



Elinkeino-, liikenne- ja
ympäristökeskus



Tutkimusraportti:

Suometsien valumavesien käsittely ja ravinteiden kierrätys puuhakebioreaktorilla

SuVaKi

Kirsi Karhio, Heini Postila, Juha-Pekka Saarelainen, Matthew Hopkins



Hankkeen nimi:

Suometsien valumavesien käsittely ja ravinteiden kierrätys puuhakebioreaktorilla, SuVaKi

Hankkeen toteuttajat (pää toteuttaja ja osatoteuttajat):

- Pro Höytiäinen ry
- Oulun yliopisto, Vesi-, energia- ja ympäristötekniikan tutkimusyksikkö
- Watec Consulting Oy

Yhteyshenkilö ja yhteystiedot (puhelin ja posti):

Kirsi Karhio, 050 3282144, kirsi.karhio@gmail.com

Hankkeen toteutusaika:

30.11.2020-25.11.2022

Hankkeen toimenpiteiden kuvaus ja tulokset:

www.prohoytiainen.fi

Tutkimusraportin tekijät:

Kirsi Karhio, Heini Postila, Juha-Pekka Saarelainen ja Matthew Hopkins

Sisällysluettelo

ESIPUHE.....	6
ALKUSANAT	7
Tiivistelmä	5
1. Hankkeen lähtökohta ja tavoitteet	6
2. Projektin toteutus	8
2.1 Valuma-alueen vedenlaatututkimukset.....	8
2.2 Pilot-laitteiston tutkimukset	11
2.3 Sienitutkimukset	13
2.4 Koebioreaktorit	20
2.4.1 Koebioreaktorien suunnittelu ja rakentaminen.....	20
2.4.2 Koebioreaktorien seuranta	22
2.4.3 Koebioreaktoreista saadut alkuvaiheen tulokset	24
2.5 Menetelmän kustannustehokkuuden, vaikuttavuuden ja monistettavuuden arviointi.....	27
Lähdeluettelo:	28
Liitteet	29

ESIPUHE

Suomi on metsien, soiden, peltojen ja vesistöjen maa. Metsät peittävät lähes 80 % Suomen pinta-alasta ja metsistä suurin osa on metsätalouskäytössä. Maataloutta harjoitetaan alle 10 % pinta-alasta ja sisämaan vesistöt kattavat vähän yli 10 % pinta-alasta. Ihmistoiminta aiheuttaa ravinne-, kiintoaine- ja metallikuormitusta vesistöihin. Kuormituksella on monia haitallisia vaikutuksia vesiekosysteemeihin. Suomi on sitoutunut vesistöjen vähintään hyvän tilan tavoitteeseen. Metsätalous ja maatalous aiheuttavat hajakuormitusta. Maataloutta harjoitetaan merkittävästi pienemmällä pinta-alalla kuin metsätaloutta, mutta valtakunnallisesti se on suurin vesistökuormittaja. Viimeaikaisten tutkimusten mukaan metsätalouden aiheuttama kuormitus on kuitenkin arvioitua suurempaa. Metsätalous on suurin kuormittaja Itä- ja Pohjois-Suomessa, missä on paljon ojitettuja suometsiä ja vähän muuta ihmistoimintaa.

Metsätaloustoimenpiteet, kuten hakkuut, maanmuokkaus, lannoitus ja ojien kunnostus aiheuttavat kiintoaine- ja ravinnekuormitusta. Kuormitus on yleensä suurimmillaan 1–3 vuotta toimenpiteiden jälkeen ja palautuu ennen toimenpidettä olevalle tasolle noin kymmenessä vuodessa. Uusimmissa tutkimuksissa on kuitenkin havaittu, että vanhojen 1960–1980-luvuilla kaivettujen metsäojien kuormitusvaikutus näkyy edelleen, ja suurin osa metsätaloudesta aiheutuvasta kuormituksesta johtuu vanhoista ojituksista. Soiden suuri merkitys on ymmärrettävää koska keskimäärin 30 % Suomen maapinta-alasta on soita. Niistä metsäojitettuja on 53 % eli 4,6 Mha, mikä vastaa 18 % tämänhetkisestä metsätaloustoiminnan piirissä olevasta pinta-alasta. Osuus on selvästi tätä suurempi Itä- ja Pohjois-Suomessa. Uudisojitusta ei enää tehdä, mutta monilla vanhoilla ojitusalueilla on tarvetta kunnostaa oja, tehdä hakkuita ja uudistamistoimenpiteitä.

Metsätaloudessa on tehty paljon töitä viimeisten vuosikymmenten aikana kuormituksen vähentämiseksi. Käytössä on suunnittelutyökaluja ja erilaisia vesiensuojelumenetelmiä. Hyvällä suunnittelulla ja vesiensuojeluratkaisuilla on mahdollista vähentää merkittävässä määrin kiintoainekuormitusta. Haasteena on ravinnekuormituksen, erityisesti liukoisen typen, fosforin ja hiilen kuormituksen vähentäminen. Niiden pidättämiseen on vain vähän keinoja, ja ne eivät sovellu kaikkiin kohteisiin. On tärkeä löytää uusia menetelmiä liukoisten ravinteiden huuhtoutumisen vähentämiseen. Tähän haasteeseen on vastannut Suometsien valumavesien käsittely ja ravinteiden kierrätys puuhakebioreaktorilla (SuVaKi) -hanke.

SuVaKi -hankkeessa rakennettiin puuhakebioreaktori Pohjois-Karjalaan Kiskojoen valuma-alueelle Pro Höytiäinen ry:n, Oulun yliopiston ja Watec Consulting Oy:n yhteistyönä. Suunnittelussa ja rakentamisessa tuli vastaan monia haasteita, jotka ratkaistiin. Ratkaisut ovat arvokkaita toteutettaessa bioreaktoreita muilla alueilla. Hankkeen kesto oli hyvin lyhyt eikä kaikkia vaikutuksia saatu selville, mutta jo lyhyessä ajassa reaktori satoi valuma-alueelta huuhtoutuvaa rautaa ja nitraattia. Suurin osa liukoisessa muodossa huuhtoutuvasta tyydestä ja fosforista on orgaanista, ja vasta pidempiaikainen seuranta osoittaa reaktorin tehon niiden pidättäjänä. On syytä jatkaa reaktorin toiminnan seurantaa ja välittää tietoa hyvistä käytännöistä, joilla menetelmää voidaan toteuttaa muillakin alueilla.

Joensuussa 11.11.2022

Leena Finér
Professori emerita

ALKUSANAT

SuVaKi –hanke sai alkunsa vuonna 2020 monen asian kohdatessa. Keväällä 2020 valmistui Pro Höytiäisen toimeksiannosta opinnäyte Rauanjoen tilasta ja kunnostustarpeista (Jolkkonen & Heiskanen 2020) ja samanaikaisesti järviyhdistyksen vasta perustettu Wirtavesitiimi aloitteli uhanalaisen taimenen elinympäristökunnostuksia.

Pro Höytiäinen ja Watec Consulting Oy kohtasivat joella kunnostustalkoissa ja elokuussa järjestyi palaveri, johon kutsuttiin myös Tapio Oy. Palaverissa mietittiin Höytiäisen valuma-alueen tilannetta laajemmin, myös mahdollisuutta yhteistyöhön. Tavoitteeksi asetettiin luoda Höytiäisen vesistöalueelle isompi kunnostuskokonaisuus, jossa huomioidaan vedenlaatutekijöitä, luonnon monimuotoisuutta, soiden ennallistamista ja uhanalaisten lajien elpymistä. Fokukseen haluttiin erityisesti tuoreen inventointitiedon Rauanjoki, mahdollisena Kiskonjoki, ja niiden valuma-alueilla olevien suo- ja metsävesien käsittely, alkuperäisen taimenkannan elpymisen (Rauanjoki) ja istutetun taimenkannan selviytyminen ja sopeutuminen (Kiskonjoki). Todettiin tarve luonnonmukaisille ja huoltovapaille menetelmille metsävesien puhdistamiseksi humuksesta ja ravinteista, ylipäättään vesiensuojelun ratkaisuille. Syntyi ajatus soveltaa Oulun yliopiston ja Suomen ympäristökeskuksen Passiiviset hybridipuhdistusratkaisut arktisten valumavesien typen ja raskasmetallien puhdistamiseen (HybArkt)- hankkeessa selvitettyjä valumavesien passiivisia hybridipuhdistusratkaisuja (Postila et al. 2021) metsäisessä ympäristössä, taimenjoen valuma-alueella.

Maa- ja metsätalouden vesienhallinnan 1. avustushaku aukesi 15.10.2020 ja avustuksen tavoitteet ja kohdentaminen osuivat suunnitelmiin. Oulun yliopiston tutkimusyksikkö teki 12.11.2020 päätöksen olla mukana hankkeessa ja kuun lopussa kolmen osatoteuttajan yhteinen hankehakemus oli valmis. Vuoden viimeisenä päivänä Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarjassa julkaistu tutkimus, Metsistä ja soilta tuleva vesistökuormitus 2020 (Finér et al.) tuki hankkeen lähtökohtia ja tavoitteita – menetelmän kehittämistä ratkaisuksi suometsien valumiin.

Kiitämme hankkeen mahdollistamisesta ja hyvästä yhteistyöstä

- ❖ rahoittajia ja yhteistyökumppaneita - Maa- ja metsätalousministeriön ja Ympäristöministeriön yhteistä Maa- ja metsätalouden vesienhallinnan ohjelmaa ja sitä hallinnoinutta Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskusta sekä Maa- ja vesiteknikan tuki ry:tä, Metsä Groupia, OLVI-säätiötä, Pohjois-Karjalan tulevaisuusrahastoa ja UPM Metsää;
- ❖ sparrausrinkiä - Leena Finér (Luke), Helena Haakana (PoKELY), Tiina Käki (PoKELY), Tiina Laine (MetsäGroup), Minna Maasilta (MVTT), Jukka Nykänen (PKL), Teppo Oijala (MetsäGroup), Silja Pitkänen-Arte (Metsä Group), Anna-Kaisa Ronkanen (SYKE), Anne-Mari Rytönen (PoPELY), Janne Uutera (UPM Metsä), Henri Vaarala (PoPELY) - jonka asiantuntemus ja tuki oli käytössämme hankkeen aikana;
- ❖ välirahoittajana toiminutta Polvijärven kuntaa;
- ❖ maanomistajia, Aki Nevalainen ja Kiskonjoen yhteismetsä sekä heitä, joilla oli valmius luovuttaa metsäkiinteistönsä tutkimuksen käyttöön;
- ❖ vahvan talkoopanoksensa antaneita järviyhdistyksen jäseniä ja virtavesiaktiiveja sekä Karelia-ammattikorkeakoulun opiskelijoita;
- ❖ maasto- ja laboratoriotöissä avustaneita henkilöitä Oulun yliopistossa;
- ❖ Neova-Group sienipilottitestauksiin saadusta hakkeesta.

Raportin tekijät

Tiivistelmä

Viimeaikaiset tutkimukset ovat osoittaneet, että suometsien ravinne-, humus- ja kiintoainepäästöt vesistöihin ovat arvioitua suuremmat ja myös jatkuvat pidempään. Hankkeen päätavoitteena oli tutkia puuhakebioreaktorirakenteiden soveltuvuutta suometsävesien käsittelyyn yhtenä ratkaisuna vesiekosysteemien kuormituksen vähentämiseksi. Puuhakebioreaktorin tiedetään jo soveltuvan hyvin poistamaan nitraattityppeä denitrifikaatiolla. Koska kohteen vesissä typpi esiintyi arvioitua enemmän orgaanisessa muodossa, tehtiin tarvittavia testauksia sen poistamisesta myös pilot-laitteistolla sekä sienitestauksin laboratoriossa oletuksena, että sienet voisivat hajottaa tyyppiä orgaanisesta muodosta epäorgaaniseen muotoon. Hankkeessa myös kartoitettiin veden tilaa eri puolilla Höytiäisen valuma-aluetta mm. pH- ja lämpötilamittauksin sekä vesinäyttein. Syksyllä 2021 toteutetut alustavan sienitestauksen tulokset huoneenlämpötilassa vaikuttivat lupaavilta, mutta pidempiaikaisten testausten perusteella luonnonvesien lämpötiloissa havaittiin selkeää tyyppiä huuhtoumaa. Näiden tulosten pohjalta bioreaktorirakenteeseen ei vielä lisätty sieniymppiä.

