



Ravinteet Poistoon: Alusveden suodatusmenetelmän sovellettavuus (2023–2024)

Loppuraportti

Laura H. Härkönen, Leena Nurminen, Kaarina Lukkari, Meri
Back, Juha Grönroos ja Suvi Lehtoranta



Suomen ympäristökeskus
Finlands miljöcentral
Finnish Environment Institute



Sisällys

Tiivistelmä	4
Hankkeen tausta ja tavoite	5
Hankkeen toteutus	6
Kohdejärvi	6
Taustaselvitykset	7
Vedenlaadun seuranta	7
Sedimenttinäytteenotto ja sisäisen kuormituspotentialin arviointi	8
Luvat ja suostumukset	9
Alusveden suodatuspilotin laitteisto ja toteutus	9
Alusveden suodatuspilotin seuranta	12
Hankkeen tulokset.....	13
Järvivesinäytteiden tulokset	13
Järjestelmänäytteiden tulokset	14
Polymeerilisäyksen vaikutus.....	18
Pilotin laskennallinen tehokkuus	20
Rejektivedessä olevan fosforin hyötykäyttöpotentiaalin arviointi	21
Alusveden suodatusmenetelmässä syntyvä sivuvirta	22
Vastaavan materiaalin aiempi käsittely ja mahdollinen hyötykäyttö.....	22
Rejektiveden mahdollisuudet fosforiravinteen kierrätyksessä	23
Hiekkasuodattimelle kertyneen fosforipitoisen hiekan kierrätysmahdollisuus	24
Kustannus- ja lainsäädännöllisiä näkökulmia talteen otetun fosforiravinteen kierrätyksessä.....	25
Pilotin kustannukset	26
Kokemukset pilotista	27
Hankkeen vaikuttavuus	28
Vesienhoidon edistäminen	28
Soveltuvuus ja vaikuttavuus tulevilla vesienhoitohankkeissa	28
Viestintä	30
Yhteistyö	33
Hankkeen toteutuminen seurattavien mittareiden perusteella	34
Hankkeen kokonaiskustannukset ja rahoitus	35
Johtopäätökset.....	35
Kiitokset	36
Lähteet.....	37

Kirjoittajat: Laura H. Härkönen¹, Leena Nurminen², Kaarina Lukkari¹, Meri Back¹, Juha Grönroos¹ ja Suvi Lehtoranta¹

¹⁾ Suomen ympäristökeskus, Latokartanonkaari 11, 00790 Helsinki

²⁾ Helsingin yliopisto, Viikinkaari 1, 00790 Helsinki

Kannen kuva: Laura Härkönen

Tiivistelmä

Alusveden poisto, suodatus ja palautus kunnostettavaan järveen on kerrostuville järville soveltuva kunnostusmenetelmä, jossa pyritään suodattamalla poistamaan alusvedessä olevia ravinteita. Järviin kertyneiden ravinteiden poistoon tähtäävien järvikunnostusmenetelmien kehittämisellä on mahdollista parantaa järvikunnostusten vaikuttavuutta. Lisäksi ravinteiden poistoon tähtäävät menetelmät voivat tukea yhteiskunnallisia kiertotaloustavoitteita ja edistää siirtymää kohti ravinteiden suljettua kiertoa.

Ympäristöministeriön rahoittamassa Ravinteet poistoon: Alusveden suodatusmenetelmän sovellettavuus (RaPo)-hankkeessa pilotoitiin Inkoon Linkullasjön-järvellä kesän 2024 aikana vedenpuhdistusteknologiaan perustuvaa suljetun kierron alusveden suodatusmenetelmää. Suomen ympäristökeskuksen ja Helsingin yliopiston yhteistyöhankkeen tavoitteena oli jatkokehittää Lahden Kymijärvellä pilotoidun hiekkasuodatusmenetelmään perustuvan menetelmän monistettavuutta ja sovellettavuutta. Suodatuspilotti suunniteltiin avovesikaudella 2023 tehtyihin vedenlaadun ja sedimentin taustaselvityksiin perustuen. Pilotin päätyttyä arvioitiin alusveden suodatuksen vaikuttavuutta suhteessa ravinteiden poistotehokkuuteen. Lisäksi arvioitiin suodatuksen sivuvirtana syntyneen fosforipitoisen rejektiveden hyötykäyttöpotentiaalia kasvinravinteena yhdessä Luonnonvarakeskuksen kanssa.

Linkullasjön-järven kerrostuneisuusolojen takia pilotin kesto jouduttiin rajaamaan 21 vrk:n mittaiseksi, jotta voitiin välttää alusveden pumppaamisesta johtuva ennen aikainen kerrostuneisuuden purkautuminen. Linkullasjön väliaikaisessa suodatuspilotissa kokonaisfosforin poistotehokkuus oli keskimäärin 58,9 %, fosfaattifosforin 63,1 % ja kokonaisraudan 52,3 %. Kokonaistypen keskimääräinen reduktio oli 27,2 %, kiintoaineen 26,6 % ja orgaanisen kokonaishiilen 1,9 %. Alusveden suodatuksen tehokkuutta parantaa suodatetun veden johtaminen hiekkasuodattimen jälkeen joko kasvipeitteiseen, perkaamattomaan ojaan tai vaihtoehtoisesti kosteikkoon. Suodatusjärjestelmän toimintahäiriöiden tunnistamisessa järjestelmään tulevan ja siitä lähtevän veden pitoisuuksien seuranta esimerkiksi kenttäspektrofotometrin avulla on suositeltavaa.

Linkullasjön suodatuksessa syntyneen rejektiveden ja hiekkasuodattimessa hyödynnetyn hiekan käyttökelpoisuutta lannoitteena tai maanparannusaineena tutkittiin raiheinän astiakokeiden ja fraktioinnin avulla. Rejektiveden hyödyntäminen kastelukäytössä ei Linkullasjön pilotin tulosten perusteella merkittävästi lisänne kasvien kasvua, sillä rejektiveden fosforipitoisuudet ovat väkilannoitteisiin nähden pieniä. Myöskään suodatushiekkalla ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta raiheinäsatoon. Suodatinhiekan käyttö maanparannusaineena ei kuitenkaan heikentäne fosforin käyttökelpoisuutta tai rajoita kasvien kasvua. Rejektiveden ja suodatushiekan mahdollinen hyötykäyttö on suunniteltava ja arvioitava tapauskohtaisesti.

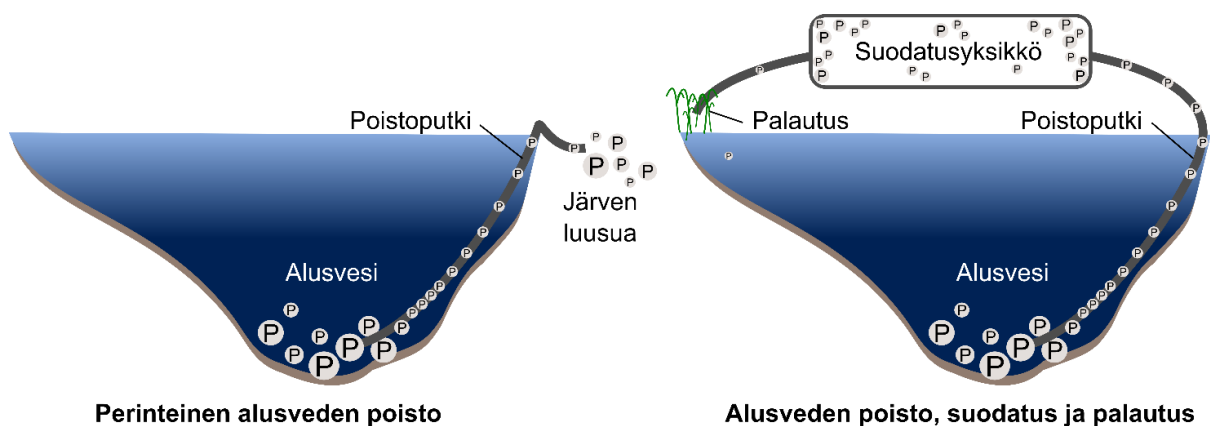
Alusveden suodatushankkeiden kustannukset riippuvat kunnostuskohteesta ja sen käytettävissä olevalle toteutusmenetelmälle asettamista reunaehdoista. Alusveden suodatus voidaan toteuttaa joko erikseen perustetun hiekkasuodatuskentän avulla tai väliaikaisella vedenpuhdistusteknologiaan perustuvalla suodatusyksiköllä. Hiekkasuodatuskentän ja siihen liittyvän laitteiston perustamiskustannukset saattavat olla väliaikaisen, vedenpuhdistusteknologiaan perustuvan ratkaisun perustamiskustannuksia korkeammat, mutta ylläpitokustannukset vastaavasti alhaisemmat. Näin ollen hiekkasuodatuskenttään ja väliaikaiseen suodatusratkaisuun perustuvien alusveden suodatusjärjestelmien kustannukset muodostunevat kokonaisuutta tarkastellen toisiaan vastaaviksi. Yleisesti ottaen ravinteiden poistoon tähtäävien menetelmien alku- ja kertainvestoinnit saattavat olla perinteisiin menetelmiin nähden suurempia, mutta tarve toistettavuudelle vähenee sen myötä, kun ravinteita poistuu järvestä. Järvien kunnostaminen edellyttää lisäksi aina ulkoisen ravinnekuormituksen hallintaa, jota ilman järvien tilaa ei voida parantaa.

Hankkeen tausta ja tavoite

Järvien rehevöityminen on seurausta ravinnepitoisuuksien, usein etenkin fosforipitoisuuden liiallisesta noususta (Schindler 2012). Rehevöityminen aiheuttaa muun muassa kasviplanktonituotannon voimistumista ja sinileväkukintoja, kalakannan vinoutumista ja kasvillisuuden runsastumista. Lisäksi rehevöityminen saattaa lisätä järvien kasvihuonekaasupäästöjä (Beaulieu ym. 2019). Rehevöityminen heikentää siten paitsi järvien ekologista tilaa ja uhkaa useita järviluontotyyppejä ja lajeja, myös järvien virkistyskäyttöarvoa. Siksi ravinnepitoisuuksien vähentäminen on useiden järvikunnostushankkeiden tärkeä päämäärä. Ulkoiseen kuormitukseen kohdistuvat toimenpiteet ovat pitkällä aikavälillä tärkeimpiä, sillä niiden avulla vähennetään järveen kertyvien ravinteiden, erityisesti fosforin määrää. Sisäinen kuormitus, eli pohjasedimentteihin kertyneiden ravinteiden vapautuminen voi kuitenkin hidastaa järven toipumista rehevöitymisestä vielä pitkään ulkoisen kuormituksen vähentämisen jälkeen (Søndergaard ym., 2003). Useimmilla rehevöityneillä järvilla tarvitaan näin ollen toimenpiteitä myös sisäisen kuormituksen vähentämiseksi.

Monet rehevöitymisen torjuntaan tähtäävät järvikunnostusmenetelmät pyrkivät ehkäisemään fosforin (P) vapautumista sedimentistä. Esimerkiksi ravinteita sedimenttiin pidättävillä kemiallisilla käsittelyillä voidaan saavuttaa nopeitakin parannuksia vedenlaatuun, mutta vaikutukset jäävät usein väliaikaisiksi (Agstam-Norlin ym. 2021, Reitzel ym. 2005). Useat luontaiset mekanismit, kuten esimerkiksi turbulenssi, bioturbaatio ja kerrostuneisuuden voimistama alusveden alhainen happipitoisuus edesauttavat ravinteiden sisäistä kuormitusta, joka heikentää järvikunnostusten vaikuttavuutta ja hidastaa vesienhoidon tavoitteiden saavuttamista. Järviin päätyneiden ravinteiden poistoon pyrkivät menetelmät voivat siten tarjota ravinteiden pidättämiseen tähtääviä menetelmiä tehokkaamman ratkaisun pidemmällä aikavälillä (Horppila 2019). Ravinteiden poistoon tähtäävien kunnostusmenetelmien kehittämisellä ja poistettujen ravinteiden hyötykäytöllä voidaan tukea myös yhteiskunnallisia kiertotaloustavoitteita ja edistää ravinteiden siirtymistä luonnolliseen suljettuun kiertoon (Tammeorg ym. 2024).

Alusveden poisto, suodatus ja palautus kunnostettavaan järveen on innovatiivinen kerrostuville järville soveltuva menetelmä, jossa hyödynnetään rehevän järven sisäistä fosforikuormitusta ja pyritään poistamaan alusvedessä olevia ravinteita kesän lämpökerrostuneisuuskaudella (Nurminen ym. 2021). Menetelmässä johdetaan runsaasti ravinteita sisältävää, hapetonta alusvettä rannalle sijoitettuun ilmastussammioon, jonka jälkeen ilmastettu vesi johdetaan ravinnesuodattimena toimivaan hiekkasuodatuskenttään ja edelleen kosteikon läpi tai ojaa pitkin takaisin järveen (Kuva 1). Suodatuskentällä alusveden sisältämää fosforia saostuu alusvedessä olevaan rautaan ja muodostunut ravinnepitoinen sakka jää hiekkasuodatuskentälle.



Kuva 1. Havainnekuva perinteisestä alusveden poistomenetelmästä sekä suljetun kierron alusveden suodatusmenetelmästä.

Suljettuna kiertona toteutettua alusveden suodatusmenetelmää on pilotoitu lupaavin tuloksin Lahden Kymijärvellä vuodesta 2018 saakka (Nurminen ym. 2021, Silvonen ym. 2021, Silvonen ym. 2022). Kymijärvellä ravinnesuodattimena on toiminut valuma-alueelle järven läheisyyteen perustettu pysyvä rakenteinen hiekkasuodatuskenttä. Lisää pilottikohteita kuitenkin tarvitaan, jotta menetelmän soveltuvuutta erityyppisille järville voidaan arvioida tarkemmin.

Ympäristöministeriön rahoittaman **Ravinteet Poistoon: Alusveden suodatusmenetelmän sovellettavuus (RaPo)** -hankkeen (VN/4375/2023) tavoitteena oli jatkokehittää Lahden Kymijärvellä pilotoitun alusveden suljetun kierron suodatusmenetelmän monistettavuutta ja arvioida menetelmän kustannustehokkuutta uudella järvikohteella. Tavoitteena oli saada uutta tietoa hiekkasuodatuksen perustuvan alusveden suodatuksen sovellettavuudesta yleisemmin hyödynnettävänä kerrostuvien järvien kunnostusmenetelmänä. Vaihtoehtona maanrakennustöitä edellyttävälle pysyvä rakenteiselle hiekkasuodatuskentälle hankkeessa testattiin väliaikaista, vedenpuhdistusteknologiaa hyödyntävää hiekkasuodatinratkaisua, joka mahdollistaisi myös fosforipitoisen ravinnesakan talteenoton. Vaikuttavuuden arvioinnin ohella tarkasteltiin näin ollen myös suodatuksen sivuvirtana syntyvässä laitteiston huuhteluvedessä, eli niin kutsutussa rejektivedessä olevan fosforin hyötykäyttöpotentiaalia kasvinravinteena. Suljetun kierron alusveden suodatusmenetelmän monistettavuuden parantamiseksi hankkeen tavoitteena oli myös tuottaa menetelmäohje.

Ympäristöministeriön rahoittamassa Ravinteet Poistoon: Alusveden suodatusmenetelmän sovellettavuus (RaPo) -hankkeessa jatkokehitettiin Lahden Kymijärvellä pilotoitua alusveden suodatusmenetelmää. Tavoitteena oli edistää ravinteiden poistoon tähtäävän alusveden suodatuksen monistettavuutta uusille järvikohteille. Alusveden suodatusmenetelmää kehittämällä voidaan tukea vesienhoidon tavoitteiden saavuttamista.

Hankkeen toteutus

RaPo-hanke toteutettiin Suomen ympäristökeskuksen (Syke) ja Helsingin yliopiston (HY) tutkimusyhteistyönä aikavälillä 1.3.2023-31.12.2024. Syke toimi hankkeessa päätoteuttajana ja HY tutkimusyhteistyösopimuksen kautta.

Kohdejärvi

Maalis-huhtikuun 2023 aikana kartoitettiin yhdessä Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry:n (LUVY) sekä Uudenmaan ELY-keskuksen asiantuntijoiden kanssa hankkeen pilottikohteeksi soveltuvaa, kunnostustarpeessa olevaa kerrostuvaa järveä. Kartoituksen tukena hyödynnettiin Maanmittauslaitoksen syvyyskartta-aineistoja sekä Ympäristöhallinnon avoimesti saatavilla olevia vedenlaadun aikasarjoja.

Ennakkotietojen perusteella RaPo-hankkeen kohdejärveksi valittiin Linkullasjön Inkoossa (järvinumero 81.066.1.005). Järven pinta-ala on 60 ha, maksimisyvyys 7 m ja keskisyvyys 4,8 m. Linkullasjön lukeutuu luontaisesti runsasravinteisiin järviin ja sen ekologinen tila on arvioitu tyydyttäväksi. Järven valuma-alueen pinta-ala on noin 12 km², josta CORINE-maanpeiteaineiston perusteella 34,7 % on maatalousmaita, 45,7 % metsiä ja 1,6 % asutusta. Sekä ulkoisesta että sisäisestä kuormituksesta kärsivällä järvellä toimii aktiivinen kalastuskunta, jolla on halua ja kiinnostusta järven tilan parantamiseen tähtääviin toimenpiteisiin.

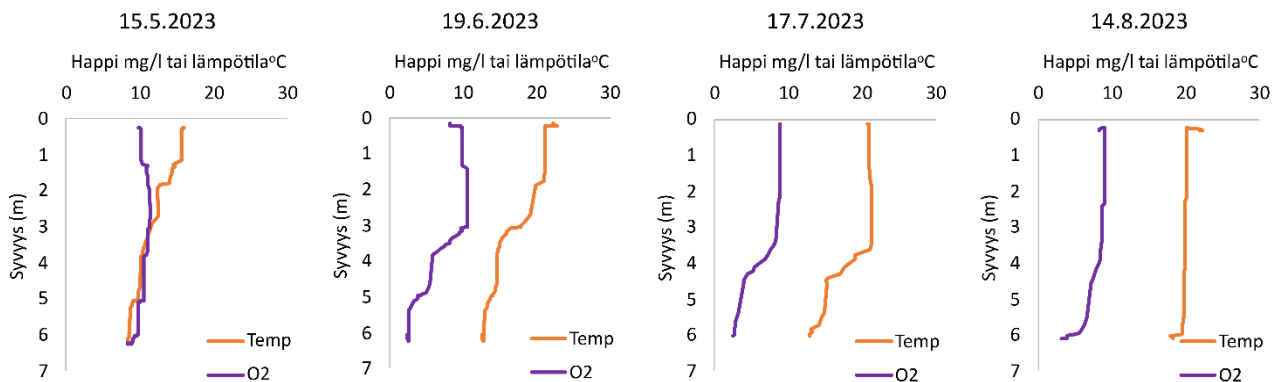
Taustaselvitykset

Järvellä toteutettiin vuoden 2023 aikana vedenlaadun ja sedimentin taustaselvitykset, joiden perusteella pyrittiin selvittämään järven ravinne- ja happiolosuhteita kerrostuneisuuskaudella, sekä järven sisäisen kuormituksen potentiaalia arvioimalla sedimentin fosforivarannon suuruutta ja huokosveden fosfaattifosfori- ja rautapitoisuuksia. Alusveden suodatusjärjestelmä ja -tapa suunniteltiin ja mitoitettiin taustaselvitysten tuloksiin perustuen.

