

# Vesijärven Enonselän fosforin kierto, vuo ja poistopotentiaali

Tutkimusraportti Päijät-Hämeen Vesijärvisäätiölle

2024

Soila Silvonen

Oona Lehtinen

Tom Jilbert

Jukka Horppila

Leena Nurminen



**HELSINGIN YLIOPISTO**

**BIO- JA YMPÄRISTÖTIEEELLINEN TIEDEKUNTA**

## Sisällys

1. Johdanto.....	3
1.1. Fosforin poiston tehostaminen osaksi Enonselän kunnostusta? .....	3
1.2. Kymijärven alusvesiselvitykset pohjana Enonselälle.....	3
1.3. Matalien ja syvien alueiden yhteys fosforin kierrossa.....	4
1.4. Selvitystutkimuksen tavoitteet.....	5
2. Aineisto ja menetelmät.....	6
2.1. Näytteenotto ja laboratorioanalyysit.....	6
2.1.1. Vesinäytteet.....	7
2.1.2. Sedimentti- ja huokosvesinäytteet.....	7
2.2. Aineiston laskelmat.....	8
2.2.1. Fosforivuot pohjanläheiseen veteen.....	8
2.2.2. Fosforinpoistopotentiaali alusvettä pumppaamalla.....	9
2.2.3. Metadata-analyysi: Nürnbergin regressio.....	10
3. Tulokset ja tulosten tarkastelu.....	11
3.1. Mittaukset Enonselällä.....	11
3.1.1. Lämpötilakerrostuminen ja happi.....	11
3.1.2. Vesipatsaan fosfori ja rauta.....	12
3.1.3. Sedimentti.....	23
3.1.4. Kuiva-aineen, kokonaisfosforin ja rautasidonnaisen fosforin bruttosedimentaatio .....	25
3.2. Laskelmat ja alusveden poisjohtamisen kunnostuspotentiaali Enonselällä .....	27
3.2.1. Fosforivuo pohjanläheiseen veteen eri näytteenottopisteillä.....	27
3.2.2. Fosforinpoistopotentiaali alusvettä poisjohtamalla.....	29
3.2.3. Nürnbergin regressiojärvet: järvien ominaisuuksien ja kunnostustuloksen yhteys sekä soveltaminen Enonselän tapauksessa .....	30
4. Yhteenveto ja johtopäätökset.....	32
5. Lähteet.....	34

## 1. Johdanto

### 1.1. Fosforin poiston tehostaminen osaksi Enonselän kunnostusta?

Enonselän päällysveden fosforipitoisuus ylittää yhä hyvän ekologisen tilan edellyttämän enimmäispitoisuuden (18 µg/l) ja järvioltaassa esiintyy mm. sinileväkukintoja. Sisäinen fosforikuormitus on arvioitu huomattavaksi rehevyyttä ylläpitäväksi tekijäksi Enonselällä, ja sitä on pyritty hallitsemaan esimerkiksi syvänteiden ilmastuksella sekä hoitokalastuksella. Vaikka kehityssuunta menneinä vuosikymmeninä on ollut kohti parempaa ja tuottavan kerroksen fosforipitoisuus on laskenut huippuvuosista, Enonselällä ei viime vuosina ole kunnostustoimista huolimatta havaittu selvää käännettä rehevästä karumpaan tilaan. Hidas karuuntumiskehitys on toisaalta luonnollista pitkän rehevöitymishistorian jälkeen, mutta toisaalta tämä voi myös olla osoitus siitä, että fosforin kierron vähentämiseksi järvessä ja siten kunnostumisen nopeuttamiseksi ei ole vielä löydetty sopivia keinoja.

Syvänteiden hapetuksesta ei tutkimusten mukaan esimerkiksi ole ollut apua Enonselän rehevyyden vähentämisessä, sillä se on pikemminkin lisännyt fosforin kiertoa systeemissä (Niemistö ym. 2016, 2020). Näin ollen fosforin poistamiseen perustuva menetelmä kuten alusveden pumppaaminen voisi paremmin tukea Enonselän karuuntumiskehitystä osana kunnostusprosessia. Alusveden poisjohtamisen teho kunnostusmenetelmänä perustuu fosforin kertymiseen korkeiksi pitoisuuksiksi syvien alueiden pohjanläheiseen veteen etenkin kesäkaudella, kun vedessä ja sedimentissä tapahtuva orgaanisen aineen hajotustoiminta on vilkkaimmillaan ja alusvesi menee hapettomaksi. Perinteisesti alusvesi johdetaan järven alajuoksulle, mutta menetelmää on testattu myös suljetun kierron järjestelmänä, jossa pumpattu vesi puhdistetaan ja palautetaan takaisin järveen. Menetelmän kunnostuspotentiaalia ja mitoituksen optimointia on tutkittu sekä suljetun kierron sovellutusta pilotoitu jo Lahden Kymijärvellä (Nurminen ym. 2020; Silvonen ym. 2021, 2022).

### 1.2. Kymijärven alusvesiselvitykset pohjana Enonselälle

Kymijärven Myllypohjan altaalla tehtiin vuosina 2017 ja 2018 esiselvityksiä, joissa arvioitiin alusveden poisjohtamisen fosforinpoistopotentiaalia, vaikutuksia järvioltaan lämpötilakerrostumiselle sekä alusveden pumppauksen optimointia molemmat edellä mainitut tekijät huomioiden (Silvonen ym. 2021). Tutkimuksessa todettiin, että sovittamalla alusveden pumppausvirtaama fosforin diffuusionopeuteen sedimentistä pohjanläheiseen veteen on mahdollista köyhdyttää järvioltaan fosforivarastoja tehokkaasti, eikä tämä todennäköisesti aiheuta kesäkerrostuneisuuden purkautumista kyseisellä kohteella, kun alusveden poistuma kesän aikana on noin 40 % sen tilavuudesta.

Fosforipoistuman vaikutusta Myllypohjan tilaan arvioitiin paitsi fosforitaseen avulla, myös hyödyntämällä Nürnbergin (2020) empiiriseen aineistoon pohjautuvaa regressiokaavaa. Kaava kuvaa alusvettä poisjohtamalla poistetun fosforimassan suhdetta järven päällysveden kokonaisfosforipitoisuuden laskuun kunnostusaikana valitulla joukolla järviä:

$$TP_{epi}Change = 0,471 - 0,331 \log(total\ areal\ export)$$

(1)

jossa  $TP_{epi}Change$  = päällysveden kokonaisfosforipitoisuuden prosentuaalinen muutos kunnostuksen päätyttyä, ja  $total\ areal\ export$  = alusveden mukana poistetun fosforin määrä pinta-alayksikköä kohden.

Kaavan avulla laskettiin Myllypohjalle tarvittava fosforipoistuma toivotun päällysveden fosforipitoisuuden saavuttamiseksi, ja edelleen kuinka monena vuonna Myllypohjan alusvettä olisi pumpattava fosforin diffuusionopeuteen sovitetulla virtaamalla, jotta oletettavasti päällysveden

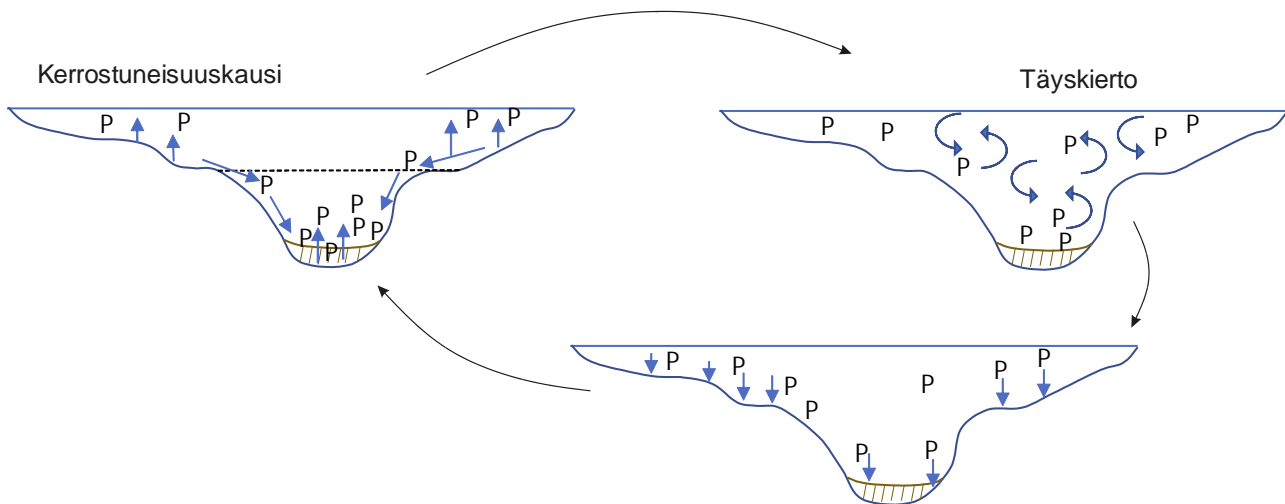
kokonaisfosforipitoisuus laskisi halutun raja-arvon alle. Koska Myllypohja vastaa morfologisilta perusominaisuuksiltaan Nürnbergin (2020) tarkastelemissa järviä (mm. pinta-ala, morfometrinen indeksi), kaavan käyttöä arviointityökaluna voidaan Myllypohjan tapauksessa pitää perusteltuna.

Alusveden poisjohtamisen kunnostuspotentiaalin kartoitukseen Vesijärven Enonselällä voidaan käyttää lähtökohtana samankaltaista periaatetta kuin Kymijärven Myllypohjalla: selvitetään fosforin vuo alusveteen kerrostuneisuuskaudella, lasketaan mahdollinen poistoteho vuohon ja alusveden tilavuuteen sovitetulla alusveden pumppausvirtaamalla, ja arvioidaan saatujen poistumien vaikutusta järven tilan kehitykseen. Koska Enonselkä on kuitenkin sekä pinta-alansa että maksimisyvyytensä osalta huomattavasti suurempi järviällä kuin Myllypohja, on kunnostuspotentiaalin ja etenkin odotettavissa olevien tulosten arvioinnissa tiettyjä haasteita Myllypohjaan verrattuna. Esimerkiksi Nürnbergin (2020) regressio (kaava 1) perustuu joukolle järviä, joiden pinta-alat ovat huomattavasti pienempiä (0,05–5,7 km<sup>2</sup>) kuin Enonselän (32 km<sup>2</sup>), ja jotka ovat myös suhteessa syvempiä (morfometrinen indeksi 2,5–47,6 m/km vs. Enonselän 1,2 m/km). Näin ollen regression soveltuvuutta Enonselän kaltaiselle järviältaalle on tarkasteltava kriittisesti.

### *1.3. Matalien ja syvien alueiden yhteys fosforin kierrossa*

Matalilta alueilta tulevan sisäisen fosforikuormituksen on havaittu olevan myös kerrostuvissa järvissä kasvukaudella merkittävämpi tekijä päällysveden leväsiintymien säätelijänä kuin hapettomien syvänteiden (Tammeorg ym. 2017; Zhao ym. 2024). Niemistö ym. (2022) totesivat AFRY:n Vesijärvisäätiölle tuottamassa selvityksessä, että myös Enonselällä tärkein lähde sisäiselle fosforikuormitukselle kesäkaudella ovat matalat sekä harppauskerroksen tuntumassa olevat syvyyvyöhykkeet. Toisaalta tiedetään, että järvien sedimenttiä kulkeutuu matalilta alueilta syvänteisiin eroosion ja painovoiman vaikutuksesta (Blais & Kalff 1995; Niemistö ym. 2020), ja sen sisältämää fosforia vapautuu edelleen alusveteen mikrobitoiminnan seurauksena etenkin hapettomien jaksojen aikana kesäisin. Matalien alueiden ja syvänteiden välillä on siten ravinnedynamiikan kannalta yhteys sedimentin kulkeutumisen kautta.

Vaikka ravinteiden kulkeutuminen alusvedestä tuottavaan kerrokseen on kerrostuneisuuskaudella pääosin vähäistä, ei matalien alueiden, päällysveden ja syvänteiden välinen yhteys myöskään todennäköisesti ole yksisuuntainen. Nürnberg (1985) on osoittanut, että etenkin rautapitoisessa järvessä veden pintakerroksen fosforipitoisuus nousee täyskierron aikana, kun alusveteen kertynyttä fosforia pääsee sekoittumaan koko vesipatsaaseen; varsinkin rautasidonnaisen fosforin pitoisuus nousee veden pintakerroksissa huomattavasti. Vesimassojen sekoittuessa sekä vertikaalisesti että horisontaalisesti onkin mahdollista, että osa tästä alusvesiperäisestä fosforista myös sedimentoituu lopulta matalille alueille (Kuva 1), ja tällä mekanismilla syvänteet voivat puolestaan ruokkia matalia alueita ja osaltaan ylläpitää näiltä tulevaa sisäistä fosforikuormitusta kasvukausilla.



**Kuva 1.** Fosforin teoreettinen kierto järven vesipatsaan ja pintasedimentin välillä suhteessa lämpötilakerrostumiseen.

Järvien kunnostuksen kannalta tällaisen ilmiön tunnistaminen olisi merkittävä edistysaskel, sillä se osoittaa, että fosforin poistaminen järven miltä alueelta tahansa hyödyttää koko ekosysteemiä vähentämällä siellä kiertävän, leväkukintoja ruokkivan fosforin kokonaismäärää. Tämä vahvistaisi myös, että alusveden pumppaaminen syvänteistä esim. kesäaikaan voi olla kannattava menetelmävaihtoehto, sillä fosforia on tehokkainta poistaa sieltä missä sitä on suurimpina pitoisuuksina. Siksi syvänteistä peräisin olevan fosforin dynamiikan selvittäminen tarjoaa myös Enonselällä työkalun alusveden poiston vaikuttavuusarviointiin. Syvänteiden yhteyttä matalien alueiden sisäiseen ravinnekuormitukseen ei ylipäätään ole aiemmin tutkittu, joten tämä selvitys tuo myös uutta, arvokasta tietoa.

#### 1.4. Selvitystutkimuksen tavoitteet

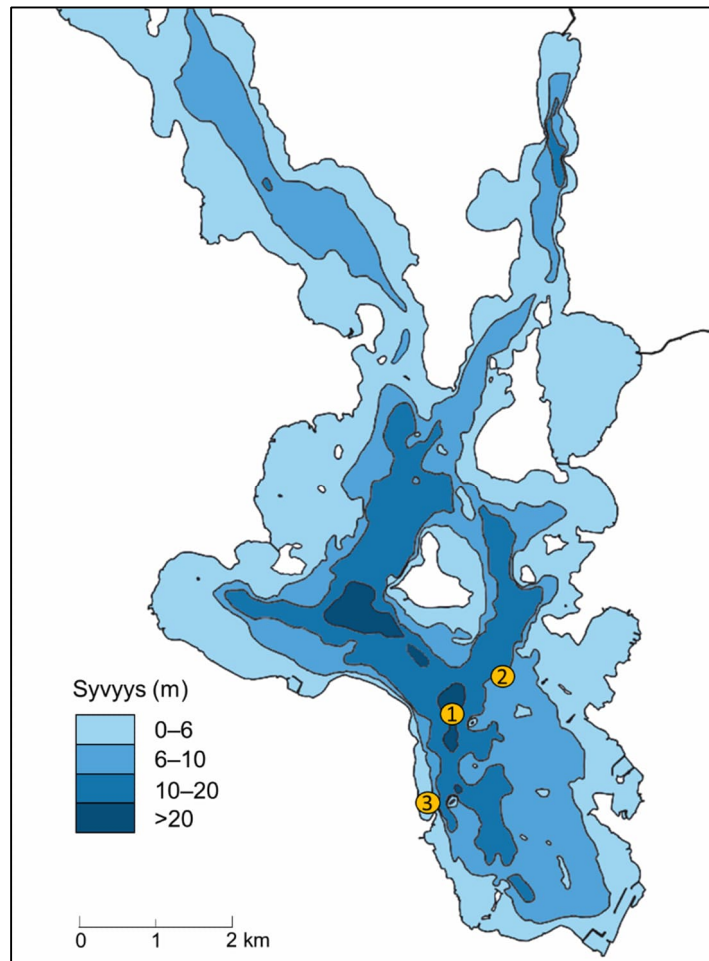
Tässä esiselvitystutkimuksessa kartoitettiin Enonselän vesipatsaan fosfori- ja rautapitoisuudet, niiden kierto sekä fosforivuo hapettoman syvänteen pohjanläheiseen veteen sen laskemiseksi, paljonko järvioltaasta voitaisiin poistaa fosforia pohjanläheistä alusvettä pumppaamalla joko suljetun kierron puhdistusjärjestelmän läpi tai alajuoksulle. Fosforivuon määrittämiseen sisällytettiin sedimentin fosforin liukenemisen lisäksi myös partikkelimainen fosfori bruttosedimentaationa, sillä resuspensio on merkittävä sisäisen kuormituksen mekanismi, ja myös uusi sedimentoituva aines tuo pohjanläheiseen veteen lisää fosforia.

Tutkimuksessa arvioitiin samalla, miten alusveden fosforin poistaminen voi vaikuttaa Enonselän ekologiseen tilaan. Tätä varten Enonselällä kerättiin vuonna 2023 näytteitä vesipatsaasta ja sedimentistä fosforin ja raudan vuodenaikaisdynamiikan seuraamiseksi syvännepisteeltä ja kahdelta matalammalta alueelta. Tavoitteena oli havainnoida, kuinka merkittävässä määrin syvänteiden alusveteen kertyvää fosforia kulkeutuu täyskiertojen aikana kerrostumattomille alueille, eli missä määrin hapettomien syvänteiden sisäkuorma voi vaikuttaa myös matalien alueiden sisäiseen kuormitukseen. Lisäksi pyrittiin arvioimaan Nürnbergin (2020) regressioyhtälön käyttökelpoisuutta työkaluna Enonselän tapauksessa pohjanläheisen veden pumppaamisen tehon arvioimiseksi. Koko selvitystutkimuksen tarkoituksena oli näillä keinoilla selvittää, missä määrin alusveden pumppaamisella voitaisiin nopeuttaa Enonselän toipumista rehevöitymisestä.

