Eesti Maaülikool; Põllumajandus- ja Keskkonnainstituut;

Hüdrobioloogia ja kalanduse õppetool





Haljala vallas oleva nelja paisjärve üldfosfori sisekoormusest ja sellest tulenevalt sette eemaldamise vajaduse hindamine.

Vastutav täitja:

Emeriitprofessor

Ingmar Ott

Tartu 2025

Sisukord

[Sissejuhatus 3](#_Toc194339991)

[1. Meetodid 3](#_Toc194339992)

[2. Tulemused. Sette üldkoostis ja fosfori kogused settes 6](#_Toc194339993)

[2.1. Muike paisjärve sette koostis ja fosfori fraktsioonid 8](#_Toc194339994)

[2.2. Reooja paisjärve sette koostis ja fosfori fraktsioonid 11](#_Toc194339995)

[2.3. Oruveski paisjärve sette koostis ja fosfori fraktsioonid 13](#_Toc194339996)

[2.4. Ojaäärse paisjärve sette koostis ja fosfori fraktsioonid 16](#_Toc194339997)

[3. Uuritud paisjärvede fosforisisalduse muutused inkubatsioonikatsetes 18](#_Toc194339998)

[4. Arutelu ja kokkuvõte 19](#_Toc194339999)

[Kirjandus 23](#_Toc194340000)

# Sissejuhatus

Töös uuriti Haljala vallas oleva nimetu järve (paisutatud Ojaäärse II paisuga, edaspidi Ojaäärse paisjärv), Oruveski järve (paisutatud Oruveski II paisuga), Muike järve (paisutatud Oruveski I paisuga) ja Reooja järve (paisutatud Põhjakalda paisuga) setet ülesandega anda hinnang, kas ja kuivõrd võivad paisjärvedesse kogunenud setted mõjutada Võsu veekogumi(te) (Võsu lähtest Laviku paisuni ja Võsu Laviku paisust suudmeni) seisundit lähtudes eelkõige üldfosfori koormusest.

Koguti üks settekurn igast paisjärvest fosfori koguste selgitamiseks ja lisaks igast järvest kaks settekurna inkubatsioonikatseks. Sisekoormuse hinnangu andmiseks määrati kuivaine, orgaanilise aine -, karbonaatide - ja terrigeense aine sisaldus, kirjeldati sette koostist, tehiti üldfosfori ja fosfori fraktsioonide analüüsid ning inkubatsioonikatsed selgitamaks enesereostuse suurust. Settefosfori koguste ja inkubatsioonikatse järgi antakse eksperthinnang ohu suuruse kohta. Settefosfori fraktsioneerimine viidi läbi vastavalt metoodikale, mis sobib heledaveeliste ja väheseorgaanilise aine sisaldusega, karedaveelistele veekogudele.

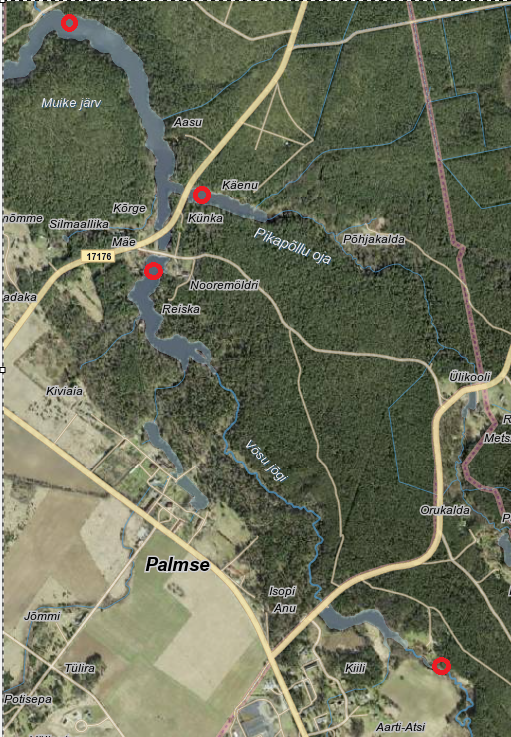
Töös osalesid emeriitprofessor Ingmar Ott, MSc. Aimar Rakko, MSc. Katrin Ott.

## 1. Meetodid

***Proovivõtt.***

Välitööd toimusid järgmistel kuupäevadel:

Muike paisjärv 1.06.2024, 11.07.2024 ja 17.02.2025; Oruveski 26.06.2024 ja 22.02.2025.; Reooja 11.07.2024 ja 22.02.2025; Ojaäärse 19.09.2024., 17.02.2025. Proovipunktide paigutus on joonisel 1.1. Proovipunktide asukohad määrati pärast settelasundi levikualade ja paksuse uuringuid. Setteproovide kogumiseks kasutati Uwitec- ja Willner tüüpi settepuure, mille abil saadi 6-7 cm läbimõõduga proovid koos sette pinna kohal oleva veekihiga.



**Joonis 1.1**. Proovipunktide paigutus Oruveski, Reooja, Muike ja Ojaäärse paisjärvedel.

***Laboratoorsed analüüsid.*** Sette keemilise koostise määramiseks lõigustati puursüdamikud 3-4 cm paksusteks kihtideks. Sete säilitati kuni analüüside läbiviimiseni 4 °C juures pimedas (külmikus), et hoida ära muutusi sette keemilises koostises. Setteproovid homogeniseeriti enne analüüside teostamist.