Vedenlaadun seuranta

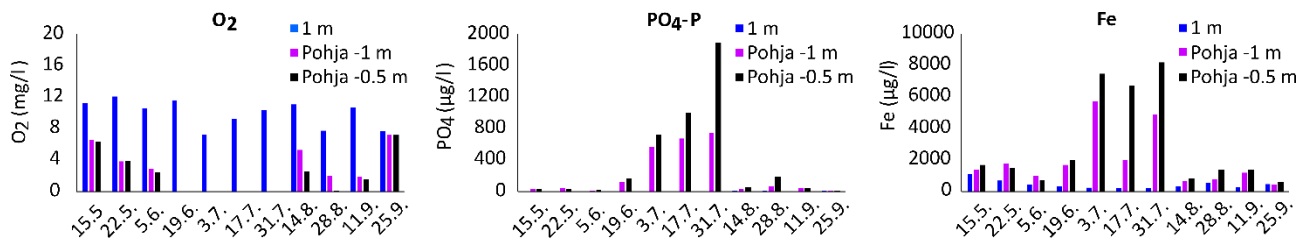
Vedenlaadun seurantaa toteutettiin 15.5.-25.9.2023. Vesinäytteet otettiin kahden viikon välein päänäytteestä (1 m pinnan alapuolelta) sekä alusvedestä (1 m ja 0,5 m pohjan yläpuolelta). Näytteistä määritettiin kokonaisfosfori (TP) ja -typpipitoisuudet (TN), fosfaattifosfori (PO_4), ammoniumtyppi (NH_4), nitraatti- ja nitriittitypen summa (NO_{2-3}), kiintoaine (SS), sameus, orgaaninen kokonaishiili (TOC), happi (O_2), kokonais- (Fe) ja liukoinen rauta (dFe) sekä päänäytteestä 0–2 m syvyydestä kokoomana myös a-klorofylli (Chl). Järviveden analyysitulokset tallennettiin ympäristötiedon hallintajärjestelmä Hertan pintavedenlaatuosioon (Vesla).

Jokaisen näytteenoton yhteydessä määritettiin lisäksi näkösyvyys ja mitattiin jatkuvatoimisella mittarilla (EXO2, YSI Incorporated, Yellow Springs, Ohio, USA) vesipatsaan happipitoisuus ja lämpötila pinnasta pohjaan kerrostuneisuusolojen selvittämiseksi. Vertikaaliprofiilimittausten perusteella havaittiin, että järveen muodostuu jokseenkin epästabiili lämpötilakerrostuneisuus. Lämpötilan harppauskerros oli kerrostuneisuuskaudella 2023 noin 3–4 m syvyydessä, mutta lämpötilaero päänäytteen ja alusveden välillä oli vain noin 6–8 °C. Tästä johtuen 7.-8.8.2023 vallinnut Sylvia-myrsky pääsi sekoittamaan järven vettä tehokkaasti, ja aiheutti kerrostuneisuuden ennenaikaisen purkautumisen (Kuva 2). Taustaselvitysten perusteella todettiin, että alusveden pilotoinnin kesto joudutaan rajoittamaan, jotta voidaan välttää alusveden pumppaamisesta johtuva mahdollinen ennenaikainen kerrostuneisuuden purkautuminen.



Kuva 2. Linkullasjön-järven vesipatsaan lämpötila (Temp) ja happipitoisuudet (O2) 15.5., 19.6, 17.7. ja 14.8.2023 jatkuvatoimisella mittarilla mitattuna.

Vesianalyysitulosten perusteella kuitenkin todettiin, että Linkullasjön soveltuu kohdejärveksi hyvin. Alusvedessä havaittiin kerrostuneisuuskaudella happikatoa, joka edesauttaa liukoisten ravinteiden, kuten fosfaattifosforin ja liukoisen raudan vapautumista sedimentistä. Linkullasjön-järven veden fosfaattifosforipitoisuudet nousivat kerrostuneisuuskaudella happipitoisuuden laskun myötä (Kuva 3). Kokonaisfosforipitoisuus Linkullasjön päänäytteenä oli avovesikaudella 2023 keskimäärin 47 µg/l ja alusvedessä keskimäärin 1130 µg/l.



Kuva 3. Linkulasjön-järven päänäytteen ja alusveden happi-, fosfaattifosfori- ja kokonaisrautapitoisuudet avovesikaudella 2023.

Sedimenttinäytteenotto ja sisäisen kuormituspotentialin arviointi

Vedenlaadun seurannan lisäksi järvellä otettiin kerrostuneisuuden muodostuttua sedimenttinäytteitä 3.7.-11.9.2023 (Kuva 4). Näytteet otettiin Kajak-putkinäytteenottomella noin kahden viikon välein (3.7., 17.7., 31.7., 14.8., 11.9.).

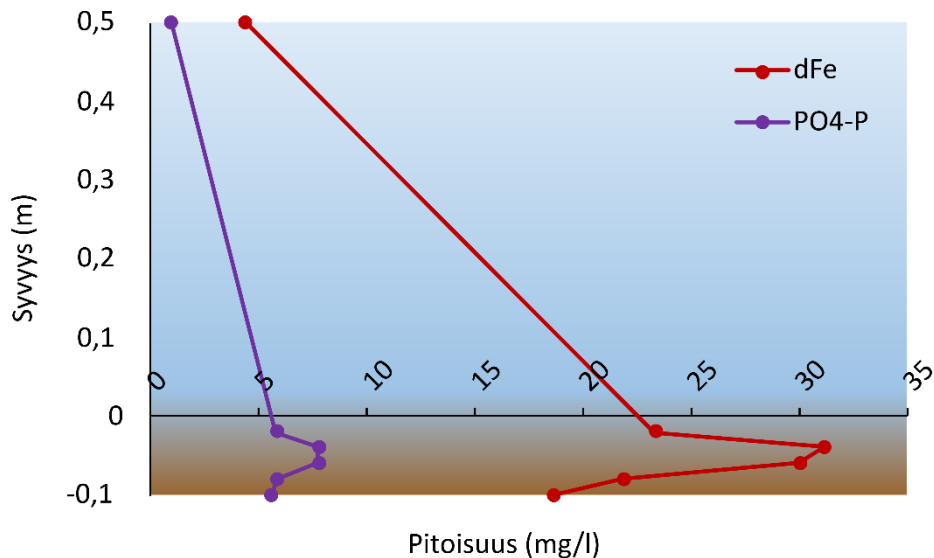


Kuva 4. Valokuvia Linkulasjön-järven näytteenotosta: a) vesinäytteenotossa käytetty Limnos-putkinoudin, b) päänäytteen (oikealla) ja alusveden (vasemmalla) happinäytteet kesäkuussa 2023, c) sedimenttinäytteenotossa käytetyt putkinoutimet ja Rhizon-suodattimet sedimenttien huokosvesinäytteitä varten sekä d) näkösyvyyden mittausta Secchi-levyllä syyskuussa 2024. Kuvat a ja c, Laura Härkönen sekä kuvat b ja d, Kaarina Lukkari.

Huokosvesinäytteet otettiin sedimentistä syvyyksiltä 0–2 cm, 2–4 cm, 4–6 cm, 6–8 cm ja 8–10 cm. Sedimentin huokosvesien PO_4 - sekä dFe-pitoisuudet olivat heinäkuussa 2023 moninkertaisesti alusveden pitoisuuksia suuremmat (Kuva 5). Sedimentin fosforivarantojen ja liukoisien fosforin diffuusiokapasiteetin laskemista varten hyödynnettiin sedimentin huokosvesien sekä pohjanläheisen veden PO_4 -pitoisuutta. Sedimentin diffuusiokapasiteetti oli mahdollista laskea vain sille ajanjaksolle, jolla pohjanläheinen vesi oli hapeton (3.7.-31.7.2023). Kyseisen kerrostuneisuusjakson aikana sedimentin pinnanläheisen huokosveden PO_4 -pitoisuus oli varsin korkea ja vaihteli välillä 4,5–7,0 mg/l (ka. 5,8 mg/l). Pohjanläheisen hapettoman alusveden PO_4 -pitoisuus vaihteli puolestaan välillä 0,6–1,5 mg/l (ka. 0,9 mg/l) (Kuva 5). Liukoisien raudan pitoisuus sedimenttipinnan läheisessä huokosvedessä vaihteli puolestaan välillä 21,8–31,2 mg/l (ka. 25,0 mg/l), kun pohjanläheisessä vedessä pitoisuus oli keskimäärin 4,4 mg/l.

Linkulasjön korkeat sedimentin huokosveden liukoisien fosforin pitoisuudet kertovat sedimentin merkittävästä fosforivarannosta, joka hapettomissa olosuhteissa vapautuu alusveteen ja vesipatsaaseen. Kerrostuneelle heinäkuun 2023 ajanjaksolle sedimentin liukoisien fosforin vapautumisnopeutta kuvaavaksi diffuusioarvoiksi laskettiin 20–30 mg/m²/d (ka. 26 mg/m²/d), mikä on varsin korkea luku. Vertailun vuoksi alusvedenpoiston toisella pilottikohteella Kymijärvellä (Myllypohja, syvyys 8,8 m) liukoisien fosforin diffuusionopeuden ka. kesäkerrostuneisuuden aikana on ollut n. 7 mg/m²/d. Diffuusioarvo kuvaa gradienttieroista johtuvaa sedimentin huokosveden liukoisien fosforin kulkeutumista sedimentistä yläpuoliseen veteen olosuhteiden ollessa hapettomat (Boudreau 1997). Diffuusionopeuteen vaikuttaa sedimentin fosforivarantojen lisäksi pohjanläheisen

veden lämpötila ja sedimentin orgaanisen aineen määrä hapettomissa olosuhteissa (Silvonen ym. 2024). Linkullasjön todettiin soveltuvan alusveden suodatuksen pilottikohteeksi myös sedimenttinäytteiden ja sisäisen kuormituspotentiaalin perusteella. Sedimentin ja sen yläpuolisen vesimassan välillä on suuri gradienttiero fosforin pitoisuudessa.



Kuva 5. Linkullasjön-järven pohjanläheisen veden sekä pintasedimentin huokosveden keskimääräiset fosfaattifosforin ($PO_4\text{-P}$) ja liukoisen raudan (dFe) pitoisuudet kerrostuneisuuskaudella 3.-31.7.2023.

Luvat ja suostumukset

Linkullasjön kalastuskunnalta ja pilotin perustamiskohteen maanomistajalta pyydettiin kirjallinen suostumus pilotin toteuttamiseksi. Lisäksi Uudenmaan ELY-keskukselta pyydettiin lausunto vesi- ja ympäristönsuojelulain mukaisen luvan tarpeesta ja Inkoon kunnalta arvio toimenpideluvan tarpeesta. Vesi- tai ympäristönsuojelulain mukaista lupaa tai toimenpidelupaa ei tarvittu, koska kyseessä oli väliaikainen, pilottimuotoinen toiminta, eikä suodatusmenetelmällä arvioitu olevan vaikutuksia järven veden korkeuteen tai heikentäviä vaikutuksia järven vedenlaatuun.

Alusveden suodatuspilotin laitteisto ja toteutus

Alusveden suodatuksen pilotointi Linkullasjön-järvellä toteutettiin kesällä 2024 ja sen toteutus suunniteltiin kesän 2023 seurantatulosten perusteella. Järven epästabiileiksi todettujen kerrostuneisuusolojen takia pilotointijakso päätettiin rajoittaa enintään yhden kuukauden mittaiseksi. Markkinakartoituksen perusteella palveluntuottajiksi valittiin Hyxo Oy sekä RantalaTimber Oy, jotka ovat olleet osallisina myös Lahden Kymijärven pilotissa ja tuntevat siten ennalta menetelmän ja sen toimintaedellytykset. Pilotin yksityiskohtainen suunnittelu toteutettiin yhdessä palveluntuottajien kanssa.

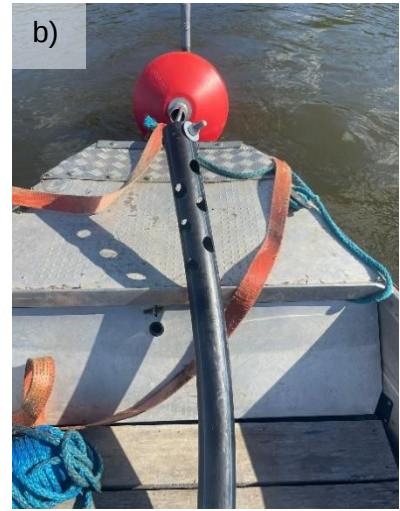
Hankkeen tavoitteena oli käynnistää pilotointi järven lämpötilakerrostuneisuuden muodostuttua. Järvellä tehtyjen mittausten perusteella (ks. osa Järvivesinäytteiden tulokset) lämpötilakerrostuneisuus alkoi muodostua kesäkuun 2024 puolivälin jälkeen. Näin ollen pilotin pystytys- ja perustustyöt toteutettiin juhannusviikolla (Kuva 6, Kuva 7) ja järjestelmä käynnistettiin 25.6.2024. Palveluntuottajien ja maanomistajan kanssa sovittiin pilotin jatkamisesta 15.7.2024 saakka. Suodatusaika oli siten kokonaisuudessaan 21 vrk.

Suodatusjärjestelmää varten perustettiin n. 150 m päähän järven rannasta n. 4×7 m laajuinen murskepeti, jonka alle oli asennettu suodatinkangas. Suodattimien alle asennettiin lisäksi 60×60 cm betonilaatat ja suodatusjärjestelmän tekniikkaa suojaamaan asennettiin väliaikainen, laudoista ja vanerista rakennettu katos.

Suodatuspilotissa järven syvänteelle asennettiin alusveden imuputki noin 70 cm pohjan yläpuolelle (Kuva 6). Välimatka imuputken ja järven vesinäytteenottopisteen välillä oli noin 20 m. Imuputken suulle noin 40 cm matkalle poratuilla rei'illä pyrittiin varmistamaan veden tasaisempi imeytyminen alusvedestä ja ehkäisemään sedimentin sekoittuminen alusveteen. Hapetonta alusvettä johdettiin 3 l/s virtaamalla järven ranta-alueelle sijoitetun, maksimissaan 10 m³/h vetoisen uppopumpun avulla ensin ilmastussammioon, jonka jälkeen vesi johdettiin DynaSand-hiekkasuodattimelle. Alusveden hapettua liukoinen fosfori sitoutuu rautapartikkeleihin. Hiekkasuodatusteknologiaan perustuvan DynaSandin periaate on karkeasti ottaen sama kuin Kymijärven kohteella käytetyllä hiekkakentällä: hiekkarakeiden mineraalipinnat muodostavat rautapartikkeleille kiinteitä adsorptiopintoja (mm. Taskinen 2018). Rautahydroksidisakan muodostuminen katalysoi edelleen adsorptiomekanismia. DynaSand-laitteen toimintaperiaate on kuitenkin huuhdella hiekkaa jatkuvasti, jolloin erillistä hiekan kuorinta- tai vaihtotarvetta ei ole. Ilmastettu alusvesi suodattuu hiekkapatjassa ylöspäin samaan aikaan, kun hiekka liikkuu alaspäin. Suodatuspilotissa hiekka puhdistuu pesurissa suodatusprosessin aikana ja puhdistusvesi, jossa on konsentroitunutta fosforipitoista rautasakkaa (ns. rejektivesi), poistuu suodattimesta erillisenä poistona.

DynaSandin suodattavana aineena toimi kvartsihiekkä, jonka raekoko oli noin 0,9–1,2 mm. Hiekkä suodattimessa oli suodatuksen alkaessa noin 2700 kg. Hiekkasuodattimelta puhdistettu vesi johdettiin olemassa olevaan, järveen laskevaan kasvi- ja sammalpeitteiseen ojaan, josta vesi pääsi vapaasti purkautumaan takaisin noin 70 m päässä sijaitsevan Linkullasjön-järven etelärannalle. DynaSandin rejektivesi johdettiin edelleen DynaDrum-rumpusuodattimelle, jonka avulla voitiin vähentää muodostuvan rejektiveden määrää suodatusta tehostamalla ja samalla mahdollistaa fosforipitoisen rautasakan erillinen talteenotto. DynaDrumin toiminta perustuu siihen, että epäpuhtaudet, kuten kiintoaine tai saostunut rauta, jäävät hyvin hienosilmäisen kangassuodattimen ansiosta suodattimen sisään ja epäpuhtauksien pesu tapahtuu ajoittaisella vastavirtahuuhtelulla. Rejektivettä tulee tällöin vähemmän kuin esim. Dynasand-hiekkasuodattimesta. DynaDrum-suodattimessa suositellaan käytettäväksi sakanmuodostusta edistävää koagulanttia tai polymeeriä, jotta kangassuodatin voi toimia (Rossi ym. 2018). DynaDrumille lisättiin 9.7.2024 alkaen positiivisesti varautunutta eli kationista vedenerotuspolymeeriä (Flopam 4650 SSH), jonka avulla pyrittiin entisestään tehostamaan rejektiveden konsentrointia. DynaDrumilta puhdistettu vesi johdettiin samaan ojaan DynaSand-hiekkasuodattimelta lähtevän veden kanssa. Jäljelle jäänyt fosforin ja raudan sekainen rejektivesi johdettiin erilliseen saaviin ja saavista uppopumpun avulla tiivistetylle siirtolavalle. Hyötykäyttöpotentiaalin arviointia varten osa rejektivedestä kerättiin talteen ennen sen johtamista siirtolavalle.

Järjestelmän sähkö tuotettiin dieselgeneraattorin avulla, koska kiinteää sähkönsyöttöä ei ollut pilotin perustamispaikalla saatavilla. Dieselgeneraattorin hyödyntäminen lisää kunnostuksen hiilijalanjälkeä, eikä sen käyttö laajemmassa mittakaavassa ole yleisesti suositeltavaa. Jollakin sopivalla kohteella esim. riittävän tehokkaiden aurinkopaneeleiden hyödyntäminen voisi olla vaihtoehto. Linkullasjön-järvelle perustetun järjestelmän edellyttämän sähkövirran voimakkuus arvioitiin suunnitteluvaiheessa vähintään 16 ampeeriksi.

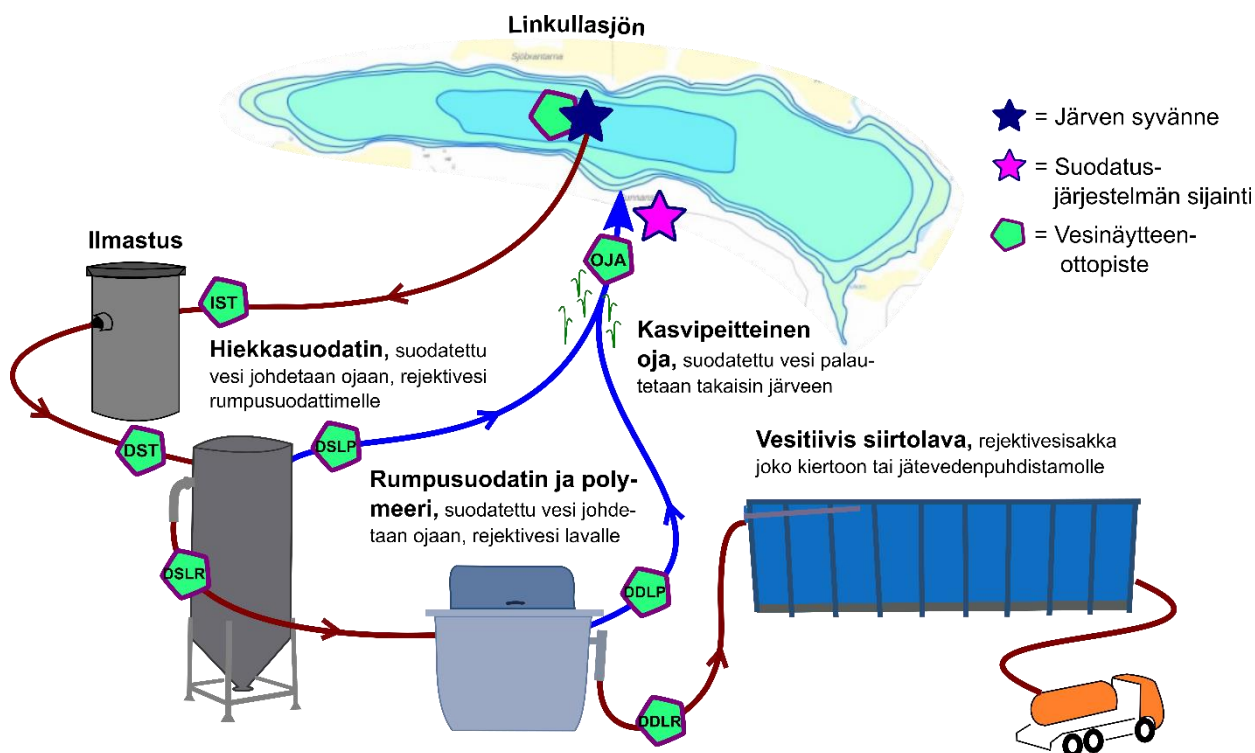


Kuva 6. Linkulasjön-järvellä kesän 2024 aikana toteutetun alusveden suodatuspilotin a) laitteiston yleiskuva, b) syvänteelle asetettu alusveden imuputki, c) järven rantaan asennettu uppopumppu, d) ilmastussammio, e) DynaSand-hiekkasuodatin, f) DynaSandilta lähtevän puhdistetun veden purku järveen laskevaan matalaan, kasvi- ja sammalpeitteiseen ojaan, g) DynaDrum-rumpusuodatin sekä h) rejektivesisammio, josta rejektivedet johdettiin uppopumpulla tiivistetylle siirtolavalle. Kuvat a ja c-h, Laura Härkönen; kuva b, Leena Nurminen.