## 2. Aineisto ja menetelmät

### 2.1. Näytteenotto ja laboratorioanalyysit

Fosforin dynamiikkaa tarkasteltiin Enonselällä kolmella eri syvyysvyöhykkeellä sijaitsevalla näytteenotopisteellä: 1) lämpötilakerrostuva alue (Lankiluodon syvänte), syvyys 30 m, 2) välivyöhyke (kerrostuneisuuskaudella pohja harppauskerroksen tuntumassa), syvyys 9 m, 3) matala (kerrostumaton) alue, syvyys 6 m (Kuva 2). Välivyöhykkeen ja matalan alueen näytteenotopisteet valittiin Enonselän alueelta Lankiluodon syvänteen läheisyydestä mahdollisimman edustavilta pakoilta välttäen kuitenkin selkeitä eroosiopohjia, joille ei kerry lainkaan löyhää sedimenttiä.



Kuva 2. Näytteenotopisteet Enonselällä (1-3). Syvyysaineisto: © Traficom (09/2021).

Näytteet otettiin vuonna 2023 kaikilta kolmelta näytteenotopisteeltä kaikkina järven lämpötilakerrostuneisuuskausina yhteensä 8 kertaa: talvikerrostuneisuus jääpeitteisenä aikana (helmikuu; 27.2.), kevättäyskierto (toukokuu; 26.5.), 2 viikon välein kesäkerrostuneisuuskaudella (heinä-elokuu; 12.7, 26.7., 10.8., 24.8., 7.9.) ja syystäyskierto (lokakuu; 23.10.). Lisäksi täyskiertojen aikana sekä kesäkerrostuneisuuskaudella kaikille näytteenotopisteille asennettiin sedimenttikeräimet n. 1 m etäisyydelle pohjasta (4 rinnakkaista putkea, joiden halkaisija 5,4 cm) ankkurin ja kohon avulla. Keräimiin kertynyt materiaali (sedimentaationäyte) otettiin talteen muun näytteenoton yhteydessä aina noin 2 viikon kuluttua keräinten asettamisesta (edellä mainitut näytteenotopäivät touko-lokakuussa). Keväällä ja syksyllä sedimenttikeräimet asennettiin heti, kun selkeä kerrostuneisuuden purkautuminen oli automaattimittausasemilla havaittu.

Kesäkerrostuneisuuskausi määritettiin alkaneeksi, kun vesipatsas oli riittävän stabiilisti kerrostunut ja alusvesi selkeästi hapeton. Keräinten viennin sekä näytteenottojen yhteydessä vesipatsaasta mitattiin pinnasta pohjaan jokaiselta metriltä lämpötila ja liukoisen hapen pitoisuus (DO) YSI-6820 -sondilla (YSI Corporation, Yellow Springs, OH, USA).

### 2.1.1. Vesinäytteet

Vesipatsaasta otettiin vesinäytteet Limnos-putkinoutimella ( $V=2,6$  l;  $h=40$  cm) 3 m kokoomanäytteinä pinnasta pohjaan (2 rinnakkaista kokoomanäytettä/syvyysväli), ja kustakin kokoomanäytteestä otettiin seuraavat osanäytteet:

- 1) 250 ml suodattamaton näyte – kokonaisfosfori (TP)
- 2) 100 ml suodattamaton näyte + kestäväinti 1 ml 5,8 M suolahappoa (HCl) – kokonaisrauta (TFe)
- 3) 50 ml suodatettu näyte (ruiskusuodatus, lasikuitusuodatin Macherey-Nagel, läpäisevyys  $<0,4$   $\mu\text{m}$ ) + kestäväinti 500  $\mu\text{l}$  4 M rikkihappoa ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) – liukoinen fosfaattifosfori ( $\text{PO}_4\text{-P}$ )
- 4) 10 ml suodatettu näyte (ruiskusuodatus, lasikuitusuodatin Macherey-Nagel, läpäisevyys  $<0,4$   $\mu\text{m}$ ) + kestäväinti 100  $\mu\text{l}$  67 % typpihappoa ( $\text{HNO}_3$ , NORMATOM® for trace metal analysis) – liukoinen kokonaisfosfori ja -rauta (DP, DFe)
- 5) 1 l suodattamaton näyte (vain 0-3 m syvyysväli) – veden kiintoaine

Osanäytteiden 1 ja 3 TP ja  $\text{PO}_4\text{-P}$  määritettiin spektrofotometrisesti Seal Analytical –analysaattorilla (Viikki, Helsingin yliopisto), osanäytteen 2 TFe määritettiin Metropolilabissa (Viikki). Osanäytteen 4 DP ja DFe määritettiin ICP-MS-analysaattorilla (Kumpula, Helsingin yliopisto). Osanäytteestä 5 suodatettiin kiintoaine laboratoriossa imusuodatusjärjestelmällä esipunnituille GF/F-suodattimille (Whatman, läpäisevyys  $<0,7$   $\mu\text{m}$ ). Suodattimet kuivattiin 105 °C:ssa 2 h ajan, jonka jälkeen punnittiin kiintoaineen kuivamassa. Kuivatut suodattimet poltettiin 450 °C:ssa 2 h ajan ja näin määritettiin orgaanisen aineen pitoisuus hehkutushäviönä (loss on ignition=LOI, %).

Lisäksi kokoomanäytteistä otettiin kerran kussakin kerrostuneisuuden vaiheessa: talvikerrostuneisuus (27.2.), kevättäyskierto (26.5.), kesäkerrostuneisuus (10.8.) ja syystäyskierto (23.10.), partikkelimaisten rautaoksidien sitoman fosforin (Fe-P) näytteet suodattamalla 100-500 ml vettä ruiskulla esihuhdeltujen lasikuitusuodattimen läpi (Macherey-Nagel, läpäisevyys  $<0.4$   $\mu\text{m}$ ). Suodattimet pakastettiin 15 ml sentrifugiputkissa ja kylmäkuivattiin. Kuivatuista suodattimista uutettiin rautaoksidien sitoma fosfori mukailien Ruttenbergin (1992) SEDEX-menetelmän CDB-uuttovaihetta ohittaen Slompin ym. (1996) tavoin  $\text{MgCl}_2$ -välihuuhtelut, sekä lyhentämällä vesihuuhdeluvaihetta: löyhästi sitoutunut fosfori uutettiin ensin pois lisäämällä suodattimen sisältävään sentrifugiputkeen 10 ml 1 M  $\text{MgCl}_2$ -liuosta, minkä jälkeen näytteet jätettiin ravistelijaan 2 h ajaksi, sentrifugoitiin ja kaadettiin liuos pois. Näytteet huuhdeltiin lisäämällä tilalle 10 ml Milli-Q-vettä, jättämällä näytteet ravistelijaan 30 min ajaksi ja sentrifugoimalla sekä kaatamalla huuhteluvesi pois. Varsinainen uutto tehtiin lisäämällä näytteisiin 10 ml natriumsitraatti-bikarbonaatti-natriumditioniittiliuosta (CDB), minkä jälkeen näytteet jätettiin ravistelijaan 8 h ajaksi ja otettiin sitten uute sentrifugoinnin jälkeen talteen. Suodatinten mahdollisten taustapitoisuuksien huomioimiseksi tuloksissa tehtiin myös jokaisen uuttoerän yhteydessä nollanäytteitä, joissa edellä kuvattu käsittely tehtiin huuhdelluille, käyttämättömille suodattimille. Uutteista analysoitiin niiden P-pitoisuus (Fe-P) ICP-MS-analysaattorilla ja muunnettiin vastaaviksi pitoisuuksiksi vesinäytelitraa kohden.

### 2.1.2. Sedimentti- ja huokosvesinäytteet

Jokaisella näytteenottokerralla otettiin kaikilta näytteenottopisteiltä myös kaksi rinnakkaista sedimenttiprofiilia HTH Gravity corer -sedimenttiputkinoutimella (putken halkaisija 9 cm)

pintasedimenttinäytteitä varten, ja lisäksi avovesikaudella syvännepisteen sedimenttiprofiileista kerättiin myös huokosvesinäytteet. Sedimenttiprofiilien päällä olevasta vedestä kerättiin pohjanläheiset vesinäytteet, jotka jaettiin ja käsiteltiin osanäytteiksi yllä olevien kohtien 1-4 mukaisesti. Huokosvesinäytteet otettiin putkessa olevien reikien läpi sedimenttiprofiilista 0-10 cm syvyydeltä 2 cm välein käyttäen 15 ml ruiskuja ja Rhizon-suodattimia (Rhizosphere Research Products, suodatinosan pituus 5 cm, huokoskoko 0,15 µm). Kustakin huokosvesinäytteestä erotettiin kaksi 1 ml osanäytettä erillisiin sentrifugiputkiin ja laimennettiin 10 ml:aan Milli-Q-vedellä. Toinen osanäyte (PO<sub>4</sub>-P) kestäväitettiin 100 µl:lla 4 M rikkihappoa (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ja toinen (DFe) 100 µl:lla 5,8 M suolahappoa (HCl). Huokosvesinäytteiden PO<sub>4</sub>-P määritettiin spektrofotometrisesti Seal Analytical – analysaattorilla (Viikki, Helsingin yliopisto), DFe määritettiin Metropolilabissa (Viikki).

Sedimenttiprofiileista viipaloitiin talteen 1 cm paksuinen pintasedimenttikerros. Näytteistä punnittiin laboratorioissa tuoreena osanäyte upokkaaseen, kuivattiin 105 °C:ssa 16 h ja määritettiin näytteen vesipitoisuus märkä- ja kuivamassojen erotuksena. Kuiva-aineen orgaanisen aineen pitoisuus (LOI %) määritettiin hehkutushäviönä polttamalla näytettä 550 °C:ssa 2 h. Loput tuoreesta sedimenttinäytteestä kuivattiin kylmäkuivurilla, ja tästä erotettiin kaksi osanäytettä uuttoja varten. Osanäyte 1 (100-500 mg) uutettiin typpihappomärkäpoltolla lisäämällä näytteeseen 5 ml 65 % typpihappoa (HNO<sub>3</sub>, EMSURE® Reag. Ph. Eur., ISO for analysis) ja kuumentamalla näytteitä 160 °C:ssa 30 min ajan. Uutteet laimennettiin 1 M HNO<sub>3</sub>-pitoisuuteen ja näistä analysoitiin P- ja Fe-pitoisuudet, joita käytettiin estimaatteina sedimentin TP- ja TFe-pitoisuuksille. Osanäytteestä 2 (100 mg) uutettiin pelkistyvien rautaoksidien sitoma fosfori (Fe-P) CDB-menetelmällä kuten kuvattu luvussa 2.1.1. vesipatsaasta suodatettujen Fe-P-näytteiden osalta, ja uute määritettiin ICP-MS-analysaattorilla (Kumpula, Helsingin yliopisto).

Lisäksi kevättäyskierrosta alkaen kaikille näytteenottopisteille asennettiin sedimenttikeräimet n. 1 m etäisyydelle pohjasta (4 rinnakkaista putkea, joiden halkaisija 5,4 cm) ankkurin ja kohon avulla. Keräimiin kertynyt materiaali (sedimentaationäyte) otettiin talteen muun näytteenoton yhteydessä aina noin 2 viikon kuluttua. Materiaali kuivatettiin kylmäkuivurilla ja punnittiin, minkä jälkeen siitä erotettiin kolme osanäytettä. Osanäytteet 1 ja 2 käsiteltiin ja analysoitiin kuten vastaavat osanäytteet pintasedimentistä (ks. edellinen kappale), osanäyte 3 punnittiin upokkaaseen, poltettiin 550 °C:ssa 2 h ajan ja määritettiin tuhkan massan perusteella LOI (%).

## 2.2. Aineiston laskelmat

### 2.2.1. Fosforivuot pohjanläheiseen veteen

Fosforin kokonaisvuo pohjanläheiseen veteen eri näytteenottopisteillä määritettiin kahden tekijän summana: 1) liukoisen PO<sub>4</sub>-P:n diffuusio pintasedimentistä yläpuoliseen veteen (vain syvännepiste), 2) partikkelimaisen fosforin bruttosedimentaatio, joka sisältää sekä resuspendoituneen että uuden sedimentoituvan aineksen. Bruttosedimentaatio määritettiin erikseen myös rautasidonnaiselle fosforille (Fe-P).

1) PO<sub>4</sub>-P:n diffuusio (pH 6:ssa divetyfosfaattina, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) sedimentistä (*F*) laskettiin jokaiselle näytteenottoajankohdalle Fickin 1. lakiin perustuen Boudreaun (1997) mukaan kaavalla

$$F = - \frac{\Phi \cdot D \cdot \Delta C}{\theta^2 \cdot \Delta z} \quad (2)$$

jossa  $\Phi$  = pintasedimentin huokoisuus,  $D$  = lämpötilakorjattu divetyfosfaatin (H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) diffuusiokerroin,  $\theta$  = pintasedimentin huokostilan mutkaisuus, "tortuositeetti",  $\Delta C$  = sedimentti-vesi-rajapinnan pitoisuusero, ja  $\Delta z$  = diffuusioetäisyys sedimentin pintakerroksesta pohjanläheiseen veteen.



Sedimentin huokoisuus  $\Phi$  määritettiin Sarazinin ym. (1995) mukaan pintasedimenttinäytteiden märkä- ja kuivamassoja hyödyntäen

$$\Phi = \left[ 1 + \frac{m_d}{2.5(m_w - m_d)} \right]^{-1} \quad (3)$$

jossa  $m_d$  = sedimenttinäytteen kuivamassa ja  $m_w$  = sedimenttinäytteen märkämassa.

Sedimentin huokostilan mutkaisuus laskettiin Boudreaun (1997) mukaan

$$\theta^2 = 1 - \ln(\Phi^2) \quad (4)$$

Diffuusioyhtälö ei sisällä muiden aineiden kuten raudan ja hapen vaikutusta tarkasteltavan ionin kulkeutumiseen, ja tästä syystä yhtälö voi tuottaa virheellisen arvion fosforin todellisesta diffuusiosta järvessä sellaisilla alueilla ja aikoina, joilla sedimentin pintakerros on hapellinen ja rautaoksidit saattavat estää fosforin kulkeutumista yläpuoliseen veteen sedimentti-vesi-rajapinnan pitoisuusgradientista huolimatta. Tämän tutkimuksen laskelmissa huomioitiin siksi Silvosen ym. (2021) tapaan yllä kuvattu laskennallinen diffuusio syvännepisteellä fosforin kokonaisvuossa ainoastaan sellaisina ajankohtina, joina pohjanläheinen vesi on ollut hapetonta.

**2)** Kokonaisfosforin ja rautasidonnaisen fosforin bruttosedimentaatio määritettiin kaikilta pisteiltä kuiva-aineen bruttosedimentaation (BS) ja sedimenttikeräinnäytteiden fosforipitoisuuden (c) tulona:

$$BS_P = BS \times c \quad (5)$$

### 2.2.2. Fosforinpoistopotentiaali alusvettä pumppaamalla

Fosforipoistuma alusvettä pumppaamalla laskettiin Lankiluodon syvänteen (näytteenottopiste 1) pohjanläheisen veden keskimääräisiä TP-pitoisuuksia hyödyntäen. Koska fosforinpoiston ja veden pumppaamisen välinen hyötysuhde on periaatteessa maksimaalinen, kun fosforia poistetaan samalla nopeudella kuin sitä kertyy pohjanläheiseen veteen eikä vesi ala laimeta pumppauksen vaikutuksesta (Silvonen ym. 2021), tässä tutkimuksessa tarkasteltiin 1) eri pumppausvirtaamilla saatavia fosforipoistumia ( $TP_{exp}$ ) sekä 2) vedenottoputken vaadittavaa vähimmäisvaikutusaluetta ( $A_{TP}$ ) eli sitä, kuinka suuren pohjapinta-alan fosforivuoto riittää ylläpitämään vallitsevaa pohjanläheisen veden TP-pitoisuutta kullakin virtaamalla. Silvosen ym. (2021) laskelmista poiketen fosforin kokonaisvuossa huomioitiin diffuusion ( $F$ ) lisäksi myös partikkelimaisen fosforin vuot luvussa 2.2.1. kuvatun mukaisesti.

$$TP_{exp} = Q \times c \times t \quad (7)$$

jossa  $Q$  = pumppausvirtaama,  $c$  = pohjanläheisen veden TP-pitoisuus ja  $t$  = pumppausaika.

$$A_{TP} = \frac{TP_{exp}}{F + BS} \quad (8)$$

### 2.2.3. Metadata-analyysi: Nürnbergin regressio

Nürnbergin (2020) regressioyhtälöön käytettyä järviaineistoa tarkasteltiin sen arvioimiseksi, määrittääkö jokin järven perustavanlaatuisen morfologinen ominaisuus tai TP-pitoisuus sen vastetta alusveden poisjohtamiseen. Regressiossa käytettyjen järvien (n=11) tiedot saatiin G. Nürnbergiltä henkilökohtaisesti. Tarkastelun kohteeksi valittiin järvien ominaisuuksista pinta-ala, tilavuus, keskisyvyys, suurin syvyys, morfometrinen indeksi ja päällysveden TP-pitoisuus ennen alusveden poisjohtamista.

Järvien ominaisuuksien ja alusveden poisjohtamisella saatujen kunnostustulosten välistä riippuvuutta tarkasteltiin Spearmanin korrelaatiolla kunkin ominaisuuden osalta erikseen. Kunnostustuloksen mittarina käytettiin hyötysuhdeindeksiä, joka laskettiin järvien päällysveden TP-pitoisuuden prosentuaalisen laskun ( $TP_{epi}Change$ ) ja pinta-alasuhteutetun TP-poistuman (*total area export*) suhteena. Suhdeluku kuvaa sitä, kuinka tehokkaasti fosforin poistaminen alusvedestä laski päällysveden TP-pitoisuutta kunnostushankkeen loppuun mennessä.