***Sette keemilised parameetrid.*** Laboratoorsete analüüside käigus määrati kõigist settekihtidest kuivaine, orgaanilise aine, karbonaatide ja terrigeense aine sisaldus. Kuivainesisalduse määramiseks kuumutati setet 105 °C juures 24 h jooksul. Kuivaine sisaldus arvutati kuivatamiseelse- ja järgse kaalutise vahena. Orgaanilise aine sisaldus määrati pärast õhkkuiva sette põletamist 520 °C juures 5 tunni jooksul. CaCO3 sisalduse määramiseks kuumutati setet edasi 950 °C juures 2 tunni jooksul. Põletamisel tekkinud kaalukadu omistati karbonaatidest eraldunud süsihappegaasi kaalule, mille kaudu arvutati karbonaatide sisaldus — kokkuleppeliselt väljendades seda kaltsiumkarbonaadina (Heiri *et al*., 2001). Terrigeense aine sisalduse leidmiseks lahutati õhkkuiva sette kaalust orgaanilise aine ja kaltsiumkarbonaatide kaal.

Veekogu setetes esineb fosfor erinevates keemilistes vormides ehk nn. fraktsioonides. Fosforifraktsioonide levinuimaks määramise meetodiks on keemiline ekstraheerimine, mille käigus lisatakse settele erinevaid lahuseid ja eemaldatakse erinevad fosforivormid (tabel 1.1). Fraktsioone määrati pindmisest homogeniseeritud settekihtides, kasutades Psenner *et al*. (1984) fraktsioneerimisskeemi modifitseeringut (Hupfer *et al*., 1995). Fosforikontsentratsioonid igas lahuses määrati spektrofoto­meetriliselt Murphy & Riley (1962) molübdeensinise värvusreaktsiooni meetodil.

Tabel 1.1.Fosfori fraktsioonid vastavalt Psenner *et al*. (1984) skeemile (modifitseeritrud Paludan & Jensen*,* 1995 poolt).

**Lühend Fraktsioon Kirjeldus**

Labiilne-P NH4Cl-SRP labiilne ja nõrgalt seotud fraktsioon, kergesti vabanev fosfor

Fe-P BD-SRP rauaühenditega seotud fosfor

Al-P NaOH-SRP alumiiniumühenditega seotud fosfor

Org-P NaOH-NRP orgaanilise ainega seotud fosfor

Ca-P HCl-TP peamiselt kaltsiumühenditega seotud fosfor

Jääk-P Residual-P orgaaniline ja raskestilahustuv fosforifraktsioon

***Inkubatsioonikatse.*** Settefosfori inkubatsioonikatse jaoks kasutati paisjärvedest kogutud settepuursüdamikke. Settest vette lekkivate ainekoguste määramiseks inkubeeriti settetorusid erineva aja jooksul (Muike paisjärv 31 -; Reooja 26 -; Oruveski -26; Ojaäärse 31 ööpäeva) 4°C juures nii aeroobsetes kui ka anaeroobsetes tingimustes. Inkubatsiooniperioodi jooksul vabanevate fosforihulkade hindamiseks määrati enne ja pärast katset sette kohal olevas vees lahustunud fosfaatioonide sisaldus spektrofotomeertiliselt molübdeensinise meetodil Murphy ja Riley (1962).

***Vee omadused ja fütoplankton***

Lähteülesandele lisaks pidasime vajalikuks uurida ka vee omadusi ja fütoplanktonit. Vee omadusi uuriti kõikides paisjärvedes, aga fütoplanktonit kolmes (Muike, Oruveski, Reooja). Järvede omaduste uurimine aitab selgitada ökosüsteemide toimimist, erinevaid ökoloogilisi protsesse, nt kas veesambas valdavad hapnikurikkad või hapnikuvaesed tingimused. Sellest sõltub ka sisekoormuse suurus.

## 2. Tulemused. Sette üldkoostis ja fosfori kogused settes

Üldfosfori sisaldus ei anna ühest vastust, kas järve settest toimub enesereostus. Oluline on teada fosfori fraktsioone, mis võivad erinevas koguses settest vette lahustuda. Olenevalt veekogu erinevatest keskkonnatingimustest, on osad nendest fosforivormidest kergesti settest vabanevad ning esmasprodutsentidele kättesaadavad. Mõned antud vormidest on inertsed ega osale veekogu fosforiringes, vaid talletuvad settesse. Seega, kui on teada fosforivormide jaotus settes, on võimalik ka paremini mõista veekogu fosforiringe eripära ning hinnata settest lähtuvat sisekoormust. Orgaanilise ainega seotud fosfor vabaneb selle bakteriaalse lagundamise tagajärjel fosfaatses vormis sette poorivette ning võib sealt kanduda veesambasse. Lisaks võib bakterite enda elutegevuse tõttu muutuda keskkonnatingimused settes (nt. hapniku olemasolu, pH, rauaühendite vm. sisaldus), mis soodustavad fosfori vabanemist veelgi. Labiilne fosfor vabaneb settest veesambasse väga kergesti. Labiilne fosforifraktsioon sisaldab poorivees lahustunud või nõrgalt setteosakestega seotud fosforit. Antud fraktsiooni sisaldus järvesettes on väga oluline, sest tegemist on kergesti settest vette vabaneva fraktsiooniga, mis on suurtaimedele ja fütoplanktonile kättesaadav.

