatuse ning asulate tööstus- ja heitvee puuduliku puhastamise tõttu. Näiteks võib tuua Tartu, Võru ja Rapla linna mõju vastavalt Emajõele, Võhandu jõele ja Vigala jõele. Viimastel aastatel on reostuskoormus tublisti vähenenud, eriti pärast Eesti astumist Euroopa Liitu. Siis oli võimalik hakata nüüdisaegseid puhastusseadmeid rajama Euroopa toetusraha abil. Nii nagu järvedes on ka jõgedes oluline reguleerida põllumajandusest ja olmeveest pärit fosfori- ja lämmastikuühendite hulka. Erinevalt järvedest ei pruugi vooluvee ajutine suur fosfori- või lämmastikusisaldus tähendada elustikule pöördumatut kahju. Suur hapnikusisaldus aitab mõõdukat reostust taluda, samas kannab vesi selle kiiresti allavoolu. Lühiajalisest reostusest aitab taastuda ülalt tulev puhas vesi. Anorgaanilist reostust põhjustasid nõukogude aja lõpul kõige silmatorkavamalt

**3.5.** Pärast jõele rajatud paisu avamist kanduvad selle taha kogunenud setted allavoolu, muutes oluliselt sealset elustikku ja elupaiku. Aja jooksul need siiski taastuvad ning kättesaadavaks muutunud ökosüsteemiteenuste väärtus on enamasti märksa suurem kui jõe paisutamisest saadud tulu. Pildil Elwha jõgi USAs Washingtoni osariigis pärast kahe jõele rajatud paisu lammutamist 2012. a. Lühikese ajaga kandus merre u 10,5 mln tonni setteid, mis olid 80 aasta jooksul paisu taha kogunenud.

Tallinna prügimägi Pääsküla jões ning Kohtla-Järve tuhamäed Kohtla ja Purtse jões. Mõlemat reostusallikat on viimastel aastatel edukalt neutraliseeritud.

Omaette kategooria moodustab Eestis põlevkivikaevandustest väljapumbatav põhjavesi. Enamasti ei ole see mürgine, ehkki sisaldab ohtralt heledat lubjasetet ja looduslikust tasemest rohkem sulfaate. Kirde-Eestis on välja kujunenud piirkondi, kus niisugune kaevandusvesi moodustab suurema osa või isegi kogu vooluhulga. Ilma selleta jääksid paljud ojad ja väiksed jõed kuivaks. Samas kuulub selline vesi formaalselt heitvee hulka.

### TARBEVEE VÕTMINE (VOOLUHULGA VÄHENDAMINE)

Palavates ja kuivades maades, sealhulgas Lõuna-Euroopas, on mureks, et jõgede vooluhulgast ei piisa inimeste vajaduste rahuldamiseks. Oma osa veepuuduses on suurtel paisjärvedel, millest vee aurumine on kuumas kliimas mitu korda suurem kui kitsast, puudega varjatud jõesängist. Tagajärjeks võib olla halvemal juhul see, et enne suubumist kasutatakse ära kogu jõevesi. Jahedas ja niiskes Eestis sellist olukorda tavaliselt ei teki. Kõige märkimisväärsem vooluhulga muutmine toimus 1970.–1980. aastatel. Siis juhiti osa Kesk- ja Põhja-Eesti jõgede vett (Pärnu ülemjooks, Jägala, Soodla, Pirita) kanalite kaudu Ülemiste järve, et kindlustada Tallinna linna veevarustust. Tallinna veevajadus oli tollal tunduvalt suurem kui tänapäeval.

**MUUD MÕJURID** Eesti jõed sobivad peamiselt harrastuslikuks, mitte tööduslikuks kalapüügiks. Seepärast ei saa püügiga seotud väärnähtustest rääkida samas tähenduses nagu mõne väga suure jõe puhul (näiteks Doonau Kesk-Euroopas või Volga Venemaal). Pigem kuuluvad nad rööv- või ebasportliku püügi kategooriasse. See kehtib ka veetranspordi kohta: enamik Eesti jõgesid polegi laevatatavad. Seega pole põhjendatud ka jõestikke ühendavate kanalite rajamine. Kesk-Euroopas on kanalite ehitamine võimaldanud tulnukliikidel oma levilat kontrollimatult laiendada niihästi lihtsalt pärivoolu kulgedes kui ka laevadele kinnitudes. Eelkõige käib see mõnede limuste (näiteks rändkarp) ja kirpvähiliste kohta. Eestisse (Peipsi järve) toodi rändvähk Venemaa poolelt lausa meelega (joonis 3.6). Peipsist on ta tänapäevaks levinud ka sinna suubuvate jõgede alamjooksudele.

**3.6.** Rändvähk (*Gmelinoides fasciatus*) toodi võõrliigina Peipsi järve 1970. aastate esimesel poolel eksikombel. Tegelikult sooviti introdutseerida hoopis teist kirpvähi liiki, et suurendada kalade toiduobjektide arvukust. Rändvähk levis väga hästi ja nõrgestas kohalike liikide populatsioone. Kalad pole suutnud tema arvukust oluliselt vähendada.

### KÜSIMUSED

1. Mis olid järvede seisundi muutuste peamise põhjused Eestis 1960.–1980. aastatel?
2. Kuidas võib kliima soojenemine mõjutada järvi?
3. Millised on järvede eutrofeerumisilmingud?
4. Milliseid järvi kasutati peamiselt linaleotuseks?
5. Milline võib olla aine settimiskiirus järvedes?
6. Millist mõju avaldab vooluveekogude õgvendamine ja paisutamine nende ökosüsteemile?
7. Kuidas mõjutab vooluveekogude elustikku setete kuhjumine?

### MÕISTED JA MÄRKSÕNAD

toiteainete väliskoormus
toiteainete sisekoormus
eutrofeerumine
linaleotus
hajureostus
veetaseme muutmine
tehisjärvede rajamine
setete ladestumine
maastumine
soostumine
õgvendamine
paisutamine
vee reostus
vooluhulga vähendamine

# 3.3. Siseveekogude ökosüsteemiteenused

Samas tähenduses kasutatakse ka termineid „keskkonnateenused“, „ökosüsteemsed teenused“, „keskkonnafunktsioonid“ ja „looduse hüved“.

## 3.3.1. Ökosüsteemiteenuste teooria ja tüpoloogiad

Inimesed tunnevad ökosüsteemide talitlemist ja teavad, et neid tuleb säilitada kas või selleks, et ise püsima jääda. Majanduslikult asjale lähenedes saab hinnata inimese tehtavaid kulutusi millegi loomiseks, arvestades turuväärtust. Veekogude rajamisel on see võimalik, liikide asustamise ja väljasurnud liikide puhul ilmselt mitte. Kui väidetakse, et mingi liik, ökosüsteem või kooslus on haruldane ja suure looduskaitselise väärtusega, siis jääb selgusetuks, kui suur see väärtus on ja kuidas seda hinnata. Pealegi puudub esialgu tehnoloogia, mis võimaldaks kadunud liike taastada.

1990. aastatel hakati ökosüsteemide väärtust hindama sotsiaal-majanduslike meetodite abil. Selle lähenemisviisi peamine arendaja oli Robert Costanza. Praeguseks on see jõudmas looduskaitsealastesse õigusaktidesse. Nii luuakse sild ökosüsteemide ja majanduse vahel ning looduslik mitmekesisus seostatakse inimühiskonna majandusliku rikkusega.

Veeökosüsteemide hüvesid käsitatakse ühiskonnale pakutavate kaupade ja teenustena. Sisuliselt on need inimeste olemasolu või heaolu võimaldavad nähtused. Kõige tähtsamad neist on joogivesi, ilma ja kliima kujundamine, kalavarud, veevool ja isepuhastus, samuti virgestusvõimalused (kalastus, suplus, paadisõit).

Ökosüsteemiteenuste teooria levis laiemalt pärast ÜRO 2005. a ökosüsteemide aruannet (Millennium... 2005). Selles jaotati need teenused neljaks (joonis 3.7):

- varustavad teenused (*provisioning services*), näiteks toit, vesi, maavarad;
- reguleerivad teenused (*regulating services*), näiteks mõju kliimale, vee kvaliteet, veevarud, üleujutused;
- tugiteenused (*supporting services*), näiteks aineringe, fotosüntees, elupaigad;
- kultuuriteenused (*cultural services*), näiteks esteetiline või vaimne nauding, inspiratsiooniallikad, virgestusvõimalused.

Teine ökosüsteemiteenuste tüpoloogia pärineb kollektiivilt, kes koostas ülevaateteose „Ökosüsteemide ja bioloogilise mitmekesisuse majandus“ (TEEB 2008), mis on eelmisega üsna sarnane. Esimene käis kogu maailma kohta, teist kohandati Euroopa tingimustele.

Ühtsest rahvusvahelisest klassifikatsioonist CICES (*Common International Classification of Ecosystem Services*) jäeti jaotuse tegemisel välja tugiteenused, mida on väga raske arvestada otsese teenusena.

Neid klassifikatsioone ja rahvusvahelisi kogemusi arvestades on Eesti rannikumere ja siseveekogude kohta välja töötatud oma ökosüsteemiteenuste hindamise metoodika. Selle kandev idee on veekogu keskkonnaomaduste ja seisundi seotus teenuste arvu ja väärtusega. Teisisõnu, teenuste pakkumine sõltub veekogu olukorrast, mille määravad veekogu morfoloogilised omadused ning ökoloogiline ja keemiline seisund.

**3.7.** „Millenniumi ökosüsteemide aruandes“ toodud ökosüsteemiteenuste klassifikatsioon. Euroopa keskkonnaagentuur on kasutusele võtnud jaotuse, milles tugiteenuste rühm puudub, sest sellised teenused ei paku otseselt inimese heaolu mõjutavat hüve (vt tabel 3.2). Selle liigitusega sooviti lihtsustada teenuste väärtuse leidmist.

Ökoloogilist ja keemilist seisundit hinnatakse nii seisu- kui ka vooluvetes keskkonnaministri 2009. aasta 28. juuli määruses nr 44 nimetatud kriteeriumide järgi (Pinnaveekogumite… 2010). Keskkonnatingimuste hindamisel on veidi teistsugune lähenemisviis.

▶ Jõgede puhul kasutatakse üldiste keskkonnatingimuste iseloomustamiseks kuut näitajat: (1) äravool, (2) sängi tõkestatus, (3) veevõtt, vee teisaldamine ja veeheide, (4) looklevus, (5) kaldavööndi maakate ja (6) seos lammiga. Tulemus saadakse nende kuue näitaja hinnanguväärtuste (1–5) aritmeetilise keskmise põhjal.

▶ Järvede puhul kasutatakse morfoloogiaindeksit (MOI), mis arvutatakse pindala ja sügavuse suhte põhjal:

$$MOI = \ln (pind / süg_{max}),$$

kus *pind* on järve pindala hektarites ja $süg_{max}$ järve maksimaalne sügavus meetrites. Indeksi väärtuse järgi jagatakse järved kolme klassi: suured (> 3), keskmised (0,8–3) ja väikesed (< 0,8).

Siseveekogude ökosüsteemiteenuste nimekiri on esitatud tabelis 3.2. Tegemist on Eesti tingimustele vastavate ökosüsteemiteenustega. Mujal maailmas võivad tingimused ja seega ka teenused teistsugused olla.

## Tabel 3.2. EESTI LOODUSLIKE JÄRVEDE JA JÕGEDE ÖKOSÜSTEEMITEENUSTE JAOTUS

| Teenuse rühm | Teenus | Selgitus |
|---|---|---|
| Varustavad | Kalavaru (tööndusliik kalapüük) | Siia kuulub vaid kutseline kalapüük. Harrastuspüük on kultuuriteenus. |
| | Roostik (materjal)** | Peamiselt pilliroog. |
| | Pinnaveevaru (joogiks) | Hindamisel lähtutakse tegelikust olukorrast ja võimalusest. Ei arvestata, et põhjalikke puhastusmeetodeid rakendades saab iga vee joogikõlblikuks muuta. |
| | Pinnaveevaru (muuks otstarbeks peale joomise) | Niisutusvesi, tuletõrjevesi, jahutusvesi, tööstusvesi jms. Vesi kala- ja vähikasvatuseks (vesiviljelus). Lähtutakse tegelikust olukorrast ja võimalusest vett kasutada. |
| | Mudavaru (raviks ja põllumajanduslikuks otstarbeks)** | Ravimuda, loomade lisasööt, väetis mahepõllumajanduses jms. |
| Reguleerivad ja säilitavad | Elupaikade säilitamine | Arvestatakse elupaikade looduslikku mitmekesisust veekogudes. Nt suurus, sügavus, kaldajoone keerukus, vooluveekogude looklevus, setete iseloom, vooluhulk ja selle dünaamika määravad elupaikade mitmekesisuse ja väärtuse. |
| | Kaitsealused ja võtmeliigid, looduslikud kooslused ning nende tasakaalu säilitamine | Väga suure väärtuse ja tähtsusega teenus: kui on suur liigirikkus ja leidub haruldasi ning karakterliike, siis on kooslused tasakaalus. Jõgede puhul on eristatud looduslikke lõhilaste ja karplaste elupaiku. |
| | Vee looduslikkuse tagatus (looduslik veekvaliteet ja heitvee lahjendus, isepuhastusvõime) | Hinnatakse, kui tugev on ökosüsteem looduslike protsesside tagamisel ja milline on tema toimimise efektiivsus. |
| | Hüdrodünaamika säilitamine ja kaitse üleujutuste eest | Ei tohi olla olulist inimmõju hüdromorfoloogilistele parameetritele (nt vooluvete paisutamine, järvede veetaseme alandamine). |
| Kultuurilised | Puhkamiseks sobivad keskkonnatingimused (tüüpide kaupa) | Jalutamine kaldal, päevitamine, suplemine, ujumine, vaadete nautimine, paadisõit järvel jpm. |
| | Harrastuskalastuseks ja jahinduseks sobivad keskkonnatingimused (tüüpide kaupa) | Hinnatakse kalastamiseks ja jahipidamiseks vajaliku taristu olemasolu, püügivõimalusi ning kala-, vähi- ja ulukivaru. |
| | Teadusuuringute võimalused | Hinnatakse veekogumi omanäolisust ja eripära. |
| | Õppetegevuse võimalused | Õuesõppe tingimuste olemasolu. |
| | Inspiratsiooniallikas loometegevuseks | Kuna loometegevust võivad stimuleerida väga erinevad tegurid, on selle teenuse hindamine subjektiivne. |
| | Looduslikud sümbolid (pühapaigad, rahvuslikud sümbolid) | Ühiskondlikult aktsepteeritud pühapaigad, rahvuslikud sümbolid. |
| Abiootilised | Hüdrotermaalenergia | |
| | Hüdroenergia* | Hüdroenergiat tootvad rajatised (paisud, elektrijaamad). |
| | Transport (laevatamine ja jääteed) | Navigeerimine (laevatatavad jõed) või talitransport (ametlik jäätee). Siia ei kuulu puhke-eesmärkidel tehtav paadisõit, kalastamine, sõidud mootor- või maastikusõidukiga. Uisutamisvõimalused kuuluvad kultuuriteenuste alla. |

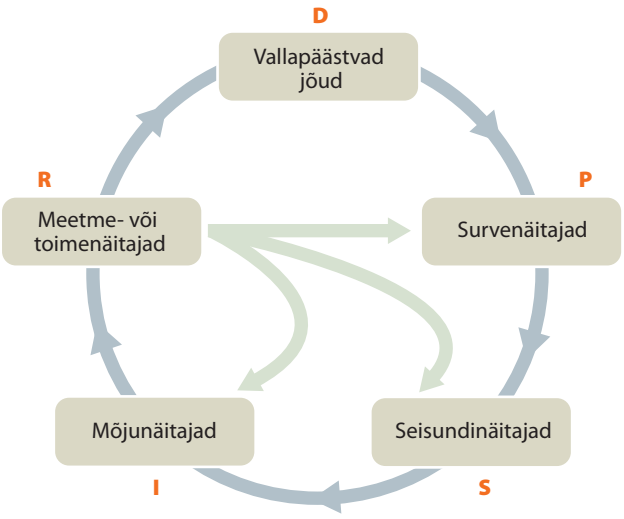
* kehtib ainult jõgedes; ** kehtib ainult järvedes

(Kosk 2016)

### 3.3.2. Ökosüsteemiteenuste hindamise meetodid

Ökosüsteemiteenuste hindamisel tuleb arvestada looduses valitsevaid põhjuslikke seoseid. Selleks selgitatakse välja näitajad (indikaatorid), mille nimekirja pidevalt täiendatakse. Eesti keskkonnaindikaatorite süsteemi aluseks on DPSIR-raamistik. Selle nimetus tuleb viiest näitajatüübist, millest igaühe esimene täht annab lühendisse ühe tähe. Need tüübid on järgmised:

| | |
|---|---|
| **D** | Vallapäästvad jõud (*driving forces*) väljendavad keskkonnasurvet põhjustavaid tegureid. Enamasti mõeldakse nende all inimtekkelisi tegureid, mis kirjeldavad sotsiaalset, demograafilist, majanduslikku jms olukorda (nt rahvaarv). |
| **P** | Survenäitajad (*pressure*) väljendavad inimtegevuse tagajärjel keskkonnale avaldatavat survet (nt saasteainete hulk). |
| **S** | Seisundinäitajad (*state*) iseloomustavad kvantitatiivselt või kvalitatiivselt keskkonnaseisundit (nt veekvaliteeti iseloomustavad näitajad). |
| **I** | Mõjunäitajad (*impact*) iseloomustavad keskkonnaseisundist ja selle muutustest tulenevat mõju nii ökosüsteemidele kui ka inimestele (nt veekogude eutrofeerumisest tulenevad koosluste ja elupaikade muutused). |
| **R** | Meetme- või toimenäitajad (*response*) väljendavad keskkonnaseisundi parandamiseks rakendatud meetmeid (nt saastetasumäärad). Sageli on need seotud poliitiliste otsustega. |




**3.8.** DPSIR-mudeli viis keskkonnaindikaatorite rühma, mis kirjeldavad ühiskonna ja keskkonna vahelisi seoseid. Ökosüsteemiteenuste hindamisel tuleb arvestada, et indikaatorid esindaksid kõiki DPSIRi mudeli rühmi (vt tabel 3.3).

Nende näitajate omavahelisi suhteid kujutatakse enamasti ringina (joonis 3.8), kus iga eelnev näitaja on järgmise põhjus: vallapäästvast jõust lähtub surve keskkonnale, see mõjutab keskkonnaseisundit, see omakorda inimesi ja ökosüsteeme jne.

Mõju leevendamiseks võetakse tarvitusele meetmed, mis peaksid vähendama vallapäästvast jõust tulenevat

Tabel 3.3. VÄLJAVÕTE JÄRVE VARUSTAVATE ÖKOSÜSTEEMITEENUSTE INDIKAATORITE TABELIST

| Teenus | Indikaator (tüüp, ühik) |
|---|---|
| Kalavaru (tööndusliik kalapüük) | D – nõudlus kalatoorme järele (EUR/kg)<br>P – püütud kogus (t/ha/a)<br>S – kalavarude hinnang liikide kaupa (t/a)<br>I – kalasaagi realiseerimisest tulenev hüve (kasum) (EUR/a)<br>R – kalalaevade püügilubade arv (tk), kalapüügi kvoodid (t/a), kalapüügi piirangud (t/a), kalurite püügilubade arv (tk) |
| Roostik (materjal) | D – nõudlus pilliroo ja selle kasutamise järgele<br>P – pilliroo varumine (ha/a)<br>S – kasutatava roostiku pindala (ha)<br>I – varutud roostiku realiseerimisest tulenev hüve (kasum) (EUR/a)<br>R – looduskaitsealade spetsiifilised piirangud (% kogu alast) |
| Pinnaveevaru (joogiks) | D – pinnaveetarbijate arv (% elanikkonnast)<br>P – pinnaveevõtt (veevõtu osakaal veebilansist (%)), heitvee sissevool ($m^3$)<br>S – pinnavee kvaliteet (vastavus standardile) (jah/ei)<br>I – kulutused joogivee viimiseks standardis ettenähtud tasemele (EUR/$m^3$)<br>R – joogivee hind (pinnavee baasil) (EUR/$m^3$) |
| Pinnaveevaru (muuks otstarbeks peale joomise, sh vesiviljelus, tööstus- ja põllumajandusvesi) | D – veevajadus vastavas majandusharus ($m^3$/a)<br>P – veevõtt vastavas majandusharus ($m^3$/a)<br>S – piisav veehulk (vaba varu olemasolu) (jah/ei)<br>R – vee erikasutusload (tk/$m^3$) |

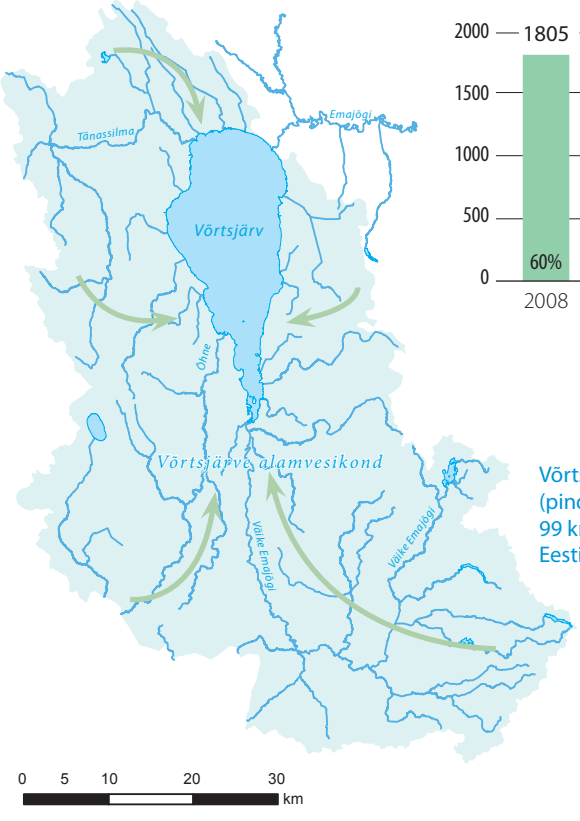
(Kosk 2016)

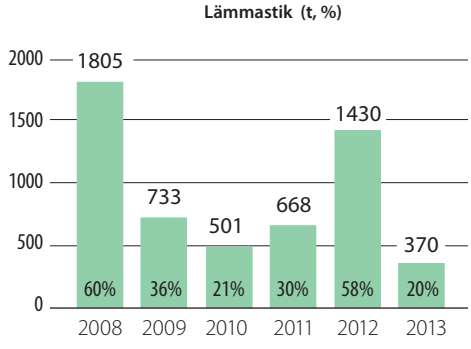
keskkonnasurvet, parandades sel moel keskkonnaseisundit. Tabelis 3.3 on esitatud kokkuvõte Eesti siseveekogude soovitatavatest indikaatoritest järvede varustavate teenuste näitel. Selle põhimõtte järgi on leitud kõikide siseveekogude ökosüsteemiteenuste indikaatorid.

Üks ökosüsteemi reguleerivaid teenuseid on veekogu isepuhastus. Järved eemaldavad veest sinna sissevooluga kantud toiteained (lämmastik, fosfor). Näiteks Võrtsjärv eemaldab aastas veest sadu tonne lämmastikku ja kümneid tonne fosforit (joonis 3.9).

Ehkki võib väita, et looduse hüved on hindamatu väärtusega, võib rahalise väärtuse leidmine aidata loodust säästvamalt majandada. Rahalise väärtuse leidmist raskendab sageli turuhinna puudumine. Loodushüvede hindamiseks kasutatakse mitmesuguseid meetodeid. Eestikeelse kokkuvõtte on neist teinud Marit Sall kolleegidega (Sall jt 2012). Joonisel 3.10 loetletud meetodid on järgmised.

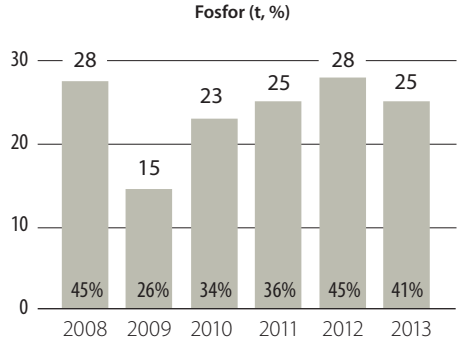
1) *Turuhinna meetod* (reaalne turg ja hind) – ökosüsteemiteenuste väärtus võrdub nende turumajandusliku rahalise väärtusega.
2) *Tulevikuväärtuse meetod* – valmidus maksta mingit hinda ökosüsteemiteenuste kasutamise eest tulevikus.
3) *Välditud kahju meetod* – ökosüsteemiteenuste hind võrdub kahju ärahoidmise hinnaga.
4) *Paranduskulude meetod* – ökosüsteemiteenuste hind on teenuse taastamise hind.
5) *Vältimiskulude meetod* – investeeringute maksumus, vältimaks või hoidmaks ära ökosüsteemiteenuste kvaliteedi halvenemist või nende kadu.
6) *Asenduskulude meetod* – ökosüsteemiteenuste kasutamisega samaväärse tegevuse hinna leidmine.
7) *Hedonistlike hindade meetod* – arvutustes kasutatakse kinnisvara hindu, lähtudes muu hulgas looduskeskkonna kvaliteedist („miljonivaade“).
8) *Reisikulu meetod* – inimeste valmidus maksta paiga külastuse eest, arvestades aja- ja rahakulu.
9) *Maksevalmiduse meetod* – inimeste küsitlemine, millest selgub, kui palju ollakse nõus maksma ökosüsteemiteenuste säilimise, saamise või kahjustumise vältimise eest.
10) *Aktsepteerimisvalmiduse* ehk *loobumistasu meetod* – inimeste küsitlemine, millest selgub, kui suurt rahalist hüvitist nad sooviksid saada nõustumise eest keskkonnakvaliteedi halvenemisega või mõne ökosüsteemiteenuse kadumisega.

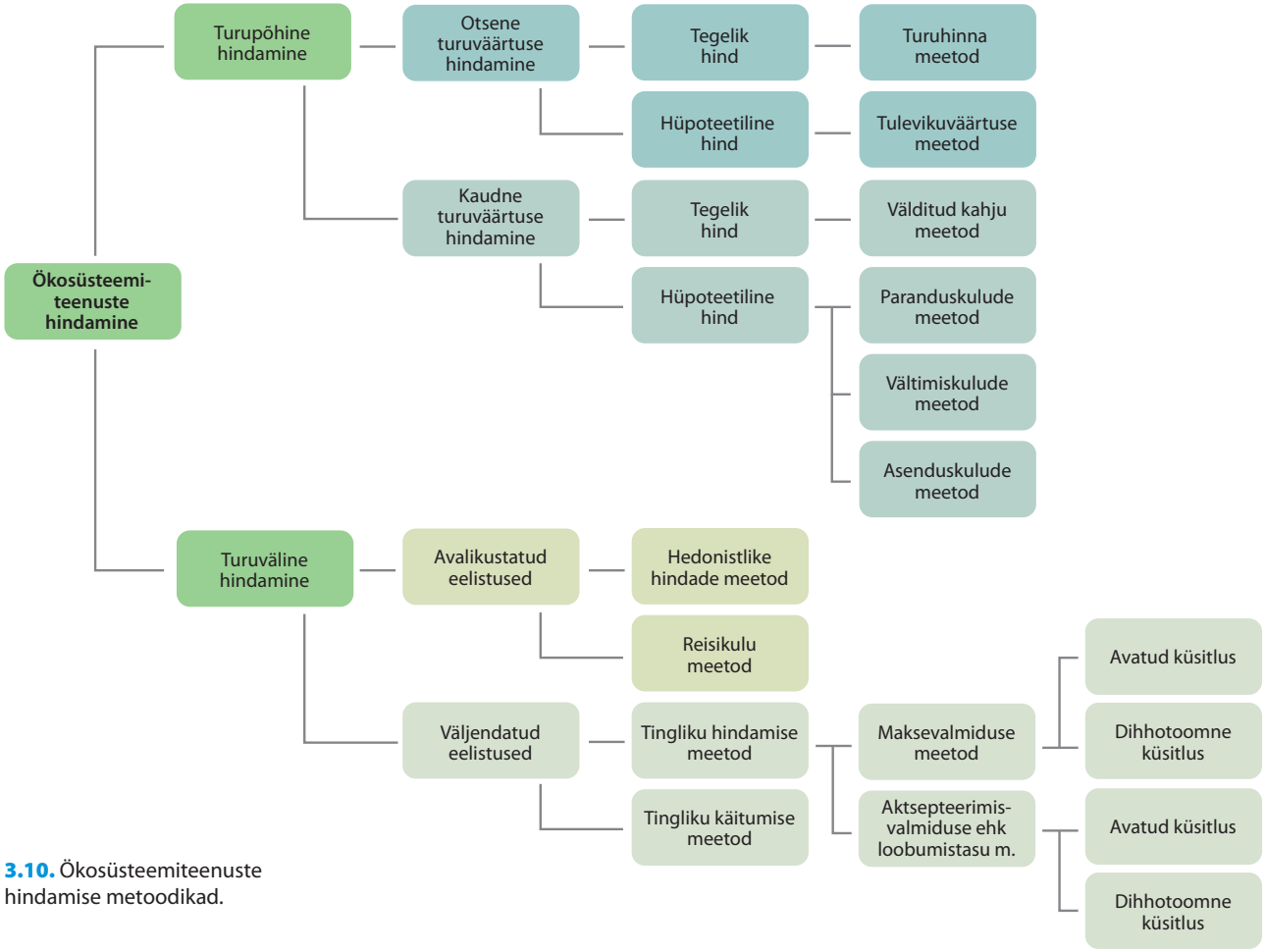



**3.9.** Üks Võrtsjärve reguleerivaid teenuseid on toiteainete eemaldamine veest: järv peab kinni 20–60% sissetulevast lämmastiku- ja 26–45% fosforikoormusest. Joonisel absoluutne (t) ja suhteline (%) lämmastiku- ja fosforipeetus Võrtsjärves aastatel 2008–2013.

Võrtsjärve alamvesikond (pindala 3374 km², millest 99 km² asub Lätis) on Ida-Eesti vesikonna osa.






**3.10.** Ökosüsteemiteenuste hindamise metoodikad.

Ka Eestis on hinnatud mõne veekogu ökosüsteemiteenuseid. Näiteks Jägala joa ökosüsteemiteenuste maksumus ületab kümneid kordi tulu, mida võiks saada seal paisu abil elektrienergiat tootes (joonis 3.10).

2015. ja 2016. a uuriti Tallinna ja Harjumaa inimeste valmidust parandada Harku järve ökosüsteemiteenuseid. Hoolimata sellest et järv on kehvas ökoloogilises seisundis, on see populaarne paik ökosüsteemiteenuste tarbimiseks (joonis 3.10). Harku järve hindamisel kasutati maksevalmiduse meetodi kaht alajaotust: tinglik hindamine ja valikkatse meetod. Esimese puhul vaadeldi kõiki ökosüsteemiteenuseid koos, teise puhul eraldi. Järve ökoloogilise seisundi parandamise eest halvast kesiseks nõustusid inimesed tasuma keskmiselt 13,34 ja selle parandamise eest halvast heaks 15,22 eurot aastas. Kokku olid Tallinna ja Harjumaa 11 omavalitsust valmis Harku järve olukorra parandamise eest halvast kesiseks maksma 5,7 miljonit eurot aastas ehk 28 miljonit eurot perioodil 2016–2020. Järve viimise eest halvast seisundist heasse olid summad vastavalt 6,6 miljonit ja ligi 33 miljonit. Inimesed soovisid meelsamini parandada üksikteenuste kvaliteeti ja vähem kõigi ökosüsteemiteenuste kvaliteeti.

Sama loogika järgi tuleb käsitleda ka ökosüsteemide „pahateenuseid“. Näiteks võib tuua looduskatastroofid (tormid, maavärinad, maalihked, trombid, tsunamid), põuad ja üleujutused, samuti sääsed, puugid, põllukahjurid, korrastamata pargid. Pahateenused võivad olla inimestele kas otseselt kahjulikud (joonis 3.11) või lihtsalt häirivad, kuid samas looduse talitlemise seisukohalt vajalikud. Niisiis on pahateenused samuti ökosüsteemide osad ja neid ei tohi käsitleda tervikut arvestamata. Nendega võideldes tuleb silmas pidada ökosüsteemi säilitamise ja kaitse põhimõtteid.

**3.10.** Jägala joa tingliku hindamise uuring (2009) tõi välja, et loodusliku vooluhulgaga Jägala joa rahaline väärtus on ligi 35 korda suurem joa väärtusest elektrienergia tootmisel.

Linnamäe hüdroelektrijaam on paisutanud Jägala joast allavoolu paikneva ala, muutes sellega jõe elupaikade ja ökosüsteemiteenuste kvaliteeti.

Harku järvel on head võimalused ökosüsteemiteenuste kasutamiseks, kuid paraku ei luba kehv ökoloogiline seisund neid täielikult nautida.

**3.11.** Ökosüsteemi "pahateenus" – malaariat ja lümfisoonte filarioosi levitav hallasääsk *Anopheles stephensi*. 80% malaariajuhtumitest esineb Sahara-taguses Aafrikas. Igal aastal haigestub malaariasse 300–500 miljonit ja sureb 1,5–2,5 miljonit inimest.

## KÜSIMUSED

1. Milles seisneb ökosüsteemiteenuste kontseptsioon?
2. Millised on DPSIR-raamistiku keskkonnaindikaatorite näitajatüübid?
3. Nimetage jõgede ja järvede ökosüsteemiteenuste sarnasusi ja erinevusi.
4. Mis on ökosüsteemide pahateenused?
5. Milles seisneb ökosüsteemiteenuste hindade määramise hedonistlik meetod?

## MÕISTED JA MÄRKSÕNAD

ökosüsteemiteenused
siseveekogude ökosüsteemiteenused
jõgede keskkonnatingimuste näitajad
järvede morfoloogiaindeks
DPSIR-raamistik
keskkonnaindikaatorid
ökosüsteemiteenuste hindamise metoodikad
ökosüsteemide pahateenused

# 3.4. Siseveekogude ökoloogilise seisundi hindamine

Ökoloogilise seisundi hindamine on veekogude majandamisel määrava tähtsusega eeltingimus. Pärast seisundi hindamist saab kindlaks teha ökosüsteemi eripärad ja anda veekogu kasutusvõimaluste prognoos. Selline skeem töötab peaaegu kõigi veemajandusküsimuste lahendamisel, olgu tegu veekogu taastamise, tervendamise, korrastamise, kalamajanduse või muu kasutusega.

## 3.4.1. Ökoloogilise seisundi mõiste ja tunnused

Veepoliitika raamdirektiivi järgi tähistab **ökoloogilise seisundi** mõiste pinnaveeökosüsteemide puhul nende struktuuri ja toimimise kvaliteeti. „Ökoloogialeksikoni“ järgi on tasakaalulise ökosüsteemi koosseis stabiliseerunud selliseks, kus „liikide konkurents on minimaalne, koosluse ruumiline struktuur maksimaalselt liigestunud ja aastane produktsioon ligikaudu võrdne kooslusest väljalangeva biomassiga“ (Masing 1992). Seda on defineeritud ka kui väljakujunenud ökosüsteemile omast struktuuri ja koosseisu suhteliselt püsivat olekut (Maastik jt 2004). Ökoloogiline seisund (ökosüsteemi olukord) peaks olema selle tasakaalu väljendus.

Mõnikord samastatakse ökoloogilist seisundit troofsusseisundiga, mis on aga pigem ökosüsteemi toiteainete sisaldus. Vahel pruugitakse samas tähenduses ka väljendeid „vee kvaliteet“ ja „ökoloogiline tasakaal“.

Mõnikord samastatakse ökoloogilise seisundiga üksikute tunnuste väärtusi. Näiteks Äntu Sinijärv (joonis 3.12) on Väike-Maarja lähedal paiknev allikajärv, kus vee üldlämmastikusisaldus on väga suur – kuni 5000 mg/m$^3$. Eutroofsuse ja hüpertroofsuse piiriks on juba 1100 mg/m$^3$. Kuid sellegipoolest on järv kristallselge veega. Seal on mõõdetud suurim vee läbipaistvus Eesti järvedes ja seda asustab vähetoitelise järve elustik. Vesi on selge, sest napib fosforit, mis lubjarikkas vees on suures osas lahustumatult seotud. Seega ei näita üldlämmastikusisaldus üksi siin järve ökoloogilist seisundit.

**3.12.** Karedaveeline Äntu Sinijärv on üks kõige selgema veega järvi Eestis. Põhjus on selles, et väga suurest lämmastikusisaldusest hoolimata on fosforit vees vähe.

Ökosüsteemi seisund on määratletav sünteesi- ja laguahela tasakaalu kaudu, kuid praktikas on seda raske kindlaks teha. Usaldusväärse tulemuse saamiseks peaks hindama kõigi toiduahelalülide produktsiooni. Veeökosüsteemid on aga nii keerulised, et seda pole enamasti võimalik teha. Seepärast kasutatakse veekogude hindamistunnuste väärtuste sarnasust loodusliku seisundi väärtustega. Ka sel juhul tuleb teha lihtsustusi. Näiteks võidakse pidada looduslikele tingimustele vastavaks järvede seisundit 1950. aastatel, sest varasemaid usaldusväärseid andmeid lihtsalt pole.

Ökoloogilise **seisundi hindamisel** kasutatakse mitmesuguseid tunnuseid, nagu elustiku mitmekesisus, indikaatorliigid ja -kooslused, elustikurühmade suhteline produktiivsus, veeõitsengu intensiivsus, toiteainete sisaldus, lahustunud gaaside hulk ja jaotus, veesamba kihistumus, sette paksus, sette oksüdatsiooniaste, settimise kiirus, vee värvus ja läbipaistvus, veekogu kinnikasvamise aste. Mitmed näitajad, näiteks sulfaatide ja kloriidide sisaldus vees, pole ökoloogilise seisundi hindamisega otseselt seotud. Magevetes ei ole nad kuni teatud sisalduseni veekogudele olulised. Anaeroobsetes tingimustes võivad sulfaadid siiski sulfiidideks muutuda, millest näiteks vesiniksulfiid on elustikule mürgine. Suur kloriidi- ja sulfaadisisaldus võib muuta veekogu liigilist koosseisu riimveelistes veekogudes.

**Füüsikalis-keemilistest üldtingimustest** arvestatakse ökoloogilise seisundiklassi määramisel järgmisi kvaliteeditunnuseid: temperatuur, pH, hapnikusisaldus, soolsus, toiteainesisaldus, hapestumus, ohtlikud ained, muud saasteained. Hüdromorfoloogilised määramistunnused on veerežiim, veekogu kuju ja tõkestamatus (vooluvetes).

**Elustikurühmadest** tuleb vooluvete hindamisel raamdirektiivi järgi arvestada suurtaimede, põhjaeluliste ränivetikate ja selgrootute põhjaloomade koosseisu ja arvukust ning kalade koosseisu, arvukust ja vanuselist struktuuri. Seisuvete puhul on hinnatavaks rühmaks ränivetikate asemel fütoplankton, muud rühmad ehk „bioloogilised elemendid“ langevad vooluvete omadega kokku.

Veekogude ökoloogilist seisundit kujundavad looduslikud tingimused. Olulised on ökopiirkond ja veekogu tüüp (vt alapeatükk 1.13.5). Eesti, Läti ja Leedu jõed ja järved kuuluvad Balti ökopiirkonda. Kõik Eesti siseveekogud asuvad madalikul (< 200 m ümp). Keskkonnaministri määruse järgi (Pinnaveekogumite... 2010) jagatakse vooluveed valgla suuruse ja vee humiinainesisalduse järgi seitsmesse tüüpi. Seisuveed jagatakse pindala, kihistumuse ja vees lahustunud ainete (vee karedus, humiinained, kloriidid) järgi kaheksasse tüüpi.

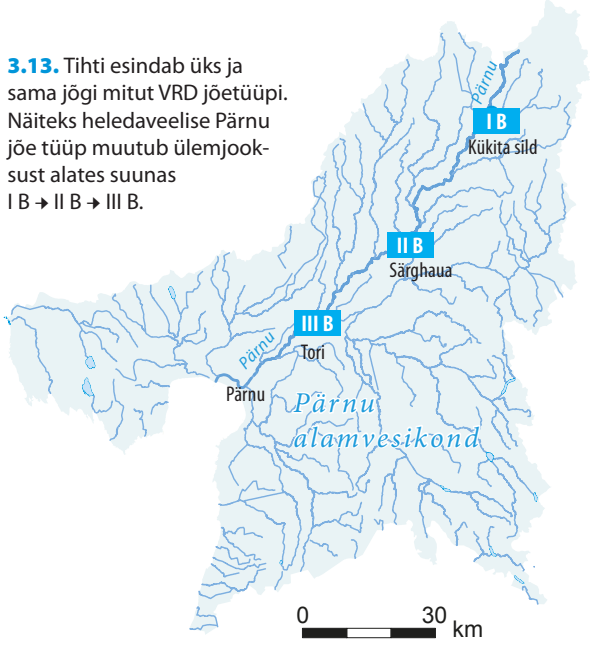
Olulised ökoloogilist seisundit kujundavad keskkonnatingimused on järgmised.

- **Veekogu mõõtmed (morfomeetrilised näitajad).** Suuremad ja sügavamad veekogud on juba termodünaamika põhitõdede järgi mõjutustele vastupidavamad. Madalates ja suurtes järvedes on veemass hästi aereeritud, väikestes ja sügavates tagab stabiilsuse suur veemaht. Mida väiksem on veekogu, seda rohkem sõltub ökoloogiline seisund kaldanõlva kaldest ja ulatusest. Järsematelt ja kitsamatelt nõlvadelt kantakse aineid veekogusse rohkem kui laugematelt ja laiematelt. Samas uhutakse laugemate nõlvadega veekogudesse palju aineringesse lülituvaid aineid üleujutuste ajal. Vooluveekogudes, eriti väiksemates, on oluline voolusängi looklevus, järvedel kaldajoone liigestatus ja saarte olemasolu. Mida liigendatum on kaldajoon, seda rohkem on elupaiku.
- **Veekogu varjutatus.** See on oluline väiksemates veekogudes, eriti kitsastes jõgedes, kus fotosünteesi pidurdab valguse vähesus.
- **Hüdroloogiline režiim (voolukiirus, veemaht, veevahetus).** Veemaht on otseselt seotud morfomeetriliste näitajatega. Mida suurem on veemaht ja mida intensiivsem veevahetus (voolukiirus), seda parem on ökoloogiline seisund. Suur veemaht tagab protsesside stabiilsuse, suurema eluruumi ja mitmekesisemad keskkonnatingimused. Intensiivsem veevahetus tagab parema gaasirežiimi ja toiteainete juurdevoo, eemaldab kogunenud orgaanilisi aineid ning võimaldab elustiku liikumist. Iseasi, et leidub liike, mis on spetsialiseerunud just väikesele vooluhulgale või sügavusele.
- **Vee üldaluselisus.** Mida karedam on vesi, seda tasakaalulisem on tavaliselt seisund. Selle tagab siseveekogudes karbonaatne puhversüsteem. Karedas vees on ka esmasprodutsendid paremini varustatud mineraalse süsinikuga. Mürgid toimivad karedas vees nõrgemini kui pehmes vees.
- **Setete koostis.** Järvedes on bentaali sügavam osa (profundaal) tavaliselt pehmete setetega kaetud. Selle koostis ning vee ja sette piirpinnal toimuvad protsessid (settimine, resuspensioon, bioturbatsioon) võivad seisundit märgatavalt muuta. Litoraalis ja sublitoraalis on setted enamasti jämedamad, kuid seisundi kujundamisel samuti olulised. Vooluveekogudes on üks ökoseisundi kujundajaid põhja struktuur, milles võivad ülekaalus olla liiv, kivid, savi, kruus, orgaaniline sete vm.
- **Toiteained.** Toiteainevaeguse korral on ökosüsteemi seisund hea, kuid enamasti vähe vastupidav mõjutustele. Toiteainete lisandudes vastupidavus esialgu suureneb. Nende üleküllus on aga üks selgemaid ökosüsteemi halva seisundi väljendusi. Üleküllust põhjustavad vesikeskkonnas toimunud muutused, mida kirjeldavad terminid „eutrofeerumine“ ja „antropogeenne eutrofeerumine“.

- **Lahustunud ja kolloidse orgaanilise aine iseloom ning hulk.** Orgaaniline aine veekogudes on tavaliselt mitmesuguse koostise ja päritoluga. Humiinained seovad fosfaate ja töötavad seega omamoodi puhvrina. Fosfor on järvedes peamine primaarproduktsiooni piirav mõjur. Agregeerunud humiinained mõjutavad oluliselt ka veekogu valgusrežiimi, hajutades ja neelates tugevasti kiirgust. Mida rohkem on humiinaineid, seda vastupidavam on ökosüsteem. Bioloogiliselt kergesti lagunev orgaaniline aine seevastu täidab veekogus sarnast osa lahustunud toiteainetega. Erinevus on vaid selles, et toiteained lülituvad aineringesse sünteesiahela, bioloogiliselt kergesti lagunev orgaaniline aine aga laguahela kaudu.
- **Ilmastik.** Mida madalama troofsusega on veekogu, seda rohkem on ta mõjutatud ilmastikust. Mõõdukas temperatuuri tõus enamasti intensiivistab bioloogilisi protsesse. Ökosüsteemi stabiilsusega on see seotud niivõrd, kuivõrd dünaamiline on üldine temperatuurijaotus. Temperatuurikõikumise perioode on väga erineva pikkusega, alates ühest päevast ja lõpetades aastatuhandetega. Ökosüsteemi seisundile avaldab kõige otsesemat mõju aastane kiirgusbilanss. Rahuliku ilmastikunäitajate dünaamikaga aastatel on veekogude seisund parem. Sademed mõjutavad veekogu seisundit veevahetuse intensiivsuse, ainevoo ja veetaseme dünaamika kaudu. Siin võib tekkida küsimus, kas veerikastel perioodidel uhutakse valglalt rohkem aineid sisse, mille tagajärjel seisund halveneb, või vastupidi: veerikastel perioodidel toimub lahjenemine, nii et lahustunud ainete sisaldus veekihis väheneb. Vastus sõltub veekogu valgalast ja morfomeetriast. Eesti väikejärvedes on veerikastel perioodidel ülekaalus lahjendusefekt, vooluveekogudes sageli vastupidi. Siis on küll märgata suuremat huumusainete sissevoolu, mis ökosüsteemi pigem stabiliseerib.
- **Kõrgus merepinnast.** Veepoliitika raamdirektiivi järgi on see tunnus oluline juhul, kui veekogu asub kõrgemal kui 200 m ümp. Et peaaegu kõik Eesti veekogud asuvad madalamal (välja arvatud mõned väikesed jõed ja järved), ei ole kõrgusel merepinnast meie oludes tähtsust.

**Tüüp I B** – väikese valgala ja vooluhulgaga heledaveeline jõgi.

**Tüüp II B** – keskmise valgala ja vooluhulgaga heledaveeline jõgi. Jõgi on juba laiem ja elupaiku rohkem.



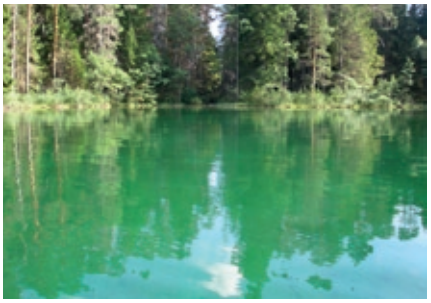

**3.13.** Tihti esindab üks ja sama jõgi mitut VRD jõetüüpi. Näiteks heledaveelise Pärnu jõe tüüp muutub ülemjooksust alates suunas I B → II B → III B.

**Tüüp III B** – suurusjärgu võrra suurema valgala ja vooluhulgaga heledaveeline jõgi. Jõgi on lai, elupaikade ja elustiku mitmekesisus on suur.

**■ ÖKOLOOGILISE SEISUNDI HINDAMISE PÕHIMÕTTED EUROOPA LIIDU SISEVEEKOGUDES** Seisundi hindamise põhimõtted määrab kindlaks veemajandust reguleeriv veepoliitika raamdirektiiv (VRD), mis hakkas kehtima 22. detsembril 2000. Seejuures tehakse VRDs selget vahet tüpoloogia ja klassifikatsiooni vahel.

**Tüpoloogia** on veekogude jaotamine rühmadesse ehk tüüpidesse keskkonnanäitajate iseärasuste põhjal. Selleks kasutatakse niisuguseid looduslikke tunnuseid nagu mõõtmed, kõrgus merepinnast, vee karedus, hüdroloogiline režiim jt. Eraldi tüpoloogiad luuakse järvede, jõgede, siirdeveekogude ja rannikumere kohta. Eestis pole siirdeveekogusid – merelähedasi poolsoolaseid siseveekogusid – eristatud ja merd me siin ei käsitle. VRD põhimõtteid arvestades on Eestis koostatud järvede tüpoloogia (vt alapeatükk 1.13.5). See on lihtsustus, mis on valminud varem Eestis loodud tüpoloogiate eeskujul. Jõgede tüpoloogia on esitatud samas alapeatükis. Näiteid VRD jõe- ja järvetüüpide esindajatest on kujutatud joonistel 3.13 ja 3.14.

**3.14.** Järvetüüpide näiteid VRD tüpoloogia järgi.



**Tüüp I**

**Äntu Sinijärv**. Üks Eesti selgeveelisemaid järvi. Väga kareda veega, mistõttu peamine toiteaine fosfor ei pääse mõjule. Vesi on selge ja elustik vaene.

**Tüüp II**

**Kaarepere Pikkjärv** Vooremaal. Kõige arvukam VRD järvetüüp Eestis. Väikese sügavuse tõttu on sellised järved sageli väga taimerikkad. Vesi on keskmise karedusega, kihistumata.

**Tüüp III**

**Saadjärv** Vooremaal. Üks suuremaid ja sügavamaid järvi Eestis. Vesi on keskmiselt kare ja kihistunud. Rikkaliku elustikuga, tugeva ökosüsteemiga, peab inimmõjule teatud piirini hästi vastu.

**Tüüp IV**

**Loosalu järv** Raplamaal. Suurim rabajärv Eestis. Tumeda ja pehme veega. Elustik suhteliselt vaene.

**Tüüp V**

**Tänavjärv** Vihterpalu lähedal. Eestis haruldane järvetüüp. Väga pehme veega. Tänavjärve ümbritsev raba pole vett kuigi tumedaks teinud. Elustik on vaene, kuid sellistes järvedes on üsna palju haruldasi liike.

**Tüüp VI**

**Võrtsjärv**. Eesti suuruselt teine järv on keskmise vee karedusega ja väga madal. Järve mõjutavad oluliselt veetaseme kõikumine ja suures akvatooriumis hästi levivad lained.

**Tüüp VII**

**Peipsi järv**. Eesti suurim järv (pindala 3555 km$^2$, suurim sügavus 15,3 m). Suure pindala tõttu pole kihistunud. Vesi on hele ja keskmise karedusega. Rikkalikult elupaiku ja elustikku.