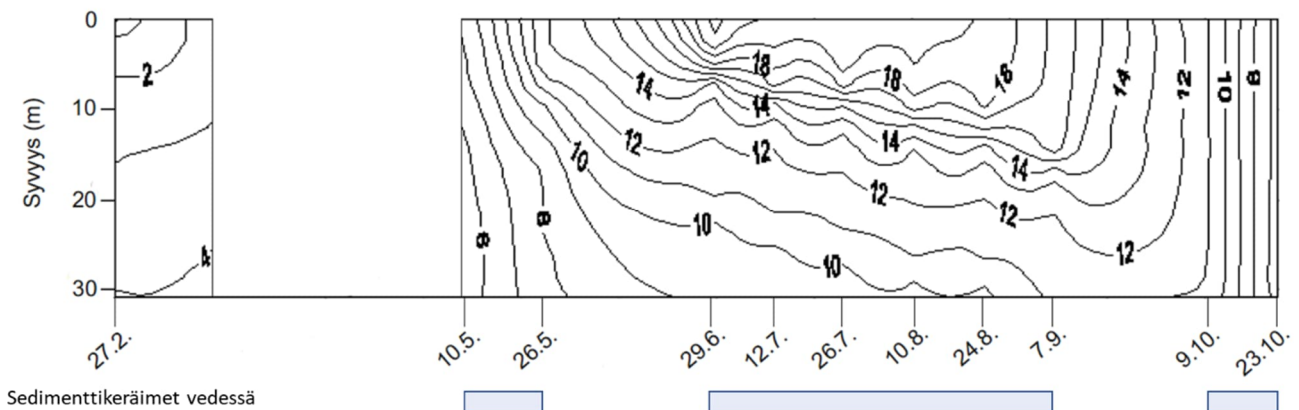
### 3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

#### 3.1. Mittaukset Enonselällä

##### 3.1.1. Lämpötilakerrostuminen ja happi

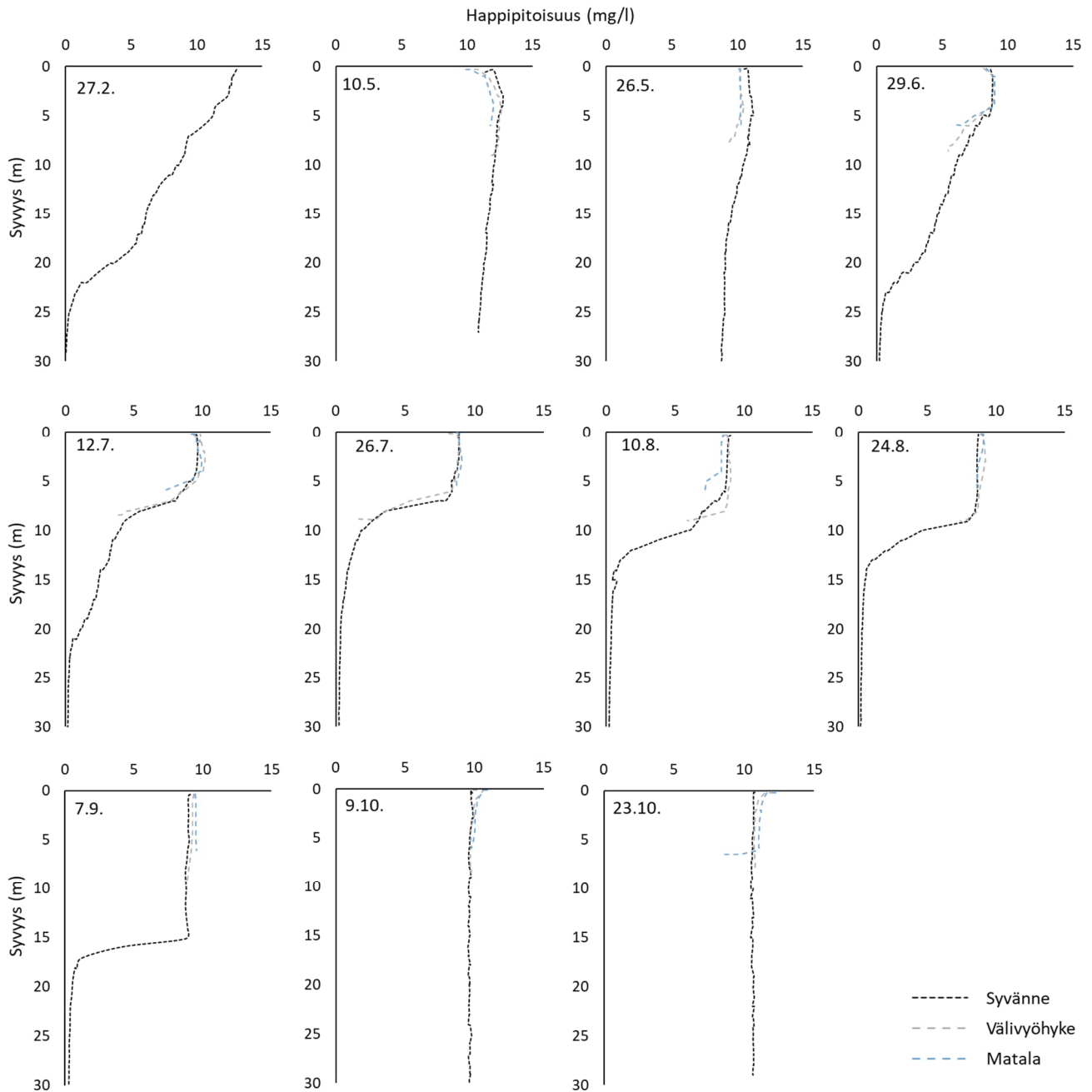
Enonselän vesi oli jääpeitteiseen aikaan tyypillisesti käänteisesti lämpötilakerrostunut, jolloin lämpimin vesikerros (4 °C) oli pohjan lähellä (Kuva 3). Kevättäyskierto oli käynnissä toukokuussa, ja hapeton alusvesikerros muodostui kesäkuun loppupuoleen mennessä. Harppauskerros muodostui noin 10 m syvyyteen, joskin se laski syystäyskiertoa kohden hitaasti syvemmälle, lopulta noin 15 metriin. Lankiluodon syvännealueella (183 533 m<sup>2</sup>) alusveden tilavuus oli tällöin kerrostuneisuuden alkuvaiheessa noin 673 000 m<sup>3</sup>, ja koko Enonselällä (ml. Paimelanlahti ja Vähäselkä, yht. 32 km<sup>2</sup>) noin 29 605 000 m<sup>3</sup>.

Alusveden lämpötila oli kesällä noin 10–12 °C. Syystäyskierto alkoi lokakuun alkupuolella, jolloin vesipatsas oli lämpötilaltaan 7–10 °C (Kuva 3). Näin ollen hapettoman alusvesijakson pituus Enonselällä vuonna 2023 oli noin 3,5 kk (karkeasti 100 päivää).



**Kuva 3.** Enonselän vesipatsaan lämpötilaprofiili vuonna 2023 syvänpisteellä (Lankiluodon syväne) mitattuna, sekä näytteenottopäivämäärät ja sedimenttikeräinten keräysajaksot.

Jääpeitteen alla vesipatsas oli hapeton syvyysvälillä 25–30 m, joskin happipitoisuus laski melko tasaisesti välillä 0–25 m (Kuva 4). Vesipatsas ilmastui kevättäyskierron aikana, mutta kesäkuun loppuun mennessä 25–30 m syvyydellä oli jälleen hapetonta. Heinäkuun puolivälin jälkeen käytännössä koko alusvesi oli hapetonta syystäyskiertoon asti.



Kuva 4. Vesipatsaan happipitoisuus eri mittauspisteillä ja ajankohtina.

### 3.1.2. Vesipatsaan fosfori ja rauta

#### Syväne

Syvänepisteen veden pintakerroksen (0–2 m) kokonaisfosforipitoisuus vaihteli välillä 18–29  $\mu\text{g/l}$ . Korkeimmillaan pitoisuus oli syystäyskierron aikana (Kuva 5) ja matalimmillaan alkukesällä. Keskimääräinen kerrostuneisuuskauden kokonaisfosforipitoisuus pintakerroksessa oli 21  $\mu\text{g/l}$ . Tästä suurin osa oli useimmiten partikkelimuodossa (Kuva 5).

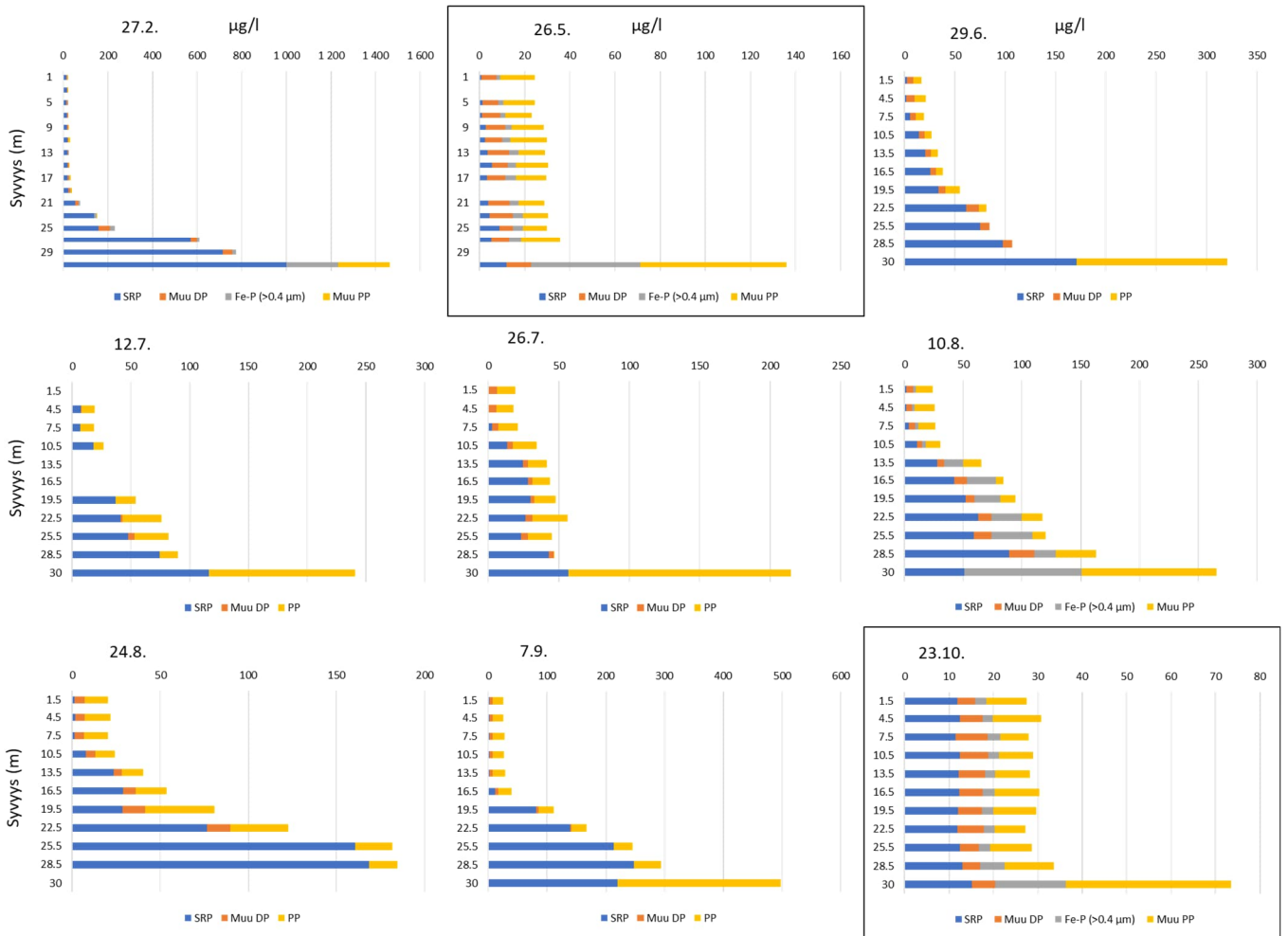
Kesäkerrostuneisuuskaudella päällysveden (0–10 m) kokonaisfosforipitoisuudet vaihtelivat melko vähän kerrosten välillä, vaikkakin päiväkohtaisia eroja oli. Lämpötilan harppauskerroksen alapuolella

pitoisuudet nousivat useimpina mittausajankohtina asteittain, ja samalla liukaisen fosfaattifosforin osuus kasvoi niin, että se muodosti yleensä suurimman osan kokonaisfosforista (Kuva 5). Suurimmillaan pitoisuudet olivat pohjanläheisessä vedessä. Pohjanläheisen vesikerroksen (sedimenttinäytteen päältä mitattu pitoisuus) keskimääräinen kokonaisfosforipitoisuus kesäkerrostuneisuuskaudella oli 307 µg/l. Jos huomioidaan lisäksi sedimentin päällä olevat syvimmät vesikerrokset (27–30 m), oli keskimääräinen pohjanläheinen kokonaisfosforipitoisuus 227 µg/l; tämä syvyysväli on oleellisempi alusveden poisjohtamisen kannalta. Verrattuna mm. 2020-23 Hertta –tietokannassa oleviin velvoitetarkkailunäytteisiin lukemat ovat samansuuntaisia, joskin kesänaikaista vaihtelua esiintyi jonkun verran. Pitoisuuksiin voi vaikuttaa mm. kuinka läheltä sedimentin pintaa vesinäyte on otettu. Talvella, jääpeitteisenä aikana kyseisen syvyysvälin keskimääräinen pitoisuus oli tässä tutkimuksessa 1 502 µg/l (Kuva 5). Samansuuntaisia talviaikaisia lukemia on havaittu myös Enonselän velvoitetarkkailun yhteydessä 2022-2023.

Täyskiertojen aikana vesipatsas oli kokonaisfosforipitoisuuksien osalta melko tasakoosteista. Pitoisuudet olivat jonkin verran korkeampia syystäyskierrrossa (29 µg/l) kuin kevättäyskierrrossa (24 µg/l). Kevät- ja syystäyskierto erosivat toisistaan myös vesipatsaan fosforifraktioiden osuuksien osalta: keväällä fosfaattifosforin osuus kokonaisfosforista oli melko pieni ja hallitsevina fraktioina olivat muu liukoinen fosfori sekä ei-rautasidonnainen partikkelimainen fosfori, kun taas syksyllä yli kolmasosa kokonaisfosforista oli fosfaattifosforia, ja noin kolmasosan muodosti ei-rautasidonnainen partikkelimainen fosfori (Kuva 5). Tämä ei-rautasidonnaisen partikkelimaisen fosforin suhteellisen suuri osuus täyskiirroissa selittyy etenkin keväällä fosforin sitoutumisella kasviplanktoniin, sekä sillä, että harppauskerroksen alapuolelle sedimentoitunut orgaaninen aines päätyy vesimassojen kiertäessä vesipatsaan pintakerrokseen. Syystäyskierrrossa myös fosfaattifosforin pitoisuus kymmenkertistui edeltävään kerrostuneisuuskauteen nähden, kun alusveteen kertynyt liukoinen fosfori sekoittui vesimassojen mukana pinnan läheiseen veteen, mutta ei syksyllä (lokakuussa) enää tehokkaasti sitoudu kasviplanktonbiomassaan perustuotannon vähäisyyden vuoksi. Muun kuin fosfaattimuotoisen liukaisen fosforin osuus kokonaisfosforista oli merkittävin veden pintakerroksissa kerrostuneisuuskaudella sekä kaikissa vesikerroksissa täyskiertojen aikana.

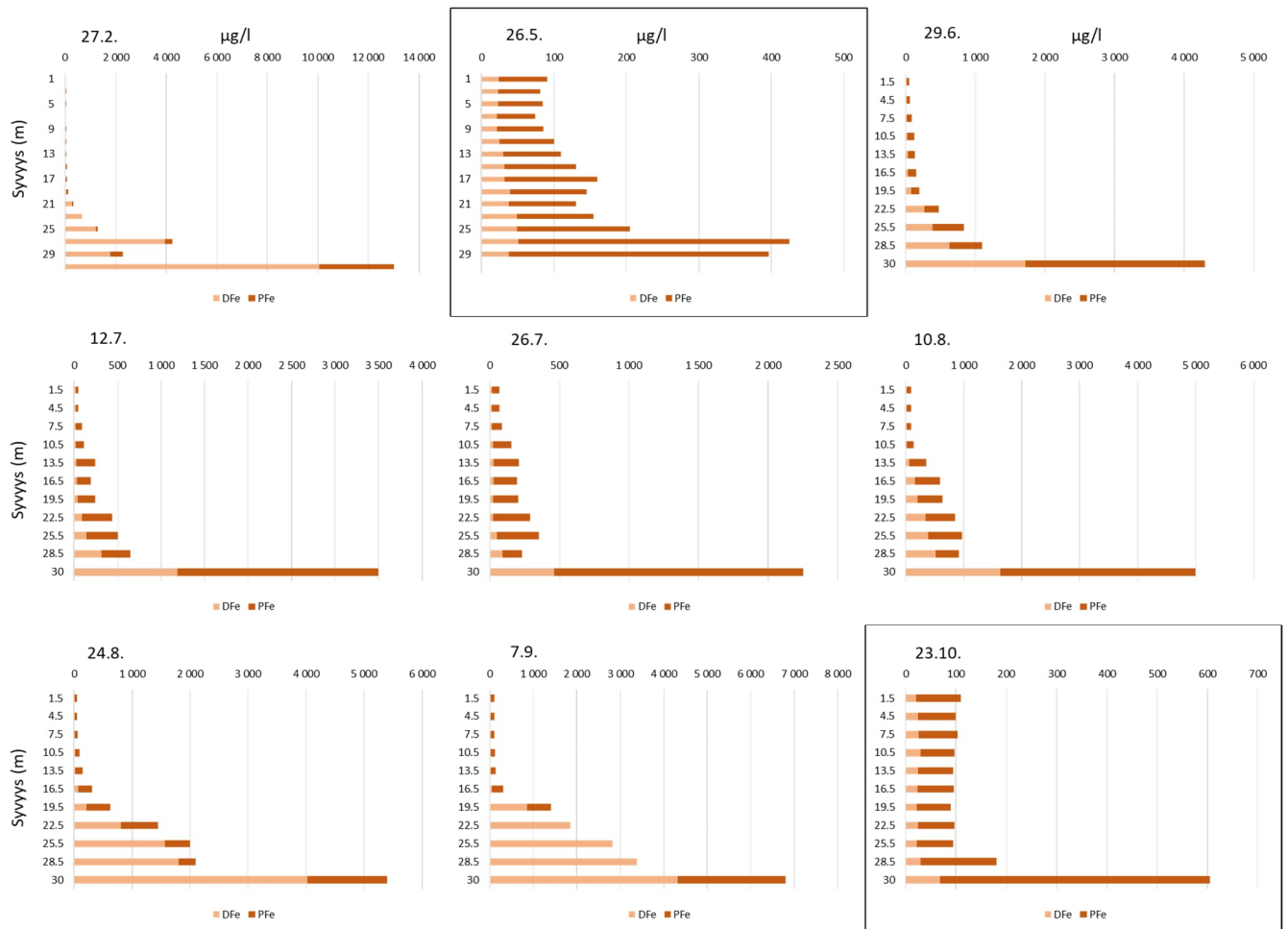
Rautasidonnaisen fosforin osuus mittauspäivinä (27.2., 26.5., 10.8. ja 23.10.) oli melko pieni; pitoisuus vaihteli välillä 0,2–3,7 µg/l. Suurimmillaan pitoisuus oli pohjanläheisessä vedessä kaikkina mittauspäivinä (Kuva 5). Täyskiertojen aikaan rautasidonnaisen fosforin osuus kuitenkin selkeästi tasoittui vesipatsaassa ja pitoisuudet nousivat pinnan läheisessä vedessä. Lisäksi 10.8. kesäkerrostuneisuuden näytteenottopäivänä rautasidonnaisen fosforin pitoisuus selkeästi nousi alusvedessä harppauskerroksen alapuolella.