Rauaühenditega seotud P fraktsioon sõltub järves olevatest hapniku tingimustest ning on potentsiaalselt vabanev. Madalad järved on tavaliselt hapnikurikkad ning seega on fosfor seotud raud(III)oksiidi osakestega. Samas, kuigi sette pindmine kiht on aeroobne, võib fosfor difundeeruda sügavamatest anaeroobsetest settekihtidest järvevette. Samuti võib vabaneda rauaga seotud fosfor talvel, kui järv on ummuksil või suvel, kui tihe suurtaimestik kasutab ära öö jooksul järvevees oleva hapniku.

Alumiiniumühenditega seotud fosfor võib olla potentsiaalselt vabanev sobivate keskkonna-tingimuste juures, kuid seda peetakse vastupidavamaks fraktsiooniks, kui rauaühenditega seotud fosforivormi.

Jääk-P ja kaltsiumühenditega seotud fosforivorme peetakse võrdlemisi inertseks ja arvatakse, et need ei osale veekogu fosforiringes.

Allpool on esitatud tabel 2.1, kus on toodud varasemates Eesti järvede setete uuringutes P sisalduse väärtused. Nõrgalt seotud fosfor, raua ja alumiiniumiga seotud fosfor, kaltsiumiga seotud fosfor ja orgaanilisse ainesse talletatud fosfor võib, aga ei pruugi olla settes olev P kogusumma. Antud töö lähteülesande järgi analüüsiti ka sette üldfosforit (üldP). Selle järgi eristub üldP sisalduse alusel pealmises settekihis Reooja paisjärv (Tabel 2.2). Reooja sette P sisaldused on väga suured, kuid ka teistes uuritud paisjärvedes on need Eestis mõõdetud suuremate väärtuste seas.

P settest vette lahustumise uurimiseks on lisaks fosfori üldkogusse ja fraktsioonide selgitamisele ka inkubatsioonikatse läbiviimine. Sette kohal olevas vees P sisalduse ajalise dünaamika järgi võib oletada, kas võiks toimuda sekundaarreostust. Seejuures peab silmas pidama, et sisalduse muutus ei pruugi olla ja enamasti ei olegi ajas lineaarse muutusega. Samamoodi on tulemuste interpreteerimisel küsitavuseks kunstlikes tingimustes saadud väärtuste ülekandmine looduslikesse. Küsimuseks on ka see, kui sügav kiht võiks järve aineringes osaleda. Väga üldiselt peetakse aktiivseks *ca* 10 cm paksust pealmist kihti. See sõltub väga paljudest asjaoludest – sette koostis, sette lõimis, vee omadused, hüdroloogiline režiim, elustiku aktiivsus jne.

Tabel 2.1. Eesti mõnede järvede setete pindmises kihis üldfosfori sisaldused (Püld) ja uuritud P fraktsioonide summad (µgP/g kuivaines; Palo, Ott jt. 2020).

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Järv | Kirjandusviide | üldP µg/g kuivaines pinnakihis | µgP/g kuivaines. Fraktsioonide summa |
| Ruusmäe | Kruusement & Punning, 2000 | 5 200 | 5 200 |
| Köstrejärv | Ott, 2006 | 4 600 | 3 230 |
| Arbi | Kisand, 2008 | 4 460 | 4 356 |
| Põlva paisjärve sissevool | Uri *et al*., 2020 |  | 3 521 |
| Linnulaht | Kisand & Übner, 2012 | 2 500 |  |
| Harku | Heinsalu, 1994 | 2 340 | 1 732 |
| Martiska | Kisand, 2008 | 2 554 | 1 607 |
| Neitsijärv | Galuzo, 2000 | 1 681 | 1 554 |
| Viljandi | Ott *et al*., 2006 |  | 1 269 |
| Endla | Ott, 2006 | 2 200 |  |
| Ahnejärv | Kisand, 2008 | 1 941 | 1 164 |
| Verevi | Kisand, 2005 |  | 987 |
| Peipsi | Kisand, 2008 |  | 869 |
| Saadjärv | Ott, 2007 | 1 000 | 859 |
| Kuradijärv | Kisand, 2008 | 1 357 | 777 |
| Prossa | Kisand & Nõges, 2003 |  | 737 |
| Kurtna Liivjärv | Kisand, 2008 | 1 067 | 712 |
| Võrtsjärv | Nõges & Kisand, 1999 | 1 010 | 702 |
| Vööla meri p. 1 | Saar & Ott, I. 2013 |  | 930 |
| Kaiavere | Kisand & Nõges, 2003 |  | 699 |
| Kaiavere | Palo, M., Ott, I. jt. 2020 | 2 598 |  |
| Kaiu | Palo, M., Ott, I. jt. 2020 | 1 848 |  |
| Papi | Palo, M., Ott, I. jt. 2020 | 1 219 |  |
| Jõemõisa | Palo, M., Ott, I. jt. 2020 | 4052 |  |
| Raigastvere | Palo, M., Ott, I. jt. 2020 | 825 |  |
| Tamula | Palo, M., Ott, I. jt. 2020 | 4 533 |  |
| Ähijärv | Palo, M., Ott, I. jt. 2020 | 2 355 |  |