**Tüüp VIII**

**Kooru järv** Saaremaal. Rannajärved on suhteliselt hiljuti merest eraldunud endised lahed. Enamikus neis on senini tunda mere mõju. Nad on madalad ja ebastabiilsed.

VRD järvede tüpoloogia erineb troofsustüpoloogiast, mille lõid August Thienemann (1922) ja Einar Naumann (1931). Näiteks Skandinaavia maad on Eestile küll ruumiliselt lähedal, kuid nende veekogud kuuluvad vees lahustunud ainete väiksema sisalduse tõttu teistesse tüüpidesse.

Looduslikes veekogudes eristatakse omaette ökoloogilist (bioloogilise ja hüdromorfoloogilise seisundi kombinatsioon) ja keemilist seisundit. Tehisveekogudes hinnatakse ainult ökoloogilist potentsiaali. See näitab, kui sarnased on nad ökosüsteemi struktuuri ja talitlemise poolest kõige lähedasemate looduslike veekogudega.

Seisundi hindamisel kasutatakse **ökoloogilise kvaliteedi suhtarvu** mõistet (*ecological quality ratio*), mis kujutab endast olemasoleva väärtuse ja loodusliku fooni suhet (joonis 3.15). Kesises või halvemas seisundiklassis olevatele veekogudele tuleb olukorra parandamiseks luua meetmekava. Väga head või head seisundit tuleb säilitada.

VRD kehtestab viis **ökoloogilise seisundi klassi**, mida tähistatakse järgmiste värvustega:

| | |
|---|---|
| *väga hea* (sinine) – | pinnaveekogum on looduslikus seisundis |
| *hea* (roheline) – | pinnaveekogum on looduslähedases seisundis |
| *kesine* (kollane) – | inimmõju pinnaveekogumile on mõõdukas |
| *halb* (oranž) – | inimmõju pinnaveekogumile on tugev |
| *väga halb* (punane) – | inimmõju pinnaveekogumile on väga tugev |

**Keemilise seisundi kvaliteediklasse** on kaks: *hea* ja *halb*. Esimesel juhul ei ületa pinnaveekogumi ühegi keemilise kvaliteedinäitaja väärtus kemikaaliseaduses sätestatud norme, teisel juhul ületab neid vähemalt üks.

Tugevasti muudetud ja tehisveekogude **ökoloogilise potentsiaali seisundiklasse** on neli: *väga hea, hea, kesine* ja *halb*.

Seisunditunnuste väärtusvahemike määramiseks on mitu võimalust. Inimmõjuta tasemete hindamiseks kasutatakse kas fooniveekogusid või foonitingimusi.

Järvede foonitingimuste selgitamiseks kasutatakse võimaluse korral ka paleolimnoloogilisi uuringuid, mis võimaldavad settesse talletatud organismide järgi jälgida seisundi dünaamikat kauges minevikus. Seda meetodit on rakendatud ka Eesti järvede puhul. Üks näide paleolimnoloogiliste uuringute kasutamisest on esitatud joonisel 3.16.

Teine võimalus fooniveekogude otsimisel on valgla seisundi hindamine. Nõuded fooniveekogude valglale varieeruvad Euroopas ökoregiooniti. Näiteks Balti ja keskökoregiooni järvede kohta kehtivad järgmised tingimused: inimasustus peab olema hõredam kui 10 inimest ruutkilomeetri kohta, punktreostust ei tohi olla, metsa ja looduslike alade osakaal valgala maakasutustüüpides peab olema üle 60% ja intensiivseid põllumajandusalasid alla 20%.

Marco Vighi ja Giuseppe Chiaudani (1985) kasutasid seisuveekogude foonilise, s.t inimmõjueelse fosforisisalduse määramiseks **morfoedaafilist indeksit** (*MEI*). Looduslikud tingimused on igal järvel isesugused, kuid *MEI* abil saab ennustada, millise tasemeni tuleb taastada lahustunud fosfori sisaldus hea ökoloogilise seisundi saavutamiseks.

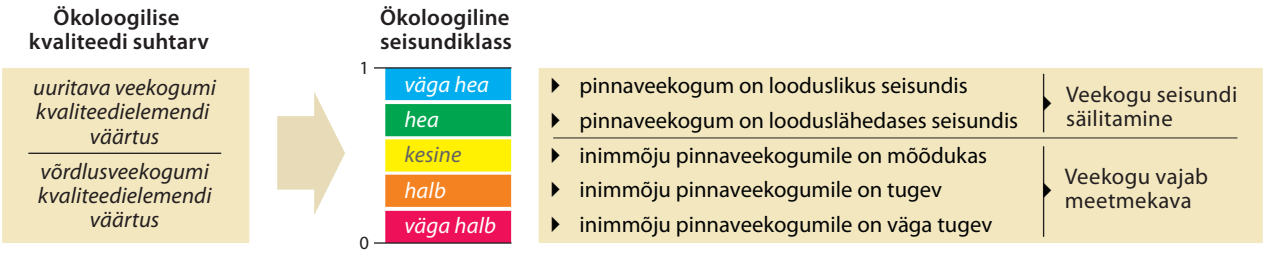
$$\log P = 1{,}48 + 0{,}33\ (\pm\ 0{,}09)\ \log MEI_{\mathrm{alk}},$$

$$\log P = 0{,}75 + 0{,}27\ (\pm\ 0{,}11)\ \log MEI_{\mathrm{cond}},$$

kus $MEI_{\mathrm{alk}}$ on morfoedaafiline indeks arvutatuna vee aluselisuse põhjal (aluselisus/järve keskmine sügavus) ja $MEI_{\mathrm{cond}}$ morfoedaafiline indeks arvutatuna vee elektrijuhtivuse põhjal (elektrijuhtivus/järve keskmine sügavus).

Vajalike väärtusvahemike leidmiseks valitakse need tunnused, mis annavad surveteguritega statistiliselt olulisi seoseid. Samuti võib kasutada tunnuste omavahelisi seoseid ja seoseid teiste seisundiindikaatoritega. Segastes olukordades lubab VRD siiski kasutada ka eksperdiarvamust. Eesti siseveekogude ökoloogilise seisundi hindamiseks kasutatavad näitajad ja klassifikatsioon on esitatud keskkonnaministri määruses (Pinnaveekogumite… 2010). Metoodika täiustamine jätkub nii Eestis kui ka teistes ELi liikmesriikides.

Koondhinnangu andmine veekogu seisundile on VRDs sätestatud nii, et bioloogilised tunnused on prioriteetsed ja keemilised toetavad neid. Looduslike veekogude ökoloogilise seisundiklassi määrab kõige halvemas klassis olev element (ingl *one-out, all-out*). Kui näiteks hinnang suurtaimede seisundile on kõige halvem, nt kesine, siis on ka kogu veekogu seisund kesine. Seda põhimõtet on hiljem kritiseeritud, sest nii võib seisundiklass saada alahinnatud. Eesti järvede seisundi hindamisel kasutatakse reeglit, et seisund otsustatakse selle klassi järgi, millesse langeb ⅔ või rohkem kõrgema seisundiväärtusega indikaatoritest. See põhimõte on tuletatud ELi üleeuroopalise veepoliitika raamprogrammi projektist ECOFRAME. Suurema osa kvaliteedielementide hinnang tasandab sel juhul ühe elemendi madala hinnangu, mis võib tingitud olla looduslikest iseärasustest (nt mittevastavusest tüübile). Koondhinnangu andmisel Eesti vooluveekogudele ja nende seisundiklassi määramisel kasutatakse siiski *one-out, all-out*-põhimõtet, kuid mitte ühe indikaatori piirides.

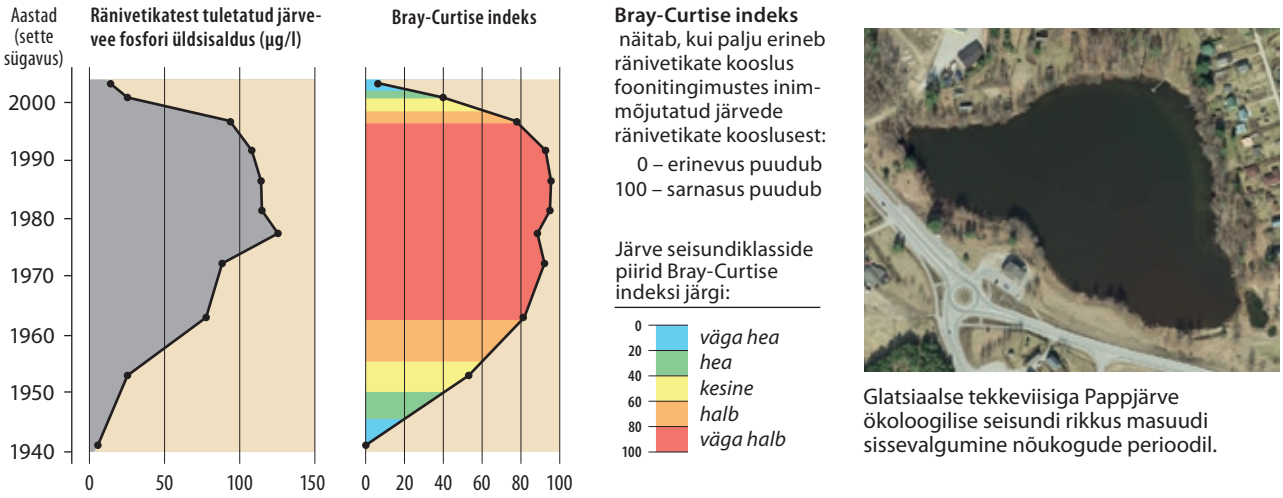



**3.15.** Pinnaveekogumi ökoloogiline seisundiklass määratakse seda kogumit iseloomustavate bioloogiliste, füüsikalis-keemiliste ja hüdromorfoloogiliste kvaliteedielementide järgi. Koondhinnang antakse halvima kvaliteedi suhtarvu väärtuse järgi. Seisundiklasside määramise kord ja vastavate kvaliteedinäitajate väärtused on kirjas keskkonnaministri määruses (Pinnaveekogumite... 2010).

TABEL **ÖKOLOOGILISE SEISUNDIKLASSI MÄÄRAMISEL KASUTATAVAD KVALITEEDIELEMENDID JA KVALITEEDINÄITAJAD**

| | Bioloogilised kvaliteedielemendid | Füüsikalis-keemilise kvaliteedielemendi näitajad | Hüdromorfoloogilise kvaliteedielemendi näitajad |
|---|---|---|---|
| **Vooluveekogum** | Fütobentos, suurselgrootud, kalastik | vee pH, lahustunud hapniku sisaldus, biokeemiline hapnikutarve ($BHT_5$), ammooniumioonide sisaldus ($NH_4^+$), üldlämmastikusisaldus ($N_{üld}$) ja üldfosforisisaldus ($P_{üld}$) | 1) veerežiim (vooluhulk ning selle dünaamika madalveeperioodil ja muul ajal)<br>2) jõevoolu tõkestatus (tõkestatus piki jõge ja risti jõge)<br>3) morfoloogilised tingimused (jõe lang, jõe põhja iseloom, jõe laius, jõe kalda iseloom, jõe kaldavööndi ulatus, jõe lamm) |
| **Seisuveekogum** | Fütoplankton, suurtaimestik, suurselgrootud | vee pH, läbipaistvus, metalimnioni paksus või algussügavus, üldfosforisisaldus ($N_{üld}$) ja üldlämmastikusisaldus ($P_{üld}$) | 1) veerežiim (veetaseme muutused)<br>2) morfoloogilised tingimused (veekaitsevööndi seisund, järvekalda struktuur, järve sügavuse vaheldumine, põhjasetted) |

Märkus: kavas on lisada vooluveekogumite bioloogiliste kvaliteedielementide hulka suurtaimestik ning seisuveekogumite elementide hulka fütobentos, zooplankton ja kalastik




Glatsiaalse tekkeviisiga Pappjärve ökoloogilise seisundi rikkus masuudi sissevalgumine nõukogude perioodil.

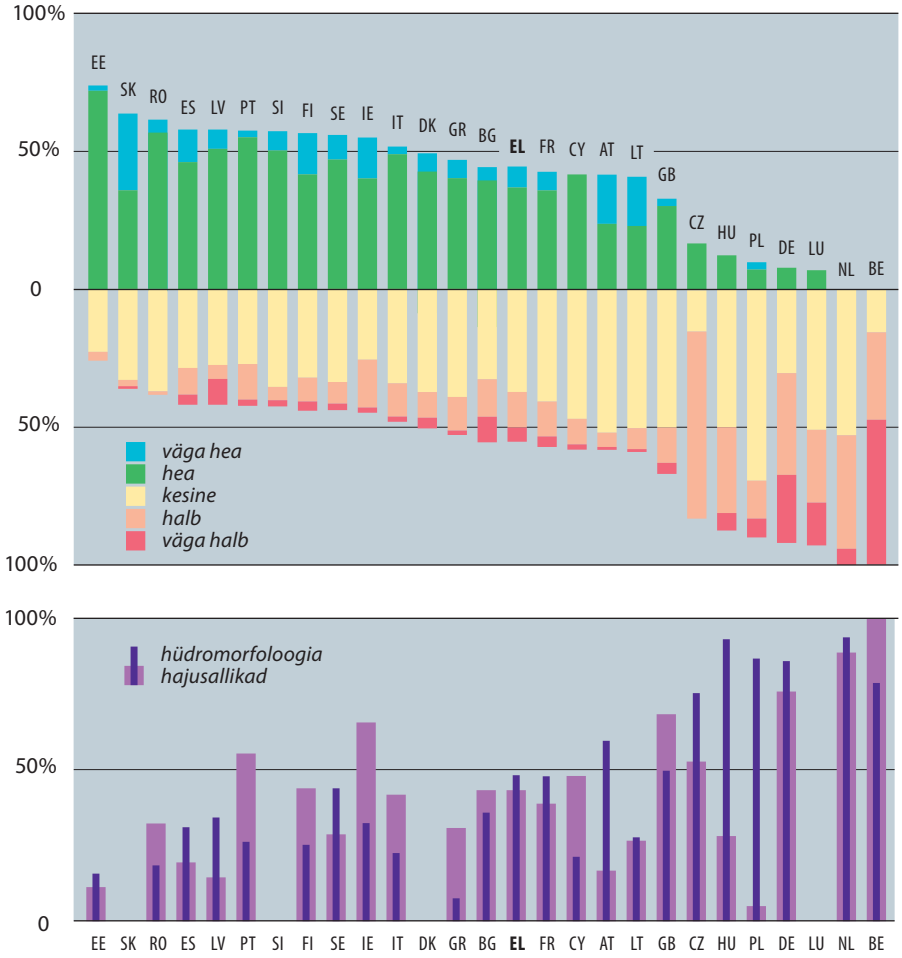
**3.16.** Pappjärve ökoloogilise seisundi dünaamika 1940–2005. Bray-Curtise ökoloogilise seisundi indeks määratakse ränivetikate järgi.

## JÄRVEDE JA JÕGEDE SEISUND EUROOPAS JA EESTIS

Euroopa Keskkonnaagentuur avaldab ülevaateid vee ja veekogude seisundist, hindamisest, surveteguritest ja prognoosidest. Üleeuroopaline veekogude hindamine algas 2003. a, 2010. aastaks olid kokkuvõtted tehtud. Selleks ajaks oli inventeeritud veekogude tüüpe, arutatud klassifitseerimise põhimõtteid, võrreldud klassifikatsioone ja harmoniseeritud neid kõigis ökoregioonides, mõne elustikurühma puhul ka kõikides liikmesriikides.

Eesti jõed on Euroopas suhteliselt hea ökoloogilise seisundiga (joonis 3.17). Selgelt on märgatav seos koormusallikate ja seisundi vahel. Järvede seisundi järgi Eesti päris esikohal ei ole (joonis 3.18).

Veekogude seisundit hinnatakse küll peamiselt VRD nõuete kohaselt, kuid sageli vajatakse rakendusküsimustes suuremat põhjalikkust. Näiteks VRD järgi ei arvestata järvedes üldse bakter- ega zooplanktonit. Eriti viimase rühma puudumine on esile kutsunud palju kriitikat.




| | Riik | Jõgede arv |
|---|---|---|
| EE | Eesti | 654 |
| SK | Slovakkia | 1 760 |
| RO | Rumeenia | 3 256 |
| ES | Hispaania | 3 474 |
| LV | Läti | 204 |
| PT | Portugal | 1 507 |
| SI | Sloveenia | 131 |
| FI | Soome | 949 |
| SE | Rootsi | 15 474 |
| IE | Iirimaa | 4 508 |
| IT | Itaalia | 3 991 |
| DK | Taani | 13 642 |
| GR | Kreeka | 649 |
| BG | Bulgaaria | 688 |
| **EL** | Euroopa Liit | **91 040** |
| FR | Prantsusmaa | 10 781 |
| CY | Küpros | 163 |
| AT | Austria | 7 322 |
| LT | Leedu | 832 |
| GB | Suurbritannia | 9 080 |
| CZ | Tšehhi | 1 062 |
| HU | Ungari | 584 |
| PL | Poola | 987 |
| DE | Saksamaa | 8 817 |
| LU | Luksemburg | 102 |
| NL | Holland | 254 |
| BE | Belgia | 177 |

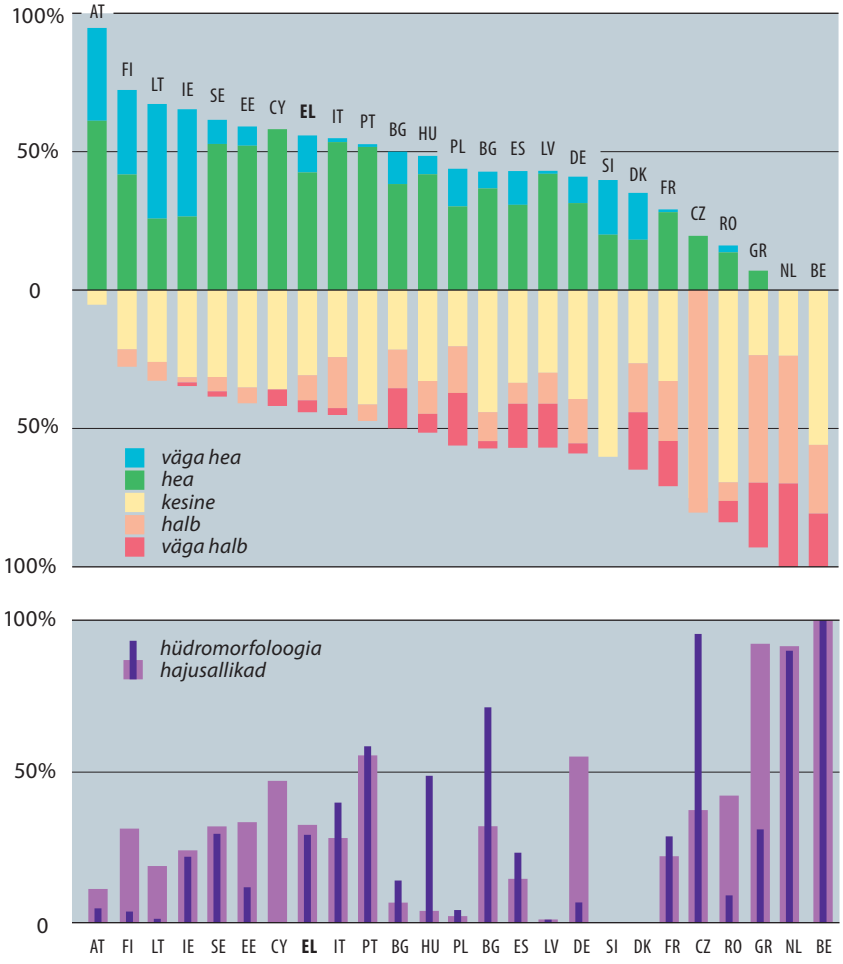
**3.17.** Jõgede seisund ELi liikmesriikides. Üleval on valimisse võetud jõgede (nt Eesti puhul 654 jõelõiku) protsentuaalne jaotus ökoloogilise seisundi või potentsiaali järgi. All on samade jõgede protsentuaalne jaotus mõjutatuse järgi kahest survetegurist: hüdromorfoloogiast (inimese põhjustatud veerežiimi muutus, kaldaala või veekogu põhja ümberkujundamine, paisud, teised vesiehitised jms) ning hajusallikatest (ainete koormus, mis lähtub kindla asukohata allikatest).

## KÜSIMUSED

1. Kuidas mõjutavad järve morfomeetrilised näitajad tema ökoloogilist seisundit?
2. Kuidas mõjutab ilmastik veekogude ökoloogilist seisundit?
3. Millised on veekogude ökoloogilise hindamise kvaliteediklassid?
4. Mida näitab ökoloogilise kvaliteedi suhtarv?
5. Millised on fooniveekogude näitajate väärtuste leidmise võimalused?

## MÕISTED JA MÄRKSÕNAD

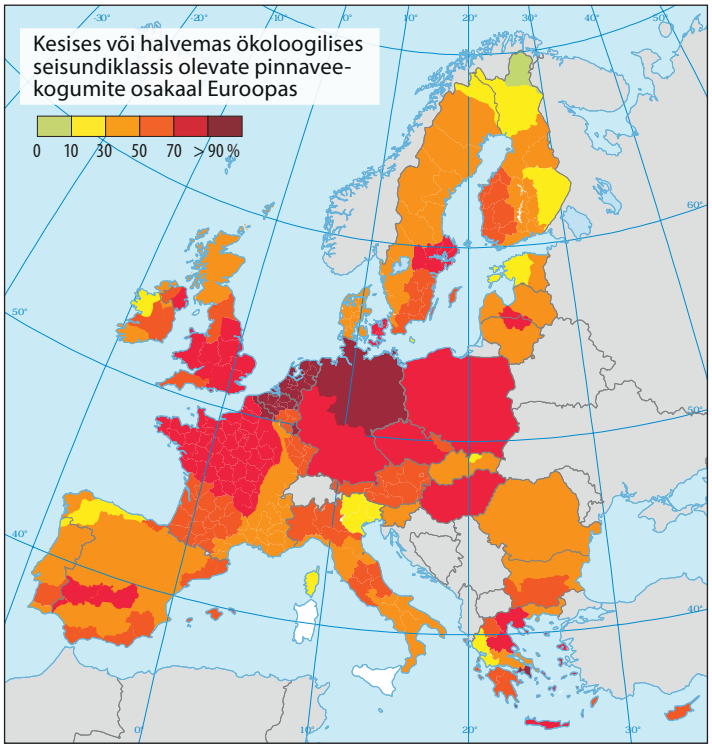
ökoloogiline seisund
ökoloogilise seisundi hindamise tunnused
ökoloogilist seisundit kujundavad keskkonnatingimused
tüpoloogia
ökoloogilise kvaliteedi suhtarv
ökoloogilise seisundi klassid
keemilise seisundi kvaliteediklassid
ökoloogilise potentsiaali seisundiklassid
morfoedaafiline indeks




| | Riik | Järvede arv |
|---|---|---|
| AT | Austria | 62 |
| FI | Soome | 1 770 |
| LT | Leedu | 345 |
| IE | Iirimaa | 801 |
| SE | Rootsi | 7 196 |
| EE | Eesti | 86 |
| CY | Küpros | 17 |
| **EL** | Euroopa Liit | **14 755** |
| IT | Itaalia | 145 |
| PT | Portugal | 118 |
| BG | Bulgaaria | 42 |
| HU | Ungari | 76 |
| PL | Poola | 180 |
| GB | Suurbritannia | 1 119 |
| ES | Hispaania | 150 |
| LV | Läti | 259 |
| DE | Saksamaa | 680 |
| SI | Sloveenia | 5 |
| DK | Taani | 783 |
| FR | Prantsusmaa | 247 |
| CZ | Tšehhi | 67 |
| RO | Rumeenia | 131 |
| GR | Kreeka | 13 |
| NL | Holland | 447 |
| BE | Belgia | 16 |

**3.18.** Järvede seisund ELi liikmesriikides. Üleval on valimisse võetud järvede (nt Eesti puhul 86 järve) protsentuaalne jaotus ökoloogilise seisundi või potentsiaali järgi. All on samade järvede protsentuaalne jaotus mõjutatuse järgi kahest surveteguristi: hüdromorfoloogiast (inimese põhjustatud veerežiimi muutus, kaldaala või veekogu põhja ümberkujundamine, vesiehitised jms) ning hajusallikatest (ainete koormus, mis lähtub kindla asukohata allikatest).

# 3.5. Siseveekogude tervendusmeetodid




**3.19.** Üle 51 000 Euroopa jõe (56% veekogumitest) ehk 630 000 km (64% kogupikkusest) on kesise või kehvema seisundi või potentsiaaliga. Järvede olukord on pisut parem: 44% ehk ligikaudu 6500 järve on kesise või kehvema seisundi või potentsiaaliga. Järvede parem olukord tuleneb sellest, et 60% vaadeldud järvedest on Rootsis ja Soomes, kus inimasustuse tihedus ja põllumajanduslik surve on suhteliselt tagasihoidlik.

## 3.5.1. Mõisted: tervendamine, taastamine ja korrastamine

Varem kasutusel olnud mõiste „veekogude taastamine“ on otsetõlge ingliskeelsest väljendist *restoration of water body*. See eeldab olukorda, kus veekogu on peaaegu hävinud ja luuakse sisuliselt uuesti. Paljudel juhtudel on aga kannatada saanud hoopis veeökosüsteem, toimunud nihked hüdrokeemilises või hüdroloogilises režiimis, hävinud kooslused, kannatada saanud veekogu välisilme jne. Sellistel puhkudel on kohasemad terminid „tervendamine“ ja „korrastamine“.

**Tervendamine** on protsess, kus mitmesuguste füüsikalis-keemiliste ja/või bioloogiliste võtete ning meetodite abil parandatakse ökoloogilist seisundit. Sellega suurendatakse ka veekogu virgestuslikku ja majanduslikku väärtust. Füüsikalis-keemiliste meetodite hulka kuuluvad näiteks toiteainete keemiline setitamine ja veetaseme reguleerimine. Bioloogilistest meetoditest võib nimetada biomanipulatsiooni. Tervendamise abil püütakse inimese muudetud ökosüsteemi viia tagasi looduslähedasse tasakaalulisse seisundisse. Tervendamine on põhjendatud siis, kui veeökosüsteemi looduslik taastumine oleks võimatu või liiga aeglane, et tagada väärtusliku elustiku säilimist.

Veekogu **taastamisel** (nimetatakse ka uuendamiseks või noorendamiseks) taasluuakse juba hävinud veeökosüsteem. Näiteks võib tuua muda eemaldamise sellega täitunud järvenõost. Tihti on endise ökosüsteemi ja liigirikaste koosluste taastamine võimatu, sest koos veekogu kadumisega on toimunud ulatuslikud muutused ka valglal. Siis on mõistlikum luua juba asendusveekogu, mis küll enam ei sisalda kõiki varasemaid looduslikke komponente, kuid sobitub paremini muutunud tingimustesse. Sellist protsessi nimetatakse **rehabilitatsiooniks**.

Veekogu **korrastamine** (ka „saneerimine“) on protsess, mille käigus muudetakse veekogu ja sellega piirnevate alade välisilmet, kuid veekogu enda ökoloogiline seisund oluliselt ei muutu. Korrastamine on seotud virgestusliku ja esteetilise väärtuse taastamise või loomisega. Selle alla kuuluvad näiteks kaldaveetaimestiku niitmine, randade ja paadisildade rajamine. Regulaarne korrastamine poollooduslike koosluste säilitamiseks on **hooldamine**.

## 3.5.2. Tervendamise eeldused ja eesmärgid

Kõigepealt tuleb välja selgitada **tervendamis-** või **taastamisvajadus** ning seejärel püstitada konkreetne **eesmärk**, millisena tahetakse veekogu tulevikus näha. Eesmärgi määratlemiseks on kasulik leida mõni soovitavas seisundis võrdlusveekogu, mille eeskujul peaks tervendatava veekogu ökosüsteem toimima hakkama. Selle põhjal saab hinnata, kui halvas seisundis on tervendatav veekogu ja millised meetmed tuleks tarvitusele võtta. Olenevalt eesmärgist saab valida tervendamismeetodid ja kriteeriumid, mida soovitakse järgida.

Tervendustöödeks vajalik eelandmestik peab sisaldama järgmisi komponente:

- valgla kirjeldus,
- veekogu morfomeetrilised ja hüdroloogilised näitajad,
- vee- ja ainebilanss,
- elustiku iseloomustus,
- teave varasemate arenduste ning looduskaitseliste jm piirangute kohta.

Valgla kirjeldus sisaldab veekogu paiknemist, maakasutust, mullastiku iseloomustust, hüdroloogilisi iseärasusi ning punkt- ja hajureostusallikate paiknemist. Veekogu morfomeetriasse kuuluvad suurus, sügavus, veemahu ja -vahetuse iseärasused, setete paiknemine ja kirjeldus ning (eriti vooluveekogudel) vahetu kalda-ala iseloomustus. Ainebilansi puhul tuleb analüüsida toitainete koormust ning teiste valglalt saabuvate ainete ja põhjasetete keemilist koostist. Elustiku iseloomustus peab piisava põhjalikkusega kirjeldama kogu ökosüsteemi ja selle komponente ning hindama elustiku rolli aineringetes. Ning lõpuks tuleb tervendamise eesmärkide ja meetodite valikul arvesse võtta piirkonna üld- ja detailplaneeringuid, arengukavasid ning loodus- ja keskkonnakaitselist teavet. Andmestiku kogumiseks vajalikud eeluuringud peavad kestma vähemalt aasta.

Tervendamise või taastamise **peamine eeldus** on välisreostuse oluline piiramine ja looduslähedaste tingimuste taastamine valglal. Vastasel korral pole ette näha veekogu seisundi märgatavat paranemist. Lõpuks tuleb silmas pidada, et tervendamise tulemus ei saa olla ideaalne. On lootusetu kopeerida ajaloolist klimaatiliste ja biogeokeemiliste sündmuste jada või väga pika aja jooksul väljakujunenud ökosüsteemi.

**3.20.** Inni järve kaldaala korrastati 2008. aastal, kuid järve ökoloogilist seisundit see ei parandanud.

**■ VEEKOGU TERVENDAMINE VARASEMA SEISUNDI SAAVUTAMISEKS** Järved ja jõed on pidevas muutumises ning inimmõju kiirendab seda protsessi oluliselt. Kui loodusliku arengu käigus toimuvad muutused on enamasti nii aeglased, et jäävad märkamatuks, siis kiired inimtekkelised muutused viimase sajandi jooksul on selgelt tajutavad. Näiteks on paljudel jõgedel oluliselt muudetud voolusängi kuju.

Tervendamiseks vajaliku taustinfo leidmine võib olla üsna keerukas. Hüdrobioloogilised vaatlusread Eestis on enamasti lünklikud ja lühikesed: järvede puhul vaid 50–60 aastat pikad, vooluvete puhul veel lühemad. Ka ajaloolised fotod või arhiivimaterjal ei luba tavaliselt vaadata ajas kaugemale tagasi kui ühe sajandi. Seisuvete puhul saab kasutada paleolimnoloogilisi andmeid, mis annavad mõne järve puhul võimaluse tagasivaateks alates selle sünnimomendist. Kuid milline hetk võtta aluseks veekogu tervendamisel või taastamisel? Kõik looduslikud ökosüsteemid muutuvad nii ajas kui ruumis ka ilma inimmõjuta.

**■ VEEKOGU VÄLISILME MUUTMINE – KORRASTAMINE** Inimestele meeldib, kui maastikus leidub veekogusid. Seepärast on maastikukujundajate eesmärk anda veekogude tervendamisel neile selline välimus, mis kaunistaks piirkonda ning looks uusi puhkemajanduslikke võimalusi. Enamasti ei lähtuta siin veekogude kui ökosüsteemide talitlemisest, vaid neid käsitatakse „anumatena“, mille kuju ja välimust saab tehniliste vahenditega kergelt muuta. Puhkajate jaoks on ideaalne järv kuldse liivase rannariba ja türkiissinise veega. Järve veevaruna käsitava inseneri unistus on võrkaiaga piiratud ja betooni kängitsetud tiik, kus veevahetus on viimse tilgani reguleeritud ning igasugune elustik kõrvaldatud.

Ainult välisilmest lähtuv veekogu korrastamine osutub seetõttu ebaõnnestunud valikuks, mis ei täida ka ühekülgselt valitud eesmärki (joonis 3.20).

**■ VEEKOGU PRODUKTIIVSUSE SUURENDAMINE JA VESIVILJELUS** Siseveekogude bioressursside all mõistetakse enamasti kala- ja vähivarusid. Palju väiksemat huvi pakuvad senini vetikad, suurtaimed, veelinnud, imetajad ja mudavarud. Veekogu produktiivsus oleneb eelkõige looduslikust tüübist ja bioressurssidest. Looduslike järvede produktiivsuse suurendamine väetamise teel mõisteti Eestis hukka juba aastakümneid tagasi ning pole põhjendatud ka tänapäeval. Piirkondades, kus muret teevad happevihmad (näiteks Rootsis ja Norras), lubjatakse aga järvi regulaarselt. Tugev inimmõju viimase poolsajandi jooksul pole õnneks Eesti

järvede kalamajanduslikke eeldusi oluliselt rikkunud. Järvede kalasaagist annavad enamiku Peipsi ja Võrtsjärv, väiksemate osaks jääb 1%. Ka jõgede kalavarud on pigem kohaliku tähtsusega. Eesti kalamajandus sisevetel põhineb peamiselt looduslikel kooslustel, mida ekspluateeritakse peaaegu täies ulatuses. Kalatoodangut saab suurendada vaid kasvandustes.

**■ LIIKIDE JA KOOSLUSTE KAITSE** Eesti järvede kaitse põhimõtted on põhjalikku käsitlemist leidnud juba aastakümneid, jõgedega on tegeldud lühemat aega. Euroopa Liidu loodusdirektiivi (Natura 2000) järgi vajavad kaitset haruldased ja reostustundlikud järvetüübid (pehmeveelised ja vähese veevahetusega järved), looduslikult väga kaunid või haruldase tekkeviisiga veekogud ning need, kus on haruldane elustik või omapärane ökosüsteem. Veekogude formaalne kaitse alla võtmine ei hoia ära nende vananemist. Seetõttu on veekogude tervendamine haruldaste liikide või kooslusteelupaiga säilitamiseks ikkagi aktuaalne. Iseasi, et mõned liigid just vajavadki vananevaid veekogusid. Haruldastele liikidele või kooslustele sobiva elupaiga taastamine tähendab tihtipeale ka valgla maastiku tervendamist. See on tavaliselt mahukas töö, mille õnnestumisprotsent on väike. Esimestel aastatel pärast muudatusi võib elustiku seisund hoopis halveneda, näiteks on seda täheldatud jõeloogete taastamisel.

**3.21.** Paisjärve tervendamisel võib pärast orgaanilise sette eemaldamist katta põhja geotekstiiliga, mis stabiliseerib setteid ja kindlustab nõlva. Tihti soovitakse sel moel vähendada ka taimede liigset levikut. Enamasti see siiski ei õnnestu või õnnestub ainult lühiajaliselt. Kui aga suuri taimi ei kasva, võivad veekogu hõivata niitjad makrovetikad.

**■ ÖKOLOOGILISE SEISUNDI JA PUHKEMAJANDUSLIKE VÕIMALUSTE PARANDAMINE** Eestis hõlmab virgestus veekogudel peamiselt kalapüüki, suplemist, veesporti, paadiliiklust ja linnuvaatlusi. Enamik meie veekogusid on väikesed ja madalad. Seepärast võib eriti asulates ja suvekuudel tekkida oht, et puhkajate surve ületab veekogu taluvusvõime. Seda nimetatakse ka **rekreatiivseks mahutavuseks** (maksimaalne üheaegse kasutamise intensiivsus, mis ökoloogilist seisundit veel ei muuda). Korrastamise käigus saab seda mõnevõrra suurendada. Virgestusega seotud tegevustest kahjustavad kaldaalasid ja kutsuvad esile kallaste erosiooni hoonete ehitamine, telkimine, autoliiklus ja üldine reostamine. Siiski ei vastandu virgestus ja veekogu hea ökoloogiline seisund alati teineteisele. Hea läbipaistvusega vesi, intensiivne veevahetus ja mudastumata põhi on hinnatavad tunnused mõlemal puhul. Samas vähendavad puhkemajanduslikku väärtust rohke ja liigirikas veetaimestik ning tihe taimkate kallastel.

**■ TÖÖSTUSLIKU VÕI TEHNILISE OTSTARBEGA VEEKOGUD** Paljude veekogude puhul on nende taastamise, korrastamise või tervendamise ainukeseks eesmärgiks luua reservuaar, kust vajaduse korral saaks ammutada piisavas koguses ja sobiva kvaliteediga vett. Selliste veekogude elustikule ja ökosüsteemile ei seata peale stabiilse veekvaliteedi muid eeltingimusi.

*Tarbe- ja joogiveevarud.* Joogiks kasutatakse kas kaitstud põhjaveekihtide vett või puhastatud pinnavett. Järvede ja jõgede vett tuleb enne selle kasutamist joogi- ja tarbeveena enamasti puhastada. Selliste järvede tervendamise eesmärk on parandada toorvee kvaliteeti, et vähendada hilisemaid töötluskulusid.

*Vihmutusvesi ja kunstlume tootmine.* Eestis on keskmiselt iga neljas või viies suvi põuane, nii et tekib veenappus. See annab tunda eriti köögiviljakasvatuses ja kultuurkarjamaade hooldamisel. Looduslike veekogude suvine kasutamine vihmutusvee ammutamiseks pole säästlik. Veevaru kogumiseks tuleks hakata veetaset reguleerima ning pidev veetaseme kõikumine häiriks kogu ökosüsteemi. Mõistlikum on selleks otstarbeks luua tehisveekogud või paisjärved. Eestis rajati paisjärvi intensiivselt 1960.–1980. aastatel. Praeguseks on need algse tähtsuse enamasti minetanud ja omandanud puhkemajandusliku rolli või kadumas. Ka kunstlume tootmisel suusaradade tarbeks tuleb tagada talvehooajaks piisav veevaru. Selleks vajalik veehulk on niisutamisega võrreldes tunduvalt väiksem ja seetõttu sobivad selleks ka looduslikud veekogud. Lume tootmiseks ei sobi siiski sogane ja heljumirikas vesi, mis ummistab lumekahurite pumbad ja annab lumele ebameeldiva pruunika või roheka tooni.

Kõiki eelnimetatud veekogusid saab kasutada ka *tuletõrjevee* võtmiseks.

### 3.5.3. Järvede tervendamine

Maailmas on üha rohkem hakatud tegelema rikutud veeökosüsteemide tervendamise või taastamisega. Kasutatavate tehnoloogiliste võtete hulk on suur ja kogemused selles vallas kasvavad. Enamik tervendusmeetodeid on seotud toiteainete (peamiselt fosfori) koormuse ja toitelisuse vähendamisega. Väiksema osa moodustavad meetodid, mis võimaldavad kõrvaldada orgaanilise reostuse, hapestumise, sooldumise ja mürgiste ühendite põhjustatud tagajärgi. Lihtsustatult võib tervendusmeetodid jagada kolme rühma: insener-tehnilised, ökoloogilised ja kompleksed.

**Insener-tehnilised meetodid** hõlmavad mitmesuguseid hüdromehaanilisi ja keemilisi tehnoloogiaid. Peamiselt mõjutatakse nende abil valglat, järvenõgu ja abiootilisi näitajaid.

- *Veebilansi muutmine* seisneb peamiselt veevahetuse suurendamises, mis kiirendab toitainete ja heljumi väljaviimist järvest. Reostunud sissevoolude korral aitab järve seisundit parandada ka nende kõrvalejuhtimine järvest.
- *Veetaseme reguleerimine.* Enamasti tõstetakse veetaset selleks, et saavutada suuremat veemassi. See loob stabiilsema keskkonna vee-elustikule, säilitab talveperioodiks suurema hapnikuvaru ja vähendab vee toiteainesisaldust. Kõrgema veetaseme korral aeglustub järve vananemine ja paranevad puhkemajanduslikud võimalused. Veetaseme alandamist ei peeta looduslike järvede puhul sobivaks, kuid seda kasutatakse tehisveekogude puhastamisel ja setete mineraliseerumise tõhustamiseks.
- *Veekihtide eemaldamine.* Kihistunud järvedes on sügavamad veekihid sageli toiteainetest üleküllastunud. Sealt vee ärajuhtimine parandab vee kvaliteeti ja veekogu seisundit.
- *Õhustamine.* Hapnikuvaestes ja/või kergesti laguneva orgaanilise aine rikastes veekogudes aitab õhustamine varustada elustikku hapnikuga, kiiremini lagundada orgaanilisi ühendeid ja takistada fosfori vabanemist setetest.
- *Toiteainete keemiline setitamine.* Mitmesuguste keemiliste ainete abil (peamiselt alumiiniumi- ja rauaühendid) muudetakse toiteained vees lahustumatuks, setitatakse välja ja seotakse püsivalt põhjasetteis.
- *Setete isoleerimine.* Toiteainerikaste setete katmine liiva, kruusa, kipsi, kanga või muu materjaliga aitab setteid stabiliseerida ja takistab toiteainete jõudmist veesambasse.
- *Setete eemaldamine.* Rohked põhjasetted on iseloomulikud vananevatele ja tehisjärvedele. Nende eemaldamisel suureneb veemaht ja väheneb oluliselt toiteainete sisekoormus.
- *Elustiku mürgitamine.* Suure toitelisuse korral on probleemiks vetikate ja suurtaimede kontrollimatu vohamine. Mitmesuguste mürkidega on võimalik vähemalt ajutiselt veekogusid kasutuskõlblikuna hoida.
- *Biomassi eemaldamine.* Enamasti eemaldatakse veekogust esmasprodutsendid (suurtaimed, vetikad), et vältida nende lagunemisest tingitud orgaanilise aine kuhjumist ja tekkivat hapnikupuudust.

**Ökoloogilised meetodid** piirduvad järvetervenduses elusorganismide mõjutamisega. Peamiselt vähendatakse või lisatakse toiduahelate komponente ja muudetakse ökosüsteemi kui terviku toimimist.

- *Biomanipulatsioon* on elustikurühmade vahekorra muutmine eesmärgiga saavutada isereguleeruv ökosüsteem.
- *Bioloogiline tõrje.* Ebasoovitavate liikide tõrjeks kasutatakse nende looduslikke vaenlasi.

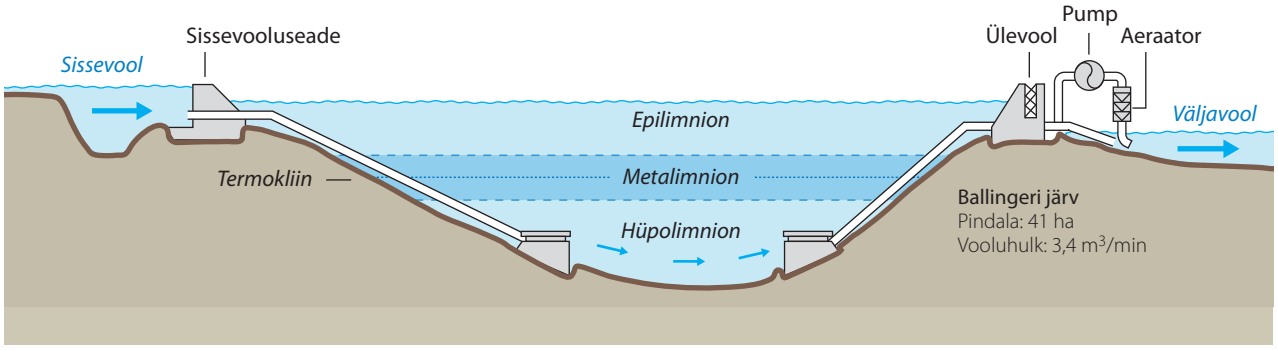
**Kompleksmeetodite** rakendamisel kasutatakse kombineeritult nii insener-tehnilisi kui ka bioloogilisi võtteid.

- *RIPLOX ja DEPOX.* Toiteainete keemilise setitamise ja sidumise meetodid, mis on kombineeritud aereerimise ja setteis oleva orgaanilise aine lagundamisega mikroorganismide abil.
- *Makrofüüdijärvede tervendamine.* Suurtaimestiku hävitamine on kombineeritud veetaseme tõstmise ja põhjasetete eemaldamisega.

#### ■ VEEKIHTIDE EEMALDAMINE JA ÕHUSTAMISMEETODID

**Veekihtide eemaldamine** Enamasti juhitakse ära toiteainerikka hüpolimnioni vesi. See vähendab toiteainete kogust, suurendab hapnikuga varustatud ala ja muudab veekihtide mahtu. Siis hoiavad ka setted paremini toiteaineid kinni ega vabasta neid veesambasse. Enamikus järvedes, kus seda meetodit on rakendatud, on hüppekiht jäänud endisele kõrgusele, ainult mõnel juhul on see liikunud sügavamale.

Hüpolimnioni vee eemaldamiseks paigutatakse järve põhja toru, mis algab järve kõige sügavamast kohast ja suundub väljavoolu (joonis 3.22). Väljavoolutoru ots paikneb järve veepinnast allpool ja toru hakkab tööle sifoonina. Esmakordse kasutaja järgi kutsutakse seda Olszewski toruks. Meetodi eelduseks on see, et järve veetase ei muutu. Vee kihistumuse lõhkumise ohtu ei teki, sest hüpolimnionist äravoolava vee kiirus ei ole kuigi suur. Hüpolimnioni vee ärajuhtimist on soovitatav kasutada selliste järvede puhul, milles on välja kujunenud pikaajaline kihistumus.



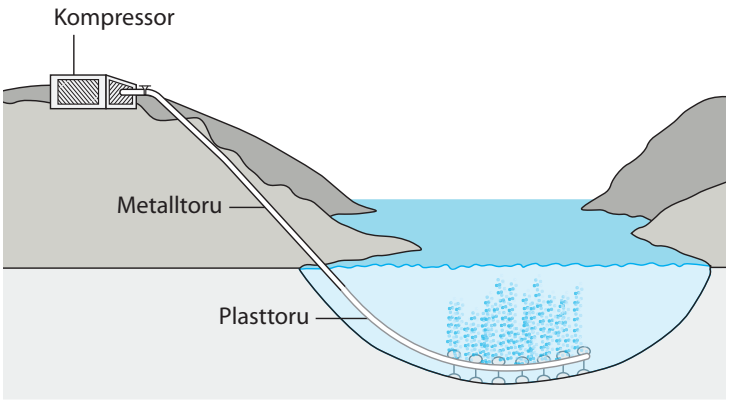

**3.22.** Vee ärajuhtimine järve hüpolimnionist vähendab selle toiteainesisaldust, suurendab hapnikuga varustatud ala ja muudab veekihtide mahtu.

Meetod on võrdlemisi odav ja tulemused head. Vee väljajuhtimine hüpolimnionist peaks algama siis, kui järv on kihistunud, kuid põhjalähedast täielikku hapnikupuudust (anoksiat) pole veel tekkinud. Talvel, kui kihistumust pole, juhitakse vett välja otse epilimnionist. Peamine negatiivne külg on väljajuhitava vee suur fosforisisaldus, hapnikuvaesus ja halb lõhn. See võib tekitada probleeme veekogus, kuhu väljapumbatav vesi juhitakse. Seda saab leevendada väljavoolava vee eelneva õhutamisega. Kasutatakse ka kombineeritud väljajuhtimist, kus hüpolimnionist pärit vesi segatakse pinnalähedastest kihtidest väljajuhitud hapnikurikkama veega. Nii tagatakse väljavoolava vee suurem hapnikusisaldus ja vesi ei mürgita allavoolu asuva veekogu elustikku. Meetod toimib siis, kui hüpolimnioni vesi vahetub vähemalt 2–3 korda kihistumuse püsimise ajal.

Eesti järvedest kaaluti selle meetodi kasutamist Arbi järve puhul Elvas, kuid probleemiks oleks kujunenud väljajuhitava vee liiga halb kvaliteet. Poolas Olsztyni linnas paiknevas Kortowskie järves pole siiani kuigi häid tulemusi saavutatud, sest järv on suur ja aeglase veevahetusega. Samas on see üsna odav viis olukorda mingilgi määral parandada.

**Hajus- ehk difuusse õhustuse meetod** Veekogusse sisestatakse augustatud torud. Need paigutatakse kas põhjale või vahetult selle kohale. Torudesse juhitud suruõhk väljub mullidena aukudest ja õhustab vett (joonis 3.23). Selline moodus soodustab oksüdatsiooniprotsesse ning vabastab $H_2S$, $CH_4$, $NH_3$ jt vees lahustunud gaasid atmosfääri. Ühtlasi takistab see veesamba kihistumist ning sügavates järvedes pikendab tsirkulatsiooniperioodi. Peamine hapnikusisalduse suurendaja on veesamba läbisegamine. Niisugune meetod on väga odav. Näiteks Poolas Olsztyni linnas asub ühe väikese järve kaldal tuulejõul töötav elektrigeneraator, mis pumpabki õhku vette.

Meetod sobib kasutamiseks asulates või nende läheduses olevates järvedes, ka talviti. Talvine jääalune õhutamine parandab kalade elutingimusi. Protsess on seda tõhusam, mida pisemad on gaasimullid ja mida väiksem vett liikumapanev ülerõhk. Samuti on õhkkardin (auklik voolik) märksa tõhusam kui ühest kohast õhu vettepumpamine. Enamasti on sellised veekogud nii rikutud, et aereerimise lõppedes halb olukord taastub.



**3.23.** Hajusaeratsioon tähendab kogu veesamba töötlemist. Õhustamise kõrval soodustab see mitme vees lahustunud gaasi ($H_2S$, $CH_4$, $NH_3$) eraldumist veest ning takistab veesamba kihistumist.

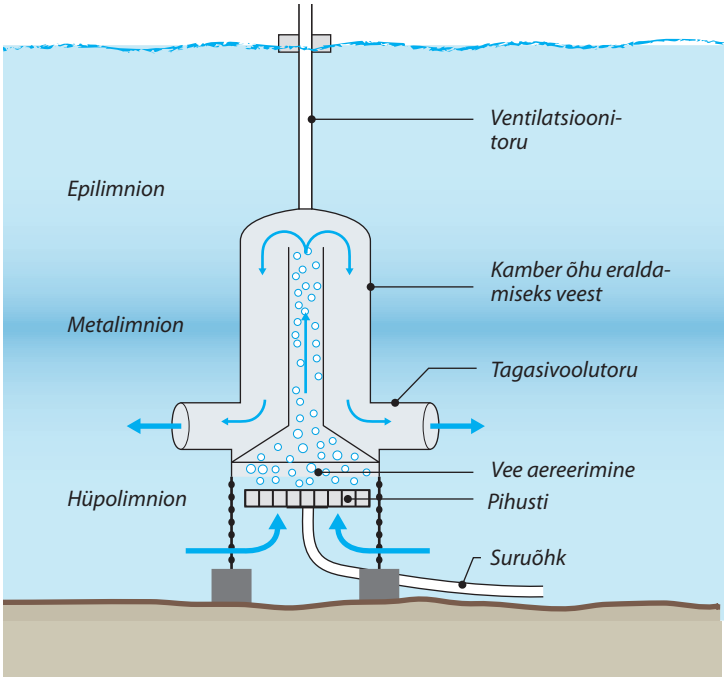
**Hüpolimnioni aereerimise meetod (LIMNO, HYPOX)** See on mõeldud kihistunud järvede oksüdeerimiseks hapnikuga hüppekihti lõhkumata. Hüppekihi lõhkumisel on oht, et põhjakihtide toiteainevaru tõstetakse veesamba kõrgematesse kihtidesse, kus toimub fotosüntees. Sealsed vetikad ja bakterid saavad sel juhul kasutada palju rohkem ressursse. Tagajärjeks võivad olla veeõitsengud ja muud sellega kaasnevad ebasoovitavad nähtused. Samuti soodustab kihistumine raua ja mangaani vabanemist setetest, kuid metalimnion takistab selle tõusu eufootilisse kihti. Raua ja mangaani hoidmine lahustumatuna on vajalik, kui vett soovitakse kasutada joogiks. Ühtlasi seotakse õhustatud vees liigne fosforikogus. Meetod aitab parandada ka kaladele sobivat veesamba osa.