Nürnbergin (1985) havainnot rautasidonnaisen fosforin pitoisuusnousuista veden pintakerroksissa syystäyskierrrossa olivat selkeämmät kuin tässä tutkimuksessa. Tämä saattaa selittyä osin Enonselän suuremmalla vesimassalla, syvyysvyöhykkeiden pinta-alasuhteilla ja laimenemisvaikutuksella, mutta merkittävää saattaa olla myös menetelmäerot näiden tutkimusten välillä ja niihin vaikuttavat tekijät. Toisin kuin Nürnbergin (1985) tutkimuksessa, tässä selvityksessä rautasidonnaista fosforia mitattiin suoraan tekemällä fraktiointi vesinäytteestä suodattamalla erotellulle kiintoaineelle. Tämä tarkoittaa, että mikäli merkittävä osa vesipatsaan raudasta ja sen sitomasta fosforista oli suodattimen läpäisevässä kolloidimuodossa, suuri osa rautasidonnaisestakin fosforista päätyi liukaisen fosforin näytteisiin (PO<sub>4</sub>-P, DP). Koska molemmat liukaisen fosforin näytteet kestävästi hapottamalla, fosfori olisi irronnut mahdollisista kolloidikokoisista rautapartikkeleista tässä vaiheessa ja ollut siten mitattavissa PO<sub>4</sub>-P:na. Näin ollen osa mitatuista PO<sub>4</sub>-P-pitoisuusnousuista täyskiirroissa saattaa kuvastaa pienen partikkelikoon rautafosforia.



**Kuva 5.** Vesipatsaan fosforifraktiot (SRP=soluble reactive phosphorus (tai  $PO_4-P$ ), DP=liukoinen fosfori, Fe-P=rautasidonnainen fosfori, PP=partikkelimainen fosfori) syvännepisteellä eri näytteenottoajankohtina. Täyskiertojen aikaiset mittaukset on merkitty mustilla kehyksillä. Huomaa x-akselien vaihtelevat asteikot paneelien välillä.

Syvänteen vesipatsaan kokonaisrautapitoisuudet noudattelivat sekä ajallisesti että vesikerrosten välillä samankaltaisia kuvioita kuin kokonaisfosforin (Kuva 6). Veden pintakerroksessa (0–2 m) pitoisuudet vaihtelivat välillä 24–110 µg/l; pienimmillään ne olivat talvella jääpeitteisenä aikana ja suurimmillaan syystäyskierron aikana. Fosforin tapaan suurimmat kokonaisraudan pitoisuudet mitattiin säännönmukaisesti pohjanläheisimmästä vesikerroksesta (enimmillään 13 000 µg/l talvella). Kerrostuneisuuskausilla liukoisen raudan osuus kokonaisraudasta kasvoi syvyyden mukaan, joskin partikkelimaista rautaa oli etenkin pohjanläheisessä vedessä merkittävinä osuuksina (Kuva 6).



**Kuva 6.** Vesipatsaan rautafraktiot (DFe=liukoinen, PFe=partikkelimainen rauta) syvännepisteellä eri näytteenottoajankohtina. Täyskiertojen aikaiset mittaukset on merkitty mustilla kehyksillä. Huomaa x-akselien vaihtelevat asteikot paneelien välillä.

### Välivyöhyke

Välivyöhykkeen pintakerroksen (0–2 m) kokonaisfosforipitoisuudet eivät merkittävässä määrin eronneet syvänteen vastaavista pitoisuuksista; keskimääräinen kesäkerrostuneisuuden aikainen pitoisuus oli 22 µg/l, kevättäyskierrossa 23 µg/l ja syystäyskierrossa 29 µg/l. Korkeimmat pitoisuudet mitattiin syvänteen tapaan pohjanläheisimmästä vesikerroksesta (sedimenttinäytteen päältä), mutta kevättäyskiertoa lukuun ottamatta pohjanläheisetkin pitoisuudet olivat aina alle 100 µg/l (Kuva 7). Pintakerrosten fosforifraktioiden jakauma eri näytteenottoajankohtina oli samankaltainen kuin syvänteessä; merkittävimmät fraktiot kesäkerrostuneisuuskaudella olivat ei-fosfaattimuotoinen liukoinen sekä ei-rautasidonnainen partikkelimainen fosfori, ja syystäyskierrossa fosfaattifosforin pitoisuudet moninkertaistuivat kaikissa vesikerroksissa, toisin kuin kevättäyskierrossa (Kuva 7).

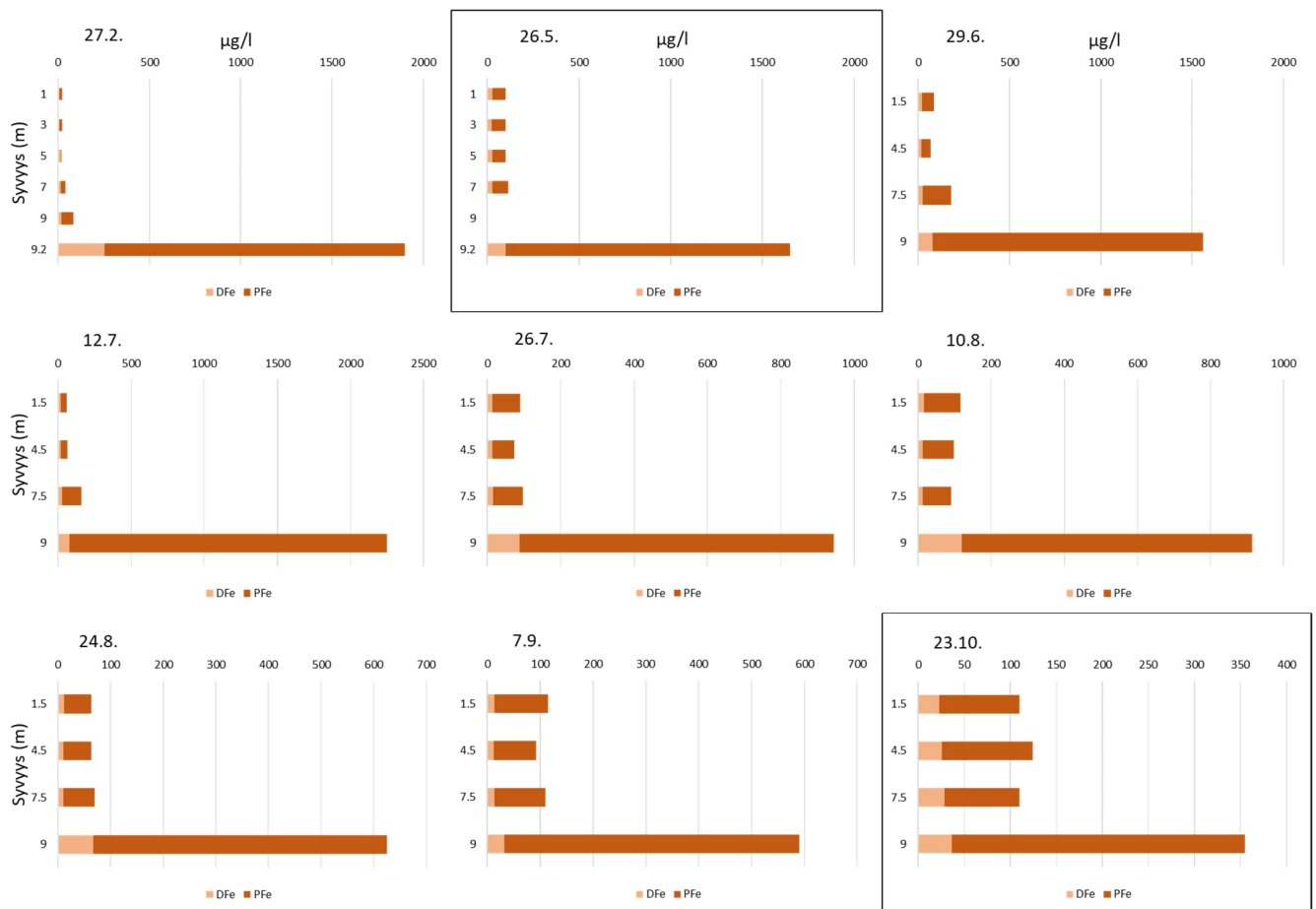
Rautasidonnaisen fosforin osuus mittauspäivinä (27.2., 26.5., 10.8. ja 23.10.) oli suurimmillaan pohjanläheisessä vedessä kaikkina mittauspäivinä, joskin pitoisuuden nousua oli havaittavissa kaikissa vesikerroksissa täyskiertojen aikana (Kuva 7). Havainto viittaa siihen, että pitoisuuksien nousu johtuu rautasidonnaisen fosforin kulkeutumisesta syvänteeltä.



**Kuva 7.** Vesipatsaan fosforifraktiot (SRP=soluble reactive phosphorus (tai  $PO_4\text{-P}$ ), DP=liukoinen fosfori, Fe-P=rautasidonnainen fosfori, PP=partikkelimainen fosfori) välivyöhykkeellä eri näytteenottoajankohtina. Täyskiertojen aikaiset mittaukset on merkitty mustilla kehysillä. Huomaa x-akselien vaihtelevat asteikot paneelien välillä.

Välivyöhykkeen vesipatsaan rautapitoisuudet olivat kesäkerrostuneisuuskaudella hieman korkeampia kuin syvänteen; 0–2 m vesikerroksen keskimääräinen kokonaisraudan pitoisuus oli 88 µg/l (vrt. syvänteen 70 µg/l) (Kuva 8). Talvella sekä syystäyskierrossa pitoisuudet olivat samaa tasoa kuin syvänteessä, keväällä hieman korkeampia. Syvänteen tavoin suurimmat kokonaisraudan pitoisuudet mitattiin pohjanläheisimmästä vedestä, mutta erotuksena syvänteeseen liukoisen raudan osuus kokonaisraudasta oli kaikkina ajankohtina ja kaikissa vesikerroksissa melko pieni. Lisäksi pääosan kokonaisraudasta muodosti partikkelimainen rauta (Kuva 8), koska pohjaläheinen vesi on välivyöhykkeellä koko kesän hapellinen, vaikka heinäkuussa onkin pohjanläheistä kerrostumista havaittavissa (Kuva 4). Kuitenkin selkeää liukoisen raudan pitoisuuden nousua koko vesipatsaassa oli havaittavissa täyskiertojen aikana.





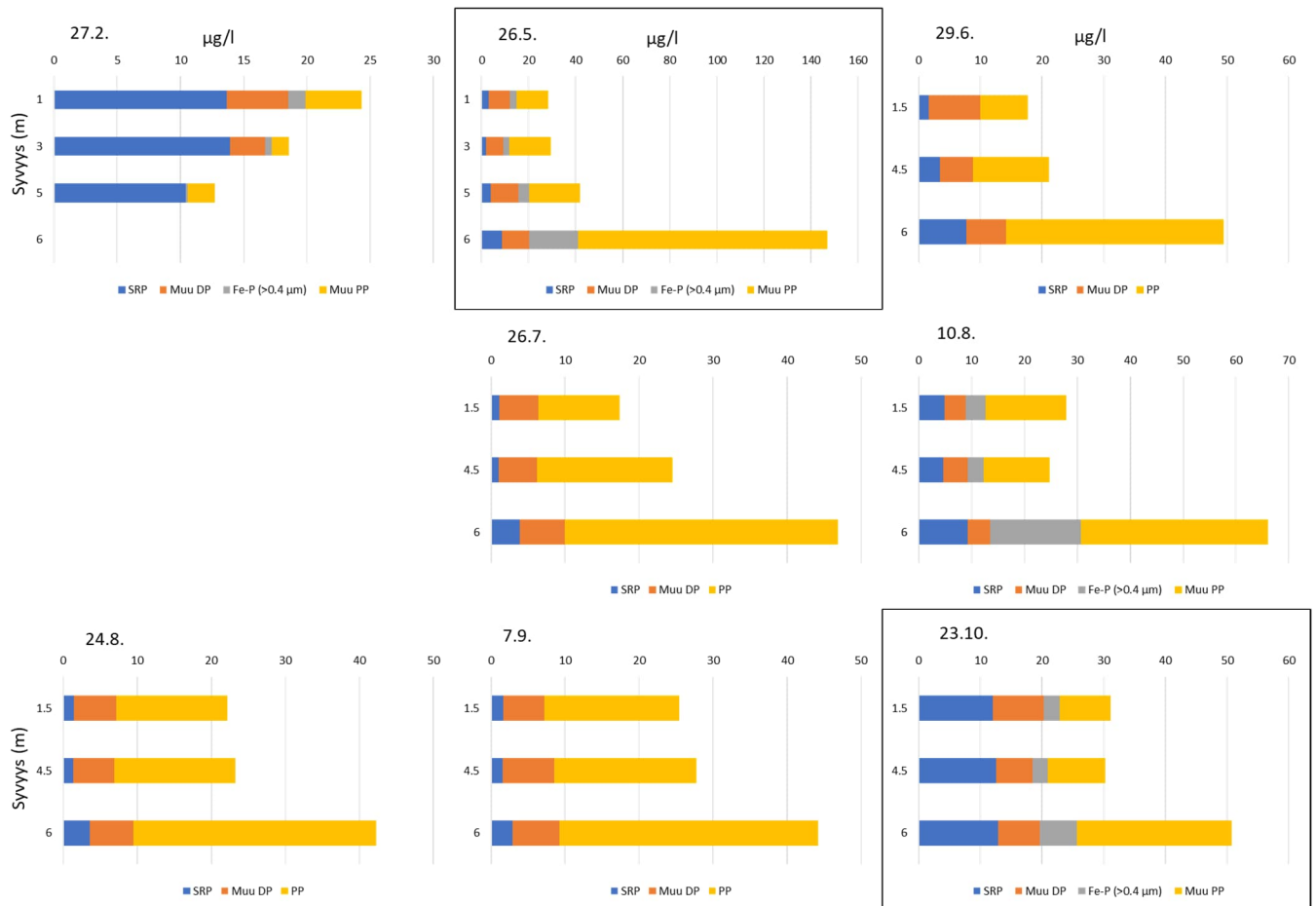
**Kuva 8.** Vesipatsaan rautafraktiot (DFe=liukoinen, PFe=partikkelimainen rauta) välivyöhykkeellä eri näytteenottoajankohtina. Täyskiertojen aikaiset mittaukset on merkitty mustilla kehyksillä. Huomaa x-akselien vaihtelevat asteikot paneelien välillä.

### Matala vyöhyke

Matalan pisteen veden pintakerroksen (0–2 m) kokonaisfosforipitoisuudet olivat kesäkerrostuneisuuden aikana samalla tasolla kuin syvänpisteellä ja välivyöhykkeellä (22 µg/l) (Kuva 9). Kevättäyskierron pintakerroksen pitoisuus oli hieman korkeampi kuin muilla näytteenotopisteillä (27 µg/l, vrt. syvänpisteeseen 24 ja välivyöhykkeen 23 µg/l). Pohjanläheiset pitoisuudet olivat korkeimpia (42–92 µg/l), joskaan ero muihin vesikerrokseen ei yleensä ollut yhtä jyrkkä kuin syvänpisteellä ja välivyöhykkeellä.