Tabel 2.2. Sette üldfosfori (üldP) sisaldus (µgP/g kuivaines) ja P fraktsioonide summa uuritud paisjärvede pealmises 4 cm paksuses kihis.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Paisjärv | P fraktsioonide summa | üldP |
| Muike | 3854 | 3867 |
| Ojaäärse | 5668 | 5879 |
| Oruveski | 3560 | 3741 |
| Reooja | 8079 | 8221 |

### 2.1. Muike paisjärve sette koostis ja fosfori fraktsioonid

Muike järve pealmises 12 cm paksuses settekihis on fosforisisaldus 128 gP/m2 märjas settes. Sellist pealmist settekihti peetakse aineringes aktiivseks. Niisuguses kihis saab teada P koguhulga, kui arvestada sette levikut kogu järves. Kui palju aga sellest tegelikult järve veesambasse ja Võsu jõkke kandub sõltub vee- ja ainebilansi arvutuste tulemustest. Hinnangu andmisele aitavad kaasa fosfori fraktsioneerimise ja inkubatsioonikatse tõlgendamised.

Tavapäraselt on sette kuivainesisaldus pindmisemas kihis ca 10 % sette märgkaalust, aga Võsu paisjärvedes on see suurem, nii ka Muikes (joonis 2.1.1). Muike paisjärves on sette kuivaine sisaldus väga suur juba sette pinnal. Alumistes, mattunud settekihtides on sete kokkusurutum, setteosakeste vahel poorivett vähem ja seega sette kuivaine osakaal suurem.

Kuivaine jaguneb veel omakorda orgaaniliseks, karbonaatseks ja terrigeenseks osaks (joonis 2.1.2). Muike puhul koosnes see peamiselt terrigeensest ainest, mis moodustas oluliselt üle poole kuivainest kõikides kihtides. Kaltsiumkarbonaatide sisaldus oli suhteliselt väike. Muike paisjärve sete on peamiselt mineraalne (hiljuti moodustunud).

**Joonis 2.1.1.** Muike paisjärve sette kuivaine sisaldused (% märgkaalust).

**Joonis 2.1.2.** Muike paisjärve sette kuivaine üldkoostis.

Muike paisjärve fosforivormide summa pindmises 12 cm paksuses settekihis oli 3300-4100 μg P/g kuivaines (KA; joonised 2.1.3 ja 2.1.4). Võrreldes teiste Eesti järvedega on sette pindmise kihi fosforisisaldus üks suurimaid. Sarnane on nt Põlva paisjärves fosfori fraktsioonide summa (suurim sisaldus 3626 μg P/g KA).

**Joonis 2.1.3.** Fosforifraktsioonide jaotus Muike paisjärve sette kuivaines.

**Joonis 2.1.4.** Fosforifraktsioonide protsentuaalne jaotus Muike paisjärve sette kuivaines.

Muike ja ka teistele paisjärvedele on eripärane raua ja alumiiniumiga seotud P fraktsioonide suur osakaal sette kõikides profiilides. Tavaliselt domineerib järvede settes orgaanilise ainega seotud fosfor. Labiilse, kergesti vette tagasilahustuva fosfori osakaal on sarnane paljudes Eesti järvede omaga – mõned protsendid üldkogusest. Lubiainetega seotud P kogus on suhteliselt suur. Settefraktsioonide summa on fosfori üldkogusega väga lähedase väärtusega. Muike paisjärvele on iseloomulik, et mineraalainetega seotud fosfor on suure osakaaluga. See tähendab ka, et kuigi sete on väga fosforirikas, on see seotud. Kui järves valdab kauakestvalt hapnikupuudus, siis võib olukord muutuda ja settest lahustub fosforit liigses koguses vette.

### 2.2. Reooja paisjärve sette koostis ja fosfori fraktsioonid

Reooja paisjärves on pealmises 12 cm paksuses settekihis 197 gP/m2 märjas settes. Selline settekiht on oletatavasti aineringes aktiivne. Sellises kihis P koguhulga saab teada, kui arvestada sette levikut. Kui palju aga sellest tegelikult järve veesambasse ja Võsu jõkke kandub sõltub vee- ja ainebilansi arvutuste tulemustest. Hinnangu andmisele aitavad kaasa fosfori fraktsioneerimise ja inkubatsioonikatse tõlgendamised.

Tavapäraselt on sette kuivainesisaldus madalaim sette kõige pindmisemas kihis (ca 10 % sette märgkaalust), aga Võsu paisjärvedes on see suurem, nii ka Reoojas (joonis 2.2.1). Alumistes, mattunud settekihtides on sete kokkusurutum, setteosakeste vahel poorivett vähem ja seega sette kuivaine osakaal suurem.

Sette kuivaine jaguneb veel omakorda orgaaniliseks, karbonaatseks ja terrigeenseks osaks (joonis 2.2.2). Reooja paisjärve sette kuivaine koosnes ülekaalukalt terrigeensest ainest, mis moodustas pealmistes kihtides kolmveerandi kuivainest. Juba 12 cm sügavusel valdas ülekaalukalt terrigeeenne aine. Kaltsiumkarbonaatide sisaldus oli suhteliselt väike. Ka Reooja paisjärve sete on peamiselt mineraalne (hiljuti moodustunud).