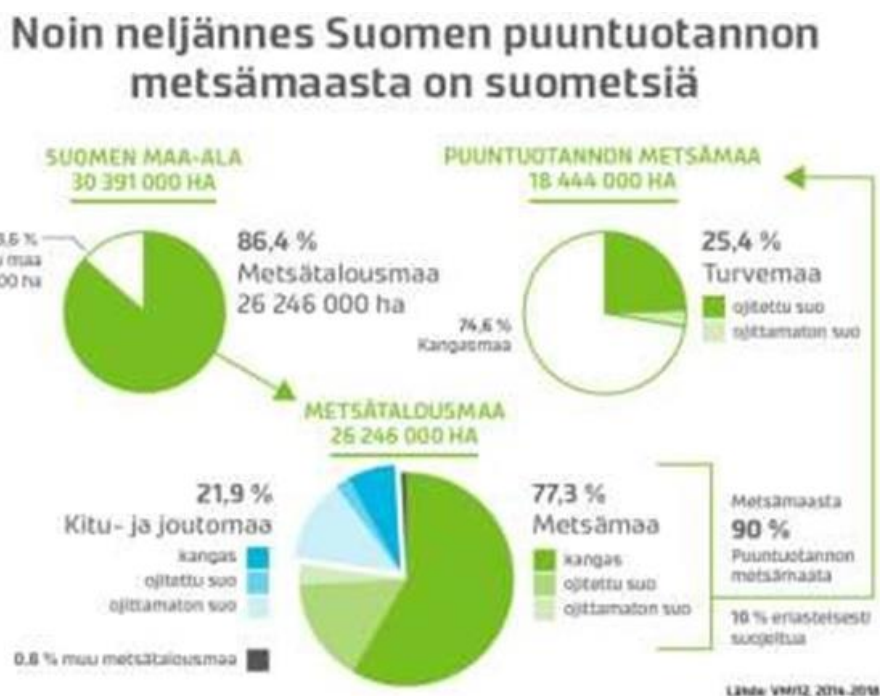
Varsinaisille koebioreaktoreille soveltuvan sijoituspaikan löytämisessä oli haasteita ja rakentamaan päästiin vasta hankkeen lopulla, syyskuussa 2022. Tutkimuskenttä toteutettiin Pohjois-Karjalaan, Polvijärven Lahtolahden Pyöräkankaalle, Suursuon valuma-alueelle, josta on yhteys Kiskonjoen kautta Höytiäiseen. Se käsittää kaksi koebioreaktoria, toisen materiaalina on koivun runkopuuhake, toisessa on lisäksi biohiiltä. Bioreaktorit käynnistettiin syyskuun lopussa 2022 ja sen jälkeen on virtaamia mittaamalla ja kenttää säätämällä etsitty optimiviipymää. Bioreaktoreiden seuranta-aika jäi hankkeessa lyhyeksi, mutta jo alkuvaiheen seurantatulosten perusteella bioreaktori poisti vedestä nitraattityppeä ja rautaa. Myös alkuhuuhtoumia bioreaktorin materiaaleista todettiin tapahtuvan, ja siihenkin on seurannan ohella syytä paneutua jatkossa.

1. Hankkeen lähtökohta ja tavoitteet

Hankkeen lähtökohtana oli vuoden 2020 lopussa julkaistut tutkimustulokset (Finér et al. 2020), joiden mukaan metsäojitusten ravinne- ja humuskuormituksen on todettu jatkuvan huomattavasti pidempään kuin aiemmin on oletettu. Tutkimusten mukaan suometsien ravinne-, humus- ja kiintoainepäästöt vesistöihin ovat yhtä suuret kuin maatalouden päästöt. Suomen kokonaiskuormituksesta on uuden arvion mukaan metsistä ja soilta tulevan typen osuus 16 % (7 300 tonnia/v), fosforin 25 % (440 tonnia/v) ja orgaanisen hiilen osuus 78 000 tonnia/v. Kun Suomen puuntuotantoon käytettävästä metsämaasta noin neljännes on suometsiä, on näiden turvepohjaisten maiden kuormitus vesistöillemme huolestuttavan korkealla tasolla (kuva 1).

”Tutkijoiden mukaan typen ja orgaanisen hiilen kuormituksen hallintaan tulisi kehittää uusia menetelmiä erityisesti turvemaille”

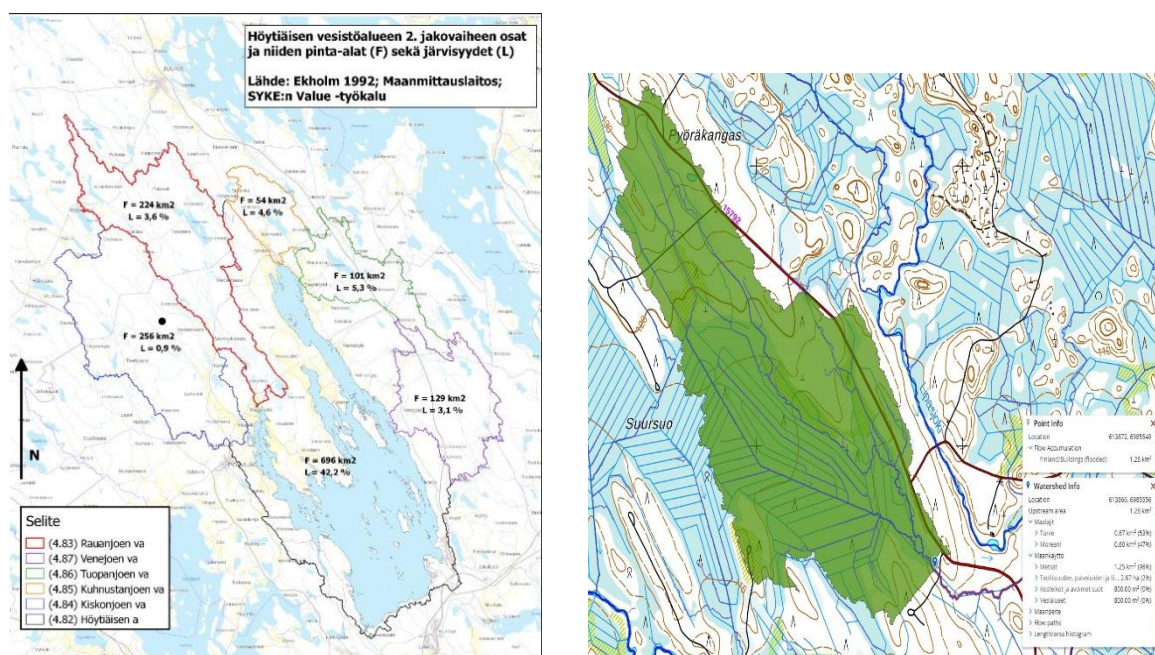
- Metsistä ja soilta tuleva vesistökuormitus 2020/ Valtioneuvoston julkaisu -



Kuva 1. Suometsien pinta-ala ja merkitys Suomen puuntuotannossa.

Suometsien valumavesien käsittely ja ravinteiden kierrätys puuhakebioreaktorilla-, jatkossa SuVaKi -hankkeen tavoite oli kehittää ja testata puuhakepohjaista bioreaktoria suometsien valumavesien typen poistoon ja myöhemmin, mahdollisissa jatkotutkimuksissa, myös arvioida sen mahdollisuuksia

ravinteiden ja humuksen kierrätykseen. Denitrifioivia puuhakebioreaktoreita on käytetty ja tutkittu aiemmin eri yhteyksissä. Suomessakin testauksia on tehty menestyksellisesti mm. kalanviljelylaitosten ja kaivosvesien yhteydessä sekä luotu mitoitus- ja suunnittelutyökalua bioreaktoreiden suunnitteluun. Menetelmää ei sen sijaan ole kohdennettu eikä testattu yhteen Suomen suurimmista vesistökuormituksen lähteistä, turvepohjaisten talousmetsien valumavesikuormituksen pienentämiseen. Myöskään puuhakepohjaisen vesiensuojelurakenteen mahdollisuuksia poistaa ja kierrättää ravinteita syntypaikallaan ei ole selvitetty riittävän monipuolisesti.



Kuva 2a. Höytiäisen valuma-alue ja kuva 2b koebioreaktorin sijainti ja valuma-alue Polvijärvellä, Pohjois-Karjalassa.

SuVaKi -hankkeessa oli tarkoitus soveltaa aiempaa puuhakebioreaktoreista kertynyttä tietoa suometsien valumavesien käsittelyyn ja kehittää sen pohjalta ratkaisukonsepti mitoituksineen, jatkossa myös metsätalouden ravinteiden kierrätykseen syntypaikallaan. Hankkeessa tutkittiin Vuoksen vesistöalueella Höytiäiseen laskevan Rauanjoen valuma-alueen vedenlaatua ja osavaluma-alueiden kuormituksia. Lisäksi tutkittiin maantieteellisesti viereisen ja kooltaan vastaavan Kiskojoen muutaman osavaluma-alueen kuormituksia. Näiden tietojen perusteella valittiin bioreaktoreiden koerakenteelle sopivin alue, joka löytyi Kiskojoen valuma-alueelta.

Denitrifioivissa bioreaktoreissa puuhake, tai muu materiaali, kuten biohiili, toimii hiilen lähteenä denitrifioiville heterotrofisille mikrobeille, jotka hapettavat nitraattityppeä typpikaasuksi. Metsätalousvesissä keskimäärin nitraattityppinä on noin 20 % kokonaistypestä (Vuollekoski & Joensuu 2006) eli erityisesti tätä osuutta voidaan poistaa puuhakebioreaktoreissa. Nitraattityypen osuutta, jos tyyppi on ammoniumtyppimuodossa, voidaan myös parantaa erilaisilla teknisillä ratkaisuilla, joista on saatu laboratoriomittakaavan testaustuloksia osana Oulun yliopistossa tehtyjä jatko-opintotutkimuksia. Tyyppiä lisäksi metsätalouden vesissä on runsaasti humusta, jonka poistamiseen puuhakebioreaktoria testataan ja kiintoaineen mukana reaktoriin voi myös pidettyä ravinteita. Koska valuma-alueelta tehtyjen vedenlaatututkimusten perusteella huomattiin, että näissä turvemetsätalousvesissä oli kirjallisuusarviota selvästi vähemmän tyyppiä epäorgaanisessa muodossa

ja käytännössä miltei kaikki orgaanisessa muodossa, hankkeen yhdeksi tehtäväksi otettiin selvittää, miten orgaanista typpeä saataisiin muutettua epäorgaaniseen muotoon.

Tavoitteena oli seurata puuhakepohjaisten koebioreaktoreiden (2 kpl) toimintaa ja puhdistustehokkuutta näytteenotoilla. Saatujen tulosten perusteella oli tarkoitus laskea menetelmän kustannustehokkuutta ja vaikuttavuutta Rauanjoen valuma-alueella, mutta myös ratkaisuna suometsien ravinnekuormituksen torjuntaan osana talousmetsien hakkuukiertoa. Tavoitteena oli myös kehittää menetelmästä metsätalouden hakkuukiertoon sovitettu passiivinen ja huoltovapaa vesienkäsittelymenetelmä ja tuottaa konseptiratkaisun mukaiset tyyppikuvat ja mitoituslaskurit osaksi tulevia metsätalouden vesiensuojelukäytäntöjä.

2. Projektin toteutus

Hanke varsinaiset tutkimukset toteutettiin viitenä (5) työpakettina:

Työpaketti 1. Suometsien vedenlaatu ja haasteet vesienkäsittelylle

Työpaketti 2. Valuma-alueen vedenlaatututkimukset

Työpaketti 3. Puuhakebioreaktorirakenteiden suunnittelu ja mitoitus

Työpaketti 4. Koebioreaktoreiden rakentaminen ja seuranta sekä tulosten tarkastelu

Työpaketti 5. Menetelmän kustannustehokkuuden, vaikuttavuuden ja monistettavuuden arviointi

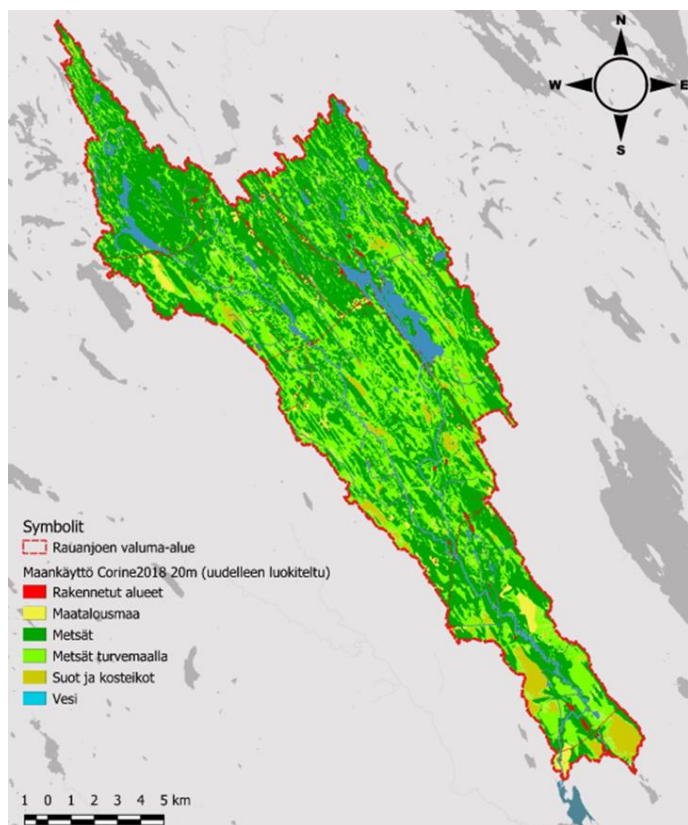
Näistä työpaketin 1 ja 2 tulokset on raportoitu kappaleessa 2.1. Työpaketti 3 laajeni alkuperäisestä, koska työpaketin 2 tutkimuksissa huomattiin projektin alkuvaiheessa, että tyypestä oli arvioitua enemmän, lähes kaikki, orgaanisessa muodossa. Tästä syystä tähän työpakettiin toteutettiin myös pilot-laitteisto kesällä 2021 sekä laboratoriossa orgaanisen typenpoistoon liittyviä tutkimuksia syksystä 2021 syksyyn 2022 asti. Selvyyden vuoksi työpakettien 3 ja 4 tiedot esitellään tässä raportissa kolmen pääotsikon alla: 2.2 Pilot-laitteiston tutkimukset, 2.3 Sienitutkimukset ja 2.4 Koebioreaktorit. Työpaketin 5 alkuperäisen suunnitelman toteuttaminen oli mahdotonta, koska lyhentyneen hankeajan puitteissa ehdittiin vasta aloittamaan seuranta. Tätä aihetta on kuitenkin hieman käyty läpi kappaleessa 2.5.