Alusveden suodatuspilotin seuranta

Linkullasjön-järven vesinäytteenotto aloitettiin 20.5.2024 ja sitä jatkettiin kahden viikon välein koko kerrostuneisuuskauden ajan syyskuun alkuun saakka. Näytteenotto toteutettiin vastaavasti kuin vuonna 2023: vesinäytteet otettiin päänäytteenotosta 1 m pinnan alapuolelta, sekä alusvedestä 1 m ja 0,5 m pohjan yläpuolelta. Näytteistä määritettiin sameus sekä kokonaisfosfori-, kokonaistyppi-, fosfaattifosfori-, nitraatti- ja nitriittityppi-, ammoniumtyppi-, kiintoaine-, orgaaninen kokonaishiili-, happi- ja rautapitoisuus sekä päänäytteenotosta myös *a*-klorofyllin pitoisuus. Jokaisen näytteenoton yhteydessä määritettiin lisäksi näkösyvyys ja mitattiin jatkuvatoimisella mittarilla (EXO2, YSI Incorporated, Yellow Springs, Ohio, USA) vesipatsaan happipitoisuutta ja lämpötilaa kerrostuneisuusolojen seuraamiseksi.

Järjestelmän käynnistyttyä otettiin vesinäytteitä järjestelmään tulevasta, sekä järjestelmästä lähtevästä vedestä yhteensä seitsemästä näytteenottopisteestä (Kuva 7). Järjestelmään tulevan ja järjestelmästä lähtevän veden seuranta jatkettiin laboratorioon toimitettavien vesinäytteiden avulla viikoittain koko suodatusjakson 25.6.-15.7.2024 ajan. Lisäksi järjestelmään tulevia ja järjestelmästä lähteviä fosfaattifosfori- ja liukoisien raudan pitoisuuksia seurattiin arkipäivisin kenttäspektrofotometrillä (DR 3900, Hach Company, Loveland, Colorado, USA).

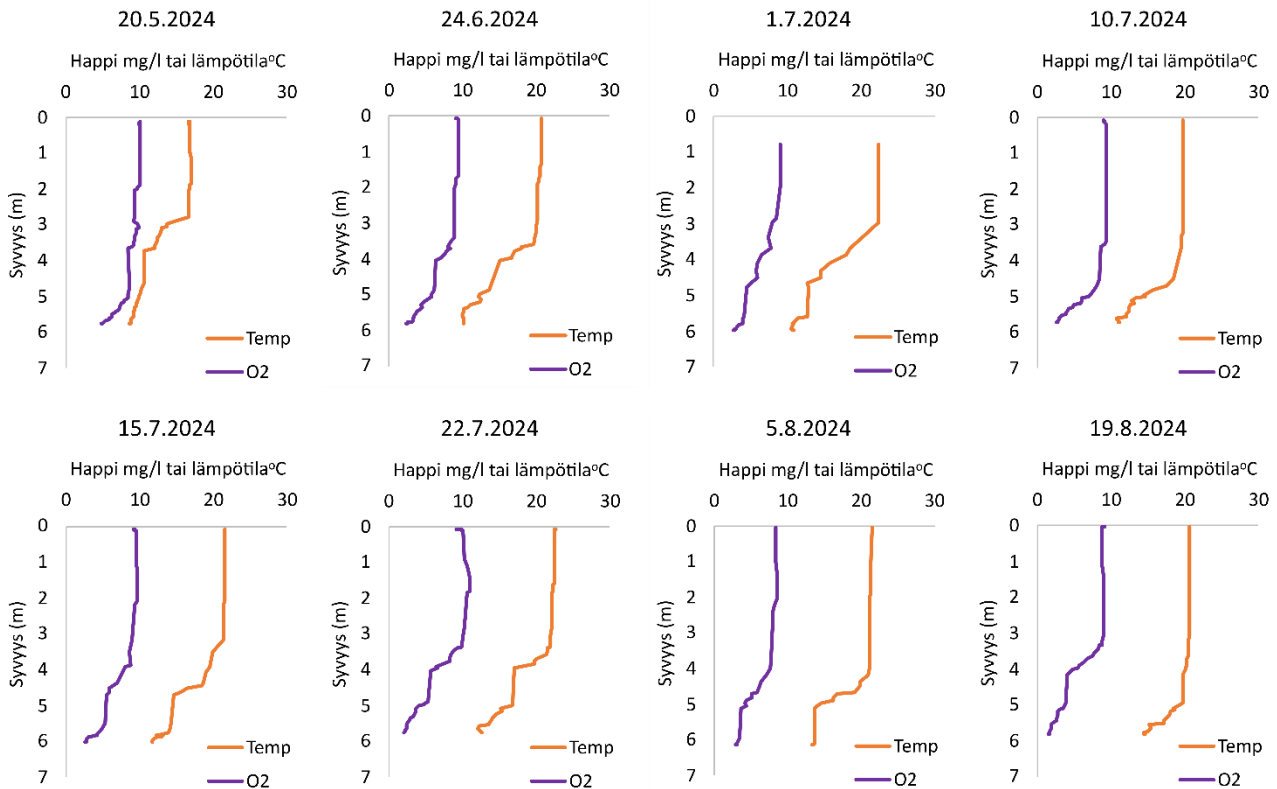


Kuva 7. Havainnekuva Linkullasjön-järven alusveden suodatuspilotista ja pilotin aikaisista vesinäytteenottopisteistä. Järvivesinäytteet otettiin järven syvänteeltä. Syvänteelle painotetun alusveden imuputken etäisyys syvänteeseen vesinäytteenottopisteelle oli noin 20 m. Järjestelmän vesinäytteenottopisteet ovat IST = ilmastussammioon tuleva vesi, DST = DynaSandille tuleva vesi, DSLP = DynaSandilta lähtevä puhdistettu vesi, DSLR = DynaSandilta lähtevä rejektivesi (joka johdettiin DynaDrum-suodattimeen), DDLP = DynaDrumilta lähtevä puhdistettu vesi, DDLR = DynaDrumilta lähtevä rejektivesi sekä OJA = järven ojan kautta purkautuva, suodatusjärjestelmästä lähtenyt puhdistettu vesi.

Hankkeen tulokset

Järvivesinäytteiden tulokset

Vuonna 2024 lämpötilakerrostuneisuus alkoi muodostua järvelle kesäkuun puolivälissä ja kerrostuneisuuskausi kesti edellisvuodesta poiketen elokuun loppupuolelle saakka (Kuva 9). Kesän 2024 aikana ei esiintynyt myrskytuulia, jotka olisivat purkaneet kerrostuneisuuden ennenaikaisesti.

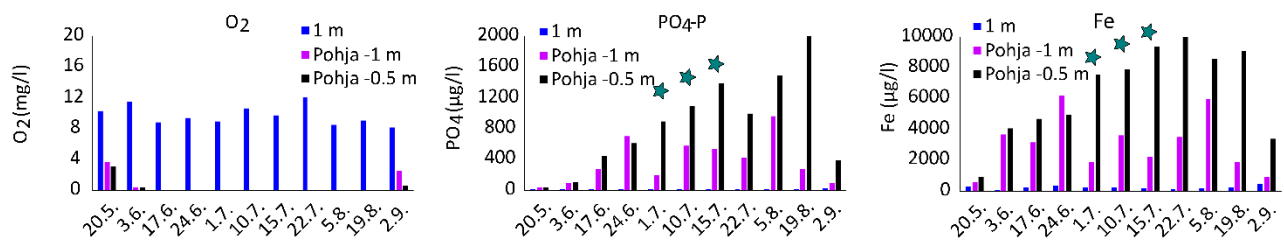


Kuva 8. Linkulasjön-järven vesipatsaan lämpötila (Temp) ja happipitoisuudet (O2) avovesikaudella 2024 jatkuvatoimisella mittausrakennuksella mitattuna. Kesäkuun näytteenottokerroilla 3. ja 17.6. jatkuvatoiminen mittausrakennus oli epäkunnossa, eikä vertikaaliprofiileja saatu mitattua. Viimeisellä näytteenottokerralla 2.9.2024 lämpötilakerrostuneisuus oli purkautunut (ei kuvassa).

Linkulasjön-järven alusveden happi alkoi kulua loppuun heti kerrostuneisuuskauden alussa (Kuva 9). Vastaavasti alusveden fosfaattifosfori- ja rautapitoisuudet alkoivat nousta kesäkuun puolivälistä alkaen. Päällisveden (1 m) fosfaattifosforipitoisuus kerrostuneisuuskaudella (17.6.-19.8.2024 otetuissa näytteissä) oli keskimäärin 7,6 µg/l ja alusvedessä (1 m ja 0,5 m pohjan yläpuolella) puolestaan keskimäärin 826,3 µg/l. Pitoisuusero päällis- ja alusveden välillä oli siten huomattava ja kertoo voimakkaasta sisäisestä kuormituksesta. Lähimpänä pohjaa (0,5 m pohjan yläpuolelta) otetuissa näytteissä fosfaattifosfori- ja rautapitoisuudet nousivat melko tasaisesti kerrostuneisuuskauden loppuun saakka, niin ikään sisäistä kuormitusta ilmentäen. Rehevissä kerrostuvissa järvissä on tyypillistä, että liukoisen fosforin ja raudan pitoisuudet nousevat alusveden hapettomissa oloissa loppukesää kohti.

Järjestelmän imuputki oli asetettu noin 70 cm pohjan yläpuolelle noin 20 m etäisyydelle syvänteeseen viralliselta vesinäytteenottopisteeltä. Metri pohjan yläpuolelta 1.7.2024 järjestelmän käynnistämisen jälkeen otetuissa näytteissä fosfaattifosfori- ja rautapitoisuuksien havaittiin laskeneen edellisen näytteenottokerran pitoisuuksiin nähden (Kuva 9). Teoriassa on mahdollista, että fosfaattifosfori- ja

rautapitoisuuksien aleneminen 1 m pohjan yläpuolella olisi saattanut johtua osin alusveden poistosta, mutta pitoisuuden laskuun voi olla useita syitä. Vaihtelua pohjanläheisen kokonaisraudan pitoisuuksissa tapahtui myös vuoden 2023 taustaselvitysten aikana (Kuva 3). Kesän 2024 aikana havaittujen pitoisuuksien laskuun saattoivat esimerkiksi vaikuttaa järven mahdolliset virtaukset ja alusveden laimeneminen siihen sekoittuvalla päälyysvedellä, koska kerrostuneisuus ei ollut jyrkkä. Lämpötilan harppauskerros oli heinäkuun alkupuolella noin 4 m syvyydessä ja heinäkuun puoliväliin mennessä se oli laskenut noin 5 m syvyyteen (Kuva 8), kun vesisyvyys 1 m pohjan yläpuolelta otetuissa näytteissä oli noin 5,6 m. Ero päälyysveden ja alusveden lämpötilassa oli heinäkuussa noin 10 astetta. Mahdollinen päälyysveden sekoittuminen alusvedestä 1 m pohjan yläpuolella otettuihin näytteisiin ei kuitenkaan näkynyt kyseisen näytteenottoaikaan happipitoisuuksissa, jotka pysyivät tasolla 0,1 mg/l läpi koko kerrostuneisuusjakson.



Kuva 9. Linkullasjön-järven päälyysveden ja alusveden happi-, fosfaattifosfori- ja kokonaisrautapitoisuudet avovesikaudella 2024. Tähdillä merkittyinä näytteenottoajankohtina alusveden suodatus oli käynnissä.

Järjestelmän sammuttamisen jälkeen 1 m pohjan yläpuolelta otettujen näytteiden fosfori- ja rautapitoisuudet alkoivat jälleen nousta kerrostuneisuuskauden loppua kohden. Kerrostuneisuuskaudella ennen suodatusta alusvedestä 1 m pohjan yläpuolelta otetuissa näytteissä (17. ja 24.6.) alusveden fosfaattifosforipitoisuus oli keskimäärin 485 µg/l, suodatusaikana (1., 10. ja 15.7.) otetuissa näytteissä keskimäärin 440 µg/l ja suodatuksen jälkeen otetuissa näytteissä (22.7., 5.8. ja 19.8.) keskimäärin 557 µg/l. Vastaavasti 0,5 m pohjan yläpuolelta otetuissa näytteissä fosfaattifosforipitoisuus oli ennen suodatusta otetuissa näytteissä keskimäärin 530 µg/l, suodatusaikana keskimäärin 1133 µg/l ja suodatuksen jälkeen keskimäärin 1600 µg/l.

Lämpötilaero päälyysveden ja alusveden välillä kaventui elokuun alusta alkaen, ollen 19.8. enää noin 5 astetta. Viimeisellä näytteenotokerralla (2.9.) kerrostuneisuus oli purkautunut, mikä näkyi alusveden kohonneessa happipitoisuudessa ja laskeneissa raudan ja fosfaattifosforin pitoisuuksissa. Vastaavasti täyskierron ja päälyys- ja alusveden sekoittumisen jälkeen päälyysveden fosfaattifosforipitoisuus oli noussut tasolle 31 µg/l ja pohjanläheisen veden (1 m pohjan yläpuolella) pitoisuus laskenut tasolle 91 µg/l. Lähimpänä pohjaa otetussa näytteessä fosfaattifosforipitoisuus oli kerrostuneisuuden purkautumisen jälkeen edelleen varsin korkea, 240 µg/l.

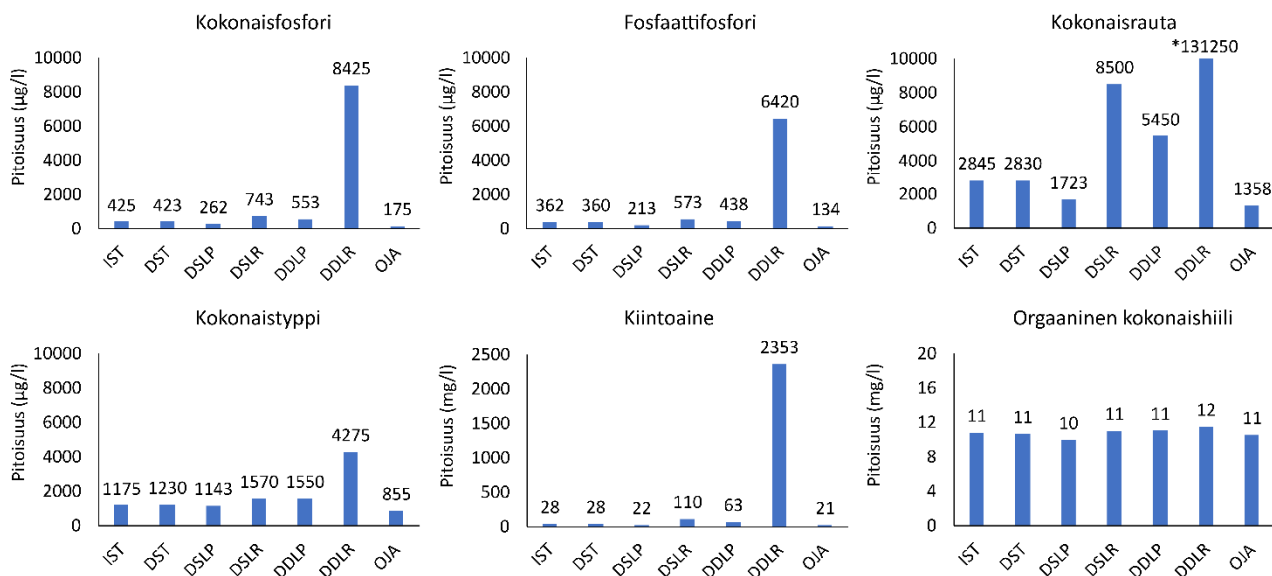
Silvonen ym. (2023) ovat arvioineet riskiä päälyysveden väliaikaisten ravinnepitoisuuksien kohoamiselle järjestelmästä johdettavan suodatetun veden vuoksi. Suodatuksella ei saada kaikkia ravinteita alusvedestä poistettua ja suodatetun alusveden pitoisuudet ovat saavutettavista reduktioista riippuen todennäköisesti päälyysveden pitoisuuksiin verrattuna korkeammat. Riski päälyysveden fosforipitoisuuden kohoamiselle on kuitenkin vähäinen ja asettuu todennäköisesti järvien luontaisten päälyysveden fosforipitoisuuksien vaihteluvälille (0–12 %, Silvonen ym. 2023). Linkullasjölle ei havaittu päälyysveden merkittävää fosfaattifosforipitoisuuden kohoamista suodatuksen aikana (Kuva 9).

Järjestelmänäytteiden tulokset

Takaisin Linkullasjön-järveen ojaa pitkin purkautuvan, järjestelmän läpi suodatetun veden kokonaisfosforipitoisuus oli keskimäärin 41,1 %, fosfaattifosforin pitoisuus 36,9 %, ja

kokonaisraudan pitoisuus 47,7 % järjestelmään tulevan veden pitoisuudesta (Kuva 10, Kuva 12). Näin ollen suodatusjärjestelmällä saatiin koko suodatusjaksolla pidätettyä keskimäärin 58,9 % kokonaisfosforista, 63,1 % fosfaattifosforista ja 52,3 % kokonaisraudasta (Taulukko 1). Kokonaistypen osalta keskimääräinen reduktio oli odotetusti pienempi, vain 27,2 %. Lähes samansuuruinen keskimääräinen reduktio saatiin kiintoaineelle (26,6 %). Orgaanisesta kokonaishiilestä järjestelmään pidättyi ainoastaan 1,9 %.

Fosforin reduktiot olivat Linkullasjön väliaikaisessa pilotissa keskimäärin hieman alhaisempia verrattuna Kymijärven 200 m² laajuisen hiekkasuodattimkentän reduktioihin, jotka vuonna 2023 vaihtelivat TP:n osalta välillä 49–87 % ja PO₄:n osalta välillä 53–94 % (Nurminen ym. 2023). Korkeimmat reduktiot Kymijärven suodattimella saatiin raudan esisuodatuksella ja alhaisimmat reduktiot hiekkasuodattimella havaittiin loppukesällä, kun alusveden pitoisuudet olivat korkeimmillaan ja toisaalta kentän hiekkapatja alkoi olla tukossa. On hyvä huomioida, että käsiteltävän veden pitoisuuksien lisäksi myös veden viipymällä järjestelmässä on oleellinen vaikutus poistotehokkuuteen.