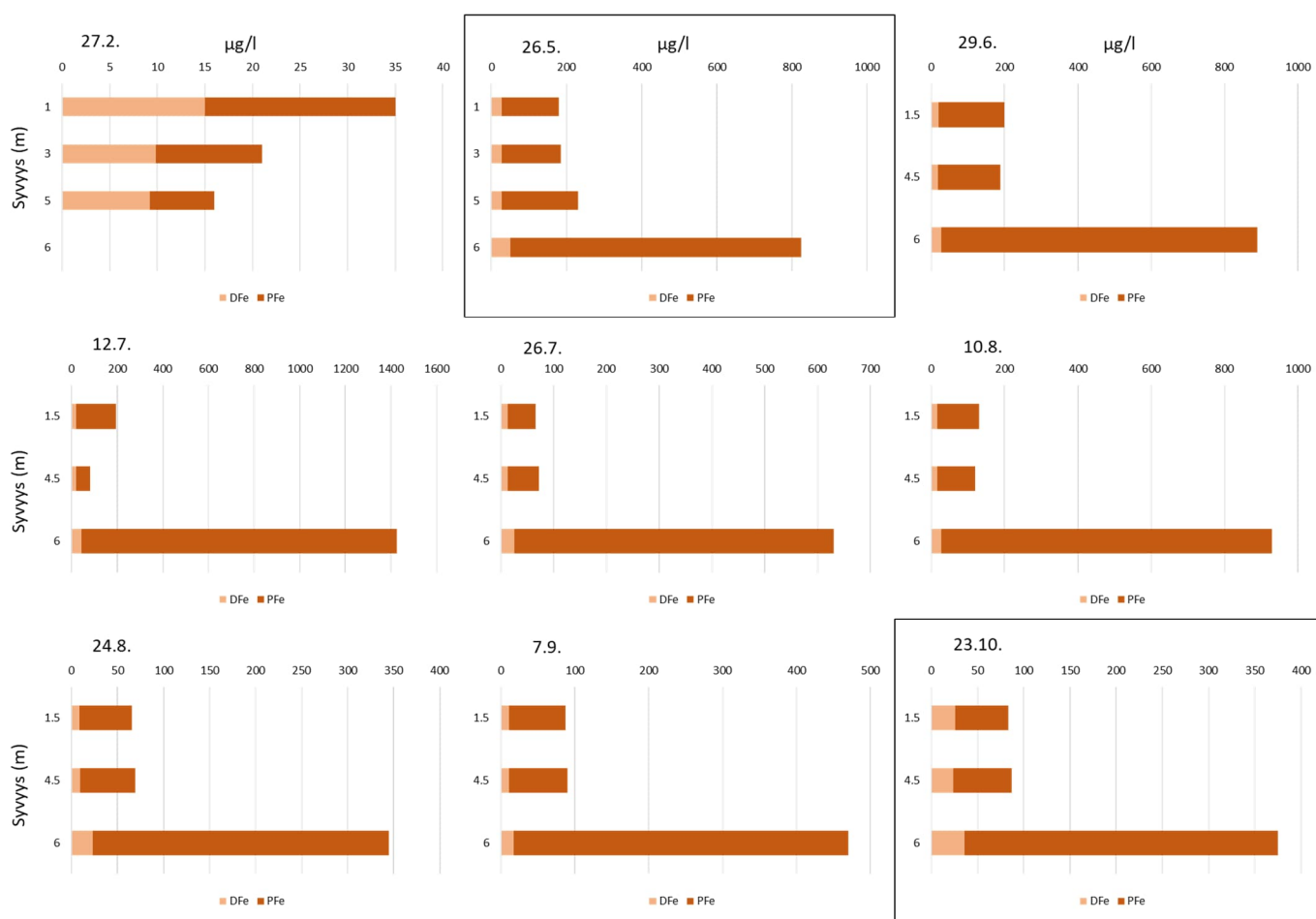
Kuten välivyöhykkeellä, fosfaattifosforin osuus kokonaisfosforista oli huomattava lähinnä talvella sekä syystäyskierron aikana, jolloin myös planktonituotanto on alhaisimmillaan. Muina aikoina merkittävin fraktio oli ei-rautasidonnainen partikkelimainen fosfori, jonka pitoisuus lisääntyi kesän edetessä ja syvyyden mukaan plankton tuotannon lisääntyessä ja orgaanisen aineksen sedimentaation kasvaessa (Kuva 9).

Kuten välivyöhykkeellä rautasidonnaisen fosforin osuus mittauspäivinä (27.2., 26.5., 10.8. ja 23.10.) oli suurimmillaan pohjanläheisessä vedessä kaikkina mittauspäivinä, paitsi talvella (Kuva 9).



**Kuva 9.** Vesipatsaan fosforifraktiot (SRP=soluble reactive phosphorus (tai PO<sub>4</sub>-P), DP=liukoinen fosfori, Fe-P=rautasidonnainen fosfori, PP=partikkelimainen fosfori) matalalla vyöhykkeellä eri näytteenottoajankohtina. Täyskiertojen aikaiset mittaukset on merkitty mustilla kehyksillä. Huomaa x-akselien vaihtelevat asteikot paneelien välillä.

Kokonais- ja liukoisen raudan pitoisuudet noudattelevat matalalla vyöhykkeellä muiden näytteenotuspisteiden tapaan suurelta osin fosforin ajallisia ja vesikerrosten välisiä pitoisuusvaihteluita (Kuva 10). Vesipatsaan rautapitoisuudet ovat kuitenkin jonkin verran korkeampia matalalla vyöhykkeellä kuin muilla näytteenotuspisteillä: kesäkerrostuneisuuden aikaan veden pintakerroksen (0–2 m) kokonaisraudan keskimääräinen pitoisuus oli 124 µg/l (vrt. syvänteen 70 ja välivyöhykkeen 88 µg/l). Matalan pisteen pintakerroksen korkeammat rautapitoisuudet johtunevat alueen eroosio- ja resuspensioherkkyydestä, jolloin sedimentoitunut materiaali kiertää herkemmin vesipatsaassa. Pohjanläheiset kokonaisraudapitoisuudet olivat kuitenkin pääosin samaa tasoa tai matalampia kuin muilla näytteenotuspisteillä. Liukoisen raudan osuus kokonaisraudasta oli huomattava ainoastaan jään alla talviaikaan; muutoin lähes kaikki rauta oli partikkelimuotoista.



**Kuva 10.** Vesipatsaan rautafraktiot (DFe=liukoinen, PFe=partikkelimainen rauta) matalalla vyöhykkeellä eri näytteenottoajankohtina. Täyskiertojen aikaiset mittaukset on merkitty mustilla kehyksillä. Huomaa x-akselien vaihtelevat asteikot paneelien välillä.

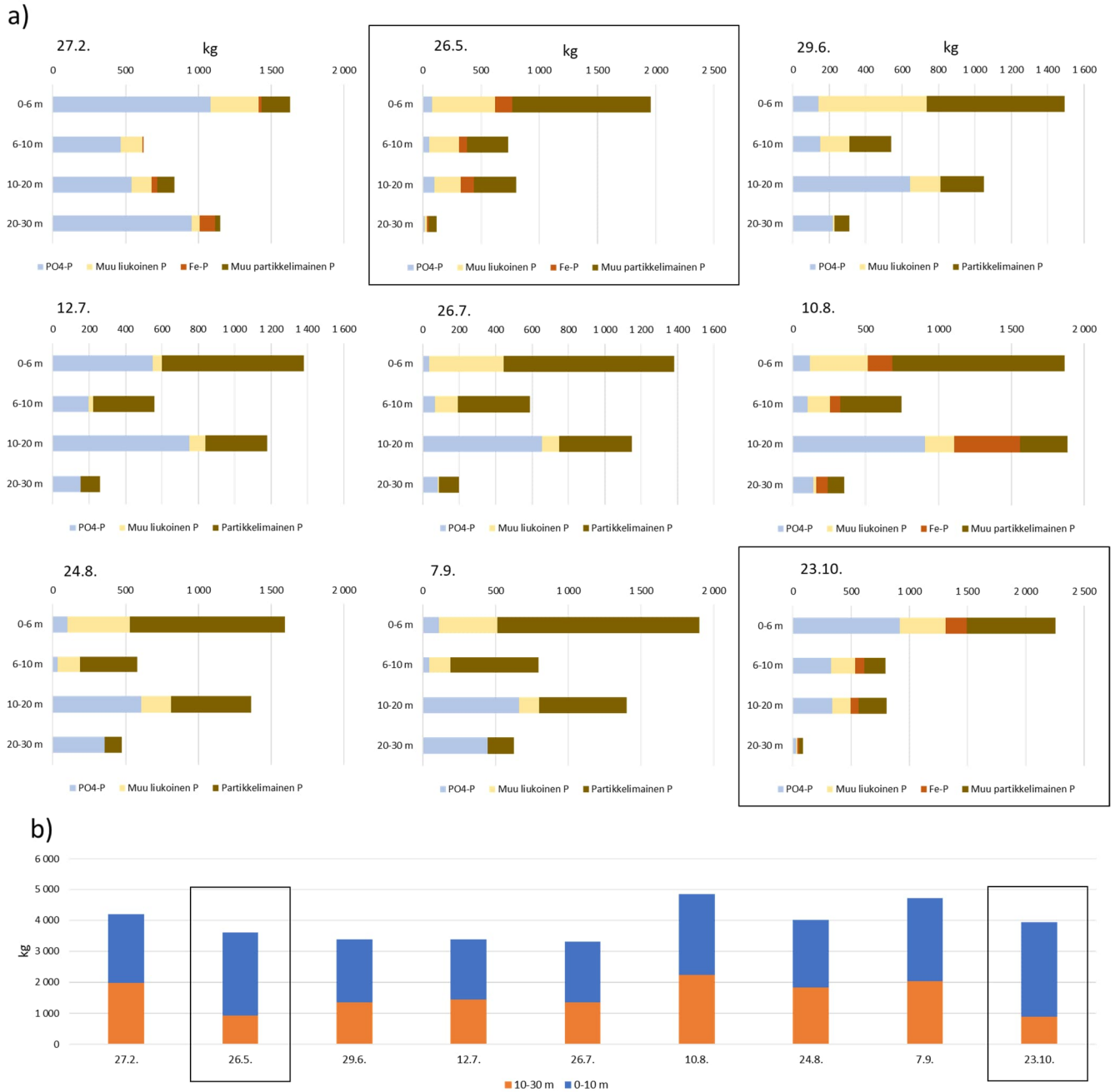
## Koko Enonselkä

Enoselän vesimassoihin suhteutettuna fosforin massat vaihtelivat syvännepisteellä eri vesikerroksissa eri näytteenottokerroilla selkeästi (Kuva 11a). Talviaikaan merkittävä osa fosforista esiintyi liukoisessa muodossa erityisesti fosfaattifosforina melko tasaisesti koko vesipatsaassa (ka. 760 kg). Kevättäyskierron alkamisen jälkeen partikkelimaisen fosforin massat kasvoivat ja liukoisen fosforin laskivat vastaavasti koko vesipatsaassa (Kuva 11a). Partikkelimaisen fosforin osuus on suurin koko kesäkauden ajan nimenomaan päällysveden pintakerroksessa (ka. 1 018 kg), mikä heijastelee pitkälti kesänaikaista planktonituotantoa. Toinen piikki oli havaittavissa harppauskerroksen tuntumassa ja juuri sen alapuolella (ka. 410 kg), samoin fosfaattifosforin toinen nousu (ka. 703 kg). Harppauskerroksen alapuolisen kerroksen partikkelimaisen fosforin keskittymä heijastelee planktonituotannon ja muun orgaanisen aineksen sedimentaatiota vesipatsaassa ja liukoisen fosforin pitoisuuden nousu orgaanisen aineksen mineralisaation lisäksi hapettomista olosuhteista johtuvaa rautaoksidien pelkistymistä ja siten liukoisen fosforin vapautumista (Boström ym. 1982). Näytteenottokerralla (23.10.) syystäyskierron alkamisen jälkeen fosforimassat olivat pyörähtäneet alusvedestä, mikä näkyi liukoisen (1 311 kg) ja partikkelimaisen (944 kg) fosforin selkeänä painottumisena pintakerrokseen (0-6 m).

Tarkasteltaessa päiviä, joina rautasidonnainen fosfori analysoitiin vesipatsaasta (27.2., 26.5., 10.8., 23.10.) havaitaan selkeitä eroja mm. talvikerrostuneisuuden ja kevättäyskierron välillä (Kuva 11a). Talvikerrostuneisuuden aikaan iso osa rautasidonnaisesta fosforista on pohjanläheisessä

alusvedessä (20–30 m: 108 kg), kun taas vesimassojen sekoituttua keväällä harppauskerroksen läheisen (10–20 m: 113 kg) ja päällysveden (0–6 m: 149 kg, 6–10 m: 69 kg) rautasidonnaisen fosforin osuus nousee. Kesäkerrostuneisuuden aikaan elokuussa on havaittavissa rautasidonnaisen fosforin nousua harppauskerroksen alapuolella (10–20 m: 452 kg), mutta myös päällysvedessä (0–6 m: 169 kg, 6–10 m: 73 kg) (Kuva 11a). Tämä voi johtua mm. pitkään jatkuneen kerrostuneisuuden aiheuttamasta hapettomuudesta ja siten fosforipitoisuuden noususta alusvedessä, joka sääolosuhteista, lähinnä tuulisuudesta, johtuen vuotaa harppauskerroksesta läpi myös päällysveteen (Saggio & Imberger 2001). Juuri 10.8. näytteenotokerralla oli järvellä kova tuuli, ja 7.–8.8. oli tietojen mukaan kesän Sylvia-myrskyksi nimetty säärintama. Rautasidonnaisen fosforin mittauksia ei kuitenkaan tehty muina kesäkerrostuneisuuskauden aikoina vesipatsaasta, joten kyseisen myrskyn merkitystä ilmiölle on vaikea suoraan osoittaa. Syystäyskierron aikaan havaittiin saman suuntainen ilmiö kuin keväällä vesimassojen sekoittumisen yhteydessä: rautasidonnaisen fosforin määrä oli suurin päällysvedessä (0–6 m: 184 kg, 6–10 m: 81 kg).

Tarkasteltaessa kokonaisfosforin yhteismassoja päällysveteen (0–10 m) ja alusveteen (10–30 m) jaoteltuna havaitaan, että kokonaisfosforimassat olivat alusvedessä korkeimmillaan talvella (1987 kg) ja kesäkerrostuneisuuden aikaan, massojen kasvaessa kesän edetessä (1 440–2 028 kg) (Kuva 11b) todennäköisesti sisäisen kuormituksen eli sedimentin diffuusion ja osaltaan myös orgaanisen aineksen hajoamisen ja resuspendoitumisen myötä. Näytteenotokerroilla (26.5. ja 23.10.) kevät- ja syystäyskiertojen alkamisen jälkeen Enonselän fosforimassoista yli puolet oli vesipatsaan ylimmissä kerroksissa (2 690 kg ja 3 048 kg), sillä vesimassojen sekoittuessa pitoisuudet olivat tasaiset koko vesipatsaassa ja pintakerrosten vesitilavuus on suurin. Lisäksi täyskiertojen alkamisen jälkeen Enonselän koko vesipatsaan fosforimassa pieneni edelliseen näytteenotokertaan eli kerrostuneisuuskauteen nähden (Kuva 11b). Esimerkiksi syystäyskierron aikana koko vesimassan fosforivähenemä on n. 800 kg. Tämä johtunee kierroissa mm. pintaveteen resuspendoituneen aineksen sedimentoitumisesta, kun alusvedestä peräisin oleva liukoinen fosfori sakkautuu raudan kanssa (esim. Nürnberg 1985; Davison 1993).



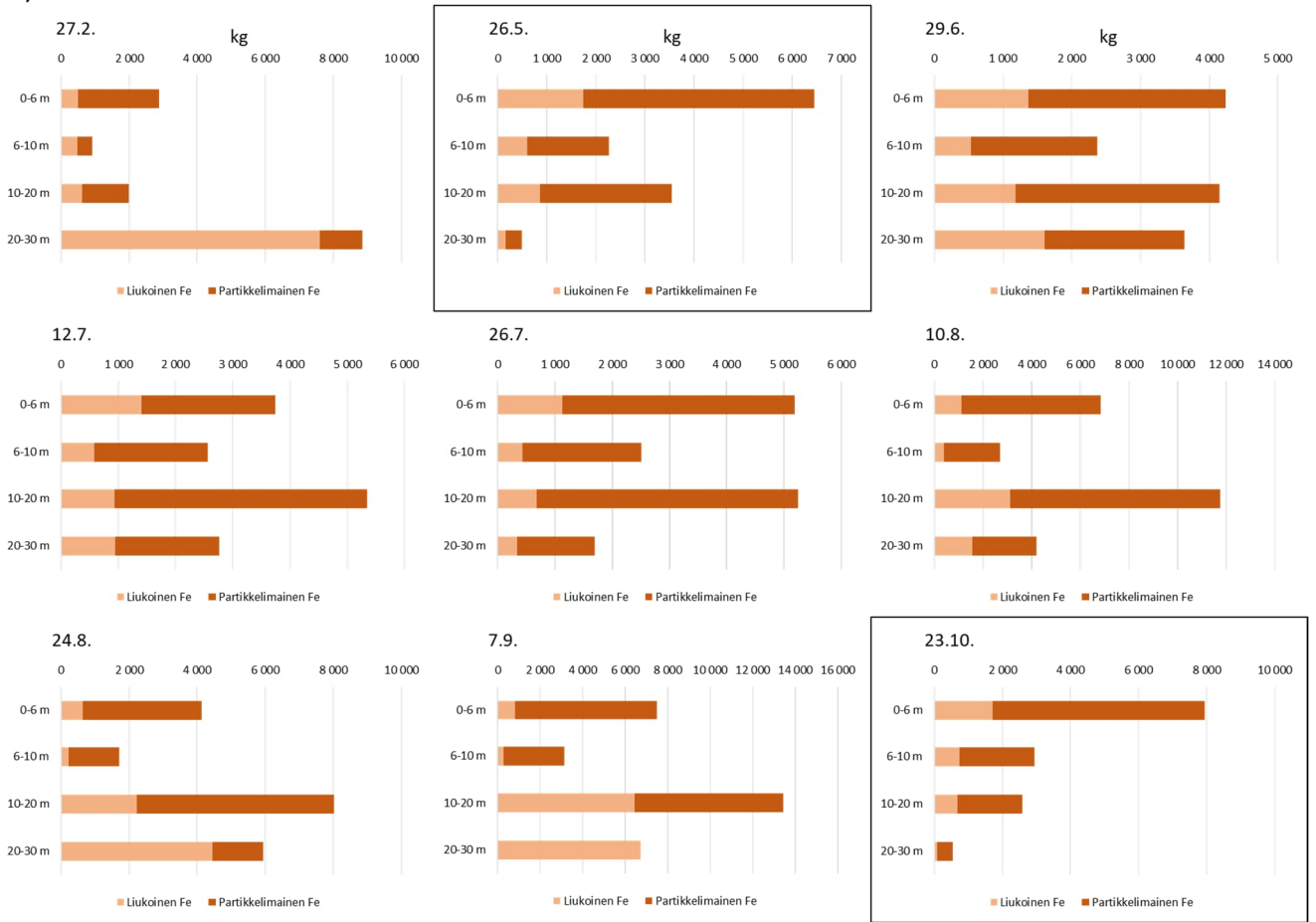
**Kuva 11.** Fosforin kokonaismassat Enonselän vesipatsaassa syvännepisteeltä mitatuilla pitoisuuksilla laskettuna eri näytteenottoajankohtina. a) Fosforin fraktioiden massoja eri vesikerroksissa eri näytteenottoajankohtina. b) Kokonaisfosforin yhteismassat 0–10 m vesikerroksessa ("päälysvesi") ja 10–30 m vesikerroksessa ("alusvesi") eri näytteenottoajankohtina. Täyskiertojen aikaiset mittaukset on merkitty mustilla kehysillä. Laskelmissa on huomioitu vesikerrosten tilavuuksissa koko Enonselkä mukaan lukien Paimelanlahti ja Vähäselkä.