Eesti järvedes võib toitesoolade sisalduse erinevus veekihtide vahel väga suur olla. Näiteks väikeses metsajärves, Kooraste Linajärves, on epilimnionis üldfosfori sisaldus 50–60 mg/m$^3$, aga põhjalähedastes kihtides 1000 mg/m$^3$ või rohkemgi.

Seadmed valmistatakse iga järve morfomeetriat arvestades. Enamasti on seadmed kõrgusega 5–25 m ja läbimõõduga 1–10 m. Töötamisel kasutatakse põhjalähedast vett (nooltega on joonisel 3.24 kujutatud vee liikumist), mis aereeritakse ja viiakse samasse kihti tagasi.

LIMNO-süsteemi on täiustatud fosforit setitava raudkloriidi lisamise teel. Seda nimetatakse HYPOX-meetodiks. Ühe Rootsi katsejärve vees vähenes HYPOXi rakendamisel anorgaanilise lämmastiku sisaldus alla 0,3 mg/l (varem oli see olnud üle 2 mg/l). Algul olid ülekaalus ammooniumioonid, hiljem nitraatioonid. Fosfaatide sisaldus vähenes 0,8 mg-lt/l 0,05 mg-ni/l. Fosfori hulga vähenemine hüpolimnionis oli seotud raua ja mangaani koguse vähenemisega. Nende metallide hüdroksiidid settivad tahkete osakestena põhja.

Et vältida olukorda, kus põhja lähedalt kõrgematesse kihtidesse suunatav vesi tekitab kaladel gaasimullihaigust, viiakse LIMNO aeraatoris vesi sügavamale, kus kalad viibivad harva. Õhu asemel võib kasutada ka hapnikku.




**3.24.** LIMNO aeraatorit kasutatakse kihistunud järvede tervendamiseks hüppekihti lõhkumata: aereeritakse vaid hüpolomnioni põhjalähedast vett, mis suunatakse sinna ka tagasi.

## ■ TOITEAINETE KEEMILINE SETITAMINE JA KEMOMANIPULATSIOON

Veekogude tervendamiseks võib kasutada vees lahustuvaid või peeneteralisi aineid. Esmapilgul võib tunduda, et ükskõik millise kemikaali lisamine vette on keskkonnavaenulik tegevus. Kuid paljud selleks kasutatavad ained (raud, lubjakivi) on veeökosüsteemide aineringete looduslikud komponendid, mida lisatakse nende vaeguse korral. Siiski nõuab selline vahelesegamine põhjalikke eeluuringuid, koostööd erialaspetsialistidega ja keskkonnalubade olemasolu.

Kemomanipulatsiooni võib jagada kolme suurde rühma:

1) vee ja/või setete keemiline töötlemine, mille käigus setitatakse välja toiteained, fikseerides need põhjasetetes siduvate ainetega või muutes põhjasetete redokstasakaalu;
2) pH reguleerimine;
3) elustiku keemiline tõrje, mille abil üritatakse vabaneda mingist konkreetsest liigist või elustikurühmast.

Vee või setete keemilisel töötlemisel mõjutatakse peamiselt abiootilist keskkonda, kuid enamasti on sellel kõrvaltoime ka elustikule. Tavaliselt on eesmärgiks toiteainete väljaviimine veesambast ja nende setitamine kujul, kus nad pole enam fütoplanktonile ega suurtaimedele kättesaadavad. Paljud kasutatavad kemikaalid suudavad peale toiteainete setitada ka fütoplanktonit ja orgaanilist ainet ennast või mõjuda tõrjevahendina suurtaimestikule.

Toiteainete keemiline setitamine järvede tervendusmeetodina töötati välja 1960.–1970. aastatel Rootsis. Toonased katsetused ebaõnnestusid, sest kemikaalide kogused olid liiga väikesed või ei suudetud piirata väliskoormust. Hiljem on sel teel edukalt tervendatud järvede hulk kasvanud.

Setitamine seisneb **koagulantide** (raua- või alumiiniumisoolad, kustutatud lubi) pihustamises vette. Tekivad suured ja kiiresti settivad osakesed või sültjad helbed, mis seovad veest toiteaineid ja setitavad elusorganisme ning orgaanilist ainet. Veekogu põhjas moodustab koagulant vee ja sette piirpinnale barjääri, mis ei lase toiteainetel enam vette lahustuda. Siduda ja setitada püütakse peamiselt fosforiühendeid, sest enamasti on just fosfor järvedes piiravaks toiteaineks. Selline setitamine on väga tõhus tervendusmeetod, mille mõju on pikaajaline, kestes isegi üle 20 aasta. Protsess on edukam sügavates ja kihistunud järvedes, kus toiteainete resuspensioon setteist veesambasse on madalate järvedega võrreldes tühine. Meetod on vähem tõhus madalates taimerikastes järvedes ja neis veekogudes, kus toiteainete väliskoormus ületab kemikaalidega eemaldatavate ainete hulka. Siiski on setitamine õnnestunud ka keskmiselt kuni 2 m sügavustes järvedes. Väga vedela või hõljuva sette korral võib tekkida vajadus lisada veel teistki koagulanti (näiteks biolagunevat polüakrüülamiidi).

Vees lahustunud lämmastiku reguleerimine ja setitamine on fosforiga võrreldes märksa keerukam ja tihti hoopis võimatu.

Elustiku keemilisel tõrjel on tunduvalt pikem ajalugu kui vee ja setete keemilisel töötlusel. Näiteks hakati vasksulfaati kasutama vetikatõrjeks juba 20. sajandi alguses. Tavaliselt tõrjutakse mikrovetikaid või suurtaimi. Elustiku tõrje pole tervendamismeetod, vaid pigem veekogu korrastamine ja eutrofeerumise tagajärgede likvideerimine. Paljude liigtoiteliste järvede ja paisjärvede puhul, mis kannatavad toiteainete suure väliskoormuse all, võib keemiline elustikutõrje tänu oma kiirusele ja odavusele olla ainus hea lahendus.

**Alumiiniumiühendid** Alumiiniumi (Al) soolad on maailmas kõige laiemalt kasutatavad koagulandid veepuhastuses ja järvetervenduses. Maakoores on alumiinium üks levinumaid keemilisi elemente (8%) ning seetõttu on tema sisaldus veekogude põhjasetetes samuti suur. Skandinaavia järvede setted sisaldavad alumiiniumi näiteks keskmiselt 2–4% kuivkaalust. Seega leidub pindmises settekihis (0–10 cm) ruutmeetri kohta sadu gramme alumiiniumi. Järvevee töötlemine alumiiniumi sooladega suurendab setete alumiiniumisisaldust vaid pisut või ei muuda seda üldse. Enamasti pruugitakse alumiiniumsulfaati ($Al_2(SO_4)^{3-} \times 14\,H_2O$), naatriumaluminaati ($Na_2Al_2O_4$) või alumiiniumkloriidi ($AlCl_3$). Vette lisamisel moodustavad need soolad hüdrolüüsil suuri alumiiniumhüdroksiidi ($Al(OH)_3$) helbeid, millele adsorbeeruvad lahustunud fosforiühendid. Helbed settivad veekogu põhja, viies fosfori aineringest välja. Ühtlasi haaravad helbed settides endaga kaasa vees leiduvaid väikesi hõljuvaid osakesi (vetikarakud, orgaaniline aine). Selle protsessi käigus ei lõhuta fütoplanktonirakke ning vette ei pääse neis sisalduvaid toiteaineid ega mürke. Alumiiniumiühendid takistavad väga tõhusalt fosfori vabanemist setetest, suurendavad vee läbipaistvust ja vähendavad fütoplanktoni biomassi. Pärast töötlust on täheldatud positiivseid muutusi ka veekogu liigilises koosseisus, näiteks sinivetikate asendumist rohe- ja ränivetikatega ning vesikirbuliste arvukuse kasvu. Paks helbekiht veekogu põhjas matab enda alla bentiliste vetikate kooslused ja takistab uute moodustumist. Samas mõjub nii alumiiniumisoolade kui ka muude koagulantide kasutamine negatiivselt põhjaloomadele ja bentostoidulistele kaladele.

Alumiiniumisoolade hüdrolüüsil on võtmeteguriks pH, mis määrab hüdrolüüsi lõpp-produktid ja nende lahustuvuse. Järvedes tavalise pH (6–8) juures moodustub polümeerne ja lahustumatu $Al(OH)_3$:

$$Al^{3+} + 3H_2O \rightarrow Al(OH)^{2+} + H^+ + 2H_2O \rightarrow$$
$$\rightarrow Al(OH)_3 + 3H^+$$

Hüdrolüüsi käigus vabanevad vesinikioonid ja pH võib töötluse ajal märgatavalt langeda. Lahustunud fosfaadid reageerivad alumiiniumiga kas otse või adsorbeeruvad alumiiniumhüdroksiidist moodustunud helvestele:

$$Al(OH)_3 + PO_4^{3-} \rightarrow AlPO_4 + 3OH^-$$
$$Al(OH)_3 + PO_4^{3-} \rightarrow Al(OH)_3{\sim}PO_4^{3-}$$

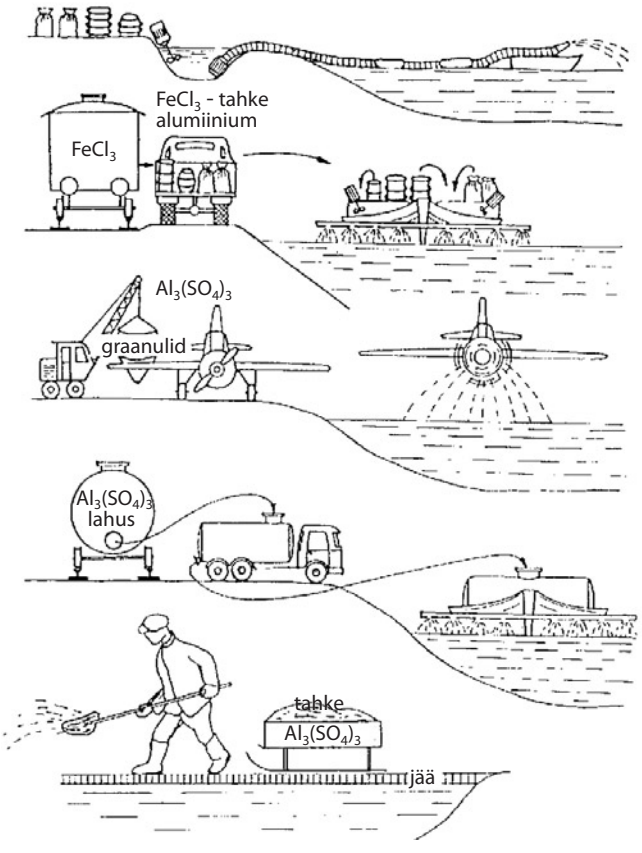
pH vahemikus 4–6 moodustuvad hüdrolüüsi käigus mitmesugused lahustuvad vahevormid ($Al(OH)_2^+$, $Al(OH)^{2+}$ jt) ning pH langemisel alla 4 on kogu alumiinium vaid ioonsel ($Al^{3+}$) lahustunud kujul. $Al^{3+}$ on mürgine, ohtlikuks peetakse tema sisaldust üle 50 µg/l. Magevee looduslik alumiiniumisisaldus neutraalse pH juures on keskmiselt 10 µg/l. Maailma tervishoiuorganisatsioon (WHO) on samas seisukohal, et $Al^{3+}$ sisaldus joogivees peab olema alla 200 µg/l. Alumiiniumi ülemäärane leidumine joogi- ja tarbevees on seotud tõsiste tervisehäiretega.

Hüdrolüüsi käigus langev pH on probleemiks pehmeveelistes ja vähese puhverdusvõimega järvedes, sest mürgiste alumiiniumiühendite hulk suureneb neis kiirelt üle lubatava piiri. Kui näiteks vee karbonaatne karedus on alla 10 mg/l CaO, siis juba 3 mg/l $Al^{3+}$ blokeerib kogu vee puhverdusvõime. Sellest suurem alumiiniumisisaldus langetab pH kogu ökosüsteemi jaoks katastroofilisele tasemele. Siis tuleb koos alumiiniumisooladega lisada vette puhveraineid. Tavaliselt kasutatakse selleks naatriumhüdroksiidi, kaltsiumhüdroksiidi või naatriumkarbonaati. Ka liialt suur pH (> 8) pole alumiiniumiga töötlemiseks sobiv, sest siis moodustuvad ioonid ($Al(OH)^{4-}$) seovad fosforit halvasti. Alumiiniumiühendite kasutamine on laialt levinud Ameerika Ühendriikides. Euroopas eelistatakse neile rauaühendeid, et mitte riskida vee hapestumisega. Samas pole alumiiniumil

põhinev meetod tundlik hapnikupuuduse suhtes. Juba settinud alumiiniumiühendid ei lahustu anaeroobses keskkonnas ja see võimaldab neid edukalt kasutada ka kihistunud järvedes.

**Tehnoloogia.** Oluline on alumiiniumisoolade piisav kogus, sest siduda tuleb nii lahustunud fosfaadid kui ka heljumi kujul esinev fosfor. Kogus sõltub settes leiduva anorgaanilise ehk labiilse fosfori hulgast, fosfori sisekoormusest ja veekogu puhverdusvõimest (üldaluselisusest). Eeluuringud koos laborikatsetega on vajalikud igal konkreetsel juhul eraldi. Tavaliselt on lisatud alumiiniumi hulk jäänud vahemikku 5–100 g/m$^2$ või 5–25 g/m$^3$. Varem sageli kasutatud alumiiniumsulfaadist soovitatakse loobuda. Sulfaatide lisandumine anaeroobse hüpolimnioniga järve võib soodustada vesiniksulfiidi teket, ebasoodsalt mõjutada rauaringet ning vähendada setete fosforisidumisvõimet. Seevastu alumiiniumnitraadil ($Al(NO_3)_3$) on peale koaguleerivate omaduste ka võime soodustada denitrifikatsiooni ja selle kaudu orgaanilise aine lagunemist. Et alumiiniumhüdroksiidi helbed on väga kohevad ja väikese tihedusega, võib alumiiniumisooli manustada koos kaltsiumhüdroksiidiga. Viimane moodustab vees kaltsiidi, mis peale fosfori sidumise suurendab koos alumiiniumhüdroksiidiga settides põhjasetete kuivkaalu ja tihedust.

Anorgaaniline fosfor seondub alumiiniumiga tunduvalt paremini kui osakeste kujul esinev orgaaniline fosfor. Käitlemiseks oleks parim aeg seega talvel või varakevadel, kui lahustuvate fosforivormide osakaal vees on suurim. Fosfori sidumine ja väljasettimine pole paraku madala veetemperatuuri korral kuigi tõhus ning seepärast on mõistlik töötlus ette võtta hoopis varasuvel, vahetult enne sinivetikate ilmumist. Alumiiniumisooli võib järve lisada nii tahkel kui ka vedelal kujul (joonis 3.25). Talvel võib neid jääle puistata. Lahuse lisamine on efektiivsem, sest soolade lahustumisele ja hüdrolüüsile kulub aega. Vee selgitamiseks ja fosfaatide sidumiseks jääb selle võrra vähem aega. Töödelda võib tervet järvepinda või ainult seda ala, kus hüpolimnionis esineb hapnikupuudus. Kihistunud järvedes võib ka hüpolimnionist vee välja pumbata, sinna kemikaale lisada ja siis vee tagasi pumbata (vt lk 305–306). Väikeste veehoidlate puhul on mõeldav ainete lisamine sissevoolu proportsionaalselt vooluhulgaga.




**3.25.** Järvede ja veehoidlate töötlemine koagulantidega.

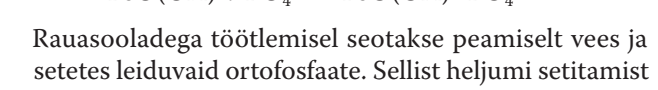
**Senised kogemused ja meetodi võimalikud puudused.** Alumiiniumiühendite mõju järvedele on tõhus ja pikaajaline, ületades kestuselt raua- ja kaltsiumiühendite mõju. Seniste kogemuste põhjal kestab nende toime keskmiselt kümme kuni kakskümmend aastat. Näiteks 1986. a alumiiniumsulfaadi lahusega töödeldud Barleberi järv Saksamaal on siiani läbipaistva veega ning varasemad sinivetikaõitsengud pole enam kordunud. Meetod on enamasti osutunud edukamaks kihistunud järvedes. Madalates järvedes pärsib alumiiniumi mõju suurtaimede fotosünteesi tagajärjel tekkiv suur pH. Ühtlasi takistab tihe taimestik lisatavate ainete ühtlast jaotumist. Suurtaimed võivad juurte kaudu muuta kättesaadavaks ka sügavamate settekihtide fosforit. Meetodi tõhusust võivad oluliselt vähendada ka bentilised selgrootud, kes segavad alumiiniumhelveste kihi läbi sügavamate setetega.

**Rauaühendid** Raua (Fe) ühendite kasutamine kemomanipulatsioonis sarnaneb alumiiniumiühendite kasutamisega. Peamiselt kasutatakse reagendina raud(III)kloriidi ($FeCl_3$). Levinud on veel raud(II)kloriid ($FeCl_2$) ja raudsulfaat ($Fe(SO_4)_3$). Rauasoolade viimisel vette toimub hüdrolüüs ja moodustuvad geeli meenutavad raud(III)hüdroksiidi helbed, mis omakorda võivad muutuda edasi raudoksiidi ja -hüdroksiidi seguks:

$$Fe^{3+} + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+$$

$$Fe(OH)_3 \rightarrow FeO(OH) + H_2O$$

Nii nagu alumiiniumigi puhul seotakse fosfor rauaga kas otse raudfosfaadiks või toimub fosfaatide adsorbeerumine raudhüdroksiidi helvestele.

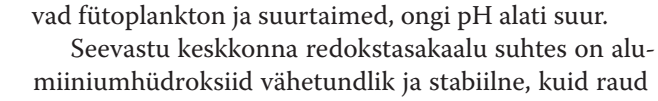


$$FeO(OH) + H_3PO_4 \rightarrow FePO_4 + 2H_2O$$
$$FeO(OH) + PO_4^{3-} \rightarrow FeO(OH){\sim}PO_4^{3-}$$

Rauasooladega töötlemisel seotakse peamiselt vees ja setetes leiduvaid ortofosfaate. Sellist heljumi setitamist nagu alumiiniumi puhul rauaühenditega töötlemisel enamasti ei toimu. Raudhüdroksiidi helbed on pH kõikudes alumiiniumist stabiilsemad ning ioonsel kujul raud pole elusorganismidele mürgine. Raudhüdroksiid seob fosfaate kõige tõhusamalt pH vahemikus 5–7. Suurema pH juures efektiivsus väheneb, kuid pH > 8 juures on rauaühendid ikkagi paremad fosforisetitajad kui alumiiniumiühendid, ning eutroofsetes järvedes, kus vohavad fütoplankton ja suurtaimed, ongi pH alati suur.

Seevastu keskkonna redokstasakaalu suhtes on alumiiniumhüdroksiid vähetundlik ja stabiilne, kuid raud moodustab veekogu põhjas dünaamilise puhvri. Redokspotentsiaali vähenedes muutub raud lahustuvaks ($Fe^{2+}$) ega suuda enam fosforit seotuna hoida. Nii nagu alumiiniumhüdroksiidi puhul moodustub ka rauasoolade hüdrolüüsil ohtralt vesinikioone, mis viib pH langemiseni ja võib olla lõpuks veeorganismidele hukutav.

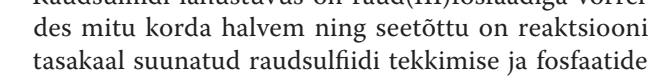
Raua fosfaatide sidumise efektiivsust mõjutab ka veekogus leiduvate sulfiidide rohkus. Kolmevalentne raudhüdroksiid ja raudfosfaat reageerivad vesiniksulfiidiga ning välja sadeneb raudsulfiid:



$$2FeO(OH) + 3H_2S \rightarrow 2FeS + S^0 + 4H_2O$$
$$2FePO_4 + 3H_2S \rightarrow 2FeS + 2PO_4^{3-} + S + 6H^+$$

Raudsulfiidi lahustuvus on raud(III)fosfaadiga võrreldes mitu korda halvem ning seetõttu on reaktsiooni tasakaal suunatud raudsulfiidi tekkimise ja fosfaatide vabanemise suunas. Rauarikastes setetes on see protsess palja silmaga märgatav: pruuni värvi oksüdeeritud setted muutuvad raudsulfiidi moodustudes mustaks. Tekkiv raudsulfiid mattub põhjasetetesse ja nii viiakse raud ringest välja.

**Tehnoloogia.** Rauaühendite manustamisel on oluline eel- ja järelseire, et vältida kemikaalide üle- või aladoseerimist ning pH nihkumist soovimatus suunas. Eeltööde käigus tuleb määrata eri fosforifraktsioonide ning raua hulk ja jaotus nii vees kui ka setetes. Vajalike koguste selgitamisel tuleb arvestada, et peale fosfori sidumise võib osa rauast kaotsi minna ka reageerimise tõttu sulfiididega. Kõige sagedamini kasutatakse $FeCl_3$. $Fe(SO_4)_3$ puhul võib sulfaatide lisandumine nende redutseerumise tõttu hapnikuvabas keskkonnas töötlemise efektiivsust hoopis vähendada. Rauasoolade hüdrolüüsil vabanevad vesinikioonid tuleb pehmeveelistes järvedes neutraliseerida, kasutades selleks näiteks peeneteralist kaltsiumkarbonaati ($CaCO_3$):



$$FeCl_3 + 2H_2O \rightarrow FeO(OH) + 3H^+ + 3Cl^-$$
$$6H^+ + 3CaCO_3 \rightarrow 3CO_2 + 3H_2O + 3Ca^{2+}$$

$FeCl_2$ hüdrolüüsil ($FeCl_3$ asemel) on vabanevate $H^+$-ioonide hulk ja aine üldkogus kolmandiku võrra väiksemad. Vajalike koguste arvutamisel tuleb lähtuda sellest, et pärast töötlust peaks kogufosfori sisaldus vees jääma alla 30–40 g/l. Sellest suurem fosforikogus võimaldab planktonvetikate massilist arengut ning tehtud jõupingutused jäävad kasutuks. Et vältida hilisemat fosfori taasvabanemist setetest, peab raua ja fosfori molaarsuhe põhjasetetes olema pärast töötlust suurem kui 8.

Rauaühendeid manustatakse enamasti vedelal kujul. Lahus toimetatakse kohale paakautodes või valmistatakse kontsentraadist kohapeal, kasutades lahustamiseks järvevett. Ainete suure reaktiivsuse tõttu tuleb kasutada happekindlaid torusid ja pumpi. Manustamine helikopterilt või lennukilt pole soovitatav, sest happelised rauasoolad kahjustavad järve ümbritsevat elustikku. Soolade asemel võib kasutada ka raudhüdroksiidipastat. See on tihti tööstuse jääkprodukt ja rauasooladest tunduvalt odavam. Selles tooraines kasvab aja jooksul raudoksiidide osakaal ning fosfori ja sulfaatide sidumise võime väheneb. Raudhüdroksiidi võib kanda talvel ka jääle. Olenemata valitud meetodist peab ainete jaotumine järves olema ühtlane, et töötluse tõhusus ei väheneks.

Töötluseks sobivad hilissügis ja varakevad, sest vegetatsiooniperioodil jääb enamik fosforist seotuks fütoplanktoni rakkudesse või suurtaimedesse ning rauaühendid seda ei mõjuta.

**Senised kogemused ja meetodi võimalikud puudused.** Rauaühendite meetodil pole nii pikka toimeaega kui alumiiniumi puhul ning töötlemise tulemuslikkuse ja tagajärgede kohta on vähem infot. $Fe^{3+}$ pole sellise sisalduse juures, mida kasutatakse töötlusel, veeorganismidele mürgine. Küll võib aga raua lisamine soodustada sinivetikate arengut veekogudes, kus raud on piiravaks toiteaineks.

Ebaõnnestunud katsetes pole enamasti täidetud vajalikke nõudeid. Näiteks Hollandis töödeldi madalat, kuid väga intensiivse veevahetusega (vaid 35 päeva) järve rauaühenditega ja saadi kohe väga head tulemused. Paraku püsisid need napilt kolm kuud, sest vee viibeaeg järves oli lühike. Ebaõnnestumised on tavalised ka kihistunud järvedes. Siis võivad rauaühendid jäädagi redutseeritud kujule ega ole võimelised fosforit siduma. Sellisel juhul tuleks kasutada kombineeritud meetodit (näiteks RIPLOX; vt lk 312–313) või samal ajal aereerida hüpolimnioni.

Kui kasutada raudkloriide, võib kloriidisisaldus (olenevalt veevahetuse intensiivsusest ja lisatud ainete hulgast) tõusta mitmesaja milligrammini liitris, kuid see on siiski väikese mõjuga. Näiteks joogivees on kloriidide piirsisalduseks 250 mg/l. Ebameeldiv nähtus rauaühenditega töötlemisel on vee pruunikas-sogane värvus, kuid paari päeva jooksul see kaob.

**Kaltsiumiühendid** Kalgiveelistes ja rohketoitelistes järvedes on suviti tavaliseks nähtuseks järvelubja ($CaCO_3$) settimine. Sellega kaasneb vee piimjas-sogane värvus ning veetaimede kattumine järvelubja kihiga. Põhjus peitub intensiivses fotosünteesis, mis suurendab vee pH-d ja vähendab sellega kaltsiumiühendite lahustuvust. Nõnda seotakse ja setitatakse fosforiühendid ning ühtlasi väheneb veekogu toitelisus. Sama toimub allikatoitelistes järvedes põhjavee kaudu lisanduva kaltsiumi tõttu. Need looduslikud protsessid andsid idee kasutada samu reaktsioone ka tervendamist vajavates liigtoitelistes järvedes. Keskkonna suhtes agressiivsete alumiiniumi- ja rauasoolade asemel võiks fosfori setitamiseks niisiis kasutada hoopis kaltsiumiühendeid. Tuntuimad neist on kustutatud lubi ehk kaltsiumhüdroksiid ($Ca(OH)_2$), kustutamata lubi ehk kaltsiumoksiid ($CaO$), kaltsiit ehk kaltsiumkarbonaat ($CaCO_3$) ja kips ($CaSO_4 \times 2H_2O$). Kaltsiit seob efektiivselt fosforit suure pH (> 9) juures ja vähendab oluliselt vee fosforisisaldust. Kustutatud lubja lisamisel vette moodustub samuti kaltsiit. Fosfor adsorbeerub nii selle kristallide pinnale kui ka sisemusse ning tekib vees lahustumatu $Ca\text{-}PO_4$ kompleks – hüdroksüapatiit:

$$10\,CaCO_3 + 6\,HPO_4^{2-} + 2\,H_2O \rightarrow$$
$$\rightarrow Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 + 10\,HCO_3^-$$

Hüdroksüapatiidi moodustab vees ka kips. See on lahustumatu ja tõhus fosfori siduja üksnes suure pH (> 9,5) juures. pH langedes paraneb lahustuvus kiiresti ja fosfor vabaneb. Tavaliselt toimub see protsess hüpolimnionis ja põhjasetetelähedases veekihis. Kaltsiumiühenditega töötlemine võib vetikarakkude ja -kolooniate settimise tõttu lühiajaliselt vähendada ka fütoplanktoni biomassi ja klorofülli hulka vees.

Fosfori setitamise kõrval leiavad kaltsiumiühendid rakendust ka hapestunud järvede tervendamisel, kus neid pruugitakse pH languse ja puhverdusvõime vähenemise korral. Lupjamist kasutatakse liigirikkuse taastamiseks eeldusel, et nii fauna kui ka floora suudavad hapestumise üle elada. Ülemäärase lupjamise tagajärjel saame endise pehmeveelise järve asemel kalgiveelise, mille liigiline koosseis ja kooslused on teistsugused. Sellist teguviisi enam tervendamiseks nimetada ei saa. Järvede lupjamine on rutiinne tervendustegevus Skandinaavias. Sellega tegeldakse ka USAs, Kanadas ja Suurbritannias. Eesti järvi hapestumine üldjuhul ei ohusta, sest nii jõed kui ka enamik järvi on lubjarikka pinnakatte ja aluspõhja tõttu hästi puhverdatud. Rabajärved on aga looduslikult happelise veega.

**Tehnoloogia.** Oluline on setitada karbonaate ja fosfaate, kuid mitte suurendada vee pH-d sel määral, et see elustikku ohustama hakkaks. Fosfori setitamisel kasutatakse enamasti lubjapiima ($Ca(OH)_2$ suspensioon), mida pihustatakse paadist järve pinnale või paari meetri sügavusele. Kihistunud järvede puhul on efektiivne moodus pihustamine hüpolimnioni koos samaaegse aereerimisega, et nihutada karbonaatse puhversüsteemi toimimist karbonaatide settimise suunas. Lubjapiima pihustamisel vette settivad suured osakesed kiiresti põhja, väiksemad aga lahustuvad ja moodustavad kaltsiidi. Lisatava lubjapiima hulk jääb enamasti vahemikku 25–300 mg/l. Kaltsiumiühendeid võib järve lisada mitu korda väikeste annustena või ühekorraga. Korduvtöötlemine väikeste annustega (5–80 mg/l) on peale fosfori setitamise ja klorofülli hulga vähendamise tõhus vahend fütoplanktoni ja suurtaimede biomassi reguleerimiseks. Ühekordne töötlemine suure kogusega (> 200 mg/l) mõjutab peamiselt setteid ja lahustunud fosforit ega pruugi olla kuigi pikaajalise mõjuga.

Alternatiivina on lubjapiima asemel kasutatud looduslikku kaltsiiti või järvelupja. Saksamaal asuva kalgiveelise ja eutroofse Arendsee järve tervendamiseks kasutati isegi järvelupja, mida ammutati järve enda litoraalist. Töötluse tulemusena kattusid setted 20–120 mm paksuse kaltsiidikihiga, mis isoleeris efektiivselt põhjasetted. Kaltsiidil on küll väiksem fosforisidumisvõime kui lubjapiimal.

Kaltsiumiühendeid võib kasutada ka vee pH tõstmiseks, puhverdusvõime suurendamiseks ja katioonidega rikastamiseks. Kulude vähendamiseks pruugitakse jahvatatud lubjakivi või peent killustikku. Samal eesmärgil saab kasutada ka magneesiumi sisaldavaid kivimeid (näiteks dolomiiti, $CaMg(CO_3)_2$). Lubjapiimaga võrreldes tõuseb pH kaltsiidi jt looduslike mineraalide mõjul aeglaselt. Lupjamise eesmärk on viia vee pH vähemalt 6-ni ja tõsta üldaluselisus üle 0,1 $mg_{ekv}/l$, mis tagaks arvestatava puhverdusvõime. Lupjamisel võib toimeaineid puistata otse järve, kuid sobivate hüdroloogiliste tingimuste korral võib töödelda ka valglat või sissevoole. Valglaid on töödeldud ka puidujäätmete põletamisel saadud tuhaga, mis lisaks kaltsiumile rikastab veekogusid ka teiste puhverdavate elementidega.

Vooluveekogude töötlemisel kasutatakse automaatdosaatoreid. Järvi töödeldakse ujuvvahenditelt ning toimeained juhitakse kaldal paiknevatest mahutitest töötlemiskohani torude kaudu. Väiksematel järvedel võib lupjamist teha paadist käsitsi või talvel jäält. Suurte ja raskesti ligipääsetavate järvede puhul võib kasutada kopterit.

Üks võimalus on kareda põhjavee pumpamine hapestunud järvedesse. Põhjavee karedus ja üldaluselisus on tihti suurem pinnaveekogude omast ning selle kasutamine on kemikaalide pruukimisest odavam ja ohutum. Meetod pole rakendatav piirkondades, kus põhjaveevarud on piiratud või järvede veetase seotud põhjavee tasemega.

**Senised kogemused ja meetodi võimalikud puudused.** Järvede töötlemine kaltsiumiühenditega on tõhus meetod, et ohjeldada fütoplanktoni ja suurtaimede vohamist. Näiteks Kanadas Briti Columbia provintsis asuvat kalgiveelist Friskeni järve, mille suure troofsuse põhjuseks oli valglal leiduva apatiidi looduslik lahustumine, töödeldi kaltsiumhüdroksiidiga. Toimeainet kulus keskmiselt 0,8 t/ha ning töötluse tulemusena vähenes Chl *a* hulk 80% ja fosfaatide hulk 97%. Ligikaudu sama suure toimeainete kogusega ($Ca(OH)_2$ 0,8 t/ha ja $CaCO_3$ 0,24 t/ha) töödeldi hüpertroofset Halfmooni järve Kanadas Alberta provintsis. Seal vähenes kahe aasta jooksul töötlemiseelse ajaga võrreldes klorofüll *a* hulk 53% ja fosfaatide hulk 63%. Fosfori vabanemine setetest vähenes suvel umbes poole võrra, märgatavalt paranesid talvised hapnikuolud järves.

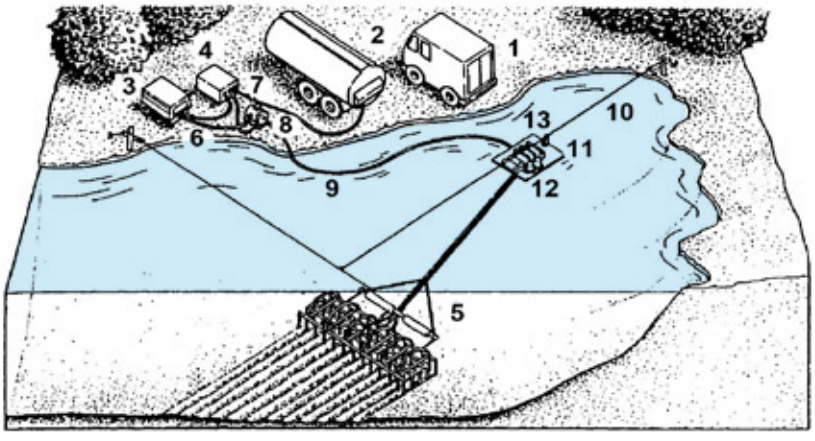
Lupjamise eelisteks teiste meetodite ees on odavus, toimeainete kerge kättesaadavus ja mürgiste ühendite puudumine. Raua ja alumiiniumiga võrreldes on kaltsiumil tunduvalt väiksem võime fosforit siduda. Veeorganismide jaoks on ebasoodne ka pH suur tõus. Pehmeveelistes järvedes võib pH tõusta kergesti üle 11. See avaldab mõju peamiselt avaveekooslustele ning võib halvemal juhul kesta üle aasta. Töötlemine vähendab algul ka vee läbipaistvust, kuid vees hõljuvad lubjaosakesed settivad hiljemalt paari päeva jooksul.

Lubjaga tervendatud happeliste järvede ökosüsteemid näitavad kiiresti paranemise märke: ilmuvad hapestumise suhtes tundlikud liigid, paraneb kalastiku liigiline koosseis ja füsioloogiline seisund. Ökosüsteemi taastumine ei pruugi siiski olla lõplik ja veekogusse ei naase kõik need liigid, kes elasid seal enne hapestumist. Ka pidev happelise vee lisandumine valglalt muudab järvevee uuesti happeliseks. Siis tuleb kestva tulemuse saavutamiseks lubjata ka valglat, mis on tunduvalt kulukam.

**Kompleksmeetodid RIPLOX, PHOSLOCK®, BENTOPHOS®** Ühe konkreetse kemikaali kasutamine kemomanipulatsioonis ei pruugi alati olla piisavalt tõhus. Teravalt kihistunud järvedes ei piisa ainult fosfori setitamisest ja inaktiveerimisest, vaid suurendada tuleb ka hüpolimnioni väikest redokspotentsiaali ning vabaneda akumuleeruvatest orgaanilistest ainetest. Peale selle on mitu eespool kirjeldatud meetodit tundlikud suure või väikese pH suhtes. Sellistel puhkudel tuleb kasutada mõnda kompleksmeetodit või spetsiaalseid kõrgmolekulaarseid aineid.

**RIPLOX** on kombineeritud tervendusvõte fosfori resuspensiooni vähendamiseks ja setetes oleva orgaanilise aine oksüdeerimiseks denitrifikatsiooni abil. Meetodit on mõnda aega tulemuslikult kasutatud Skandinaavias ja Saksamaal ning see on mõeldud veekogu efektiivseks tervendamiseks lühikese aja jooksul. Tõhus on see järvedes, kus setetes leidub vähe fosforit siduvaid ühendeid ning aereerimine annaks resuspensiooni tõttu hoopis vastupidise tulemuse, s.t toiteained toodaks pigem uuesti ringlusse.

RIPLOX seisneb setete pindmise kihi töötlemises kaltsiumnitraadi ($Ca(NO_3)_2$), raudkloriidi ($FeCl_3$) ja lubjaga ($CaCO_3$). $FeCl_3$ lisatakse setete fosforisidumisvõime parandamiseks. Raudkloriidi lisamine võib setted väga happeliseks muuta (pH < 3), ja kuna denitrifikatsiooni siis sisuliselt ei toimuks, on vajalik lupjamine, et saavutada optimaalne pH (7–7,5). Edasi lisatakse kaltsiumnitraat, et suurendada setete redokspotentsiaali ning seega tõhusamalt lagundada setete orgaanilist ainet. Suure toitelisusega järvedes, kus põhjasetetesse on ladestunud palju kergesti lagunevat orgaani-




**3.26.** Riplox-meetod on rakendatav peamiselt hüpertroofsete väikejärvede puhul. Setete pindmist kihti töödeldakse äkketaolise seadmega (5), mida veetakse järve põhja mööda. Laoturiga lisatakse settesse fosforit siduvat kemikaali (enamasti raudkloriidi), lupja pH stabiliseerimiseks ja kaltsiumnitraati elutingimuste loomiseks denitrifitseerivatele bakteritele. Bakterid lagundavad orgaanilised ained settes (Eiseltová 1994 järgi).

1– välilabor, 2 – kemikaalimahuti, 3 – teisaldatav kompressor suruõhu tootmiseks, 4 – mahuti kemikaalide (raudkloriid ja kaltsiumnitraat) segamiseks, 5 – „äke" kemikaalide settesse manustamiseks, 6 ja 7 – suruõhuvoolikud, 8 – suruõhuga töötav pump, 9 – voolik kemikaalide juhtimiseks töötluspaika, 10 – tross „äkke" juhtimiseks, 11 – suruõhuga töötav pump kemikaalilahuse valmistamiseks ja settesse juhtimiseks, 12 – lahusepumba veevõtutorud, 13 – pneumaatiline vints

Esimest korda ja seni kõige edukamalt kasutati RIPLOXi meetodit 1975. a Rootsis Lillesjöni järves, kuhu oli aastaid juhitud reovett. Selles väikeses (4,2 ha) ja madalas (keskmine sügavus 2 m) järvekeses hakkasid surema kalad, tekkis aastaringne hapnikupuudus ja veepind kattus lemmeldega.

Tervendustööde käigus juhiti reovesi järvest kõrvale, suurtaimestik eemaldati ja setteid töödeldi RIPLOXi meetodil. Kemikaalidega mõjutati vaid 1,2 ha järvepinnast. Kokku kulutati kuue päeva jooksul raudkloriidi 13 000 kg/ha, $Ca(OH)_2$ ja $Ca(NO_3)_2$ kulus vastavalt 5000 ja 12 000 kg/ha.

Pärast töötlust oli veesammas hapnikurikas, vee läbipaistvus suurenes ning fosforisisaldus vähenes töötluseelse tasemega võrreldes 70–85%. Hoolimata suurest lisatud nitraadikogusest vähenes vees ammooniumlämmastiku sisaldus. Denitrifikatsioon toimus poolteise kuu jooksul ning sette hapnikutarve vähenes ca 30% võrra.

list ainet, toimub selle bakteriaalne lagunemine ka loomulikul teel. Selleks kulub aga palju hapnikku, mille tagajärjeks on setete ja hüpolimnioni hapnikupuudus. Redokspotentsiaal langeb ning seetõttu vabaneb ka rauaga seotud fosfor. Denitrifikatsiooni käigus muudetakse orgaaniline aine gaasiliseks lämmastikuks, süsihappegaasiks ja veeks:

$$2\,NO_3 + 3\,CH_2O \rightarrow N_2 + 3\,CO_2\uparrow + 3\,H_2O$$

Denitrifikatsiooni positiivseks küljeks on selle toimumine redokspotentsiaalivahemikus, kus raud on veel oksüdeeritud kujul ning seob tõhusalt fosforit. Looduslikes järvedes pole nitrifikatsioon kuigi oluline protsess, sest nitraate on seal harva piisavalt.

RIPLOXi kasutamine nõuab kogu veekogu, eriti setete põhjalikku eeluuringut. Oluline on teada setete keemilist koostist ja seal sisalduvate ainete (raud, fosfori eri fraktsioonid, kergesti lagunev orgaaniline aine) vahekorda. Näiteks raudkloriidi ja lubja lisamine ei pruugi üldse vajalik olla, kui sette pH on denitrifikatsiooniks juba sobivalt suur ja rauasisaldus fosfori sidumiseks piisav (vähemalt 30–50 mg/g).

Sobivaim aeg meetodi kasutamiseks on hiliskevad. Toimeaineid tuleb doseerida täpselt ja need peavad settele jaotuma ühtlaselt, samuti pole soovitatav nende liigne sattumine veesambasse. Praktikas on parimaks lahenduseks kemikaalide pihustamine sette pindmisse (10–20 cm) kihti äkketaolise laoturiga, millel on elastsed torud (joonis 3.26). Laoturit veetakse kas vintsiga või paadi järel ning asendit põhja suhtes reguleeritakse suruõhuga. Seadme liikumiskiirus on maksimaalselt 4–5 m/min. See on kasutatav väikeste ja madalate järvede puhul, mille põhi on tasane ja suuremast prahist puhas.

Negatiivse näite RIPLOXi kasutamise kohta saab tuua samuti Rootsist. 1980. a prooviti sama moodi tervendada Trekanteni järve. Pärast töötlemist ilmnes taas fosforileke põhjasetetest. Seda põhjustas värskelt settinud orgaaniline aine, mis redutseeris sulfaadid sulfiidideks. Need sidusid omakorda raua ja lahustunud fosfor hakkas uuesti vabanema. Eestis katsetati fosfori sidumist raudkloriidiga Neitsijärve setetes, kuid üledoseerimise tõttu hakkas fosforit settest hoopis vabanema.

RIPLOXi meetodi eeliseks on kiirus, kuid ta on rakendatav ainult tugevalt eutroofsete, väikeste ja madalate järvede puhul. Töötluse mõjuaeg on pikem kui alumiiniumiühendeid kasutades. Teisalt on seadmestik kallis ja selle soetamine või ehitamine vaid ühe järve tervendamiseks pole majanduslikult otstarbekas. Lillesjöni järve tervendamise kogumaksumus oli ligikaudu 179 000 USA dollarit (2002. a vääringus). 45% sellest summast kulutati seadmestikule ja järve eeluuringutele. Kemikaalide maksumus moodustas vaid 6% kogusummast, samal ajal kui seadmete installeerimine hõlmas 28% eelarvest. Ülejäänud kulud moodustasid töötasud ja seadmete rent. Võrreldes alumiiniumiühendite kasutamisega on RIPLOX vähem levinud ning seepärast on keerulisem leida juhiseid vajalike ainekoguste arvutamiseks ja seadmete konstrueerimiseks.

RIPLOXi meetodi peamine puudus on nitraatide liiga lühiajaline kontakt settega. Hea lahustuvuse tõttu on nitraadid vees ja setteis liikuvad ning soovitud tulemuse saavutamiseks tuleks järve töödelda ühe vegetatsiooniperioodi jooksul mitu korda. Selle probleemi lahenduseks on loodud komplekskemikaal Depox®Fe, mis transpordib nitraadid settesse ja hoiab neid seal pikemat aega reaktsioonivõimelisena. Depox®Fe koostisse kuuluvad $Ca(OH)_2$ ja $Fe(NO_3)_3$, millest $H_2O_2$ manulusel sünteesitakse erineva pH juures ruumilised $(FeOOH)_n$ makromolekulid, mille sise- ja väliskülgedele adsorbeeruvad nitraatioonid. Vette viiduna annab Depox®Fe suspensiooni, mis sisaldab $NO_3^-$-, $Fe^{3+}$- ja $Ca^{2+}$-ioone kaalulises vahekorras 1 : 1,3 : 0,7. Suspensiooni manustatakse otse hüpolimnioni, et vältida makromolekulide lõhkumist ja nitraatioonide enneaegset vabanemist. Senised katsed on näidanud, et Depox®Fe kasutamine pidurdab oluliselt fosfori taasvabanemist setetest, oksüdeerib orgaanilist ainet ning takistab sulfaatide redutseerimist ja metaani tootmist.

**PHOSLOCK™ ja BENTOPHOS™.** Phoslock on lantaanil põhinev kemikaal lahustunud fosfori sidumiseks ja setitamiseks. Lantaankloriidi kasutamise üle veepuhastusjaamades vaieldi juba aastakümneid tagasi. Lantaani ioonid suudavad tõhusalt setitada paljusid fosforifraktsioone, kuid samal ajal peeti lantaani lahustunud ühendeid olenevalt sisaldusest või rakendusviisist veeorganismidele mürgiseks. 1990. aastatel leiti keemiliselt sobiv tugev adsorbent – bentoniit, mis hoiab lantaani ioone oma struktuuris ega vähenda samas nende fosfori sidumise võimet. Seda ainet tuntakse kaubamärkide all

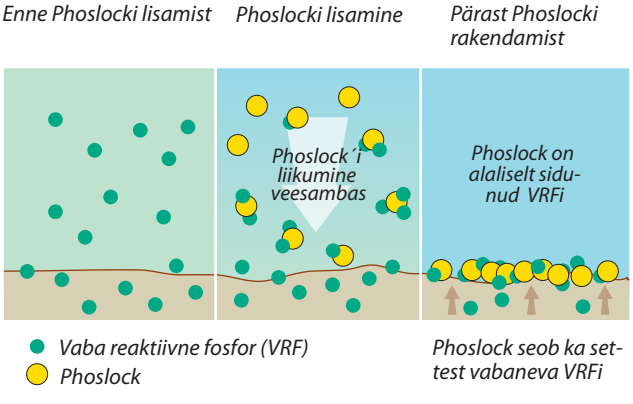
PHOSLOCK™ ja BENTOPHOS™. Phoslocki tööpõhimõte seisneb fosfaatide sidumises lantaani abil:

$$La_3^+ + PO_4^{3-} = LaPO_4$$

Reaktsiooni tulemusel moodustub lahustumatu mineraal $LaPO_4 \times n2H_2O$. Phoslock lisatakse vette kas graanulite või suspensioonina. Settimise käigus eemaldatakse veesambast peaaegu kogu lahustunud fosfor ja adsorbeeritakse bentoniidis lahustumatuks kompleksühendiks, mis pole enam vetikatele kättesaadav. Settides moodustab Phoslock vee ja sette piirpinnale kihi, mis jätkab lahustunud fosforivormide sidumist ning takistab sügavamates settekihtides oleva fosfori jõudmist veesambasse (joonis 3.27).

Phoslocki meetodi eelis on võime töötada väga laias pH vahemikus (~4–11). Optimaalne pH jääb piiridesse 6–8. Suurema pH juures moodustub lantaanhüdroksiid, mis aeglustab fosfori sidumist ja sel juhul võib fosfori setitamiseks kuluda kuni neli ööpäeva. Fosfaatide sidumine toimub ka anaeroobses keskkonnas. Erinevalt alumiiniumiühenditest pole vaja karta mürgiste ainete vabanemist väikese pH juures.

Vajalik kogus sõltub vee fosforisisaldusest ja üldaluselisusest. Lantaan seob küll eelistatult fosfaate suhtes 1 : 1, kuid reageerib ka vees leiduvate karbonaatidega. Väikese üldaluselisuse korral võib lähtuda vaid fosfaatide kogusest. 1 g fosfori eemaldamiseks kulub 100 g Phoslocki. Vajalik kemikaalide kogus on seega tunduvalt väiksem kui näiteks alumiiniumisoolade kasutamisel. Pehmeveelistes järvedes pole vaja karta ka pH langemist töötluse järel. Kui Phoslocki kogusega liialdada, võib vette sattuda lahustunud lantaani, mille mürgisus on siiski tühine. Näiteks Uus-Meremaal Okareka järves leiti pärast töötlust toimunud seirepüükidel kaladest lantaani, kuid see eritus kiiresti ja peatselt oli lantaani sisaldus kalade kudedes töötlusele eelnenud tasemel.




**3.27.** Phoslock on lantaanil põhinev kemikaal vees lahustunud fosfaatide ($PO_4^{3-}$) sidumiseks lahustumatuks kompleksühendiks ja selle setitamiseks.

## ALGITSIIDID JA HERBITSIIDID

Algitsiide ehk vetikamürke ja herbitsiide ehk umbrohumürke kasutatakse veekogudes massiliselt arenevate vetikate ja suurtaimestiku tõrjeks.

**Algitsiidid** Algitsiididega töötlemine on üks levinumaid võtteid sinivetikate ehk tsüanobakterite põhjustatud veeõitsengute ohjeldamiseks. Seepärast kutsutakse neid ka tsüanotsiidideks. Mõned neist hävitavad vetikarakud kohe, teised pidurdavad kasvu ja arengut. Enamiku algitsiidide peamine puudus on mürgisus ka teistele organismidele, mis tekitab palju surnud orgaanilist ainet. Selle lagunemise tagajärjel võib veekogus tekkida hapnikupuudus ning kalade suremine. Ühtlasi vabanevad vetikate suremisel ka neis sisalduvad mürgid. Seepärast soovitatakse algitsiide kasutada pigem vegetatsiooniperioodi alguses, kui sinivetikate biomass on veel väike ja nad on mõjuainete suhtes tundlikumad. See võimaldab ka kokkuhoidu kasutatavate ainete koguses. Sinivetikate vastupanuvõime nende mürgitamise suhtes suureneb paraku kiiresti ja seepärast tuleb mürgikogust pidevalt suurendada. Niipea kui algitsiidide mõju väheneb või kaob, hakkavad allesjäänud vetikarakud uuesti arenema ning mõne päeva jooksul võib mürgitamisele eelnenud seis taastuda.