**Joonis 2.2.1.** Reooja paisjärve sette kuivaine sisaldused (% märgkaalust).

**Joonis 2.2.2.** Reooja paisjärve sette kuivaine koostis.

Reooja paisjärve fosforivormide summa pindmises 12 cm paksuses settekihis oli 6500-8200 μg P/g kuivaines (KA; joonised 2.2.3 ja 2.2.4). Võrreldes teiste Eesti järvedega on sette pindmise kihi fosforisisaldus väga suur. Orgaanilise ainega sette tüsedus on väga väike. Sete on ilmselt moodustunud suhteliselt lühikesel ajaperioodil, kuid koormus valgalalt paistab olevat väga suur nii väikse veekogu kohta. Kehva olukorda iseloomustavad ka vee omadused ja fütoplanktoni näitajad.

**Joonis 2.2.3.** Fosforifraktsioonide jaotus Reooja paisjärve sette kuivaines.

**Joonis 2.2.4.** Fosforifraktsioonide protsentuaalne jaotus Reooja paisjärve sette kuivaines.

Ka Reooja paisjärvele on eripärane raua ja alumiiniumiga seotud P fraktsioonide suur osakaal sette kõikides profiilides. Tavaliselt domineerib järvede settes orgaanilise ainega seotud fosfor. Labiilse, kergesti vette tagasilahustuva fosfori osakaal on Reooja settes isegi väiksem, kui tavaliselt. See peaks tähendama, et kuigi P kogused on väga suured, siis fraktsioonid on seotud ja seda väetisaine ressurssi ära ei kasutata. Lubiainetega seotud P kogus on suhteliselt suur. Settefraktsioonide summa on fosfori üldkogusega väga lähedase väärtusega. Kui järves valdab kauakestvalt hapnikupuudus, siis võib olukord muutuda ja settest lahustub fosforit liigses koguses vette.

### 2.3. Oruveski paisjärve sette koostis ja fosfori fraktsioonid

Oruveski paisjärves on pealmises 12 cm paksuses settekihis 95 gP/m2 märjas settes. Sellise paksusega settekihti peetakse aineringes aktiivseks. P koguhulga selle tüsedusega settes saab teada, kui arvestada sette levikut üle kogu järve. Kui palju aga sellest tegelikult järve veesambasse ja Võsu jõkke kandub sõltub vee- ja ainebilansi arvutuste tulemustest. Hinnangu andmisele aitavad kaasa fosfori fraktsioneerimise ja inkubatsioonikatse tõlgendamised.

Tavapäraselt on sette kuivainesisaldus sette kõige pindmisemas kihis ca 10 % sette märgkaalust, aga Võsu paisjärvedes on see suurem, Oruveskis siiski vaid pisut (joonis 2.3.1). Alumistes, mattunud settekihtides on sete kokkusurutum, setteosakeste vahel poorivett vähem ja seega sette kuivaine osakaal suurem.

Oruveski paisjärve sette kuivaine koosnes ülekaalukalt terrigeensest ainest, mis moodustas pealmistes kihtides 40-60% kuivainest (joonis 2.3.2). Kaltsiumkarbonaatide sisaldus on võrreldes teiste järvedega suurem.

**Joonis 2.3.1.** Oruveski paisjärve sette kuivaine sisaldused (% märgkaalust).

**Joonis 2.3.2.** Oruveski paisjärve sette kuivaine koostis.

Oruveski paisjärve fosforivormide summa pindmises 12 cm paksuses settekihis oli 2900-3600 μg P/g kuivaines (KA; joonised 2.3.3 ja 2.3.4). Need kogused on võrreldes teiste Eesti järvedega päris suured. Sarnane on nt Põlva paisjärves fosfori fraktsioonide summa (suurim sisaldus 3626 μg P/g KA).

**Joonis 2.3.3.** Fosforifraktsioonide jaotus Oruveski paisjärve sette kuivaines.

**Joonis 2.3.4.** Fosforifraktsioonide protsentuaalne jaotus Oruveski paisjärve sette kuivaines.

Oruveski paisjärvele on iseloomulik, et fraktsioonide jaotus on pisut ühtlasem võrreldes teiste uuritud paisjärvedega. Siiski on selles orgaanilise aine osakaal väiksem kui enamuses Eesti järvede settes. Proovivõtmise ajal oli samuti aru saada, et Oruveski paisjärve sete sarnaneb teistest enam looduslike järvede settele (pehme, plastiline, ühtlasema konsistentsiga). Labiilse, kergesti vette tagasilahustuva fosfori osakaal on Oruveski sarnane tavalisega (mõni %). Raua, alumiiniumi ja kaltsiumiga seotud P kogus on suhteliselt suur, mis peaks näitama, et fosfor püsib settes. Kui järves valdab kauakestvalt hapnikupuudus, siis võib olukord muutuda ja settest lahustub fosforit liigses koguses vette. Settefraktsioonide summa on fosfori üldkogusele lähedase väärtusega.

### 2.4. Ojaäärse paisjärve sette koostis ja fosfori fraktsioonid

Ojaäärse paisjärves on pealmises 12 cm paksuses settekihis 139 gP/m2 (märg sete). Niisugust pealmist kihti peetakse aineringes aktiivseks. P koguhulga saab järve kohta teada, kui arvestada sette levikut kogu alal. Tegeliku koguse selgitamiseks Võsu jõkke kandumisel tuleks arvestada nii neid koguseid, vette lahustumise määra ja vee- ja ainebilansi arvutuste tulemustest.