Liukoisen ja partikkelimaisen raudan massat vaihtelivat syvännepisteellä eri vesikerroksissa eri näytteenottokerroilla selkeästi (Kuva 12a). Talvella merkittävä osa raudasta sijaitsi syvissä vesikerroksissa ja pohjanläheisistä hapettomista oloista johtuen (Kuva 4) liukoisessa muodossa (7 610 kg). Muina ajankohtina suurimmat raudamassat esiintyivät partikkelimaisessa muodossa, joko aivan pintakerroksessa (0–6 m: ka. 4 515 kg) tai juuri harppauskerroksen alapuolella (ka. 5 495 kg) (Kuva 12a). Harppauskerroksen alapuolinen partikkelimaisen raudan piikki voi olla seurausta sekä päälysveden orgaanisen aineksen vajoamisesta että jo sedimentoituneen aineksen

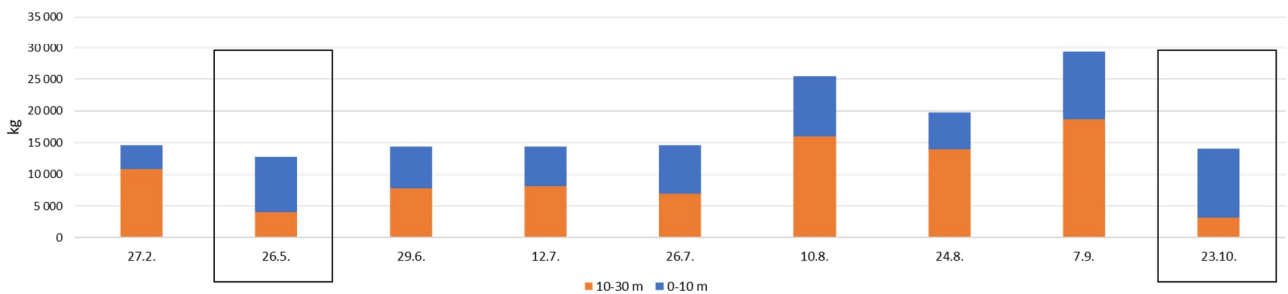
resuspendoitumisesta. Liukoisen raudan osuus kasvoi hapettomassa alusvedessä kesäkerrostuneisuuden aikana loppukesää kohti ja näytteenottokerralla (23.10.) syystäyskierron alkamisen jälkeen suurimmat liukoisen (1 706 kg) ja partikkelimaisen raudan (6 239 kg) massat havaittiin pintakerroksessa (0–6 m) (Kuva 12a). Ilmiö puoltaa täyskiertojen merkitystä harppauskerroksen alapuolelle diffundoituneen ja/tai resuspendoituneen pohjanläheisen raudan nostamisessa pinnan läheiseen veteen vesimassojen pyörähtäessä.

Tarkasteltaessa kokonaisraudan yhteismassoja päällysveden (0–10 m) ja alusveden (10–30 m) välillä, havaittiin sama ilmiö: erityisesti alusveden kokonaisrautamäärät kasvoivat loppukesää kohti (7 791–18 729 kg) (Kuva 12b) indikoiden kesäkerrostuneisuuden aikaista kasvavaa liukoisen raudan kuormitusta sedimentistä (Balistrieri ym. 1992). Lisäksi näytteenottokerroilla (26.5. ja 23.10.) kevät- ja syystäyskiertojen alkamisen jälkeen koko vesipatsaan kokonaisrautamassat olivat alhaisimmillaan (12 754 kg ja 14 002 kg) ja suhteessa isompi osa kokonaisraudasta oli päällysvedessä. Nämä ajalliset muutokset raudan kokonaismassojen vertikaalisessa jakautumisessa kuvaavat raudan kulkeutumista alusvedestä päällysveteen vesimassojen kiertäessä ja toisaalta sedimentaation merkitystä heti kiertojen jälkeen (Nürnberg 1985; Balistrieri ym. 1992). Lisäksi on todennäköistä, että kovat tuulet varsinkin syksyllä voivat kuljettaa vesipatsaan pintakerrokseen kummunneita rautamassoja tuulten suuntaisesti myös matalammille alueille.

a)



b)



**Kuva 12.** Raudan kokonaismassat Enonselän vesipatsaassa syvännepisteeltä mitatuilla pitoisuuksilla laskettuna eri näytteenottoajankohtina. a) Liukoisen ja partikkelimaisen raudan määriä eri vesikerroksissa eri näytteenottoajankohtina. b) Kokonaisraudan yhteismäärät 0–10 m vesikerroksessa ("päälyysvesi") ja 10–30 m vesikerroksessa ("alusvesi") eri näytteenottoajankohtina. Täyskiertojen aikaiset mittaukset on merkitty mustilla kehyksillä. Laskelmissa on huomioitu vesikerrosten tilavuuksissa koko Enonselkä mukaan lukien Paimelanlahti ja Vähäselkä.

### 3.1.3. Sedimentti

Pintasedimentin orgaanisen aineksen pitoisuus (LOI %) vaihteli eri syvyysvyöhykkeillä välillä 11,5–14,9 % (Taulukko 1). Orgaanisen aineksen pitoisuus oli keskimäärin suurin syvännepisteellä. Pintasedimentin fosforipitoisuus vaihteli matalalla näytenpisteellä 2 028–3 792 mg/kg ollen suurimmillaan syystäyskierron alkamisen jälkeen (Taulukko 1). Välihyöhykkeen vaihtelu oli 1 876–4 411 mg/kg ja jälleen suurimmat pitoisuudet havaittiin syystäyskierron aikana. Syvänteellä sitä

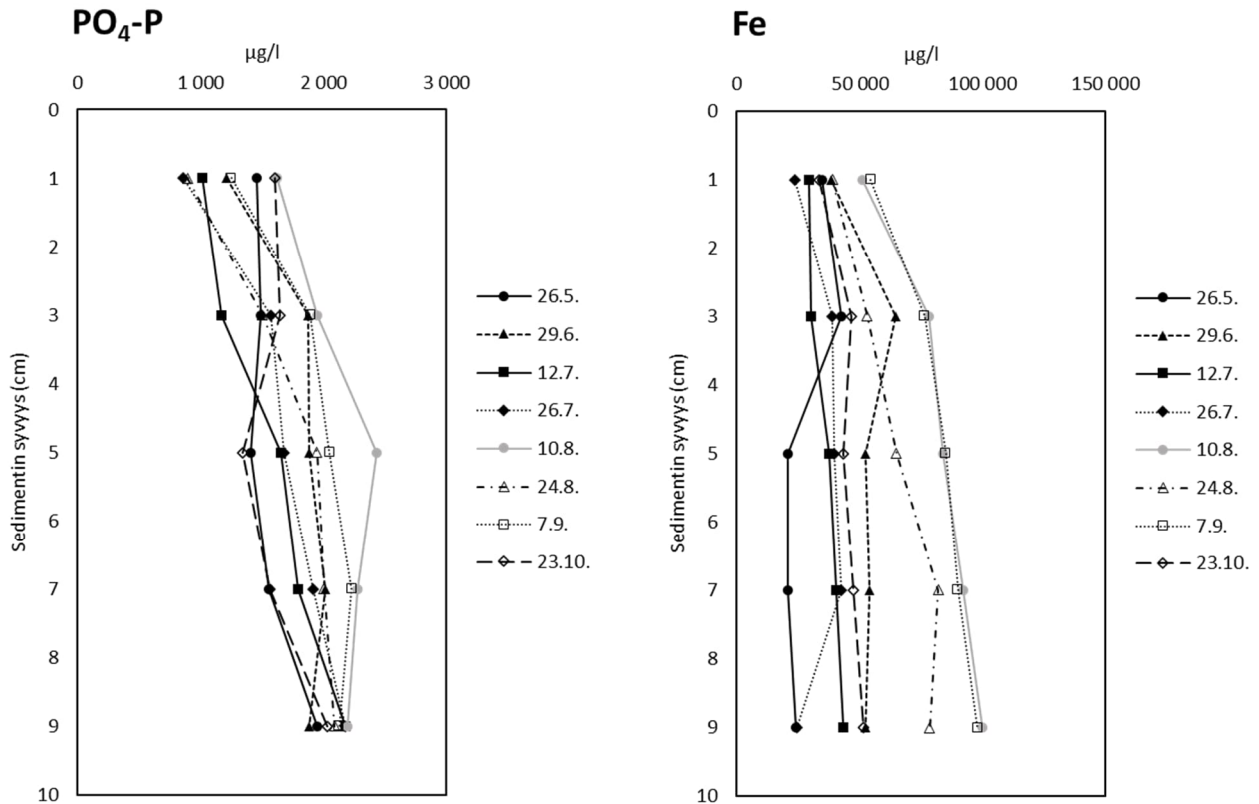
vastoin suurimmat fosforipitoisuudet sedimentissä havaittiin talvikerrostuneisuuden aikaan, vaihteluvälin eri näytteenotokertojen välillä ollessa 2 548–5 917 mg/kg. Päinvastoin kuin muilla vyöhykkeillä, syvänteellä fosforipitoisuus oli alhaisin syystäyskierron aikaisella näytteenotokerralla. Matalalla näytepisteellä ja välivyöhykkeellä sedimentin rautapitoisuus oli korkeimmillaan kevät- ja syystäyskiertojen aikaan, sekä talvikerrostuneisuuden aikaan (matalan pisteen tiedot puuttuvat) (Taulukko 1). Syvänteen sedimentissä korkeimmat rautapitoisuudet mitattiin talvikerrostuneisuuden ja kevättäyskierron aikaan. Kauden aikaiset vaihtelut eri näytepisteiden kokonaisfosfori- ja rautapitoisuuksissa ja erojen keskittyminen pitkälti täyskiertojen ajankohtiin tukee vesimassojen liikkeiden merkitystä aineiden kulkeutumisessa ja sedimentoitumisessa.

**Taulukko 1.** Pintasedimentin (0–1 cm) fosfori- ja rautapitoisuus (mg/kg) sekä orgaanisen aineen pitoisuus hehkutushäviönä (LOI %) eri näytteenotopisteillä ja ajankohtina.

	Syvänteen			Välivyöhyke			Matala		
	P	Fe	LOI %	P	Fe	LOI %	P	Fe	LOI %
27.2.2023	5917	3713	17.6	2230	4069	11.8	-	-	-
26.5.2023	4845	3400	14.9	2103	4280	13.0	2103	4280	11.5
29.6.2023	2721	2599	14.1	2113	2973	13.7	2294	2591	13.1
12.7.2023	2703	3249	12.6	2129	2599	12.4	2986	2642	11.5
26.7.2023	3214	7421	13.4	2047	2225	12.7	2623	2506	12.0
10.8.2023	2608	3995	12.9	1945	1937	12.7	2075	2122	12.3
24.8.2023	2987	3798	12.8	1876	1892	12.7	2028	1946	11.9
7.9.2023	2707	2944	13.6	1882	2224	13.3	2857	2597	12.4
23.10.2023	2548	2646	13.4	4411	3687	13.3	3792	4120	11.6

Syväntepisteen sedimentin huokosveden fosfaattifosforipitoisuudet vaihtelivat eri näytteenottoajankohtina määritetyn 10 cm syvyyden suhteen n. 1 000–2 500 µg/l ja vastaavasti rautapitoisuudet 17 000–100 000 µg/l, pitoisuuksien noustessa kerrostuneisuuden edetessä loppukesää kohti (Kuva 13). Selvää jyrkkää vertikaaligradienttia sedimentissä ei havaittu fosforin eikä raudan kohdalla, joten liukoisen fosforin ja raudan diffundoitumista voidaan olettaa tapahtuvan koko mitatulta syvyydeltä sedimentissä ylöspäin ja edelleen hapettomissa oloissa pohjanläheiseen alusveteen (Jilbert ym. 2020).

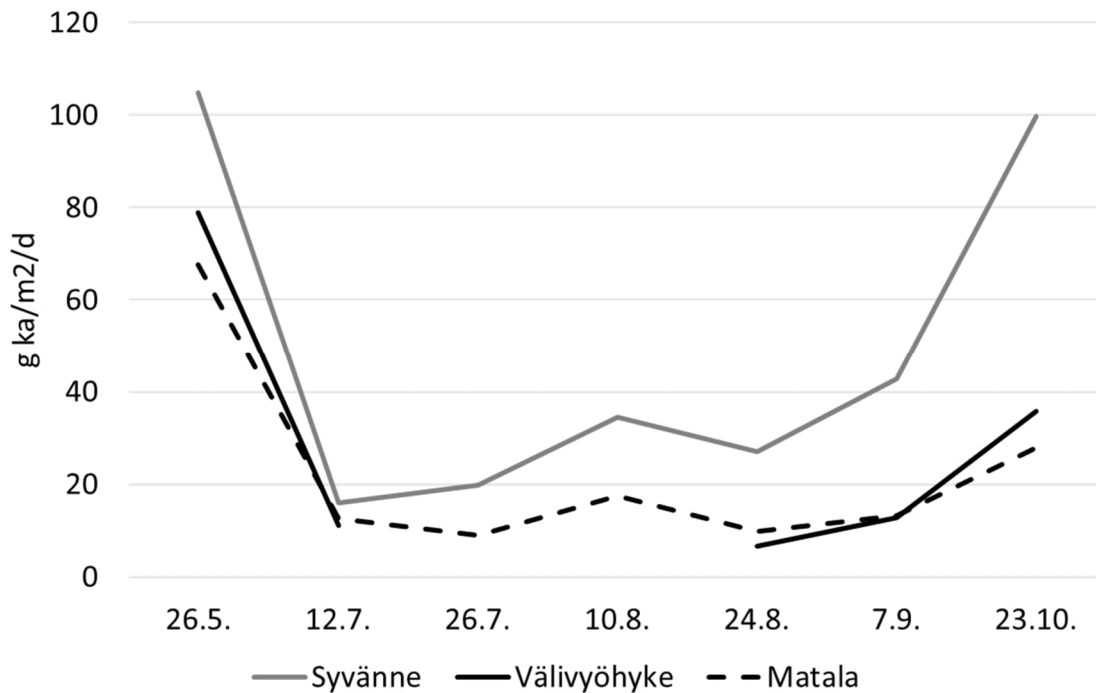




**Kuva 13.** Syvännepisteen sedimentin huokosveden fosfaattifosfori- ja rautapitoisuudet eri näytteenottoajankohtina.

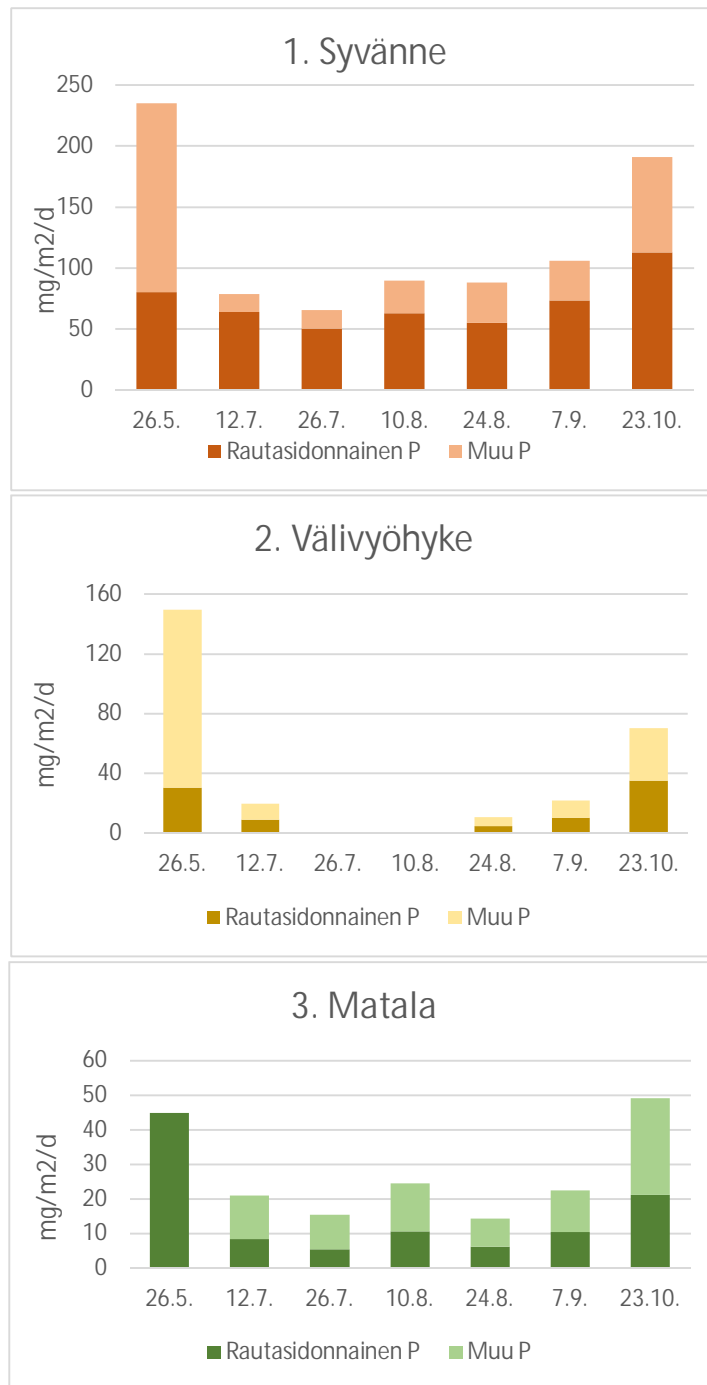
### 3.1.4. Kuiva-aineen, kokonaisfosforin ja rautasidonnaisen fosforin bruttosedimentaatio

Enonselän kuiva-aineen bruttosedimentaation (BS) keskiarvo oli 34 g/m<sup>2</sup>/d. Syvänteen BS:n keskiarvo vaihteli välillä 20–105 g/m<sup>2</sup>/d, välivyöhykkeen 6–36 g/m<sup>2</sup>/d ja matalan 9–54 g/m<sup>2</sup>/d (Kuva 14). Korkeimmat bruttosedimentaatioarvot havaittiin kevät- ja täyskiertojen aikana kaikilla pisteillä ja erityisesti syvännepisteellä. Tulokset ovat samansuuntaisia Niemistö ym. (2011) havaintojen kanssa. Huomionarvoista on myös selkeä bruttosedimentaation nousu kesäkerrostuneisuuden aikana 10.8. tuulisena päivänä ja kesän Sylvia –myrskyn tai pidemmän tuulisen jakson jälkeen. Yleisesti ottaen täyskiertojen ajankohtaan sijoittuvat bruttosedimentaatiopiikit sopivat yhteen sedimentin kohonneiden fosfori- ja rautapitoisuuksien kanssa erityisesti matalalla näytenpisteellä ja välivyöhykkeellä (Taulukko 1).