2.1 Valuma-alueen vedenlaatututkimukset

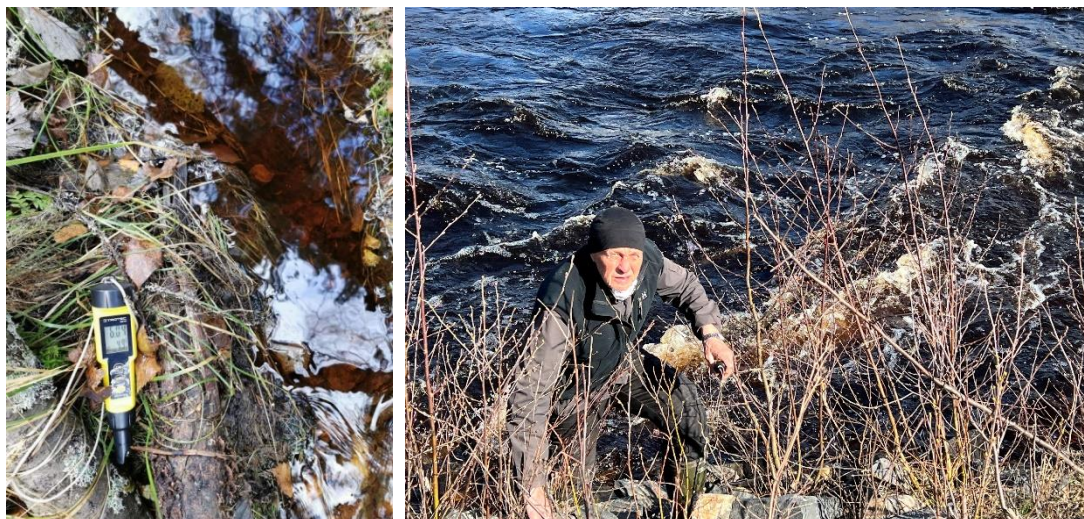
Hankkeessa selvitettiin Rauanjoen ravinnekuormituksia Höytiäiseen ja kartoitettiin suuremman kuormituksen osavaluma-alueita. Koko Rauanjoen ravinnekuormitukset selvitettiin VEMALA-työkalulla. Kokonaiskuormitusten ja valuma-alueiden maankäytön selvittäminen (kuva 5) auttoi kohdentamaan maastotutkimuksia suurempien kuormitusten läheisyyteen. Vedenlaadun ja kuormituksen esittäminen kuormituslukuina on tärkeää myös viestinnällisesti, sillä silloin eri osapuolet näkevät konkreettisesti, mistä kuormitusta tulee ja mille alueille on tärkeää kohdentaa toimenpiteitä. Vedenlaadunäytteillä vahvistettiin hotspot -alueiden kuormitus tulevia toimenpiteitä varten.

Kartta- ja paikkatietoaineiston perusteella osa-valuma-alueiden vedenlaadun tarkastuksia tehtiin talkootyönä Pro Höytiäisen Wirtavesitiimin toimesta. Osavaluma-alueiden valuma-alue- ja maankäyttötiedot otettiin Scalgo-ohjelmistosta. Kenttämittauksena käytettiin silmämääräistä veden sameutta sekä pH-mittaria (kuva 4). Tarkastuskäyntien perusteella merkittävimmistä kuormittajista ja sivupuroista otettiin vesinäytteet sivupurojen vedenlaadun todentamiseksi (taulukko 1).

Kenttähavaintojen perusteella tehtiin maastokatselmuksia ja etsittiin sopivia rakennuspaikkoja bioreaktorille.



Kuva 3. Rauanjoen valuma-alue ja maankäyttö (Jolkkonen & Heiskanen, 2020)



Kuvat 4a ja b. Vedenlaadun kenttätutkimuksia Rauanjoelta ja sen sivupuroista tehtiin mm. pH-mittarilla (Kuva 4a Seppo Hirvonen). Vedenlaatumittauksia korkean veden aikaan keväällä 2022, kuvassa Wirtavesitiimin Seppo Hirvonen (Kuva 4b Kirsi Karhio)

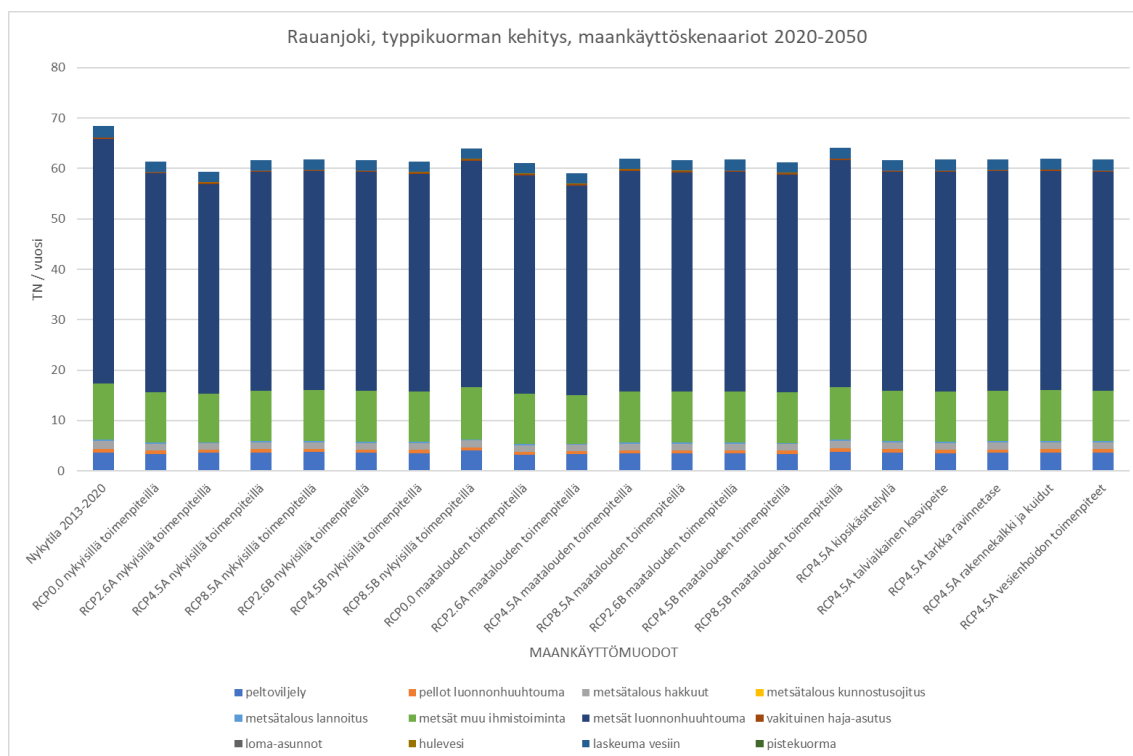
Taulukko 1. Valuma-alue tutkimusten vesinäytteiden tulokset ja niistä lasketut keskiarvot

Parametri	Yksikkö	Hartuskosken suo-oja	Suuri Vehkasuon puro	Suuri Vehkas..	Suuri Vehka..	Saarilammen puro	Saarilammen puro	Saarilammen puro, latva	Valkealammen puro	Heinälammien puro	Keskiarvot kohteista
Näytteenpäämäärä		2021-06-13	2021-06-13	2021-07-30	2021-09-21	2021-08-16	2022-07-29	17.8.2022	2021-08-16	2021-08-16	
kokonaistyyppi, N	µg/L	350	1500	1100	660	450	490	500	1500	670	802
nitraattityppi, NO ₃ -N	µg/L	<4	5	7	7	4	5	3	30	<4	9
nitriittityppi, NO ₂ -N	µg/L	<2	3	5	5	3	3	5	<2	3	4
kokonaisfosfori	µg/L	15	42	27	10	12	20	19	120	16	31
pH-arvo		6,52	5,33			6,2	6,4	5,4	4,7	6,4	6
sameus	ZFn (NTU)	6,34	11			12	2,12	2,12			7
ammoniumtyppi, NH ₄ -N	µg/L	<4	44	74	54	24	40	3	13	<4	36
fosfaattifosfori, PO ₄ -P	µg/L	2	3	4	<2	4	4	2	9	4	4
kiintoaine	mg/L	11,3	40,4								26
COD-Mn	mg/L	9,35	61,3								35
permanganaattiluku (KMnO ₄ -luku)	mg/L	36,9	242								139
alkaliniteetti pH 4.5	mmol/L	<0.150	<0.150								
Fe	µg/L	59,8	4580				2260	2260			2290
Kiintoaine	mg/L					5,8	5,5	12	59	4,5	17
Kok. orgaaninen hiili, TOC	mg/l							21			21
Liukoinen org. hiili, DOC	mg/l							17			17

Vesinäytteiden perusteella Rauanjoella tyyppipitoisuudet olivat paikoin korkealla, mutta tyyppipääsääntöisesti orgaanisessa muodossa. Nitriitti, nitraatti ja ammoniumpitoisuudet, joihin bioreaktorin tiedetään olevan tehokas menetelmä, olivat varsin pieniä. Rauanjoen rautapitoisuudet ovat nimensä mukaisesti huomattavan korkeat.

Rauanjoen kokonaisravinnekuormitukset ja niiden tulevaisuuden muutokset eri ilmastonmuutoksen skenaarioissa selvitettiin VEMALA-mallilla. Hankkeen alkuperäisenä tavoitteena oli päästä arvioimaan bioreaktorilla saavutettavia vaikutuksia kokonaiskuormitukseen, jos menetelmä saataisiin laaja-alaiseen käyttöön. Bioreaktorin pitkäaikaisten puhdistustulosten puuttuessa valuma-alueen vaikuttavuusarvioita ei päästy tekemään.

Valuma-alueen vedenlaatututkimuksista laadittiin yhdistyksen jatkohankkeita ja virtavesikunnostuksia varten valuma-alueen tutkimusraportti. VEMALA-malli tulosten perusteella Rauanjoen kokonaistyyppikuormitus laskisi RCP 4,5 maankäyttöskenaariolla ilman vesiensuojelutoimenpiteitä nykyisestä 68 tonnista 62 tonniin vuoteen 2050 mennessä, kts kuva 5.

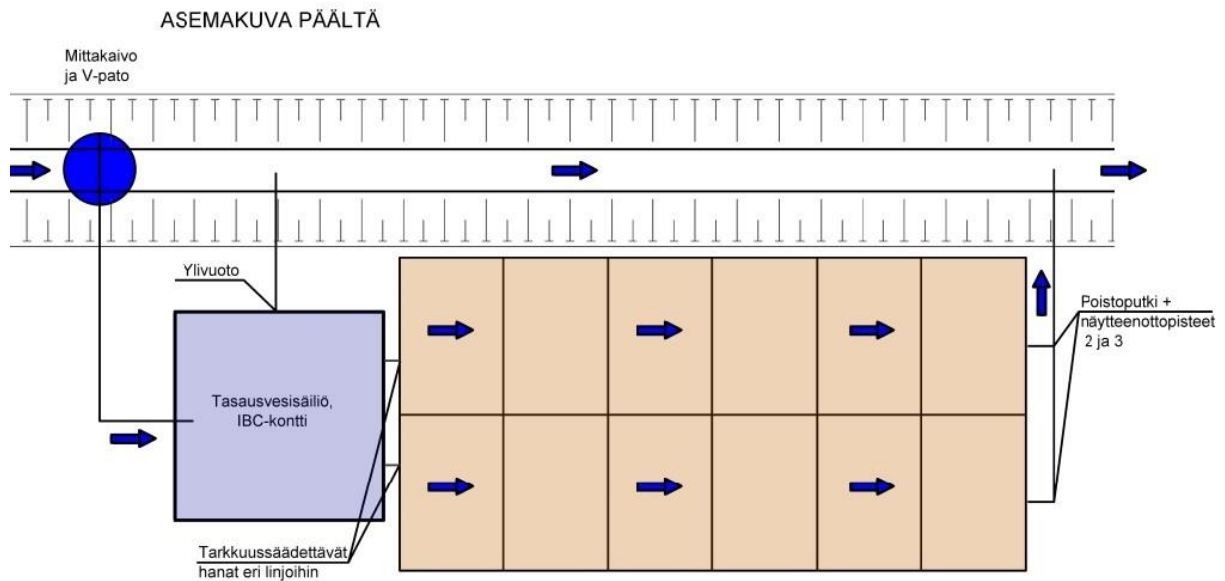


Kuva 5. Rauanjoen vuosittaisen typpikuormituksen kehitys 2020–2050 eri maankäyttöskenaarioiden mukaan. VEMALA-laskentaohjelma

2.2 Pilot-laitteiston tutkimukset

Valuma-alue tarkasteluiden ja vedenlaatuhavaintojen perusteella lähdettiin etsimään sopivaa paikkaa pilot-tutkimuksille. Pilot-tutkimusten tarkoituksena oli tuottaa lisätietoa varsinaisen tutkimusrakenteen suunnitteluun, mitoittamiseen ja rakenteisiin. Vesinäytteiden perusteella havaittiin, että Rauanjoen valuma-alueella oli nitraattimuodossa olevan typen osuus kirjallisuuden perusteella arvioitua pienempi, joten puhdistustavoitteiden saavuttamiseksi haluttiin testata denitrifikaation perustuvan bioreaktoriin integroitavia muita typenpoistomenetelmiä. Pilot-laitteistolla tavoiteltiin lähtövedessä olevan nitraatti, nitriitti ja ammonium-muodossa olevan typen poistamista. Lisäksi haluttiin testata mahdollisia humuspitoisten ja virtaamaltaan voimakkaasti vaihtelevien vesien käsittelyn pullonkauloja ja mahdollisia häiriötekijöitä.