Kuva 10. Linkullasjön-järvellä toteutetun alusveden suodatuspilotin tulokset laboratoriomääritysten perusteella. IST = ilmastussammioon tuleva vesi, DST = DynaSandille tuleva vesi, DSLP = DynaSandilta lähtevä puhdistettu vesi, DSLR = DynaSandilta lähtevä rejektivesi (joka johdettiin DynaDrum-suodattimeen), DDLP = DynaDrumilta lähtevä puhdistettu vesi, DDLR = DynaDrumilta lähtevä rejektivesi sekä OJA = järveen ojan kautta purkautuva, suodatusjärjestelmästä lähtenyt puhdistettu vesi. * DDLR:n kokonaisraudan pitoisuus ylittää kuvan y-akselin asteikon.

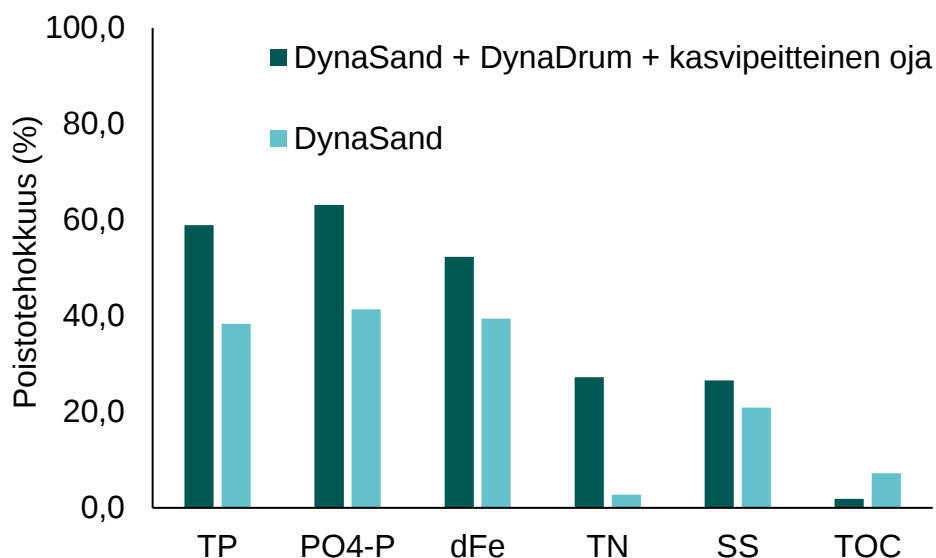
DynaSand-hiekkasuodattimen jälkeen puhdistettu vesi johdettiin Linkullasjön pilotissa kasvi- ja sammalpeitteiseen perkaamattomaan ojaan, jota pitkin vesi virtasi vapaasti noin 70 m matkan ennen purkautumista järveen (Kuva 11). Koko Linkullasjön pilotin suodatusjärjestelmä käsitti näin ollen sekä DynaSand- ja DynaDrum-suodattimet että kasvipeitteisen ojan.

Suodattimet ja kasvipeitteisen ojan sisältävällä koko järjestelmällä reduktiot olivat selvästi korkeampia, kuin pelkän DynaSand-hiekkasuodattimen reduktiot (Taulukko 1, Kuva 12). Kun kokonaisfosforin osalta koko järjestelmällä saatiin suodatettua keskimäärin 58,9 %, pelkällä hiekkasuodattimella vastaava reduktio oli puolestaan keskimäärin 38,4 %. Fosfaattifosforin osalta reduktiot koko järjestelmällä olivat 63,1 % ja hiekkasuodattimella 41,3 %.



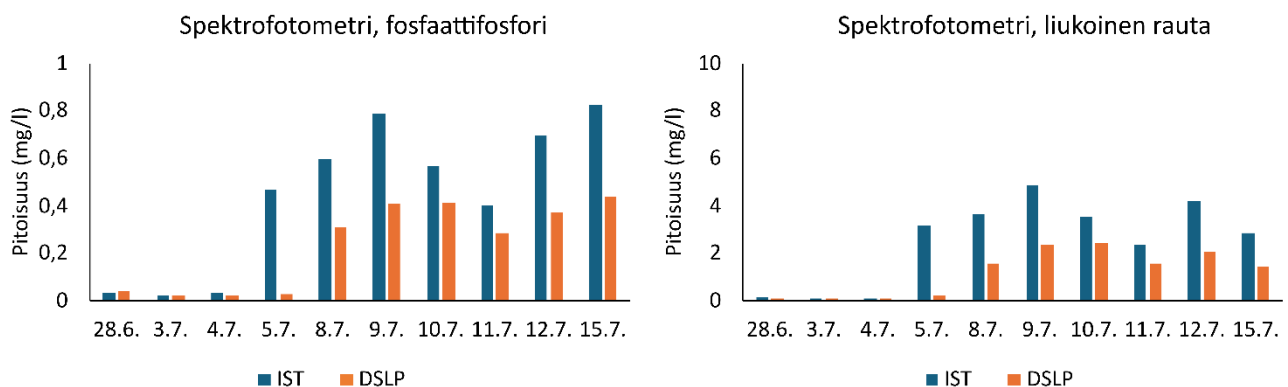
Kuva 11. Linkullasjön-järveen purkautuva matala, perkaamaton oja, johon alusveden suodatusjärjestelmän puhdistetut vedet johdettiin ja josta järjestelmästä lähtevän puhdistetun veden näytteet otettiin kesän 2024 aikana.

Veden suotautuminen ojassa olevan kasvillisuuden läpi ja muut ojan luontaiset ravinteita ja kiintoainetta pidättävät prosessit (kuten esimerkiksi pidätyminen sedimenttiin, denitrifikaatio) paransivat lähes kaikkien muuttujien reduktioita (Kuva 12). Pelkällä hiekkasuodattimella saatiin esimerkiksi pidätettyä keskimäärin 2,8 % kokonaistypestä, mutta puhdistetun veden johtaminen kasvipeitteistä ojaa pitkin paransi reduktiota 27,1 %:n (Taulukko 1). Orgaanisen kokonaishiilen osalta reduktio hiekkasuodattimella oli kuitenkin suurempi kuin ojan sisältävän koko järjestelmän reduktio, mikä kertoo todennäköisesti ojasta luontaisesti kulkeutuneiden humusyhdisteiden sekoittumisesta ojassa virtaavaan suodatusjärjestelmän läpi käyneeseen veteen. Tästä huolimatta ojan TOC:n pitoisuudet olivat hyvin pieniä ja TOC:n reduktiota tapahtui vähäisessä määrin (1,9 % järjestelmään tulevasta), joten riskiä järjestelmästä johtuvalle järven TOC-pitoisuuden kohoamiselle ei ole. Pilotin perusteella voidaan todeta, että pelkän hiekkasuodattimen hyödyntämisen sijaan alusveden suodatuksen tehokkuutta parantaa suodatetun veden johtaminen joko olemassa olevaan, perkaamattomaan ojaan tai vaihtoehtoisesti kosteikkoon, kuten Kymijärvellä (Silvonen ym. 2023).



Kuva 12. Kokonaisfosforin (TP), fosfaattifosforin (PO₄-P), liukoisen raudan (dFe), kokonaistypen (TN), kiintoaineen (SS) sekä orgaanisen kokonaishiilen (TOC) keskimääräiset prosentuaaliset reduktiot Linkullasjön DynaSand- ja DynaDrum-suodattimet sekä ojan käsittävällä koko suodatusjärjestelmällä (ero järjestelmään tulevan (IST) ja järveen purkautuvan ojaveden (OJA) välillä) sekä DynaSandilla (ero järjestelmään tulevan (IST) ja DynaSandissa puhdistetun veden (DSLPI) välillä).

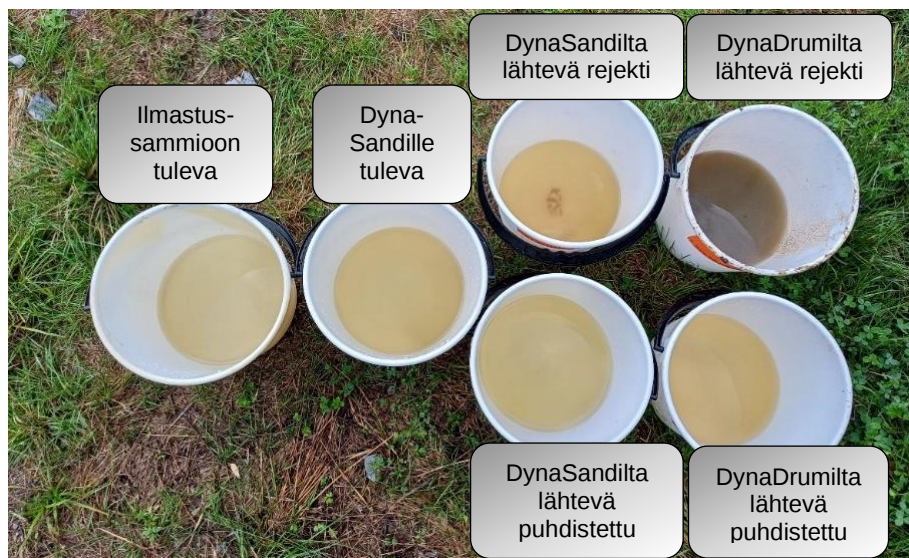
Järjestelmän keskimääräisiä reduktioita tarkasteltaessa on kuitenkin otettava huomioon, että suodatuksen käynnistämisen jälkeen niin DynaSand-hiekkasuodattimen kuin koko järjestelmän reduktiot olivat kenttäspektrofotometrin ja laboratoriomääritysten perusteella 4.7.2024 saakka yleisesti ottaen erittäin pieniä (Kuva 13, Taulukko 1). Kenttäkäyttöisen happimittarin perusteella ilmastussammioon suodatusjakson alkupuoliskolla tuleva vesi osoittautui odotuksista poiketen hapelliseksi, joka osoitti alusveden imuputken ottavan osin myös hapellista päällysvettä järjestelmään. Syvänteelle painotetun imuputken alusvedenoton syvyyttä tarkistettiin 4.7.2024 tehtyjen kenttäspektrofotometrimittausten jälkeen ja imuputken päätä laskettiin lähemmäs pohjaa, jotta varmistettiin alusveden saaminen järjestelmään päällysveden sijaan. Kun imuputken pää oli saatu varmuudella painotettua alusveteen, järjestelmään tulevat pitoisuudet alkoivat 5.7. alkaen nousta ja DynaSandin tehokkuus parantua huomattavasti (Kuva 13, Taulukko 1). Hiekkasuodatin edellyttää riittävän korkeita tulopitoisuuksia toimiakseen oikein.



Kuva 13. Kenttäspektrofotometrillä mitatut fosfaattifosforin ja liukoisin raudan pitoisuudet ilmastussammioon tulevassa vedessä (IST) ja DynaSand-hiekkasuodattimelta lähtevässä, puhdistetussa vedessä (DSLPL) kesällä 2024 Linkulasjön-järvellä toteutetulla alusveden suodatuspilotilla. Kenttäspektrofotometrillä ei seurattu järveen purkautuvan ojassa kulkevan veden pitoisuuksia.

DynaSandin suodatustehokkuudessa havaittiin 11.7. väliaikainen heikentyminen (Kuva 13), joka saattoi osin johtua DynaSandissa olevan suodatushiekan adsorptiopintojen täyttymisestä raudalla. Tämän kaltaisiin toimintahäiriöihin puuttumiseksi järjestelmän poistotehokkuuden säännöllinen seuranta esimerkiksi kenttäkäyttöisen spektrofotometrin avulla on erityisen tärkeää. Järjestelmän tulovirtaamaa nostettiin 11.7. hetkellisesti, jotta hiekan peseytymistä saatiin tehostettua ja adsorptiopintoja vapautettua suodatustehon parantamiseksi. DynaSand-hiekkasuodattimen reduktioteho riippuu mm. käsiteltävän veden pitoisuuksista, virtaamasta ja veden viipymästä, joten esimerkiksi alhainen virtaama korkeilla rautapitoisuuksilla voi aiheuttaa adsorptiopintojen täyttymistä ja hiekkapatjan tukkeutumista ja siten fosforin reduktiotehon laskua.

Visuaalisen tarkastelun perusteella järjestelmään tulevan ja järjestelmästä lähtevän puhdistetun veden laadussa ei havaittu merkittäviä eroja. DynaSandilta ja etenkin DynaDrumilta lähtevissä rejektivesissä sen sijaan havaittiin rautasakkaa ja kiintoainetta (Kuva 14).



Kuva 14. Linkullasjön kesän 2024 alusveden suodatusjärjestelmälle tuleva ja siitä lähtevä vesi järjestelmän eri osissa 15.7.2024.

Taulukko 1. Seurantamuuttujien laboratoriomäärittelyihin perustuvat prosentuaaliset reduktiot Linkullasjön-järven alusveden suodatusjärjestelmän eri osissa suodatusjakson alkupuoliskolla ennen imuputken painottamista (26.6. ja 3.7.2024 otetut näytteet, $n = 2$), loppupuoliskolla painottamisen jälkeen (9. ja 15.7.2024 otetut näytteet, $n = 2$) sekä koko suodatusjaksolla (26.6.–15.7.2024 otetut näytteet, $n = 4$). Koko järjestelmä käsitti DynaSand- ja DynaDrum-suodattimet sekä kasvipeitteisen ojan.

Tarkastelukohde	Muuttuja	Keskimääräinen reduktio (%)		
		Ennen imuputken painotuksen korjaamista	Imuputken painotuksen korjaamisen jälkeen	Koko jaksolla
Koko järjestelmä: Ilmastussammioon tulevan (IST) ja järveen purkautuvan veden (OJA) välinen ero	Kokonaisfosfori	32,1	61,7	58,9
	Fosfaattifosfori	49,3	63,8	63,1
	Kokonaisrauta	-4,6	58,3	52,3
	Kokonaistyyppi	12,9	33,3	27,2
	Kiintoaine	12,3	30,3	26,6
	TOC	-1,1	4,2	1,9
Hiekkasuodatin: Ilmastussammioon tulevan (IST) ja DynaSand-hiekkasuodattimelta lähtevän puhdistetun veden (DSLIP) välinen ero	Kokonaisfosfori	1,3	42,2	38,4
	Fosfaattifosfori	-1,4	43,5	41,3
	Kokonaisrauta	-0,9	43,7	39,5
	Kokonaistyyppi	-12,1	9,1	2,8
	Kiintoaine	6,4	24,7	20,9
	TOC	5,8	8,3	7,2

Polymeerilisäyksen vaikutus

DynaSand-hiekkasuodattimelta DynaDrum-rumpusuodattimelle johdettavaan hiekkasuodattimen huuhteluveteen eli rejektiveteen lisättiin 9.-15.7.2024 kationista vedenerotuspolymeeriä (Flopam 4650 SSH) noin 450–500 ml/h. Polymeerin avulla pyrittiin tehostamaan järjestelmässä muodostuvan rejektiveden konsentroituamista, vähentämään muodostuvan rejektiveden määrää ja samalla edistämään ravinnesakan talteenottoa ja kierrätyspotentiaalia. DynaSandin tulovirtaama oli noin 3 l/s ja DynaSandilta lähtevän rejektiveden määrä 10 % tulovirtaamasta (0,3 l/s).

Rejektivettä muodostui suodatuspilotin aikana arviolta 2 m³ (2000 l). Mikäli DynaDrumin avulla ei olisi vähennetty rejektiveden määrää, sitä olisi laskennallisesti voinut muodostua 21 vrk pilotin aikana yli 500 m³, joka olisi edellyttänyt päivittäistä 15 m³ vetoisen siirtolavan tyhjennystä.

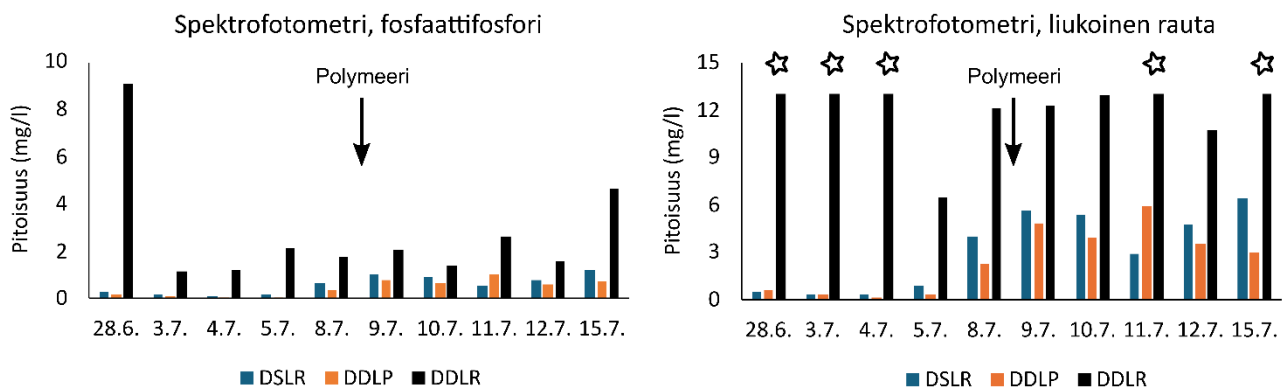
Koska DynaDrum-rumpusuodatinta hyödynnettiin DynaSandilta tulevan rejektiveden konsentroimiseen ja suodattamiseen, DynaDrumin reduktioiden vertaaminen koko järjestelmän tai DynaSandin reduktioihin ei ole mielekästä. Sen sijaan on arvioitava DynaDrumin tuomaa lisäarvoa muodostuvan rejektiveden konsentroinnissa. DynaDrumin avulla saatiin pidätettyä keskimäärin 25,6 % DynaSandin rejektiveden kokonaisfosforista, 23,6 % fosfaattifosforista, 35,9 % kokonaisraudasta ja 42,2 % kiintoaineesta (Taulukko 2, Kuva 15). DynaDrumin keskimääräiset reduktiot olivat kokonaistyyppä ja orgaanista kokonaishiiltä lukuun ottamatta suuremmat ennen DynaDrumille tehtyä polymeerilisäystä kuin sen jälkeen (Taulukko 2, Kuva 15). Kokonaistypen ja TOC:n osalta reduktiot jäivät kuitenkin myös polymeerilisäyksen jälkeen huomattavan pieniksi, eikä polymeerilisäyksellä näin ollen vaikuttanut olevan tarkastelumuuttujien pidättymiseen merkittävää vaikutusta.

DynaDrumin reduktiotuloksiin liittyy kuitenkin epävarmuuksia, sillä polymeerilisäystä edeltävän ajankohdan tulopitoisuudet järjestelmään olivat huomattavan alaiset verrattuna polymeerilisäyksen aikaisiin pitoisuuksiin (Kuva 13). Ennen polymeerilisäyksen ajankohtaa myös DynaSandilta lähtevien, DynaDrumille johdettavien rejektivesien pitoisuudet olivat hyvin matalia (Kuva 15). Lisäksi järjestelmässä käsiteltävä vesimäärä eli kokonaisvirtaama (3 l/s) oli hyvin alhainen koko pilotiajan ajan ja suhteutettuna DynaDrumin toimintamekanismiin (ajoittainen vastavirtahuuhtelu) polymeeriannostelu ei välttämättä ollut optimaalinen. Alhaisilla virtaamilla polymeerin ihanteellisen annostelusuhteen löytäminen on vaikeaa. Linkullasjön pilottia varten saatavilla olleen kationisen Flopam-polymeerin toimintaa ei myöskään varmistettu laboratoriokokeilla Linkullasjön alusvettä hyödyntäen. Vedenlaadusta riippuen joillakin kohteilla anioninen tai varaukseton polymeeri saattaa toimia kationista polymeeriä paremmin ja tehokkaimman polymeerin valinta tulisi siten varmentaa laboratoriokokeilla (Howe ym. 2012).