Kuva 14. Kuiva-aineen bruttosedimentaatio Enonselällä eri näytteenottopisteillä.

Kokonaisfosforin bruttosedimentaation ( $BS_P$ ) keskiarvo oli  $71 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ . Syvänteen  $BS_P$  vaihteli välillä  $65\text{--}235 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$ , välivöhykkeen  $20\text{--}150 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$  ja matalan  $14\text{--}49 \text{ mg P/m}^2/\text{d}$  (matalan yöhykkeen kevään  $BS_P$  puuttuu materiaalin vähäisyyden vuoksi) (Kuva 15). Rautasidonnaisen fosforin bruttosedimentaation ( $BS_{Fe-P}$ ) keskiarvo oli  $37 \text{ mg Fe-P/m}^2/\text{d}$ . Syvänteen  $BS_{Fe-P}$  vaihteli välillä  $55\text{--}113 \text{ mg Fe-P/m}^2/\text{d}$ , välivöhykkeen  $5\text{--}35 \text{ mg Fe-P/m}^2/\text{d}$  ja matalan  $5\text{--}45 \text{ mg Fe-P/m}^2/\text{d}$  (Kuva 15). Sekä kokonaisfosforin että eroteltuna rautasidonnaisen fosforin bruttosedimentaatiot olivat pääsääntöisesti suurimmillaan kevät- ja syystäyskiertojen aikaan ja kaikilla näytteenottokerroilla suurimmat arvot havaittiin syvänteellä. Syväntäalueille tyypillisesti bruttosedimentaatio oli suurinta, sillä vesipatsaan sestonin sedimentoitumisen lisäksi materiaalia fokuoitetuu ja sortuu kauden aikana matalammilta alueilta (Niemistö ym. 2020). Tästä huolimatta matalalla näytepisteellä erityisesti kevättäyskierron aikana  $BS_{Fe-P}$  oli merkittävän suuri ( $> 40 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ ) verrattuna kesäkerrostuneisuuden aikaan ( $< 10 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ ) ja syystäyskiertoonkin ( $> 20 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ ). Ilmiö oli erityisen korostunut keväällä tutkimusjakson aikana, jolloin myös erityisesti talvikerrostuneisuuden aikana liukoisen fosforin (Kuva 5) ja varsinkin raudan (Kuva 6) pitoisuudet olivat syvänteessä korkeita. Selkeä  $BS_P$  ja  $BS_{Fe-P}$  piikki on havaittavissa myös syystäyskierron aikaan, mitä tukevat myös sedimentin kohonneet kokonaisfosfori ja -rautapitoisuudet näytepisteillä (Taulukko 1).



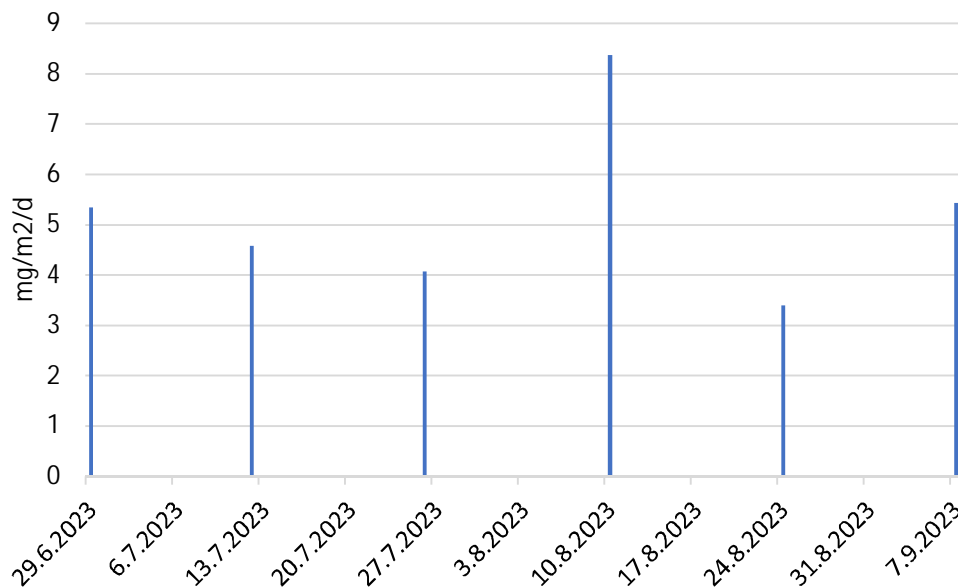
Kuva 15. Kokonaisfosforin bruttosedimentaatiot eli rautasidonnaisen fosforin ja muun fosforin suhteet eri syvyyssyöhykkeillä (mg/m<sup>2</sup>/d). Puuttuvat pisteet: 26.5. matala vyöhyke (liian vähän näytettä kokonaisfosforin (muu P) määrittämiseen), 26.7. ja 10.8. välivyöhyke (keräimet kadonneet).

### 3.2. Laskelmat ja alusveden poisjohtamisen kunnostuspotentiaali Enoselällä

#### 3.2.1. Fosforivuo pohjanläheiseen veteen eri näytteenottopisteillä

Liukoisen fosfaattifosforin laskennallinen diffuusionopeus vaihteli syvännepisteen pintasedimentissä kerrostuneisuuskauden aikana n. 3 mg/m<sup>2</sup>/d (24.8.) – 8 mg/m<sup>2</sup>/d (10.8.) (Kuva 16). Arvot ja vaihteluhaarukka vastasivat tasoltaan Kymijärven Myllypohjasta mitattuja lukuja (Silvonen ym.

2021). Diffuusionopeudet noudattelivat todennäköisesti pohjanläheisen veden lämpötilojen lisäksi sedimentoituvan orgaanisen aineen määrää: diffuusio oli korkeinta sedimentaatiopiikkien (mm. täyskierrot) jälkeen laskien asteittain kunnes tapahtui uusi sedimentaatiomaksimi. Korkein yksittäinen fosforin diffuusiomittaus oli 10.8. (Kuva 16), mihin esimerkiksi vaikuttivat todennäköisesti yhdessä alusveden lämpötila sekä kesän kasviplanktonuotannosta ja mahdollisesti näytteenottoa edeltävistä myrskytuulista johtuva korkeahko bruttosedimentaatio (Kuva 14).

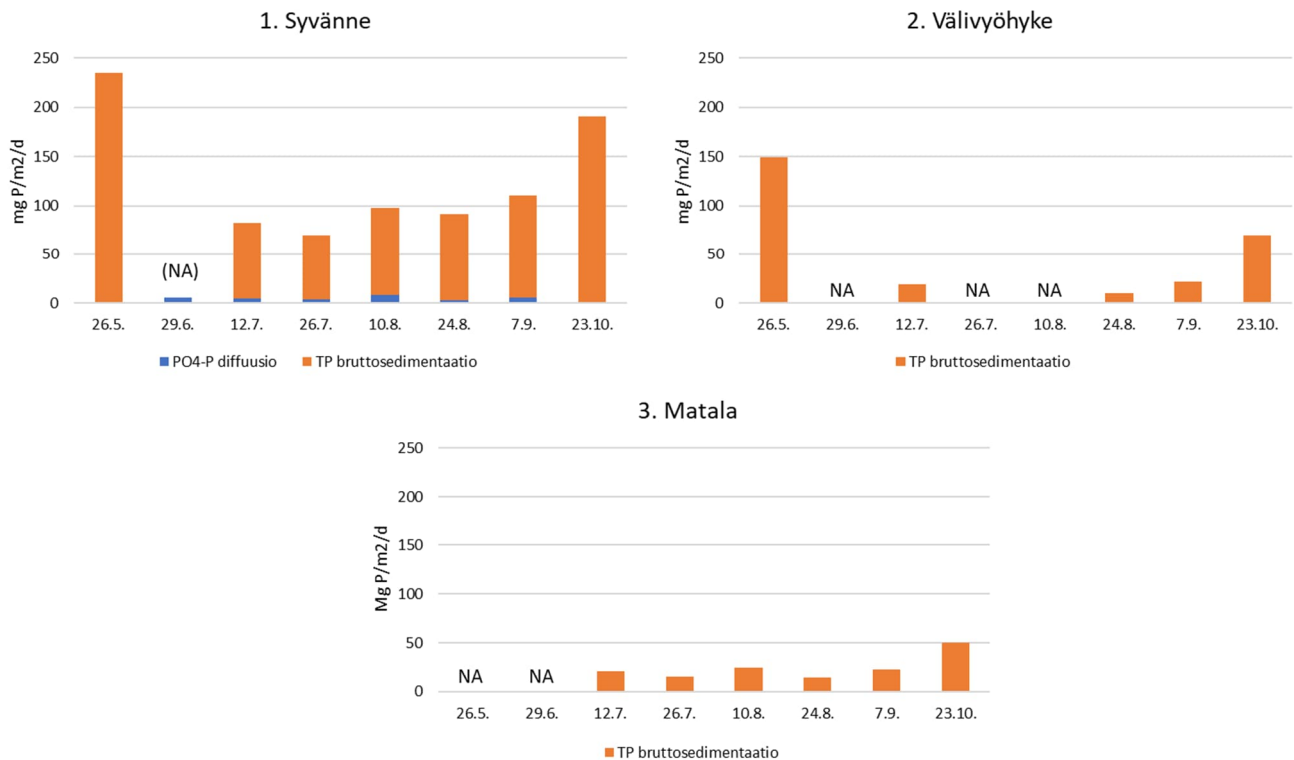


**Kuva 16.** Liukoksen fosfaattifosforin ( $PO_4\text{-P}$ ) laskennallinen diffuusionopeus syvännepisteen pintasedimentistä pohjanläheiseen veteen eri näytteenottoajankohtina.

Lankiluodon syvänteen pohjanläheisen veden fosforivuosta ylivoimaisesti suurimman osan muodosti partikkelimainen fosfori (fosforin bruttosedimentaatio; ks. luku 3.1.4.), jonka osuus oli sedimentin diffuusiolukemiin nähden kaikkina näytteenottoajankohtina yli kymmenkertainen (Kuva 17). Yhteenlaskettu sedimentin diffuusioperäinen ja bruttosedimentaationa laskettu partikkelimainen fosfori muodostivat suurimman fosforivuon syvännepisteellä. Suurimmat bruttosedimentaatiot mitattiin kaikilla pisteillä kevät- ja syyskiertojen aikana (Kuvat 14 ja 17), mikä korostaa vesimassojen vaikutusta järven sisäisten fosforivarastojen liikkeissä täyskiertojen aikana.

Keskimääräinen fosforivuo syvännepisteellä kerrostuneisuuskauden aikana (näytteenottopäivät 29.6.–7.9.) oli  $76 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ , välivyöhykkeellä  $17 \text{ mg/m}^2/\text{d}$  ja matalalla pisteellä  $19 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ . Aikaisempien tutkimusten mukaan Enonselän ulkoisen kuormituksen on puolestaan arvioitu olevan  $0,23 - 0,45 \text{ mg/m}^2/\text{d}$  (Horppila ym. 2016). On huomattava, että sisäisen ja ulkoisen kuormituksen lukemat eivät suoraan vertaudu toisiinsa, sillä sisäkuorma kuvastaa järveen kertyneen fosforin toistuvaa kiertoa ekosysteemissä, kun taas ulkokuorma kuvaa uuden fosforin bruttokertymää järveen. Sisä- ja ulkokuorman suuruusluokkaerot kertovat kuitenkin siitä, että järvi-ekosysteemiin kertyneen fosforin sisäisellä kierrolla on huomattava merkitys järven trofiatason ylläpitäjänä; merkittävä osa sedimentoituneestakaan fosforista ei haudaudu pysyvästi vaan jatkaa kiertoa vesipatsaan ja sedimentin välillä erilaisin mekanismein. Lisäksi ulkoinen kuormitus on laskettu vuotuisen ravinnekuormituksen pohjalta ja suurin osa ulkoisesta kuormituksesta tulee järveen kesäkerrostuneisuuskauden ulkopuolella kevät- ja syysvaluntapiikkeinä, mikä voi korostaa järven sisäisten ravinnekiertoprosessien merkitystä kasvukaudella. Enonselän vuotuista fosforikuormitusta on myös vastikään tarkistettu ja ulkoinen kuormitus havaittu aikaisempaa ( $1\,982 \text{ kg/v}$ ) suuremmaksi

(2 982 kg/v), kun VEMALA:n kuormitusmalliin tarkennettiin valuma-alueen havaintopisteitä (Narikka & Huttunen 2023).



**Kuva 17.** Fosforin vuo pohjanläheiseen veteen eri näytteenottopäivinä mitattuna liukoisen fosfaattifosforin (PO<sub>4</sub>-P) diffuusiona ja kokonaisfosforin (TP) bruttosedimentaationa. NA=mittausaineisto puuttuu kokonaisuudessaan kyseiseltä päivältä, (NA)=bruttosedimentaatiomittaus puuttuu. Diffuusioiden osalta on esitetty lukemat ainoastaan niiltä ajankohdilta ja alueilta, joilla alusvesi oli hapetonta.

### 3.2.2. Fosforinpoistopotentialia alusvettä poisjohtamalla

Fosforinpoistopotentialia Enonselän Lankiluodon syvänteellä alusvettä poistamalla arvioitiin eri kriteerein (Taulukko 2). Laskelmissa käytettiin pohjanläheisen veden arvioidun kesäkerrostuneisuuskauden (100 d) mukaista, tässä tutkimuksessa mitattua keskimääräistä kokonaisfosforipitoisuutta (227 µg/l). Laskelmien kriteereinä käytettiin mm. erilaisia poistovirtaamia (10 - 1 000 l/s), joiden perusteella arvioitiin vastaavat fosforipoistumat ( $TP_{exp}$ ). Esim. poistovirtaamalla 10 l/s fosforin kokonaispoistuma yhden kerrostuneisuuskauden aikana olisi 20 kg ja virtaamalla 100 l/s kilonääräinen kokonaispoistuma kerrostuneisuuskaudella olisi 198 kg ja virtaamalla 1000 l/s vastaavasti 1 964 kg. Eri poistovirtaamien kohdalla arvioitiin vedenottoputken vaadittavaa vähimmäisvaikutusaluetta, joka esimerkiksi edellä esitetyillä arvoilla olisi 0.3 ha, 2.6 ha ja 25.8 ha. Vedenottoputken vähimmäisvaikutusalue eli vedenoton kattama pohjan pinta-ala kasvaa luonnollisesti poistovirtaaman kasvaessa. On toki todettava, että vedenottoputken laskennallisen vaikutusalueen todentamiseksi on hyvä esim. mallinnuskeinoin arvioida veden liikkeitä mahdollisen putken läheisyydessä. Käytännössä yksittäisen vedenottoputken vaikutusalue ei siis välttämättä voi ylittää etenkään suurilla virtaamilla taulukossa 2 esitettyihin pinta-aloihin, vaan suurten virtaamien tapauksessa vedenotto tulisi mahdollisesti jakaa usean putken välille riittävälle pinta-alalle, jotta pohjanläheisen veden laimenemista ei pääse tapahtumaan.

**Taulukko 2.** Laskelmat fosforin poistumisesta Enonselältä Lankiluodon syvänteen (>20 m syvyyssvyöhyke) alusvettä poisjohtamalla. Laskelmissa on käytetty pohjanläheisen veden (0–3 m päästä sedimentin pintaa otetut vesinäytteet) kesäkerrostuneisuuskauden keskimääräistä kokonaisfosforipitoisuutta 227 µg/l.

Alusveden poistovirtaama (l/s)	Vedenottoputken vaadittu vähimmäisvaikutusalue A <sub>TP</sub> (ha)	Alusveden poiston maksimikesto kauden aikana* (d)	Fosforin kokonaispoistuma TP <sub>exp</sub> (kg/kerrostuneisuuskausi)
10	0.3	100	20
20	0.5	100	39
50	1.3	100	98
100	2.6	100	196
500	12.9	100	982
1 000	25.8	100	1 964

\* Kun kesän aikana poistettavan veden maksimitilavuudeksi määritellään 40 % alusveden tilavuudesta; ks. Silvonon ym. 2021. Maksimikeston ylärajana 100 d, joka vastaa karkeasti kesäkerrostuneisuuskauden pituutta.

Fosforinpoiston merkittävyyden arvioinnissa sisäisen kuormituksen osalta huomattavaa on paitsi fosforivuon suuruus ja sen myötä veden kokonaisfosforipitoisuus, myös laatu. Syvänteessä kerrostuneisuuskaudella suurin osa partikkelimaisen fosforin vuosta pohjanläheiseen veteen (bruttosedimentaatio) koostui rautasidonnaisesta fosforista (Kuva 15). Rautaoksideihin sitoutunutta fosforia puolestaan voidaan pitää ns. labiilina fraktiona, sillä siitä merkittävä osa voi vapautua hapettomassa alusvedessä orgaanisen aineen hajotustoiminnan yhteydessä. Mitä suurempi osa syvänteisiin sedimentoituvasta rautasidonnaisesta fosforista pystytään poistamaan, sitä vähemmän labiilia fosforia sedimenttiin pääsee kertymään. Tämä puolestaan voi ainakin teoriassa vähentää fosforin hapettoman sisäkuorman määrää paikallisesti.

### 3.2.3. Nürnbergin regressiojärvet: järvien ominaisuuksien ja kunnostustuloksen yhteys sekä soveltaminen Enonselän tapauksessa

Spearmanin korrelaatiotesteissä yhdenkään tarkastellun järven ominaisuuden ja kunnostuksen hyötysuhteen välillä ei ilmennyt merkitsevää yhteyttä merkitsevyystasolla 0,05; korrelaatiokertoimen  $|r_s|$  arvot vaihtelivat 0,03–0,35 ja  $p$ -arvot olivat 0,29–0,95 (LIITE: Taulukko A1). Jos testeistä jätettiin pois järvi, jonka päällysveden TP-pitoisuus oli lähtötilanteessa erityisen korkea (Chain, 300 µg/l), oli  $|r_s|$  päällysveden TP-lähtötilannepitoisuuden ja kunnostuksen hyötysuhteen välillä 0,49  $p$ -arvolla 0,15. Muiden ominaisuuksien osalta kyseisen järven pois jättäminen testistä ei vienyt korrelaatioita lähemmäs merkitsevää tasoa (LIITE: taulukko A1).