Pilot-laitteistolle löydettiin sopiva jatkuvan virtaaman ja suuren ravinnekuormituksen kohde Rauanjoen yläjuoksulta. Syrjäisen sijainnin takia järjestelmästä jouduttiin tekemään off-grid- eli verkkovirran ulkopuolella aurinkopaneeleilla toimiva ratkaisu. Pilot-laitteistosta tehtiin 2-linjainen, maanpäällinen ja väliaikainen ratkaisu (kuva 6). Pilot-laitteiston linjastoissa oli lehtipuuhaketta ja lisäksi 20 % lehtipuubihiiltä. Tavoitteena oli testata eri viipymien vaikutusta puhdistustuloksiin. Pilot-laitteisto rakennettiin heinäkuussa 2021 ja sen toimintaa tutkittiin ja säädettiin lokakuuhun 2021 asti.



Kuva 6. Bioreaktorin pilot-laitteiston suunnitelma.

Käytännössä pilot-ratkaisu (kuva 7) koostui 200 litran ylävesisäiliöstä ja kuudesta peräkkäisestä 90 litran muovilaatikosta, joiden välillä oli d50mm putkiyhde vuorotellen ylhäällä ja alhaalla. Yhden linjaston tilavuus oli siten 540 litraa. Ylävesisäiliöön tulovesi otettiin ajastimella kytketyllä uppopumpulla, jota käytettiin aurinkopaneelilla ja akulla.



Kuva 7. Bioreaktorin pilot-laitteiston tutkimuskäytössä (Kuva: Juha-Pekka Saarelainen)

Pilot-tutkimuksien tuloksien edustavuutta häiritsivät virtauksensäätörakenteiden tukkeutumishäiriöt ja siten epäjatkuvat virtaamat. Lukuista säädöistä huolimatta, jatkuva virtaama oli laitteistoilla säilynyt vain kaksi kertaa, jolloin otettiin taulukon 2 mukaiset vesinäytteet. Tuloksista näkyy selkeimmin

puuhakemateriaaliin liittyvä alkuhuuhoutuma. Vesinäytteiden ottamisen aikaan virtaama ei ollut tavoitteellisen kahden vuorokauden (2 vrk) viipymän mukainen. Virtaamaongelmien takia pilot-laitteistolla ei saatu tutkittua viipymän vaikutusta puhdistustuloksiin.

Pilot-laitteisto kuitenkin tarjosi arvokasta kokemusta passiivisten ja toimintavarmojen ratkaisujen kehittämiseksi. Tärkein havainto oli, että humuspitoisten luonnonvesien virtauksensäätorakenteet ovat todella herkkiä tukkeutumaan. Lisäksi humus ja roskat aiheuttavat virtauksensäätorakenteissa virtaamamuutoksia, joiden hallintaan panostettiin täydenmittakaavan koereaktoreiden suunnittelussa.

Taulukko 2. Pilot-laitteistosta otetut vesinäytteiden tulokset.

Parametri	Yksikkö	YLÄVESISÄILIÖ	PILOT-LAITTEISTO	YLÄVESISÄILIÖ	PILOT-LAITTEISTO
Päivämäärä		2021-08-16	2021-08-16	2021-09-21	2021-09-21
kiintoaine	mg/L	11	15		
pH		5,1	5,6	4,7	4,9
kokonaistyyppi, N	µg/L	700	1300	660	2100
nitraattityppi, NO ₃ -N	µg/L	<4	<4		
nitriittityppi, NO ₂ -N	µg/L	4	<2		
kokonaisfosfori	µg/L	11	490	10	2900
ammoniumtyppi, NH ₄ -N	µg/L	12	<4	54	<4
fosfaattifosfori, PO ₄ -P	µg/L	3	310	<2	2500

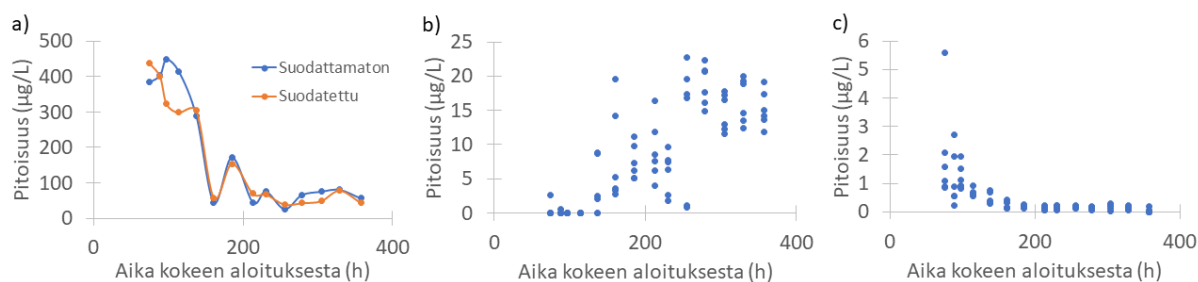
2.3 Sienitutkimukset

Koska kesän 2021 valuma-alueelta tehtyjen vedenlaatutarkastelujen perusteella typpi oli hyvin pitkälti, ja ennakoitua enemmän, orgaanisessa muodossa, oli tarpeen selvittää, miten orgaanista tyyppiä voitaisiin muuttaa epäorgaaniseen muotoon ja/tai poistaa. Orgaanisen typen hajotusta ammoniumtyypeksi voivat tehdä hajottajat, kuten bakteerit ja sienet. Tästä syystä laboratorioolosuhteissa testattiin sahanpuru-sienimateriaalin toimivuutta veden käsittelyssä. Laboratoriokokeet tehtiin kolmessa vaiheessa. Tätä asiaa ei ollut alkuperäisessä hankesuunnitelmassa, mutta koska siitä ei löytynyt kirjallisuudesta tietoa, ja orgaanisen typen kuormitus on niin voimakkaasti turvemetsätalouteen (ja myös turvemaatalouteen liittyvä aihe), niin sitä nähtiin tarpeelliseksi tutkia.

Koska hankesuunnitelmassa ei ollut näihin analyysihin erikseen varattuna rahaa, niin pääasiassa nitraattityppi ja ammoniumtyypianalyysit päätettiin tehdä itse laboratoriossa kittimenetelmällä, jolloin useampia analyysijä voidaan tehdä kohtuuhintaan. Kaikki nämä laboratoriomääritykset tehtiin YSI 9500 -fotometrillä. Ammoniakki tehtiin käyttämällä kittiä (YPM166), jolla voidaan analysoida 0–1,0 mg/l (N)- pitoisuuksia, mutta laimentamalla jopa 10 mg/l (N) pitoisuuksia. Nitraatti määritettiin käyttämällä kittiä (YPM163), jolla voidaan analysoida 0–1,0 mg/l (N)-pitoisuuksia, mutta laimentamalla määrittämisväliä voidaan vielä kasvattaa. Nitriitti määritettiin käyttämällä kittiä (TPM109), jolla voidaan analysoida 0–0,5 mg/l (N) -pitoisuuksia, mutta laimentamalla määrittämisväliä voidaan sitäkin vielä kasvattaa. Lisäksi muutamasta näytteestä teetettiin kyseiset analyysit myös Eurofinsin laboratoriossa. Kokonaistypen osalta ei loppujen lopuksi löydetty Euroopasta kittimenetelmää, jolla voitaisiin analysoida niin pieniä kokonaistypen pitoisuuksia kuin mitä turvevaltaiselta metsätalousalueelta oli odotettavissa. Tästä syystä osa näytteistä lähetettiin Oulun yliopiston Oulangan tutkimuskeskuksen tyypianalysointilaitteille (Autoanalyzer 500, määrittämisrajat 50,4 µg/l - 1512,0 µg/l) analysoitavaksi keuhällä 2022. Lisäksi osasta näytteistä tehtiin kokonaistypianalyysit Eurofinsin laboratoriossa.

1. Vaihe

Syksyllä 2021 tehtiin testausten ensimmäinen vaihe, jossa huoneenlämpötilassa johdettiin 15 vrk ajan Rauanjoen valuma-alueelta kerättyä vettä lakkakääpä (*Ganoderma Lucidum*) -sahanpuruyksikköön. Yksikön koko oli 10 l (17x12x50cm) ja vesi virtasi siinä pumppauksen avulla horisontaalisesti. Veden viipymä oli asetettu noin 3 vrk ja testit tehtiin huoneenlämpötilassa (21°C). Koska tämän lyhyen testijakson tulokset vaikuttivat lupaavilta (kuva 8), päätettiin joulukuussa 2021 jatkaa vaiheen 2 pidempikestoisilla testauksilla.



Kuva 8. Lakkakääpä (*Ganoderma Lucidum*) -sahanpuruyksikön lähtevän veden laadun vaihtelu a) orgaaninen tyyppi, b) ammoniumtyyppi ja c) nitraattityyppi.

2. Vaihe

Joulukuussa 2021 käynnistettiin testauksen seuraava vaihe. Siinä aseteettiin sahanpurua, johon oli ympätty lakkakääpää (*Ganoderma Lucidum*) tai osterivinokasta (*Pleurotus Ostreatus*) rinnakkaisiin testauksiin. Kuudessa pilottilaatikossa oli lakkakääpä-sahanpurua, ja näistä kolme peitettiin muovilla ja kolme jätettiin avonaiseksi (kuva 8). Kolmessa pilottilaatikossa oli osterivinokas -sahanpurua, ja ne olivat kaikki avonaisia. Suorakaiteen muotoisten HDPE:stä valmistettujen laatikoiden mitat olivat 58,5 cm (pituus) x 12,5 cm (leveys) x 4,7 cm (syvyys). Jokaisen yksikön sisään, 7 cm loppupäästä, asetettiin 0,5 cm paksu muovirakenne, johon kiinnitettiin metalliverkko (huokoskoko = 2 mm). Tämän tavoitteena oli, että loppupäähän saatiin pelkästään vesitila, johon esimerkiksi sähköjohtavuusanturit voidaan asettaa merkkiainekokeen ajaksi. Tämän verkon läpi vesi pääsee virtaamaan, mutta sahanpuru-sienimateriaali ei pääse liikkumaan. Lisäksi loppusyksystä 2022 käynnistettiin testi, jossa on vain puumateriaalia, ja läpi johdetaan vettä, jotta voidaan nähdä, mitä materiaalista liukenee. Tämän testin tulokset eivät kuitenkaan ehtineet vielä tähän loppuraporttiin, mutta ne on suunnitelmassa julkaista tutkimuksista tehtävässä kansainvälisessä tieteellisessä artikkelissa.



Kuva 9. Vaiheen 2 lakkakääpä+sahanpuruyksiköt testauksessa (Kuva: Matthew Hopkins)

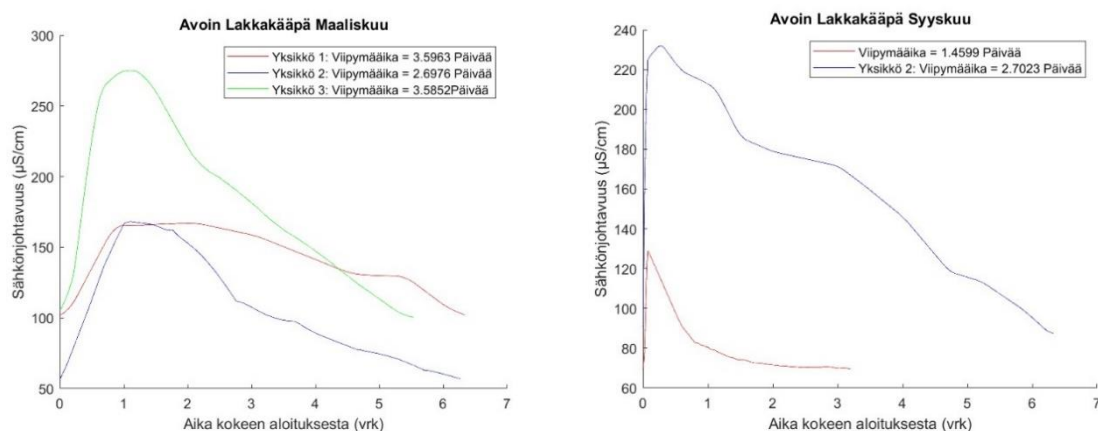
Laboratoriokokeissa käytettiin Oulun läheltä (Saarisenoja (65.082692, 25.737643)) turvemetsätalousalueelta kerättyä vettä. Tämän pisteen vedenlaatu kokonaistypen suhteen oli samankaltainen, kuin Rauanjoen valuma-alueella, toki tyypestä epäorgaanisessa muodossa oli jonkin verran suurempi osuus ja fosforia ja rautaa oli myös enemmän (taulukko 3). Vettä lisättiin sienihakemateriaalin pinnalle alkupäähän peristalttisen pumpun avulla niin, että ensimmäisen viikon ajan testin alussa pumppausmäärä oli noin 2,0 l/vrk, jolloin viipymä oli laskennallisesti noin yksi vrk. Tämän jälkeen pumppausnopeutta laskettiin (noin 1,0 l/vrk), jotta viipymäksi saadaan noin kaksi vrk. Poistoputken avulla vedenpinta pidettiin yksikössä halutulla tasolla. Laboratoriokokeessa haluttiin tavoitella mahdollisimman luonnontilaisen kaltaisia olosuhteita, joten kokeet aloitettiin 5°C asteen lämpötilassa, ja 135 vrk kuluttua siirryttiin 12°C lämpötilaan. Kokeen loppuvaiheessa (lakkakäävällä noin 270 vrk aloituksesta ja osterivinokkaalla noin 280 vrk), siirryttiin vielä kolmen vrk:n viipymään.

Taulukko 3. Suursuolta tulevan vedenlaadun ja Saarisenojan vedenlaadun tulokset.