Näin ollen Linkullasjön polymeerilisäyksen vaikutuksesta ei ole mahdollista tehdä luotettavia johtopäätöksiä. Tulokset eivät olleet odotettuja ja olivat ristiriidassa Kymijärven hiekkasuodatinpilotilla testatun tanniinipohjaisen biopolymeerin (HTH40, Haarla Oy) tuloksien kanssa. Kymijärvellä testattiin biopolymeerin soveltuvuutta ravinnesakan konsentrintiin ja liukoisten aineiden sakkaamiseen (Nurminen ym. 2020). Biopolymeeri muodosti nopeasti kiintoainetta, johon merkittävä osa alusveden hapettuvasta raudasta ja fosforista sitoutui. Liukoisesta raudasta ja liukoisesta fosforista jopa oli 90 % saatiin poistettua käsitelystä alusvedestä polymeerin muodostamaan kiintoaineeseen. Polymeerikäsittelyssä muodostuneet saostumat olivat suuria ja järjestelmässä testattu viirankangas pidatti noin 80 % muodostuneesta kiintoaineesta. Koska käytössä oli tanniinipohjainen biopolymeeri, veden typpipitoisuudet kuitenkin nousivat käsittelyssä (TN n. 200 % ja NH₄-N n. 30 %) (Silvonen ym. 2022). Kymijärven pilotin kaltaisessa kosteikon ja hiekkasuodattimen yhdistävässä systeemissä kosteikon luontaiset prosessit voivat kuitenkin osaltaan vähentää biopolymeerin käytöstä johtuvaa, järveen päätyvää typpikuormaa.

Taulukko 2. Seurantamuuttujien laboratoriomäärittelyihin perustuvat prosentuaaliset reduktiot Linkulasjön-järven alusveden suodatusjärjestelmän DynaDrum-rumpusuodattimella ennen polymeerilisäystä (26.6.–3.7.2024, n = 2), loppupuoliskolla polymeerilisäyksen jälkeen (9.–15.7.2024, n = 2) sekä koko suodatusjaksolla (26.6.–15.7.2024, n = 4). *Polymeerilisäys tehtiin ainoastaan DynaDrum-rumpusuodattimelle johdettavaan veteen, eikä polymeerilisäys näin ollen vaikuta DynaSand-hiekkasuodattimelta lähtevien vesien pitoisuuksiin.

Tarkastelukohde	Muuttuja	Keskimääräinen reduktio (%)		
		Ennen polymeerilisäystä	Polymeerilisäyksen jälkeen	Koko jaksolla
Rumpusuodatin:	Kokonaisfosfori	33,8	22,7	25,6
DynaSandilta lähtevän rejektiveden (DSLRL) ja DynaDrum-rumpusuodattimelta lähtevän puhdistetun veden (DDLRL) välinen ero	Fosfaattifosfori	31,7	21,8	23,6
	Kokonaishiekkasäiliö	43,1	29,9	35,9
	Kokonaistyyppi	-1,1	2,3	1,3
	Kiintoaine	49,2	34,2	42,2
	TOC	-6,0	3,8	-0,2



Kuva 15. Kenttäspektrofotometrillä mitatut fosfaattifosforin ja liukoisen raudan pitoisuudet DynaSandilta lähtevässä, DynaDrumille johdetussa rejektivedessä (DSLRL), DynaDrumilta lähtevässä puhdistetussa vedessä (DDLRL) ja DynaDrumilta lähtevässä rejektivedessä (DDLRL). Tähdellä merkittyinä ajankohtina DDLRL:n liukoisen raudan pitoisuudet ylittivät kenttäspektrofotometrin määrittämisrajan.

Pilotin laskennallinen tehokkuus

DynaSand-hiekkasuodattimelle tulevan veden virtaama oli noin 3 l/s koko suodatuskauden ajan. Keskimääräisen DynaSandille tulevan kokonaisfosforipitoisuuden (423 µg/l) perusteella laskettuna koko suodatuskauden aikana (21 vrk) järjestelmän avulla olisi keskimääräisellä reduktiolla (58,9 %) saatu poistettua reilu 1 kg (noin 1356 g) järven kokonaisfosforia.

Linkulasjöllä kasvukauden päällysveden kokonaisfosforipitoisuus kesän 2024 tulosten perusteella oli keskimäärin 60 µg/l, joka kuvaa runsasravinteisen järven tyydyttävää ekologista tilaa. Hyvän ekologisen tilan luokkaraja-arvo runsasravinteisille järville on alle 55 µg TP/l. Hyvän tilan saavuttamiseksi Linkulasjön kokonaisfosforin laskennallinen poistotarve olisi kokonaisuudessaan 12 619 kg. Nürnberg (2020) kaavaa hyödyntäen Linkulasjön pilotissa käytetyllä hyvin alhaisella virtaamalla (3 l/s) tavoiteltu pitoisuus saavutettaisiin noin 900 vuoden kuluttua. Varsinaisissa alusveden suodatushankkeissa tavoitteelliset virtaamat ovat kuitenkin suurempia (Nurminen ym. 2020). Mikäli virtaamaa saataisiin nostettua suuremman laitteiston avulla esimerkiksi Kymijärven nykyistä virtaamaa vastaavaksi (10 l/s), suodatus tehostuisi ja teoreettinen suodatusaika lyhenisi noin 280 vuoteen. Linkulasjöllä kerrostuminen on kuitenkin epästabili ja hapeton alusvesikerros

melko ohut järven mataluuden takia, jonka vuoksi korkeammat virtaamat voivat rikkoa järven kerrostuneisuuden helpommin eikä virtaaman kasvattaminen ole siksi kannattavaa. Näin ollen alusveden suodatus ei voida pitää Linkullasjön-järvelle kovin tehokkaana menetelmänä myöskään epärealistisen pitkän laskennallisen suodatusajan takia. Linkullasjön tapauksessa myös suuri ulkoinen kuormitus heikentää sekä alusveden suodatuksen että muiden järvellä tehtävien kunnostustoimien tehokkuutta. Yleisesti ottaen voidaan kuitenkin todeta, että rehevälle järvelle kaikki fosforin poistoon tähtäävät toimenpiteet ovat suositeltavia (Silvonen ym. 2024), varsinkin jos poistettavalle ravinnesakalle löytyy jatkokäyttöä.

Syvemmillä, stabiilisti kerrostuvilla järvillä menetelmä voi sopia Linkullasjön esimerkkiä paremmin ja laskennalliset suodatusajat luokkaraja-arvojen muutoksille voivat olla realistisempia (Nurminen ym. 2020). Jos esimerkiksi mataliin vähähumuksisiin järviin lukeutuvan Kymijärven Myllypohjan syvänteen päällysveden kokonaisfosforipitoisuudessa (40 µg/l) halutaan selkeää muutosta tyydyttävästä hyvään ekologiseen laatuluokkaan (raja-arvo 25 µg/l, Aroviita ym. 2019), fosforin kokonaispoistotarve on 326 kg. Käsittelyvirtaamalla 10 l/s ja 3 kk pumppausajalla kunnostusaika olisi n. 13 vuotta (Nurminen ym. 2020). Jos alusvedestä käsiteltäisiin vuosittain 40 %, mikä on Kymijärvellä suositeltava kerrostuneisuutta purkamaton yläraja, tarvittaisiin n. 40 l/s pumppausvirtaama. Tällöin laskennallinen kunnostusaika lyhenisi kolmeen vuoteen (Nurminen ym. 2020). Kymijärvellä fosforin vuosittaiseksi poistumaksi on saatu laskennassa käytetyillä oletuksilla (pohjanläheinen fosforipitoisuus 320 µg/l, virtaama 10 l/s, suodatusaika 3 kk) n. 25 kg/a, joka vastaa n. 3,5 % Kymijärven ulkoisesta kuormituksesta. Kymijärven diffuusiolaskelmien mukaan 10 l/s pumppaus poisti sedimentistä >8 m syvyyksiltä alueilta kesäkauden aikana n. 60–80 % diffuusion vaikutuksesta vesipatsaaseen tulevasta fosforista (Horppila ym. 2019).

Rejektivedessä olevan fosforin hyötykäyttöpotentiaalin arviointi

Kymijärven pilotissa tunnistettiin pitkän aikavälin tavoitteeksi kehittää ravinnesuodattimiin sitoutuneen fosforin uusiokäyttöä ja kierrätystä esimerkiksi maanparannusaineena ja peltolevityksessä (Nurminen ym. 2020). Ruoantuotanto ja viljely ovat riippuvaisia kasviraivinteista, kuten fosforista. Fosfori on luonnonvara, jonka lisääntynyt louhinta on johtanut tiedossa olevien fosforivarantojen ehtymiseen ja nostanut fosforin Euroopan kriittisten aineiden listalle (European Commission 2017). Fosforimalmin lisäksi fosforilannoitteiden lähteinä voivat toimia fosforipitoiset orgaaniset jakeet, kuten kotieläinten lanta. Myös yhdyskuntajätevedeen päätyvää fosforia voidaan ottaa talteen ja kierrättää takaisin kasvinravinteeksi. Nykyisin fosforia saostetaan jätevesistä rauta- ja alumiiniyhdisteisiin, jolloin fosfori päättyy puhdistamolietteeseen niukkaliukoisessa muodossa. Fosforin talteenotto ja kierrätys kasveille käyttökelpoisemmassa muodossa mm. jätevesistä ja niiden puhdistuksessa syntyvästä lietteestä on tärkeää myös huoltovarmuuden ja omavaraisuuden kasvattamisen näkökulmasta.

Luonnossa fosfori sitoutuu mm. järvisedimentin rautayhdisteisiin ja niistä vapautuminen säätelee esimerkiksi fosforin pitoisuutta sedimentin huokosvedessä ja edelleen sen yläpuolisessa vesikerroksessa (Nriagu & Dell, 1974). Tätä ominaisuutta hyödynnetään alusveden suodatusmenetelmässä, jossa järven alimmista vesikerroksista johdettavaa, sedimentin pelkistyneiden olojen ja mineralisaation vapauttamaa fosforia ja rautaa sidotaan ilmastuksen jälkeen hiekkasuodattimen rakeiden pinnoille esimerkiksi Fe-hydroksyfosfaatteina (Silvonen et al. 2022). Fe-hydroksidit ja -hydroksyfosfaatit (tästädes FeP-yhdisteet) muodostavat saostumia partikkelien pinnoille ja kertyvät myös suodatuksessa syntyvään rejektiveteen.

RaPo-hanketta täydentävänä osana tarkasteltiin suodatuksessa muodostuvassa rejektivedessä olevan fosforin hyötykäyttöpotentiaalia yhteistyössä Syken kiertotalousasiantuntijoiden ja Luonnonvarakeskuksen (Luke) kanssa. Suodatuksen aikana kerättiin talteen DynaDrum-rumpusuodattimelta lähtevää rejektivettä ja suodatuksen päätyttyä myös DynaSand-hiekkasuodattimen hiekkaa, joiden käyttökelpoisuutta lannoitteena tai maanparannusaineena tutkittiin Lukessa syksyn 2024 aikana raiheinän astiakokeiden ja Hedleyn fraktioinnin avulla (Hedley

ym. 1982, Salo ym. 2013). Rejektiveden ja suodatushiekan mahdollista hyödyntämistä tarkastellaan tässä lyhyesti teoreettisesti sekä niillä tehtyjen kemiallisen uuton ja kasvatuskokeiden valossa.

Alusveden suodatusmenetelmässä syntyvä sivuvirta

Linkullasjön 21 vrk pituisen suodatuspilotin aikana syntyi arviolta noin 2000 l sivuvirtaa DynaDrum-rumpusuodattimelta johdettuna rejektivetenä, josta karkeasti arvioiden puolet oli polymeeritöntä ja puolet polymeerillistä. Rejektiveden fosforianalyysin perusteella sen sisältämän kokonaisfosforin määrä oli noin 0,017 kg. Fosforin poistoa DynaDrumilla pyrittiin tehostamaan lisäämällä synteettistä vedenerotuspolymeeriä, koska aiempien tutkimusten perusteella mm. biopolymeerin on havaittu nopeuttavan fosforin saostumista ja laskeutumista (Silvonen ym. 2022).

Linkullasjön-järvellä hyödynnetty polymeeri oli veteen liukenevaa kationista polyakryyliamidia (Flopam 4650 SSH). DynaDrumilta lähtevästä rauta- ja fosforisakan sekaisesta rejektivedestä oli siten kaksi tutkimusmateriaalia (polymeeritön ja polymeerillinen). On hyvä huomioida, että näiden kahden eri käsittelyn aikana pumpattujen alusvesien keskimääräiset tulopitoisuudet järjestelmään olivat eri tasolla (polymeeritön: fosfaattifosfori 35 µg/l ja liukoinen rauta 60 µg/l; polymeerikäsittely: fosfaattifosfori 690 µg/l ja liukoinen rauta 2450 µg/l).

Linkullasjön pilotissa käytetyssä DynaSand-hiekkasuodattimessa oli noin 2700 kg suodatushiekkaa. Suodatuksen yhteydessä hiekkarakeiden pinnoille saostuva ja alusveden mukana tuleva muu aines todennäköisesti lisäävät hiekan massaa. Sitä ei kuitenkaan ollut mahdollista punnita Linkullasjön pilotissa suodatuksen jälkeen, joten DynaSandille kertyneen fosforimäärän arvioinnissa joudutaan turvautumaan karkeaan arvioon. Suodatuksen jälkeen DynaSandin suodatushiekan P-pitoisuudeksi analysoitiin 0,230 g/kg kuiva-ainetta (96,1 %) kohti. Jos oletetaan, että DynaSandin sisältämän hiekan massa suodatuksen päätyttyä oli 3000 kg, kuiva-aineen fosforipitoisuuden perusteella laskettuna DynaSandin sisältämän fosforin määrän voitaisiin karkeasti arvioida olevan noin 0,66 kg. Linkullasjön pilotissa hiekan kierrätys ei ollut mahdollista, vaan se kuljetettiin hävitettäväksi. On kuitenkin tärkeää selvittää mahdollisuutta muodostuvan sivuvirran hyötykäytölle, mikäli pilotoidun menetelmän käyttö yleistyisi.

Vastaavan materiaalin aiempi käsittely ja mahdollinen hyötykäyttö

Erilaisina sivuvirtoina syntyvien raudan ja fosforin yhdisteiden lähteitä ovat mm. kemian- ja muun teollisuuden jätevesien sekä erityisesti yhdyskuntajätevesien käsittely. Yhdyskuntajätevesien käsittelyssä saostettu fosfori päätyy puhdistamolietteeseen, joka päätyy nykyisin mädätyksen ja kompostoinnin jälkeen joko viherrakentamiseen tai peltomaahan. Viherrakentamisessa levitettävät lietemäärät ovat pinta-alaa kohden suurempia kuin maataloudessa. Fosforia levitetään viherrakentamisessa myös enemmän, kuin kasveilla on mahdollista sitoa. Näin ollen suuret levitysmäärät voivat aiheuttaa riskin fosforin ja haitta-aineiden valumille ympäristöön. Maatalouskäytössä puhdistamolietteen peltolevitystä perustellaan pääosin maanparannusvaikutuksilla, sillä fosforin käyttökelpoisuus kasveille rauta- ja alumiiniyhdisteisiin sitoutuneena on heikko. Tällöinkin fosforia kuitenkin vapautuu hitaasti kasvien käyttöön, ja puhdistamoliete voi siten olla soveltuva ravinnelähde joillakin alueilla. Tehokkaamman fosforin kierrätyksen kannalta olisi tärkeää, että fosfori voitaisiin erottaa jo jätevedestä tai lietteestä. Uusia tekniikoita onkin viime vuosina kehitetty fosforin erottamiseksi ja kierrätyksen tehostamiseksi (Lehtoranta ym. 2021).

Kerrostuvien, rehevöityneiden järvien pohjanläheiseen veteen vapautuneen fosforin talteenotto ja kierrätys olisi hyödyllistä sekä järven tilan pitkäkestoisen parantamisen että fosforin kierrättämisen kannalta. Jätevedenpuhdistuksessa käytetään yleisesti rauta- tai alumiiniyhdisteitä saostamaan fosforia kemiallisesti joko suoraan tai yhdessä mikrobiologisten prosessien kanssa (esim. Parsons & Smith, 2008). Saostetun fosforin kierrätyksessä kasvinravinteena ongelmina voivat kuitenkin olla muun muassa lietteen sisältämät haitta-aineet ja fosforin heikko käyttökelpoisuus. Alusveden

suljetun kierron suodatusmenetelmän etuna fosforin poistossa on saostus alusveden sisältämään rautaan ilmastuksen jälkeen, jolloin rautaa ei tarvitse kemikaalina lisätä.

FeP-yhdisteissä fosfori voi olla heikosti käyttökelpoisessa muodossa, sillä se sitoutuu tiukasti mm. Fe-oksihydroksideihin ja Fe-fosfaatteihin (Johnston & Richards 2003; Nieminen ym. 2011). Näiden niukkaliukoisten yhdisteiden sitoman fosforin käyttökelpoisuuteen kasveille voi kuitenkin vaikuttaa muun muassa maan happamuus, kosteus ja orgaanisen aineksen määrä (Nieminen et al. 2011). Kasvinravinteena käyttökelpoista fosforia voidaan erottaa jätevedestä saostamalla sitä mm. kiteisenä magnesiumammoniumfosfaattina tai kalsiumfosfaattina (Smil 2002; Johnston & Richards 2003).

Rejektiveden mahdollisuudet fosforiravinteen kierrätyksessä

Lukessa syksyllä 2024 toteutetuissa kokeissa (Lemola & Salo 2024) tarkasteltiin rejektihiekan ja sekä polymeerillisen että polymeerittömän rejektiveden sisältämän sakan fosforin käyttökelpoisuutta kemiallisen uuton avulla (Hedley ym. 1982). DynaDrum-rumpusuodattimelta johdettu polymeerillinen rejektisakka sisälsi Hedleyn fraktioinnin perusteella kokonaisfosforia keskimäärin 4327 mg/kg ja polymeeritön sakka puolestaan noin 64 % vähemmän, keskimäärin 1559 mg/kg. Erot saattoivat osaltaan johtua myös käsiteltävän alusveden pitoisuuseroista kahden eri käsittelyn aikana. Polymeerillisen rejektiveden sakan fosfori oli Hedleyn fraktioinnin mukaan sitoutunut pääasiassa rauta- ja alumiiniyhdisteisiin ja uuttui natriumhydroksidiin. Polymeerittömässä rejektiveden sakassa, ja erityisesti suodatushiekan sakassa fosfori oli pääasiassa voimakkaammin sitoutunutta ja heikommin kasveille käyttökelpoista (fraktiointimenetelmän kohdejakeena apatiittimineraalien fosfori tai partikkelirakenteen sisällä oleva fosfori) ja uuttui pääasiassa suolahappoon. Vaikka suodatushiekkassa oli vähiten kokonaisfosforia, siitä oli suurempi osa (lähes neljännes) kasveille käyttökelpoisessa muodossa (uuttui fraktioinnissa veteen ja natriumbikarbonaattiin) kuin rejektivesien sakoissa. Rejektiveden sakka ilman polymeeriä sisälsi 189,3 mg/kg kasveille helposti käyttökelpoista fosforia, mikä oli fraktioiden summasta noin 12 %. Vastaavat luvut polymeeriä sisältävässä sakassa olivat 599,6 mg/kg ja 14 % (Lemola & Salo 2024).