Nürnbergin (2020) regressiojärvien ominaisuuksien tarkastelussa ei ilmennyt sellaista tekijää, jolla olisi tilastollisesti merkitsevä yhteys alusveden poisjohtamisen hyötysuhteeseen. Näin ollen ei löytynyt perustetta sille, ettei regressioyhtälöä voisi käyttää työkaluna Enonselän tapauksessa, joskaan ei myöskään saatu tukea sen soveltavuudelle, koska selkeitä säännönmukaisuuksia ei aineistosta löytynyt. Tilastollisesti merkitsevien tulosten puute voi osittain liittyä aineiston varsin pieneen kokoon ( $n=11$  tai 10), ja suuremmalla havaintomäärällä säännönmukaisuuksia tulisi joidenkin ominaisuuksien suhteen todennäköisesti paremmin esiin.

Tästä antaa mahdollisesti viitteitä se, että yhden poikkeavan havainnon jättäminen testin ulkopuolelle (Chain-järven korkea TP-lähtöpitoisuus) tuotti päällysveden TP-lähtöpitoisuuden ja alusveden poisjohtamisen hyötysuhdeindeksin välille selvästi suuremman, joskaan ei edelleenkään merkitsevän, negatiivisen korrelaation. Poikkeavan havainnon jättäminen ulkopuolelle voi olla

perusteltua, sillä Chain-järvessä oli alusveden poisjohtamisen lisäksi tehty sedimentin ruoppausta (Murphy ym. 1999), mikä osaltaan poisti järvestä merkittävästi fosforia, ja mahdollisesti tämän seurauksena päällysveden TP-alenema oli alusveden mukana poistettuun fosforimäärään nähden suurempi kuin muilla järvillä. Tämä havainto saattaisi merkitä, että kunnostettavan järven päällysveden TP-pitoisuus voi olla yhteydessä siihen, kuinka suuren pitoisuusaleneman tietty pinta-alasuhteutettu fosforipoisto saa aikaan: matalammilla lähtöpitoisuuksilla tehokkuusennuste on mahdollisesti parempi. Päätelmää ei kuitenkaan olemassa olevalla aineistolla voida riittävästi vahvistaa, ja on huomioitava, että aineiston matalat lähtöpitoisuudet ovat voineet olla yhteydessä johonkin muuhunkin kunnostustulokseen vaikuttavaan tekijään.

Lisäksi on todennäköistä, että järven suhteellinen syvyys (esimerkiksi morfometrisellä indeksillä mitattuna) vaikuttaa alusveden poisjohtamisen kunnostustehoon, vaikka yhteyttä ei Nürnbergin (2020) regressioaineistolla pystytty osoittamaan – syvänteiden merkitys järven rehevyysasteen säätelijänä riippuu osin siitä, kuinka suuren osan järven pinta-alasta ne muodostavat. Regressioaineiston järvien morfometrisen indeksin keskiarvo on 20 m/km, mikä kuvaa sitä, että aineiston järvet ovat keskimäärin morfologialtaan selvästi kuoppamaisempia kuin Enonselkä. On kuitenkin mahdotonta päätellä, missä määrin ja millä raja-arvolla järven suhteellinen syvyys vaikuttaa kunnostustulokseen; regressioaineiston joukossa on myös melko matalia järviä, joilla alusveden poisjohtamisen jälkeen havaitut päällysveden TP-pitoisuusalenemat olivat merkittäviä.

Jos Enonselän yhtenä kunnostustavoitteena on päällysveden TP-pitoisuuden laskeminen suurille vähähumuksisille järville määritellyn hyvän tilan raja-arvon alle (<18 µg/l), olisi vaadittava suhteellinen pitoisuusalenema tässä tutkimuksessa mitatusta keskimääräisestä, kesäaikaisesta pintakerroksen pitoisuudesta (21 µg/l; ks. kappale 3.1.2.) 18 %. Nürnbergin (2020) regressioyhtälöllä laskettuna tämä edellyttäisi yhteensä 94 mg/m<sup>2</sup> fosforipoistoa alusvettä poisjohtamalla – koko Enonselän pinta-alaan suhteutettuna (ml. Paimelanlahti ja Vähäselkä) vaadittava kokonaispoistuma olisi siten 3 019 kg. Tämä tavoitepoistuma voitaisiin saavuttaa taulukko 2 esitettyjen, alusveden poisjohtamisesta seuraavien fosforipoistumien perusteella nopeimmillaan noin 1,5 kesäkerrostuneisuuskauden aikana pumppausvirtaamalla 1 000 l/s, mikäli vedenottoputken tai -putkien vaikutusalue on mahdollista saada hyvin laajaksi (25,8 ha). Pumppausvirtaamalla 500 l/s vaadittu vedenottoputken vaikutusalue olisi puolet tästä, jolloin fosforin tavoitepoistuma saavutettaisiin noin 6 kesäkerrostuneisuuskauden aikana.

#### 4. Yhteenveto ja johtopäätökset

Enonselän vesialtaan kokonaisfosfori- ja rautamassojen vuodenaikaiset vaihtelut päälly- ja alusvedessä sekä erityisesti kokonaisfosfori- ja rautamassojen keskittyminen päällysveteen kevät- ja syystäyskiertojen yhteydessä puoltavat täyskiertojen ja syvien hapettomien alueiden merkitystä aineiden kulkeutumisessa ja vertikaalisessa kumpuamisessa. Selvityksessä havaittiin myös viitteitä täyskiertojen yhteydestä markkerina käytetyn rautasidonnan fosforin kierrossa ja kulkeutumisessa eri syvyysvyöhykkeiden välillä. Kerrostuneisuuskausien tärkeä rooli liukoisen fosforin kertymisessä alusveteen sekä täyskiertojen merkitys alusveden fosforin kumpuamisessa ja leviämisessä on selkeä: vaikka rautasidonnan fosforin pitoisuusnousua täyskierrossa veden pintakerroksissa ei mittauksissa havaittu yhtä selkeästi kuin Nürnbergin (1985) tutkimuksessa, liukoisen fosforin vastaava pitoisuusnousu tukee päätelmää, että kyse oli pikemminkin mittausmenetelmän rajoitteista kuin ilmiön puuttumisesta. Rautasidonnan fosforin osuus sedimentoituvasta aineksestä eri syvyysvyöhykkeillä ei ollut täyskierroissa suurempi kuin kesäkerrostuneisuuskaudella: tämä ei kuitenkaan sulje pois mahdollisuutta, että alusvesiperäistä fosforia sedimentoituu merkittävästi myös matalille alueille, mutta tutkimuksessa muiden fosforifraktioiden rooli sedimentaatioiden nousussa täyskierroissa oli vähintään yhtä merkittävä.

Fosforinpoistopotentiali Vesijärven Enonselän Lankiluodon syvänteellä alusvettä poistamalla arvioitiin eri kriteerein käyttämällä pohjanläheisen veden arvioidun kesäkerrostuneisuuskauden mukaista keskimääräistä kokonaisfosforipitoisuutta (227 µg/l) ja erilaisia poistovirtaamia (10 – 1 000 l/s), joiden perusteella arvioitiin vastaavat fosforipoistumat. Nürnbergin (2020) regressioyhtälön sovellettavuudelle ja luotettavuudelle Enonselän tapauksessa ei tässä selvityksessä ilmennyt sen enempää selkeitä vasta-aiheita kuin puoltavia tekijöitä regression tausta-aineiston suppeudesta johtuen. Yleisesti ottaen yhtälöllä voidaan arvioida aika, jona tietyllä vuosittaisella fosforipoistumalla saavutetaan jokin tietty päällysveden TP-enimmäispitoisuus; esimerkiksi Enonselän (Vesijärven) tapauksessa raja-arvona voidaan pitää <18 µg/l, joka on suurille vähähumuksisille järville määritellyn hyvän tilan raja-arvo.

Valittu poistomenetelmä vedenkäsittelykapasiteetteineen, käytettävissä olevat resurssit ja haluttu kunnostusaika pitkälti määrittävät käytettävän poistovirtaaman. Vesijärven Enonselän päällysveden TP-pitoisuus (21 µg/l) on niin lähellä haluttua hyvän tilan rajaa, että voidaan todeta, että kaikilla valituilla pumppaustehoilla on oletettavasti positiivinen vaikutus päällysveden pitoisuuden laskuun. Pistemäisen alusveden poistoputken vähimmäisvaikutusalue on rajoitettu, joten jos halutaan optimoida sedimentistä diffundoituvan fosforin tasainen poistoteho, poistoputken vaikutusalueen pinta-ala ja sitä kautta poistovirtaama on mahdollista maksimoida esim. useammalla poistoputkella, mahdollistamalla poistoputken ajoittainen siirtäminen alueella tai putken reiittäminen pidemmältä alueelta.

Enonselän syvänteessä havaittiin kesäkerrostuneisuuden lisäksi erityisesti talvella erittäin korkeita pohjanläheisiä alusveden liukoisen fosforin pitoisuuksia (ka. 1 502 µg/l). Havainto puoltaa ajatusta siitä, että alusveden poisto kunnostusmenetelmänä voi olla mielekäästä kesäkerrostuneisuuden lisäksi myös talvikerrostuneisuuden aikaan, jolloin sedimentistä diffundoituvaa liukoista fosforia poistamalla voidaan merkittävästi vähentää kevättäyskierrossa tuottavaan kerrokseen päätyvien ravinteiden kokonaismäärää. Tällä voi olla merkittävä vaikutus varsinkin saman vuoden kevään ja alkukesän perustuotantotasoon.

Tämän selvityksen tavoitteena oli myös haarukoida, milloin ja mistä fosforipitoista vettä olisi järven kunnostusmielessä tehokkainta poistaa. Kerrostuneisuuskauden hapettomat syvänealueet ovat korkeista pitoisuuksista johtuen tehokkaimpia alueita fosforin poistoon. Tässä selvityksessä havaittiin lisäksi, että hapettomissa oloissa sedimentistä diffundoituva liukoinen fosfori on merkittävä, mutta toisaalta pieni osa vesimassan fosforin kokonaisvuosta. Diffuusion lisäksi suuri osa pohjanläheisen veden fosforivuosta (>90 %) on syvänealueilla ja matalammilla alueilla



tapahtuvasta partikkelimaisen fosforin bruttosedimentaatiota. Tämä koostuu sekä uuden tuotetun orgaanisen aineksen vajoamisesta ja mineralisaatiosta että sedimentin mukana resuspendoituneesta aineksesta. Havainto puoltaa sitä, että varsinaisten syvänealueiden lisäksi fosforin poistaminen myös matalammilta alueilta vähentää Enonselän vesialueen leväkukintoja ylläpitävää fosforivarastoa.

Vaikka kasvukaudella määrällisesti suurin osa Enonselän sisäisestä kuormituksesta tuottavaan kerrokseen on peräisin matalilta alueilta, tämä tutkimus osoittaa, että alusveteen kerrostuneisuuskausilla kertyvä fosfori kiertää järvessä täyskiertojen aikaansaamana ja siten osaltaan hidastaa vesipatsaan ravinnepitoisuuksien laskua tavoiterajoihin. Näin ollen järven fosforivarastojen ehdyttäminen joko syvänteiden alusvedestä tai muilta alueilta todennäköisesti tukisi Enonselän rehevyytason vähentämistä pitkällä aikavälillä yhdessä valuma-alueeseen kohdistuvien toimien kanssa.

### *Kiitokset*

Gertrud Nürnberg toimitti käyttööme aineistoa järvistä, jotka olivat mukana hänen regressioyhtälössään julkaisussa Nürnberg (2020). Päijät-Hämeen Vesijärvisäätiö rahoitti selvitystyön.

## 5. Lähteet

- Balistrieri LS, Murray JW, Paul B (1992) The cycling of iron and manganese in the water column of Lake Sammamish, Washington. *Limnology and Oceanography* 37: 510-528.
- Blais JM & Kalff J (1995) The influence of lake morphometry on sediment focusing. *Limnology and Oceanography* 40:582-588.
- Boström B, Jansson M, Forsberg C (1992) Phosphorus release from lake sediments. *Archiv für Hydrobiologie – Beiheft Ergebnisse der Limnologie* 18: 5-59.
- Boudreau BP (1997) *Diagenetic models and their implementation*. Springer.
- Davison W (1993) Iron and manganese in lakes. *Earth-Science Reviews* 34: 119-163.
- Horppila J., Niemistö J. & Silvonen S. (2016) Vesijärven sisäisen fosforikuormituksen kehitys hapetuksen aikana. Raportti. Helsingin yliopisto, ympäristötieteiden laitos.
- Jilbert T, Jokinen S, Saarinen T, Mattus-Kumpunen U, Simojoki A, Saarni S, Salminen, S, Niemistö J & Horppila J (2020) Impacts of a deep reactive layer on sedimentary phosphorus dynamics in a boreal lake recovering from eutrophication. *Hydrobiologia*, 847:4401–4423, <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04289-9>.
- Murphy TP, Macdonald RH, Lawrence GA, Mawhinney M (1999) Chain Lake restoration by dredging and hypolimnetic withdrawal. Teoksessa: *Aquatic Restoration in Canada, Ecovision World Monograph Series* (s. 195–211). Backhuys Publishers, Leiden, Alankomaat.
- Narikka M. & Huttunen I (2023) Vesijärven ulkoisen kuormituksen tarkentaminen Vemala –malliin. Suomen ympäristökeskus. Raportti Päijät-Hämeen Vesijärvisäätiölle. 18 s.
- Niemistö J., Köngäs P., Hietanen S., Horppila J. (2011) Sisäinen fosforikuormitus ja sedimentin hapenkulutus Vesijärven Enonselällä 2011. Raportti. Helsingin yliopisto, ympäristötieteiden laitos.
- Niemistö J, Köngäs P, Härkönen L & Horppila J (2016) Hypolimnetic aeration intensifies phosphorus recycling and increases organic material sedimentation in a stratifying lake: Effects through increased temperature and turbulence. *Boreal Environment Research* 21:571-587.
- Niemistö J, Silvonen S & Horppila J (2020) Effects of hypolimnetic aeration on the quantity and quality of settling material in a eutrophied dimictic lake. *Hydrobiologia* 847:4525-4537.
- Niemistö J, Wichmann A, Nurmesniemi E-T, Aurola A-M, Hurmerinta E (2022) Vesijärven Enonselän ravinnekuormituksen kemiallisten vähentämistoimenpiteiden suunnittelu. AFRY:n projektiraportti Päijät-Hämeen Vesijärvisäätiölle.
- Nurminen L., Niemistö J., Silvonen S., Jilbert T., Horppila, J., Malin I. & Kotakorpi M. (2020). Vesistöjen sisäinen kuormitus hyötykäyttöön –uuden sovelluksen jalkauttaminen. (VESIKUJA -hanke) Loppuraportti. Helsingin yliopisto.
- Nürnberg GK (1985) Availability of phosphorus upwelling from iron-rich anoxic hypolimnia. *Archiv für Hydrobiologie* 104:459-476.
- Nürnberg GK (2020) Hypolimnetic withdrawal as a lake restoration technique: determination of feasibility and continued benefits. *Hydrobiologia* 847:4487-4501.
- Ruttenberg KC (1992) Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments. *Limnology and Oceanography* 37:1460-1482.

- Saggio A & Imberger J (2001) Mixing and turbulent fluxes in the metalimnion of a stratified lake. *Limnology and Oceanography* 46: 392-409.
- Sarazin G, Gaillard JF, Cois, Philippe L & Rabouille C (1995) Organic matter mineralization in the pore water of a eutrophic lake (Aydat Lake, Puy de Dôme, France). *Hydrobiologia* 315:95–118.
- Silvonen S, Niemistö J, Csibrán A, Torma P, Krámer T, Nurminen L, Jilbert T & Horppila J (2021) A biogeochemical approach to evaluate the optimization and effectiveness of hypolimnetic withdrawal. *Science of the Total Environment* 755:143202.
- Silvonen S, Niemistö J, Myyryläinen J, Kinnunen O, Huotari S, Nurminen L, Horppila J & Jilbert T. (2022) Extracting phosphorus and other elements from lake water: chemical processes in a hypolimnetic withdrawal and treatment system. *Water Research* 218:118507.
- Slomp CP, Epping EH, Helder W & Raaphorst WV (1996) A key role for iron-bound phosphorus in authigenic apatite formation in North Atlantic continental platform sediments. *Journal of Marine Research* 54:1179-1205.
- Tammeorg O, Möls T, Niemistö J, Holmroos H, Horppila J (2017) The actual role of oxygen deficit in the linkage of the water quality and benthic phosphorus release: potential implications for lake restoration. *Science of the Total Environment* 599–600:732–738.
- Zhao, S., Hermans, M., Niemistö, J., & Jilbert, T. (2024). Elevated internal phosphorus loading from shallow areas of eutrophic boreal lakes: Insights from porewater geochemistry. *Science of the Total Environment* 907, 167950.

## LIITTEET

Taulukko A1. Spearmanin korrelaatiotestien tulokset Nürnbergin (2020) regressioyhtälössä mukana olleiden järvien ominaisuuksien yhteydestä kunnostuksen hyötysuhdeindeksiin. a) Analyysissä mukana kaikki regressiossa mukana olleet järvet (n=11) b) Analyysistä jätetty pois ruoppauskäsitelty Chain-järvi (n=10).

Ominaisuus	$r_s$	$p$	df	S
a) A (km <sup>2</sup> )	0.03	0.95	9	214
V (10 milj. m <sup>3</sup> )	0.22	0.52	9	172
Keskisyvyys (m)	-0.32	0.34	9	290
Suurin syvyys (m)	-0.35	0.29	9	298
Morfometrinen indeksi (m/km)	-0.20	0.56	9	264
Päällysveden TP lähtötilanteessa	-0.12	0.73	9	246
b) A (km <sup>2</sup> )	-0.01	1.00	8	166
V (10 milj. m <sup>3</sup> )	0.27	0.45	8	120
Keskisyvyys (m)	-0.25	0.49	8	206
Suurin syvyys (m)	-0.26	0.47	8	208
Morfometrinen indeksi (m/km)	-0.12	0.76	8	184
Päällysveden TP lähtötilanteessa	-0.49	0.15	8	246