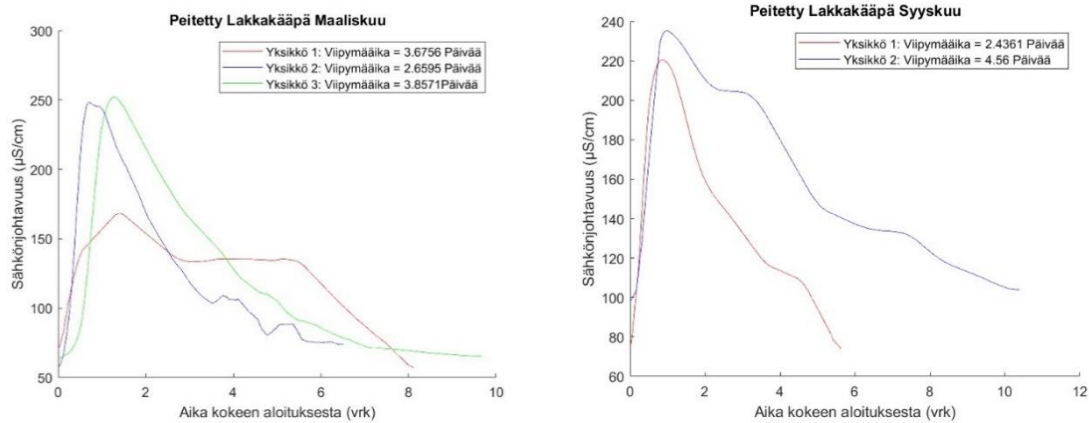
Parametri	yksikkö	Vedenlaatu-mittaukset Suvaki Suursuo		Saarisenojan vedenlaatuspisteen vedenlaadun vaihtelu 2017-2018				
		Keskiarvo	n	Keskiarvo	Keskihajonta	max.	min.	n
kokonaistyyppi, N	µg/L	955,0	4	858,3	219,2	1300	600	12
nitraattityppi, NO ₃ -N	µg/L	147,0	4	187,5	72,9	320	100	12
ammoniumtyppi, NH ₄ -N	µg/L	53,9	4	131,4	76,2	250	27	12
kokonaisfosfori	µg/L	21,0	4	56,9	9,4	79	46	12
fosfaattifosfori, PO ₄ -P	µg/L	3,3	4	43,0	10,0	61	25	12
pH-arvo		6,1	1	5,5	0,5	7,5	5,99	10
kiintoaine	mg/L	4,5	4	15,3	4,8	28	12	10
TOC	mg/L	36,5	4	14,3	3,1	20,3	9,8	12
DOC	mg/L	34,3	4	13,0	3,2	18,4	7,4	12
Fe Liuko	mg/L		na	1,5	0,4	2,28	0,86	12
Fe Total	mg/L	2,4	4	5,3	1,1	7,19	3,36	12

Pilottiyksiköihin toteutettiin merkkiainekokeet veden viipymän selvittämiseksi natriumkloridilla (NaCl) maaliskuussa ja syyskuussa 2022. Merkkiainekokeita varten liuotettiin 0,309 g/ 200 ml:aan deionisoitua vettä, ja tämä pumpattiin aina yhteen yksikköön. Pumppaus tehtiin vaihtamalla vesilähde tulovedestä suolaliuokseen noin neljän tunnin ajaksi (vaihteli pumpun nopeuksien erojen mukaan). Sähkönjohtavuuden ja suolapitoisuuden välille oli määritetty kalibrointikäyrä. Sähkönjohtavuusloggeri (HOBO) asetettiin mittaamaan pilottiyksiköistä lähtevän veden laatua. Keskimääräinen viipymä laskettiin (Postila et al. 2015) mukaisesti.

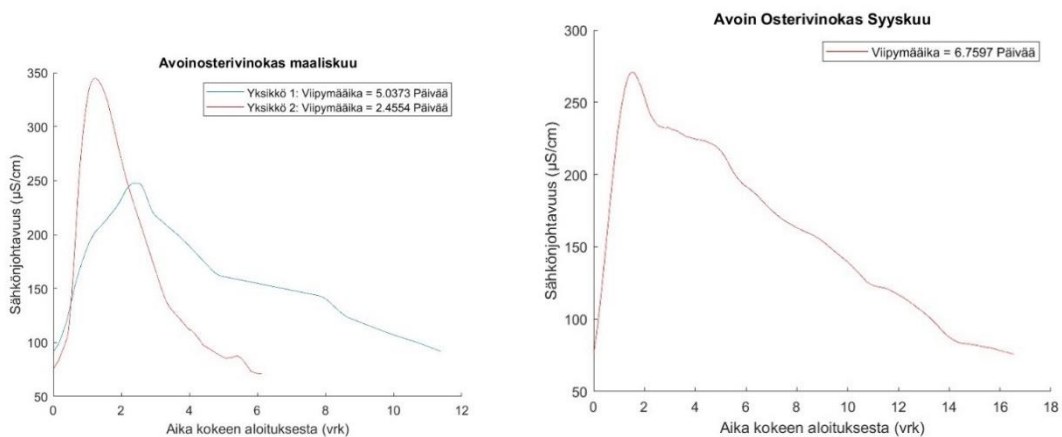
Toteutettujen NaCl-merkkiainekoemäärittysten perusteella maaliskuussa, jolloin vesi oli virrannut noin kolme kuukautta (3 kk) pilottirakenteen läpi, veden keskimääräiset viipymäajat vaihtelivat 2,5–3,9 vrk välillä (kuvat 10–12). Tämä kertonee siitä, että sienen kasvu oli jo hidastanut jonkun verran veden virtausta tavoitellusta lähtötilanteen noin kahdesta vrk:sta. Osasta yksiköistä ei ole tuloksia sähkönjohtavuusanturin ongelmien vuoksi. Syyskuussa, noin yhdeksän kuukautta (9kk) kokeen aloituksen jälkeen, keskimääräinen veden viipymäaika vaihteli 1,5–6,8 vrk välissä, eli sienen lisäkasvu on osassa lisännyt maaliskuun tilanteeseen verrattuna veden viipymää. Avoimen ja peitetyn lakkakäävän yksikössä 1 keskimääräinen viipymäaika oli selvästi lyhentynyt syyskuussa (kuvat 10–11). Avoimen lakkakäävän yksikössä 2 keskimääräinen viipymäaika on pysynyt suurin piirtein samana, kuin se oli maaliskuussakin (kuva 10) ja peitetyn lakkakäävän yksikössä lähes tuplaantunut (kuva 11). Osterivonokkaan yksikön 2 testauksessa keskimääräinen viipymäaika oli selvästi kasvanut syyskuussa maaliskuun tilanteeseen verrattuna (kuva 12).



Kuva 10. Veden virtaus ja viipymäaika yksiköissä, joissa lakkakääpä-sahanpurumateriaali oli avoimena. Tulokset maaliskuun 2022 mittauksista yksiköistä 1–3 (vasen kuva) ja syyskuun 2022 mittauksista yksiköistä 1–2 (oikea kuva).

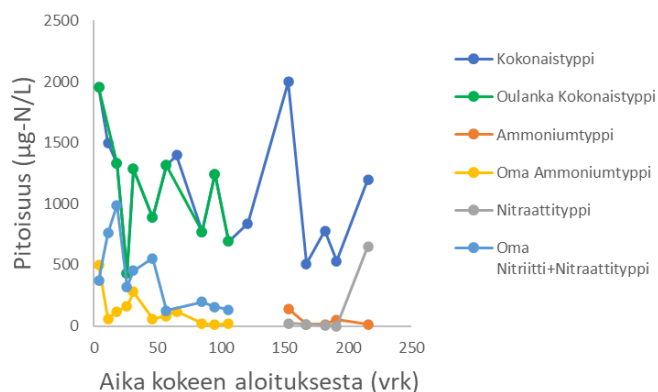


Kuva 11. Veden virtaus- ja viipymäaika yksiköissä, joissa lakkakäpä-sahanpurumateriaali oli peitettyä. Tulokset maaliskuun 2022 mittauksista (vasen kuva) ja syyskuun 2022 mittauksista (oikea kuva).

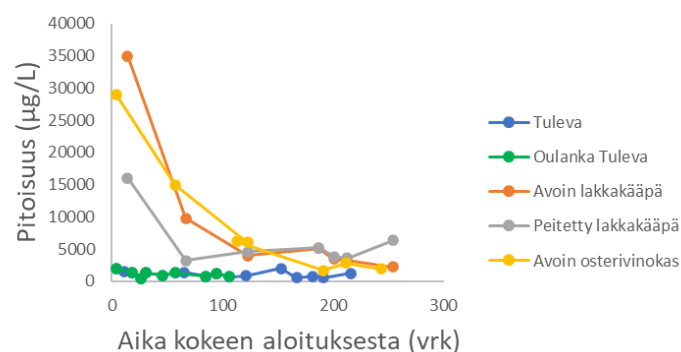


Kuva 12. Veden virtaus- ja viipymäaika yksiköissä, joissa oli osterivinokasta ja sahanpurua. Tulokset maaliskuun 2022 mittauksista yksiköistä 1 ja 2 (vasen kuva) ja syyskuun 2022 mittauksista yksiköstä 2 (oikea kuva).

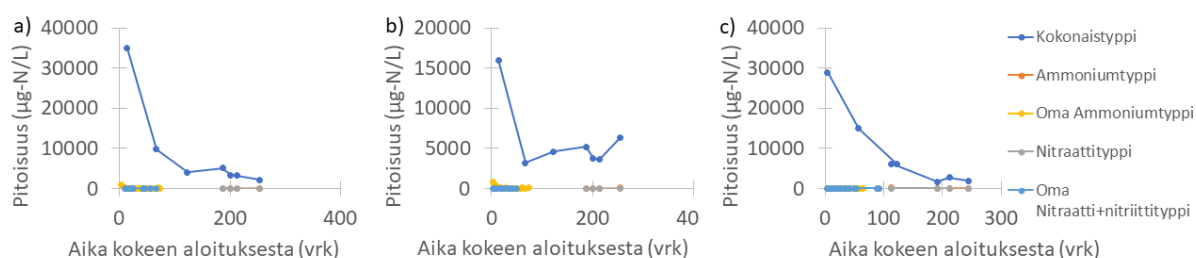
Mittausten perusteella tulevan veden kokonaistyyppipitoisuudet vaihtelivat noin 500–2000 $\mu\text{g/l}$ välillä (kuva 13). Varsinkin alkuvaiheissa pilottirakenteista lähti selvästi huuhtoutumaan typpeä, mutta myös testausten loppuvaiheessa tulevan typen pitoisuudet ovat pääasiassa hieman pienempiä kuin pilottirakenteista lähtevän typen pitoisuudet (kuva 14). Pilottirakenteista lähtevä vedessä epäorgaanisen typen pitoisuudet jäivät edelleen hyvin pieniksi kokonaisuuteen verrattuna (kuva 15).



Kuva 13. Tulevan veden typpifraktioiden laadunvaihtelu. Kokonaistyyppi, ammoniumtyppi ja nitraattityppi arvot on analysoitu Eurofinsin laboratoriossa. Oulanka kokonaistyyppianalyysit on tehty Oulangan tutkimuskeskuksen laboratoriossa, ja Oma ammoniumtyppi ja Oma Nitraatti+Nitraattityppi Oulun yliopiston laboratoriossa omana työnä.



Kuva 14. Kokonaistypen pitoisuudet.



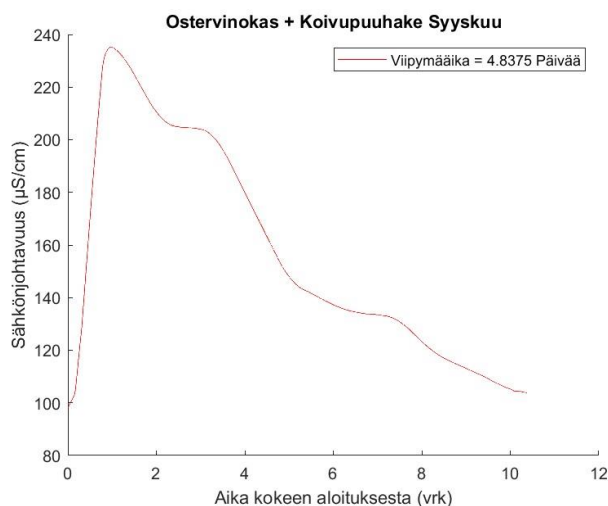
Kuva 15. a) Avoin lakkakääpä+sahanpuru, b) peitetty lakkakääpä+sahanpuru, c) osterivinokas+sahanpuru yksiköistä lähtevän veden laatu. Kokonaistyyppi, ammoniumtyppi ja nitraattityppi arvot on analysoitu Eurofinsin laboratoriossa. Oma ammoniumtyppi ja Oma Nitraatti+Nitraattityppi on analysoitu Oulun yliopiston laboratoriossa omana työnä.