Rejektivesistä tehdyt Hedleyn fraktioinnin tulokset koskevat rejektiveden sakkaa, joka on saatu haihduttamalla suuri määrä vettä ensin pois. Polymeerillisen rejektiveden kuiva-ainepitoisuus oli 0,24 % ja polymeerittömän 0,55 %. Jos rejektivesiä käytettäisiin sellaisenaan ilman energiaa kuluttavaa haihduttamista ja kuivaamista, voisi kysymykseen tulla käyttö sadettamalla. Yleisesti käytetty sadetusmäärä 30 mm tarkoittaisi, että hehtaarille sadetettaisiin 300 m³ vettä (300 000 litraa). Näin laskien sadetuksen mukana polymeeritöntä rejektiveden sakkaa levitettäisiin hehtaarille 1650 kg ja polymeerillistä 720 kg. Kasveille käyttökelpoista (liukoinen ja labiili) kokonaisfosforia levitettäisiin pellon pintaan 0,31 kg (polymeeritön) ja 0,43 kg (polymeerillinen). Määrät yhtä sadetuskertaa kohti ovat melko pieniä, jos niitä vertaa esimerkiksi viljavuusluokassa 3 sallittuihin fosforin enimmäislannoitusmääriin (VM 64/2023) vuodessa viljoille (16 kg/ha) ja nurmille (30 kg/ha). (Lemola & Salo 2024)

Rejektiveden hyödyntäminen kastelukäytössä ei Linkullasjön pilotin tulosten perusteella merkittävästi lisänne kasvien kasvua, mutta fraktioinnin perusteella rejektivedestä ei toisaalta liene myöskään haittaa (Lemola & Salo 2024). Samalla on kuitenkin huomioitava, että Linkullasjön pilotissa käsiteltävät vesimäärät ja siten myös rejektiveden määrä olivat huomattavan pieniä. Suuremman mittakaavan suodatushankkeissa ja korkeammilla tulevan veden virtaamilla muodostuvan rejektiveden ja sen mukana muodostuvan sakan määrät ovat huomattavasti suurempia, joka voisi sadetuskäytössä aiheuttaa sakan kertymiseen sadetettaville peltolohkoille. Näin ollen rejektiveden mahdollinen hyötykäyttö on suunniteltava ja arvioitava tapauskohtaisesti. Lisäksi mahdollisessa sadetuskäytössä on varmistettava, etteivät ravinteet pääse huuhtoutumaan takaisin vesistöön. Samoin synteettisten polymeerien käyttöön ja niiden hajoamiseen ympäristössä liittyy vielä useita ratkaisemattomia kysymyksiä. Linkullasjöllä hyödynnetty polyakryyliamidi liukenee veteen, eikä todennäköisesti toimi mikromuovin lähteenä. Synteettisten polymeerien pääsy

ympäristöön on kuitenkin estettävä, sillä useat synteettiset polymeerit ovat haitallisia vesieliöille. Osa synteettisistä polymeereistä on myös tunnistettu mikromuovien lähteiksi (Fjäder ym. 2022), eikä niitä siksikään tule päästää ympäristöön. Näin ollen synteettisten polymeerien hyödyntäminen suodatuskäytössä voi olla esteenä rejektiveden hyötykäytölle esimerkiksi lannoituskäytössä. Vaihtoehtona synteettiselle polymeerille ovat biopolymeerit (Silvonen et al. 2022), vaikkakin niiden käyttö on nykyisin vielä vähäistä ja vakiintumatonta.

RaPo-hankkeessa ei myöskään analysoitu rejektiveden sisältämiä muita raskasmetalleja tai mahdollisia haitta-aineita (esim. torjunta-aineita). Mikäli rejektivettä tai lietettä tullaan tulevaisuudessa hyödyntämään kasteluvetenä ja ravinnelisanä esim. peltoviljelyssä, selvitys mahdollisesti haitallisten yhdisteiden pitoisuuksista on tarpeen. Rejektiveden hyödyntäminen peltoviljelyssä edellyttää myös tietoa ravinnepitoisuuksista, jotta sallitut levitysmäärät voidaan arvioida. Elintarvikkeeksi tai rehuksi viljeltävien kasvien sijasta rejektivettä tai lietettä voitaisiin mahdollisesti hyödyntää turvallisemmin viheralueiden tai puistojen kasteluvesi- ja ravinnelisanä.

Hiekkasuodattimelle kertyneen fosforipitoisen hiekan kierrätysmahdollisuus

Hiekkasuodattimelle kertynyt materiaali on laadultaan ja ominaisuuksiltaan erilaista kuin rejektivesi. DynaSandin suodatushiekkassa oli selvästi vähemmän fosforia (173 mg P/kg) kuin polymeerillisen (4327 mg P/kg) tai polymeerittömän (1559 mg P/kg) rejektiveden sakassa. Tämä voi selittyä osin sillä, että hiekkassa FeP-yhdisteitä oli ohuena kerroksena hiekkarakeiden pinnoilla. FeP-pitoista hiekkaa voisi mahdollisesti käyttää maanparannusaineena ja ravinnelähteenä erityisesti savi- ja turvemailloja. Hiekan pesu ja uudelleenkäyttö voivat olla myös vaihtoehtoja, joita tulisi selvittää.

Luken astiakokeissa suodatinhiekkaa hyödynnettiin italian raiheinän (*Lolium multiflorum*, var. Barmutra II) kasvatuskokeessa, jossa sen vaikutusta tutkittiin mahdollisena maanparannusaineena (Lemola & Salo 2024). Ennen kokeen perustamista suodatushiekkasta määritettiin kuiva-aine kuivattamalla näytettä yön yli 105 °C:ssa. Kokonaisfosforipitoisuus määritettiin kuningasvesipolton jälkeen ICP:llä. Hiekan kuiva-ainepitoisuus oli 96,1 % ja kokonaisfosforipitoisuus keskimäärin 0,23 g/kg. Suodatinhiekkassa veteen ja natriumbikarbonaattiin uuttuvaa, kasveille helposti käyttökelpoista (liukoista ja labiilia) fosforia oli keskimäärin 42,8 mg/kg, mikä on fraktioinnissa määritetystä kokonaisfosforista lähes neljännes. Suodatinhiekan fraktiointiin perustuen astiakokeessa annettiin näin ollen nopeasti kasveille käyttökelpoista kokonaisfosforia noin 2 mg/kg kuiva-ainetta (ka) kohden. Kasvatuskokeessa käytetty maa oli vähän fosforia sisältävää hietamaata, jota on käytetty useissa astiakokeissa (Ylivainio ym. 2021). Astiakokeiden maa-ainekset kalkittiin ennen astiakokeita pH:n nostamiseksi tasolle 6,5. Astiaa kohti suodatinhiekkaa punnittiin 300 g kuiva-ainetta vastaava määrä, mikä on maanparannuskäyttöön mahdollinen annos. Koska tarkoituksena oli tutkia vaikuttaako suodatinhiekkassa fosforin käyttökelpoisuuteen kasveille, annettiin suodatinhiekkaa saaneille koejäsenille myös 50 mg/kg ka maata fosforilannoitus väkilannoitteena. Suodatinhiekan tuottama tuoresato oli astiakokeiden perusteella 2,8 % ja kuiva-ainesato 1,7 % korkeampi kuin saman fosforilannoituksen väkilannoitteella saaneen verranteen. Suodatinhiekkalla ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta raiheinäsatoon, eikä astiakokeen perusteella voida vielä tehdä johtopäätöksiä suodatinhiekan käyttökelpoisuudesta maanparannusaineena. Se voitaneen kuitenkin todeta, että suodatinhiekan käyttö maanparannusaineena ei heikennä fosforin käyttökelpoisuutta eikä muutenkaan rajoita kasvien kasvua. (Lemola & Salo 2024)

Hiekan käyttäminen maanparannusaineena voisi mahdollisesti olla hyödyllistä orgaanispitoisissa tai heikosti vettä läpäisevissä savimaissa, joihin voi muodostua fosforin saatavuutta edistävät pelkistävät olosuhteet (Saracanolao ym. 2024). Fosforin saatavuutta suodatushiekan pinnoilta voisi mahdollisesti edistää myös jollakin fosforia liuottavalla esikäsittelyllä. Nesteen lisääminen lisäisi massaa, mikä ei olisi kuljetuksen kannalta edullista, mutta toisaalta nestelisiä voisi helpottaa hiekkasuodattimen tyhjennystä imuautolla.

On mahdollista, että suodatushiekan raekokoa muuttamalla voidaan vaikuttaa suodatuksen tehoon ja mahdollisesti myös Fe-oksihydroksideihin sitoutuneen fosforin käyttökelpoisuuteen.

Vedenpuhdistusteknologiaan perustuvissa suodatuslaitteistoissa hiekan raekoko on kuitenkin usein laitevalmistajan suosittelu ja pyritty optimoimaan suodatustehokkuuden kannalta. Raekokoon on mahdollista vaikuttaa etenkin hiekkasuodatuskenttää hyödynnettäessä. Mahdollisen hyötykäytön kannalta pienemmissä hiekkapartikkeleissa suhteessa suurempi pinta-ala on maassa kosketuksissa kosteudelle sekä pH:n ja hapetus-pelkistys-tilan muutoksille sekä kasvien juurten ravinteidenotolle (Chorover ym. 2007). Niukkaliukoisen fosforin liuottaminen hiekkarakeiden pinnoilta voi olla kasville hidas tapa saada ravinteita (kuten liuottaminen maan mineraalipinnoilta), mutta hidas ja tasainen vapautuminen voi olla edullista tietyissä kasvuolosuhteissa ja tietyille kasveille. Tällä voidaan mahdollisesti välttää esim. joitakin kasvien liasta raudan saannista aiheutuvia vaurioita sekä ylimääräisen fosforin huuhtoutumista maasta suuren valunnan aikana.

Kustannus- ja lainsäädännöllisiä näkökulmia talteen otetun fosforiravinteen kierrätyksessä

Rejektiveden tai lietteen hyötykäytön mahdollisuuksia pohdittaessa tulisi ottaa huomioon myös siihen liittyviä kustannusnäkökulmia. Vaikka kierrätys ja ravinteiden uusiokäyttö olisi kestävä käytön mukaista, suuren tilavuuden vievän rejektiveden tai lietteen kuljetus kunnostuskohteesta kaukana sijaitsevaan käyttökohteeseen luo kustannuksia ja kuluttaa levityskaluston lisäksi kuljetusvälineiden polttoaineita aiheuttaen kasvihuonekaasupäästöjä. Mikäli ravinnepitoisuus on tilavuuteen nähden pieni, suuren rejektivesi- tai lietetilavuuden kuljetus ja levitys ei välttämättä ole taloudellisesta näkökulmasta kannattavaa. Mikäli sivuvirtaa voitaisiin hyödyntää lähellä kunnostuskohdetta ja siirtää massa pumppaamalla, kuljetuskustannuksissa ja polttoaineenkulutuksessa säästettäisiin.

Yksi huomioitava näkökulma rejektiveden tai lietteen hyötykäytössä on myös sen saatavuuden ajoittuminen suhteessa käyttötarpeeseen. Alusveden suodatus on toteutettava keski- tai loppukesällä, kun kunnostettavan järven vesi on kerrostunut. Peltojen kastelukäytössä rejektivedelle olisi puolestaan suurin tarve yleensä alkukesällä. Mikäli käyttötarve viljelyssä tai maanparannuksessa ei ajoitu loppukesään, rejektivesi tai liete pitää varastoida, mikä lisää myös kustannuksia. Levityksen ajankohtaan vaikuttaa myös routa ja lumen sulamisvesien ja runsaan pintavalunnan ajoittuminen sekä maan muokkauksen tai muun käsittelyn ajankohta.

Alusveden suodatuksessa syntyvän sivuvirran mahdollisessa hyötykäytössä on otettava huomioon myös lainsäädännölliset näkökulmat. Lannoitelain (711/2022) tarkoituksena on varmistaa, että Suomessa valmistetut ja markkinoille tuodut lannoitevalmisteet ovat laadukkaita ja sopivat kasvintuotantoon. Lisäksi niiden käytön tulee olla turvallista niin kasveille ja eläimille kuin ympäristöllekin. Käytöllä ei saa myöskään olla haitallisia vaikutuksia vesistöjen tilaan. Osana elintarvikeketjua pyritään myös varmistamaan, ettei lannoitevalmisteiden käyttö aiheuta riskejä ihmisten terveydelle. Lannoitevalmisteiden ryhmään kuuluvat lannoitteet, kalkitusaineet, maanparannusaineet, kasvualustat ja biostimulantit.

Lannoitevalmisteiden on täytettävä joko kansallisen lannoitelain tai EU:n lainsäädännön vaatimukset. Lisäksi toisessa EU- tai ETA-maassa laillisesti valmistetut ja markkinoidut tuotteet voidaan tuoda Suomen markkinoille vastavuoroisen tunnustamisen periaatteiden mukaisesti. Lannoitevalmisteiden valvonta Suomessa kuuluu Ruokavirastolle.

Kansalliseen lainsäädäntöön sisältyvät:

- Lannoitelaki (711/2022), jonka tavoitteena on varmistaa korkealaatuinen kasvintuotanto, elintarvikkeiden laatu sekä ympäristön ja vesien suojelu edistämällä turvallisten ja laadukkaiden lannoitevalmisteiden tarjontaa ja käyttöä sekä tarjoamalla käyttäjille tarvittavat tiedot. Laki koskee lannoitevalmisteiden ja niiden ainesosien valmistusta, markkinoille saattamista, käyttöä, varastointia, kuljetusta, vientiä ja tuontia sekä lannan käyttöä.
- Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista (964/2023), joka tarkentaa lannoitelain säännöksiä. Siinä määritellään esimerkiksi tuoteluokkien laatuvaatimukset, ainesosaluokkien käsittelyvaatimukset, lannoitevalmisteiden merkintävaatimukset sekä ravinteiden ilmoitustavat.

- Maa- ja metsätalousministeriön asetus toiminnan harjoittamisesta ja valvonnasta (965/2023), jossa tarkennetaan lannoitelain säännöksiä talouden toimijan ilmoitettavista tiedoista, ilmoitusmenettelystä, tiedostojen sisällöstä ja järjestämisestä sekä laatujärjestelmän vaatimuksista. Siinä määritellään myös, mitä tietoja lannoitevalmistuseristä on ilmoitettava sekä ennakoilmoitusten aikataulu ja toteutus. Lisäksi asetuksessa käsitellään viranomaisten tarkastus- ja valvontamenettelyjä.
- Valtioneuvoston asetus fosforia sisältävien lannoitevalmisteiden käytöstä (64/2023, joka sisältää tarkempia määräyksiä fosforin käytöstä maa- ja puutarhataloudessa sekä viher- ja ympäristörakentamisessa. Asetus liittyy vesipuitelidirektiivin täytäntöönpanoon.
- Valtioneuvoston nitraattiasetus (1250/2014), joka säätelee lannoitevalmisteiden käyttöä ja varastointia ympäristönsuojelulain nojalla.

Pilotin kustannukset

Kokonaisuudessaan ostopalveluna toteutettu alusveden 21 vrk:n pituinen suodatuspilotti Linkulasjön-järvellä tuli kustantamaan noin 50 000 euroa. Suurin osa kustannuksista (noin 29 000 euroa) kohdistui pilotin perustamiseen, järjestelmän toiminnan edellyttämään hienosäätöön ja pilotin purkamiseen kuluviin työvoima- ja materiaalikuluihin sekä suodatusjärjestelmää tukevan laitteiston vuokrakuluihin. Sen lisäksi noin 17 000 euroa kohdistui suodatusjärjestelmän ja kenttäkäyttöisen spektrofotometrin vuokrakuluihin, järjestelmän ylläpitoon ja seurantaan sisältyviin työvoimakuluihin sekä järjestelmän edellyttämän polymeerin kustannuksiin. Näiden lisäksi vähäisempiä ostopalvelukuluja muodostui dieselgeneraattorin polttoaineesta, hiekkasuodattimen ja siirtolavan tyhjennyksestä sekä suodatusjärjestelmälle johtavan hiekkatien vahvistukseen tarvitusta sepelistä.

Lisäksi sekä järvellä että suodatuslaitteistolla tehtävää vedenlaadun seurantaan varten tulee varata ostopalvelukuluja. Linkulasjön pilotissa suuri osa seurannasta tehtiin Syken ja Helsingin yliopiston työvoimana. Linkulasjön pilotissa suunnittelua edeltävän vesi- että sedimenttinäytteenoton sisältävän kattavan ennen/aikana/jälkeen-tyyppisen seurannan kustannukset olivat arviolta 35 000 euroa.

Linkulasjön ominaisuuksista ja kerrostuneisuusoloista johtuen pilotin kestoa jouduttiin rajaamaan, jotta varmistettiin kerrostuneisuuden säilyminen pilotin aikana. Pilotin kustannukset olivat pilotin kesto huomioiden suhteellisen korkeat. Koska valtaosa kustannuksista kohdistui kuitenkin perustamiseen liittyvään työvoimaan ja materiaaleihin, pilotin keston lisääminen olisi tasannut kustannuksia pitemmällä aikavälillä. Ravinteiden poistoon tähtäävien menetelmien ja niiden edellyttämän infrastruktuurin alkuinvestoinnit voivat olla perinteisiin menetelmiin nähden korkeammat, mutta kustannukset voivat tasoittua ajan ja ravinteiden poistumisen myötä, kun toistettavuuden tarve vähenee. Laskennallisen pilotin aikaisen fosforin poistuman perusteella (noin 1356 g) fosforikilolle tuli kokonaiskustannukset huomioiden Linkulasjöllä melko korkea hinta. Lähtökohtaisesti menetelmän tulisi kuitenkin olla käynnissä koko kerrostuneisuuskauden ajan (järvestä ja sen sijainnista riippuen arviolta kesäkuun alkupuolelta elokuun loppupuolelle saakka) ja useampana perättäisenä vuonna, jolloin alkuinvestoinnit tasaantuisivat pitemmälle aikajaksolle. Pelkän Linkulasjön suodatusjärjestelmän kuukausivuokra ilman työvoimakuluja olisi karkeasti arvioiden ollut noin 8 000–10 000 euron tuntumassa, jota voidaan pitää summittaisena arviona järjestelmän kuukausittaisista ylläpitokustannuksista. Kustannukset voivat kuitenkin vaihdella palveluntuottajasta ja suodatusjärjestelmästä riippuen.

Testatun menetelmän kustannustehokkuuden arviointi yleisellä tasolla on hankalaa paitsi pilottihankkeen lyhyen keston myös laajan menetelmäsovellettavuuden takia. Esimerkiksi Kymijärven pilottimittakaavan tapaisella kentälle asennettuun kiinteään hiekkasuodattimeen perustuvalla suodatusmenetelmällä suurin osa kustannuksista muodostui pumppausjärjestelmän rakentamisesta. Muut kustannukset riippuvat mm. käytetyistä suodatinmateriaaleista ja mahdollista saostuskemikaaleista (Horppila ym. 2019, Nurminen ym. 2020).

Kustannuksia voidaan tasata myös, mikäli muodostuvaa rejektivettä on mahdollista hyödyntää esimerkiksi peltokastelussa sen sijaan, että rejektivesi kuljetetaan jätevedenkäsittelylaitokselle.

Kokemukset pilotista

Kokonaisuutena Linkullasjön suodatuspilotti onnistui odotusten mukaisesti. Toteutuksessa kohdattiin kuitenkin haasteita, jotka on huomioitava tulevissa alusveden suodatushankkeissa.