Algitsiidid on kas anorgaanilised või orgaanilised.

**Anorgaanilised algitsiidid.** Siia kuuluvad mürgised soolad, koagulandid ja fotoinitsiaatorid.

*Mürgistest sooladest* on kõige rohkem kasutatud vaseühendeid, peamiselt vasksulfaati ($CuSO_4 \times 5H_2O$), mille suhtes on eriti tundlikud sinivetikad. See takistab nende fotosünteesi, fosfori omastamist ja lämmastiku fikseerimist. Vetikatele on vaseühendid mürgised juba siis, kui nende sisaldus on 5–10 µg/l. Paraku settib vask mineraalainerikkas vees ja suure pH juures veest välja ning neeldub hästi ka savidel. Seepärast on efektiivne annus tavaliselt palju suurem, isegi kuni 1 mg/l. Samas seovad vaske rabavetes leiduvad humiin- ja fulvohapped, mis jätavad ta lahusesse. Vaseühendite eeliseks on kiire toime, odavus ning valikuline toime sinivetikatele. Siiski on vaseühenditel ka kõik algitsiididele omased negatiivsed küljed. Sinivetikad muutuvad aja jooksul vase suhtes tundetuks. Vaseühendid on mürgised ka paljudele teistele veeorganismidele. Ühtlasi ladestub vask põhjasetetes.

Peale vaseühendite on vetikatõrjes kasutatud hõbenitraati ($AgNO_3$), kaaliumpermanganaati ($KMnO_4$) ja naatriumhüpokloritit (NaOCl). Paraku on need kõik valimatult mürgised enamikule vee-elustikust.

Mürgiste soolade puudustest on enamasti vabad *koagulandid*, mida kasutatakse veepuhastusjaamades ja järvetervenduses fosfori setitamisel. Need moodustavad vette viimisel suuri helbeid, mis setitavad edu-

kalt fütoplanktonit. Kuid näiteks sinivetika *Microcystis* suured kolooniad settivad koagulantide toimel halvasti. Peale vetikate setitavad koagulandid ka bakterplanktonit ja isegi väikesi zooplanktereid. Samas on tugevate veeõitsengute korral muud elustikurühmad nagunii tugevas vähemuses ja suure vetikamassi eemaldamine kompenseerib kaod teistes elustikurühmades.

*Fotoinitsiaatorid* moodustavad päikesekiirguse toimel mitmesuguseid reaktiivse hapniku osakesi (ROS). Tuntuimad neist on näiteks monohapnik ($^1O_2$), vesinikperoksiid ($H_2O_2$), superoksiidradikaal jt. Nad on väga tugevad biotsiidid ja kahjustavad paljusid makromolekule: lipiide, valke ja nukleiinhappeid. Fotoinitsiaatorite hulgas leidub nii anorgaanilisi (näiteks $TiO_2$) kui ka orgaanilisi aineid (humiinained, klorofüll, porfüriinid). Fotoinitsiaatorid on enamasti väga lühikese elueaga ega akumuleeru veekogus. Nendegi puuduseks on vähene valikulisus.

**Orgaanilised algitsiidid.** Vähemalt mõned orgaanilised algitsiidid lagunevad veekogudes. Anorgaanilistega võrreldes on nad tunduvalt kallimad ja nende kasutamist piirab paraku üldine mürgisus kõigile veeorganismidele. Seetõttu on enamiku orgaaniliste algitsiidide kasutamisest loobutud või on nad üldse keelatud. Paljud pestitsiidid (simasiin, Diuron, Reglone A) on väga mürgised ka vetikatele. Laialt põllumajandusliku herbitsiidina kasutatava kemikaali Roundup (toimeaineks glüfosaat) pruukimine veekogudes oleks ebaotstarbekas liiga suure vajaliku annuse tõttu. Sinivetikate valikulist tõrjet saab teha ka mitmesuguste antibiootikumide abil, kuid nende kasutamine suuremates järvedes ja veehoidlates pole majanduslikult mõttekas.

**Herbitsiidid** Herbitsiidid on mürgised eelkõige suurtaimedele, kuigi päris paljud neist on paralleelselt kasutatavad ka algitsiididena. Enamik tänapäeva herbitsiide on efektiivsed, ei tekita aeglaselt lagunevaid mürgiseid jääke ega ladestu toiduahelates. Paljudel juhtudel on herbitsiidide kasutamine üks vähestest võimalustest puhastada suurtaimedest ummistunud veekogusid. Kulukuselt on herbitsiidide kasutamine võrreldav taimestiku regulaarse niitmisega. Kui aga surev taimestik jäetakse järve lagunema, tarbib roiskuv taimemass väga palju hapnikku ning ühtlasi vabanevad taimekudedesse ladestunud toiteained.

Enamik herbitsiide on orgaanilised ühendid. Järvetervenduses kasutatakse neist väheseid. Herbitsiidid võib jaotada nelja rühma:

- *Süsteemsed herbitsiidid* tungivad taimesse võsude või juurte kaudu, kanduvad taimes laiali ja hävitavad kogu taime.
- *Kontaktherbitsiidid* mõjuvad tõrjevahendiga kokkupuutuvale taimeosale, kuid taimes laiali ei kandu. Osaliselt hävivad võsud, kuid juurestik jääb puutumata.
- *Selektiivsed herbitsiidid* hävitavad vaid kindlat liiki taimi.
- *Mitteselektiivsed* ehk *üldhävitavad herbitsiidid* tapavad valimatult kogu taimestiku, millega nad kontakti satuvad.

**Glüfosaat** (kaubamärgid Roundup®, Rodeo®, Aquamaster®, AquaPro®) on neist tuntuim. Tegu on süsteemse herbitsiidiga, mida kasutatakse ujulehtedega ja kaldaveetaimestiku tõrjumiseks. Veesisese taimestiku hävitamiseks ta ei sobi. Töötlus seisneb võsude pritsimises lahusega. Kuigi tegemist on üldhävitava herbitsiidiga, saab ettevaatliku pritsimise korral suurtaimi hävitada ka valikuliselt. Töödeldud taimestik sureb mõne nädalaga, kuid tihti on vaja teha korduspritsimist, et hävitada ka need taimed, kelleni mürk algul ei jõudnud. Glüfosaati peetakse veeorganismides mitteakumuleeruvaks. Akuutse mürgisuse on WHO tunnistanud väikeseks. Keskmine letaalne doos (LC50; 96 h) veeselgrootute puhul on > 55 mg/l, kuid see oleneb keskkonnatingimustest, liigist, arengustaadiumist ning toimeainele lisatud abiainetest. Glüfosaati sisaldavad tooted on väga mürgised ka kõigile loomadele, sealhulgas inimestele.

**Fluridoon** (Sonar®, Avast®, Whitecap®) on aeglase toimega süsteemne herbitsiid, mis takistab soontaimedes karotinoidide sünteesi. Ilma karotinoididеta laguneb klorofüll päikesekiirguse toimel. Toimeaeg on pikk (30–90 päeva) ja parim tulemus saavutatakse, kui tõrjet alustatakse vegetatsiooniperioodi alguses. Fluridoon sobib ka veesisese taimestiku hävitamiseks aeglase veevahetusega järvedes ja veehoidlates. Väikese sisalduse korral ilmneb valikuline toime. Kui sisaldus on näiteks 5 µg/l, hävib tähk-vesikuusk, kuid säilivad penikeeled.

**2,4-diklorofenoksüäädikhape ehk 2,4-D** (Navigate®, AquaKleen®, Aquacide®) on kiire toimega süsteemne ja valikuline herbitsiid, mille mõju sarnaneb taimede kasvuhormoonide auksiinide omaga. Läbi lehtede imendudes ja meristeemis akumuleerudes põhjustab ta taime ebanormaalset kasvu ja lõpuks hukutab selle. 2,4-D-d tarnitakse nii graanulite kui ka vedelikuna. Graanuleid pruugitakse veesisese taimestiku tõrjel, vedelikuga pritsitakse ujulehtedega ja kaldaveetaimestikku. Toimeaeg on 2–3 nädalat.

**Endotaal** (Aquathol®, Hydrothol®) on nii herbitsiid kui ka algitsiid veesisese taimestiku ning niit- ja mändvetikate tõrjumiseks. Toimemehhanism seisneb valgusün-

teesi takistamises rakumembraanis. Toimeaine võib olla kaladele mürgine ja parim tulemus saavutatakse, kui veetemperatuur on üle 18 °C.

**Dikvaat** (Reward®, Weedtrine D®) kuulub kontaktherbitsiidide hulka, imendudes läbi lehepinna ja hävitades rakumembraane. Ta tapab ujulehtedega, veesisese ja kaldaveetaimestiku kahe nädala jooksul. Dikvaat ei sobi kasutamiseks heljumirikkas vees, kus taimede lehed on kaetud muda- või lubjakorraga. Ka selle aine puhul on vajalik võrdlemisi kõrge veetemperatuur.

**Triklopüüri** (Renovate®) kasutatakse peale veetaimestiku hävitamise ka veekogude kaldaveetaimede tõrjel. Toimemehhanism sarnaneb 2,4-D omaga, kuid on kiirem. Esimesed märgid mõjust ilmnevad juba 12 tunni möödudes.

## ■ VEETASEME REGULEERIMINE

Tavaliselt soovitakse veekogu sügavust suurendada, sest see on ajapikku ise vähenenud näiteks setete kuhjumise, veetaseme alanemise või maakerke tagajärjel. Sageli vajavad inimesed suuremat sügavust veetranspordile (nt paadikanalite ja sadamate rajamine, läbipääsude süvendamine). Tulemuse püsivus oleneb nii setete kuhjumiskiirusest kui ka veetaseme võimalikust edasisest muutumisest. Merega aeg-ajalt ühenduses olevates rannajärvedes sõltub järve veetaseme muutumine merevee taseme pikaajalistest muutustest.

Madaldumine võib kaasa tuua järvepõhja ja isegi kogu veepeegli kattumise suurtaimedega, veemahu vähenemise, hapnikusisalduse kõikumise, kalade liikumisvõimaluste halvenemise, järve läbikülmumise ohu ning lõpuks ka kinnikasvamise. Setete kuhjumine järve sisse- ja väljavoolupiirkonnas põhjustab tihti ka kaldaveetaimestiku vohamist. See võib aeglustada veevahetust, samuti tõsta veetaset väljavoolu ummistumise korral. Muda ja suurtaimed häirivad ka suplejaid. Siis võib veekogu tervendamiseks kaaluda setete eemaldamist.

## ■ SETETE EEMALDAMINE JA KATMINE JÄRVEDES

Setete kogunemine järve on loomulik ja paratamatu nähtus. Seda soodustab ka inimtegevus, kutsudes valglal esile erosiooni ja suurendades toiteainete sissekannet. Fütoplanktoni ja suurtaimede biomass jääb alati osalt lagundamata ning kasvatab settekihi paksust. Karedast järveveest, eriti allikate kaudu järve saabuvast veest, võib ühtlasi välja sadeneda lubja- või rauarikast settematerjali.

Setete kogunemine muudab nii järve üldilmet, ökoloogilist seisundit kui ka kasutusvõimalusi. Setete eemaldamine muutub aktuaalseks siis, kui järvenõgu on nendega juba peaaegu täitunud või kui setted on ebasoovitava koostisega.

Setete eemaldamist makrofüüdijärvede tervendamise ja uuendamise käigus, kui koos mudakihiga eemaldatakse nii taimed kui ka settinud taimejäänuste mass, käsitletakse detailsemalt lehekülgedel 324–328.

**Setete ebasoovitav koostis.** Enamasti on tegu setete liigse toiteainerohkusega. Seega on nende eemaldamise eesmärk kõrvaldada järvest toiteainete sisekoormusallikas. Setteist väljaimbuvad toiteained suurendavad vetikate ja suurtaimede produktsiooni. Hiljem hakkab settiv biomass järvepõhjas lagunema ning toiteained imbuvad neist jälle tagasi järvevette. Seetõttu jätkub järvevee rikastumine toiteainetega ka siis, kui välisreostusallikate koormust on märgatavalt vähendatud.

Teiseks võib setete koostis olla ebasoovitav seetõttu, et sinna on ladestunud ohtlikke mürkaineid (nt raskmetallid, naftaproduktid), mida soovitakse setete eemaldamisega järvest kõrvaldada.

**Setete eemaldamise viisid** Setteid on võimalik eemaldada nii tervet veekogu või selle osa kuivale jättes kui ka veetaset alandamata. Esimesed kaks varianti sobivad eriti paisjärvedele, mis on küll tegelikult vooluvete hüdromorfoloogiliselt rikutud osad. Kui vee väljajuhtimine pole võimalik või lubatav, tuleb eemaldada setted vee alt. Meetod peab vastama sette omadustele. Kui reostunud pindmine settekiht koosneb väga vedelast mudast (joonis 3.28 A), pole seda võimalik välja tõsta ning ära tuleb pumbata sette ja vee segu. Tehnilistele võimalustele võib piirid seada ka sette liiga tihe koostis.

**Eelised, ohud ja piirangud.** Õigesti tehtud sette-eemaldusest on nii makrofüütide kui ka fütoplanktoni vohamise tõkestamisel abi juhul, kui järve ei satu valglalt uut reostust. Mõju on pikaajaline, sest kõrvaldatakse nii orgaanilised ained, toitained kui ka ohtlikud saasteained.

Mõnikord võib setete eemaldamine veekogu seisundit hoopis halvendada. Kui neid ei ladustata nõuetekohaselt ning otse kallastele laotatud mudast väljanõrguv toiteainerikas vesi valgub veekogusse tagasi, on tagajärjeks varasemast tugevam sisekoormus. Toiteained muutuvad siis kättesaadavaks ka alumistest, varem mattunud settekihtidest. Nii võib vesi eutrofeeruda hoogsamaltki kui enne eemaldustöid. Samuti on oluline tööde järjekord. Setteid tuleb kõigepealt hakata eemaldama ülesvoolu asuvast järvest või järveosast.

Eemaldamise käigus võib osa setetest järveveega seguneda (resuspendeeruda), eriti kui pindmine settekiht on väga vedel. Et setted on järveveega võrreldes toiteainerikkamad, rikastub vesi väetavate ainetega. Churchill jt (1975) täheldasid USAs Lõuna-Dakotas asuva Hermani järve sette-eemaldustööde käigus fosforisisalduse kasvu järvevees sette resuspensiooni tõttu, kuigi vetikate suurenenud produktsiooni sellele ei järg-

nenud. Arvatavasti oli vesi liiga sogane, et võimaldada vetikatele piisavalt valgust. Lilly järves suurenes samal põhjusel küll vetikate produktsioon, kuid see osutus lühiajaliseks ja nõrgaks.

Sette resuspensioon võib anda tõsise tagasilöögi mürkainete korral. Näiteks polükloreeritud bifenüülid (PCB) on seotud just peenemate setteosakestega (läbimõõt alla 74 µm). Võrdluseks: liivaterade suurusvahemik on 63 µm – 2 mm. Seega on 74 µm setteosakesed suuruselt võrreldavad ülipeene liivaga, mis settib väga aeglaselt. Seetõttu tuleks setet eemaldades kaitsta ülejäänud järveosi resuspensiooni eest. Tööpiirkond tuleks ümbritseda veesisese, ujukite abil veepinnani või sellest pisut kõrgemale ulatuva tõkkega, mis ei laseks üleskeerutatud settel teistesse järveosadesse valguda.

Vesiniksulfiidirikka settekihi segunemine järveveega võib ohustada kalastikku, kahandades vee hapnikusisaldust, eriti kui veemaht on väike. Kui veetaset alandada, võivad kalad jääda järvepõhja sügavamatesse osadesse lõksu.

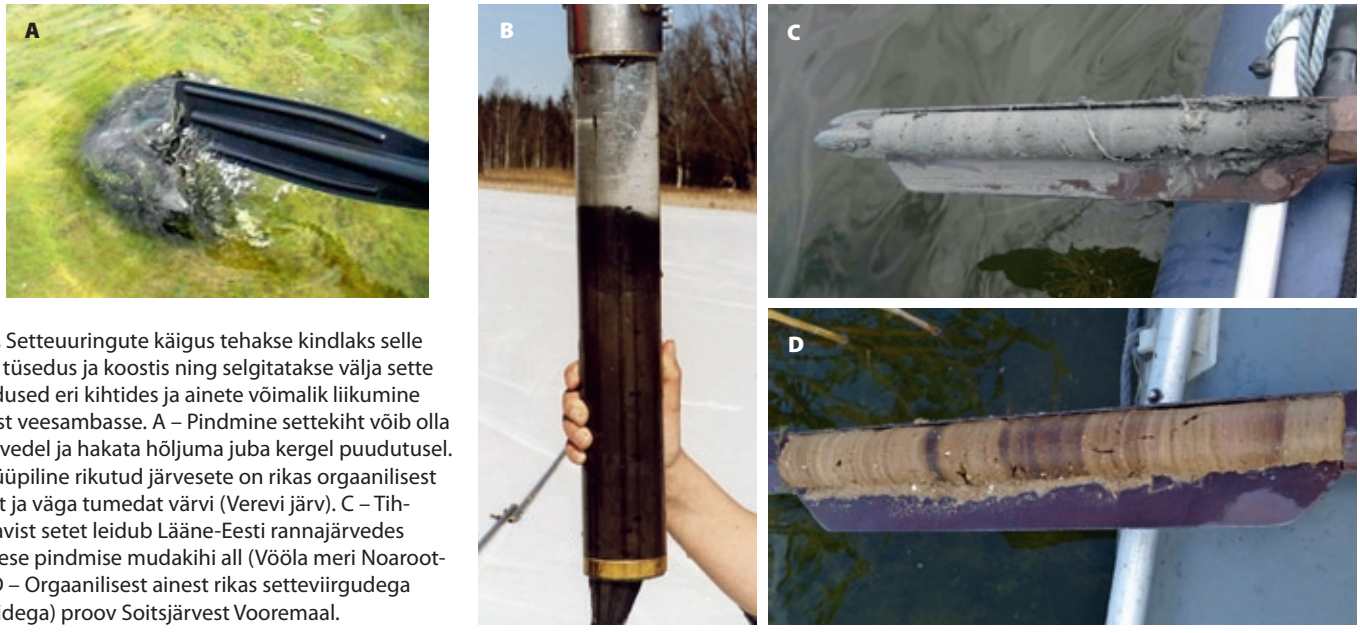
Setete eemaldamise järel ei pruugi suurtaimestik hästi taastuda (kui eesmärgiks polnud just suurtaimede leviku piiramine). Pärast ulatuslikku suurtaimede eemaldamist võib järves ülekaalu saavutada fütoplankton. Selle vohamise korral väheneb vee läbipaistvus, mis omakorda takistab suurtaimede arengut.

**Eeltööd ja planeerimine.** Enne sette eemaldamist tuleb meetodi sobivuse kindlakstegemiseks korraldada limnoloogilised uuringud. Nende käigus hinnatakse järve elustiku seisundit ja vee abiootilisi näitajaid, võimaluse ja vajaduse korral ka vee- ja toitainebilanssi.

Setteuuringute tavaline eesmärk on **settelasundi paksuse ja koostise kindlakstegemine.** Selleks võetakse järve eri piirkondadest vertikaalsed setteproovid (joonis 3.28). Nende arv oleneb nii järve suurusest kui ka erinevate settetüüpide esinemisest. Iseloomustatakse settekihtide paksust, veesisaldust ja lõimist ning orgaanilise, karbonaatse ja maismaalise komponendi osakaalu. Peale selle tuleb konkreetsest probleemist lähtudes määrata toiteainete, raskmetallide või naftasaaduste sisaldus.

Toiteainetest on kõige olulisem fosfor, kuid ainult üldise fosforisisalduse määramisest ei pruugi piisata. Mõned fosforivormid on püsivalt setetega seotud, teised võivad sobivate tingimuste korral tagasi vette imbuda. Eriti kehtib see setteosakestevahelises poorivees lahustunud fosfaatide kohta. Kui need satuvad veesambasse, on nad bakteritele, vetikatele ja suurtaimedele kergesti omastatavad. Poorivee fosforisisaldus võib olla kümneid kordi suurem kui järvevee oma, seega võib selle segunemisel järveveega viimase fosforisisaldus tublisti tõusta. Samuti võib anaeroobsetes setetes muutuda lahustuvaks rauaga seotud fosfor. Fosfori eri vormide osakaalu määramine ehk settefosfori fraktsioneerimine annab infot tema sisalduse ja võimaliku liikumise kohta setteist vette. Detailsemate fosforiuuringute käigus tehakse laboris inkubatsioonikatseid, kus mõõdetakse, kas ja kui kiiresti settest fosforit sette kohal olevasse veekihti imbub. See iseloomustab fosfori sisereostuskoormust järves ehk teisisõnu fosforikoormust, mis ei pärine väljastpoolt järve, vaid setetest.

Setteuuringute abil tehakse kindlaks, millises piirkonnas ja mis sügavusel asuvad kõige toiteainerikka-




**3.28.** Setteuuringute käigus tehakse kindlaks selle levik, tüsedus ja koostis ning selgitatakse välja sette omadused eri kihtides ja ainete võimalik liikumine settest veesambasse. A – Pindmine settekiht võib olla väga vedel ja hakata hõljuma juba kergel puudutusel. B – Tüüpiline rikutud järvesete on rikas orgaanilisest ainest ja väga tumedat värvi (Verevi järv). C – Tihket savist setet leidub Lääne-Eesti rannajärvedes õhukese pindmise mudakihi all (Vööla meri Noarootsis). D – Orgaanilisest ainest rikas setteviirgudega (varvidega) proov Soitsjärvest Vooremaal.

mad või reostunumad settekihid. Seejärel otsustatakse, milline on piisav **eemaldatava settekihi paksus** või kas on üldse mõistlik pindmist settekihti eemaldada (kui näiteks allpool paljanduksid reostunud kihid, mida pole võimalik eemaldada). Mõnikord ei ilmne settefosfori vertikaalses jaotuses suure sügavuseni märkimisväärseid muutusi. Näiteks Halli järves USAs Minnesota osariigis oli sette fosforisisaldus enam-vähem ühtlane pinnalt kuni sügavuseni 8,5 m. Sellises olukorras soovitatakse sette eemaldussügavuse määramiseks teha fosfori vabanemiskatseid erinevatest sügavuskihtidest pärit settega.

Setete eeluuringute põhjal saab hinnata ka nende **sobivust edasiseks kasutamiseks**. Sven Björk (1994) on soovitanud neid kasutada väetisena. Eestis kehtivad sel puhul reoveesetete kohta käivad normid (Reoveesette… 2019). Kui eesmärgiks pole väetamine, vaid ladustamine, võidakse kindlaks määrata kemikaalide kogus, mida on vaja sette toiteainete inaktiveerimiseks. Need andmed on kasulikud ka siis, kui setteid polegi otstarbekas eemaldada ja neid otsustatakse otse järves keemiliselt töödelda. Eemaldamise korral tuleb aga teada, kui palju lisaaineid on tarvis toiteainete sidumiseks enne settevee tagasilaskmist järve.

Planeerimise käigus tuleb otsustada, millisest piirkonnast ja kui palju setteid eemaldada. Näiteks pole mõtet seda teha väikeselt alalt paksu kihina ja mujalt üldse mitte. Kui puhastada vaid mingit kitsast järveosa (näiteks ujula ümbrust), siis on tõenäoline, et muda kandub sinna kiiresti tagasi. Tuleb otsustada, kas setete eemaldamist peab hakkama regulaarselt kordama, millist tehnikat kasutada, mida teha eemaldatud settega ja kui suur on tööde maksumus. Kui järve valglal plaanitakse teha maaparandus- või ehitustöid, mis toovad kaasa setete suurenenud sissekande, siis on mõistlik alustada sette-eemaldustöid alles pärast seda. On juhtunud, et kavandatakse setete eemaldamist, kuid ei arvestata, et järv asub kaitsealal või et seal elab kaitsealuseid liike, mistõttu selliseid töid ei tohigi teha.

**Seire ja järelseire.** Seire ja järelseire võimaldavad kontrollida sette-eemalduse mõju järve ökosüsteemile ning hinnata rakendatud meetmete tulemuslikkust pärast töid. Kui järv setete eemaldamiseks veest tühjaks lastakse, tuleb tööde käigus eelkõige veenduda, et toiteainerikas settevesi ei nõrguks tagasi järve. Kui setteid eemaldatakse veetaset langetamata, tuleb tööde ajal kontrollida järvevee toiteainesisalduse muutusi ning sellega seotud fütoplanktoni produktsiooni. Veel tuleb kontrollida tervendatavast järvest allavoolu jäävate veekogude seisundit, eriti kui need on elustiku poolest väärtuslikud või olulised haruldaste elupaikadena. Samuti tuleb tõkestada resuspendeerunud setete levik järveosadesse, kuhu need jõuda ei tohi. Näiteks Viljandi järves tuleb kavandatavate sette-eemaldustööde käigus tagada, et üleskeerutatud muda ei satuks naabruses asuvale järvepalli esinemisalale puhtal liivapõhjal.

Kindlasti on vaja võrrelda töödele järgneval vegetatsiooniperioodil järve elustiku- ja keemianäitajaid nende andmetega, mis koguti enne eemaldustöid. Uuritavate tunnuste seas on olulised järvevee hapnikusisaldus, pH, toitainesisaldus ja hägusus, Chl *a* sisaldus, elustiku liigiline koosseis. Otstarbekas on järve ökoloogilise seisundi hindamine ELi veepoliitika raamdirektiivi järgi. Mida pikema aja jooksul järve korduvat järelseiret tehakse, seda parem ülevaade järve tervise taastumisest saadakse.

**Alternatiivid** Kui sette eemaldamine pole võimalik – kui see on liiga kulukas, pole lubatud või on kaasnevad riskid suuremad kui loodetav kasu –, siis võib kaaluda alternatiivseid variante, et vähendada settega seotud ebasoovitavat mõju järvele.

**Sette keemiline töötlemine** annab võimaluse siduda settesse ühendid, mille sattumist settest järvevette soovitakse vältida. Samuti saab sedasi viia kindlaid ühendeid ohutul moel settest välja (nt lämmastiku eraldumine gaasilises vormis denitrifitseerimise soodustamisel) või leevendada setteprotsesside ebasoovitavat mõju. Setete keemilist töötlemist peetakse setete eemaldamisest odavamaks. Ka järvevee **õhutusmeetodid** võivad järve seisundit parandada, soodustades orgaanilise aine aeroobset lagunemist settes ning aidates ära hoida anaeroobse keskkonnaga kaasnevaid ebasoovitavaid keemilisi protsesse ja järveelustiku jäämist hapnikuvaegusse.

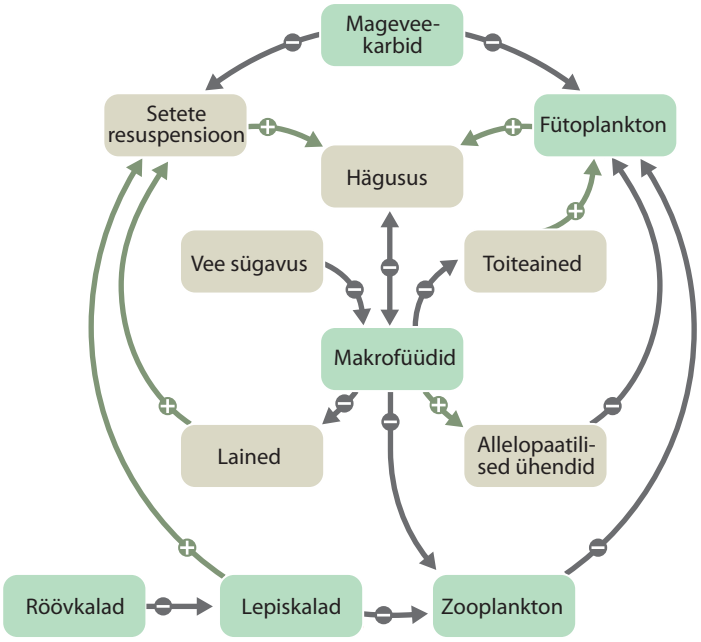
Alternatiivina setete eemaldamisele on kasutatud ka nende **katmist**. Materjalid, mille abil seda tehakse, on kallid. Samuti on setete katmine mõnes mõttes haigussümptomite, mitte põhjuse kõrvaldamine, sest reostunud setted jäetakse eemaldamata. Setete katmist peetakse tõhusaks võtteks, kui soovitakse piirata veetaimede levikut. Siiski ei saa seda meetodit kulukuse tõttu rakendada suurematel aladel. Puuduseks on tulemuse lühiajalisus: kaetud pinnale settib uus materjal, mille taimed taasasustavad. Siis tuleb katmist korrata või kattematerjal uutest setetest puhastada. Katmisega kaasneb ka põhjaloomastiku hävinemine katte all.

Kui probleemiks on ainult madal veetase, võib põhja süvendamisest säästvamaks lahenduseks olla **veetaseme tõstmine**. Näiteks Soomes asuv keskmiselt vaid 0,4 m sügavune Kanteleenjärvi oli kinnikasvamise ohus, kuni veetaset tõsteti. Selle tulemusena säilis ja paranes järve väärtus linnukaitsealana. Neile sette-eemaldustöödele, mille eesmärgiks on suurtaimestiku piiramine, on üks võimalikke alternatiive ka **veetaseme alandamine** sette kuivalejätmise ja/või läbikülmumise saavutamiseks. See mõjub taimeliikidele valikuliselt (mõne levikut piirab,

mõne oma soodustab). Sette kuivatamine ning külmutamine paraku hävitab põhjaloomastiku.

Alati on võimalik **olukorra jätmine endiseks**, kui tundub, et setete eemaldamisest tõuseb pigem kahju kui kasu. Selline võib olukord olla näiteks siis, kui sügavamad settekihid on reostunumad kui neid katvad ja neid järveveest isoleerivad hiljem settinud kihid.

Järvesiseste meetodite rakendamise eeltingimuseks on väljastpoolt järve tuleva reostuse lõpetamine, sest muidu on tulemused lühiajalised ja tehtud kulutused asjatud. Järvele võib abi olla ka sellest, kui **alandatakse järve välisreostuskoormust** kas reostusallikatest tuleva saaste hulga vähendamisega või reostunud vee mööda juhtimisega järvest. Viimasel juhul tuleb arvesse võtta, et kannatada saab järgmine allavoolu asuv veekogu.




**3.29.** Veekogu ökosüsteemi vastastikuste mõjutegurite skeem.

**BIOMANIPULATSIOON** Biomanipulatsioon seisneb järve toiduahelasse kuuluvate elustikurühmade arvukuse vahekorra reguleerimises eeldusel, et ahela „lülide“ vaheline normaalne seos on katkenud või ebatõhus. Peamine eesmärk on vähendada fütoplanktoni arvukust. Selle saavutamiseks võib mõjutada toiduahelat, suurendades fütoplanktonit toiduks tarvitava taimtoidulise zooplanktoni hulka või vähendades fütoplanktonile kättesaadavate toiteainete, eelkõige fosfori hulka setetes.

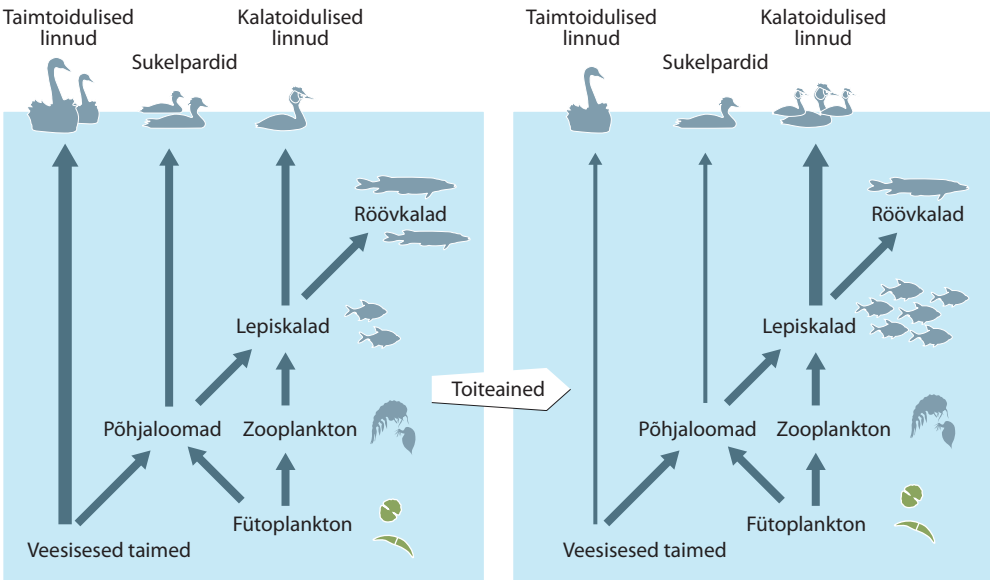
Selgeveelistes järvedes domineerib veesisene taimestik, vee läbipaistvus on suur ja toiteainesisaldus väike. Sogastes järvedes on ülekaalus fütoplankton, vesi on vähese läbipaistvusega ja suure toiteainesisaldusega (joonis 3.29).

Toiteainete hulga suurenedes toimuvad muutused kõigil troofilistel tasemetel. Suure toiteainete koormuse juures on lepiskalade, näiteks latika ja särje asustustihedus suur. Lepiskalad söövad muu hulgas fütoplanktonist toituvat zooplanktonit. Seetõttu suureneb fütoplanktoni hulk. Ühtlasi vabastavad latikad põhjas songides setetesse talletunud fosforit. See soodustab omakorda fütoplanktoni, sealhulgas sinivetikate arengut ning vesi muutub veel sogasemaks. Kahaneva läbipaistvuse tõttu väheneb suurtaimede hulk ning seetõttu ka taim- ja lepistoiduliste veelindude arvukus. Domineerima hakkavad kalatoidulised linnud (joonis 3.30).

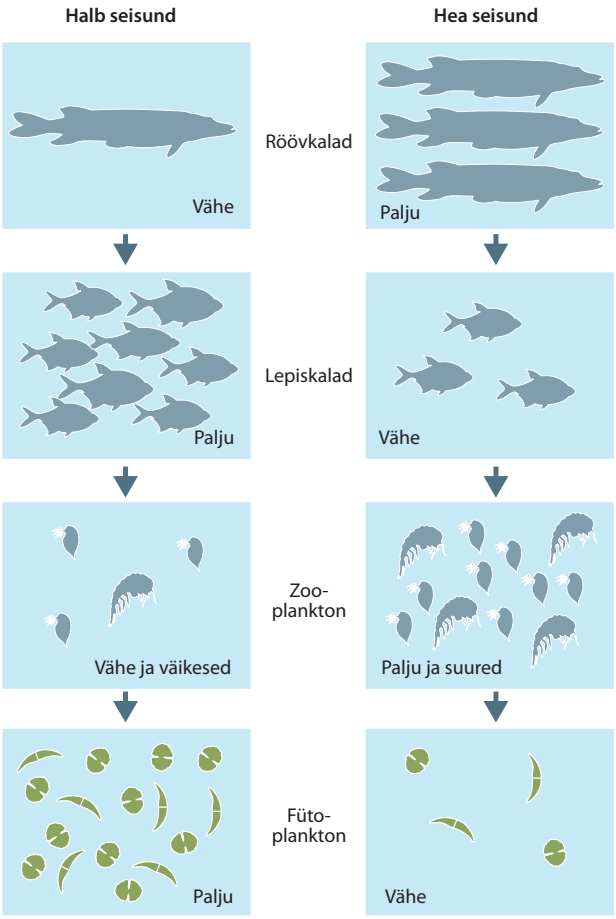
Biomanipulatsiooni mõiste võttis kasutusele Joseph Shapiro 1975. a, kuid juba 1940. a töödeldi vasksulfaadiga üht USA Connecticuti osariigi järve, mis kannatas tugevate veeõitsengute all. Õitsengud lõppesid alles siis, kui järve asustati ahvenaid. Pole selge, kas tegijad mõistsid, milles röövkalade mõju seisnes.

Biomanipulatsiooni ideed hakkas 1960. aastatel oma töödes levitama Tšehhi limnoloog Jaroslav Hrbáček. Tšehhimaal on vähe looduslikke järvi ja needki asuvad enamasti mägedes. Seepärast loodi seal juba keskajal palju kalatiike. Kunstlikud ökosüsteemid, eriti kui nad peavad toodangut andma, vajavad pidevat ökoloogilist kontrolli. Algul tähendas see manipuleerimist kõigi järveosadega, et parandada vee kvaliteeti. Praegu mõeldakse selle all enamasti pikaajalise kontrolli saavutamist ülemäärase fütoplanktoni üle. Mõjutades seoseid toiduahela lülide vahel, suurendatakse või vähendatakse nende produktsiooni. Kui näiteks surve suurtele vesikirbulistele väheneb, hoogustub nende toitumine fütoplanktonist, mille tagajärjel suureneb vee läbipaistvus ning paranevad valgusolud, mis omakorda soodustab veesisese taimestiku kasvu.

Põhja-Euroopa väikese toiteainesisalduse ja keskmise sügavusega järvede toiduahela tüüpiline struktuur on järgmine. Tipus asuvad röövkalad, enamasti haug (*Esox lucius*) ja ahven (*Perca fluviatilis*). Järgnevad lepiskalad, nt särg (*Rutilus rutilus*) ja latikas (*Abramis brama*), ning zooplankton ja fütoplankton (joonis 3.31). Zooplankton on oluline lüli primaarprodutseerijate ja kõrgemate troofiliste tasemete vahel. Toitudes fütoplanktonist, bakteritest, algloomadest ja detriidist, teeb zooplankton nende energia kättesaadavaks endast toiduahelas kõrgemal paiknevatele tarbijatele. Veekogu on heas seisundis, kui enamiku tekkivast fütoplanktonist sööb zooplankton kiiresti ära.




**3.30.** Veekogu troofilise struktuuri muutumine toitekoormuse tõustes.




**3.31.** Skemaatiline joonis halvast ja heast olukorrast järves.

**Biomanipulatsiooni meetodid** Fütoplanktoni biomassi vähendamiseks võib rakendada järgmisi meetodeid:

- plankton- ja bentostoiduliste kalade valikuline väljapüük,
- röövkalade või zooplanktoni hulga suurendamine,
- kogu kalastiku mürgitamine,
- röövkaladele ja zooplanktonile varjupaikade loomine,
- karpidele sobiva substraadiga alade laiendamine,
- karpide asustamine,
- taimestiku lisamine.

Tihti ei pruugi ainult ühe meetodi kasutamine anda soovitud tulemusi. Plankton- ja bentostoiduliste kalade eemaldamine toimub peamiselt traalimise, mõrdade, nootade või nakkevõrkudega. Et enamik lepiskalu on hea taastumisvõimega, suudavad nad väljapüütud osa enamasti ühe kuni kahe aasta jooksul taastoota. Samas on väga raske traditsioonilisi püügivahendeid kasutades kõiki isendeid kätte saada. Seepärast rakendatakse masspüügi meetodit koos uute röövkalade asustamisega, parandades sel moel lepiskalade ja röövkalade arvulist vahekorda. See on oluline biomanipulatsiooni tulemuste stabiilsuse tagamiseks. Uute röövkalade asustamine ei nõua palju aega ega suuri rahalisi vahendeid. Küll võib aga osutuda vajalikuks korduv asustamine, kuni röövkalad saavad suguküpseks ja hakkavad oma asurkonna taastootmises ise osalema. Enamasti asustatakse hauge, kes on põhjaparasvöötme järvedes kõige efektiivsem röövkala. Kohade asustamine

on nende tundlikkuse tõttu keerulisem, pealegi ei sobi suuremad (> 18 cm) latikad oma kõrge kehakuju tõttu enam kohadele toiduks

Kogu kalastiku hävitamiseks on kasutatud rotenooni. See on tõhus kalamürk, mida saadakse troopilise liblikõielise taime *Derris elliptica* juurte pulbristamisel. Kõik kalad on rotenooni suhtes tundlikud, kuid peamised ohvrid on plankton- ja bentostoidulised kalad. Kõigi kalade hävitamiseks piisab kogusest 1 mg/l. Rotenoon on kõige efektiivsem soojas vees. Paraku hävitab ta ka zooplanktoni, mistõttu saavad hoopis vetikad mõnda aega kontrollimatult kasvada. Viimasel ajal pole see meetod enam kasutamist leidnud.

Zooplanktonile ja röövkaladele varju- ning kudemispaikade loomine on pikema perspektiiviga meetod. Selleks võib järve siirata makrofüüte, näiteks kollast vesikuppu või mändvetikaid. Selliseid kohti võib ka kunstlikult luua, kinnitades veekogu põhja pajuvitsu või konstrueerides spetsiaalseid veekihis ujuvaid makrofüütidega aluseid. Niisugused taimed pakuvad pelaagilisele zooplanktonile päeviti varju, võimaldades neil vaenlasi vältida. Varjepaikade loomist ainult biomanipulatsiooni eesmärgil on siiski vähe kasutatud.

Suured mageveekarbid, näiteks rändkarbid ja jõekarplased, on võimelised filtreerima suure osa järveveest, toitudes seejuures otseselt ka fütoplanktonist, sealhulgas sinivetikatest. Seetõttu arvatakse, et karpide otsesel asustamisel või nende asustustiheduse suurendamisel sobivate elupaikade loomise teel veekogusse võib olla pikaajaline positiivne mõju veekogu ökosüsteemile. Karpide asustustiheduse suurendamiseks saab sobivaid elupaiku luua veekogusse kive ja muud tahket substraati lisades. Karpide asustamist kui biomanipulatsiooni meetodit on seni vähe kasutatud ja uuritud. Karpide arvukuse suurendamisel on sarnane mõju lepiskalade eemaldamisega. Filtreerides vett, vähendavad nad veekogus hägusust ja fütoplanktoni hulka. Osa filtreeritud sestonist, mida nad toiduks ei tarvita, heidetakse vette tagasi pseudofekaalidena. Need on limaga kokkukleebitud lahustumatud osakesed, mida karbid heidavad korrapäraselt sissevoolusifooni kaudu mantliõõnest tagasi välja. Seega stabiliseerivad karbid oma elutegevusega ka setteid. Karbid toimivad nagu fosforipumbad, omastades veesambas kolloidsete ühendite koosseisus olevaid fosfaate ja setitades neid vees lahustumatute pseudofekaalidena põhja.

### Eeldused edukaks biomanipulatsiooni rakendamiseks ja vajalikud eeluuringud

**Eeltingimused.** Eduka biomanipulatsiooni eeltingimusteks on **välise toiteainekoormuse vähendamine** ning makrofüütide ja röövkalade olemasolu järves.

Kui keskmine üldfosfori (TP) sisaldus arvutatuna fosfori väliskoormusest on madalates järvedes üle 0,05–0,1 mg/l ja sügavates järvedes üle 0,01–0,02 mg/l, tuleb esmajärjekorras vähendada fosfori väliskoormust. Selleks tuleb üle vaadata ja parandada asulate heitveepuhastussüsteemid, rajada veekogude ümber puhverribasid, mis takistaksid toitainete jõudmist veekogusse, luua märgalapuhasteid ja vähendada põldude väetamist. Järvesisene üldfosfori koormus peaks jääma alla 0,1 mg/l.

**Põhjataimestikule sobivate kasvutingimuste loomine.** Et makrofüüdid ja nende pealiskasv tarbivad efektiivselt toiteaineid, väheneb fütoplanktonile kättesaadavate toiteainete hulk vees. Samuti on mõned makrofüüdid (tähkvesikuusk – *Myriophyllum spicatum*, vahelmine näkirohi – *Najas marina* subsp. *intermedia*, räni-kardhein – *Ceratophyllum demersum*, rabe mändvetikas – *Chara globularis*) võimelised eritama vette ühendeid, mis pärsivad vetikate arengut. Madalates tuultele avatud järvedes vähendavad makrofüüdid lainetuse mõju ja soodustavad settimist. Samal ajal stabiliseerivad nad oma juurtega setteid, mistõttu väheneb setete resuspensioon. Taimestiku vahel leiavad vaenlaste eest varjupaika suured taimtoidulised zooplankterid.

Et suurendada biomanipulatsiooni õnnestumise tõenäosust, peaks **röövkalade osakaal järves olema 25–30%**. Röövkalad täidavad veekogus biomelioratiivset rolli, hoides väheväärtusliku peenkala arvukust kontrolli all.

Varem arvati, et biomanipulatsiooni saab edukalt teostada vaid väikestes ja madalates järvedes, mille maksimaalne suurus on neli hektarit ja maksimaalne sügavus neli meetrit. Samuti usuti, et sinivetikate domineerimise korral ei saa biomanipulatsioon olla edukas. Biomanipuleerida saab siiski ka märksa suuremaid, sügavamaid, kihistunud ja sinivetikarohkeid järvi, kuigi see võib kujuneda kallimaks ja keerulisemaks.

Et tagada biomanipulatsiooni efektiivsus, peab **lepiskalade väljapüük olema intensiivne**. Nii plankton- kui ka bentostoiduliste kalade hulka tuleb võimalikult lühikese aja jooksul vähendada vähemalt 75% võrra. Kuna planktontoidulised kalad toituvad otseselt zooplanktonist, on just nemad peamiseks sihtmärgiks. Bentostoidulisi kalu tuleb välja püüda nende toiduotsimistüübi tõttu, mis suurendab vee hägusust ja halvendab seega valgustingimusi. Nii satuvad toiteained taas vette, soodustades sellega fütoplanktoni arengut. Samuti piiravad nad tuhnimisega suurtaimede kasvu ja levikut.

Õnnestunud tervendamise kogemused Euroopa järvede näitel kinnitavad, et ühel aastal väljapüütavate karpkalalaste hulka saab ennustada. Võrrand näitab optimaalset väljapüütavate kalade kogust esimesel biomanipulatsiooni aastal (kg/ha) ning selle aluseks on üldfosfori sisaldus vees (TP, µg/l):

$$Püügivajadus = 16{,}9 \times TP^{0{,}52}$$

## Tabel 3.4. BIOMANIPULATSIOONI PLUSSIDE, MIINUSTE, VÕIMALUSTE JA OHTUDE ANALÜÜS

| Plussid | Miinused | Võimalused | Ohud |
|---|---|---|---|
| • Tõhus meetod<br>• Palju rakendusnäiteid teistest riikidest<br>• Keskkonnasõbralik<br>• Võimalik kasutada kombineerituna teiste meetoditega<br>• Tulemused pikaajalised | • Eeldab põhjalikke teadmisi veekogu toitumissuhete kohta<br>• Eeltööde suur hulk<br>• Seisundi säilitamine nõuab lisatööd (järelkalastus)<br>• Hind kõrge<br>• Lünklik õigusloome | • Koostöö teiste riikidega<br>• Kogenud spetsialistid | • Eeluuringud ebapiisavad<br>• Toiteainete sisekoormus suur<br>• Positiivne tulemus pole garanteeritud<br>• Huvigruppide erimeelsused<br>• Järjepidevuse võimalik puudumine |

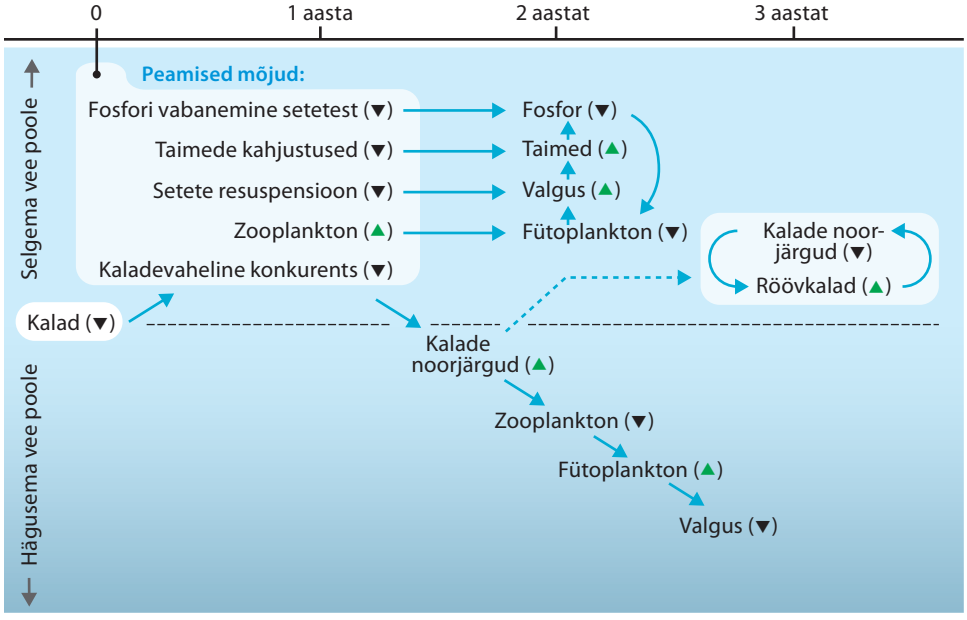
**Eeluuringud.** Eeluuringute käigus peab selguma, kas eeldused biomanipulatsiooni teostamiseks on täidetavad. Et välja selgitada kalaliikide proportsionaalne levik, ajalis-ruumiline paiknemine ja tihedus avavees, tuleb kasutada katsetraalimist ning uppuvaid ja ujuvaid sektsioonseirevõrke. Kaldapiirkonnas tuleb kasutada uppuvaid mitmesektsioonilisi seirevõrke ning nooda- ja mõrrapüüki. Katsetraalimise asemel võib kasutada ka veesamba vertikaalset ja horisontaalset kajaloodimist.

**Seire ja järelseire.** Nii biomanipulatsiooni kestel kui ka pärast seda tuleb tervendatud veekogu regulaarselt seirata. Jälgida tuleb nii füüsikalis-keemilisi (fosforisisaldus, lämmastikusisaldus, pH, Secchi ketta nähtavus) kui ka bioloogilisi kvaliteedinäitajaid (Chl *a* sisaldus, fütoplanktoni kooslus, fütoplanktoni arvukus ja biomass, zooplanktoni arvukus ja biomass).

**Biomanipulatsiooni kui järve tervendamise meetodi plussid, miinused, võimalused ja ohud** Eduka biomanipulatsiooni tulemusel väheneb plankton- ja bentostoiduliste kalade biomass ning järvesisene fosforikoormus. Suureneb zooplanktoni biomass, mis hoiab kontrolli all fütoplanktoni arvukust. Samuti suureneb vee läbipaistvus ja levima saavad hakata veealused suurtaimed, kes omakorda suruvad alla vetikate kasvu.

Tabelis 3.4 on esitatud biomanipulatsiooni plussid ja miinused. Seni on rohkem edu saavutatud väikestes ja madalates järvedes. Suurtes ja sügavates järvedes nõuab see rohkem ressursse. Paljudes järvedes on jäänud loodetud tulemused saavutamata või on vee kvaliteedi muutused olnud väga lühiajalised. Pikaajaliste muutuste saavutamiseks on oluline, et järves oleks stabiilne röövja lepistoiduliste kalade suhe. Makrofüütidega peaks olema kaetud vähemalt 15–20% järve pindalast.