3. Vaihe

Touko-kesäkuun vaihteessa 2022, kun kokonaistypen tulokset saatiin ensimmäistä kertaa nähtäväksi, todettiin että sahanpuru+sieniyksiköistä huuhtoutui voimakkaasti orgaanista typpeä. Tällöin mietittiin, että miten jatketaan. Sahanpuru arvioitiin niin pienen raekoon materiaaliksi, että sieni helposti hajottaa sitä kasvaessaan ja vapauttaa typpeä. Tästä syystä päädyttiin tekemään testaukset

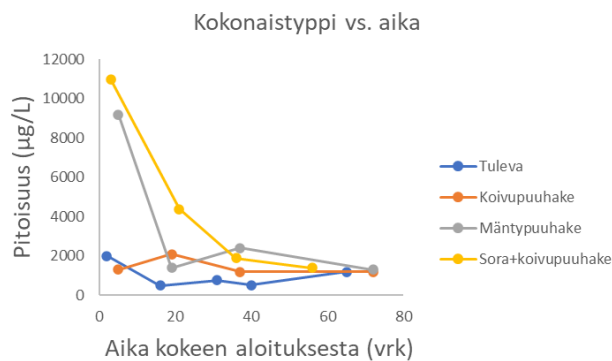
yksiköissä, joissa kaikissa osterivinokas-sahanpuruymppiä oli tilavuutena noin 1/6. Toisena materiaalina ensimmäisessä yksikössä oli koivupuuhaketta (5/6), toisessa yksikössä mäntypuuhaketta (5/6) ja kolmannessa koivupuuhaketta (2,5/6) ja soraa (2,5/6). Soramateriaali oli 16–20 mm kiilleliusketta. Testaukset, joissa oli pelkästään koivupuuhaketta, on aloitettu 11.6.2022 ja se pilottirakenne, jossa oli myös soraa, 27.6.2022. Kohtuullisen tuoreet puuhakkeet oli haettu juuri ennen kokeen aloitusta Oulun lähialueelta Neova-Groupilta tiedoksi saadusta paikasta. Testauksiin johdettiin samaa vettä kuin 2. vaiheen testauksiinkin, pitäen viipymäaika kahdessa vrk:ssa ja lämpötila 12 °C:ssa.

Merkkiainekoe toteutettiin 2. Vaiheen testauksissa kerrotulla tavalla myös osterivinokas-koivupuuhakkeelle syyskuussa 2022. Koska HOB0-sähkönjohtavuusantureita oli vain rajatusti käytössä, merkkiainekoetta ei ehditty tehdä muille (osterivinokas-mäntypuuhake) yksikölle ennen niiden lähettämistä ulkopuoliseen laboratorioon analysoitavaksi. Osterivinokas-koivupuuhakeyksikön keskimääräinen veden viipymäaika oli noin 4,8 vrk noin kolmen kuukauden käyttöajan jälkeen (kuva 16).

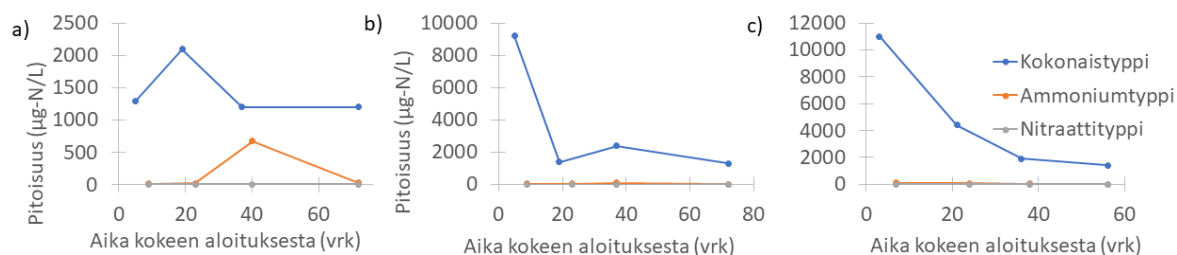


Kuva 16. Osterivinokas+koivupuuhakkeen veden keskimääräinen viipymäaika syyskuussa 2022 toteutetuissa testeissä.

Kun verrattiin tulevaa ja pilottiyksiköistä lähtevää kokonaistyyppiä, niin myös näissä esiintyi alussa osin merkittäviä huuhtoumia, mutta kohtuu pian (noin 2 kk) lähtevän veden pitoisuudet laskivat jo samalle tasolle kuin tulevatkin (kuva 17). Mahdollisesti tämän jälkeen oltaisiin voitu havaita pidättymistä, mutta koska materiaalit täytyi lähettää ulkopuoliseen laboratorioon analysoitavaksi, soramateriaalin testausta lukuunottamatta, että niistä ehdittäisiin saada hankkeen aikana tulokset, testit valitettavasti keskeytettiin. Suurin osa yksiköistä lähtevästä tyypestä oli orgaanisessa muodossa (kuva 18). Kun verrataan käyttämättömän koivupuuhake- ja mäntypuuhakkeen tuloksia kolme kuukautta käytössä olleisiin, kokonaistyyppien määrä ei ole muuttunut (liite 1). Sen sijaan esim alumiinin, raudan, rikin ja magnesiumin sekä koivupuuhakkeen kyseessä ollessa myös fosforin pitoisuudet ovat kasvaneet.



Kuva 17. Kokonaistyyppien pitoisuudet.



Kuva 18. a) Osterivinokas+koivupuuhake, b) osterivinokas+mäntypuuhake, c) osterivinokas+koivupuuhake+sora yksiköistä lähtevän veden laatu.

Sienitestausten yhteenveto

2. ja 3. vaiheen sienitestauksissa ei saavutettu enää niin positiivisia tuloksia, kuin mitä 1. vaihe antoi olettaa. Kuitenkin kun 3. vaiheessa, jossa käytettiin puuhakkeita ja soraa, alkuhuuhtoumista oli päästy eroon, päästiin jo lähtevän kokonaistyyppien pitoisuuksissa samalle tasolle tulevan kanssa ja tästä eteenpäin olisi mahdollisesti päästy jo poistumiin, eli suunta vaikutti lupaavalta. On myös tärkeä tutkia, mitä puumateriaaleista itsestään huuhtoutuu, ja vaikka tutkimukset aloitettiin, niin niitä tuloksia ei ehditty saada vielä tähän raporttiin. Tuloksista on tarkoitus laatia tieteellinen artikkeli kansainväliseen lehteen.

2.4 Koebioreaktorit

2.4.1 Koebioreaktorien suunnittelu ja rakentaminen

Koebioreaktorin suunnittelussa lähdettiin tavoittelemaan painovoimaisesti toimivaa ja riittävän typpipitoisen valumaveden käsittelyä. Tutkimuksellisen edustavuuden takia koereaktori haluttiin tehdä vesieristettynä, jotta voitiin varmistua vedenlaadun muutosten johtuvan vain ja ainoastaan järjestelmästä eikä esimerkiksi pohjavedellä laimentumisesta. Jotta voitaisiin seurata myös kylmän veden aikaista ja talvenaikaista toimivuutta, tarvittiin rakennuskohteeksi jatkuvan virtaaman sivupuro.

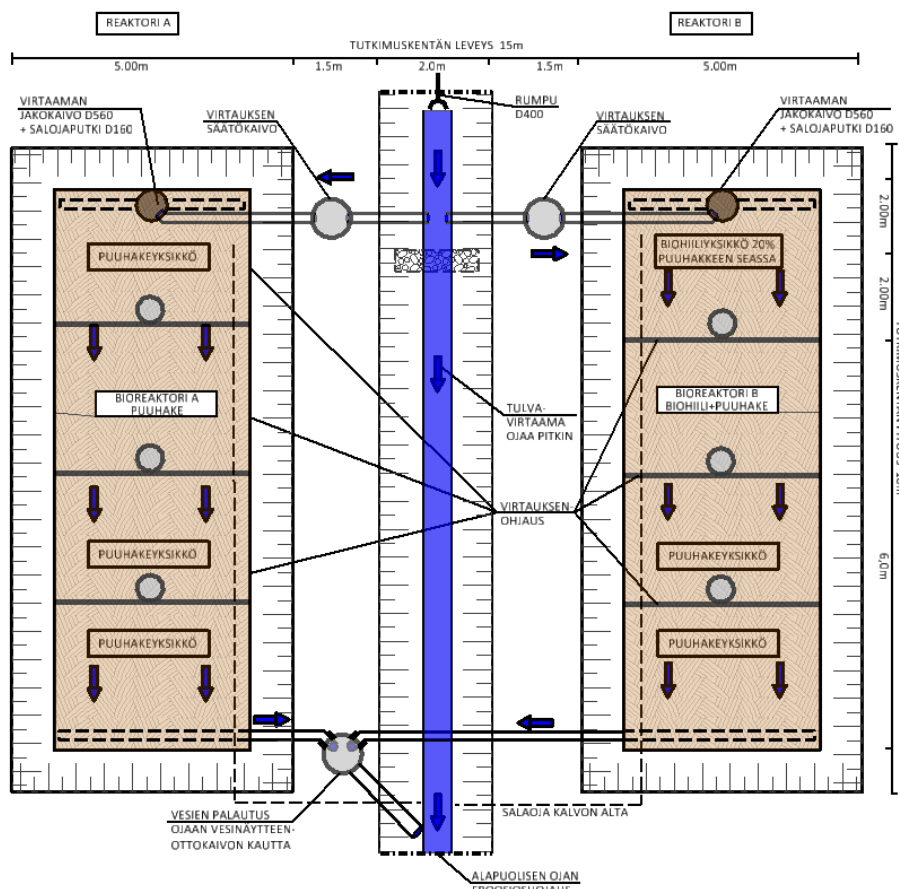
Pilot-tutkimusten perusteella täyden mittakaavan koerakenteisiin valittiin vertailtavaksi toiseen linjaan puuhakebioreaktori ("kustannustehokas") ja toiseen biohiili-puuhakebioreaktori ("tehostettu"). Biohiiltä käytettiin 20 % puuhakkeen tilavuudesta ja se asennettiin bioreaktorin etuosaan.

Koereaktoreiden rakentaminen aloitettiin kesäkuussa 2022. Ensimmäisen rakennuskohteen osoittauduttua rakennusolosuhteiltaan mahdolltomaksi, aloitettiin välittömästi uusien kohteiden kartoitus. Lopulta rakentamaan päästiin syyskuun alussa ja bioreaktoriin kytkettiin virtaamat syyskuun lopussa. Rakennuspaikan vaihduttua rakennustöiden ajan tehtiin lähtövedenlaadun mittauksia pitkäaikaisemman vedenkuvan saamiseksi.

Koebioreaktori (kuva 19) rakennettiin lopulta Kiskonjoen valuma-alueelle ojitetun Suursuon valuma-alueelle sopivien rakennusolosuhteiden ja vedenlaadun löydyttyä. Rakennetun koebioreaktorin tilavuus on 10,5x4,5x0,8 m ja puuhake+biohiili bioreaktorin tilavuus 10x4,5x0,8 m. Bioreaktoreita ennen valumaojaan tehtiin laskeutusallas. Lasketusaltaan jälkeen tulevaa metsätien rumpua käytettiin rakennusaikaisesti virtaamien väliaikaiseen katkaisuun. Rummun jälkeen tehtiin eroosiosuojattu ylivuotopato, jonka etupuolelle muodostuvasta vesiaiheesta ohjattiin virtaamat ojan molemmille puolille rakennettuihin bioreaktoreihin. Rummun ja ylivuotopadon korkoeroksi jätettiin 5 cm veden hapettamiseksi.

Bioreaktorin vesi ohjataan virtauksensäätkäivojen kautta. Virtauksensäätkäivoista voidaan jatkossa muuttaa bioreaktoriin kulkevaa virtaamaa eri viipymien ja sen mukaisten puhdistustulosten tutkimiseen. Virtauksenkaivoista vesi ohjataan d160 salaojaputkella bioreaktoriin. Bioreaktori on vesieristetty 0,5 mm LPDE-kalvolla. Kalvon molemmin puolin asennettiin suodatinkankaat suojatekstiiliksi. Puuhakkeen sekaan tehtiin virtauksenohjausrakenteet oikovirtaamien estämiseksi sekä kolme (3 kpl) näytteenotto- ja tarkkailukaivoa. Käsiteltyt vedet kerätään puuhakkeesta D160 salaojaputkella ja johdetaan näytteenottokaivon kautta takaisin eroosiosuojattuun avo-ojaan.

ASEMAPIIRUSTUS:



Kuva 19. Bioreaktorin suunnitelma

Liitteessä 2 on esitelty bioreaktoreiden rakennusvaiheita kuvasarjana.