Edellytys menetelmän soveltuvuudelle on riittävä vesisyvyys, joka turvaa stabiilin lämpötilakerrostuneisuuden muodostumisen. Linkullasjön maksimisyvyys on vain noin 7 m ja suodatuskaudella lämpötilan harppauskerros oli noin 5 m syvyydessä. Epästabiileista kerrostuneisuusoloista johtuen alusveden suodatusaika jouduttiin lähtökohtaisesti rajaamaan enintään kuukauden mittaiseksi alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen. Kerrostuneisuusolojen puolesta alusveden suodatusta olisi kuitenkin pystytty toteuttamaan kesäkuun lopulta elokuun puoliväliin saakka, mutta pilotoinnin kustannukset oli mitoitettu vuodelle 2024 kuukauden kestoista pilottia varten edeltävän kesän olosuhteiden perusteella. Suodatuskaudella Linkullasjön alusveden paksuus harppauskerroksen alla oli kuitenkin alhainen ja alusveden imuputken painottaminen sopivalle syvyydelle oli kerrostuneisuudesta huolimatta haastavaa. Pilotin perustamisen ja suodatuksen käynnistämisen jälkeen imuputki osoittautui olevan liian syvällä, jonka vuoksi putki ja uppopumppu tukkeutuivat niihin imeytyneen sedimentin takia. Imuputkea siirrettiin tukkeutumisen ehkäisemiseksi ylemmäs, jonka jälkeen järjestelmään päätyi puolestaan hapettoman alusveden sijaan myös hapellista päällysvettä ja liian alhaisia ravinteiden ja raudan tulopitoisuuksia, jotka heikensivät järjestelmän suodatustehoa. Painottaminen sopivalle syvyydelle saatiin lopulta onnistumaan, mutta alusveden riittävä paksuus helpottaisi pilotin perustamisessa ja varmistaisi suodatusjakson kattavamman pituuden kerrostuneisuuskaudella. Etenkin suodatuksen alkuvaiheessa on varauduttava siihen, että järjestelmää joudutaan hienosäätämään useaan otteeseen ennen kuin suodatusteho vakiintuu ja järjestelmä alkaa toimia odotetulla tavalla. Lisäksi polymeerilisäyksellä ei saavutettu odotusten mukaisia tuloksia rejektiveden konsentroinnissa, joka saattaa johtua pilottiluonteisella järjestelmällä käsitellyistä pienistä vesimääristä ja toisaalta myös käytetystä polymeeristä. Polymeerin valinta on tulevissa hankkeissa varmennettava laboratoriokokein kunnostettavan järven alusvettä hyödyntäen.

Pilotin vaatima sähkövirran tarve oli arvioitu 16A:ksi suodatuslaitteistoon, käytettyyn uppopumppuun, ilmastussammioon, sekä järven syvänteen ja suodatusjärjestelmän sijainnin väliseen välimatkaan ja korkeuseroon perustuen. Järjestelmän havaittiin kuitenkin sammuneen todennäköisten virtapiikkien seurauksena useampaan otteeseen pilotin aikana. Automatisoimattoman järjestelmän ylläpito edellyttää riittävää läsnäoloa, jotta mahdollisiin toimintahäiriöihin voidaan puuttua. Toimintahäiriöiden tunnistamisessa järjestelmään tulevan ja siitä lähtevän veden fosfori- ja rautapitoisuuksien päivittäinen seuranta kenttäspektrofotometrin avulla on suositeltavaa. Myös ilmastussammioon tulevan veden happipitoisuutta on hyvä seurata, jotta voidaan varmistua hapettoman alusveden johtamisesta järjestelmään. Seurantaa varten pilotin perustamisvaiheessa on huomioitava riittävän tiheästi asennetut hanat, joiden avulla järjestelmään tulevasta, siinä kulkevasta ja siitä lähtevästä vedestä voidaan ottaa näytteitä sekä kenttä- että laboratoriomääryksiä varten.

Sitoutuneen paikallisen tahon osallistuminen suodatushankkeeseen helpottaa sekä järjestelmän ylläpidossa että seurannassa. Vaihtoehtoisesti järjestelmän ylläpitoon tarvittava työvoima voi olla mahdollista sisällyttää ostopalveluna hankittavan suodatusjärjestelmän palvelunkuvaukseen, kuten Linkullasjön pilotissa toimittiin. Työvoiman ostaminen palveluntuottajalta osana suodatusjärjestelmän vuokrausta kuitenkin nostaa suodatuksen kokonaiskustannuksia, jonka vuoksi paikallisen tahon osallistaminen ensisijaisena toimintatapana on suositeltavaa.

Järjestelmän perustaminen edellyttää riittävän maa-alan suodatusjärjestelmän vakauttamiseen tarvittavaa murskepetiä varten, vaikka suodatus toteutettaisiin Linkullasjön tapaan väliaikaisen, liikuteltavan vedenpuhdistusteknologian avulla. Järjestelmän perustaminen on mahdollista kohteille, joille on joko olemassa tai perustettavissa oleva riittävän kantava tie. Suodatusyksikkö ja sen perustamiseen tarvittavat materiaalit edellyttävät raskailla yhdistelmäajoneuvoilla kulkemista, jonka vuoksi tien kantavuudesta on varmistuttava. Myös rejektiveden ja suodatushiekan tyhjennykseen tarvittavan imuauton ja mahdollisen polttoainekuljetuksen pääsy järjestelmälle on varmistettava. Linkullasjöllä tien kantavuuden kanssa kohdattiin haasteita ja tietä jouduttiin kahteen otteeseen vahvistamaan rankkasateiden jälkeen.

Linkullasjön järjestelmän vaatima sähkö jouduttiin tuottamaan dieselgeneraattorilla, jonka hyödyntämistä laajemmassa mittakaavassa ei sen suuren hiilijalanjäljen vuoksi suositella. Järjestelmän on tarkoitus toimia ympärivuorokautisesti, jolloin dieselgeneraattorin valvomattomaan käyttöön liittyy myös teoreettinen riski mahdollisesta ympäristövahingosta. Ensisijaisesti olisi hyvä pyrkiä hyödyntämään kiinteää sähkötolppaa tai muuta kiinteää sähkön lähdettä, mikäli sellainen on riittävällä sähkövirralla varustettuna saatavilla. Vaihtoehtoisesti riittävän tehokkaiden aurinkopaneelien saatavuutta tulisi selvittää. Vedyllä toimivien generaattorien saatavuuden lisääntyminen voi tulevaisuudessa mahdollisesti vähentää generaattoreiden hiilijalanjälkeä kohteilla, joilla muuta sähkön lähdettä ei ole saatavilla.

Hankkeen vaikuttavuus

Vesienhoidon edistäminen

Järvien hyvän ekologisen tilan tavoitteesta ollaan jäljessä (EEA 2024). Useimmat järvien sisäistä kuormitusta hillitsemään tähtäävät menetelmät pyrkivät estämään fosforin vapautumista sedimentistä. Ravinteiden pidättämiseen tähtäävillä menetelmillä ei kuitenkaan useimmiten saavuteta pitkäkestoisia tuloksia järvien tilan paranemiseksi (Horppila 2019). Euroopan laajuisesti nykyisillä toimenpiteillä on monesti onnistuttu parantamaan huonoimmissa ekologisen tilan luokissa olevien järvien tilaa kohti tyydyttävää, mutta hyvää ekologista tilaa ei ole onnistuttu saavuttamaan (EEA 2024). Ravinteiden pidättämisen sijaan niiden poistoon tähtäävillä menetelmillä voitaisiin vaikuttaa tehokkaammin rehevöitymisen taustasyihin ja rehevöitynyttä tilaa ylläpitäviin mekanismeihin (Horppila 2019). Hyvän ekologisen tilan saavuttamiseksi ja järvikunnostusten kestävyyskehittämiseksi ravinteiden poistoon tähtäävien menetelmien kehittäminen on perusteltua (Tammeorg ym. 2024).

RaPo-hankkeessa jatkokehitettiin Lahden Kymijärvellä kehitettyä suljetun kierron alusveden suodatusmenetelmää, joka tähtää ravinteiden poistoon ja tarjoaa mahdollisuuden myös ravinteiden talteenottoon (Nurminen ym. 2021, Silvonen ym. 2021, Silvonen ym. 2022). Menetelmän kehittämisellä on laajennettu vesienhoidon keinovalikoimaa. RaPo-hankkeessa tuotetun, Kymijärven ja Linkullasjön tuloksiin pohjautuvan menetelmäohjeen avulla pyritään edesauttamaan jalkautumista uusille kunnostuksen tarpeessa oleville kerrostuville järville (Nurminen ym. 2024). Pilotointia edeltävän ja sen aikaisen seurannan avulla on laajennettu myös Linkullasjön-järven ekologisen tilan arviointia varten käytettävissä olevaa vedenlaatuaineistoa.

Sekä Kymijärven että Linkullasjön tulosten perusteella suljetun kierron alusveden suodatus on lupaava, ravinteiden pysyvämpään poistoon tähtäävä kunnostusmenetelmä rehevöitymisestä kärsiville syville, kerrostuville järville.

Soveltuvuus ja vaikuttavuus tulevilla vesienhoitohankkeissa

Vesienhoitoon kytkeytyvien tulevien suodatushankkeiden suunnittelussa ja toisaalta myös rahoituksessa on huomioitava menetelmän reunaehdot. Menetelmä soveltuu parhaiten syville,

kerrostuville järville, joiden alusvesi muodostuu kerrostuneisuuskaudella hapettomaksi (Nurminen ym. 2024). Yleissääntöä riittävälle, kerrostuneisuuden muodostumisen takaavalle vesisyvyydelle ei kuitenkaan ole. Kerrostuneisuuden muodostuminen riippuu paitsi järven syvyydestä, myös muun muassa järven yleisestä morfologiasta, valon läpäisevyyteen vaikuttavista fysikaaliskemiallisista tekijöistä (veden tummuus ja sameus) sekä järven alttiudesta tuulten sekoittavalle vaikutukselle. Näin ollen kerrostuneisuusolot on selvitettävä tapauskohtaisesti.

Soveltuvuuden arvioinnissa taustatieto päälyys- ja alusveden happi-, ravinne- ja rautapitoisuuksien kehittymisestä kerrostuneisuuskaudella on myös oleellista. Päälyysveden fosforipitoisuuksien perusteella arvioidaan laskennallinen fosforin poistotarve, jolla tavoiteltava parannus järven ekologisessa tilassa voitaisiin saavuttaa. Vastaavasti alusveden pitoisuuksien perusteella voidaan arvioida fosforin sisäisen kuormituksen potentiaalia sekä alusveden rautavarantoa, jotka vaikuttavat menetelmän soveltuvuuteen kohteelle. Esimerkiksi Kymijärvellä hapettoman alusveden keskimääräiset kokonaisfosfori- ja kokonaisrautapitoisuudet ovat olleet 320 µg P/l ja 10 mg Fe/l (Nurminen ym. 2024). Runsasravinteisella Linkullasjöllä vastaavat hapettoman alusveden keskimääräiset pitoisuudet olivat kesäkaudella 2024 puolestaan huomattavasti suuremmat, 941 µg P/l ja 40 mg Fe/l. Alusveden suodatusta koskevien hankesuunnitelmien olisi siten hyvä sisältää joko taustatiedot järven kerrostuneisuusoloista ja vedenlaadun kehittymisestä kerrostuneisuusajana, tai vaihtoehtoisesti suunnitelma niiden kartoittamisesta suodatusta edeltävällä avovesikaudella. Kuten järvikunnostuksissa yleisesti, reunaehdona on myös järven ulkoisen kuormituksen hallinta. Ilman ulkoisen kuormituksen vähentämistä järvellä tehtävien kunnostustoimien vaikuttavuus jää lyhytkestoiseksi. Näin ollen hankesuunnitelmissa tulisi osoittaa myös tehdyt tai suunnitellut toimet ulkoisen kuormituksen vähentämiseksi.

Lisäksi hankesuunnitelmissa olisi kuvattava vaikuttavuuden arviointia tukeva seurantasuunnitelma, jossa oleellista on sekä järviveden että suodatusjärjestelmään tulevan ja sieltä lähtevän veden seuranta vähintään suodatusta ennen ja sen aikana (Nurminen ym. 2024). Järvikunnostusten vaikuttavuuden arvioimiseksi myös kunnostuksen jälkeinen seuranta on oleellista.

Järviin kertyneen fosforin poistoon tähtäävien alusveden suodatushankkeiden odotetaan vähentävän päälyysveden fosforipitoisuutta pidemmällä tähtäimellä. Alusveden suodatuksen vaikuttavuuden arvioinnissa suodatusjärjestelmän fosforin ja muiden alkuaineiden poistotehokkuus on siten erityisen oleellista. Kymijärven ja Linkullasjön-järven suodatushankkeissa fosforin poistotehokkuus on ollut keskimääräinen 59–67 % ja kokonaisraudan poistotehokkuus keskimäärin 52–90 % (Nurminen ym. 2024). Näitä voidaan pitää suuntaa antavina indikaatioina menetelmän vaikuttavuudesta ja tavoiteltavista poistotehokkuuksista. Vaikuttavuuden arvioinnissa on kuitenkin huomioitava, että laskennallinen aikajänne tulosten saavuttamiselle voi kuitenkin vaihdella kohteesta riippuen muutamista vuosista kymmeneen vuosiin (Nurminen ym. 2020). Näin ollen ekologisen tilan parannusta ei todennäköisesti useimmissa tapauksissa ole odotettavissa 2–3 vuoden kestoisten alusveden suodatushankkeiden aikana.

Alusveden suodatushankkeiden kustannukset riippuvat suuresti kunnostuskohteesta ja sen käytettävissä olevalle toteutusmenetelmälle asettamista reunaehdoista. Alusveden suodatus voidaan kohdekohtaisesti toteuttaa joko erikseen perustetun hiekkasuodatuskentän avulla tai väliaikaisella vedenpuhdistusteknologiaan perustuvalla suodatusyksiköllä (Nurminen ym. 2024). Hiekkasuodatuskentän ja siihen liittyvän putkiston ja ilmastuslaitteiston perustamiskustannukset voivat Kymijärven kokemusten perusteella nousta karkeasti arvioiden noin 80 000–100 000 euroon (Nurminen ym. 2020). Väliaikaisen, vedenpuhdistusteknologiaan perustuvan ratkaisun perustamiskustannukset voivat olla tätä alhaisemmat, mutta ylläpitokustannukset vastaavasti korkeammat. Linkullasjön pilottiluonteisessa esimerkissä perustamis- ja laitteiston vuokratkustannukset kuukauden kestoiselle pilotille olivat noin 50 000 euron luokkaa. Linkullasjön järjestelmän osalta on kuitenkin huomioitava, että käytössä oli pilottikokoinen, pieniä vesimääriä käsittelevä järjestelmä. Varsinaisissa alusveden suodatushankkeissa käsiteltävien vesimäärien ja virtaamien on todennäköisesti oltava suurempia, jolloin vuokrattava laitteistokin lienee kalliimpi.

Ylläpitokustannukset voivat väliaikaisissa ratkaisuissa kohota tiheimmän ylläpitotarpeen vuoksi korkeammiksi, sillä automatisoimattoman järjestelmän toiminnan varmistamiseksi lähes päivittäinen vierailu järjestelmällä on suositeltavaa etenkin suodatuksen alkuvaiheessa. Hiekkasuodatuskentän huoltoon voi puolestaan riittää kentän koosta ja tulevan veden pitoisuuksista riippuen hieman harvempi varautuminen joko viikoittaisella tai parhaimmassa tapauksessa kuukausittaisella tasolla (Nurminen ym. 2024). Toteutustavasta riippumatta alusveden suodatusjärjestelmä tarvitsee myös sähkönlähteen ja riittävän sähkövirran, jonka kustannukset riippuvat kulloinkin voimassa olevista sähkön hinnoista. Näin ollen hiekkasuodatuskenttään ja väliaikaiseen suodatusratkaisuun perustuvien alusveden suodatusjärjestelmien kustannukset muodostunevat kokonaisuutta tarkastellen toisiaan vastaaviksi.

Perustamiseen, laitteiston vuokraan ja ylläpitoon, seurantaan, vaikuttavuuden arviointiin ja viestintään sekä näihin liittyviin työvoimakuluihin perustuvat realistiset hankkeen kokonaiskustannukset esimerkiksi kolmen vuoden alusveden suodatushankkeissa voisivat karkeasti arvioiden nousta 400 000–500 000 euron tuntumaan. Arviota voidaan kuitenkin pitää ainoastaan suuntaa antavana, koska kustannukset voivat vaihdella huomattavasti esimerkiksi kunnostettavan kohteen ominaisuuksista, suodatusjärjestelmän perustamispaikasta ja -tavasta sekä käytettävissä olevan paikallisen yhteistyötahon panoksesta riippuen. Yleisesti ottaen ravinteiden poistoon tähtäävien menetelmien osalta on hyvä muistaa, että niiden perustamiseen liittyvät kertainvestoinnit ovat todennäköisesti perinteisiä kunnostusmenetelmiä korkeammat. Kustannukset kuitenkin tasaantuvat ajan myötä, kun toistettavuuden tarve vähenee ravinteiden poistuessa järvestä. Perinteisissä menetelmissä ravinteiden poistumaa ei usein tapahdu yhtä tehokkaasti, jolloin toistettavuuden tarve ei vähene.

Viestintä

RaPo-hankkeen toteutuksesta ja tuloksista viestittiin useissa kansallisissa ja kansainvälisissä tilaisuuksissa. Lisäksi tuotettiin hankkeen verkkosivu sekä kaksi verkkouutista ja niihin pohjautuvia sosiaalisen median päivityksiä. Hankkeessa tuotetussa menetelmäohjeessa kuvataan alusveden suodatuksen suunnittelussa, toteutuksessa ja tarvittavassa seurannassa huomioitavat tekijät, jonka avulla menetelmän soveltaminen uusilla kohteilla helpottuu. Hankkeessa toteutetun viestinnän avulla on lisätty tietoisuutta sekä alusveden suodatusmenetelmän periaatteista ja mahdollisuuksista että ravinteiden poistoon tähtäävien menetelmien potentiaalista vesienhoidossa.

Hankkeen verkkosivu: [https://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus_kehittaminen/Tutkimus_ja_kehittamishankkeet/Hankkeet/Ravinteet_Poistoon_Alusveden_suodatusmenetelman_sovellettavuus_RaPo/Ravinteet_Poistoon_Alusveden_suodatusmen\(65719\)](https://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus_kehittaminen/Tutkimus_ja_kehittamishankkeet/Hankkeet/Ravinteet_Poistoon_Alusveden_suodatusmenetelman_sovellettavuus_RaPo/Ravinteet_Poistoon_Alusveden_suodatusmen(65719))

Hankkeen viestintätuotteet:

- Härkönen, L.H., Nurminen, L., Lukkari, K., Silvonen, S., Horppila, J., Grönroos, J., Lehtoranta, S., Salo, T., Lemola, R., Back, M. & Vuorivirta, M. Alusveden suodatus osana kestävämpää järvikunnostusta. Vesitalous-lehti, käsikirjoitus.
- Nurminen, L., Horppila, J., Silvonen, S., Härkönen, L.H., & Lukkari, K., 2024. Alusveden suodatuksen menetelmäohje. Vesi.fi, (pdf) <https://vesi.fi/aineistopankki/metelmaohje-kerrostuville-jarville-soveltuvalle-alusveden-suodatukselle/>
- Härkönen, L. & Nurminen, L. 2024. Removing nutrients from lakes using closed-circuit hypolimnetic withdrawal (Mission Banos Arena 2, suullinen esitys) <https://www.b2match.com/e/2nd-mission-arena/components/38898>
- Nurminen, L. & Härkönen, L.H. 2024. New avenues to utilize water treatment technology in lake restoration? RaPo -project: Feasibility of closed-circuit hypolimnetic withdrawal (Lahti

Lakes, posteri ja abstrakti) <https://lahtilakes.fi/blog/content/uploads/2024/05/lahti-lakes-2024-abstract-book-final.pdf>, <https://lahtilakes.fi/wp-content/uploads/2024/05/lahti-lakes-2024-abstract-book-final.pdf>

- Härkönen, L., Silvonen, S. & Nurminen, L. 2024. Alusveden suodatuksella uutta puhtia pitkävaikutteiseen järvikunnostukseen. (Vesistökunnostusverkoston vuosiseminaari, suullinen esitys)
- Härkönen, L. 2023. RaPo-project: Feasibility of closed-circuit hypolimnetic withdrawal. (Vesistökunnostajien aamukahvit, suullinen esitys)

Hankkeen verkkouutiset Syken sivuilla ja hankkeeseen liittyvät jaot sosiaalisen median kanavissa (X ja Facebook)

- <https://www.vesi.fi/jarviin-kertyneiden-ravinteiden-poistoon-uusi-menetelmaohje/>
- <https://x.com/SYKEinfo/status/1869737138616479861>
- <https://www.facebook.com/photo/?fbid=908957084749412&set=a.188833603428434>
- [https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Uutiset/Jarven_sisaisesta_kuormituksesta_aiheutu\(66023\)](https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Uutiset/Jarven_sisaisesta_kuormituksesta_aiheutu(66023))
- <https://twitter.com/SYKEinfo/status/1706623086672441408>
- <https://www.facebook.com/syke.fi/posts/pfbid02tAMYqJcCyxtay3pSQrkHOKAtPvpP6vFgokEyQedeoxuXnQ18kKeKbWCcx7fZ9cHwI>

Lisäksi Syken tutkija Meri Back julkaisi Syken Instagramin kohokohdissa Linkullasjön-järven ja pilotin näytteenottoon liittyvän My Workday -julkaisun 6.8.2024, josta on koostettu otteita alle. Koko julkaisu on katsottavissa osoitteessa <https://www.instagram.com/sykeresearch/>







Yhteistyö

RaPo-hanke vahvisti erityisesti Syken ja HY:n välistä järvikunnostukseen keskittyvää tutkimusyhteistyötä. Lisäksi hanke tuki Syken, Luken ja HY:n välistä yhteistyötä ravinteiden hyötykäyttöpotentiaalin arvioinnin kautta. Organisaatioiden välisen tutkimusyhteistyön syveneminen edesauttaa jatkossa paitsi alusveden suodatusmenetelmään, myös muihin järvikunnostusmenetelmiin ja kiertotalouteen sekä järvien tilan tutkimiseen kytkeytyneiden tutkimushankkeiden suunnittelua ja toteutusta.