Joonisel 3.32 on esitatud kokkuvõtlik ülevaade biomanipulatsiooniga kaasneda võivatest protsessidest. Välja on toodud muutuste ligikaudne toimumine ajateljel, kus nullpunkt tähistab kalade väljapüügi algust. Keskmine katkendlik joon näitab järve seisundit enne biomanipulatsiooni (tugevalt eutroofne järv korduvate veeõitsengutega), kasti sees on näidatud kalade masspüügi esmane toime. Need protsessid, mis on paigutatud keskmisest katkendlikust joonest ülespoole, parandavad järve seisundit ja vähendavad veeõitsenguid.




**3.32.** Biomanipulatsiooniga kaasnevad muutused veekogus.

## BIOMANIPULATSIOON ÜLEMISTE JÄRVES

Ülemiste järve biomanipulatsiooni projekt on Eestis seni ainus omalaadne teaduspõhiselt planeeritud, korralikult dokumenteeritud ja rahvusvahelistes teadusajakirjades kajastamist leidnud ettevõtmine.

**Kalapüügi eesmärk:** taastada järves looduslähedane toitumisahel, kus röövkalad suudaksid kontrolli all hoida lepiskalade arvukust ja vähendada seeläbi mikrovetikate vohamist.

**2004.–2006.** a teostatud biomanipulatsiooni käigus eemaldati järvest 156 tonni lepiskala, millest latikas moodustas umbes 55% ja särg 26%.

**2005.–2007.** a vegetatsiooniperioodidel vähenes oluliselt vee üldfosfori-, üldlämmastiku- ja kloriidisisaldus ning fütoplanktoni biomass. Fütoplanktoni kooslusse ilmusid lisaks niitjatele sinivetikatele ka mikro- ja pikoplankton ning kevadine fütoplanktoni kooslus muutus liigirikkamaks. Vee läbipaistvus paranes maikuudel.

**2012**. a seire käigus leiti, et biomanipulatsioon oli andnud lühiajalise positiivse tulemuse.

**Ülemiste järv** on on madal (keskmine sügavus 2,5 m). Selle vett on joogiks kasutatud juba sajandeid. Et järv paikneb linnas ja inimmõju on suur, on tema majandamine keerukas. Näiteks on inimene looduslikku valglat suurendanud sada korda, mis tähendab, et järve valgub väga erinevate omadustega vett.

Järve ökoloogiline seisund oli pikka aega püsinud kesine. Parema kvaliteediga toorvee saamiseks otsustati kasutada biomanipulatsiooni kui üht lihtsaimat meetodit eesmärgi saavutamiseks. Selle tulemusena hakkaski järgnenud aastatel vee kvaliteet paranema. Paraku polnud biomanipulatsiooni mõju küllaldane ega pikaajaline.

Nüüd otsitakse võimalust võtta joogiveeks puhastatavat toorvett järve sissevoolu lähedalt ning eraldada see ala suuremast järveosast.

**Ülemiste järve**
veepeegli pindala on 944,4 ha, valgla pindala 99,24 km$^2$, keskmine sügavus 2,5 m, maksimaalne sügavus 4,2 m, kaldajoone pikkus 16,4 km.

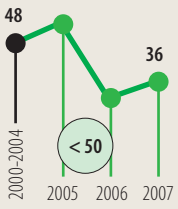
**Järve põhi** on suures osas mudane. Järvemuda lasundi paksus ulatub 8,5 meetrini. Kuna järve on kaua aega kasutatud veemahutina, on selle algsest looduslikust veerežiimist ja vee omadustest vähe säilinud.

**Veekasutus**
ASi Tallinna Vesi aasta keskmine järvest võetava vee kogus on **22 mln m$^3$**.

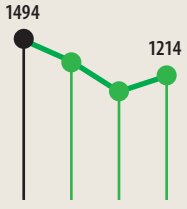
Järv on kalgiveeline ja eutroofne, kuuludes VRD klassifikatsioonis II tüüpi seisuveekogude hulka:

- veepeegli pindala alla 10 km$^2$,
- vesi keskmise karedusega, kloriidivaene,
- järv kihistumata veega.

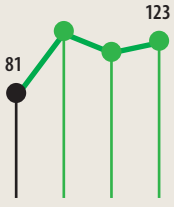
**Vee kvaliteedinäitajad enne biomanipulatsiooni (2000–2004), biomanipulatsiooni ajal (2005 ja 2006) ja pärast biomanipulatsiooni (2007) ning püstitatud eesmärgid.**



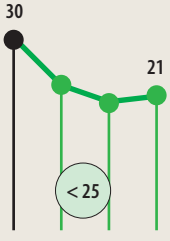

Üldfosfor (µg/l)



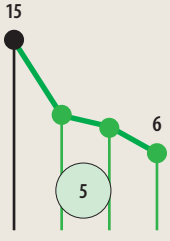

Üldlämmastik (µg/l)



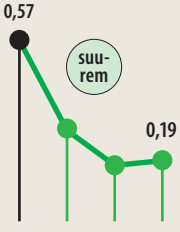

Vee läbipaistvus (cm)



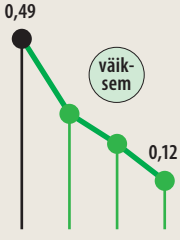

Chl a (µg/l)




Fütoplanktoni biomass (µg/l)



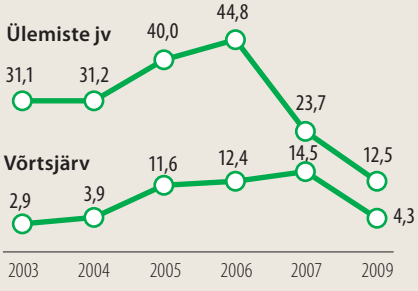

Vesikirbuliste biomass (µg/l)




Keriloomade arvukus (mln is / m$^3$)

### Biomanipulatsiooni mõju zoobentosele Ülemiste järves

2004–2008 püüti Ülemiste järvest välja bentostoidulisi kalu, eriti latikat, et parandada järvevee kvaliteeti. Toitu otsides songivad latikad põhjast muda üles, mis toob vette tagasi sinna talletunud fosforit. Järve profundaalis suurenes püügiperioodil latikate põhitoidu, surusääsklaste vastsete keskmine kaal, eriti 2006. a. Kui püük lõppes, suurenes kalade arv kiiresti. Järsult kasvas surve sääsevastsetele, kes ei saanud enam nii suureks kasvada.




Võrdluseks on toodud Võrtsjärve andmed samast ajast. Võrtsjärve profundaali asustavad samad kalaliigid ja põhjaloomad, aga seal toimub intensiivne kalapüük kogu aeg. Järv ise on Ülemistest vähem toiteline.

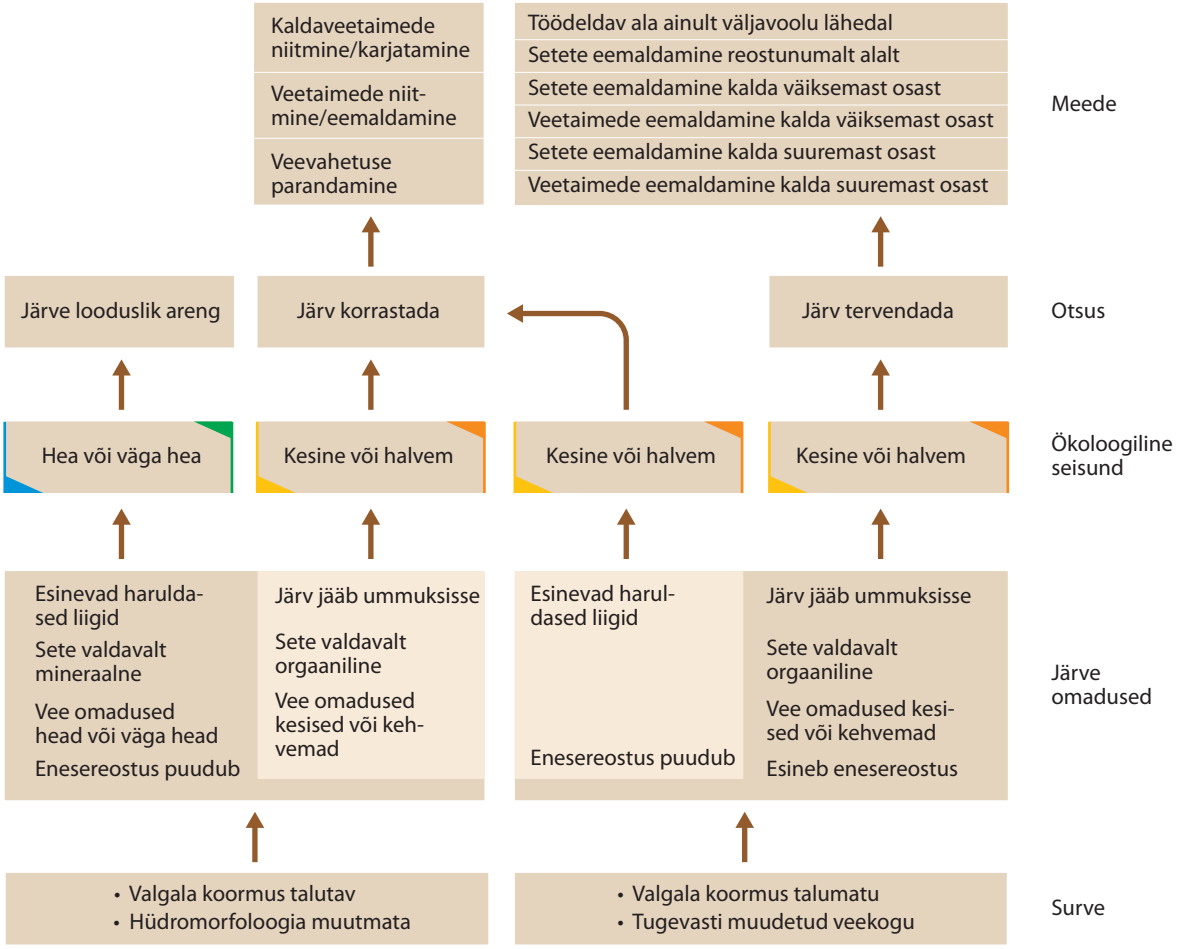
**MAKROFÜÜDIJÄRVEDE TAASTAMINE, TERVENDAMINE JA KORRASTAMINE** Madalate järvede täitumine setetega ja kinnikasvamine on looduslik protsess. Kui inimmõju tõttu on ökoloogiline seisund kesine või halvem, siis on otstarbekas rakendada meetmeid olukorra parandamiseks. Eestis tähendab järvede tervendamine traditsiooniliselt taimede ja/või muda eemaldamist. Läänе-Euroopas seevastu üritatakse madalates järvedes sageli taassaavutada seisundit, kus 30–50% järvest või isegi rohkem oleks hõivatud veealusest taimestikust. Seal püütakse kõrvaldada pigem tulnukliike, mis omamaiseid välja tõrjuvad. Makrofüüdijärvedeks peetakse Eesti tingimustes neid, mille pindalast kolmveerand või enam on taimedega kaetud. Kuid sageli soovitakse taimestiku ja sette vähendamist ka lagedamates järvedes, milles mõne kitsama piirkonna taimerohkus takistab rannas tegutsemist, suplemist, paadisõitu või kalapüüki.

Madala, kinnikasvanud ja mudastunud veekogu tühjendamiseks taimedest ning ülemise või kogu mudakihi eemaldamiseks tuleb kas kogu vesi või enamik sellest järvest eemaldada. See töö on makrofüüdijärvede puhul väga kulukas. Kui seda siiski tehakse, tuleb arvestada kahe ebasoovitava tagajärjega: (a) tekkiv veekogu muutub vähemalt ajutiselt sogase veega fütoplanktonijärveks; (b) mõneks ajaks vaesub kogu taimedega seotud elustik (mikroorganismid, selgrootud, kalad, linnud). Uuendamine on mõttekas eelkõige kunstlike mudastunud jõeosade (paisjärvede) puhul. Nende tühjendamisel tuleb vältida allavoolu jääva jõesängi reostamist väljavõetava materjaliga.

Lõuna-Saksamaalt on teada kalatiikide ajutist kuivaksjätmist hilisema kalasaagi suurendamise eesmärgil juba 15. sajandist. Põhja kogunenud muda kasutati põlluväetisena. Selline moodus paistabki sobivat just kunstlikele veekogudele. Tühjendada on soovitatav sügisest hilistalveni, et veekogu saaks kevadel uuesti täituma hakata.

Samas võib mõnes inimtekkeliseski veekogus leiduda haruldasi asukaid või ilmneda suur liigirikkus. Eriti taimerohked on madalad järved tavaliselt sissevoolude läheduses ning varjulistes lahtedes. Taimedest pärineva rohke orgaanilise aine lagundamiseks kulub palju hapnikku ning need järved võivad jääda ummuksisse.

**3.33.** Eesti rannajärvede majandamise ja kaitsmise meetmeskeem.



Korrastamine on tavaliselt väikesemahuline taimede eemaldamine, mida teevad kõik maaomanikud, kelle valdused asuvad järvekaldal. Kui taastamine ja tervendamine parandavad kogu veekogu ökoloogilist seisundit, siis korrastamine selleni ei küüni. Kuid ka asjatundmatu korrastamine võib veekogu ohustada. Näiteks pehmeveeliste järvede ujumiskohtadesse ei tohi igasugust liiva või kruusa vedada, sest see võib kaasa tuua liigsete toiteainete valgumise vette ja anda sellega parema kasvuvõimaluse veetaimedele. Samuti ei tohiks vee äärde tekitada lahtise pinnasega kohti (näiteks ehitiste puhul).

Otsuse langetamist taastamise või tervendamise vajaduse üle hõlbustab kavandatavate tegevuste kindel järjestus. Et Euroopa Liidus kehtib range veekogude kaitse ja majandamise kord, võimaldavad sellised skeemid ametnikel kergemini otsuseid vastu võtta. Makrofüüdijärved on siin lihtne näide, sest nende puhul peale taimede niitmise ning setete eemaldamise ja töötlemise muid meetodeid eriti ei kasutata. Makrofüüdijärved on ka paljud rannajärved, mis madaluse tõttu kergesti kinni kasvavad. Joonisel 3.33. on näitena esitatud Eesti rannajärvede majandamise meetmekava skeem.

**3.34.** Räni-kardheina (*Ceratophyllum demersum*) mass võib madalates järvedes suve teisel poolel ulatuda põhjast pinnani.

Vesikarikas (*Stratiotes aloides*) on paadiomanikule nuhtlus, kuid rohe-tondihobu vastsetele ainus elupaik.

**Eemaldatavate taimede kogus** Keskmiselt kareda veega järvedes (vee $HCO_3^-$-sisaldus 80–240 mg/l), mida leidub kõige rohkem, kasvavad enamasti tavalised taimeliigid (joonis 3.34). Kaitse all on üksikud samblad, näkirohud, penikeeled ja mändvetikad, samuti vesiroosid ja väike vesikupp. Järvekallastel paiknevad madala taimestikuga allikasood kuuluvad kogu Euroopas kiiresti väheneva pindalaga vääriselupaikade hulka. Sood jäävad tervendatavatest järveosadest enamasti eemale ja nende kahjustamist tuleks kindlasti vältida. Kui tegemist on hiljuti kinnikasvanud niiskete niitudega, võiks tervendustööde käigus kaaluda ka nende taastamist. Niitudel kasvavaid käpalisi, tarnu, pääsusilmi ja teisi väheneva levikuga taimi tuleks võimaluse korral säästa.

Veekogusid ääristaval taimestikul on oluline osa veekogusse saabuvate toiteainete kinnipidamisel. Paraku neelavad rohkem toiteaineid just need kaldataimed, mis on järvede tervendajaile vastumeelt. Kallastelt nõrguva toidu toel on nad suure- ja kiirekasvulised. Lautadest, põldudelt või elamutest väetada saanud järvi ääristab sageli õõtsikuriba, kus leidub mürkputke, hundinuia, soosõnajalga jm (joonis 3.35). Õõtsikust kalda poole kasvavad pajud ja kased. Niisugune taimestik tekib ka allikasoiste kallaste kinnikasvamisel.

Tervendamise käigus tuleb taimed veest välja viia, et neisse kogunenud toiteained enam järve aineringesse ei satuks. Kui välisreostus on kõrvaldatud, võib taimi veest ja kaldalt julgesti eemaldada.

145 Eesti järve uurimisel leiti, et taimestiku üldkatvuse ja järve seisundi seos on nõrk. Karedaveelistes madalates järvedes (keskmine sügavus 1–2 m) ei tohiks kaldaveetaimestik ja ujulehtedega taimestik pärast tervendamist hõivata kokku üle 30–40% nende pindalast, sügavates järvedes võiks see protsent olla 10–20.

**3.35.** Kaldaäärne õõtsikuriba mürkputkega (*Cicuta virosa*).

Veetaimestik on samas selgrootute ja kalade peamine varje-, sigimis- ja toitumisala. Taimed ja neid kattev epifüüton hoiavad vee selge. Nad takistavad sette liikumist, lisavad fotosünteesi ajal järve hapnikku, konkureerivad toidu pärast fütoplanktoniga ning seovad suveks endasse toiteaineid.

## Tabel 3.5. MÕNE EESTI JÄRVE TAIMESTIKU HULK 1950. JA 2000. AASTAIL

| Järv | Aastad | Kogu taimestiku katvuse % | Kaldaveetaimestiku % | Ujulehtedega taimestiku % | Veesisese taimestiku % või taimestiku % koos ujulehtedega |
|---|---|---|---|---|---|
| Elistvere enne veetaseme alandamist 1957 | 1951–1957[1] | 86 | 29 | 25 | 32 |
| Elistvere | 2007[2] | 87 | 31 | | 56 |
| Prossa (veetase alandatud enne 1940) | 1951–1957[1] | 94 | 26 | 30 | 38 |
| Prossa | 2000[3] | 100 | 10 | | 90 |
| Kaarepere Pikkjärv (veetase alandatud enne 1940) | 1951–1957[1] | 76 | 21 | 23 | 32 |
| Kaarepere Pikkjärv | 2007[2] | 52 | 15 | | 37 |
| Endla (veetase alandatud 1950) | 1951[1] | 34 | 17 | | 17 |
| Endla (veetase tõstetud 1968) | 2004[4] | 90 | | | |

[1] H.Tuvikese arhiiv; [2] Aruandes „Maa ja vesi" (Mugra jt 2007) sisalduva skeemi põhjal kaalumisega määratud; [3] Tõnu Feldmanni andmed; [4] Helle Mäemetsa andmed; kõiki rühmi on hinnatud koos

Näiteid Eesti väikejärvede taimestiku katvuse muutuste kohta on tabelis 3.5. Elistvere ja Prossa järv Vooremaal on püsinud makrofüüdijärvedena juba kaua. Kaarepere Pikkjärves on taimestik isegi vähenenud. Hoolimata arvatavast vananemisest pole neis kaldaveetaimestiku hulk oluliselt suurenenud.

Pehmeveelised järved on tundlikud ökosüsteemid, mille halb tervis ei pruugi suplejatele silma hakatagi. Heledate pehmeveeliste (0–30 mg/l $HCO_3^-$) järvede reostamisel suurtaimestik pigem väheneb, tumedaveelistes on seda üldse napilt. Taimi täis kasvanud pehmeveeliste järvede tervendamist on väga vähe uuritud. Pigem on vähetoiteliste liikide taasilmumine ebatõenäoline.

**Eeluuringud** Taimestiku koosseisu ja sügavuspiiride määramiseks tuleb teha põhjalik suvine uuring paadist. Ülevaate saamisel on abiks ka aerofotod. Setteproovide võtmine on hõlpsaim jää pealt. On vaja taustandmeid sissevoolude vee kvaliteedi ja valgla kohta.

**2.36.** Peipsi rand Tammispää lähedal vahetult pärast puhastamist 2005. aastal ja neli aastat hiljem.

Lauge kaldaga järvedes tuleb tervendustöödeks valida madalaveeline periood (näiteks sügisest talve lõpuni), sest see häirib veekogu ümbruse elustikku ja elanikke kõige vähem. Taimestiku niitmine on tõhusaim siis, kui süsivesikuid leidub taime võsudes vähe. Selliseid perioode on enamikul liikidel kaks: enne õitsema hakkamist, kui süsivesikuid kulub õite kasvuks, ja suve lõpul, kui süsivesikud liiguvad risoomidesse. Kuivade pilliroovarte talvine niitmine jäält taimi ei nõrgesta. Küll aga mõjub kaldaveetaimedele suvine või sügisene veealune niitmine, mille tagajärjel lõpeb risoomide õhustamine ning need hakkavad mädanema. Samas vähendab mädanevate juurikate ja tüügaste mass vee all hapnikusisaldust ning lisab toiteaineid. Väljajuurimist on kõige otstarbekam teha siis, kui taimed on täies kasvuhoos ning pole veel tekkinud küpseid seemneid ega talipungi. Setetes leidub sellegipoolest ka varasematest aastatest pärit eluvõimelisi seemneid – sellistegi taimede omi, mida parasjagu näha pole. Need liigid tõusevad esile vahetult pärast puhastamist kujunevas taimestikus. Sobiv niitmisaeg paraku ühtib teiste veekogu asukate, näiteks kalade kudemis- ja lindude pesitsusperioodiga. Seepärast saab taimestiku eemaldamist alustada tavaliselt juulikuus. Niitmine mõjutab vee kvaliteeti vähem kui juurimine, kuid viimane annab pikemaajalise tulemuse.

**Makrofüüdijärvede töötlemise negatiivsed küljed** Kui piirduda ainult taimevõsude eemaldamisega, tuleb seda üha korrata (joonis 3.36). Senine praktika näitab tavaliste veetaimede suurt elujõulisust ja taastuvust väga mitmesuguste tõrjeabinõude kiuste. Mõne liigi võsude peeneks hekseldamisel võib igast pungast saada alguse uus taim. Mürgid mõjutavad muudki elustikku ega anna taimede tõrjel pikaajalist efekti. Ka väidetavalt ohutute mürkide jäägid võivad tekitada seni veel teadmata kahju. Kestvam pärssiv mõju suurtaimedele on setete väljavõtmisel.

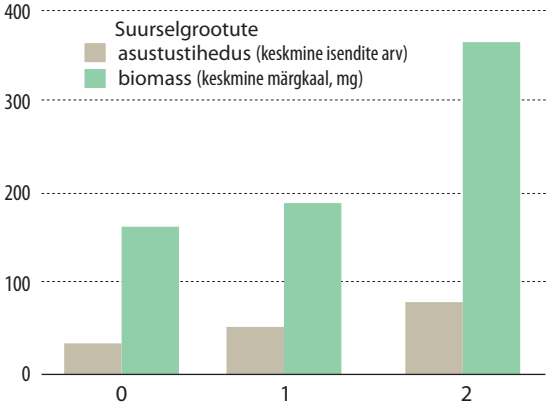
Suure pindalaga, soostunud valglaga ning kaua taimi täis olnud järvede puhul on tervendamise otstarbekus kahtlane. Näiteks suure Endla järve (286 ha) taset langetati 19. sajandil 0,3 m ning 1950. aastal 0,8 m. Suvine veepind vähenes selle tagajärjel 70%. Saared liitusid kallastega ning endisse järvepõhja kasvasid mitmel pool puud. Kui 1968. a endine veetase enam-vähem taastati, jäeti nii puistud kui ka ülejäänud taimemass vette mädanema. Setete mineraliseerimiseks järve uuesti alla lasta, mis annaks ühtlasi võimaluse kõige hullemad kohad mudast puhastada, pole majanduslikult mõistlik. Liiati häiriks see elustikku, samuti ei suudetaks takistada settevee tagasivoolamist.

Paremate väljavaadetega on väikeste makrofüüdijärvede tervendamine. Kuid hoolimata põhjalikest eeluuringutest ning teadlaste konkreetsetest soovitustest pole siiani asja saanud näiteks Neitsijärve (7,5 ha) tervendamisest Otepää kõrgustikul (vt foto lk 278–279) .

Sama oluline kui eemaldamine on taimede ja muda järgnev käitlemine. Kaldale kallatud mudast ja lagunevatest taimedest nõrguv vesi väetab järve kohe uuesti, soodustades veetaimede kasvu. Väljapumbatud setete ja taimede paigutamiseks tuleb leida sobiv koht ning tagada sellest nõrguvate toiteainete kinnipidamine, näiteks laia ja tiheda kaldaäärse taimestiku abil.

**Taimestiku eemaldamise mõju suurselgrootutele.** Veetaimestik on järvedes elupaik, mis pakub suurselgrootutele võimalusi nii kinnihoidmiseks, kalade eest varjumiseks kui ka toitumiseks. Suurselgrootute hulgas leidub mitme toitumistüübi esindajaid. Taimestikus on neist levinuimad kõdunärijad, filtreerijad, kiskjad ja taimepinnal kasvava vetikakihi kraapijad. Suurselgrootud ise on omakorda toiduks kaladele ja lindudele.

Joonisel 3.37 on paljude aastate (1951–2006) proovide põhjal kujutatud suurselgrootute asustustihedust ja biomassi mitmesuguste taimeoludega Eesti väike- ja paisjärvedes. Nii asustustihedus kui ka biomass osutusid suurimaks taimerikastes ja vähimaks taimevabades proovides, kusjuures erinevused olid kõik statistiliselt olulised. Niisiis eelistasid suurselgrootud taimede leidumist elupaigas nende puudumisele, taimede rohkust aga nende vähesusele. Analüüsist jäeti välja suured karbid, sest nende leidumist on raske usaldusväärselt mõõta väikese arvu, kuid suure biomassi tõttu.




**3.37.** Taimestiku ja suurselgrootute hulk on positiivses korrelatsioonis: mida rohkem on taimi, seda arvukamalt on põhjaloomi ja seda suurem on nende biomass. Suurselgrootute hulk määrati prooviruutudel mõõtmetega 15 × 15 cm. Taimede hulga järgi jagati prooviruudud kolme rühma: 0 – proovis polnud üldse taimi; 1 – proovis leidus kuigivõrd taimi; 2 – taimed moodustasid olulise osa proovist. Võrreldi ainult kuni 3 m sügavusi proove – välja arvatud need proovid, kus taimi oli palju (2) –, et vältida vee erinevast läbipaistvusest tulenevat mõju taimede hulgale.

Taimerohkuse ja suurselgrootute hulga positiivset seost on täheldatud mujalgi. Loomade asurkondi mõjutab tugevalt ka taimestiku tüüp. Mida mitmekesisem on elupaik, seda rohkem on liike. Eesti järvede kaldaäärsetele suurselgrootutele sobivad eriti tarnad. Nende juured, lehed ja varred on suhteliselt peened, kuid püsivad samas päriselt lagunemata vee all peaaegu aasta ringi. See võimaldab loomadel nende külge kinnitudes pikka aega varjuda ning ühtlasi kergesti toitu leida. Seevastu jämeda ja sileda varrega kaldataimede puhul (pilliroog, järvkaisel, hundinui) on tingimused selgrootutele palju kehvemad. Kõige vähem suurselgrootuid asustab ujulehtedega taimi, keskmisel hulgal kaldataimi ja kõige rohkem veesiseseid taimi. Loomulikult leidub selgrootutegi hulgas lagedat põhja eelistavaid liike, kellele taimestiku vohamine ei sobi (näiteks paljud kahetiivaliste vastsed, mudatuplased, karbid). Eeskätt kuuluvad nende hulka mutta ja liiva kaevuvad liigid, kellest paljud taluvad hapnikupuudust paremini kui taimestikuasukad.

Taimede eemaldamise korral väheneb tõenäoliselt neid asustanud loomade arvukus ja taksonirikkus. Vähenemise ulatus oleneb sellest, kui suur osa kogu taimestikust hävitati, kas seda tehti ühelt pidevalt alalt või tükati, kas seda tehti korduvalt ja millisel aastaajal. Kui taimestikku muudeti kogu tema levilaga võrreldes piiratud alal, võib see järve elustiku mitmekesisust mõneks ajaks isegi suurendada, sest vabanenud ala asustavad lageda põhja või pioneerliigid. Taimede lõikamine mõjutab eeskätt tegelikke taimeelanikke, vähem aga lageda põhja liike ja kiireid liikujaid, kes suudavad enne elupaiga hävimist põgeneda. Suurselgrootute biomass võib reguleeritava taimekasvuga aladel mõnikord isegi suuremaks kasvada, kui see on puutumata piirkondades. Sel juhul on tegemist pigem vähenõudlike liikidega, kes asustavadki meelsasti rikutud elupaiku. Eriti palju on nende hulgas surusääsklasi.

Taimestiku hulga reguleerimisel tuleb arvestada sedagi, et Eesti järvi asustab mitu kaitsealust suurselgrootuliiki, kelle asurkondi selline tegevus võib oluliselt kahjustada (tabel 3.6). Enne taimestiku kui selgrootute elupaiga lõhkumist on niisiis mõistlik uurida, kas neid liike vaadeldavas järves leidub ja kui palju võiks kavandatav töö neid häirida. Jälgida tuleks sedagi, et tervendamise ohvriks ei langeks mõni kaitsealune veetaimeliik, mida Eesti järvedes on kokku 19. Peale selgrootute asustavad tihedat veetaimestikku kalamaimud, kes avavees langeksid röövkalade saagiks.

**LITORAALI ELUPAIKADE TERVENDAMINE** Paljude järvede kaldad kannatavad tugevasti inimtekkeliste hüdromorfoloogiliste muutuste all, mis on oluliselt vähendanud elupaikade mitmekesisust ja liigirikkust järvede kaldalähedastes osades. Normaalse litoraali tunnuseks on parasvöötmes tavaliselt veetaimestik. Et looduslikes tingimustes kasvab järvekallastel mets, peaks litoraal ühtlasi sisaldama vette langenud puutüvesid ja -oksi. Saksamaal Müggelsee järves suurendas okste lisamine litoraali vee-elustiku mitmekesisust, eriti siis, kui neid asetati lagedale liivasele põhjale. Kuid ka betoonseinte või kivirahnudega kindlustatud kallaste lähedale paigutatud oksad avaldasid põhjaselgrootutele märkimisväärset positiivset mõju. Jämeda puidudetriidi pindalalise osakaalu suurendamine litoraalis 5%-lt 15%-ni parandas järve seisundi kesisest heaks. Niisiis on võimalik elupaiga näiliselt tähtsusetu parandamisega saavutada olulisi muutusi.

## Tabel 3.6. KAITSEALUSEID TAIMELEMBESI SUURSELGROOTUTE LIIKE EESTI JÄRVEDES

**Natura**[1] – Euroopa Liidu loodusdirektiivi kategooriad: II – liigid, mille kaitsmine nõuab loodushoiualade määramist; IV – liigid, mis vajavad ranget kaitset; V – liigid, mille loodusest võtmist ja kasutamist võib reguleerida kaitsekorraldusmeetmetega.
**LK** [2] – Eesti looduskaitseseaduse kategooriad: II – ohustatud liigid; III – potentsiaalselt ohustatud liigid.
**PR** [3] – Eesti punase raamatu kategooria: DD – puuduliku andmestikuga.

| Liik | | Natura II | Natura IV | Natura V | LK II | LK III | PR DD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Suur rabakiil | (*Leucorrhinia pectoralis*) | ● | ● | | | ● | ● |
| Rohe-tondihobu | (*Aeshna viridis*) | | ● | | | ● | |
| Valgelaup-rabakiil | (*Leucorrhinia albifrons*) | | ● | | | ● | |
| Hännak-rabakiil | (*Leucorrhinia caudalis*) | | ● | | | ● | ● |
| Lai ujur | (*Dytiscus latissimus*) | | ● | | | ● | ● |
| Lai tõmmuujur | (*Graphoderus bilineatus*) | | ● | | | ● | |
| Kirjukaan | (*Hirudo medicinalis*) | | | ● | ● | | |
| Eba-lamekaan | (*Boreobdella verrucosa*) | | | | | | ● |
| Kilpkonnakaan | (*Placobdella costata*) | | | | | | ● |
| Kirju linnukaan | (*Theromyzon maculosum*) | | | | | | ● |
| Tõmmuujur | (*Graphoderus zonatus*) | | | | | | ● |

[1] Euroopa... 1992; [2] Looduskaitseseadus 2004; [3] Eesti... 2008

**■ MOOTORSÕIDUKITE LAINETE TEKITATAVATE KAHJUSTUSTE VÄLTIMINE** Lained mõjuvad igale veekogule isemoodi ja ühtset eeskirja mootorsõidukite mõju vähendamiseks esitada ei saa. On täheldatud, et isegi tavaline mootorpaatide, kaatrite ja laevade liikumine mõjutab märgatavalt järvede elustikku. See tekitab vibratsiooni, müra ja laineid, erodeerib kaldaid ning võib kaasa tuua ohtlike ainete sattumise vette (joonis 3.38). Vee hapnikusisaldust suurendab vetikate ja suurtaimede fotosüntees võrreldamatult rohkem kui mootorsõidukitega tekitatud aereerimine. Mida tugevam on lainete surve, seda rohkem uhub see elustikku põhjast lahti. Berliinis Müggelsee järves oli liivapõhjalt 90% suurselgrootute lahtiuhtumiseks vaja rõhku keskmiselt 0,37 Pa. Üle 2 Pa rõhu eest ei suutnud kaitset pakkuda ka kiviklibu ega puidudetriit. Keskmiselt 35 m kaugusel kaldast kiirusega 11 km/h liikunud paadi tekitatud lained rebisid põhjast lahti 45%, 20 m kaugusel aga juba 75% selgrootutest. Kaitseks laevade tekitatud lainete eest oli ainus tõhus põhjasubstraat puujuured.

**■ INVASIIVSETE LIIKIDE MÕJU PIDURDAMINE** Liikide levila pidev muutumine on looduslik protsess. Inimtegevus võib seda oluliselt võimendada, näiteks ümberasujaid meelega või kogemata transportides, või nende levimist soodustada, näiteks kanaleid ja kraave rajades. Suurem osa levivate liikide isendeid ei jää ellu. Invasiivsed, s.t sissetunginud ja tugevasti suurenenud arvukusega liigid ohustavad seniste koosluste struktuuri ja tasakaalu. Nad võivad levitada haigusi ja parasiite, kelle suhtes kohalikel liikidel pole kaitsekohastumusi, või moodustada kohalike liikidega hübriide. Väga suure arvukuse korral võivad nad muuta isegi elupaiga enda omadusi. Sama liik ei pruugi eri elupaikades invasiivne olla. Kuid kord juba edukalt kohanenud liikide arvukust on hiljem peaaegu võimatu kontrolli all hoida, rääkimata väljatõrjumisest.

Sissetungijana on edukad need liigid, millel on

- mingis elustaadiumis suur liikumisvõime, näiteks planktiline vastne,
- juba eelnev arvukas asurkond läheduses,
- tugev vastupanuvõime keskkonnatingimuste, eriti temperatuuri ja soolsuse muutlikkuse suhtes,
- lai ökoloogiline amplituud,
- vastupidavad puhkefaasid,
- võime paljuneda vegetatiivselt või hermafrodiitselt,
- vähenõudlikkus toidu suhtes,
- suur viljakus,
- kiire kasv,
- lühike ja lihtne elutsükkel,
- suur geneetiline varieeruvus,
- sarnase ökoloogilise niši võimalus uues keskkonnas,
- suur kohanemis- ja konkurentsivõime.

Sageli puuduvad sellistel liikidel uues keskkonnas konkurendid, kiskjad, parasiidid ja haigused.

Tulnukad levivad sageli koos laevaliiklusega ning domineerivad veekogudes, kus see on intensiivne. Näiteks Saksamaal polnud tulnukliikidest kirpvähklased ega teod märgatavalt mõjutatud laevade tekitatud lainetest.

Kõige rohkem on teada kalade ja suurtaimede tulnukliikidest. Vähem tähelepanu pööratakse selgrootutele ja teistele väiksematele olenditele, ehkki nende mõju ei pruugi väiksem olla.

**3.38.** Litoraalielustiku tõhusaks kaitsmiseks veesõidukite tekitatud lainete eest peaks kaldaroostiku laius olema vähemalt 30 meetrit.

▲ **Niiluse ahven** (*Lates niloticus*) elab looduslikult paljudes Aafrika voolu- ja seisuvetes. Kuni 1950. aastateni puudus ta Niiluse jõe ülemjooksul asuvas Aafrika suurimas (68 800 km²), Victoria järves, sest ei suutnud ületada kõrget joastikku. Nüüd on selle liigi tõttu välja surnud mitusada kohalikku kalaliiki. Alguses toitus niiluse ahven ühest kohalike kirevahvenlaste perekonnast, siis hakkas sööma krevette ja limuseid. Järve ökosüsteemi muutumine on kohalikele kogukondadele avaldanud olulist sotsiaal-majanduslikku mõju. Niiluse ahvena püük on toonud kalurifirmadele sisse miljoneid dollareid. Samas on see sundinud paljusid kohalikke elanikke loobuma traditsioonilisest kalapüügist ja muutnud nad majanduspagulasteks. Peale selle on niiluse ahvena sissetoomine avaldanud kahjulikku mõju järve valglale. Kalu tuleb riknemise vältimiseks suitsutada. Seetõttu on piirkonnas märgatavalt kasvanud nõudlus küttepuidu järele, mis on toonud kaasa laialdase mullaerosiooni ja kõrbestumise.

■ **Maailma kõige ohtlikumad invasiivsed kalaliigid**, kes asustavad peamiselt seisuveekogusid, on USA põllumajandusministeeriumi andmetel järgmised.

▲ **Aasia angersäga** (*Clarias batrachus*) on pärit Lõuna-Aasiast. Et ta suudab niiskel pinnal uimedel „kõndides" liikuda, on ta võimeline ühest veekogust (näiteks kalatiigist) teise rändama.

◄ **Harilik gambuusia** (*Gambusia affinis*) on pärit Põhja-Ameerika ida- ja lõuna-osast. Võitluseks malaariasääskedega on teda levitatud üle maailma. Ta tõrjub tihti välja selgrootutest toituvad kohalikud kalad ja konnad. On tekkinud olukordi, kus gambuusiad söövad rohkem sääskede vaenlasi kui sääski endid.

**Mosambiigi tilaapia** ► (*Oreochromis mossambicus*) sobib hästi kasvatamiseks, soojades vetes levib ise väga hästi. Ta on kõigesööja, kes talub temperatuuri +10 kuni +38 °C.

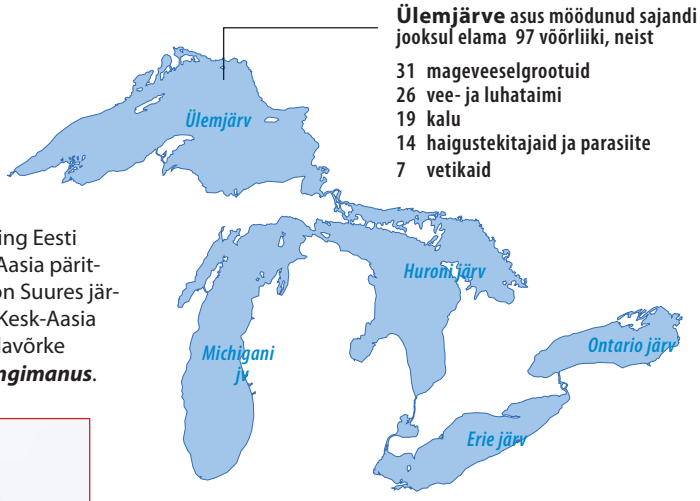
◄ **Suursuu-forellahven** (*Micropterus salmoides*) on Põhja-Ameerika päritolu. Ta sööb nii kalu, linnupoegi kui kahepaikseid ja on nüüdseks levinud ka Euroopas Suurbritanniast Venemaani.

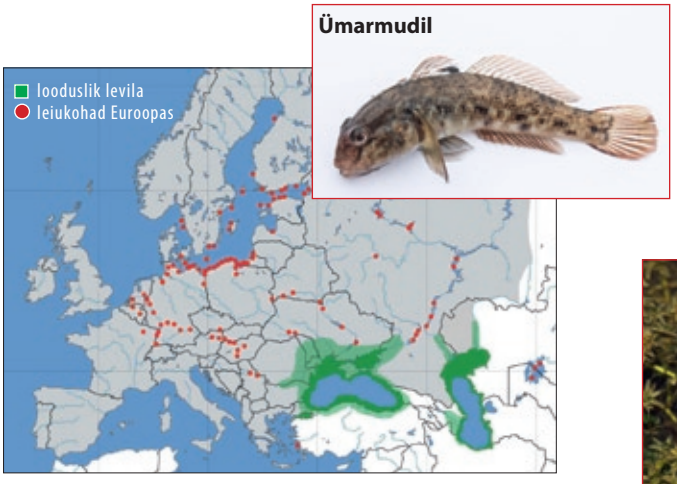
**Tähniline madupea** ► (*Ophiocephalus argus*) on Kaug-Idast pärit kiskja, kes võib neli päeva veest väljas olla.

**Karpkala** (*Cyprinus carpio*) on pärit Kesk-Aasiast. Tema looduslikud asurkonnad on välja suremas, tehislikud aga levinud üle kogu maailma. Tegu on kõigesööjaga, kes hävitab põhja songides veetaimestikku ja sogastab vett.

■ Põhja-Ameerika suurimast seisuveekogude rühmast **Suurest järvistust** on teada üle 180 võõrliigi.

Nende sekka kuuluvad selgroogsetest näiteks **merisutt** (*Petromyzon marinus*) ja **hallselg-aloosa** (*Alosa pseudoharengus*). Mõlemad pääsesid Ontario järvest ülesvoolu paiknevatesse järvedesse alles 1921. a ümber Niagara kose kaevatud kanali kaudu. Veel on Suures järvistus invasiivne Euroopa tulnukas **kiisk** (*Gymnocephalus cernuus*) ning Eesti rannikumeres viimastel aastatel plahvatuslikult levinud Kesk-Aasia päritolu **ümarmudil** (*Neogobius melanostomus* ▼). Selgrootutest on Suures järvistus olulisimad võõrliigid samuti Euroopa kaudu saabunud Kesk-Aasia rändkarbid ***Dreissena polymorpha*** ja ***D. rostriformis*** ning kalavõrke ummistav, pika ogalise sabaga vesikirbuline ***Bythotrephes longimanus***.



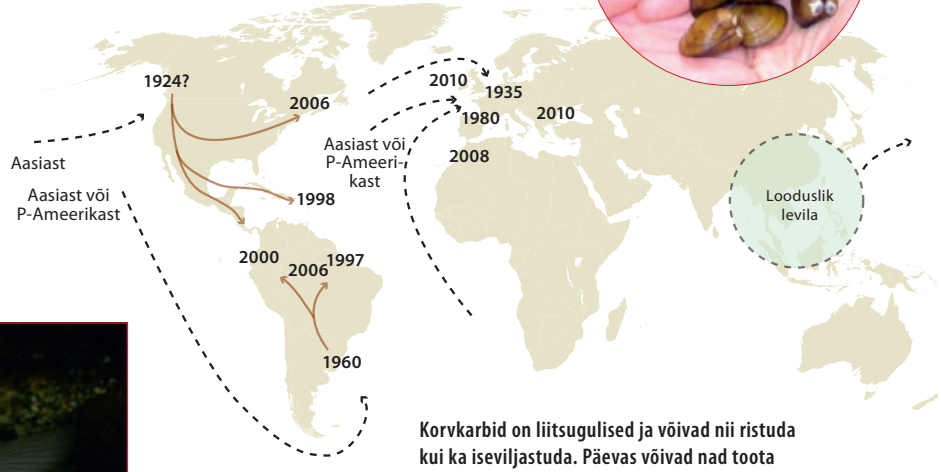




■ **Taimedest on Põhja-Ameerikas** invasiivsete tulnukate nimekirjas Lõuna-Ameerika liik **vesihüatsint** (*Eichhornia crassipes*) ning Euroopa päritolu, meilgi tavalised taimed **harilik pilliroog** (*Phragmites australis*), **kähar penikeel** (*Potamogeton crispus*) ja **tähk-vesikuusk** (*Myriophyllum spicatum*).

Eestis ja mujal Euroopas on kodunenud **kanada vesikatk** (*Elodea canadensis* ◄).

■ **Eestis** levinud invasiivliikidest võib nimetada **hõbekokre** (*Carassius auratus* ▼), kes asustab nii järvi kui ka riimveelisi merelahti. Peamised kultiveeritavad kalaliigid – karpkala ja vikerforell – meil looduslikes vetes õnneks eriti edukalt ei sigi. Kirde-Eesti tiikidest ja Narva veehoidlast avastatud **kaugida unimudila** (*Perccottus glenii*) laiemat levikut takistavad seni edukalt Narva jõe ja Peipsi röövkalad. Peamiselt Peipsi järve, samuti selle vesikonnas asuvaid väiksemaid kõvapõhjalisi järvi asustab **harilik rändkarp** (*Dreissena polymorpha*). Väike Baikali järve vesikonnast pärit kirpvähiline **rändvähk** (*Gmelinoides fasciatus*) on Peipsi madalaveelistes osades selgrootute loomade seas dominandiks muutunud. Kui unimudila eest hoiatatakse, et ta võib Peipsi elustikku kahjustada, siis rändvähk on seda juba aastakümneid väga tagajärjekalt teinud, ilma et looduskaitsjad sellele erilist tähelepanu oleksid pööranud.

■ **Üle maakera** on troopilistesse vetesse levinud Ida-Aasia korvkarbiline ***Corbicula fluminea*** ►. Tema tekitatud kahju seisneb veetorustike ja veepuhastusseadmete ummistamises, samuti kohalike karbiliikide väljatõrjumises.




Korvkarbid on liitsugulised ja võivad nii ristuda kui ka iseviljastuda. Päevas võivad nad toota kuni 2000 ning elu jooksul kuni 100 000 järglast. Noored on algul kuni 1 mm pikkused. Suguküpseks (1 cm pikkuseks) saavad nad temperatuurist olenevalt ühe kuni nelja aastaga. Suurimad isendid võivad lõpuks kasvada 5 cm pikkuseks.

### 3.5.4. Vooluveekogude tervendamine

Tegu on meetmete kogumiga, mille eesmärk on saavutada veekogu ning selle kallaste ja valgla suurem sarnasus looduslike oludega. Ideaaljuhul on tervendamise tulemuseks ökoloogiline tasakaal, mida iseloomustab nii elupaikade kui ka elustiku asjakohane mitmekesisus. Tervendamisega võib kaasneda vaadeldava ala senisest parem kasutatavus puhkealana ning ühtlasi suureneda kallaste kui kinnisvara väärtus. Kuid muudatused, mida ei tehta keskkonnakaitselistel eesmärkidel – näiteks süvendamine, vettelangenud puude kõrvaldamine, kalda kindlustamine ehitusobjekti kaitseks, ilusate vaadete avamine, muru rajamine kallasteni, veetaimestiku eemaldamine –, tuleb liigitada korrastamiseks (joonis 3.39). Jõe kui elukeskkonna seisundit need tegevused ei paranda, ehkki muudavad piirkonna inimestele atraktiivsemaks. Iseasi, et sageli üritatakse neid tegevusi raha taotlemisel tervendamisena serveerida. Tervendamine võib seisneda ka ainult mingi üksiku looduslikku seisundit häiriva objekti, näiteks truubi või paisu parandamises või eemaldamises. Kogu jõe või jõelõigu puhul on tüüpilised tegevused näiteks puhvertsoonide, vanajõgede ja luhtade taastamine või korrastamine. Nii nagu seisuvete puhul peab ka vooluvetel otsestele tervendustöödele eelnema ala põhjalik uurimine, sest muidu võib tervendus ebaõnnestuda kas või looduslike üleujutuste tõttu, mida ei osatud arvesse võtta.

Usaldusväärsete andmete saamiseks tuleb vooluveekogusid seirata nii enne kui ka pärast tervendamist ning pikemaajaliste projektide puhul ka selle ajal. Soovitav mõju (näiteks kalade edukas kudemine) võib ilmneda alles aastaid pärast tervendustöid.

Mõned vooluveekogude tervendusmeetodid sarnanevad seisuvete omadega. Veevoolu ning pika ja kitsa kuju tõttu leidub vooluvetel siiski inimmõju tüüpe, mida seisuveekogudel pole. Järgnevalt vaatleme vooluvete tervendamise viise inimmõju tüüpide kaupa.

**HOIDUMINE VEE REOSTAMISEST** Reovee sissejuhtimise korral tuleb seda enne jõkke jõudmist oluliselt lahjendada (puhastada).

Reoained ja soovimatud organismid kõrvaldatakse veest mehaaniliste, bioloogiliste, füüsikaliste ja keemiliste võtete abil. Reoveepuhastus lõpeb enamasti suublas (veekogu, kuhu juhitakse reo- või heitvesi) isepuhastumise teel. Reovee möödajuhtimine suublast ei lahenda probleemi, vaid suunab selle mujale. Suublaks tuleb valida veekogu, mille ökosüsteem suudaks sissetulevad reoained lagundada ja puhastada, s.t tuleb arvestada veekogu puhverdus- ja vastupanuvõimet eutrofeerivate mõjurite suhtes.

Üksikute veekihtide eemaldamine, nagu seda tehakse järvedes, pole väga hästi seguneva jõevee puhul mõeldav ega mõistlik. Samuti on tarbetu niigi hapnikurikka jõevee lisaõhutamine.

**PEHME SETTE EEMALDAMINE VOOLUVETEST** Muda eemaldamise viisid sarnanevad nendega, mida kasutatakse seisuvete puhul (vt lk 316 jj). Selle otsene eemaldamine, eriti suurtest paisjärvedest, ning käitlemine või ladustamine on aga kulukas. Kui paisjärv hakkab mudaga täituma, on alternatiivideks paisu kõrgendamine, paisu avamine, et vool saaks muda kaasa viia, ja uute paisude ehitamine. Ükski neist moodustest pole kesk-

**3.39.** Tallinna linna ja Saue valla piiril asuv Pääsküla jõgi on tugeva inimsurve all. Jõe seisundit on püütud parandada kallaste ja sängi heakorrastamisega, kuid erilise eduta.

konnasõbralik. Kõrgem pais või uus pais lükkab tekkinud probleemi lihtsalt kaugemale tulevikku. Suur hulk korraga allavoolu vabanevat muda reostab aga kiiresti ja pikaks ajaks paisust allpool asuva jõeosa. Paisjärved ise pole looduslikud jõeosad ning seega on nende puhastamine sisuliselt korrastamine, mitte tervendamine.

Maaparanduse tagajärjel jõesängi kogunenud pehmetel setetel võib mõnele liigile olla hukatuslik mõju isegi kiirevoolulistes jõelõikudes. Sellise olukorra näiteks on ebapärlikarbi (*Margaritifera margaritifera*) noored isendid, kes oma esimesed eluaastad peavad veetma kruusa ja jämeda liiva all. Kui kruusa- ja liivaterade vaheline ruum on mudaga ummistunud, ei saa nad hingata ega toituda. Nõnda on ebapärlikarp paljudes jõgedes määratud väljasuremisele, kui jõepõhja ei õnnestu mudast puhastada.