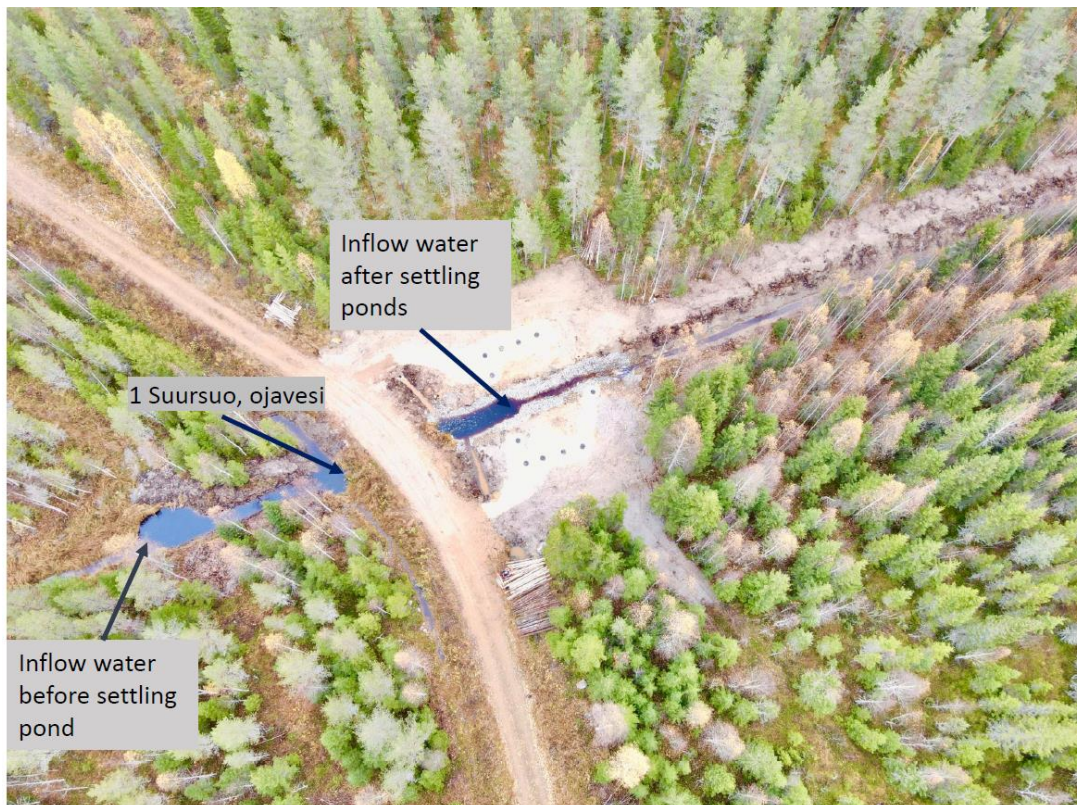
2.4.2 Koebioreaktorien seuranta

Veden johtaminen bioreaktoreihin aloitettiin 27.9.2022. Tavoitteena bioreaktoreissa oli aikaansaada noin kahden vuorokauden viipymä, sillä sen on aiemmissa laboratoriokokeissa havaittu olevan optimaalinen nitraattityypen poistumalle. Bioreaktoreiden huokostilavuudeksi (puupalojen välissä oleva ilma ja vesitilavuus) on aiemmin laboratoriossa arvioitu noin 60–65 % (laskelmissa käytettiin 63 %). Tämä ja bioreaktoreiden tilavuus huomioiden laskennallinen 2 vrk viipymä saavutetaan, kun puuhakebioreaktorissa lähtevän veden virtaama on 0,14 l/s ja puuhake+biohiili bioreaktorissa 0,13 l/s. Lähtevän veden virtaamaa mitattiin manuaalisesti astiamittauksina, joissa astiaan annettiin tulla vettä ja mitattiin astian täyttööön kuluva aika.

Veden viipymän selvittämiseksi ja tarkistamiseksi bioreaktoreissa toteutettiin kaksi merkkiainekoetta. Ensimmäinen käynnistettiin 29.9.2022 ja toinen 30.10.2022. Merkkiaineena käytettiin NaCl, jota oli liuotettu 2,5 kg noin 20 l vettä. Tämä syötettiin noin neljän minuutin aikana bioreaktoriin menevään putkeen. Jo ennen suolan syöttöä, oli kyseisen kohteen veden ja suolan avulla tehty kalibrointikäyrä. Sähkönjohtavuusloggerit (HOBO) asetettiin bioreaktoreista lähtevään veteen mittaamaan sähkönjohtavuuden vaihtelua jo ennen suolan syöttöä. Sähkönjohtavuuden muutoksen ja kalibrointikäyrän avulla voidaan määrittää veden keskimääräinen todellinen viipymäaika kyseisessä virtaamatilanteessa (Postila et al. 2015). Lisäksi sähkönjohtavuuden muutoskuvaajan avulla voidaan arvioida, onko bioreaktoreissa oikovirtauksia.

Virtaamaa säädettiin 8.10.2022 vedenpinnantason laskun avulla. Koska virtaamat vielä 8.10.2022 olivat puuhakebioreaktoripuolella liian isoja, vaihdettiin 16.10.2022 virtauksensäätökaivossa bioreaktorin tulovirtaaman säätökansi 8 mm reikäkokoon (aiemmin oli 12 mm reikä). Virtaamat tasaantuivat sen jälkeen liian pieneksi, jolloin 13.11.2022 vaihdettiin säätökansi 10 mm reikäkokoon.

Bioreaktoreihin tulevasta ja lähtevästä vedestä, sekä bioreaktorin keskellä olevista pisteistä (kuvat 20 ja 21) määritettiin akkreditoidussa laboratoriossa kokonaistyyppi (Kok. N) sekä suodatetusta, että suodattamattomasta näytteestä, ammoniumtyppi ($\text{NH}_4\text{-N}$), nitraattityppi ($\text{NO}_3\text{-N}$), kokonaisfosfori (Kok. P), fosfaattifosfori ($\text{PO}_4\text{-P}$), orgaanisen kokonaishiilen määrä (TOC), liukoisen orgaanisen kokonaishiilen määrä (DOC), rauta (Fe), kiintoaine ja liuennut happi. Bioreaktoreihin laitetusta biohiilestä ja koivupuuhakkeesta määritettiin akkreditoidussa laboratoriossa myös niiden laatu alkutilanteessa (liite 1), jotta voidaan myöhemmin tarkastella käytettyjen materiaalien ominaisuuksien vaikutusta bioreaktorin vedenpuhdistukselliseen toimivuuteen.



Kuva 20. Bioreaktoreiden tulevan veden mittauspisteet (Kuva Jyrki Repo, merkinnät Heini Postila)



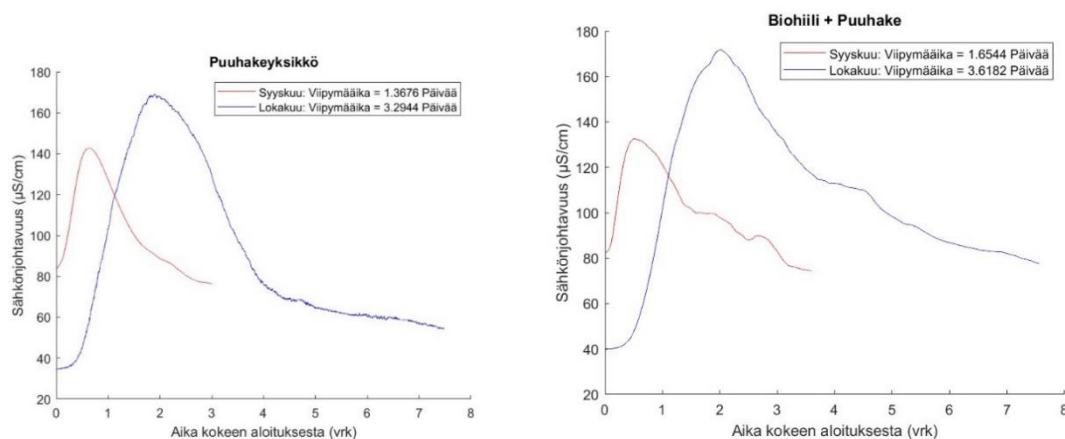
Kuva 21. Bioreaktoreiden ja niistä lähtevän veden mittauspisteet. BRwood= puuhakebioreaktori, ja BRwood+biochar = biohiili+puuhakebioreaktori (Kuva Kirsi Karhio, merkinnät Heini Postila)

2.4.3 Koebioreaktoreista saadut alkuvaiheen tulokset

Kohteen virtaamat olivat aluksi liian suuria ja laskivat myöhemmin liian pieniksi (taulukko 4), joten virtaaman säätöä jatketaan edelleen optimaalisimman tason löytämiseksi. Suolan syötön ajan 29.9.2022 biohiili+puuhakebioreaktorin virtaamat olivat tavoiteltua hieman suuremmat ja puuhakebioreaktorin selvästi suuremmat. Toisena kertana, 30.10.2022, virtaamat taas olivat tavoiteltua selvästi pienempiä. Kun verrataan tuloksia merkkiainekokeella saatuihin tuloksiin, niin 29.9.2022 käynnistetyn merkkiainekokeen mukainen viipymäaika oli puuhakebioreaktorilla 1,4 vrk ja biohiili-puuhakebioreaktori 1,7 vrk (kuva 22). Jälkimmäisen, 30.10.2022 käynnistetyn merkkiainekokeen mukainen viipymäaika oli puuhakebioreaktorilla 3,3 vrk ja biohiili-puuhakebioreaktorilla 3,6 vrk. Puuhakebioreaktorin syys- ja lokakuun merkkiainekokeiden ja biohiili-puuhakebioreaktorin syyskuussa käynnistetyn merkkiainekokeen osalta merkkiainekokeen mukainen viipymäaika on melko lailla sama kuin laskennallinen viipymäaika. Biohiili-puuhakebioreaktorin osalta mitatuissa ja laskennallisista viipymäajoissa oli lokakuussa käynnistetyssä testissä selkeä ero, johon ehkä vaikuttavat biohiilen ominaisuudet. Merkkiainekokeikärien perusteella virtaus oli kohtuullisen tasaista eikä bioreaktoreissa esiintynyt selkeitä oikovirtausalueita.

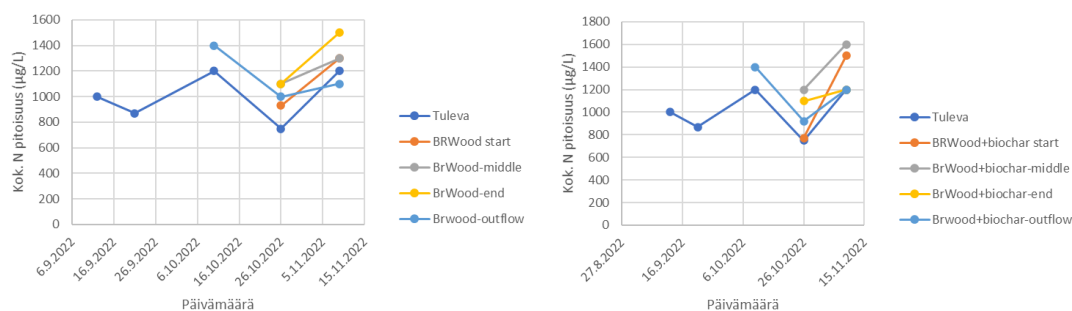
Taulukko 4. Bioreaktoreista mitatut virtaamat ja laskennalliset viipymäajat. 16.10.2022 tehtyjen mittausten jälkeen tulevan veden putkien kannet muutettiin sellaisiin, joissa tuleva reikä oli 8 mm. Vaihto tehtiin puuhakebioreaktorin 8.10.2022 mittausten perusteella.

Puuhakebioreaktori			Biohiili+puuhakebioreaktori		
Laskennallinen viipymäaika			Laskennallinen viipymäaika		
Päivämäärä	Virtaama (l/s)	(vrk)	Päivämäärä	Virtaama (l/s)	(vrk)
29.9.2022	0,18	1,6	29.9.2022	0,14	1,9
2.10.2022	0,21	1,3	2.10.2022	0,16	1,6
4.10.2022	0,20	1,4	4.10.2022	0,15	1,7
8.10.2022	0,20	1,4	8.10.2022	0,13	2,0
13.10.2022	0,13	2,1	13.10.2022	0,12	2,3
16.10.2022	0,12	2,4	16.10.2022	0,11	2,5
19.10.2022	0,17	1,6	19.10.2022	0,11	2,5
25.10.2022	0,06	4,6	25.10.2022	0,06	4,5
30.10.2022	0,08	3,5	30.10.2022	0,05	5,3
7.11.2022	0,08	3,3	7.11.2022	0,05	5,2

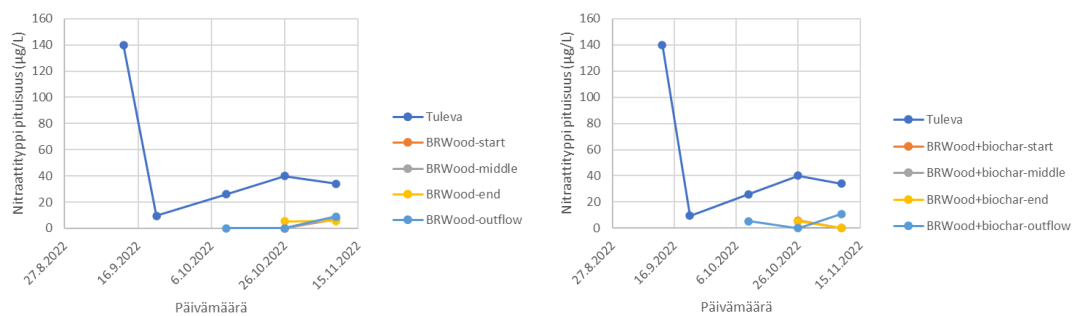


Kuva 22. Puuhakebioreaktorin (vasen kuva) ja biohiili+puuhakebioreaktorin (oikea kuva) veden keskimääräiset viipymääjat 29.9.2022 ja 30.10.2022 käynnistettyjen, NaCl toteutettujen testien perusteella.

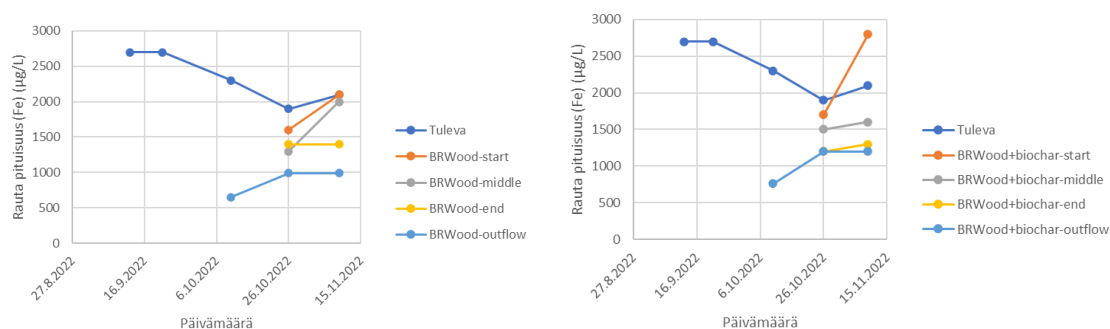
Seurantatulosten perusteella (liite 3 ja kuvat 23–27), bioreaktori pidatti heti alkuvaiheessa nitraattityppeä ja rautaa, mutta puuaineksesta lähti huuhtoutumaan fosforia, orgaanista typpeä ja orgaanista ainetta. Tällainen alkuhuuhtouma on tyypillinen puuhaketta käytettäessä ja sen kestoa olisi tärkeä seurata. Kokonaistypen osalta alkuhuuhtoumat olivat tasoittuneet jo vajaassa 1,5 kk:ssa niin, että marraskuun näytteenotokerralla puuhakebioreaktorin lähtevän veden kokonaistyyppipitoisuus oli jo alle tulevan pitoisuuden (kuva 22). Kokonaisfosforin alkuhuuhtouma oli alussa, noin puolentoista viikon käytön jälkeen, jopa kymmenkertainen, ja tästä kuukauden päästä se oli laskenut alle puoleen puuhakebioreaktorissa ja 2/3 biohiili+puuhakebioreaktorissa (kuva 27).