Tavapäraselt on sette kuivainesisaldus ca 10 % sette märgkaalust, aga Võsu paisjärvedes on see suurem, ka Ojaäärses (joonis 2.4.1). Alumistes, mattunud settekihtides on sete kokkusurutum, setteosakeste vahel poorivett vähem ja seega sette kuivaine osakaal suurem.

Ojaäärse paisjärve sette kuivaine jagunes pealmises kihis enamvähem võrdselt orgaanilise, karbonaatse ja terrigeense vahel, kuid sügavamates oli valdav terrigeenne aine (joonis 2.4.2).

**Joonis 2.4.1.** Ojaäärse paisjärve sette kuivaine sisaldused (% märgkaalust).

**Joonis 2.4.2.** Ojaäärse paisjärve sette kuivaine koostis.

Ojaäärse paisjärve fosforivormide summa pindmises 12 cm paksuses settekihis oli 4800-5900 μg P/g kuivaines (KA; joonised 2.4.3 ja 2.4.4). See on suur kontsentratsioon, kuid siiski vähem võrreldes Reooja settega.

**Joonis 2.4.3.** Fosforifraktsioonide jaotus Ojaäärse paisjärve sette kuivaines.

**Joonis 2.4.4.** Fosforifraktsioonide protsentuaalne jaotus Ojaäärse paisjärve sette kuivaines.

Ojaäärse paisjärve fraktsioonide jaotus on enam sarnane Reooja ja Muike paisjärvedega. Siiski on selles orgaanilise aine osakaal pisut suurem. Labiilse, kergesti vette tagasilahustuva fosfori osakaal on sarnane tavalisega (mõni %). Nagu neile paisjärvedele omane, on ka siin raua, alumiiniumi ja kaltsiumiga seotud P kogus suhteliselt suur, mis peaks näitama, et fosfor püsib settes. Kui järves valdab kauakestvalt hapnikupuudus, siis võib olukord muutuda ja settest lahustub fosforit liigses koguses vette. Settefraktsioonide summa on fosfori üldkogusele lähedase väärtusega, st jääkfosfori osakaal on suhteliselt väike.

## 3. Uuritud paisjärvede fosforisisalduse muutused inkubatsioonikatsetes

Sette roll veekogu fosforiringes oleneb sellest, kas fosfor seotakse settesse või vabaneb vette. Vabanev fosfor võib moodustada olulise osa veekogu koormusest. Setteosakeste vahele jääb poorivesi, milles lahustunud fosforihulk on võrreldes sette üldfosfori sisaldusega väike (tavaliselt alla 1%). Poorivees lahustunud fosfori hulk võib kordades (sageli 5-20 kordselt) ületada sette kohal oleva vee fosforisisaldust. Seega tekib sette ja vee piirpinnal fosforisisalduste erinevuse tõttu kontsentratsioonigradient, mis põhjustab lahustunud fosfori kandumist pooriveest veesambasse (Boström *et al.,* 1982). Juba osalinegi lahustunud fosfori kandumine järve vette võib oluliselt tõsta selle fosfori­kontsentratsiooni (Søndergaard *et al.,* 2003).

Katsete käigus uuriti paisjärvedest kogutud setteproovide kohal olevas vees P kontsentratsioonide muutusi (Tabel 3.1). Üldiselt on fosfaatide koguste muutused üsna väikesed. Mõnel puhul kontsentratsioonid sette kohal olevas vees suurenevad ja mõnel puhul kahanevad. Samas pole see protsess ajaliselt lineaarse väärtusega. Põhjuseks võivad olla settes toimuvad keemilised muutused, aga ka labori analüüside määramatus. Reooja paisjärves on P kontsentratsioonid suuremad, kui teistes järvedes. See on kooskõlas meie vee omaduste ja fütoplanktoni vaatlustega (vt tabel 4.1. ja 4.3.). Üldiselt näitavad inkubatsioonikatse tulemused, et vaatamata suurtele fosfori kogustele settes jääb see enamuses settesse.

Tabel 3.1. Paisjärvede inkubatsioonikatsetes fosfaatide kontsentratsioonide muutused.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Sette proovis mgPO4/l | 18.02.2025 | 23.02.2025 | 01.03.2025 | 10.03.2025 | 21.03.2025 |
| Muike aereerimata | 0,06 |  | 0,06 | 0,05 | 0,05 |
| Muike aereeritud | 0,06 |  | 0,03 | 0,04 | 0,02 |
| Ojaäärse aereerimata | 0,08 |  | 0,06 | 0,10 | 0,06 |
| Ojaäärse aereeritud | 0,08 |  | 0,06 | 0,07 | 0,06 |
| Oruveski aereerimata |  | 0,04 |  |  | 0,06 |
| Oruveski aereeritud |  | 0,03 |  |  | 0,09 |
| Reooja aereerimata |  | 0,12 |  | 0,12 | 0,11 |
| Reooja aereeritud |  | 0,10 |  | 0,18 | 0,47 |