**KALAPÄÄSUD** Kalapääs on vooluveekogul olev rajatis, mis asub loodusliku või tehistõkke (tavaliselt paisu) juures, et võimaldada kalade rännet mööda vooluveekogu. Looduskaitseseaduse järgi peab paisu valdaja tagama lõhelaste kudemis- ja elupaigana kinnitatud veekogudel kalade läbipääsu nii üles- kui ka allavoolu. Kokku rajati Eestis aastatel 2009–2015 Keskkonnaameti andmetel 89 kalapääsu.

Parim viis kalade läbipääsu tagamiseks on paisu eemaldamine. Sellega kaasneb ühtlasi võõraste koosluste asendumine tavapärastega, sealhulgas endise paisjärve kohal (seisuveekalad asenduvad taas vooluveekaladega). Alles siis, kui eemaldamine pole majanduslikel või sotsiaalsetel põhjustel võimalik, tuleb kaaluda muid variante. Mida madalam on pais, seda tõhusamalt toimivat kalapääsu on võimalik ehitada. Tõhusust hinnatakse selle järgi, kui suur osa läbimist üritavatest isenditest suudab seda teha. Pääsu selektiivsus seevastu näitab, millised liigid ja kui suured isendid suudavad pääsu läbida. Kalapääsude tavaline häda seisab selles, et puudub kindlus, kas kalad neid tõepoolest ka kasutama hakkavad.

**Tehiskärestik** või **-kosk** võimadab voolutõkke tekitatud kõrgusvahet ületada suure kaldega voolusängi abil nii, et voolukiirus oleks vastuvoolu rändavatele kaladele jõukohane (joonis 3.40).

**Möödaviikpääs** on looduslähedane tehissäng, mis juhib kalad paisust suure kaarega mööda (joonis 3.41). Ta matkib looduslikku jõge ning sarnaneb tehiskärestikuga.

**Kalatrepp** koosneb astmetena paiknevate kambrite reast (joonis 3.42). Kambrite vaheseintes on kalade läbipääsemist võimaldavad ülevoolu- või veealused avad. Kambrite veetasemete vahe kujundatakse nende liikide järgi, kelle läbipääsu peetakse kõige tähtsamaks. Denili tüüpi kalapääsus on renni põhjas (või külgedel ja põhjas) vastuvoolu 45-kraadise nurga all kaldu olevad

**3.40.** Paisu kohale rajatud tehiskärestik (mitteregu-leeritav ülevool). Veskijärve pais Leevi jõel.

**3.41.** Möödaviikpääs Kurepalu paisust Mõra jõel.

**3.42.** Kalatrepp Lätis Līgatne jõel.

tõkisplaadid. Need tekitavad voolu rahustavaid pööriseid ning vähendavad voolukiirust.

**Kalatõstukeid** üritatakse kasutada seal, kus veepindade kõrgusvahe on suur (üle 6 m) ning vett vähe (joonis 3.43).

Kalapääsude paremusjärjestus kalade seisukohalt on järgmine: 1) kujundada pais kärestikuks, 2) kärestikuline möödaviikpääs jõe kaldal, 3) tiikide kaskaadi tüüpi möödaviikpääs jõe kaldal, 4) kamberkalapääs ehk kalatrepp. Viimase sobiv versioon on pilupääs (vaheseinte otstes põhjani ulatuvad püstpilud). Neile järgnevad halvad valikud: nii ala- kui ka ülaavadega pääs, siis ainult alaavadega pääs ning kõige kehvema, ehkki veel kuidagi töötava variandina (näiteks väga väikese vooluhulga korral) ainult ülaavadega pääs. Denili kalapääs ja kalatõstuk on täiesti ebatõhusad.

Kärestikulise kalapääsu rajamiseks sobib jõelang kuni 2%, tiikide kaskaadi puhul kuni 4% ja kamberkalapääsude puhul kuni 10%. Suurema langu korral on juba raske hästi toimivat pääsu teha. Peale langu on oluline, et pääs meelitaks kalu neisse sisenema. Selle määravad sissepääsu asukoht ning piisavalt suur vooluhulk. Mida rohkem on vett, seda paremini kalapääs toimib. Kärestikulised kalapääsud ei aita mitte ainult veeloomadel liikuda, vaid on ka ise väärtuslikud elupaigad.

**3.43.** Kalatõstuk Kunda jõel. Kalad meelitatakse vanni peibutusjuhtmest tuleva vooluga ning seejärel tõstetakse nad tõstukiga ülavette. Paraku on kalatõstukite kasutegur kalade rände hõlbustamisel väga väike.

**■ ÕGVENDUSE TAGAJÄRGEDE LEEVENDAMINE** Kõige põhjalikum versioon sellest on kogu jõesängi – sealhulgas loogete ja vanajõgede – ning seda ümbritseva luha taastamine. Enamasti piirdutakse väiksemate ja odavamate meetmetega, näiteks kivide ja klibu lisamisega kiirevoolulistesse lõikudesse (joonis 3.44). Neist allpool vool kiireneb ja ülalpool aeglustub, kuid erinevalt paisudest see kalade liikumist ei takista. Sobiva suurusega kunstlikud kiviklibused kohad on voolulembestele kaladele (näiteks jõeforellile) ka koelmuteks paikades, kus need on hävinud või piiratud levikuga.

Vana jõesängi täiemahuline taastamine sarnaneb esialgsete tagajärgede poolest õgvendusega. Mõlemal juhul senine elupaik hävitatakse ning jäädakse ootama elustiku taastumist. Kui õgvendamisel on töö sooritajatel ükskõik, mis elustikust saab, siis tervendamise puhul on elustik esiplaanil. Enamasti sarnaneb tervendatud veekogu elustiku väljakujunemine sellega, mis toimub kunstlikult rajatud veekogus. Vooluveed taastuvad kiire-

**3.44.** Kunstlik kividest koelmu Esna jõel Järvamaal.

**3.45.** Vettelangenud tüved ja oksad on olulised vee-elustiku toiduallika ja varjekohana (Võhandu jõe ülemjooks).

**3.46.** Koprapaisud takistavad siirdekalade liikumist.

mini kui seisuveed, sest lisajõgedest või ülaltpoolt kandub uut elustikku vooluga peale. Sellest hoolimata on ka vooluveekogude põhi pärast tervendamist tükiks ajaks rikutud. Tööde käigus lõhutakse pika aja jooksul väljakujunenud kiht. Uuel põhjal puudub esialgu toitev vetikakile, rääkimata looduslikust suurtaimestikust.

Muuta saab nii jõesängi kuju (käänulisust), sügavust, kalde- kui ka langenurka. Selleks võib jõepõhja paigutada kallastega risti madalaid tõkkeid (kivid, kruus, palgid jm), et voolukiirus ja vee sügavus varieeruksid. Kui vana sirge säng ei sobi taastamiseks (näiteks on setetega ülemäära saastunud), võib olla parem lahendus rajada sobiva põhjaga käänuline lisasäng piki vana sängi. Seda on tehtud Hollandis Reini jõe alamjooksul.

Taastumisaeg pärast tervendamist või samalaadset füüsilist muutmist oleneb veekogu iseloomust ja muutuste ulatusest. Väikesed ojad taastuvad paari aastaga, keskmise suurusega tervendatud jõelõigul võib selleks kuluda neli aastat. Tervendamisel on oluline, et kaduma kippuvate elupaikade taastatav hulk poleks liiga väike, kuid samas ei hävitataks tervendamise käigus seni säilinud viimaseidki isendeid, kellele need elupaigad tegelikult asustamiseks olidki mõeldud. Kui töid hoolega läbi ei mõelda, võivad tervendusmeetmed jääda loodetud tulemuseta või seniseid hädasid (üleujutused, erosioon) isegi süvendada.

Hoolimata paljude õgvendatud jõelõikude olemasolust Eestis jõelookeid peaaegu taastatud ei ole. 2015. a süvendati Laeva jõe looduslikku käänulist alamjooksu Karisto oja, et sinna pääseksid kalad. Aastakümneid oli see jõgi kulgenud kunstlikku sirget sängi mööda.

Veealuseid puutüvesid on traditsiooniliselt püütud voolusängidest eemaldada, sest nad takistavad nii veevoolu, kalapüüki kui ka veetransporti. Looduslikes tingimustes, kus jõekaldad on metsaga kaetud, kuulub veealusele puidule oluline koht elustiku toiduallika ja varjekohana (joonis 3.45). Ühtlasi suurendavad veealused tüved ja oksad nagu kividki voolu mõjul vee sügavust ja põhja mitmekesisust. Seetõttu saab tüvesid nagu kivegi kasutada sängi tervendamiseks.

Suuri looduslikust puidust tekkinud vooluummistusi võib jõest eemaldada, kuid see tegevus liigitub korrastamise, mitte tervendamise alla. Küll aga on tervendamine näiteks parvetuspalkide eemaldamine.

Väga tähtsad on jõgede külgmised ühendused luhtade ja vanajõgedega. Tihti on õgvendamise käigus jõesäng ka sügavamaks muudetud ja looduslik luhtade üleujutamine seega katkestatud. Mõnes mõttes on jõesängi tervendamine ka vanajõgede otste lahtikaevamine, et kalad pääseksid neisse kudema ega jääks pärast suurvee alanemist sinna lõksu. Avatud ühendustega vanajõgedes on parem veevahetus ja soodsam gaasirežiim. Põhjaselgrootute liigistikule ei pruugi säärased muutused siiski kasulikult mõjuda. Esiteks kannatavad nad vähese liikuvuse tõttu kaevetööde all rohkem kui kalad. Teiseks on nad ise toiduks paljudele kaladele, kellel avaneb nüüd parem ligipääs vanajõgede senisele elustikule.

Vanajõgede otsi on Eestis süvendatud Narva jões, Emajões ja Põltsamaa jões.

Et inimesed ise on ohtra kraavistiku rajamisega loonud kohati ülisoodsad elutingimused kobrastele, võib tervendusmeetmeks pidada ka ülemääraste koprapaisude hävitamist. Nagu inimtekkelised paisudki on need takistuseks siirdekaladele ja mudastavad põhja (joonis 3.46). Muu hulgas mõjub see hukutavalt mudastumise suhtes väga tundlikule ebapärlikarbile. Kobraste arvukust suurendab seegi, et inimtegevuse tõttu on alla surutud kopra looduslikud vaenlased. Tugevalt on hääbunud kobraste küttimise traditsioon inimeste endi poolt. Alla 300 km$^2$ valgalaga vooluvetes on koprad sageli muutunud elupaigalise väärtuse peamisteks kujundajateks.

**3.47.** Leppadest kaldapuhver Maidla jõel Harjumaal ja sama jõgi teises kohas kaldapuhvrita.

■ **KALDAPUHVRITE TAASTAMINE** Kaldaala ehk kaldavöönd (*riparian zone*) on veekoguäärne maismaariba. Kui veekogu valglat tugevasti mõjutatakse, aitab kaldaala taimestik (puud ja põõsad) veekogu selle mõju eest kaitsta (puhverdada). Mõju seisneb nii valguse varjamises, kaldamulla kinnihoidmises juurtega kui ka tolmu kinnipidamises. Kui taimestik on hävinud, aitab selle taastamine veekogu tervenemisele kiiresti kaasa. Eriti olulised on kaldaala puistud vooluvetes, mille kaldajoon on seisuveekogudega võrreldes väga pikk. Isegi kitsas puude või põõsaste riba jõekallastel vähendab tunduvalt setete ja toiteainete kandumist kaldalt jõkke (joonis 3.47). Seega tuleks selliste puhverribade säilimist soodustada või neid rajada sinna, kus nad puuduvad. Näiteks 51 m laiune kraavi puhverriba Viljandimaal Viiratsis pidas kinni 85% lämmastikust ja 84% fosforist, 31 m laiune puhverriba Porijõe ääres aga 40% lämmastikust ja 78% fosforist.

■ **LOODUSLÄHEDASE VEEREŽIIMI TAASTAMINE** Looduslik veetase vooluvetes kõigub sesoonselt ja aastati niigi rohkem kui seisuvetes. Veerežiimi stabiilsust häirib tugevalt õgvendamine.

Mägijõgedes, kus suurvesi võib allpool õgvendatud lõike olla ajuti eriti võimas, rajatakse selle pidurdamiseks piki kaldaid eraldi käände ja lodusid, et säästa ujutusest allpool paiknevaid asulaid ja põlde. Kallaste erosiooni vähendamiseks on asulates pruugiks ehitada püstloodseid siledaid betoonseinu, mis aga ei paranda jõe kui ökosüsteemi seisundit ning on võitlus pigem tagajärgede kui põhjustega (joonis 3.48). Elustikusõbralikum on rajada selle asemel kividest või rahnudest kaldakate (*rip-rap*, joonis 3.49).

Kuivade ja soojade maade vooluvetes on veetaseme järsk langus või alaliste jõgede perioodiline kuivamine tarbevee ülemäärase võtmise tõttu aktuaalne. Ka mõnes väga suures jões (näiteks Colorado Põhja-Ameerikas,

**3.48.** Betoonseintest kaldakaitsed Denderi jões Belgias.

**3.49.** *Rip-rap*-kaldakindlustus Doonau jões Saksamaal. Kivihunnikud piki kallast kaitsevad seda lainetuse ja jää eest. Samas pakuvad kividevahelised praod elupaiku paljudele veeloomadele.

Amudarja ja Sõrdarja Kesk-Aasias) on vooluhulk enne suubumist märksa väiksem kui keskjooksul. Amudarja ja Sõrdarja vee pruukimine niisutuseks on põhjustanud suure äravooluta Araali järve kuivamise.

Väga suur osa jõgedest on looduslikult kas ajutised või kõigub vooluhulk neis tugevasti. Sel juhul kogutakse tarbevett paisude taha perioodideks, mil vooluhulk läheneb nullile (näiteks paljud jõed Austraalias). Eestis nagu muudeski parasvöötmemaades vooluvete kuivamisest tingitud tarbeveepuudust ega sellega seotud muresid enamasti ei ole.

**■ BIOMANIPULATSIOON** Et jõed on järvedega võrreldes avatumad süsteemid, pole nende elustiku reguleerimisel biomanipulatsioon nii tõhus kui järvedes. Pigem on kasu inimtekkeliste levikubarjääride (paisude) kõrvaldamisest ja sobivate elupaikade taastamisest.

**■ VEETAIMESTIKU EEMALDAMINE** Veetaimestiku eemaldamist jõgedest esteetilistel, looduskaitselistel või veevoolu soodustavatel kaalutlustel on praktiseeritud mitmel pool maailmas. Et taimestik on elupaigaks paljudele loomadele ja võib ise sisaldada kaitsealuseid liike, ei saa selle hävitamist tervendamiseks pidada. Eestis on jõgede taimestiku eemaldamine aktuaalne pigem ujumiskohtade ja asulate välisilme parandamiseks.

**■ VÕÕRLIIKIDE LEVIKU VÄLTIMINE VÕI PIIRAMINE** Vooluveekogusid asustavatest liikidest kuuluvad Euroopa invasiivsete liikide nimestikku kaladest näiteks Põhja-Ameerika päritolu vikerforell (*Oncorhynchus mykiss*), harilik päikeseahven (*Lepomis gibbosus*) ja suursuuforellahven. Vähkidest on esindatud idapoolset päritolu hiina villkäpp-krabi (*Eriocheir sinensis*) ning Põhja-Ameerika liigid signaalvähk, *Orconectes limosus* ja *O. virilis* ning punane soovähk. Limustest kuuluvad nimekirja Amuuri ja Jangtse jõestikust pärit järvekarp *Sinanodonta woodiana* ning Uus-Meremaa tulnukas rändtigu. Viimane asustab ka Eesti rannikumerd ja sinna suubuvaid ojasid. *O. limosus*, signaalvähk ja marmorvähk on Eesti vooluvetesse ka juba jõudnud. Villkäpp-krabi elab Eestis seni ainult meres. Nimestikku kuulub ka üks poolveeline imetajaliik – mink. Ta on Eesti veekogudes laialt levinud ning euroopa naaritsa neist välja tõrjunud. Eestis väga soositud forell kuulub aga näiteks Põhja-Ameerikas hoopis invasiivsete liikide nimestikku.

Peale otseste konkurentide sissetoomise või selle võimaldamise mõjutab inimtegevustest vooluvete elustikku veel kaldataimestiku liigilise koosseisu muutmine. Looduslike kaldametsade asendamine muudest liikidest puudega (näiteks eukalüptidega) võib märkimisväärselt muuta veesiseseid toiduahelaid. See on oluline eriti ülemjooksudel, kus suurem osa orgaanilist ainet satub vette just puudelt langevate lehtede, okste või viljadena.

**■ VOOLUVETE TERVENDAMISE TULEMUSI** Kalapääsude edukus sõltub suurel määral paisu kõrgusest ja jõepõhja langust. Mida kõrgem on pais ja mida vähem sarnaneb kalapääs loodusliku jõepõhjaga, seda vähem kalu seda kasutab. Et paise on väga erineva kõrgusega, varieerub ka kalapääsude tõhusus. Kui aga pääsu üldse ei ole, siis on kindel, et läbi ei pääse ükski isend.

Jõepõhja struktuuri parandamise mõttes on selgrootutele, fütobentosele ja suurtaimedele kõige kasulikum kruusa ja kiviklibu lisamine. Paremuselt järgmine võte on põhja segamine (rehitsemine), et sundida klibuvahelist muda allavoolu liikuma. Suurte kivide lisamine jõepõhja elustikule soodsat mõju ei avalda.

Jõesängi ja seda ümbritseva luha taastamisprogrammid pole Euroopas seni jõeelustikku kuigivõrd positiivselt mõjutanud. Taanis 1989. a taastatud 1,8 km pikkusel Gelså jõe osal polnud 19 aastat hiljem selgrootute faunas olulisi muutusi toimunud. Ehkki suurem osa püstitatud eesmärkidest näis olevat täidetud, ei suurendanud enamik meetmetest mikroelupaikade mitmekesisust, mida selgrootud loomad eeskätt vajavad. Kui olukord enne tervendamist pole lootusetult halb, ei pruugigi tervendustööde positiivne mõju elustikus kuigi selgelt avalduda.

Kui võrreldi kümmet tervendatud jõelõiku eri Euroopa maades paarikaupa tervendamata jõelõikudega, ilmnes kõige suurem positiivne erinevus hoopis maismaal – jõekallaste mardikate (jooksiklaste) olukorras. Neile järgnesid seisundi paranemise mõttes kalastik, luhataimestik, vee-suurselgrootud ja veetaimestik. Tervendatud ala pikkus polnud seisundi paranemise seisukohast oluline, küll aga tervenduse intensiivsus. Eriti tähtis oli see, kui palju uusi elupaiku loodi liikidele, mis nende puudumise tõttu seal varem elada ei saanud.

Elupaiga tervendamise vähest edukust võib mõnikord selgitada ka vee halb kvaliteet. Hoolimata suurepärasest hüdromorfoloogilisest olukorrast ei suuda tundlikud liigid reostunud vees ikkagi elada. Kui valgla on põllumajanduslikult tugevasti mõjutatud, võib seegi elustiku taastumist pidurdada. Nii kaladele kui ka selgrootute taastumisele mõjub hästi okasmetsade suur osakaal valglal ülalpool taastatavat ala; veetaimede puhul on olukord vastupidine. Samas ei saa tundlikud liigid tervendatud elupaiku asustada, kui nad on samas jões varem välja surnud ning teistest veekogudest on ligipääs takistatud.

## KÜSIMUSED

1. Kuidas eristada veekogude tervendamist, korrastamist ja taastamist?
2. Milliseid andmeid on vaja koguda ja milliseid uuringuid teha enne veekogu tervendamist?
3. Millised on järvede tervendamismeetodid?
4. Millise veekihi eemaldamist kasutatakse enamasti veekogu tervendamiseks ja miks?
5. Millistes veekogudes kasutatakse hajusõhutuse meetodit?
6. Miks peab kihistunud järvede tervendamisel säilitama hüppekihi?
7. Milline on koagulantide toimemehhanism veekogudes?
8. Milles seisnevad veekogude tervendamisel kasutatavate raua- ja alumiiniumiühendite sarnasused ja erinevused?
9. Miks kasutatakse veekogude tervendamisel kaltsiumiühendeid?
10. Milline on RIPLOX-meetodi toimemehhanism?
11. Millised on lantaanil põhinevate kemikaalide kasutamise eelised võrreldes teiste fosforit siduvate ühenditega?
12. Millised on veeõitsengutega võitlemisel algitsiidide kasutamise positiivsed ja negatiivsed küljed?
13. Milliseid herbitsiide kasutatakse järvetervenduses ja kuidas need veekogule mõjuvad?
14. Millistest järvedest on otstarbekas sete eemaldada?
15. Millistes veekogudes on otstarbekas rakendada biomanipulatsiooni?
16. Millised kalastiku rühmad teevad oma elutegevusega vee hägusamaks ja millised selgemaks?
17. Milliseid võtteid kasutatakse biomanipulatsioonis?
18. Kui palju ja kust tuleks järvede tervendamisel veetaimi eemaldada?
19. Millised nähtused kaasnevad taimede eemaldamisega veekogudest?
20. Milliseid meetodeid kasutatakse vooluveekogude tervendamiseks?
21. Mis on tulnukliikide eduka levimise aluseks?
22. Nimetage kalapääsude tüüpe.

## MÕISTED JA MÄRKSÕNAD

tervendamine
taastamine
rehabilitatsioon
korrastamine ja hooldamine
hooldamine
tervendamis- või taastamisvajaduse eesmärk
tervendamise või taastamise eeldus
tervendustööde eelandmestik
loodusdirektiiv
järvede tervendamise insener-tehnilised meetodid
järvede tervendamise ökoloogilised meetodid
järvede tervendamise kompleksmeetodid
veekihtide eemaldamine
hajus- e difuusse õhustuse meetod
hüpolimnioni aereerimine
toiteainete keemiline setitamine
kemomanipulatsioon
koagulandid
kompleksmeetodid RIPLOX, PHOSLOCK, BENTOPHOS
algitsiidid ja herbitsiidid
setete eemaldamine
setete katmine
biomanipulatsioon
invasiivsed liigid
kalapääsud
kaldapuhvrid

Kooraste Linajärv

# Kasutatud kirjandus


Abebe, E., W. Decraemer, P. De Ley 2008. Global diversity of nematodes (Nematoda) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 67–78.

Åberg, B., W. Rodhe 1942. *Über die Milieufaktoren in einigen südschwedischen Seen*. (Symbolae botanicae Upsalienses, V. 5.) Uppsala: A-B Lundequistska Bokhandeln.

Agasild, H., T. Nõges 2005. Cladoceran and rotifer grazing on bacteria and phytoplankton in two shallow eutrophic lakes: In situ measurement with fluorescent microspheres. – *Journal of Plankton Research*, vol. 27, pp. 1155–1174.

Agasild, H., P. Zingel, L. Tuvikene, A. Tuvikene, H. Timm, T. Feldmann, J. Salujõe, K. Toming, R. I. Jones, T. Nõges 2014. Biogenic methane contributes to the food web of a large, shallow lake. – *Freshwater Biology*, vol. 59, no. 2, pp. 272–285.

Allan, J. D. 1995. *Stream Ecology. Structure and Function of Running Waters*. London: Chapman & Hall.

Allen, G. H., T. Pavelsky 2018. Global extent of rivers and streams. – *Science*, vol. 361, no. 6402, pp. 585–588.

Allen, K. R. 1951. *The Horokiwi Stream: A Study of a Trout Population*. (New Zealand Marine Department Fisheries Bulletin, no. 10.) Wellington: New Zealand Marine Department.

Alsterberg, G. 1927. Die Sauerstoffschichtung der Seen. – *Botaniska Notiser*, s. 255–274.

Amédégnato, C., H. Devriese 2008. Global diversity of true and pygmy grasshoppers (Acridomorpha, Orthoptera) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 535–543.

Anderson, R. C. 2009. Do dragonflies migrate across the western Indian Ocean? – *Journal of Tropical Ecology*, vol. 25, pp. 347–358.

Angeler, D. G., P. Chow-Fraser, M. A. Hanson, S. Sanchez-Caprillo, K. D. Zimmer 2003. Biomanipulation: A useful tool for freshwater wetland mitigation. – *Freshwater Biology*, vol. 48, pp. 2203–2213.

Arold, I. 2001. *Eesti maastikuline liigestatus*. Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus.

Audova, A., H. Bekker 1923. *Andmed Pühajärve uurimisest*. Tartu: Odamees.

Balian, E. V., C. Lévêque, H. Segers, K. Martens 2008. The freshwater animal diversity assessment: An overview of the results. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 627–637.

Balsamo, M., J.-L. d'Hondt, J. Kisielewski, L. Pierboni 2008. Global diversity of gastrotrichs (Gastrotricha) in fresh waters. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 85–91.

Barber-James, H. M., J.-L. Gattolliat, M. Sartori, M. D. Hubbard 2008. Global diversity of mayflies (Ephemeroptera, Insecta) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 339–350.

Bartsch, I. 2008. Global diversity of halacarid mites (Halacaridae: Acari: Arachnida) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 317–322.

Bauer, A. M., T. Jackman 2008. Global diversity of lizards in freshwater (Reptilia: Lacertilia). – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 581–586.

Bennett, A. M. R. 2008. Global diversity of hymenopterans (Hymenoptera; Insecta) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 529–534.

Birge, E. A. 1897. Plankton studies on Lake Mendota. II. The Crustacea from the plankton from July 1894 to December 1896. – *Transactions of the Wisconsin Academy of Sciences, Arts and Letters*, vol. 11, pp. 274–448.

Björk, S. 1994. Restoration methods and techniques. Sediment treatment. – M. Eiseltová (ed.). *Restoration of Lake Ecosystems: A Holistic Approach. A training handbook*. IWRB publication 32. Slimbridge, UK: International Waterfowl and Wetlands Research Bureau, pp. 82–89.

Björk, S. 2014. *Limnological Methods for Environmental Rehabilitation. The Fine Art of Restoring Aquatic Ecosystems*. Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers.

Blenckner, T. 2001. *Climate Related Impacts on a Lake: From Physics to Biology*. (Acta Universitatis Upsaliensis: Comprehensive summaries of Uppsala dissertations from the Faculty of Science and Technology. Book 674.) Uppsala: Uppsala University.

Blöchl, E., R. Rachel, S. Burggraf, D. Hafenbradl, H. W. Jannasch, K. O. Stetter 1997. Pyrolobus fumarii, gen. and sp. nov., represents a novel group of archaea, extending the upper temperature limit for life to 113 degrees C. – *Extremophiles*, vol. 1, pp. 14–21.

Boers, P. C. M., J. van der Does, M. Quaak, J. van der Vlugt, P. Walker 1992. Fixation of phosphorus in lake sediments using iron(III)chloride: Experiences, expectations. – *Hydrobiologia*, vol. 233, pp. 211–212.

Bogan, A. E. 2008. Global diversity of freshwater mussels (Mollusca, Bivalvia) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 139–147.

Bond-Buckup, G., C. G. Jara, M. Pérez-Losada, L. Buckup, K. A. Crandall 2008. Global diversity of crabs (Aeglidae: Anomura: Decapoda) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 267–273.

Bour, R. 2008. Global diversity of turtles (Chelonii; Reptilia) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 593–598.

Boxshall, G. A., D. Defaye 2008. Global diversity of copepods (Crustacea: Copepoda) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 195–207.

Brendonck, L., D. C. Rogers, J. Olesen, S. Weeks, W. R. Hoeh 2008. Global diversity of large branchiopods (Crustacea: Branchiopoda) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 167–176.

Brönmark, C., L.-A. Hansson 1998. *The Biology of Lakes and Ponds*. (Biology of Habitats Series.) Oxford: Oxford University Press.

Brönmark, C., L. A. Hansson 2005. *The Biology of Lakes and Ponds*. Oxford: Oxford University Press.

Brönsted, J. N., C. Wesenberg-Lund 1911. Chemisch-physikalische Untersuchungen der dänischen Gewässer nebst Bemerkungen über ihre Bedeutung für unsere Auffassung der Temporalvariation. – *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, Bd. 4, S. 251–290, 437–492.

Camacho, A. I., A. G. Valdecasas 2008. Global diversity of syncarids (Syncarida; Crustacea) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 257–266.

Caroni, R., W. Bund, R. T. Clarke 2013. Combination of multiple biological quality elements into waterbody assessment of surface waters. – *Hydrobiologia*, vol. 704, pp. 437–451.

Carrizo, S. F., S. C. Jähnig, V. Bremerich, J. Freyhof, I. Harrison, F. He, S. D. Langhans, K. Tockner, C. Zarfl, W. Darwall

2017. Freshwater megafauna: Flagships for freshwater biodiversity under threat. – *BioScience*, vol. 67, pp. 919–927.

Cavalier-Smith, T. 2003. Protist phylogeny and the high-level classification of Protozoa. – *European Journal of Protistology*, vol. 39, pp. 338–348.

Chambers P. A., P. Lacoul, K. J. Murphy, S. M. Thomaz 2008. Global diversity of aquatic macrophytes in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 9–26.

Churchill, C. L., C. K. Brashier, C. S. Johnson 1975. *Silt Removal From a Lake Bottom*. (Ecological Research Series.) Washington, D. C.: U.S. Environmental Protection Agency.

Cohen, A. S. 2003. *Paleolimnology: The History and Evolution of Lake Systems*. Oxford: Oxford University Press.

Cooke, G. D., E. B. Welch, S. A. Peterson, S. A. Nichols 2005. *Restoration and Management of Lakes and Reservoirs*. Third edition. Boca Raton: CRC Press – Taylor and Francis Group.

Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, S. Naeem, K. Limburg, J. Paruelo, V. O'Neill, R. Raskin, P. Sutton, M. van den Belt 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. – *Nature*, vol. 387, no. 6630, pp. 253–260.

Costanza, R., L. Wainger 1991. Ecological economics. – *Business Economics*, vol. 26. no. 4, pp. 45–48.

Cover, M. R., V. H. Resh 2008. Global diversity of dobsonflies, fishflies, and alderflies (Megaloptera; Insecta) and spongillaflies, nevrorthids, and osmylids (Neuroptera; Insecta) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 409–417.

Crandall, K. A., J. E. Buhay 2008. Global diversity of crayfish (Astacidae, Cambaridae, and Parastacidae – Decapoda) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 295–301.

Currie, D. C., P. H. Adler 2008. Global diversity of black flies (Diptera: Simuliidae) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 469–475.

Davis, C. A., J. R. Bidwell 2008. Response of aquatic invertebrates to vegetation management and agriculture. – *Wetlands*, vol. 28, pp. 793–805.

Davis, W. M. 1882. On the classification of lake basins. – *Proceedings of the Boston Society of Natural History*, vol. 21, pp. 315–381.

De Grave, S., Y. Cai, A. Anker 2008. Global diversity of shrimps (Crustacea: Decapoda: Caridea) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 287–293.

Deharveng, L., C. A. D'Haese, A. Bedos 2008. Global diversity of springtails (Collembola; Hexapoda) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 329–338.

Dehorter, O., M. Guillemain 2008. Global diversity of freshwater birds (Aves). – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 619–626.

Dickson, W. 1980. Properties of acidified water. – D. Drablös, A. Tollan (eds), *Ecological impact of acid precipitation. SNSF Proj.*, Oslo-Ås, pp. 75–83.

Di Sabatino, A., H. Smit, R. Gerecke, T. Goldschmidt, N. Matsumoto, B. Cicolani 2008. Global diversity of water mites (Acari, Hydrachnidia; Arachnida) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 303–315.

Dingman, S. L. 2002. *Physical Hydrology*. Second edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.

Dodds, W. K. 2002. *Freshwater Ecology: Concepts and Environmental Applications*. San Diego – London: Academic Press.

Donk, E. van, R. D. Gulati 1991. Ecological management of aquatic ecosystems: A complementary technique to reduce eutrophication-related perturbations. – O. Ravera (ed.). *Terrestrial and Aquatic Ecosystems: Perturbation and Recovery*. Chichester: Ellis Horwood, pp. 566–575.

Douglas, G. B., M. S. Robb, D. N. Coad, P. W. Ford 2004. A review of solid phase adsorbents for the removal of phosphorous from natural and wastewaters. – E. Valsam-Jones (ed.). *Phosphorus in Environmental Technology: Principles and Applications*. London: IWA Publishing, pp. 291–320.

Downing, J. A., F. H. Rigler (eds.) 1984. *A Manual on Methods for the Assessment of Secondary Production in Fresh Waters*. (IBP Handbook no. 17, 2nd ed.) Oxford: Blackwell Scientific Publications.

Duchkov, A. D., S. A. Kazantsev, A. A. Duchkov 2007. Bottom temperature monitoring in Lake Baikal. – *Russian Geology and Geophysics*, vol. 48, no. 4, pp. 371–377.

Dudgeon, D. (ed.) 2008. *Tropical Stream Ecology*. London – Burlington, Mass.: Academic Press; Amsterdam: Elsevier.

Eichwald, K. 1939. Võrtsjärve taimestik. – *Viljandimaa I*. Tartu: Eesti Kirjameeste Seltsi Kirjastus, lk 57–59.

Eiseltová, M. (ed.) 1994. *Restoration of Lake Ecosystems: A Holistic Approach. A training handbook*. IWRB publication 32. Slimbridge, UK: International Waterfowl and Wetlands Research Bureau.

European waters – assessment of status and pressures. 2012. EEA Report No 8/2012. Copenhagen: European Environment Agency.

Falkowski, P. G., J. A. Raven 2007. *Aquatic Photosynthesis*. Second edition. Princeton: Princeton University Press.

Feld, C. K., S. Birk, D. C. Bradley, D. Hering, J. Kail, A. Marzin, A. Melcher, D. Nemitz, M. L. Pedersen, F. Pletterbauer, D. Pont, P. F. M. Verdonschot, N. Friberg 2011. From natural to degraded rivers and back again: A test of restoration ecology theory and practice. – *Advances in Ecological Research*, vol. 44, pp. 119–209.

Ferrington, L. C. 2008. Global diversity of non-biting midges (Chironomidae; Insecta-Diptera) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 447–455.

Findenegg, I. 1937. Holomiktische und meromiktische Seen. – *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, Bd. 35, S. 586–610.

Fochetti, R., J. M. Tierno de Figueroa 2008. Global diversity of stoneflies (Plecoptera; Insecta) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 365–377.

Forró, L., N. M. Korovchinsky, A. A. Kotov, A. Petrusek 2008. Global diversity of cladocerans (Cladocera; Crustacea) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 177–184.

Friberg, N., B. Kronvang, H. O. Hansen, L. M. Svendsen 1998. Long-term, habitat-specific response of a macroinvertebrate community to river restoration. – *Aquatic Conservation – Marine and Freshwater Ecosystems*, vol. 8, pp. 87–99.

Garey, J. R., S. J. McInnes, P. B. Nichols 2008. Global diversity of tardigrades (Tardigrada) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 101–106.

Giller, P., B. Malmqvist 1998. *The Biology of Streams and Rivers*. Oxford: Oxford University Press.

Giorgio, P. del 2005. *Respiration in Aquatic Ecosystems*. Oxford: Oxford University Press.

Glasby, C. J., T. Timm 2008. Global diversity of polychaetes (Polychaeta; Annelida) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 107–115.

Gleick, P. H. 1996. Water resources. – S. H. Schneider (ed.). *Encyclopedia of Climate and Weather.* Volume 2. New York: Oxford University Press, pp. 817–823.

Goh, T. K., K. D. Hyde 1996. Biodiversity of freshwater fungi. – *Journal of Industrial Microbiology*, vol. 17, pp. 328–345.

Haberman, J., E. Pihu, A. Raukas (toim.) 2003. *Võrtsjärv*. (Loodus. Aeg. Inimene.) Tallinn: Eesti Entsüklopeediakirjastus.

Haberman, J., T. Timm, A. Raukas (toim.) 2008. *Peipsi*. Tartu: Eesti Loodusfoto.

Hakala, A. 2004. Meromixis as a part of lake evolution: Observations and a revised classification of true meromictic lakes in Finland. – *Boreal Environment Research*, vol. 9, pp. 37–53.

Hammer, U. T. 1986. *Saline Lake Ecosystems of the World*. Dordrecht: Dr. W. Junk Publishers.

Hansson, L.-A., H. Annadotter, E. Bergman, S. E. Harmin, E. Jeppesen, T. Kairesalo, E. Luokkanen, P. Å. Nilsson, M. Søndergaard 1998. Biomanipulation as an application of food chain theory: Constraints, synthesis and recommendations for temperate lakes. – *Ecosystems*, vol. 1, pp. 558–574.

Heinsalu, A., T. Alliksaar 2009. Palaeolimnological assessment of the reference conditions and ecological status of lakes in Estonia – implications for the European Union Water Framework Directive. – *Estonian Journal of Earth Sciences*, vol. 58, no. 4, pp. 334–341.

Hering, D., J. Aroviita, A. Baattrup-Pedersen, K. Brabec, T. Buijse, F. Ecke, N. Friberg, M. Gielczewski, K. Januschke, J. Koehler, B. Kupilas, A. W. Lorenz, S. Muhar, A. Paillex, M. Poppe, T. Schmidt, S. Schmutz, J. Vermaat, P. F. M. Verdonschot, R. C. M. Verdonschot, C. Wolter, J. Kail 2016. Contrasting the roles of section length and instream habitat enhancement for river restoration success: A field study of 20 European restoration projects. – *Journal of Applied Ecology*, vol. 52, pp. 1518–1527.

Hickey, J. R., B. M. Alton, F. J. Griffith 1982. Extraterrestrial solar irradiance variability. Two and one-half years of measurement from Nimbus 7. – *Solar Energy*, vol. 29, no. 2, pp. 125–127.

Hosper, S. H., M.-L. Meijer, R. D. Gulati, E. van Donk 2007. Biomanipulation in shallow lakes: Concepts, case studies and perspectives. Chapter 17. – P. E. O'Sullivan, C. S. Reynolds (eds.). *The Lakes Handbook*. Volume 2. *Lake Restoration and Rehabilitation*. Oxford: Blackwell Publishing, pp. 462–482.

Hunt, T. 2012. *Eesti kalad*. Tallinn: Varrak.

Hutchinson, G. E. 1957. *A Treatise on Limnology*. Volume 1. *Geography, Physics and Chemistry*. New York: Wiley.

Hutchinson, G. E., H. Löffler 1956. The thermal classification of lakes. – *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 42, pp. 84–86.

*Ida-Eesti vesikonna veemajanduskava*. 2010. Tallinn: Keskkonnaministeerium.

Illies, J. 1967. *Limnofauna Europea*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag.

Imboden, D. M. 2004. The motion of lake waters. – P. E. O'Sullivan, C. S. Reynolds (eds.). *The Lakes Handbook*. Volume 1. *Limnology and Limnetic Ecology*. Oxford: Blackwell Publishing.

Jankowski, T., A. G. Collins, R. Campbell 2008. Global diversity of inland water cnidarians. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 35–40.

Janssen, A. B. G., S. Teurlin, A. H. W. Beusen, M. A. J. Huijbregts, J. Rost, A. M. Schipper, L. M. S. Seelen, W. M. Mooij, J. H. Janse 2019. PCLake+: A process-based ecological model to assess the trophic state of stratified and non-stratified freshwater lakes worldwide. – *Ecological Modelling*, vol. 396, pp. 23–32.

Jaume, D., G. A. Boxshall 2008. Global diversity of cumaceans & tanaidaceans (Crustacea: Cumacea & Tanaidacea) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 225–230.

Jeppesen, E., I. Sammalkorpi 2002. Restoration in practice. Chapter 14: Lakes. – M. R. Perrow, A. J. Davy (eds.). *Handbook of Ecological Restoration*. Volume 2. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 297–319.

Jeppesen, E., M. Søndergaard, B. Kronvang, J. P. Jensen, L. E. Svendsen, T. L. Lauridsen 1999. Lake and catchment management in Denmark. – *Hydrobiologia,* vol. 395–396, pp. 419– 432.

Jones, E. B. G., R. Choeyklin 2008. Ecology of marine and freshwater basidiomycetes. – *British Mycological Society Symposia Serie*s, vol. 28, pp. 301–324.

Jørgensen, S. E., H. Löffler, W. Rast, M. Straskraba 2004. *Lake and Reservoir Management*. Amsterdam: Elsevier.

Junk, J. W., P. B. Bayley, R. E. Sparks 1989. The flood pulse concept in river-floodplain systems. – D. P. Dodge (ed.). *Proceedings of the International Large River Symposium. Canadian Special Publications of Fisheries and Aquatic Sciences*, no. 106, pp. 110–127.

Jäch, M. A., M. Balke 2008. Global diversity of water beetles (Coleoptera) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 419–442.

Järvede tervendamine. Kogumik. 2011. Pk.emu.ee/struktuur/hudrobioloogiajakalandus/teadustoo/publikatsioonid/jarvede-tervendamine-kogumik/.

Järvekülg, A. (toim.) 1982. *Loomade elu*. 2. köide. *Selgrootud II*. Tallinn: Valgus.

Järvekülg, A. (toim.) 1984. *Loomade elu*. 3. köide. *Selgrootud III*. Tallinn: Valgus.

Järvekülg, A. 1994. *Eesti jõgede ja järvede seisund ning kaitse*. Tallinn: Teaduste Akadeemia Kirjastus.

Järvekülg, A. (koost.) 2001. *Eesti jõed*. Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus.

Jönsson, K. I., E. Rabbow, R. O. Schill, M. Harms-Ringdahl, P. Rettberg 2008. Tardigrades survive exposure to space in low Earth orbit. – *Current Biology*, vol. 8, pp. R729–R731.

Kail, J., K. Brabec, M. Poppe, K. Januschke 2015. The effect of river restoration on fish, macroinvertebrates and aquatic macrophytes: A meta-analysis. – *Ecological Indicators*, vol. 58, pp. 311–321.

Kalff, J. 2002. *Limnology*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

Kalkman, V. J., V. Clausnitzer, K.-D. B. Dijkstra, A. G. Orr, D. R. Paulson, J. van Tol 2008. Global diversity of dragonflies (Odonata) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 351–363.

Karofeld, E., K. Vellak, L. Marmor, J. Paal 2007. Aluselise õhusaaste mõjust Kirde-Eesti rabadele. – *Metsanduslikud uurimused*, nr 47, lk 47–70.

Karus, K., T. Feldmann, P. Nõges, P. Zingel 2014. Ciliate communities of a large shallow lake: Association with macrophyte beds. – *European Journal of Protistology*, vol. 50, pp. 382–394.

Kirk, J. T. O. 2010. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. Cambridge: Cambridge University Press.

Klapper, H. 2003. Technologies for lake restoration. – *Journal of Limnology*, vol. 62, no. 1 (Suppl.), pp. 73–90.

Kodres, J. 1920. *Kalakasvatus tiikides*. Tallinn: Agronoom.

*Koiva vesikonna veemajanduskava*. 2010. Tallinn: Keskkonnaministeeium.

Kondolf, G. M., Y. Gao, G. W. Annandale, G. L. Morris, E. Jiang, J. Zhang, Y. Cao, P. Carling, K. Fu, Q. Guo, R. Hotchkiss, C. Peteuil, T. Sumi, H.-W. Wang, Z. Wang, Z. Wei, B. Wu, C. Wu, C. T. Yang 2014. Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. – *Earth's Future*, vol. 2, pp. 256–280.

Kosk, A. (koost.) 2016. *Mere ja siseveekogude ökosüsteemi teenuste määramise ja kaardistamise metodoloogia väljatöötamine*. Tartu: Peipsi Koostöö Keskus.

Kull, T. (koost.) 2005. *Invasiivsed võõrliigid Eestis*. Tallinn: Keskkonnaministeerium.

Laarmaa R., I. Ott, H. Timm, K. Maileht, M. Sepp, H. Mäemets, A. Palm, T. Krause, K. Saar 2019. *Eesti järved*. Tallinn: Varrak.

Lampert, W., U. Sommer 2007. *Limnoecology. The Ecology of Lakes and Streams*. Second Edition. Oxford: Oxford University Press.

Laugaste, R., T. Nõges, P. Nõges, V. V. Jastremskij, A. Milius, I. Ott 2001. Algae. – E. Pihu, J. Haberman (eds.). *Lake Peipsi. Flora and Fauna*. Tartu: Sulemees Publishers, pp. 31–49.

Leht, M. (toim.) 2010. *Eesti taimede määraja*. Tartu: EMÜ – Eesti Loodusfoto.

Lévêque, C., T. Oberdorff, D. Paugy, M. L. J. Stiassny, P. A. Tedesco 2008. Global diversity of fish (Pisces) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 545–567.

Lewis, W. M. Jr. 1983. A revised classification of lakes based on mixing. – *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 40, pp. 1779–1787.

Likens, G. E. 1972. Eutrophication and aquatic ecosystems. – *Nutrient and Eutrophication: The Limiting-Nutrient Controversy.* Proceedings of the Symposium on Nutrients and Eutrophication: The Limiting-Nutrient Controversy. Vol. 1. Lawrence: American Society of Limnology and Oceanography, pp. 3–13.

Likens, G. E. 1992. *The Ecosystem Approach: Its Use and Abuse*. (Excellence in Ecology, Book 3.) Oldendorf/Luhe: Ecology Institute.

Likens, G. E. (ed.) 2009. *Encyclopedia of Inland Waters*. Oxford: Elsevier.

Likens, G. E. 2010. *Lake Ecosystem Ecology: A Global Perspective*. Amsterdam – Boston: Elsevier/Academic Press.

Loopmann, A. 1979. *Eesti NSV jõgede nimestik*. Tallinn: Valgus.

*Lääne-Eesti vesikonna veemajanduskava*. 2010. Tallinn: Keskkonnaministeerium.

Löhr, A. J., T. A. Bogaard, A. Heikens, M. R. Hendriks, S. Sumarti, M. J. van Bergen 2005. Natural pollution caused by the extremely acid crater lake Kawah Ijen, East Java, Indonesia. – *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 12, no. 2, pp. 89–95.

Maastik, A., J. Kajander, P. Heinonen, V. Hyvärinen, K. Karttunen, M.-L. Kosola, H. Ots, P. Seuna 2004. *EnDic 2004. Ympäristösanakirja. Keskkonnasõnaraamat. Environmental dictionary. Dictionnaire de l'environnement. Umweltwörterbuch. Miljöordbok. Vides vardnica. Aplinkos apsaugos žodynas. Экологический словарь*. Helsinki – Tartu: Finnish Environment Institute (SYKE); Tallinn: Mats.

MacArthur, R. H., E. O. Wilson 1967. *The Theory of Island Biogeography*. Princeton: Princeton University Press.

Madigan, M. T., J. M. Martinko, D. A. Stahl, D. P. Clarck 2012. *Brock Biology of Microorganisms*. Thirteenth edition. San Francisco: Benjamin Cummings.

Magnuson, J. J., D. M. Robertson, B. J. Benson, R. H. Wynne, D. M. Livingstone, T. Arai, R. A. Assel, R. G. Barry, V. Card, E. Kuusisto, N. G. Granin, T. D. Prowse, K. M. Stewart, V. S. Vuglinski 2000. Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere. – *Science*, vol. 289, pp. 1743–1746.

Manahan, S. E. 2005. *Environmental Chemistry*. Eighth edition. Boca Raton: CRC Press.

Manconi, R., R. Pronzato 2008. Global diversity of sponges (Porifera: Spongillina) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 27–33.

Martens, K., I. Schön, C. Meisch, D. J. Horne 2008. Global diversity of ostracods (Ostracoda, Crustacea) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 185–193.

Martin, P., E. Martinez-Ansemil, A. Pinder, T. Timm, M. J. Wetzel 2008. Global diversity of oligochaetous clitellates („Oligochaeta"; Clitellata) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 117–127.

Martin, S. 2008. Global diversity of crocodiles (Crocodilia, Reptilia) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 587–591.

Masing, V. (koost.) 1992. *Ökoloogialeksikon. Loodusteaduslik oskussõnasik*. Tallinn: Entsüklopeediakirjastus.

Massard, J. A., G. Geimer 2008. Global diversity of bryozoans (Bryozoa or Ectoprocta) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 93–99.

Maucha, R. 1932. *Hydrochemische Metoden in der Limnologie*. (Die Binnengewässer, Bd. 12.) Stuttgart: Schweizerbart.

Mellin, L. A. von 1798. *Atlas von Liefland oder von den beyden Gouvernementen u. Herzogthümern Lief- und Ehstland und der Provinz Oesel*. Riga und Leipzig: bey Johann Friedrich Hartknoch.

Mey, W., W. Speidel 2008. Global diversity of butterflies (Lepidoptera) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595; pp. 521–528.

Mikelsaar, N. 1984. *Eesti NSV kalad*. Tallinn: Valgus.

Millennium Ecosystem Assessment 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and Water. Synthesis*. Washington, DC: Island Press.

Miyagawa, T., H. Koteishi, Y. Kamimura, Y. Miyanaga, K. Takeshita, A. Nakagawa, M. Ueda 2018. Structural basis of Gip1 for cytosolic sequestration of G protein in wide-range chemotaxis. – *Nature Communications* 9, 4635; https://doi.org/10.1038/s41467-018-07035-x.

Moor, F. C. de, V. D. Ivanov 2008. Global diversity of caddisflies (Trichoptera: Insecta) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 393–407.

Moore, P. D. 2008. *Wetlands: Revised Edition*. (Ecosystem.) New York: Facts on File.

Moss, B. 2010. *Ecology of Freshwaters. A View for the Twenty-first Century.* Fourth edition. Oxford: Wiley – Blackwell.

Moss, B., D. Stephen, C. Alvarez, E. Bécares, W. van de Bund, S. E. Collings, E. van Donk, E. de Eyto, T. Feldmann, C. Fernández-Aláez, M. Fernández-Aláez, R. J. M. Franken, F. García-Criado, E. Gross, M. Gyllström, L.-A. Hansson, K. Irvine, A. Järvalt, J.-P. Jenssen, E. Jeppesen, T. Kairesalo, R. Kornijow, T. Krause, H. Künnap, A. Laas, E. Lill, B. Lorents, H. Luup, M. R. Miracle, P. Nõges, T. Nõges, M. Nykänen, I. Ott, W. Peczula, E. T. H. M. Peeters, G. Phillips, S. Romo, V. Russell, J. Salujõe, M. Scheffer, K. Siewertsen, H. Smal, C. Tesch, H. Timm, L. Tuvikene, I. Tõnno, E. Vicente, T. Virro, D. Wilson 2003. The determination of ecological quality in shallow lakes – a tested system (ECOFRAME) for implementation of the European Water Framework Directive. – *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, vol. 13, pp. 507–549.

Mäemets, A. (toim.) 1968. *Eesti järved*. Tallinn: Valgus.

Mäemets, A. 1974. On Estonian lake types and main trends of their evolution. – E. Kumari (ed.). *Estonian Wetlands and Their Life*. Tallinn: Academy of Sciences of the Estonian S.S.R., pp. 29–62.

Mäemets, A. 1976. Lake types as basis for the limnological division of the Estonian S.S.R. – *Estonia. Regional Studies*. Tallinn: Academy of Sciences of the Estonian S.S.R., pp. 63–71.