Yhteistyötä syvennettiin lisäksi Länsi-Uudenmaan Vesi ja Ympäristö ry:n (LUVY), Uudenmaan ELY-keskuksen ja Inkoon kunnan kanssa, joiden asiantuntijat autoivat hankkeen kohdevalinnan kanssa. Yhteistyö Linkullasjön kalastuskunnan kanssa sujui erinomaisesti. Lisäksi hanke vahvisti tutkimus-yhteistyötä ja loi uusia kontakteja laitetoimittajien ja urakoitsijoiden kanssa (Hyxo Oy ja RantalaTimber Oy).

Hankkeen toteutuminen seurattavien mittareiden perusteella

Seurattavien mittareiden perusteella RaPo-hanke toteutui kokonaisuutena tavoitteiden mukaisesti ja osin myös tavoitteet ylittäen (Taulukko 3).

Taulukko 3. RaPo-hankkeen toteumat mittareittain raportointikaudella 1.3.2023-31.12.2024.

	Seurattava muuttuja	Mittari	Toteuma	Lisätietoja
Toimenpiteiden ja tutkimuksen toteutuminen	Hankkeeseen osallistuvien tutkijoiden lukumäärä	5	9	Tavoite ylittynyt. Syken ja Luonnonvarakeskuksen (Luke) kiertotalousasiantuntijat osallistuivat hanketta täydentävään hyötykäyttöpotentiaalin arviointiin.
	Hankkeeseen osallistuvien organisaatioiden lukumäärä	2	3	Tavoite ylittynyt. Luken osallistuminen hyötykäyttöpotentiaalin arviointiin.
	Järvinäytteenottokertojen lukumäärä	22	22	Toteutunut tavoitteen mukaisesti.
	Järjestelmänäytteenotto-kertojen lukumäärä	4+10	4+10	Toteutunut tavoitteen mukaisesti. Laboratorionäytteitä otettiin viikoittain (4) ja näytteenottoa täydennettiin kenttäspektrofotometrinäytteiden (10) avulla.
	Pilotin toteutuminen	1	1	Toteutunut tavoitteen mukaisesti.
	Tutkimustiedon lisääntyminen			Toteutunut tavoitteen mukaisesti. RaPo-hankkeessa on saatu kattavasti lisää tutkimustietoa Linkulasjön-järven vedenlaadun kehittymisestä ja sedimentin huokosveden ravinnepitoisuuksista kerrostuneisuuskaudella, jota voidaan hyödyntää järven kunnostuksen suunnittelussa ja järven ekologisen tilan luokittelussa. Lisäksi hanke on tuottanut taustatietoa liikuteltavan alusveden suodatusjärjestelmän soveltuvuudesta järvikunnostuskäytössä ja rejektivedessä olevan fosforin hyötykäyttöpotentiaalista.
Viestinnän toteutuminen	Tilaisuuksien järjestäminen	0	0	Toteutunut tavoitteen mukaisesti.
	Tilaisuuksiin osallistuminen	0	4	Tavoite ylittynyt. Hankkeen esittely kalastuskunnan kokouksessa, Riian Mission Banos Arena-tilaisuudessa, Lahti Lakes -symposiossa sekä Vesistökuunnostusverkoston aamukahveilla ja vuosiseminaarissa.
	Viestintätuotteiden lukumäärä	8	12	Tavoite ylittynyt. Hankesuunnitelmaan kirjattujen verkkosivun, verkkouutisten, sosiaalisen media päivitysten sekä menetelmäohjeen ja asiantuntija-artikkelin lisäksi tuotettiin neljä suullista tai kirjallista esitelmää kansallisiin tai kansainvälisiin tilaisuuksiin.
	Asiantuntija-artikkelien lukumäärä	1	1	Toteutunut tavoitteen mukaisesti.
	Tieteellisten julkaisujen lukumäärä	0	0	Toteutunut tavoitteen mukaisesti.

Hankkeen kokonaiskustannukset ja rahoitus

RaPo-hanke toteutettiin ympäristöministeriön rahoituksella. Hankkeen kokonaiskustannukset olivat 244 214 euroa, josta ympäristöministeriön rahoitusosuus (80 %) kattoi 195 371 euroa (Taulukko 4). Hankesuunnitelmassa esitetyistä kokonaiskustannuksista jäi toteutumatta noin 5000 euroa. Kustannusten jakautuminen kululajeittain koko hankkeen ajanjaksolla on esitetty erillisellä kustannuserittelylomakkeella (Liite 1) ja neljännen kauden osalta liitteenä olevalla tilierittelyllä (Liite 2).

Taulukko 4. RaPo-hankkeen toteutuneet kustannukset raportointikausittain.

Kausi	1	2	3	4	Koko hanke
Toteutuneet kokonaiskulut	21 663,51	54 067,77	44 153,81	124 328,72	244 213,81
YM:n osuus 80 %	17 330,80	43 254,22	35 323,05	99 462,97	195 371,04

Johtopäätökset

Vedenpuhdistusteknologiaan perustuvalla väliaikaisella alusveden suodatusjärjestelmällä pystytään poistamaan kerrostuvien järvien alusvedessä olevaa fosforia. Edellytys menetelmän soveltuvuudelle on järven riittävä vesisyvyys, joka turvaa stabiilin lämpötilakerrostuneisuuden muodostumisen. Suodatetun veden johtaminen joko olemassa olevaan ojaan tai mahdollisuuksien mukaan kosteikkoon tehostaa ravinteiden ja raudan pidättymistä.

Alusveden suodatus voidaan toteuttaa joko erikseen perustettavan hiekkasuodatuskentän avulla tai vaihtoehtoisesti väliaikaisella vedenpuhdistusteknologiaan perustuvalla suodatusyksiköllä. Menetelmävalinta riippuu kunnostettavan kohteen asettamista reunaehdoista. Kunnostuksen suunnittelu edellyttää tietoa järven kerrostuneisuusoloista sekä ravinne- ja rautapitoisuuksien kehittymisestä kerrostuneisuuskaudella. Alusveden suodatus edellyttää aina myös säännöllistä huoltoa ja seurantaa. Järjestelmään tulevan ja sieltä lähtevän veden fosfori- ja rautapitoisuuksia kannattaa seurata esimerkiksi kenttäkäyttöisen spektrofotometrin avulla, jotta mahdolliset toimintahäiriöt voidaan tunnistaa ja niihin voidaan puuttua ajoissa. Suodatusyksikön käyttöönoton alkuvaiheessa on myös varauduttava hienosäätöön järjestelmän halutun toiminnan varmistamiseksi. Alusveden poistovirtaama on mitoitettava siten, että se ei aiheuta vaaraa kerrostuneisuuden purkautumiselle. Toisaalta myös suodatusyksikköön tulevan virtaaman on oltava riittävän suuri suodatuslaitteiston toiminnan kannalta. Linkullasjön suodatuskokeilu toteutettiin pilottimuotoisella laitteistolla pieniä tulovirtaamia hyödyntäen, eikä sillä odotettu merkittäviä parannuksia järven vedenlaatuun.

Vedenpuhdistusteknologiaa hyödynnettäessä hiekka- ja rumpusuodattimen yhdistelmällä pystytään rajoittamaan muodostuvan rejektiveden määrää. Tällä on merkitystä suodatuksen käytännön toteutuksen kannalta. Polymeerilisäyksellä pystytään Kymijärven kokemusten perusteella tehostamaan myös rejektiveden konsentroitumista rumpusuodattimella. Linkullasjön pilotilla vedenerotuspolymeerin toivottu vaikutus jäi savuttamatta joko alhaisten tulovirtaamien tai väärentyyppisen polymeerin takia. Jatkossa polymeerin valinta on varmistettava kohdekohtaisesti laboratoriokokein. Rejektiveden konsentroiminen rumpusuodatuksen avulla voi parantaa myös rejektiveden talteenottomahdollisuuksia.

Koska rehevöityneiden järvien kunnostus on pitkäjänteistä työtä, yhden kerrostuneisuuskauden aikana toteutetulta pilotoinnilta ei odotettu merkittävää vaikutusta järven fosforipitoisuuden alenemaan. Hankkeen tavoitteena olikin alusveden puhdistuksen menetelmän sovellettavuuden

testaaminen. Kaikessa järvikunnostustoiminnassa on huomioitava toimet ulkoisen kuormituksen vähentämiseksi, joita ilman kunnostuksilla ei voida saavuttaa pitkäkestoista vaikuttavuutta.

Kiitokset

Kiitämme ympäristöministeriötä RaPo-hankkeen rahoituksesta. Lisäksi haluamme kiittää Katja Pellikkaa Länsi-Uudenmaan Vesi- ja Ympäristö ry:stä (nykyisin Hämeen ELY-keskuksesta), Jaana Marttilaa ja Riku Eskelistä Uudenmaan ELY-keskuksesta, sekä Soila Silvosta ja Jukka Horppilaa Helsingin yliopistosta kohdejärven kartoitusavusta, hankkeen suunnitteluvaiheessa käydyistä keskusteluista sekä vesilain mukaisen luvantarvearvion selvitystyöstä. Ossi Kinnusta, Veera Aaltoa, Soila Silvosta, Jenni Jäänheimoa, Meri Vuorivirtaa, ja Kristiina Vuoriota kiitämme korvaamattomasta avusta hankkeen näytteenotossa. Lämpimät kiitokset kohdistamme myös Linkullasjön kalastuskunnalle ja erityisesti Henrik Sundbladille, jonka maille suodatusjärjestelmä saatiin perustaa ja jolta saatiin myös vene lainaan näytteenottoa varten. Inkoon kunnasta kiitämme Julia Scheininia sekä Mikael Wickströmiä kiinnostuksesta sekä toimenpideluvan tarpeeseen liittyvästä avusta hankkeen suunnitteluvaiheessa. Hyxo Oy:ltä kiitämme Mika Laihosta, Miikka Juvenia ja Ilkka Sillanpäättä sekä Rantala Timber Oy:ltä Jarno Rantalaa erinomaisesta yhteystyöstä ja joustavuudesta pilotin suunnittelu- ja toteutusvaiheessa. Lisäksi kiitämme Suomen ympäristökeskuksen Päivi Grönroosia, Timo Sara-Ahoa, Olga Kovrua, Virpi Vuorinen-Lindgreniä, Anne Rahikaista, Mika Sarkkista, Jaana Heiskasta sekä Katri Salosta vesinäytteiden analysoinnista ja avusta hankkeen seurannan kanssa.

Lähteet

- Agstam-Norlin, O., Lannergård, E.E., Rydin, E., Futter, M.N. & Huser B.J. 2021. A 25-year retrospective analysis of factors influencing success of aluminum treatment for lake restoration, *Water Research*, 200: 117267. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117267>
- Allred, B. J. and Racharaks, R. 2014. Laboratory comparison of four iron-based filter materials for drainage water phosphate treatment. *Wat Env Res*, 86(9):852-862.
- Aroviita, J., Mitikka, S., & Vienonen, S. (toim.) 2019. Pintavesien tilan luokittelu ja arviointiperusteet vesienhoidon kolmannella kaudella. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 37/2019. 182 s. ISBN 978-952-11-5074-6 (PDF)
- Beaulieu, J. J., DelSontro, T., & Downing, J. A. 2019. Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century. *Nature Communications*, 10(1), 1-5. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09100-5>
- Boudreau, B.P. 1997. Diagenetic models and their implementation. Springer.
- Chorover, J., Kretzschmar, R., Garcia-Pichel, F., and Sparks, D. L. 2007. Soil biogeochemical processes within the critical zone. *Element*, 3:321-326.
- EEA, 2024. Europe's state of water 2024 - The need for improved water resilience. EEA Report 7. 108 pp.
- European Commission. 2017. Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the 2017 List of Critical Raw Materials for the EU. COM/2017/0490 final. Brussels, 13.9.2017. <https://eurlex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52017DC0490>
- Fjäder, P., Korkalainen, M., Kauppi, S., Lehtiniemi, M., Salminen, J., Selonen, S., Setälä, O., Sillanpää, M., Sorvari, J., Suikkanen, S., Talvitie, J., Turunen, T., Virkkunen, H. & Ala-Ketola, U. 2022. Muovien haitalliset ympäristövaikutukset. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 17.
- Hedley, M.J., Stewart, J.W.B. & Chauhan, B.S. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal* 46, 970–976.
- Horppila, J. 2019. Sediment nutrients, ecological status and restoration of lakes. *Water Research* 160: 206–208. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.074>
- Horppila J., Jilbert T., Niemistö J., Nurminen L. ja Silvonen S. (2019). Järvien kunnostus ja ravinteiden kierrätys sisäistä kuormitusta hyödyntämällä – alusveden puhdistuksen uusi sovellus Kymijärvi-hanke, Loppuraportti. Helsingin yliopisto.
- Howe, K., Hand, D., Crittenden, J., Trussell, R. & Tchobanoglous, G. 2012. *Principles of Water Treatment*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Johnston, A. E. and Richards, I. R. 2003. Effectiveness of different precipitated phosphates as phosphorus sources for plants. *Soil Use and Management*, 19: 45-49.
- Lambert, N., van Aken, P., van den Broeck, R., and Dewil, R. 2021. Adsorption of phosphate on iron-coated sand granules as a robust end-of-pipe purification strategy in the horticulture sector. *Chemosphere*. 267: 129276.
- Lemola, R. & Salo, T. 2024. RaPo-Hyötykäyttöpotentiaalin arviointi. 31.10.2024. Luonnonvarakeskus, julkaisematon raportti.
- Liu, R. T., Chi, L. N., Wang, X. Z., Sui, Y. M., Wang, Y., and Arandiyani, H. 2018. Review of metal (hydr)oxide and other adsorptive materials for phosphate removal from water. *J Environ Chem Eng*. 6: 5269–5286.
- Nieminen, M., Laurén, A., Hökkä, H., Sarkkola, S., Koivusalo, H., and Pennanen, T. 2011. Recycled iron phosphate as a fertilizer raw material for tree stands on drained boreal peatlands. *For Ecol Manag*. 261: 105–110.
- Nriagu, J. O. and Dell, C. I. 1974. Diagenetic formation of iron phosphates in recent lake sediments. *Am. Miner*. 59:934-946.
- 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. 33 s.

- Nurminen, L., Silvonen, S., Jilbert, T., Horppila, J., Niemistö, J., Kotakorpi, M. & Malin, I. 2021. Fosforin poistaminen järvestä alusveden suodatus- ja puhdistusjärjestelmällä. *Vesitalous* 3/2021: 33–37.
- Nurminen, L., Aragao, F., Jilbert, T., Suppala, V., Mykkänen, K.-M., Silvonen, S. & Horppila, J. 2023. Lahden Kymijärven laajennetun alusvesisuodattimen tehostaminen 2022-23 Tutkimusraportti Helsingin yliopisto, Ekosysteemit ja ympäristö –tutkimusohjelma 34 s.
- Nurminen, L., Horppila, J., Silvonen, S., Härkönen, L.H. & Lukkari, K. 2024. Menetelmäohje kerrostuville järville soveltuvalle alusveden suodatukselle. Helsingin yliopisto ja Suomen ympäristökeskus. Raportti, 21 s. Saatavilla: <https://vesi.fi/aineistopankki/menetelmaohje-kerrostuville-jarville-soveltuvalle-alusveden-suodatukselle/>
- Nürnberg, G.K. 2007. Lake responses to long-term hypolimnetic withdrawal treatments. *Lake and Reservoir Management*, 23: 388–409.
- Nürnberg, G.K. 2020. Hypolimnetic withdrawal as a lake restoration technique: determination of feasibility and continued benefits. *Hydrobiologia* 847: 4487–4501. <https://doi.org/10.1007/s10750-019-04094-z>
- Parsons, S. A. and Smith, J. A. 2008. Phosphorus removal and recovery from municipal wastewaters. *Elements*, 4: 109-112.
- Reitzel, K., Hansen, J., Andersen, F.Ö., Hansen, K. and Jensen, H. S. 2005. Lake restoration by dosing aluminum relative to mobile phosphorus in the sediment. *Environ. Sci. Technol.* 39:4134-4140.
- Rosado, R., del Campillo, M. C., Martínez, M. A., Barrón, V. and Torrent, J. 2002. Long-term effectiveness of vivianite in reducing iron chlorosis in olive trees. *Plant and Soil*, 241: 139-144.
- Rossi L., Reuna S., Fred T. & Heinonen M. (2018). RAVITA technology – New innovation for combined phosphorus and nitrogen recovery. *Water Science & Technology* 78 (12), 2511-2517. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.011>
- Salo, T., Palojärvi, A., Kukkonen, S., Vestberg, M., Kapuinen, P., Tontti, T., Ylivainio, K., Parikka, P., Nummila, M., Maunuksela, L., Lindström, K., Orasmaa, S. & Paulin, L. 2013. Orgaanisten lannoitevalmisteiden vaikutus kasvien kasvuun – testimenetelmät. MTT Raportti 101, 43 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-487-468-7>
- Saracanalao, R. J., Van Ryckel, H., Verbeeck, M., Everaest, M. and Smolders, E. 2024. Increasing phosphorus fertilizer value of recycled iron phosphates by prolonged flooding and organic matter addition. *Pedosphere* 43(3): 631-640.
- Schindler, D. W. 2012. The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes. *Proceedings of the Royal Society B* 279: 4322–4333.
- Silvonen S., Niemistö J., Csibrán A., Jilbert T., Torma P., Krámer T., Nurminen L. & 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. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118507>
- Silvonen, S., Nurminen, L., Horppila, J., Niemistö, J. & Jilbert, T. 2023. Closed-circuit hypolimnetic withdrawal and treatment: impact of effluent discharge on epilimnetic P and N concentrations. *Limnology* 25: 87-95. <https://doi.org/10.1007/s10201-023-00732-7>
- Silvonen, S., Lehtinen, O., Jilbert, T., Horppila, J., & Nurminen, L. 2024 Vesijärven Enonselän fosforin kierto, vuo ja poistopotentiali. Tutkimusraportti Päijät-Hämeen Vesijärvisäätiölle. 36 s.
- Smil, 2002. Phosphorus: Global Transfers.
- Søndergaard, M., Jensen, J. P., Jeppesen, E. 2003. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hydrobiologia* 506: 135–145.
- Taskinen, M. (2018). Vedenkäsittelyprosessin tehostaminen Nerkkoon vesilaitoksella – raudan ja mangaanin poisto sekä alkalointi. Lappeenranta University of Technology. Master's Thesis.