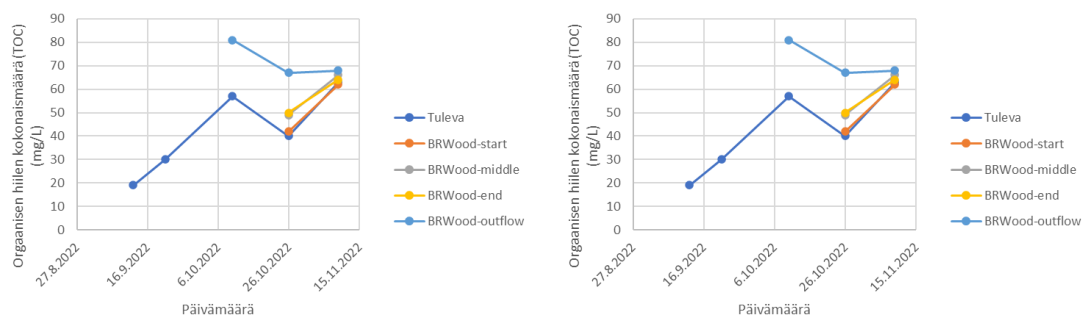
Kuva 23. Kokonaistyyppipitoisuuden vaihtelu bioreaktoreissa.



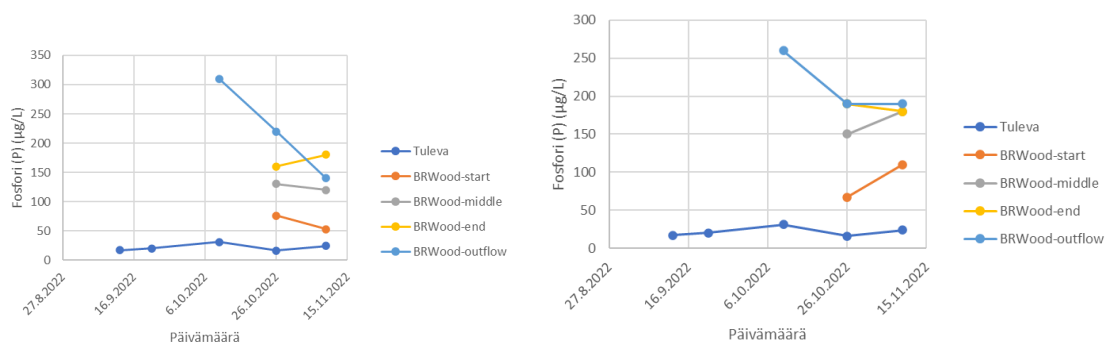
Kuva 24. Nitraattityypipitoisuuden vaihtelu bioreaktorirakenteissa.



Kuva 25. Rautapitoisuuden vaihtelu bioreaktorirakenteissa.



Kuva 26. Organisen kokonaishiilen (TOC) vaihtelu bioreaktorirakenteissa.



Kuva 27. Fosforipitoisuuden vaihtelu bioreaktorirakenteissa.

2.5 Menetelmän kustannustehokkuuden, vaikuttavuuden ja monistettavuuden arviointi

Hankkeessa oli tavoitteena arvioida myös menetelmän kustannustehokkuutta, monistettavuutta ja vaikuttavuutta. Menetelmän rakennettavuutta ja monistettavuutta parantaa hankkeen ratkaisusta huomattavasti se, ettei lopullisen käsittelyjärjestelmän tarvitse olla täysin vesitiivis. Silloin rakenteessa ei tarvitse käyttää kalvorakenteita, vaan normaali suodatinkangas riittää puuhakekaukalon ympärille. Silloin rakentamisen aikainen kuivatus voidaan tehdä suoraan kaivannosta. Ratkaisu lisää pohjaveden vaihdantaa, joka osaltaan parantaa puhdistustuloksia, vaikkei se suoraan ole itse bioreaktorin prosesseihin perustavaa vesienkäsittelyä. Bioreaktorin periaatekuva on esitetty liitteessä 4.

Rakenteen toteutettavuuden vaatimustaso vastaa sen jälkeen hajakuormitusalueen jätevesijärjestelmiä, johon maaseudun maarakentajilla on runsaasti osaamista. Hankkeessa käytetyn urakoitsijan sanallisen arvion mukaan kaikkiin hankkeessa koekuopilla tutkittuihin kohteisiin olisi saanut rakennettua kalvottoman puuhakebioreaktorin. Kalvon, ja tutkimuskäyttöä varten tarvittujen runsaiden kaivojen pois jättäminen tekee ratkaisusta huomattavasti edullisemman.

Koska bioreaktorirakenteista ei valitettavasti ehditty saada kuin alkuvaiheen (noin 1,5 kk) tutkimustuloksia, sen pitempiaikaisen puhdistustehokkuuden tasosta ei voida sanoa tässä vaiheessa vielä mitään. Tästä syystä myöskään vaikuttavuutta ja kustannustehokkuutta ei voida arvioida tässä raportissa. Molempiin em. tarvittaisiin tieto bioreaktorilla poistettavista ravinnemääristä. Myöskään mitoitustyökalun päivittäminen metsätalousvesille ei ole mahdollista pelkästään alkuvaiheen tutkimustulosten perusteella, joten sitä ei ole tässä tehty. Todennäköisesti bioreaktoreita olisi järkevin kohdistaa paikkoihin, jossa on lähitulevaisuudessa tarkoitus tehdä metsätaloustoimenpiteitä ja voidaan siis olettaa, että kuormitus tulee lähivuosina kasvamaan.

Lähdeluettelo:

Finér, L., Lepistö, A., Karlsson, K., Räike, A., Tattari, S., Huttunen, M., Härkönen, L., Joensuu, S., 2020. Metsistä ja soilta tuleva vesistökuormitus 2020 / Valtioneuvoston julkaisu
https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162009/VNTEAS_2020_6.pdf

Jolkkonen, Heiskanen, 2020. Höytiäiseen laskevan Rauanjoen vesistöalueen nykytila ja kunnostustarpeen arviointi. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2020060115700>

Postila, H., Ronkanen, A.-K., Marttila, H., Kløve, B. 2015. Hydrology and hydraulics of treatment wetlands constructed on drained peatlands. Ecological Engineering 75: 232–241.

Postila, H., Heiderscheidt, E., Korhonen, A., Lehosmaa, K., Nilivaara, R., Ronkanen, A.-K.,

Ruotsalainen, A. L., Visuri, M., Wäli, P. 2021. Passiiviset hybridipuhdistusratkaisut arktisten valumavesien typen ja raskasmetallien puhdistamiseen –HybArkt-hankkeen loppuraportti. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 1/2021. <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/324496>

Vuollekoski, M., Joensuu, S., 2006. MESUVE-hankkeessa perustettujen erityisalueiden tuloksia. Teoksessa: Kenttämies, K., Mattsson, T., (toim.) Metsätalouden vesistökuormitus MESUVE- projektin loppuraportti. Suomen ympäristö 816, s. 113–119. Saatavissa:
https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40492/SY_816.pdf?sequence=1

[illegible]

Liite 2. Bioreaktoreiden rakentamisen vaiheita Polvijärven Pyöräkankaalla, Suursuon valuma-alueella.



a. Runkojen raivaus



b. Laskuojan perkaus



c. Puusto on raivattu ja rakentaminen voi alkaa



d. Reaktori työmaan vaaitus tasolaserilla



e. Ensimmäinen salaoja



f. Hiekka tasaa pohjan rosot ja suojaa rakennetta



g. Kaivon sovitus reaktoriin



h. Kalvot estävät ulkopuoliset valumat



i. Haketta suodattimeksi



j. Väliseinät ohjaavat virtaamat tasaisesti koko rakenteeseen



k. Kaivon korkoeron tarkistus



l. 1. reaktori puolivälissä



m. Työympäristön siistimistä



n. Työvälineiden huoltoa



o. Biohiiltä hakkeen sekaan



p. Biohiili-lehtipuuhakeseos



q. Reaktorin "Huputus"



r. Huputettu ts. vain Suursuon laskuojasta ohjautuvat vedet pääsevät reaktoriin



s. Routamatto bioreaktorin eristeeksi



t. Ylivirtaamaojan eroosiosuojaus murskeella



u. Loggerit kaivossa mittaamassa
sähkönjohtavuutta



v. Ensilumi tutkimuskentällä



x. Tuloputkien tiivistämistä



y. Kaivojen säätöä



z. ja å. Rakenteita tuunattiin kohteen vaatimuksiin työn eri vaiheissa



ä. Reikäkantta muuttamalla säädetään tulevaa virtaamaa



ö. Työvälineet tarpeiden mukaan: kaivon reaktoriin mitoitettu hakekaira

Kuvat rakennusvaiheesta:

Jyrki Repo / a, b, c

Kirsi Karhio / d, e, h, i, j, k, l, m, n, t, u, v, x, y, z, å, ä, ö)

Pekka Karvonen / f, g, o, p, q, r, s

Liite 3. Koebioreaktoreista analysoidut vedenlaatutulokset.

Näytteen ottopiste	Näyte- päivä	Liennut happi		Kiintoaine (GF/C) (mg/l)	TOC (mg/l)	DOC (mg/l)	Kokonais- typpi (µg/l)	Ammoniu- m-typpi (NH4-N) (µg/l)	Nitraatti- typpi (NO3-N) (µg/l)	Fosfori (P) (µg/l)	Fosfaatti- fosfori (PO4-P) (µg/l)	Typpi, liukoinen (µg/l)	Rauta (Fe) (µg/l)
Suursuo, ojavesi	12.9.22		9,6	5,5	19	16	1000	400	140	17	3,3	1000	2700
Suursuo, ojavesi	21.9.22		9,8	8,5	30	27	870	97	9,5	20	3,9	870	2700
Suursuo, ojavesi	10.10.22		7,8	2	57	56	1200	31	26	31	2,6	1100	2300
Suursuo, ojavesi	26.10.22	6,1	10,7	1,8	40	38	750	60	40	16	3,2	720	1900
Inflow water before settling pond	9.11.22	4,5	8,5	3,9	64	60	1300	33	33	25	3,4	1200	2000
Suursuo, ojavesi	9.11.22	4,5	8,2	2,9	63	61	1200	34	34	24	3,6	1100	2100
Inflow water after settling ponds	9.11.22	4,6	8,5	3	63	61	1300	34	35	24	3,2	1100	2000
BRwood_ start	26.10.22	5,4	2,5	21	42	41	930	17	<5	76	17	650	1600
BRwood_ start	9.11.22	4,9	3,2	80	62	60	1300	27	6,9	53	7,1	1100	2100
BRwood_ middle	26.10.22	5,2	0,7	67	49	45	1100	18	<5	130	51	720	1300
BRwood_ middle	9.11.22	5,2	0,2	46	66	59	1300	29	7,3	120	46	1100	2000
BRwood_ end	26.10.22	5,2	0,5	150	50	47	1100	21	5,4	160	66	730	1400
BRwood_ end	9.11.22	5,3	0,5	20	64	57	1500	27	5,6	180	84	1000	1400
BRwood_ outflow	10.10.22		<0.2	3,6	81	76	1400	30	<5	310	210	1700	650
BRwood_ outflow	26.10.22	5,1	0,3	1,4	67	67	1000	21	<5	220	170	870	990
BRwood_ outflow	9.11.22	5,1	<0.2	1,5	68	66	1100	26	9,1	140	92	1100	990
BRwood+ biochar_s tart	26.10.22	5,5	3,6	21	40	38	770	19	5,9	67	15	630	1700
BRwood+ biochar_s tart	9.11.22	4	2,4	210	63	59	1500	27	<5	110	22	1000	2800
BRwood+ biochar_ middle	26.10.22	5,3	0,4	69	52	51	1200	20	<5	150	72	730	1500
BRwood+ biochar_ middle	9.11.22	5,4	0,4	11	63	58	1600	26	<5	180	65	1000	1600
BRwood+ biochar_e nd	26.10.22	5,2	0,3	80	60	57	1100	19	5,2	190	120	730	1200
BRwood+ biochar_e nd	9.11.22	5,3	<0.2	38	67	63	1200	25	<5	180	94	1100	1300
BRwood+ biochar_ outflow	10.10.22		<0.2	3,7	77	75	1400	29	5,4	260	170	1200	760
BRwood+ biochar_ outflow	26.10.22	5,1	<0.2	1,6	67	63	920	20	<5	190	150	780	1200
BRwood+ biochar_ outflow	9.11.22	5,1	<0.2	1,5	72	70	1200	25	11	190	140	1100	1200

Liite 4. Bioreaktorin periaatekuva