## 4. Arutelu ja kokkuvõte

Oleme seisukohal, et paisjärvede mõju selgitamiseks allavoolu paiknevatele vooluveekogudele oleks vaja uurida kompleksselt koos vee abiootiliste omaduste ja elustikuga. Niimoodi on võimalik aru saada ökosüsteemi eripäradest, toimemehhanismidest ja ka mõjust teistele veekogudele. Antud juhul näiteks oleks tarvis teada, milline on veesamba kihistusrežiim ja hapnikuolud. Samuti oleks hea saada aimu hapnikusisalduse dünaamikast. Toiteainete vabanemine settest sõltub neist tingimustest. Ühe näite tooksime ka elustikust. Oluline on teada informatsiooni veeõitsengutest, fütoplanktoni indikaatorliikidest. Fotosünteesi intensiivsus võib muuta vee keskkonda oluliselt. Me tegime vee omaduste mõõtmisi ja fütoplanktoni analüüsi lisaks tellitud töödele. Tabelites 4.1 ja 4.2 on vee omadused, mida mõõtsime multisensoriga YSI Pro DSS kõikidest uuritud paisjärvedest ning tabelis 4.3 on toiteainete sisaldused. Kuigi tegemist on madalate järvedega, on neis kõigis veesammas suvel kihistunud ja hapnikuolud kehvad – pinnal suur üleküllastus (va sügisel Ojaäärse) ja põhjalähedases kihis on hapnikku vähe. See talv oli tavalisest erinev, jääd oli lühikest aega ja veevahetus intensiivne. Ilmselt seepärast olid üllatuslikult talvised veesamba omadused paremad suvistest. Toiteainete sisalduste ökoloogilise kvaliteedi taset hinnatakse järvedes kõikide kasvuperioodi keskmiste väärtuste alusel. Selle tõtu ei saa talviseid väärtusi rangelt võttes arvestada, kuid orienteeruv hinnang sobib nt Reooja muude vaatluste tulemustega. Lisame siinkohal võrdluseks vooluveekogude P kontsentratsioonide piirväärtused hindamaks ökoloogilist kvaliteeti: väga hea <0,05; hea 0,05-0,08; kesine >0,08-0,1; halb >0,1-0,12; väga halb >0,12. Arusaadavatel põhjustel on vooluveekogude piirväärtused leebemad, kuid ka neid arvestades on üldfosfori kontsentratsioonid Oruveskis ja Reoojas väga halval tasemel.

Tabel 4.1. Vee omadused paisjärvedes 2024. a.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Kiht, m | Temp. °C | O2% | pH | Erijuhtivus, µS/cm |
|  | Muike 1.06.2024 | | | |
| 0,3 | 22,4 | 148,7 | 9,11 | 301,5 |
| 1 | 19,6 | 120 | 8,64 | 333 |
| 2 | 13,5 | 14,1 | 7,65 | 327,4 |
| 3 | 9,2 | 6,6 | 7,6 | 300,4 |
|  | Oruveski 26.06.2024 | | | |
| 0,3 | 22,5 | 128 | 8,77 | 369 |
| 1 | 20 | 122 | 8,68 | 370 |
| 2 | 17,6 | 67 | 8,09 | 390 |
| 2,5 | 16,4 | 58 | 8,05 | 414 |
|  | Reooja 11.07.2024 | | | |
| 0,3 | 21,4 | 187 | 9,62 | 220 |
| 1 | 18,5 | 100 | 8,03 | 250 |
| 2 | 15 | 20 | 7,54 | 262 |
| 3 | 11,1 | 6,4 | 7,65 | 360 |
|  | Ojaäärse 19.09.2024. | | | |
| 0,3 | 13,2 | 29 | 7,12 | 313 |
| 1 | 11,4 | 19 | 6,97 | 406 |

Tabel 4.2. Vee omadused paisjärvedes 2025. a.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Kiht, m | Temp. °C | O2% | pH | Erijuhtivus, µS/cm |
| Reooja 22.02.2025 | | | | |
| 0,3 | 0,7 | 93,7 | 7,92 | 258,3 |
| 1 | 0,3 | 93,4 | 7,77 | 256,6 |
| 2,5 | 0,6 | 89,6 | 7,69 | 251,2 |
| Oruveski 22.02.2025 | | | | |
| 0,3 | 1,4 | 88,4 | 7,64 | 294,7 |
| 1 | 2 | 90,8 | 7,8 | 350 |
| 2,5 | 2,4 | 90,7 | 7,85 | 376 |
| Ojaäärse 17.02.2025 | | | | |
| 0,3 | 0,4 | 91,9 | 7,81 | 191,6 |
| Muike 17.02.2025 | | | | |
| 0,3 | 0,1 | 80,9 | 7,56 | 263,4 |
| 1 | 1,5 | 93,1 | 2 | 272,5 |
| 2 | 2,1 | 91,7 | 7,59 | 306 |
| 3 | 2,3 | 90,4 | 7,61 | 322,6 |

Tabel 4.3. Toiteainete sisaldused uuritud paisjärvede vees seisuveekogude S2 tüüpi klassifikatsiooni järgi. Kvaliteedi klassid: roheline – hea; kollane – kesine; punane – väga halb.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Järv | Kuupäev | N-NO3 mgN/l | üldN, mg/l | P-PO4 mgP/l | üldP, mgP/l |
| Muike | 17.02.2025 | 1,41 | 2,75 | 0,059 | 0,06 |
| Ojaäärse | 17.02.2025 | 0,83 | 2,3 | 0,079 | 0,08 |
| Oruveski | 23.02.2025 | 1,92 | 2,95 | 0,047 | 0,17 |
| Reooja | 23.02.2025 | 0,39 | 1,17 | 0,118 | 0,15 |