Mäemets, A. 1977. *Eesti NSV järved ja nende kaitse*. Tallinn: Valgus.

Mölder, K. 1943. Die regionale Verteilung der Seetypen in Estland. – *Archiv für Hydrobiologie*, Bd. 39, Nr. 3, S. 403–414.

Newbold, J. D. 1992. Cycles and spirals of nutrients. – P. Calow, G. E. Petts (eds.). *The Rivers Handbook: Hydrological and Ecological Principles*. Volume 1. Oxford, UK: Blackwell Scientific Publishing, pp. 379–408.

Nõges, P., T. Nõges 2012. Võrtsjärv Lake in Estonia. – L. Bengtsson, R. W. Herschy, R. W. Fairbridge (eds.). *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs*. (Encyclopedia of earth sciences series.) Dordrecht – London: Springer, pp. 850–861.

Nõges, T., J. Haberman, A. Kangur, K. Kangur, P. Kangur, H. Künnap, H. Timm, P. Zingel, P. Nõges 2004. Food webs in Lake Võrtsjärv. – J. Haberman, E. Pihu, A. Raukas (eds.). *Lake Võrtsjärv*. Tallinn: Estonian Encyclopaedia Publishers, pp. 335–345.

Nõges, T., K. Kangro 2005. Primary production of phytoplankton in a strongly stratified temperate lake. – *Hydrobiologia*, vol. 547, pp. 105–122.

Ojaveer, H., L. Eek, J. Kotta (koost.) 2011. *Vee võõrliikide käsiraamat*. Tallinn: Keskkonnaministeerium.

Oki, T., S. Kanae 2006. Global hydrological cycles and world water resources. – *Science*, vol. 313, pp. 1068–1072.

O'Sullivan, P. E., C. S. Reynolds (eds.) 2004. *The Lakes Handbook*. Volume 1. *Limnology and Limnetic Ecology*. Oxford: Blackwell Publishing.

O'Sullivan, P. E., C. S. Reynolds (eds.) 2005. *The Lakes Handbook*. Volume 2. *Lake Restoration and Rehabilitation*. Oxford: Blackwell Publishing.

Ott, I., T. Kõiv 1999. *Eesti väikejärvede eripära ja muutused. Estonian small lakes: Special features and changes*. Tallinn – Tartu: EV Keskkonnaministeeriumi info- ja tehnokeskus – Eesti Teaduste Akadeemia – Eesti Põllumajandusülikooli zooloogia ja botaanika instituut.

Ott, I., K. Lotman, M. Kose 2012. Rannikulõugaste majandamise ja kaitse korraldamine. – M. Kose (toim.). *Rannikulõukad Eestis ja Läänemere keskosas. Arengulugu, geoloogia ja hüdroloogia, elustik ning looduskaitseline väärtus.* Tartu: Tartu Ülikooli Pärnu Kolledž – Keskkonnaamet – Eesti Maaülikool, lk 112–118.

Ott, I., T. Pedusaar, A. Järvalt 2006. Järvede tervendamine ja biomanipulatsioon. – *Eesti Loodusuurijate Seltsi aastaraamat*, 83. köide, lk 47–69.

Pastak, E. 1936. Võrtsjärve idaranniku taimkattest. – *Eesti Loodus*, nr 4, lk 137–140.

Pauwels, O. S. G., V. Wallach, P. David 2008. Global diversity of snakes (Serpentes; Reptilia) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 599–605.

Pihu, E. (toim.) 1979. *Loomade elu*. 4. köide. *Kalad*. Tallinn: Valgus.

Pihu, E., A. Raukas (toim.) 1999. *Peipsi*. Tallinn: Keskkonnaministeeriumi info- ja tehnokeskus.

Pinnaveekogumite moodustamise kord ja nende pinnaveekogumite nimestik, mille seisundiklass tuleb määrata, pinnaveekogumite seisundiklassid ja seisundiklassidele vastavad kvaliteedinäitajate väärtused ning seisundiklasside määramise kord. 2010. RT I, 25.11.2010, 15; https://www.riigiteataja.ee/akt/125112010015.

Poikāne, S., R. Portielje, M. van den Berg, G. Phillips, S. Brucet, L. Carvalho, U. Mischke, I. Ott, H. Soszka, J. Van Wichelen 2014. Defining ecologically relevant water quality targets for lakes in Europe. – *Journal of Applied Ecology*, vol. 51, no. 3, pp. 592–602.

Poinar, G. 2008. Global diversity of hairworms (Nematomorpha: Gordiaceae) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 79–83.

Polhemus, J. T., D. A. Polhemus 2008. Global diversity of true bugs (Heteroptera; Insecta) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 379–391.

Poly, W. J. 2008. Global diversity of fishlice (Crustacea: Branchiura: Argulidae) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 209–212.

Poots, L. (toim.) 1987. *Loomade elu*. 7. köide. *Imetajad*. Tallinn: Valgus.

Poppe, M., J. Kail, J. Aroviita, M. Stelmaszczyk, M. Gielczewski, S. Muhar 2016. Assessing restoration effects on hydromorphology in European mid-sized rivers by key hydromorphological parameters. – *Hydrobiologia*, vol. 769, pp. 21–40.

Porter, M. L., K. Meland, W. Price 2008. Global diversity of mysids (Crustacea-Mysida) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 213–218.

Prepas, E. E., B. Pinel-Alloul, P. Chambers, T. P. Murphy, S. Reedyk, G. Sandland, M. Serediak 2001. Lime treatment and its effect on the chemistry and biota of hardwater eutrophic lakes. – *Freshwater Biology*, vol. 46, pp. 1049–1060.

Redfield, A. C. 1958. The biological control of chemical factors in the environment. – *American Scientist*, vol. 46, no. 3, pp. 205–221.

Reinvaldt, E. 1930. Bemerkungen zur Fischfauna Estlands. – *Tartu Ülikooli juures oleva Loodusuurijate Seltsi aruanded*, 37. kd, nr 3–4, lk 233–235. Tartu: Tartu Ülikooli juures oleva Loodusuurijate Seltsi kirjastus – Krüger.

Reinvaldt, E. 1941. Märkmeid kalade paigutamisest Eesti NSV ala veekogudesse. – *Tartu R. Ülikooli juures oleva Loodusuurijate Seltsi Aruanded*, 47. kd, nr 1–2, lk 41–48. Tartu: Teaduslik Kirjandus.

Reoveesette põllumajanduses, haljastuses ja rekultiveerimisel kasutamise nõuded. 2019. RT I, 22.02.2019, 37; https://www.riigiteataja.ee/akt/129112017006?leiaKehtiv.

Riedel-Lehrke, M. 1997. *Biomanipulation: Food Web Management of Lake Ecosystems. Restoration and Reclamation Review*. Minneapolis: University of Minnesota Press.

Riikoja, H. 1930. Zur Morphometrie einiger Seen Eestis. – *Tartu Ülikooli juures oleva Loodusuurijate Seltsi aruanded*, 37. kd, nr 1–2, lk 1–89. Tartu: Tartu Ülikooli juures oleva Loodusuurijate Seltsi kirjastus – Krüger.

Riikoja, H. 1934. Eesti järvede nimestik. – *Tartu Ülikooli juures oleva Loodusuurijate Seltsi aruanded*, 41. kd, nr 1–2, lk 1–192. Tartu: Tartu Ülikooli juures oleva Loodusuurijate Seltsi kirjastus.

Riikoja, H. 1937. Zur Morphometrie einiger Seen Eestis. II. – *Tartu Ülikooli juures oleva Loodusuurijate Seltsi aruanded*, 43. kd, nr 1–2, lk 139–196. Tartu.

Riikoja, H. 1940. Zur Kenntnis einiger Seen Ost-Eestis, insbesondere ihrer Wasserchemie. – *Eesti Teaduste Akadeemia juures oleva Loodusuurijate Seltsi Aruanded*, 46. kd, lk 168–328. Tartu.

Ripl, W. 1994. Sediment treatment. – M. Eiseltová (ed.). *Restoration of Lake Ecosystems: A Holistic Approach. A training handbook*. IWRB publication 32. Slimbridge, UK: International Waterfowl and Wetlands Research Bureau, pp. 75–81.

Roth, R. A. 2009. *Freshwater Aquatic Biomes*. London: Greenwood Press.

Rueda, L. M. 2008. Global diversity of mosquitoes (Insecta: Diptera: Culicidae) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 477–487.

Russi, D., P. ten Brink, A. Farmer, T. Badura, D. Coates, J. Förster, R. Kumar, N. Davidson 2013. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity for Water and Wetlands*. London – Brussels: IEEP; Gland: Ramsar Secretariat.

Sall, M., M. Uustal, K. Peterson 2012. *Ökosüsteemiteenused. Ülevaade looduse pakutavatest hüvedest ja nende rahalisest väärtusest*. Tallinn: Säästva Eesti Instituut – Stockholmi Keskkonnainstituudi Tallinna Keskus.

Scharf, W. 2007. Biomanipulation as a useful water quality management tool in deep stratifying reservoirs. – *Hydrobiologia*, vol. 583, pp. 21–42.

Schatz, H., V. Behan-Pelletier 2008. Global diversity of oribatids (Oribatida: Acari: Arachnida). – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 323–328.

Scheffer, M. 1998. *Ecology of Shallow Lakes*. London: Chapman & Hall.

Schindler, D. 1974. Eutrophication and recovery in experimental lakes: Implications for lake management. – *Science*, vol. 184, no. 4139, pp. 897–899.

Schneider, G. 1908. Der Obersee bei Reval. – *Archiv für Biontologie*, Bd. 2, H. 1, S. 1–192. Berlin: In Kommission bei R. Friedländer & Sohn.

Schockaert, E. R., M. Hooge, R. Sluys, S. Schiloling, S. Tyler, T. Artois 2008. Global diversity of free living flatworms (Platyhelminthes, „Turbellaria") in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 41–48.

Segers, H. 2008. Global diversity of rotifers (Rotifera) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 49–59.

Sigee, D. C. 2006. *Freshwater Microbiology*. Chichester: John Wiley & Sons.

Simm, H. 1975. *Eesti pinnavete hüdrokeemia*. Tallinn: Valgus.

Sivers, G. von 1854. Die Flussfahrt auf dem Embach, von dessen Ausfluss aus dem Wirzjärv, bis Dorpat. – *Archiv für die Naturkunde Liv-, Ehst- und Kurlands*, Serie I, Bd. 1, S. 353–366. Dorpat.

Sket, B., P. Trontelj 2008. Global diversity of leeches (Hirudinea) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 129–137.

Snoeyink, V. L., J. Jenkins 1980. *Water Chemistry*. New York: Wiley-Interscience.

Søndergaard, M., E. Jeppesen, T. L. Lauridsen, C. Skov, E. H. van Nes, R. Roijackers, E. Lammens, R. Portielje 2007. Lake restoration: Successes, failures and long-term effects. – *Journal of Applied Ecology*, vol. 44, no. 6, pp. 1095–1105.

Søndergaard, M., K. D. Wolter, W. Ripl 2002. Chemical treatment of water and sediments with special reference to lakes. – M. R. Perrow, A. J. Davy (eds.). *Handbook of Ecological Restoration*. Volume 2. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 184–205.

Strøm, K. M. 1931. Feforvatn: A physiographic and biological study of a mountain lake. – *Archiv für Hydrobiologie*, Bd. 22, S. 491–536.

Strong, E. E., O. Gargominy, W. F. Ponder, P. Bouchet 2008. Global diversity of gastropods (Gastropoda; Mollusca) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 149–166.

Stumm, W. 2004. Chemical processes regulating the composition of lake waters. – P. E. O'Sullivan, C. S. Reynolds (eds.). *The Lakes Handbook*. Volume 1. *Limnology and Limnetic Ecology*. Oxford: Blackwell Publishing, pp. 79–106.

Stumm, W., J. J. Morgan 1996. *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*. Third edition. New York: John Wiley & Sons.

Sumi, T., T. Hirose 2009. Accumulation of sediment in reservoirs. – Y. Takahasi (ed.). *Water Storage, Transportation and Distribution. Encyclopedia of Water Sciences, Engineering and Technology Resources*. Paris: Eolss Publishers, pp. 224–252.

Sundberg, P., R. Gibson 2008. Global diversity of nemerteans (Nemertea) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 61–66.

Sweeney, B. W., J. M. Battle, J. K. Jackson, T. Dapkey 2011. Can DNA barcodes of stream macroinvertebrates improve descriptions of community structure and water quality? – *Journal of the North American Benthological Society*, vol. 30, no. 1, pp. 195–216.

Zingel, P., H. Agasild, T. Nõges, V. Kisand 2007. Ciliates are the dominant grazers on pico- and nanoplankton in a shallow, naturally highly eutrophic lake. – *Microbial Ecology*, vol. 53, pp. 134–142.

Tammert, H., V. Kisand, T. Nõges 2005. Bacterioplankton abundance and activity in a small hypertrophic stratified lake. – *Hydrobiologia*, vol. 547, pp. 83–90.

Tamre, R. (koost.) 2006. *Eesti järvede nimestik: looduslikud ja tehisjärved*. Tallinn: Keskkonnaministeeriumi info- ja tehnokeskus.

TEEB 2008. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity. An Interim Report*. European Communities, Brussels.

Thienemann, A. F. 1920. Biologische Seetypen und die Gründung einer hydrobiologischen Anstalt am Bodensee. – *Archiv für Hydrobiologie*, Bd. 13, S. 347–370.

Thienemann, A. F. 1928. *Der Sauerstoff im eutrophen und oligotrophen See: Ein Beitrag zur Seetypenlehre*. (Die Binnengewässer, Bd. 4.) Stuttgart: Schweizerbart.

Timm, H. 1990. Peipsi järve makrozoobentose produktsioon. Dissertatsioon bioloogiakandidaadi kraadi saamiseks (vene k). ENSV TA zooloogia ja botaanika instituut. Käsikiri.

Timm, H. 2015. *Eesti sisevete suurselgrootute määraja. Identification guide to freshwater macroinvertebrates of Estonia*. Tartu: Eesti Maaülikool.

Timm, H., R. Järvekülg, P. Pall, S. Vilbaste 2019. *Eesti jõed*. Tallinn: Varrak.

Timm, T. (toim.) 1973. *Võrtsjärv*. Tallinn: Valgus.

Timm, T. 2014. *Eesti sisevete hüdrobioloogia ajaloost*. (Teaduse ajaloo lehekülgi Eestist, XIV.) Tartu: Eesti Looduseuurijate Selts.

Tockner, K., U. Uehlinger, C. T. Robinson (eds.) 2009. *Rivers of Europe*. London: Elsevier.

Tyler, P. A., W. G. Vyverman 1995. The microbial market place – trade-offs at the chemocline of meromictic lakes. – *Progress in Phycological Research*, vol. 11, pp. 325–370.

Valk, U. (koost.) 1988. *Eesti sood*. Tallinn: Valgus.

Vannote, R. L., G. W. Minshall, K. W. Cummins, J. R. Sedell, C. E. Cushing 1980. The river continuum concept. – *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 37, no. 1, pp. 130–137.

*Veepoliitika: raamdirektiiv. Euroopa Parlamendi ja Euroopa Liidu Nõukogu direktiiv 2000/60/EÜ*. 2002. Tallinn: Keskkonnaministeerium.

Veldre, I. (toim.) 1985. *Loomade elu*. 5. köide. *Kahepaiksed ja roomajad*. Tallinn: Valgus.

Vences, M., J. Köhler 2008. Global diversity of amphibians (Amphibia) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 569–580.

Verdonschot, R. C. M., J. Kail, B. G. McKie, P. F. M. Verdonschot 2016. The role of benthic microhabitats in determining the effects of hydromorphological river restoration on macroinvertebrates. – *Hydrobiologia*, vol. 769, pp. 55–66.

Verner, B. 1994. Aeration. – M. Eiseltová (ed.). *Restoration of Lake Ecosystems: A Holistic Approach. A training handbook*. IWRB publication 32. Slimbridge, UK: International Waterfowl and Wetlands Research Bureau, pp. 69–75.

Veron, G., B. D. Patterson, R. Reeves 2008. Global diversity of mammals (Mammalia) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 607–617.

Verpoorter, C., T. Kutser, D. A. Seekell, L. J. Tranvik 2014. A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery. – *Geophysical Research Letters*, vol. 41, no. 18, pp. 6396–6402; doi:10.1002/2014GL060641.

Vighi, M., G. Chiaudani 1985. A simple method to estimate lake phosphorus concentrations resulting from natural background loadings. – *Water Research*, vol. 19, pp. 987–991.

Vilbaste, S., A. Järvalt, K. Kalpus, T. Nõges, P. Pall, K. Piirsoo, L. Tuvikene, P. Nõges 2016. Ecosystem services of Lake Võrtsjärv under multiple stress: a case study. – *Hydrobiologia*, vol. 780, pp.145–159.

Voore, V. 1939. Kalaparasiitidest ja nende esinemisest Eestis. – R. Voore, V. Voore. *Peipsi rääbisest. Kalaparasiitidest ja nende esinemisest Eestis*. (Kalanduskoja toimetised, 8.) Tallinn: Kalanduskoda, lk 11–29.

Väinölä, R., J. D. S. Witt, M. Grabowski, J. H. Bradbury, K. Jazdzewski, B. Sket 2008. Global diversity of amphipods (Amphipoda; Crustacea) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 241–255.

Waters, T. F. 1977. Secondary production in inland waters. – *Advances in Ecological Research*, vol. 10, pp. 91–164.

Welch, E. B., T. Lindell 1992. *Ecological Effects of Wastewater: Applied Limnology and Pollution Effects*. London – New York: E & FN Spon.

Wetzel, R. G. 2001. *Limnology: Lake and River Ecosystems*. San Diego: Academic Press.

Wetzel, R. G., G. E. Likens 2000. *Limnological Analyse*s. Third edition. New York: Springer.

White, P. S., J. L. Walker 1997. Approximating nature's variation: Selecting and using reference inforamtion in restoration ecology. – *Restoration Ecology,* vol. 5, no. 4, pp. 338–349.

Williams, W. D. 1993. The conservation of salt lakes. – *Hydrobiologia*, vol. 267, pp. 291–306.

Wilson, G. D. F. 2008. Global diversity of Isopod crustaceans (Crustacea; Isopoda) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 231–240.

Woolsey, S., F. Capelli, T. Gonser, E. Hoehn, M. Hostmann, B. Junker, A. Paetzold, C. Roulier, S. Schweizer, S. D. Tiegs, K. Tockner, C. Weber, A. Peter 2007. A strategy to assess river restoration success. – *Freshwater Biology*, vol. 52, pp. 752–769.

Yeo, D. C. J., P. K. L. Ng, N. Cumberlidge, C. Magalhães, S. R. Daniels, M. R. Campos 2008. Global diversity of crabs (Crustacea: Decapoda: Brachyura) in freshwater. – *Hydrobiologia*, vol. 595, pp. 275–286.

# Märksõnaregister


2,4-diklorofenoksüäädikhape ehk 2,4-D 315

## A

abiootiline 204
abiootilised teenused 289
absoluutne suremus 270
absoluutne viljakus 269
adsorptsioonikoefitsient 100
advektiivsed hoovused 92
aerosoolid 118
afootiline kiht 75
ajutised ehk temporaarsed veekogud 35, 201
akaal 202
akeniidid 218
aktiivne liikumine (liikide) 266
aktsepteerimisvalmiduse ehk loobumistasu meetod 291
akumulatiivterrassid 43
akumulatsioon järvedes 183
alalised ehk permanentsed veekogud 35
alamjooks 197
alanev mõjuahel 261
alarmaine 258
algitsiidid 314
alkalitroofsed ehk lubjatoitelised järved 172
allelopaatiline konkurents 265
Alleni paradoks 276
allikad 202
allohtoonne orgaaniline aine 153, 254
allotroofia 183
allotroofsed järved 184
alumiiniumiühendid 308
aluselisus 140
amensalism 252, 267
amfibiondid 204
amiktilised järved 84
ammonifikatsioon 146
ammooniumlämmastik 146
anabioos 270
anammoks 110
anoksiline keskkond 101
anoksügeensed fotosünteesijad 276
anorgaanilised algitsiidid 314
anorgaanilised lämmastikuühendid 146
areaal ehk levila 215
areaalne hapniku defitsiit 109
argillaal 202
argoon 99
arhede produktsioon 276
arvukus 269
asenduskulude meetod 291
assimilatsioon 271
asurkond ehk populatsioon 269
asurkonna kasv 270
asustustihedus 269
asümmeetriline konkurents 265
asümptootiline kasv 270
atmosfäär 117
atsidotroofsed järved 170
aurumine 32
autohtoonne orgaaniline aine 153, 254
autoionisatsioon 131
autotroofia 183
autotroofid ehk tootjad ehk produtsendid 260
autotroofsed järved 183
avavesi 196

## B, C

bakterbentos 209
bakterite produktsioon 276
bakterplankton 204, 205
Balti ökopiirkond 177, 295, 298
batümeetriline ehk hüpsograafiline kõver 62
batümeetriline kaart 58
Beeri seadus 71
bentaal 195, 196, 209
bentaali eluvormid 209
BENTOPHOS 313
bentos 209
biofilm 209
biokeemiline hapnikutarve (BHT) 159
bioloogiline järveteke 57
„bioloogiline reostus" 266
bioloogiline tõrje 305
biomanipulatsioon 261, 305, 319, 337
biomanipulatsioon Ülemiste järves 323
biomanipulatsiooni meetodid 320
biomass 269
biomassi eemaldamine 305
biootiline 204
biotoobid ehk elupaigad 35, 193
biotsönoos ehk kooslus 252
Bouguer-Lamberti seadus 71
brutoproduktsioon ehk assimilatsioon 271
Coriolisi jõud 90

## D

delta 46
Denili kalapääs 334
denitrifikatsioon 147
denudatsioon ehk kulutus 39
DEPOX 305
detergent 28
detriitne toiduahel 158
detrivoorid 256
diatomiid 161
dikromaatne hapnikutarve ($KHT_{Cr}$) 159
dikvaat 316
dimiktilised järved 85
dpsir-raamistik 290
dünaamilised ioonid 115
düstroofsed ehk huumustoitelised järved 170
düü 161

## E

Eesti jõgede tüübid 177
Eesti järvede tüübid VRD järgi 176
Eesti siseveekogude hapnikutingimused 109
Eesti vesikondade pinnaveekogumid 281
efektiivne kiirgus 80
Ekmani spiraal 92
eksoreilised jõed 35
ekstinktsioon ehk valguse vertikaalne nõrgenemine 71
ektogeenne meromiksia 86
elektrijuhtivus 192
elektrokeemiline hapnikuandur 103
elektromagnetkiirgus 67
elektromagnetlained 67
elupaigad ehk biotoobid 35, 193
elupaigad sisevetes 194
elustiku fülogeneetiline jaotus 223
elustiku mürgitamine 305
eluvormid 204
enamusioonid 115, 122
endeemid 215
endobentos 210
endogeenne meromiksia 88
endoreilised jõed 35
endotaal 315
energiasisaldus 269
epibentos 210
epifüüton 212
epilimnion 82, 196
epineuston 209
epipelon 212
epipsammon 212
erosioonibaas 39
erosiooniterrassid 43
esmas- ehk primaarproduktsioon 75, 271
estuaar ehk lehtersuue 47
eufootiline kiht 75
eufootilise kihi paksus 75
eurübiondid 204
eutrofeerumine 283
eutroofsed ehk rohketoitelised järved 167, 171

## F

fenoolsed ühendid 159
filtreerijad ehk kurnajad 255
flokulatsioon ehk helvestumine 157
fluridoon 315
Foreli-Ule skaala 73
fosfaatne fosfor 149
fosfor 148
fosfor hüpolimnionis 151
fosfori
— allikad 149
— sisekoormus 162
— vabanemine poorivette 163
fosforiringe 150
fosforiringe epilimnionis 150
fosforiringe madalate järvede pelagiaalis 150
fotoautotroofid 276
fotoheterotroofid 276
fotosüntees 74
fotosüntees vees 75
fotosünteesi
— valgusinhibitsiooni piirkond 76
— valgusküllastuse piirkond 76
— valguslimitatsiooni piirkond 76
— valgussõltuvus 76
fotosünteetiliselt aktiivse kiirguse piirkond 67
fotosüsteem I 74
fotosüsteem II 74
fulvohapped 154
fütaal 202
fütobentos 209
fütofiilid 213
fütoplankton 204, 205
fütoplanktoni produktsioon 271

## G

gaasid 99
gaaside lahustuvus 99
gaasilised õhusaastajad 118
generalistid ehk r-strateegid 264
glatsiaalse ehk liustikulise tekkega järved 53
gleistumine 121
glüfosaat 315
gradienthoovused 92
grupiline jaotumus 252

## H

haistmine vees 192
hajunud kiirgus 68
hajus- ehk difuusse õhustuse meetod 306
halotroofsed ehk soolatoitelised järved 174
hapestumine 134
hapnik 24, 100
hapnik seisuveekogudes 104
hapnik vooluveekogudes 104
hapniku
— absoluutne defitsiit 108
— absoluutne küllastusaste 102
— aktuaalne defitsiit 108
— allikad 101
— defitsiit 108
— lahustumine vees 100
— normaalkontsentratsioon 102
— suhteline defitsiit 108
— suhteline küllastusaste 102
— suhteline küllastuskontsentratsioon 102
— tarbijad 101
hapnikuandurid 102
hapnikumeetod 272
hapnikupuudus ehk ummuksisse jäämine 107
hapnikusisalduse hindamine 102
hapnikusisalduse mõju kaladele 101
hapnikutarve 159
happeline depositsioon ehk happeline sadestumine 134
happevihm 134
harujõed 194
hedonistlike hindade meetod 291
helvestumine ehk flokulatsioon 157
herbitsiidid 315
herbivoorid 256
heterotoopsed organismid 204
heterotroofid 260
heterotsüstid 218
holomiktilised järved 84
holoplankton 204
homotermia 82, 83
hooldamine (veekogu h.) 302
hoovused 90, 92
humiinained 154, 160, 296
humiinhapped 154
humiinid 154
huumustoitelised ehk düstroofsed järved 170
hõljum ehk plankton 204
hüdratatsioon 121
hüdriidid 24
hüdrofiilsed ained 29
hüdrofoobsed ained 29
hüdrograaf 98
hüdroloogia 18
hüdroloogiline režiim 295
hüdroloogiline tsükkel ehk veeringe 32
hüdrolüüs 120
hügropetraal 202
hüpertroofsed ehk liigtoitelised järved 167, 172
hüpolimnion 82, 196
hüpolimnioni aereerimise meetod 307
hüponeuston 209
hüporeaal 200
hüppekiht ehk metalimnion 196
hüpsograafiline ehk batümeetriline kõver 62
HYPOX-meetod 307

## I

Ida-Eesti vesikond 48
ilmastik 296
infiltratsioon 33
inimtekkelised veekogud 35
insener-tehnilised meetodid 305
interstitsiaal 202
interstitsiaalsed organismid 213
invasiivsed liigid 329–331, 337
ioonhüdraat 30
ioonide suhteline vahekord 115
ioonkoostis (sisevete i.) 115
ioonkoostisel põhinev klassifikatsioon 116
isendite kasv 270
isobaadid 58
isomeetriline kasv 270

## J

juga 44, 199, 202
jõe järk (Strahleri süsteemi järgi) 41, 197
jõe lähe 194
jõe pidevuse teooria 262
jõe suue 46, 194
jõeorg 41
jõestik 35, 194
jõesäng ehk voolusäng 41, 197
jõesängi pikiprofiil 41
jõesängi ristprofiil 41
jõetekkelised järved 55
jõgede seisund Euroopas 300
jõgi 35
jõgikond 40
jäme lagunenud orgaaniline aine (CPOM) 254
järv 35
järve
— energiabilanss 80
— kaldajoone liigendatus 60
— kaldajoone pikkus 60
— keskmine sügavus 61
— kiirgusbilanss 80
— maht 62
— morfoloogia 58
— morfoloogiaindeks 289
— pindala 59
— soojusbilanss 80
— suhteline sügavus 61
— suurim laius 60
— suurim pikkus 60
— suurim sügavus 61
— sügavus 61
— veevahetuse kiirus 62
järvede
— areng Eestis 185
— areng parasvöötmes 184
— ontogenees 181
— paiknemine 38
— segunemistüübid 84
— seisund Euroopas 301
— soojuskihistumine 81
— tekkeviisid 50
— tervendamine 305
— tüpoloogia Eestis 168
järveefekt 59
järvelubi 123, 139, 162
järvemuda ehk jütja 161
järvesetted 161
järvestik 36
järvistu 36
jütja ehk järvemuda 161

## K

kaalium 122
kairomoon 258
kalapääsud 333
kalatrepp 333
kalatõstuk 334
kaldapuhvrid 336
kaldaserv ehk marginaal 199
kaldataimed 210
kaldavall 42
kaldavesi 196
kaltsium 122
kaltsiumiühendid 311
kanalid 194, 284
kanjonorg 45
kannibalism 257
karbonaatne ehk mööduv karedus 124
karbonaatne puhversüsteem 139
karbonaatsed veed 116
karbonaatsed veekogud 116
karnivoorid 257
karstijärved 55
kasv (isendite/asurkonna k.) 270
kasvu ökoloogiline tõhusus 253
kasvukõver 265
keemiline hapnikutarve (KHT) 159
keemiline seisund 281
keemiline setitamine 307
keemilise seisundi kvaliteediklassid 298
kemoautotroofid ehk kemosünteesijad 276
kemoheterotroofid 276
kemokliin 86
kemomanipulatsioon 307
kemosünteesijad ehk kemoautotroofid 276
kergesti lagunev orgaaniline aine 104, 296, 313
keskjooks 197
kesktoitelised ehk mesotroofsed järved 167
kevadine homotermia ehk tsirkulatsioon 82
kihistumine ehk stratifikatsioon 82
kihistumuse kujunemine 82
kihistumuse stabiilsus 82
kinnitunud ehk sessiilne bentos 210
klassifitseerimine 165
klassifitseerimise alused 165
klastrid 25
klinograadne profiil 105
kloriidid 124
kloriidsed veed 116
kloriidsed veekogud 116
koagulandid 308
kogujad 255
kogulooklevus 43
kohtamus 269
Koiva vesikond 48
kommensalism 252, 267
kompensatsioonisügavus 75
kompleksmeetod
— BENTOPHOS 313
— DEPOX 305
— PHOSLOCK 313
— RIPLOX 312

kompleksmeetodid (tervendamise k.) 305
konkurents 264
konservatiivsed ioonid 115
konsumendid 260
kontaktherbitsiidid 315
konvektiivne soojusvahetus atmosfääriga 78
konvektiivsed hoovused 92
kooslus ehk biotsönoos 252
korrapärane jaotumus 252
korrapäratu jaotumus 252
korrastamine (veekogu k.) 302, 303, 324
kosed 44, 199
kosmopoliitsed liigid 215
kraapijad 255
krenaal 199
kreogeenne meromiksia 87
kriitiline sügavus 76
krüon 210
k-strateegid ehk spetsialistid 264
ksülaal 202
kultuuriteenused 288
kulutus ehk denudatsioon 39
kuristikorg ehk lõhangorg 45
kuulmine vees 192
kõrgus merepinnast 296
kõrgvesi 199
kärestik ehk ritraal 44, 199
küljeerosioon 39
külmad
— monomiktilised järved 84
— polümiktilised järved 85

■ L

labiilne lahustunud orgaaniline aine (LDOM) 155
laguahel 260
lagundajad ehk redutsendid 260
lagunenud orgaaniline aine 254
lahkumine kooslusest 267
lahustumata ehk partikulaarne orgaaniline aine (POM) 153, 157
lahustumine 120
lahustunud
— anorgaaniline fosfor (DIP) 148
— mineraalainete päritolu 117
— orgaaniline aine (DOM) 153, 155, 254
— orgaaniline fosfor (DOP) 149
lahustuv reaktiivne fosfor (SRP) 149, 163
laine ajutee 60
laine liikumiskiirus 94
lained 90, 92
laminaarne vool 91
lamm 42, 197, 201
lammorg 45
lang 42, 197
Langmuiri tsirkulatsioon 94
langus 42, 197
latentne ehk varjatud soojus 79
laugas 36
laugastik 36
laugveer 43
leetumine 121
lehtersuue ehk estuaar 47
lentilised veekogud 35, 194
leostumine 120, 121
levila ehk areaal 215
Liebigi miinimumiseadus 143
liigierisus 265
liigirikkus 215, 224
liigiteke 267
liigtoitelised ehk hüpertroofsed järved 167, 172
liikide arv sisevetes 216
liikide ja koosluste kaitse 304
liikuv ehk vagiilne bentos 210
limiteeriv toiteaine 143
LIMNO aeraator 307
limnoloogia 18
limnoloogia ajalugu 19
limnoloogia Eestis 20
limnoloogilised valdkonnad Eestis 169
limnoterrestriline elustik 201
linaleotus 88, 161, 282, 283
lisajõgi 194
lisandgaasid 99
litaal 202
litobentos 210
litofiilid 212
litoraal 196
liustikulise ehk glatsiaalse tekkega järved 53
lombid 201
looded 96
loodusdirektiiv 280, 304, 328
looduslikud veekogud 35
looked ehk meandrid 43, 199
looklevustegur 43
lootilised veekogud 35, 194
lubjatoitelised ehk alkalitroofsed järved 172
lõhangorg 45
läbipaistvustoru 72
lämmastik 99, 110, 144
lämmastiku omadused 144
lämmastikuringe 144
lämmastikuühendid Eesti järvedes 147
Lääne-Eesti vesikond 48
lühikesed lained 93
lühikesed pinnalained 93
lühikesed siselained 94

■ M

Maa veevarud 33
maa-alused veekogud 35
maailmameri 35
maalihete toimel tekkinud järved 53
maastumine 284
madalvesi 199
magneesium 124
makrofüüdid ehk suurtaimed 210
makrofüüdijärved ehk suurtaimestikurikkad järved 173
makrofüüdijärvede taastamine, tervendamine, korrastamine 324
makrofüüdijärvede tervendamine (kompleksmeetod) 305
makrozoobentos 212
makrotoiteained 143
maksevalmiduse meetod 291
marginaal ehk kaldaserv 199
Maucha diagramm 115
meandrid ehk looked 43, 199
mediaal 197
meetmenäitajad 290
megazoobentos 212
mehaaniline neelamine 121
meiozoobentos 212
meretekkelised järved 56
meromiksia 86, 87, 88
meromiktilised järved 84, 86
meromiktilised järved Eestis 88
meroplankton 204
mesotroofsed ehk kesktoitelised järved 167
metaan 111
metafosfaadid 148
metalimnion ehk hüppekiht 82, 196
metazooplankton 206
meteoriiditekkelised järved 57
mikroelemendid 115
mikrofütobentos ehk perifüüton 210, 212
mikroobid 204
mikroobne ling 261
mikrozoobentos 212
mikrotoiteained 143
miksolimnion 86
miksotroofia 184
miksotroofsed ehk segatoitelised järved 173
mineraalainete väljauhtumine 121
mineraalne süsinik sisevetes 138
mineraalsuse mõõtmise viisid 116
mittehumiinained 153
mittekarbonaatne ehk püsiv karedus 124
mitteselektiivsed ehk üldhävitavad herbitsiidid 315
moldorg 45
monimolimnion 86
monomiktilised järved 84
monotsükliline sigimine 269
morfoedaafiline indeks 298
mulla
— asendusneelamine 121
— bioloogiline neelamine 121
— füüsikaline neelamine 121
— füüsikalis-keemiline ehk asendusneelamine 121
— keemiline neelamine 121
— neelamisvõime 121
multivoltiinsed liigid 274
murdlaine 94
murenemine 120
mutualism 267
mõjunäitajad 290
märgala 36
märgalade paiknemine 38
mööda viikpääs 333
mööduv ehk karbonaatne karedus 124
mükoplankton 205
mürgised orgaanilised ühendid 159

■ N

naatrium 122
nefelomeetriline hägususühik (NHÜ) 73
negatiivne heterograadne kõver 106
nektobentilised loomad 210
nekton 204, 207
netoproduktsioon 271
neuston 28, 204, 209
nire 201
nišš 252
nitraadid 147
nitrifikatsioon 146
nitritid 147
nugilised ehk parasiidid 259
nägemine vees 192
närijad 255

■ O

ohtrus 269
ohustatud liigid 215
oja 35
oksüdeerumine 120
oksügeensed fotosünteesijad 276
oksümeetrid 102
oligomiktilised järved 85
oligotroofsed ehk vähetoitelised järved 166, 169

optiline hapnikuandur 103
orgaaniline aine 153
orgaaniline lämmastik 147
orgaanilise aine jaotus 153
orgaanilise aine koostis 153
orgaanilise aine tüübid 254
orgaanilise süsiniku koguhulk (TOC) 153, 160
orgaanilised algitsiidid 315
ortofosfaadid 148
ortograadne profiil 105
orulooked ehk orumeandrid 43
osmootne toitumine 255
otsene kiirgus 68

## P

*P*/*B* suhe 271
pagon 210
paisjärved 64
paisutamine 285
Pandivere põhjavee alamvesikond 48
paranduskulude meetod 291
parasiidid ehk nugilised 259
partenogenees 206
partikulaarne anorgaaniline fosfor 149
partikulaarne ehk lahustumata orgaaniline aine (POM) 153, 157
partikulaarne orgaaniline fosfor 149
passiivne liikumine (liikide) 266
peajõgi 35, 194
peen lagunenud orgaaniline aine (FPOM) 254
pelaal 202
pelagiaal 195, 196
pelagiaali eluvormid 195, 204
pelobentos 210
pelofiilid 213
perifüüton ehk mikrofütobentos 210, 212
permanentsed ehk alalised veekogud 35
permanganaatne hapnikutarve ($KHT_{Mn}$) 159
pH ehk vesinikueksponent 131
PHOSLOCK 313
pikad lained 95
pikad seisulained ehk seišid 95
pikiprofiil vt jõesängi pikiprofiil 41
pindkile 196
pindpinevus 28, 191
pinnaseiš 95
pinnaveekogud 35
pinnaveekogumid 281
Piperi diagramm 115
plaatina-koobalti skaala 73
plankter 204
plankton ehk hõljum 204
planktoni paradoks 265
polüfosfaadid 148
polüklooritud difenüülid (PCB) 159, 317
polümiktilised järved 85
polütsükliline sigimine 269
poolhuumustoitelised ehk semidüstroofsed järved 170
poorivee transport 164
poorivesi 163
populatsioon ehk asurkond 269
porsumine 120
positiivne heterograadne kõver 106
potamaal 199
potamoloogia 18
potentsiaalne nišš 252
praktilise soolsuse skaala 113
primaar- ehk esmasproduktsioon 75, 271
primaarne biokeemiline hapnikutarve (BHT) 159
produktsioon 271
produktsiooni ja biomassi suhe (*P*/*B*) 271
produtsendid 260
profundaal 197
protozooplankton 206
psammaal 202
psammobentos 210
psammofiilid 213
purdsetted 161
põhjaerosioon 39
põhjaveekogumid 281
põrkeveer 43, 199
püsiv ehk mittekarbonaatne karedus 124

## R

raba 200
rabenemine 120
radioaktiivse süsiniku meetod 272
rasklagunev lahustunud orgaaniline aine (RDOM) 155
rauaühendid 309
Redfieldi suhe 143
redokspotentsiaal 136
redokspotentsiaal järvedes 137
redokspotentsiaal vooluveekogudes 136
redutsendid ehk lagundajad 260
reguleerivad teenused 288
rehabilitatsioon (veekogu r.) 302
reisikulu meetod 291
rekreatiivne mahutavus 304
reofiilid 212
respiratsioon 253, 271
ressursikonkurent 264
riikkonnad 226
ripaal 197
RIPLOX 305, 312
rip-rap kallas 336
ristprofiil vt jõesängi ristprofiil 41
ritraal ehk kärestik 44, 199
rohketoitelised ehk eutroofsed järved 167, 171
rotenoon 321
r-strateegid ehk generalistid 264
ruumikonkurents 264
räni 152

## S, Z

saarte biogeograafia teooria 194
sademed 32
samasügavusjooned ehk isobaadid 58, 62
sapropeel 161
Secchi ketas 71
segatoitelised ehk miksotroofsed järved 173
seismilised lained ehk tsunamid 96
seisu- ehk lentilised veekogud 35, 194
seisundinäitajad 290
seisuveekogud 35
seisuveekogude soojusvahetus 78
seisuvete bentaal 196
seisuvete elupaigad 196
seisuvete pelagiaal 196
seišid 95
sekundaar- ehk teisproduktsioon 274
sekundaarne biokeemiline hapnikutarve (BHT) 159
selektiivsed herbitsiidid 315
semidüstroofsed ehk poolhuumustoitelised järved 170
semivoltiinsed liigid 274
sessiilne ehk kinnitunud bentos 210
setete eemaldamine 305, 316
setete fosfor 162
setete isoleerimine 305
setete katmine 316, 318
setete koostis 295
setete ladestumine 284
setete poorivesi 163
sette kogunemine 286
settesööjad 255
sigimisrütm 269
sisehõõrdumine ehk viskoossus 28
siseseišid 95
siseveekogud 18, 35
siseveekogude
— lupaigad 193
— jaotus 35
— ontogenees 179
— pH 133
— pH Eestis 135
— tüpoloogiad Eestis 167
sisevete mineraalsus 113
sisevete soolsus 113
solaarkonstant 67
sood 200
soodid ehk vanajõed 43, 199
soojad
— monomiktilised järved 84
— polümiktilised järved 85
soojusmahtuvus 191
soojusvahetus 78
soolajärved 125
soolajärvede
— paiknemine 125
— soolsus 129
— vee ioonkoostis 129
soolatoitelised ehk halotroofsed järved 174
soolsus 113, 192
soostumine 284
spektrofotomeetria 160
spetsialistid ehk k-strateegid 264
stenobiondid 204
Strahleri järgud 41
stratifikatsioon ehk kihistumine 82
stügon 210
sublitoraal 197
suhteline suremus 270
suhteline termiline vastasseis 81
suhteline viljakus 193, 269
sulfaadid 124
sulfaatsed veekogud 116
summaarne kiirgus 68
summaarne soojusbilanss 80
suremus 270
survenäitajad 290
suurselgrootud 212
suurtaimed ehk makrofüüdid ehk makrofütobentos 210
suurtaimestikurikkad järved ehk makrofüüdijärved 173
sälkorg 45
sängi kalde suurus 42
sängilooked ehk sängimeandrid 43
sängorg 45
sügavuskaardid 58
sügavuskaartide koostamine 61

sügisene homotermia ehk tsirkulatsioon 83
sündimus 269
süsihappegaas 138
süsteemsed herbitsiidid 315
süvakerge 144
zoobentos 209, 212
zooplankton 204

## T

taastamine (veekogu t.) 302
talvine pöördkihistumus 83
tarbijad ehk konsumendid ehk heterotroofid 260
tasakaaluprofiil ehk tasakaaluline pikiprofiil 39
tegelik nišš 252
tehisjärved 36, 57, 64, 283
tehiskärestik 333
tehisveekogud 35, 64, 281
teis- ehk sekundaarproduktsioon 274
tektooniline järveteke 51
temperatuur 191
temperatuuri hüppekiht 82
temporaarsed ehk ajutised veekogud 35
termokliin 82
terrassid 43
tervendamine (veekogu t.) 302, 332
tervendamise eeldused 302
tervendamise eesmärgid 302
tervendusmeetodid 302, 305, 332
tihedus 190
tippkiskjad 260
toidu korduvkasutus vooluvetes 264
toidu päritolu veekogus 262
toiduahel 260
toiduvõrgustik 260
toitained 143
toiteained 143, 295
toiteainete keemiline setitamine 305
toitelisus ehk troofsus 143
toitumine 253
toitumistüübid 255
tootjad ehk produtsendid ehk autotroofid 260
triivimine 266
triklopüür 316
trofogeenne kiht 108
trofolüütiline kiht 108
troofiline koefitsient 253
troofiline tase 252, 260
troofsus ehk toitelisus 143
troofsusklassifikatsioonid 166
troofsusseisund 294
tsunamid ehk hiidlained 96
tsüklomorfoos 29, 205
tugevasti muudetud veekogud 281
tugiteenused 288
tulevikuväärtuse meetod 291
tulnukliigid 235, 238, 287, 329
turbulentne vool 91
turuhinna meetod 291
tuulehoovused 92
tuuletekkelised järved 56
tüpiseerimine 165
tüpoloogia 169, 297

## U

ubikvistid 204
ujulehtedega taimed 210
ujutaimed 210
umbjärved 194
ummuksisse jäämine ehk hapnikupuudus 107
univoltiinsed liigid 274

## V, W

vagiilne ehk liikuv bentos 210
valgus 66
valguse vertikaalne nõrgenemine ehk ekstinktsioon 70
vallapäästvad jõud 290
vanajõed ehk soodid 43, 199
varjutatus 193, 210, 295
varustavad teenused 288
vee
— erisoojus 27
— heledus 73
— hägusus 72
— karedus 113
— keemilised omadused 31
— liikumine vooluvetes 97
— liikumisvormid 90
— läbisegunemise sügavus 75
— molekulaarstruktuur 23
— optilised omadused 70, 71
— reostus 286
— rõhk 25
— suhteline läbipaistvus 71
— tihedus 25
— värvsus 73
veebilansi muutmine 305
veehoidlad 64
veeindeks 116
veekihtide eemaldamine 305
veekogu kuivamine 192
veekogude rühmitamine veepoliitika raamdirektiivi järgi 174
veekogumid 35, 281
veelahkmed 40, 194
veemajanduskavad 280, 281
veepind 196
veepoliitika raamdirektiiv (VRD) 18, 48, 174, 194, 280, 297, 298
veepoliitika raamdirektiivi
— eesmärgid 280
— planeerimistegevus 280
veer ehk jõesängi külg 41
veeringe ehk hüdroloogiline tsükkel 32
veesisesed taimed 210
veetaimestiku eemaldamine 337
veetaseme
— alandamine 283, 318
— kõikumise teooria 263
— muutmine 283
— reguleerimine 305, 316
— tõstmine 318
veevarud Maal 33
veeõitseng 146, 172, 218, 219, 283, 307, 314, 315, 319, 322
vesi kui aine 23
vesikond 40
vesikonnad Eestis 48
vesinik 23
vesinikkarbonaatsed veekogud 116
vesinikside 24
vesiniksulfiid 110
vesiniku isotoobid 24
vesinikueksponent ehk pH 131
viljakus 269
viroplankton 205
viskoossus ehk sisehõõrdumine 28
vool 90
voolu vanus 195
vooluhulga vähendamine 287
vooluhulk 197
voolukiirus 197
voolusäng ehk jõesäng 41, 197
voolusängi laius 40
voolusängi pikiprofiili kallakus 42
vooluveekogu pikkus 40
vooluveekogud Eestis 47
vooluveekogud ehk lootilised veekogud 35, 194
vooluveekogude
— kujunemine 39
— ontogenees 179
— paiknemine 37
— soojusvahetus 79
— tervendamine 332
vooluvete bentaal 199
vooluvete elupaigad 197
vooluvete tüpoloogia Eestis 167
vooluvete veekiht 198
vulkaaniline järveteke 52
võrendik 44, 199
võõrliigid 337
vähemusioonid 115
vähetoitelised ehk oligotroofsed järved 166, 169
väikeveekogud 195, 201
välditud kahju meetod 291
väljasuremine 267
vältimiskulude meetod 291
Winkleri meetod 102

## Õ

õgvendamine 280, 284, 334, 336
õhurõhk veepinnal 190
õhustamine (veekogu õ.) 305
õhustamismeetodid 305
õlid ja rasvad 159

## Ä

äravool ehk äravoolumaht 33, 40
äravooluhoovused 92
äravoolumoodul 40

## Ö

ökoloogiline potentsiaal 281
ökoloogiline seisund 281, 294
ökoloogilise
— kvaliteedi suhtarv 298
— potentsiaali seisundiklassid 298
— seisundi hindamine 294, 297
— seisundi klassid 176, 298
— seisundi näitajad 295
ökoloogilised meetodid 305
ökosüsteem 269
ökosüsteemi „pahateenus" 292
ökosüsteemiteenused 288
ökosüsteemiteenuste hindamise metoodikad 292
ökosüsteemiteenuste indikaatorid 291
ökoton 195

## Ü

ühe- ja kahevalentsete ioonide suhe 115
üksiknäitajatel põhinevad klassifikatsioonid 166
üldaluselisus 140, 146, 171, 176, 295, 311, 312
üldfosfor 149
üldhävitavad ehk mitteselektiivsed herbitsiidid 315
üldine lahustunud ainete sisaldus (TDS) 117
üldkaredus 124
üleminekuelupaigad 200
ülemjooks 197
ülenev mõjuahel 261
üleujutus 199

# Elustiku register


## A

aasia angersäga (*Clarias batrachus*) 330
*Aedes* 244, 245
*Aedes aegypti* 245
*Aedes albopictus* 245
*Aeglidae* 237
*Aeolosomatidae* 230
aerjalalised (*Copepoda*) 206, 235
aerjalgsed (*Maxillopoda*) 235
*Aeromonas* 259, 267
*Agasicles hygrophila* 242
*Agriotypus armatus* 245
ahtalehine hundinui (*Typha angustifolia*) 266
ahvenalised (*Perciformes*) 246
ainuõõssed (*Cnidaria*) 227
aktinobakterid (*Actinobacteria*) 217
alfaproteobakterid (*Alphaproteobacteria*) 217
algloomad 220
alligaator (*Alligator*) 248
aloosa (*Alosa pseudoharengus*) 258
aloosa (*Alosa*) 258
alss (*Eleocharis*) 225
alveolaadid (*Alveolata*) 223
amasoonase viktooria (*Victoria amazonica*) 211
*Amoebozoa* 223
amööbid 222
*Anabaena* 219, 265, 267
*Andreales* 223
*Andrias davidianus* 247
*Andrias japonicus* 247
angerjalised (*Anguilliformes*) 246
*Aniptodera* 226
*Annulatascus* 226
*Anopheles* 244, 245, 293
*Apedilum elachistus* 243
*Aphanomyces astaci* 238, 259
*Aphanizomenon* 218, 219, 256, 265
apteegikaan (*Hirudo verbana*) 230
*Arapaima gigas* 247
*Archaeplastida* 223
arhed (*Archaea*) 216, 219
arktika paalia (*Salvelinus alpinus*) 265
*Artemia* 206, 207, 235
*Asplanchna* 206, 230, 257, 258
*Astacidae* 237
*Astacus astacus* 259
*Azolla* 267
*Atherix* 245, 257
atsidobakterid (*Acidobacteria*) 218
*Atyidae* (krevettide sugukond) 216, 237
*Aulacoseira granulata* 220
*Australomedusa* 227

## B

*Bacillus thuringiensis* var. *israelensis* 244
baikali viigerhüljes (*Pusa sibirica*) 251
bakterid 216
basilisk (*Basiliscus*) 248
*Bathynellaceae* 237
*Batrachospermum* (punavetikas) 212, 219, 220
beetaproteobakterid (*Betaproteobacteria*) 217
*Beggiatoa* 217
*Boeckella* 206
*Bosmina* 206, 207, 234
*Brachionus* 231, 258
*Branchinecta* 206
*Brugia malayi* 245
*Brugia timori* 245
*Bursaria* 206
*Bythotrephes longimanus* 331