Enamus fütoplanktoni näitajate väärtused olid iseloomulikud probleemsetele järvedele (Tabel 4.4.). Biomassi järgi ei ole hinnangu skaalat kehtestatud, kuid nimetame, et Eesti järvede keskmine on ca 5 g/m3. Veeõitsengud olid Muike ja Reooja paisjärvedes. Muikes oli juunis ülekaalukas dominant rohevetikas *Pandorina morum* ja juulis sinivetikas *Planktothrix agardhii.* Viimane võib ka toksiine toota. Reoojas oli väga intensiivne veeõitseng, mida põhjustas potentsiaalselt toksiline sinivetikas *Dolichospermum circinalis*. Oruveskis ja Ojaäärses olid kooslused iseloomulikud suurtaimedest rikastele järvedele, kuid oli heitveele iseloomulikke silmviburvetikaid.

Tabel 4.4. Fütoplanktoni näitajad uuritud paisjärvedes 2024. a. ja ökoloogilise seisundi hinnangud vastava keskkonnaministri määruse järgi (Pinnaveekogumite…, 2020). Roheline – hea; kollane – kesine; oranž – halb; punane – väga halb. Hinnang antud Veepoliitika Raamdirektiivi järvetüübi S2 järgi (madalad, keskmise veekaredusega järved).

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Näitaja | Muike 1.06.24 | Muike 11.07.24 | Oruveski 26.06.24 | Reooja 11.07.24 | Ojaäärse 19.09.24 |
| Fütoplanktoni biomass, g/m3 | 19,8 | 11,8 | 6,2 | 38,8 | 5,5 |
| Koondindeks | 4,5 | 5,3 | 12 | 9 | 3,67 |
| Ühtluse indeks | 0,3 | 0,24 | 0,45 | 0,03 | 0,79 |
| Koosluse hinnang | halb | halb | kesine | väga halb | hea |
| Liikide arv loendusproovis | 24 | 21 | 11 | 8 | 12 |
| Dominandid | *Pandorina morum, Peridinium sp., Mallomonas sp. Dinobryon sociale* | *Planktothrix agardhii, Peridinium sp., Mallomonas sp., Cryptomonas sp.* | *Cryptomonas sp.* | *Dolichospermum circinalis* | *Cryptomonas sp., Synura sp., Mallomonas sp., Trachelomonas sp.* |

Üldistavalt nimetame, et uuritud paisjärvede setted on võrreldes Eesti looduslike järvede ja varem uuritud paisjärvedega võrreldes üsna erinevad. Settes on peamise toiteaine, fosfori kontsentratsioonid väga suured. Sette fosfori fraktsioonides on väga suur osakaal seda toiteainet siduvatel elementidel (raud, alumiinium, kaltsium) ja vette näib lahustuvat suhteliselt väikesed kogused. Samas on orgaanilise aine kogus väike, mis tähendab, et ka bakteriaalne tegevus ei muuda oluliselt fosfori liikumist vette. Täpsemat arvutust sisekoormuse mõjuks allavoolu on raske teha, sest pole teada, millised tingimused valdavad veesambas. Kui praegu väga suur rauaga seotud fosfori kogus jääks hapnikuta, siis muutub see element kahevalentseks ja enam ei seo fosforit. Redokspotentsiaali muutused mõjutavad ka teiste fosfori fraktsioonide lahustuvust vette.

# Kirjandus

Boström, B., Jansson, M. & C. Forsberg. 1982. Phosphorus release from lake sediments. Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol. 18. 5-59.

Heiri, O., Lotter, A. F. & G. Lemcke. 2001. Loss of ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. Journal of Paleolimnology, 25:101-110.

Hupfer, M., Gachter, R. & R. Giovanoli, 1995. Transformation of phosphorus species in settling seston and during early sediment diagenesis. Aquatic Sciences, 57:305-324.

Murphy, J. & I. P. Riley, 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Analytica Chemica Acta, 27:31-36.

Paludan, C. ja H. S. Jensen. 1995. Sequential extraction of phosphorus in freshwater wetland and lake sediment: Significance of humic acids. Wetlands. 15. 365-373.

Palo, M., Ott, I. (vastutavad täitjad). 2020. Kaiavere, Kaiu, Raigastvere, Tamula järvede ning Ähijärve uurimuslik seire mittehea seisundi põhjuste täpsustamiseks, seisundi parandamiseks vajalikud meetmed ja ökoloogilise seisundi hindamissüsteemi korrigeerimise vajadus. Kobras AS, Eesti Maaülikool. Tellija Keskkonnaamet. Käsikiri. 203 lk.

Pinnaveekogumite nimekiri, pinnaveekogumite ja territoriaalmere seisundiklasside määramise kord, pinnaveekogumite ökoloogiliste seisundiklasside kvaliteedinäitajate väärtused ja pinnaveekogumiga hõlmamata veekogude kvaliteedinäitajate väärtused.RT I, 21.04.2020, 61.

Psenner, R., Puccsko, R. & M. Sager, 1984. Die Fraktionierung organicher und organicher Phosphorverbindungen von Sedimenten: Versuch einer Definition ökologisch wichtiger Fraktionen. Arch. Hydrobiol. Suppl., 70:111-155.

Søndergaard, M., Jensen, J. P. & E. Jeppesen, 2003. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. Hydrobiologia, 506-509:135-145.