## C

*Callitriche heterophylla* (vesitäht) 225
*Cambaridae* 237
*Campylodiscus* 206
*Cancellidium* 226
*Candonidae* 236
*Canthocamptidae* (rullikuliste sugukond) 213
*Capnia lacustra* 240
*Carphania* 233
*Caullerya mesnili* 259
*Caulobacter* 217
*Cephalodella* 231
*Cephalodella* (keriloom) 231
*Ceratium* 206, 220, 221, 256
*Ceratium hirundinella* 220
*Ceratomyxa shasta* 230
*Chaetophora* 212
*Chaetogaster* 229, 259
*Chaetonotus bisacer* (ripskõhtne) 230
*Chara* 210, 221, 321
*Chathamiidae* 242
*Chirocephalus* 206
*Chironomus* 243
*Chlamydomonas* (rohevetikas) 256
*Chlamydomonas* (vt koppvetikas) 155, 221
*Chlorella* (rohevetikas) 227
*Chlorobaculum* 218
*Chlorobium* 218
*Chloroflexus* 218
*Chloronema* 218
*Chroococcales* 219
*Chroococcus turgidus* 206
*Chydorus* 206, 234
*Cladophora* (rohevetikas) 210–212, 221
*Collembola* 12, 238
*Conochilus* 230
*Corbicula fluminea* 331
*Cordylophorinae* 227
*Corydalidae* 240
*Corydalus* 240
*Crangonyctidae* 236
*Craspedacusta* 206
*Craspedacusta sowerbii* 227
*Crenarchaeota* 219
*Crenobia alpina* 228
*Cricotopus nostocicola* 267
*Cristispira* 218
*Cryophila* 245
*Cryptomonas* (neelvetikas) 222, 256
*Culex* 244, 245
*Cyclops* 206
*Cyprididae* 236
*Cyrtobagous salviniae* 242

## D

*Dactylaria* 226
*Dactylobiotus* 233
*Dalyelliidae* 228
*Daphnia* 29, 206, 234, 259
*Daphnia cucullata* 29
*Deferribacter* 218
deltaproteobakterid (*Deltaproteobacteria*) 217
*Demanietta khirikhan* 237
*Derris elliptica* 321
*Desulfovibrio* 217
*Diamesa mendotae* 243
*Diamesiinae* 243
*Diaphanosoma* 206
*Dicranophora* 231
*Dictyosporium* 226
*Dileptus* 206, 207
dinofüüdid 170
*Dinophysis* 221
*Dinobryon* 219, 220
*Dinobryon sertularia* (koldvetikas) 220
*Dinocras cephalotes* 257
*Donaciinae* 241
*Dorylaimida* 229
*Draparnaldia* 212
*Dreissena rostriformis* (rändkarp) 266, 331
dzeetaproteobakterid (*Zetaproteobacteria*) 217

## E

eba-lamekaan (*Boreobdella verrucosa*) 328
ebapärlikarp (*Margaritifera margaritifera*) 286, 333
ebapärlikarplased 232
*Ecdyonurus* 210
*Echinochloa polystachya* (kukehirss) 273
ehmestiivalised (*Trichoptera*) 238, 242
ekskavaadid (*Excavata*) 223

elektriangerjas (*Electrophorus electricus*) 192, 247
elektrisäga (*Malapterurus electricus*) 192
ematigu (*Viviparus*) 231
ematigulased (*Viviparidae*) 231
*Enhydris* 248
*Enteromorpha* 221
*Entocytheridae* 236
*Ephemera* 213, 238
*Epoicocladius ephemerae* 243
epsilonproteobakterid (*Epsilonbacteria*) 217
*Ergasilus sieboldi* 235
*Eristalis* 245
eristiivalised (*Anisoptera*) 239
eriviburvetikad (*Xanthophyceae*) 222
*Eucyclops* 206
*Eudiaptomus* 206
*Euglena acus* 221
eugleniidid (*Euglenoidea*) 219, 221
*Eukiefferiella ancyla* 243
euroopa angerjas (*Anguilla anguilla*) 208
euroopa kobras (*Castor fiber*) 250
euroopa naarits (*Mustela lutreola*) 250
*Eurytemora* 206
*Euryarchaeota* 219

## F, G

firmikuudid (*Firmicutes*) 217
flamingolised (*Phoenicopteriformes*) 249
*Flavobacterium* 267
flavobakterid (*Flavobacteria*) 218
*Flexibacter* 218
florida ondatra (*Neofiber alleni*) 250
forell (vt jõeforell) 337
*Fredericella sultana* 233
*Gallionella* 217
gammaproteobakterid (*Gammaproteobacteria*) 217
*Gloeotrichia* 205, 219
*Gloeotrichia echinulata* (tsüanobakter) 205
*Gmelinoides fasciatus* 236, 266, 287, 331
*Gordiidae* (jõhvuslane) 229
*Gorgoderina vitelliloba* 259
*Gymnodinium* 221

## H

habesääsklased (*Ceratopogonidae*) 245
*Haementeria ghilianii* 230
haigrud (*Ardea*) 249
hailaadsed (*Selachomorpha*) 246
hallasääsk (*Anopheles*) 244
hallasääsklased (*Anophelinae*) 244
hallselg-aloosa (*Alosa pseudoharengus*) 331
hammaskarbilised (*Cyprinodontiformes*) 246
hanelised (*Anseriformes*) 249
*Haplotaxis* 229
haratsiinilised (*Characiformes*) 246
harilik ahaskaan (*Erpobdella octoculata*) 230
harilik ahven (*Perca fluviatilis*) 247, 319
harilik gambuusia (*Gambusia affinis*) 330
harilik jõevähk (*Astacus astacus*) 238
harilik järvekarp (*Anodonta anatina*) 232
harilik kabeujur (*Rhantus exsoletus*) 241
harilik kiisk (*Gymnocephalus cernuus*) 331
harilik kivipäevik (*Heptagenia sulphurea*) 239
harilik kollakevik (*Isoperla grammatica*) 239
harilik loidtiib (*Sialis lutaria*) 240
harilik läikkiil (*Somatochlora metallica*) 239
harilik mudatupp (*Tubifex tubifex*) 229
harilik pehmetupp (*Potamothrix hammoniensis*) 229
harilik piisammutt ehk harilik desman (*Desmana moschata*) 250
harilik pilliroog (*Phragmites australis*) 211, 331
harilik põistigu (*Physa fontinalis*) 259
harilik päikeseahven (*Lepomis gibbosus*) 337
harilik sammallane (*Plumatella fungosa*) 233
harilik selgsõudur (*Notonecta glauca*) 241
harilik vesimutt (*Neomys fodiens*) 250
harilik vesisammal (*Fontinalis antipyretica*) 211
harjasliimukas (*Alitta succinea*) 230
haug (*Esox lucius*) 319
haugilised (*Esociformes*) 246
heeringalised (*Clupeiformes*) 246
heleflamingo (*Phoenicopterus roseus*) 128
*Helicomyces* 226
hellbender (*Cryptobranchus alleganiensis*) 247
helviksammaltaimed (*Marchantiophyta*) 223
herneskarp (*Pisidium*) 214, 259
heterokondid (*Heterokontophyta*) 223, 226
*Hexagenia* 238
hiidanakonda (*Eunectes murinus*) 248
hiidlutikalised (*Belostomatidae*) 240
hiidsaarmas *brasiliensis*) 250
hiidämblik (*Dolomedes fimbriatus*) 234
hiilgekiil (*Cordulia aenea*) 239
hobukaan (*Haemopis sanguisuga*) 230
*Homalopsis* 248
hooghännalised (*Collembola*) 12, 238
hormikulised (*Calanoida*) 206, 235
hulkharjasussid (*Polychaeta*) 229
hulkraksed loomad (Metazoa) 206
hõbekoger (*Carassius auratus*) 331
händkonn (*Ascaphus truei*) 247
händur (*Bythotrephes*) 235, 257
hännak-rabakiil (*Leucorrhinia caudalis*) 328
hüdra (*Hydra*) 227
hüfomütseedid (*Hyphomycetes*) 226
hüüp (*Botaurus stellaris*) 249
*Hydropsyche* 257
*Hydroptilidae* 242, 256, 265
*Hypania invalida* 230
*Hyriidae* 213

## I, J

idalõhe (*Oncorhynchus*) 269
iibis (*Platalea*) 249
imetajad (*Mammalia*) 12, 249
imiussid (*Trematoda*) 228
*Inia geoffrensis* 250
jaanimardiklased (*Lampyridae*) 241
jakaanalased (*Jacanidae*) 249
juurjalgsed 222
jõe-kirpvähk (*Gammarus pulex*) 236
jõeforell (*Salmo trutta*) 265
jõehai (*Glyphis*) 246
jõehobu (*Hippopotamus amphibius*) 251
jõekarbilised (*Unioniformes*) 232
jõekarp (*Unio*) 213
jõekarplased (*Unionidae*) 213, 232
jõemanaati (*Trichechus inunguis*) 250
jõerailased (*Potamotrygonidae*) 246
jõgiehmeslased (*Hydropsychidae*) 214, 265
jõgi-nahksamblik (*Dermatocarpon luridum*) 226
jõhvuslased (*Gordiidae*) 229
jõhvussid (*Nematomorpha*) 228
järv-lahnarohi (*Isoetes lacustris*) 170, 225
järvepall (*Aegagropila linnaei*) 210, 211
järvevaal (*Lipotes vexillifer*) 250
järvekäsn (*Spongilla lacustris*) 227
järvevana (*Limnephilus*) 242
jäälind (*Alcedo atthis*) 249
jäälindlased (*Alcedinidae*) 249

## K

kaanid (*Hirudinea*) 229
kahepaiksed (*Amphibia*) 12, 247
kahetiivalised (*Diptera*) 238, 243
kaimankilpkonn (*Chelydra serpentina*) 248
kakandilised (*Isopoda*) 236
kalakotkas (*Pandion haliaetus*) 249
kalatäi (*Argulus foliaceus*) 236
kalatäilased (*Argulidae*) 236
kaldapäeviklased (*Siphlonuridae*) 238
kaluuga (*Huso dauricus*) 247
kanada kobras (*Castor canadensis*) 250
kanada saarmas (*Lutra canadensis*) 250
kanada vesikatk (*Elodea canadensis*) 331
kapibaara (*Hydrochaeris hydrochaeris*) 250
karbid (*Bivalvia*) 231, 232
karevetikas (*Cladophora*) 212, 221
karkjalg (*Himantopus*) 249
karpkala (*Cyprinus carpio*) 330
karpkalalised (*Cypriniformes*) 246
karpvähilised (*Ostracoda*) 193, 206, 236
karuslased (*Arctiidae*) 242

kaspia viigerhüljes (*Pusa caspica*) 251
kaugida unimudil (*Perccottus glenii*) 331
kaurilised (*Gaviiformes*) 249
keehirss (*Paspalum*) 273
keelikloomad (*Chordata*) 12, 246
keeristigulased (*Bithyniidae*) 231
keraskarplased (*Sphaeriidae*) 213, 232
*Keratella* (karikkerilane) 206
*Keratella cochlearis* 207
keriloomad (*Rotifera*) 192, 230
kevikulised (*Plecoptera*) 191, 238, 239
kibun (*Chrysops*) 245
kidakärssed (*Acanthocephala*) 230
kihulased (*Simuliidae*) 193, 214, 244, 257, 266
kiililised (*Odonata*) 238, 239
kiisk (*Gymnocephalus cernuus*) 266, 331
kiivrik (*Daphnia*) 234, 259
kilbik (*Triops*) 235
kilbikulised (*Notostraca*) 235
kiletiivalised (*Hymenoptera*) 245
kilpkonnad (*Chelonii*) 248
kilpkonnakaan (*Placobdella costata*) 328
kilpkonnalised (*Testudines*) 248
kingloom (*Paramecium*) 222
kirevahvenlased (*Cichlidae*) 267
kirju linnukaan (*Theromyzon maculosum*) 328
kirjukaan (*Hirudo medicinalis*) 230, 328
kirjukevik (*Perlodes dispar*) 240
kirpvähilised (*Amphipoda*) 236
kirpvähk (*Gammarus*) 236
kirpvähklased (*Gammaridae*) 213, 236, 266
kiskjalised (*Carnivora*) 250
kiuduslased (*Mermithidae*) 229
kivivanalased (*Goeridae*) 245
klaasik (*Leptodora kindtii*) 234
klaasik (*Leptodora*) 234, 257
klaasiksääsk (*Chaoborus*) 207, 214, 257
klaasiksääsklased (*Chaoboridae*) 245
klaasliimuklased (*Naididae*) 229
klibuvana (*Silo*) 242
klorella (*Chlorella*) 217
kodavähilised (*Conchostraca*) 235
koger (*Carassius*) 246
koldvetikad (*Chrysophyceae*) 12, 219, 220
kollane vesikupp (*Nuphar lutea*) 211
kolmehaarmelised (*Tricladida*) 228
kondorkilpkonn (*Macrochelys temminckii*) 248
konnarohulised (*Alismataceae*) 225
koppvetikas (*Chlamydomonas*) 221
kopskalalaadsed (*Dipnoi*) 246
kopsu-kakssuulased (*Paragonimus*) 232
kormoran (*Phalacrocorax*) 249
korvkarp (*Corbicula*) 232, 257
kottseened (*Ascomycota*) 226
krabilised (*Brachyura*) 237
krevetid (*Caridea*) 237
krokodill (*Crocodylus*) 248
krokodillilised (*Crocodylia*) 248
kromalveolaadid (*Chromalveolata*) 223
krüptomonaadid (*Cryptophyta*) 223
krüsofüüdid 170
kukehirss 273
kukkurloomad (*Marsupialia*) 250
kukrik (*Gyrinus*) 241
kukriklased (*Gyrinidae*) 241, 242, 258
kurelised (*Gruiformes*) 249
kurvitsalised (*Charadriiformes*) 249
kuulmiksabalased (*Mysidae*) 213
kõduhännalised (*Anomura*) 237
kõhrkalad (*Chondrichthyes*) 12, 246
kõlupea (*Alternanthera*) 242
kõrgemad vähid (*Malacostraca*) 236
kõrrelised (*Poaceae*) 225
kõõlusleht (*Sagittaria sagittifolia*) 211
kähar penikeel (*Potamogeton crispus*) 331
käppvana (*Brachycentrus*) 213, 242
kärbselised (*Brachycera*) 243, 245
kärestikulutikas (*Aphelocheirus aestivalis*) 240
kärsaklased (*Curculionidae*) 241
kärssussid (*Nemertea*) 228
käsitiivalised (*Chiroptera*) 250
käsnad (*Porifera*) 227
kääbusjõehobu (*Hexaprotodon liberiensis*) 251
kümnejalalised (*Decapoda*) 237

## L

labatigu (*Planorbis*) 209, 231
labatigulased (*Planorbidae*) 213, 231, 232
lahnarohi (*Isoetes*) 225
lai tõmmuujur (*Graphoderus bilineatus*) 328
lai ujur (*Dytiscus latissimus*) 328
laialehine hundinui (*Typha latifolia*) 266
laiuss (*Diphyllobothrium latum*) 228, 235
lamantiin (*Trichechus senegalensis*) 250
lamantiinlased (*Trichechidae*) 250
lameussid (*Platyhelminthes*) 228
*Lampsilis* 232
latikas (*Abramis brama*) 319
lauk (*Fulica atra*) 249
laulusääsk (*Culex*) 244
laulusääsklased (*Culicinae*) 244
*Lecane* 231
leediklased (*Pyralidae*) 242
*Leishmania* 222
lemlelised (*Lemnaceae*) 209
lemlik (*Wolffia*) 211
lendlane (*Myotis*) 250
lepamaim (*Phoxinus phoxinus*) 258
*Lepidurus* 235
*Lepomis macrochirus* 257
*Leptosomatidae* 229
*Leptothrix* 217
*Lernaea cyprinacea* 235
lestik (*Chydorus*) 234
lestiklased (*Chydoridae*) 213
*Lethocerus* 240
*Leucocytozoon* 244
liblikalised (*Lepidoptera*) 242
liidriklased (*Coenagrionidae*) 239
*Limnophora* 245
*Limnothrix brachynema* (tsüanobakter) 205
limused (*Mollusca*) 12, 231
linnud (*Aves*) 12, 248
linnuroni (*Ligula intestinalis*) 228, 259
liuskur (*Gerris*) 209
liuskurlased (*Gerridae*) 196, 209, 238, 241, 258
loidtiiblased (*Sialidae*) 240
loimurid (*Tardigrada*) 192, 216, 233
loivalised (*Pinnipedia*) 251
loomad 226
*Lophopodella carteri* 233
*Lubomirskiidae* 227
*Lubomirskia baikalensis* 188
ludviigia (*Ludwigia*) 2–3
lutikalised (*Heteroptera*) 238, 240
*Lutzia* 244
luukalad (*Osteichthyes*) 12, 246
lõhelised (*Salmoniformes*) 246
lõhkjalalised (*Mysidacea*) 206, 236
lõikheinalised (*Cyperaceae*) 225
lõpusehmeslane (*Rhyacophila*) 212, 242, 257
lõpushännalised (*Branchiura*) 236
lõpusjalgsed (*Branchiopoda*) 234
lõugtundlased (*Chelicerata*) 233
lülijalgsed (*Arthropoda*) 12, 233

## M

*Macrobrachium rosenbergii* 237
*Macroversum* 233
madukael (*Anhinga*) 249
maksa-kakssuulane (*Opisthorchis*) 232
maksasamblad 210
*Malawispongiidae* 227
manaati (*Trichechus manati*) 250
*Manayunkia speciosa* 230
*Mansonia* 245
maod (*Serpentes*) 248
mardikalised (*Coleoptera*) 238, 241
marmorvähk (*Procambarus fallax* f. *virginalis*) 238
*Massarina* 226
*Mastigias papua* 228
mediina niituss (*Dracunculus medinensis*) 235
*Megalagrion* 239
merikotkas (*Haliaeetus albicilla*) 249
merilestlased (*Halacaridae*) 234
merisutt (*Petromyzon marinus*) 331
meriveiselised (*Sirenia*) 250
*Mermithida* 229
*Mermithidae* (kiuduslased) 229
*Mesocyclops* 206, 207, 235
*Mesodinium rubrum* 223
*Mesostoma* (lameuss) 206
metsasääsk (*Aedes*) 244
*Metschnikowiidae* 227

*Metschnikowia bicuspidata* 259
*Micrococcus* 267
*Microstomum* 228
*Microcystis* 205, 212, 218, 265, 315
*Milnesium tardigradum* 233
mink (*Neovison vison*) 251, 337
mittesoontaimed 223
*Mochlonyx* 245
*Moerisia* 227
*Mollicutes* 217
*Mononchida* 229
mosambiigi tilaapia (*Oreochromis mossambicus*) 330
mudahüpiklased (*Periophthalmidae*) 209
mudatigu (*Lymnaea*) 274
mudatigulased (*Lymnaeidae*) 213, 232
mudatuplased (*Tubificidae*) 213, 214, 229
mullalestad (*Oribatida*) 234
must paku (*Colossoma macropomum*) 256
must-toonekurg (*Ciconia nigra*) 249
mustviires (*Chlidonias niger*) 249
mändvetikad (*Charophyceae*) 219, 221
mändvetikas (*Chara*) 210, 221
mügri (*Arvicola terrestris*) 250
mürkputk (*Cicuta virosa*) 325
*Mysis relicta* 206, 207, 237
*Myxophaga* 241

## N

naaskelnokk (*Recurvirostra avosetta*) 249
napptigu (*Ancylus fluviatilis*) 212, 231, 259
nastik (*Natrix natrix*) 248
neelvetikad ehk krüptomonaadid ehk krüptofüüdid (*Cryptophyceae*) 222
nelkuss (*Caryophyllaeus*) 229
*Neohydronomus affinis* 242
*Neochetina* 242
*Neoergasilus japonicus* 235
nerka (*Oncorhynchus nerka*) 269
*Neureclipsis* 257
*Nevrorthidae* 240
niiluse ahven (*Lates niloticus*) 330
niiluse krokodill (*Crocodylus niloticus*) 248
niitvetikad (*Cladophora*) 210, 212, 221
*Niphargidae* 236
*Nitella* 221
Nitidulidae 241
Nitrobacter 146, 217, 218
*Nitrosomonas* 146, 217
*Nitrospira* 218
nokik (*Bosmina*) 234
nokkloom (*Ornithorhynchus anatinus*) 250
*Nosodendridae* 241
*Nostoc parmelioides* 267
*Nostocales* 219
nurg (*Blicca bjoerkna*) 208
nutria (*Myocastor coypus*) 250
näpitslill (*Sarracenia purpurea*) 240
närilised (*Rodentia*) 250

## O

*Ochthebius corrugatus* 242
ogakerilane (*Keratella testudo*) 258
ogakärblased (*Stratiomyidae*) 245
ogapõskne vähk (*Orconectes limosus*) 337
ojapäeviklased (*Baetidae*) 266
ojasilm (*Lampetra planeri*) 246
*Onchocerca volvulus* 244
ondatra (*Ondatra zibethicus*) 250
*Ophioceras* 226
*Orconectes rusticus* 238
*Orconectes virilis* 258, 337
*Orthocladiinae* 243
*Oscillatoria* 219
*Oscillatoriales* 219
*Oscillochloris* 218
*Osmylidae* 240

## P

paabusilm-jõerai (*Potamotrygon motoro*) 246
*Paedocypris progenetica* 246
paelussid (*Cestoda*) 228
paka (*Cuniculus paca*) 250
paks jõekarp (*Unio crassus*) 213
paksusabaline opossum (*Lutreolina crassicaudata*) 250
*Palaemonidae* (krevettide sugukond) 216, 237
*Pantala flavescens* 239
papüürus (*Papyrus*) 274
*Paragonimus* 232, 237
*Paramelitidae* 236
*Paraergasilus longidigitus* 235
*Paramecium bursaria* (kingloom) 222
*Paramysis intermedia* 237
*Paramysis lacustris* 237
*Parapoynx* 242
*Parargyractis* 242
parasiitsägalased (*Trichomycteridae*) 247
*Parastacidae* 237
*Paratendipes thermophilus* 243
parmlased (*Tabanidae*) 245
*Pasteuria ramosa* 259
*Pectinatella magnifica* 233
pelikanilised (*Pelecaniformes*) 249
penikeelelised (*Potamogetonaceae*) 225
penikeel (*Potamogeton*) 225
*Peridinium* 221
*Phacus* 221
*Physella virgata* 258
piimjas planaar (*Dendrocoelum lacteum*) 228
pindur (*Velia*) 209
pindurlased (*Veliidae*) 209, 238, 241, 258
*Piona* (vesilest) 233, 257
*Piruella* 217
pisiehmeslased (*Hydroptilidae*) 242, 265
pisisõudur (*Micronecta*) 240
pistesääsklased (*Culicidae*) 244, 245
pistrikulised (*Falconiformes*) 249
*Planctomyces* 217
*Planktothrix* 219
planktomütseedid (*Planctomycetes*) 217
*Plasmodium* 245
*Plumatella emarginata* 233
*Plumatella fungosa* 233
*Plumatella repens* 233
*Podostemaceae* 225
poilased (*Chrysomelidae*) 241
*Polyarthra* 206
*Polypodiozoa* 227
*Polypodium* 227
*Pomatiopsidae* 231
*Pontogammarus robustoides* 236
*Potamonautes* 237
*Potamodrilidae* 230
*Prochlorococcus* 219
*Prochloron* 219
*Prosthecobacter* 218
*Prostoma* 228
*Prostoma eilhardi* 228
*Prostoma graecense* 228
proteobakterid (*Proteobacteria*) 217
protistid 206, 220
pruunvetikad (*Phaeophyceae*) 222
*Pseudomonas* 267
*Pseudobiotus* 233
*Pseudohalonectria* 226
*Pteronarcys californica* 240
*Pudaengon arnamicai* 237
puguheeringas (*Dorosoma cepedianum*) 258
punakurk-kaur (*Gavia stellata*) 249
punane soovähk (*Procambarus clarkii*) 238, 337
punasilm-liidrik (*Erythromma najas*) 191
punavetikad (*Rhodophyceae*) 210, 219, 220
pungsamblalaadsed (*Bryales*) 223
putukad (*Insecta*) 12, 238
puudukilbilised (*Anostraca*) 206, 235
põistigu (*Physa*) 274
põistigulased (*Physidae*) 232
põnguskilbilised (*Cumacea*) 235
päikeseahven (*Lepomis gibbosus*) 231
päriskonnalised (*Anura*) 247
päriskärblased (*Muscidae*) 245
pärmid 226
pürenee piisammutt ehk pürenee desman (*Galemys pyrenaica*) 250
pütilised (*Podicipediformes*) 249
*Pyrolobus fumarii* 219

## R

rabakonn (*Rana arvalis*) 247
rabe mändvetikas (*Chara globularis*) 321
rafidiofüüdid (*Raphidiophyceae*) 222
railaadsed (*Batomorpha*) 246
randal (*Phoca vitulina*) 251
rannalutiklased (*Saldidae*) 241
relikt-kuulmiksaba (*Mysis relicta*) 237
reoseen 226

*Rheotanytarsus* 243
*Rhodospirillium* 217
*Rhyncholacis penicillata* 225
*Richtersius coronifer* 233
riis (*Oryza*) 273
riisikärsakas (*Lissorhoptrus oryzophilus*) 242
ripskõhtsed (*Gastrotricha*) 206, 213, 230
ripsloomad (*Ciliophora* ehk *Ciliata*) 222
ripsussid ehk turbellaarid (*Turbellaria*) 228
risuvana (*Chaetopteryx villosa*) 242, 243
rohe-tondihobu (*Aeshna viridis*) 328
rohelised mitteväävlibakterid (*Chloroflexi*) 218
rohelised väävlibakterid (*Chlorobia*) 218
rohevetikad (*Chlorophyceae*) 210, 219, 221
rohukonn (*Rana temporaria*) 259
roolind (*Acrocephalus*) 249
roomajad (*Reptilia*) 12, 248
roomardiklased 241
rooruik (*Rallus aquaticus*) 249
ruiklased (*Rallidae*) 249
rullikulised (*Harpacticoida*) 206, 235
rändkarp (*Dreissena polymorpha*) 210, 232, 266, 331
rändkarp (*Dreissena*) 207, 232
rändtigu (*Potamopyrgus antipodarum*) 232
rändvähk (*Gmelinoides fasciatus*) 287, 331
räni-kardhein (*Ceratophyllum demersum*) 321, 325
ränivetikad ehk diatomeed (*Bacillariophyceae*) 220
rääbis (*Coregonus albula*) 208
röövmardikalised (*Adephaga*) 241

## S, Z

saarmas (*Lutra lutra*) 250
sabakonnalised (*Caudata*) 247
saletaklased (*Hydraenidae*) 241
samblad 209, 210
sammalloomad (*Bryozoa*) 12, 233
sammaltaimed (*Bryophyta*) 223
*Saprolegnia* 226
*Scapholeberis mucronata* 209
*Scenedesmus* 220
*Scenedesmus (rohevetikas)* 220
*Schistocephalus solidus* 259
*Schistosoma* (vereimiuss) 228, 232
*Schizothrix* 218
selgroogsed (*Vertebrata*) 246
selgsõudur (*Notonecta*) 209, 258
selgsõudurlased (*Notonectidae*) 241
*Sicydium plumieri* 247
*Sicydium plumieri* (mudillane) 247
signaalvähk (*Pacifastacus leniusculus*) 238, 337
sihktiivalised (*Orthoptera*) 245
siiami tapluskala (*Betta splendens*) 270
siiglased (*Coregonidae*) 258
silesaba-händur (*Bythotrephes longimanus*) 235, 266
silm (*Lampetra*) 259
silmik (*Polyphemus*) 257
silmud (*Cephalaspidomorphi*) 12, 246
silmviburlane (*Euglena*) 221
*Silo pallipes* 210
*Simulium damnosum* 244
*Sinanodonta woodiana* 337
sini-nokisdelfiin (*Sotalia fluviatilis*) 250
sinilõpuseline päikeseahven (*Lepomis macrochirus*) 247
siniraalised (*Coraciiformes*) 249
*Sinonatrix annularis* 248
sirelased (*Syrphidae*) 245
sisalikulised (*Lacertilia*) 248
siugkonnalised (*Apoda*) 247
sookilpkonn (*Emys orbicularis*) 248
sookärblased (*Ephydridae*) 245
soolavähike (*Artemia salina*) 235
soomuselised (*Squamata*) 248
soontaimed (*Tracheophyta*) 225
*Sphaerocystis* 221, 256
*Sphaerotilus natans* 217
*Spirillum* 217
*Spirochaeta* 218
*Spirogyra* 221
spiroheedid (*Spirochetes*) 218
*Staurastrum* (rohevetikas) 206, 256
*Staurastrum ophiura* 206
*Stenothyridae* 231
*Stentor polymorphus* (tõrilane) 222
*Stigonematales* 219
*Strombidium* 206
suitsvõrklased (*Sisyridae*) 240
suitsvõrklane (*Sisyra*) 240
*Sulfolobus* 219
*Sulfurospirillum* 217
surusääsklased (*Chironomidae*) 202, 214, 243, 266
susu (*Platanista gangetica*) 250
suur rabakiil (*Leucorrhinia pectoralis*) 328
suur salviinia (*Salvinia molesta*) 225
suur surusääsk (*Chironomus plumosus*) 243
suursuu-forellahven (*Micropterus salmoides*) 330, 337
suurtiivalised (*Megaloptera*) 240
sõnajalgtaimed (*Pteridophyta*) 225
sõralised (*Artiodactyla*) 251
sõrgkakandilised (*Tanaidacea*) 235
sõrmiksaarmas (*Aonyx*) 250
sõudiklased (*Cyclopidae*) 213, 235
sõudikulised (*Cyclopoida*) 206, 235, 257
sõudur (*Sigara*) 240
sõudurlased (*Corixidae*) 240
sägalised (*Siluriformes*) 246
särg (*Rutilus rutilus*) 319
sääriksääsklased (*Tipulidae*) 244
sääselised (*Nematocera*) 243
*Syncarida* 237
*Zapada cinctipes* 240

## T

*Tabellaria fenestrata* 220
taimed 223
taimed laias mõttes (*Archaeplastida*) 223
talikevik (*Taeniopteryx nebulosa*) 239
tallofüüdid ehk rakistaimed 223
*Tanypodinae* 243
taolistiivalised (*Zygoptera*) 239
tativetikas (*Gonyostomum semen*) 170, 222
teisseened (*Deuteromycetes*) 226
teod (*Gastropoda*) 231
*Terrapotamon abbotti* 237
*Tetracapsuloides bryosalmonae* 233
*Theobaldia* 245
*Thermocyclops* 235
*Thermozodium* 233
*Thiovulum* 217
tiivik (*Fissidens*) 223
*Tilapia* 256
tilder (*Tringa*) 249
tindilised (*Osmeriformes*) 246
tint (*Osmerus*) 258
*Tipula aino* 244
toonekurelised (*Ciconiiformes*) 249
*Toxorhynchites* 244
*Trichocerca* 206
*Trichocorixa* (lutikaline) 207
*Trypanosoma* 222
tsüanobakterid (*Cyanobacteria*) 218, 219
tsütofaagid (*Cytophaga*) 218
tšavõõtša (*Oncorhynchus tshawytscha*) 208
tunnelehmeslased (*Psychomyiidae*) 242, 265
turbasamblalaadsed (*Sphagnales*) 223
turbasammal (*Sphagnum*) 223
tutlane (*Cristatella mucedo*) 233
tõmmukaiman (*Melanosuchus* niger) 248
tõmmuujur (*Graphoderus zonatus*) 328
tõrikodalased (*Buccinidae*) 231
tõrilane (*Stentor*) 223
tähk-vesikuusk (*Myriophyllum spicatum*) 321, 331
tähniline madupea (*Ophiocephalus argus*) 330
tömpnina-hallhai (*Carcharhinus leucas*) 246
*Tylorrhynchus heterochaetus* 230
*Typhloplanidae* 228

## U

udrashamster (*Ichthyomys*) 250
ujuhamster (*Holochilus*) 250
ujurlased (*Dytiscidae*) 241, 257
ujurlutikas (*Ilyocoris cimicoides*) 241
ujurlutiklased (*Naucoridae*) 241
*Ulothrix* 212
unikondid (*Unikonta*) 223
*Unionicola* 234
usskerilised (*Bdelloidea*) 231

## V, W

vaalalised (*Cetacea*) 250
vaguviburilised (*Dinoflagellata*) 12, 219, 221

vahelmine näkirohi (*Najas marina* subsp. *intermedia*) 321
valgeamuur (*Ctenopharyngodon idella*) 247, 256
valgelaup-rabakiil (*Leucorrhinia albifrons*) 328
valgepea-merikotkas (*Haliaeetus leucocephalus*) 249
valgesõraline vähk (*Austropotamobius pallipes*) 238
*Vampirovibrio* 217
*Vampyrella* 256
vappkerilised (*Monogononta*) 230
varjejalglased (*Scirtidae*) 242
*Vaucheria* 222
veeopossum (*Chironectes minimus*) 250
*Verrucomicrobium* 218
vesiharklased (*Nepidae*) 240
vesikiillased (*Libellulidae*) 239
vesimardiklased (*Hydrophilidae*) 241
vesisalat (*Pistia stratiotes*) 242
vesihamstrik (*Rheomys*) 250
vesihark (*Nepa cinerea*) 191, 241
vesihernes (*Utricularia*) 257
vesihüatsint (*Eichhornia crassipes*) 2, 242, 331
vesikakand (*Asellus aquaticus*) 214, 236
vesikarikaleedik (*Parapoynx stratiotata*) 242
vesikarikas (*Stratiotes aloides*) 325
vesikelluke (*Vorticella*) 223
vesikirbulised (*Cladocera*) 206, 234
vesikuuselised (*Haloragaceae*) 225
vesilestad (*Hydrachnidia*) 233
vesilobeelia (*Lobelia dortmanna*) 170
vesilääts (*Spirodela*) 209
vesinäkk (*Acentria*) 242
vesipapp (*Cinclus cinclus*) 249
vesisammal (*Fontinalis*) 210, 211, 223
vesiämblik (*Argyroneta aquatica*) 234
vetikad 220
*Vibrio* 267
viburloomad 222
viigerhüljes (*Pusa hispida*) 251
vikerforell (*Oncorhynchus mykiss*) 337
villkäpp-krabi (*Eriocheir sinensis*) 337
*Volvox* 205
voolukärbes (*Atherix*) 257
voolukärblased (*Athericidae*) 245
voolutaklased (*Elmidae*) 213, 241, 242
võhalised (*Araceae*) 225
võldas (*Cottus gobio*) 208
võrktiivalised (*Neuroptera*) 240
väheharjasussid (*Oligochaeta*) 229, 259
vähikaanid (*Branchiobdellae*) 229
vähid (*Crustacea*) 12, 233, 234
vähid kitsas mõttes 237
väikekajakas (*Larus minutus*) 249
värvulised (*Passeriformes*) 249
vööussid (*Clitellata*) 229
*Wuchereria bancrofti* 245

## Õ, Ä, Ö, Ü

õistaimed (*Magnoliophyta*) 209, 210, 225
õrnpäevik (*Leptophlebia*) 259
õrnpäeviklased (*Leptophlebiidae*) 266
õuntigu (*Pomacea canaliculata*) 231
õuntigulased (*Ampullariidae*) 231
ämblikulaadsed (*Arachnida*) 12, 233
ämblikulised (*Araneae*) 234
üheharused (*Uniramia*) 233, 238
ühepäevik (*Ephemera*) 213
ühepäeviklased (*Ephemeridae*) 213
ühepäevikulised (*Ephemeroptera*) 238
ümarmudil (*Neogobius melanostomus*) 331
ümarussid (*Nematoda*) 228

# Veekogude register


## A
Ahja jõgi 180
Ahnejärv 283
Amazonase jõgi 39, 40, 41, 97, 180, 230, 232, 246, 250, 256, 263, 273
Amudarja jõgi 337
Amuuri jõgi 247, 337
Andsu Edejärv 54
Andsu Peräjärv 54
Angeli juga 44
Antsülusjärv 52, 180, 186
Araali meri (järv) 52, 125, 128, 230, 337
Arbi järv 306
Arendsee järv 311
Atlandi ookean 27, 246

## B
Baikali järv 51, 61, 62, 86, 96, 182, 183, 188–189, 210, 215, 227, 229, 232, 235, 236, 243, 246, 331
Balkaši järv 128
Balti jääpaisjärv 180, 181
Barleberi järv 309
Beloje järv 110
Brahmaputra jõgi 250
Breitenbachi oja 216, 276
Bullen Merri järv 128
Bunyonyi järv 52
Büyük Menderese jõgi 199

## C
Chambersi järv 58
Cleari järv 150
Colorado jõgi 45, 90, 336
Corangamite'i järv 128
Crateri järv 52, 61, 72
Cruzi järv 139
Cumberlandi jõgi 215

## D
Dalnoje järv 275
Deadmoose'i järv 126
Denderi jõgi 336
Doni jõgi 180
Don Juani järv 114, 129
Dongtingi järv 250
Doonau jõgi 230, 285, 287, 336

## E
Elbe jõgi 180
Elistvere järv 63, 173, 196, 326
Eltoni järv 113
Elwha jõgi 286
Emajõgi 20, 40, 46, 49, 59, 116, 199, 200, 208, 286, 335
Endla järv 182
Erie järv 59, 95
Esna jõgi 334
Esrumi järv 275
Eyre'i järv 128

## F
Findley järv 275
Finke jõgi 179
Friskeni järv 312
Frying Pani järv 78
Gallocanta järv 129
Gangapurna järv 53, 250
Gangese jõgi 193
Gelså jõgi 337
Gemündeni maarijärv 87
General Carrera / Buenos Airese järv 61
Genfi järv 11, 96
Golfi hoovus 90
Greeni järv 110

## H
Halfmooni järv 312
Halli järv 318
Halliste jõgi 42, 49, 213
Harku järv 292, 293
Hellenurme paisjärv 183
Hermani järv 316
Horokiwi jõgi 276
Hoti järv 85
Huroni järv 59
Hövsgöli järv 243

## I, J
India ookean 239
Induse jõgi 250
Inni järv 303
Isère'i jõgi 198
Jangtse jõgi 40, 250, 337
Jordani jõgi 128
Jägala jõgi 49, 180, 287, 292, 293

## K
Kaali järv 57, 63
Kaarepere Pikkjärv 297, 326
Kaiavere järv 63
Kalli järv 173
Kanteleenjärvi 318
Karakkuli järv 57
Karisto oja 335
Kasari jõgi 46, 49, 180
Kaspia meri (järv) 38, 52, 59, 61, 86, 125, 128, 227, 230
Kauksi paisjärv 63
Kaussjärv 88
Kawah Ijeni järv 133
Kavilda jõgi 114
Keila jõgi 49
Kelimutu kraatrijärved 133
Kellamäe järv 170
Kiievi veehoidla 275
Kivu järv 51, 141
Kohtla jõgi 286
Koiva jõgi 45, 49
Kokora Mustjärv 172
Koltsevoje järv 52
Kongo jõgi 40, 231, 246
Kooraste Linajärv 88, 148, 161, 283, 307, 339
Kooru järv 186, 297
Kortowskie järv 306
Krasnoje järv 275
Kukunori järv 128
Kunda jõgi 334
Kura lõugas 56
Kuradijärv 283
Kurtna järvestik 36, 284
Kõpu jõgi 49
Käina laht 54

## L
Laadoga järv 38, 236, 251
Laeva jõgi 335
Lahepera järv 166
Laialepa laht 56
Laiuse Kivijärv 63
Lawrence'i järv 122, 123, 157
Laxá jõgi 258
Leevi jõgi 333
Lemmjõgi 49
Līgatne jõgi 333
Liivi laht 48
Lillesjöni järv 313
Lilly järv 317
Limneameri 180
Litoriinameri 180
Loobu jõgi 49
Loosalu järv 297
Lämmijärv 59
Läänemeri 48, 180, 242

## M
Maasi jõgi 180
Magadi järv 127
Mahoney järv 111
Maidla jõgi 336
Mar Chiquita järv 126
Marioni järv 275
Martiska järv (Kurtna) 283
Martiska järv (Puhatu) 135
Matano järv 61
Matsalu laht 208
Mekongi jõgi 231, 246
Mendota järv 81
Michigani järv 59, 80, 81, 123, 331
Mikołajskie järv 275
Mirrori järv 275
Mississippi jõgi 197, 232
Mobile'i laht 231
Mono järv 126
Monouni järv 141
Murghobi jõgi 53
Muskiki järv 126
Must meri 18, 87, 230
Muti järv 16–17
Mõra jõgi 333
Mägara oja 202
Mývatni järv 275

## N
Nakuru järv 127
Nam Co järv 128
Naratši järv 275
Narva jõgi 40, 49, 197, 331, 335
Narva veehoidla (paisjärv) 63, 331
Navesti jõgi 42, 49, 180, 181
Neitsijärv 157, 279, 327
Niagara kosk 331
Nigeri jõgi 246, 263
Niiluse jõgi 40, 197, 330
Njassa järv 61, 88
Nohipalo Mustjärv 171
Nohipalo Valgõjärv 166
Nonni järv 174
Nõmmejärv 284
Nyosi järv 100, 141

## O
Oderi lõugas 56
O'Higginsi / San Martini järv 61
Ohridi järv 232
Okareka järv 314
Okavango jõgi 37, 47, 197
Ongeim'l Tketau järv 228
Ontario järv 96, 159, 331
Oostriku allikas 191
Orinoco jõgi 250, 273
Ounianga järved 56
Øvre Heimdalsvatni järv 275

## P
Pangodi järv 171
Pantanali märgala 2, 38, 126
Pappjärv 72, 299
Paraguay jõgi 2, 273
Paukjärv 169, 186, 202
Pedja jõgi 49
Peigneuri järv 55

Peipsi järv 18, 22, 48, 54, 59, 62, 63, 93, 109, 110, 166, 177, 180, 266, 275, 287, 297, 326, 331
Peipsi jääjärv 180
Perävalla jõgi 200
Piisupi järv 36
Pirita jõgi 49, 180, 287
Piusa jõgi 49, 180
Plitvice karstijärv 55
Porijõgi 201, 336
Prossa järv 326
Purtse jõgi 286
Põltsamaa jõgi 335
Pärnu jõgi 49, 180, 181, 287, 296
Pääjärvi 275
Pääsküla jõgi 217, 286, 332
Pühajõgi (Põhja-Eestis) 49
Pühajärv 21, 279
Pyramidi järv 126

■ R
Raigastvere järv 63
Raudna jõgi 49
Reini jõgi 180, 230, 254, 335
Reiu jõgi 198
Rhône'i jõgi 96
Ringsjöni järv 262
Rotoaira järv 52
Rõbinski veehoidla 275
Rõngu jõgi 199
Rõuge Suurjärv 63

■ S, Z
Saadjärv 63, 297
Saimaa järv 251
Salinas Grandese järvestik 126
Salton Sea järv 126
Sarezi järv 53
Selja jõgi 180
Sevani järv 210
Shagawa järv 150
Shasta paisjärv 60
Soapi järv 130, 133
Soitsjärv 63, 283, 317
Soodla jõgi 287
Soome laht 48
Surnumeri (järv) 38, 128, 129
Suur järvistu 36, 59, 62, 93, 235, 266, 331
Suur Orjajärv 61
Suur Soolajärv 126
Swartvlei järv 127

Sõrdarja jõgi 337
Zuni soolajärv 52

■ T
Tahoe järv 240
Taieri jõgi 55
Tamula järv 208
Tanganjika järv 51, 61, 86, 88, 232, 235, 246
Tengizi järv 128
Tennessee jõgi 215
Thamesi jõgi 275
Titicaca järv 38
Toolse jõgi 181
Trekanteni järv 313
Tänavjärv 170, 297

■ U
Ubesoo oja 182
Uljaste järv 135, 146
Urmia järv 128
Uuejõgi 46

■ V, W
Vagula järv 208
Vahujõgi 284
Valge meri 242
Valgejõgi 49, 180
Vasaristi oja 202
Verevi järv 22, 88, 107, 148, 317
Victoria järv 246, 267, 330
Vigala jõgi 286
Vilbaste allikad 79
Visla lõugas 56
Volga jõgi 40, 228, 230, 287
Volta veehoidla 57
Vostoki järv 53, 80
Võhandu jõgi 40, 180, 286, 335
Võisiku paisjärv 285
Võlingi oja 79
Võrtsjärv 20, 62, 63, 73, 95, 109, 157, 177, 180, 200, 208, 291, 297, 323
Väike Emajõgi 180
Väinameri 48
Vööla meri (järv) 317
Walkeri järv 126
Wingra järv 275
Wintergreeni järv 122, 157

■ Õ, Ä, Ö, Ü
Õisu järv 211
Õsõk-Köli järv 61, 128, 235
Äntu Sinijärv 55, 72, 167, 172, 186, 187, 294, 297
Äntu Valgejärv 187
Äänisjärv 38
Ülemiste järv 20, 59, 287, 323
Ülemjärv 59, 93, 96, 331
Ürg-Neeva jõgi 185

■ X, Y
Yukoni jõgi 46

## Isikunimede register

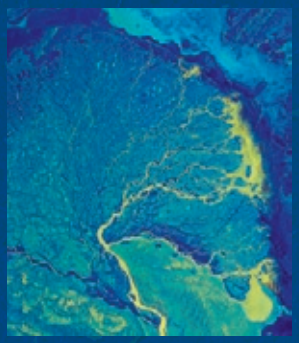
Alekin, Oleg 116
Alsterberg, Gustaf 108
Aristoteles 19
Audova, Aleksander 20
Bekker, Hendrik 20
Birge, Edward Asahel 111
Björk, Sven 318
Boyle, Robert 19
Chiaudani, Giuseppe 298
Costanza, Robert 288
Davis, William Morris 50
Eichwald, Karl 21
Erm, Vaike 21
Fischer, Jakob Benjamin 20
Forel, François-Alphonse 19
Haberman, Henn 22
Haberman, Juta 22
Hupel, August Wilhelm 20
Hutchinson, George Evelyn 50
Juday, Chancey 111
Järnefelt, Heikki 184
Järvekülg, Arvi 167
Kangur, Külli 22
Kangur, Mart 22
Kirsipuu, Aare 22
Klinge, Johannes Christoph 20
Kodres, Jaan 21
Kõiv, Toomas 169
Laugaste, Kalle 22
Laugaste, Reet 22
Lauterborn, Robert 161
Lavoisier, Antoine 19
Likens, Gene Elden 184
Loigu, Enn 178
Lokk, Saida 22
Loopmann, August 284
Mellin, Ludwig August von 20
Mikelsaar, Neeme 21, 22
Morgan, James J. 20
Mäemets, Aime 22
Mäemets, Aare 22, 168, 169
Mühlen, Max von zur 22
Naumann, Einar Christian Leonard 162, 166, 245, 298
Nõges, Peeter 22
Nõges, Tiina 22
Ott, Ingmar 22, 169
Pastak, Elsa 21
Pihu, Ervin 22
Pihu, Evi 22
Redfield, Alfred C. 143
Reinvaldt, Edvin 21
Riikoja, Heinrich 21, 208
Ruttner, Franz 138
Sall, Mari 291
Saussure, Horace Bénédict de 19
Schneider, Guido 20
Schönbein, Christian Friedrich 19
Schönberg, Natalja 21
Secchi, Pietro Angelo 71
Sillén, Lars Gunnar 19
Simm, Helle 168
Sivers, Gregor von 20
Strøm, Kaare 108
Stumm, Werner 20
Tell (Tünder), Harda 21, 22
Thales 19
Thienemann, August 108, 138, 166, 245, 298
Timm, Tarmo 20, 22
Timm, Viivi 22
Tõlp, Õilme 22
Vighi, Marco 298
Voore, Villem 21
Wesenberg-Lund, Carl 138

Vesi on elu alus. Nii nagu teisigi liike Maal poleks ka inimest veeta olemas. Ent kuigi vesi katab üle 70% maakera pinnast, ei kõlba suurem osa sellest meile joogiks (meri), asub sügaval maa all (põhjavesi) või on külmunud olekus (liustikud). Kergesti kättesaadavas vormis, s.t jõgedes-järvedes, leidub kõigest alla 0,02% kogu planeedi veevarust. Magedat vett on inimesed innukalt kasutanud, kahjuks sageli ka raisanud ja reostanud. Paljud kõrbed Põhja-Aafrikas, Araabias, Kesk-Aasias ja Austraalias on inimtegevuse, sealhulgas oskamatu või hoolimatu veemajanduse otsene või kaudne tagajärg. Magedast veest on paljudes kohtades juba ammugi puudus ning tarbijate juurdekasvu arvestades see nähtus pigem süveneb kui leeveneb.

Vahel kipub meil ununema, et looduslikud veekogud pole kõigest veega täidetud anumad, mille ainus otstarve oleks kustutada inimeste, nende koduloomade ja põllukultuuride janu. Esmajoones on nad ökosüsteemid, mida asustab neis elamiseks kohastunud liigistik. Kui aga elupaigad hävitada, kaovad ka liigid.

Selles raamatus vaatleme, mida siseveekogud – jõed ja järved – endast kujutavad, kuidas nad on tekkinud, kes neis elavad, kuidas vee-elanikud omavahel suhtlevad ja kuidas inimtegevuse survega hakkama saavad. Kirjeldame vee kui elukeskkonna omadusi, veekogudes valitsevaid soojus-, valgus- jm tingimusi, veeringet ja veevaru Maal, veekogude klassifitseerimist ja tüüpe nii Eestis kui ka mujal maailmas. Põgusalt käsitleme, kuidas on siseveekogusid seni uuritud ja millised on võimalused tervendada veekogusid, mille looduslik tasakaal on inimtegevuse tagajärjel rikutud.

Õpik on mõeldud eeskätt veekogudest huvitatud üliõpilastele, kuid loomulikult võivad seda teabeallikana kasutada kõik jõe- ja järvesõbrad.



Raamatu kaanel olev valevärvides satelliidifoto kujutab Leena deltat. See ligi 4500 km pikkune Siberi jõgi algab Baikali järve lähedalt ja suubub Põhja-Jäämerre. Üle 30 000 km$^2$ suurusele suudmealale jääb 6500 km jõeharusid, üle 30 000 järve ja üle 1500 saare. Enamiku aastast valdab siin lumine ja külmunud tundra, kevaditi moodustavad sulaveed aga ulatuslikke märgalasid. Väga lühikese suve jooksul jõuab siiski kasvada palju taimeliike ning pesitseda arvukalt rändlinde (haned, luiged, pardid). See on üks omanäolisemaid arktilisi loodusmaastikke maailmas. Peaaegu poole deltast hõlmab Ust-Lenski looduskaitseala.

Foto: European Space Agency 2019

ISBN 978-9949-9568-8-3

EMKF RAKENDUSKAVA 2014-2020

Euroopa Liit
Euroopa Merendus- ja Kalandusfond