



Jätevesien ravinteiden ja hiilen kokonaisvaltainen talteenotto RAHI 2

Loppuraportti 1/2023–10/2025
17.11.2025



Euroopan unionin rahoittama –
NextGenerationEU

Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY

Ilmalantori 1,
00240 Helsinki
puhelin 09 156 11
faksi 09 1561 2011

www.hsy.fi

Lisätietoja

Maria Valtari
maria.valtari@hsy.fi

Copyright

Kartat, graafit, ja muut kuvat: HSY
Kansikuva: HSY

Tiivistelmä

RAHI 2 -hanke keskittyi ravinteiden talteenoton ja kierrätyksen teknologioiden kehittämiseen suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla. Hanke jakautui kolmeen osatehtävään, joissa tarkasteltiin yhdyskuntajäteveden fosforin talteenoton potentiaalia, RAVITA™-prosessin optimointia sekä lietehiilen tuotantoa ja jatkokäyttömahdollisuuksia.

Ensimmäisessä osatehtävässä arvioitiin yhdyskuntajätevesien fosforin talteenottopotentiaalia RAVITA-tekniikalla. Selvityksen mukaan asukasvastineluvultaan yli 10 000:n jätevedenpuhdistamoilla voidaan ottaa talteen fosforia noin 1700 tonnia vuodessa. Lisäksi tarkasteltiin RAVITA-prosessissa välituotteena syntyvän kemiallisen lietteen ja jätevesilietteen käsittelyssä syntyvän rejektiveden tyypin hyödyntämistä teollisuudessa. Kemiallisen lietteen käyttö metsäteollisuuden jätevedenpuhdistuksessa osoittautui lupaavaksi vaihtoehdoksi. Rejektiveden tyypellä voitaisiin korvata kolmannes metsäteollisuuden typpitarpeesta, mutta tyypin hyödyntäminen edellyttää rejektiveden konsentroimista.

Toisessa osatehtävässä kehitettiin RAVITA-prosessin liuotus- ja uuttovaiheiden parametreja. Tuhkistamalla voitiin poistaa kemiallisen lietteen orgaanista hiiltä ja parantaa prosessin vaikuttavuutta. Uuttokokeissa saavutettu alumiinin uuttoteho oli 86 % ja takaisinuuuttoteho 99 %. Raudan takaisinuuottoa saatiin tehostettua aiemmasta tasolle 40 %. Fosforihapon kierrätys liuotusvaiheeseen ei heikentänyt prosessin toimintaa. Osatehtävän toisessa kokonaisuudessa arvioitiin aktivoitujen lietehiilen käyttöä suodatinmateriaalina. Aktivoitu lietehiili poisti panoskokeissa lähes 90 % EU:n jätevesidirektiivissä listatuista mikroepäpuhtauksista. Kolonniko-keissa havaittiin kuitenkin, että lietehiilen sisältämää fosforia liukeni käsiteltävään jäteveeseen. Tämä voi rajoittaa lietehiilelle soveltuvia käyttökohteita.

Kolmannessa osatehtävässä toteutettiin pyrolyysiprosessin elinkaariarviointi hyödyntämällä aiempien RAHI-hankkeiden ja HSY:lla olevassa olleita tietoja. Selvityksessä vertailtiin pilottilaitosta, täyden mittakaavan laitosta sekä nykyisiä lietteen käsittelymenetelmiä (Metsäpirtin kompostointi ja Ämmäsuon käsittely). Arviointi osoitti, että täysimittaisessa pyrolyysilaitoksessa nettohiilensidonta olisi positiivinen ja päästöt olisivat pienemmät kuin käytössä olleessa pilottilaitoksessa. Lisäksi selvitettiin lietehiilen jatkokäyttöä maanparannuksessa, suodatinmateriaalina ja betonin raaka-aineena. Selvityksen perusteella todettiin, että suurin markkinapotentiaali on maanparannuksessa, mutta lietehiilen käyttöturvallisuus ja siihen liittyvä lainsäädäntö vaativat jatkotarkastelua.

RAHI 2 -hankkeen tulokset tukevat HSY:n strategiaa Itämereen johdettavan ravinnekuormituksen hallitsemiseksi ja kiertotalouden edistämiseksi. Työ jatkuu RAHI 3 -hankkeessa vuonna 2026. RAHI 3 -hankkeessa tarkastellaan jätevedenpuhdistamon ravinnetasetta ja jatketaan jäteveden ravinteiden talteenottoon liittyvää työtä RAVITA-prosessia kehittämällä ja mahdollisella rejektiveden tyypin talteenoton pilotoinnilla. Hankkeessa tarkastellaan myös lietehiilen teknistä käytettävyyttä suodatinmateriaalina.

Sisällys

Tiivistelmä	ii
Sisällys	iii
1 Hankkeen nimi ja toteuttajat	1
2 Hankkeen tausta	2
3 Hankkeen toteutus ja tulokset	2
3.1 Osatehtävä 1	2
3.1.1 Fosforin valtakunnallinen talteenottopotentiali	2
3.1.2 Kemiallisen lietteen hyödyntäminen teollisuudessa	3
3.2 Osatehtävä 2	4
3.2.1 Pilot-mittakaavan linkokokeet Viikinmäessä	4
3.2.2 Liuotuskokeet	5
3.2.2.1 Fosforihappoliuotus ja kiintoaineen poisto 2023	5
3.2.2.2 Fosforihappoliuotus 2024	5
3.2.2.3 Kierrätetyn fosforihapon testaus liuotuksessa 2024–2025	7
3.2.2.4 Typpihappoliuotukset 2024	9
3.2.3 Uttokokeet	10
3.2.3.1 Jatkuvatoinen uuttokoeajo 2023	10
3.2.3.2 Uuton panoskokeet 2024	11
3.2.3.3 Jatkuvatoinen uuttokoeajo 2024	11
3.2.3.4 Raudan takaisinuuton parantaminen 2024	13
3.2.3.5 Uuton ja takaisinuuton panoskokeet 2025	13
3.2.3.6 Jatkuvatoinen uuttokoeajo ja fosforihapon kierrätys 2025	16
3.2.4 Lietehiilen aktivointi ja käyttö jäteveden haitta-aineiden poistossa	19
3.2.4.1 Panoskokeet	19
3.2.4.2 Kolonnikoe	20
3.2.4.3 Lietehiilen regenerointi	23
3.3 Osatehtävä 3	24
3.3.1 Pyrolyysiprosessin elinkaariarvio	24
3.3.2 Pyrolyysilaitoksen koetoiminta	24
3.3.3 Selvitys lieteihiilen jatkokäyttömahdollisuuksista	25
4 Muutokset alkuperäiseen hankesuunnitelmaan	26
5 Viestinnän toteutuminen	27
6 Hankkeen vaikutukset	28
7 Talousraportti	29
7.1 Osatehtävä 1	29
7.2 Osatehtävä 2	29
7.3 Osatehtävä 3	29

7.4	Kokonaiskustannukset.....	29
8	Yhteenveto _____	31
	Kirjallisuus _____	33

Liitteet:

- Liite 1. RAHI 2 vaikutusten arviointi
- Liite 2. RAHI2 DNSH-arvion toteutuminen
- Liite 3. RAHI2 Kustannuserittely 2025 loppuraportti
- Liite 4. Tilintarkastajan lausunto
- Liite 5. RAHI 2 Tuntikirjausluettelo 1.1.2025-31.10.2025

1 Hankkeen nimi ja toteuttajat

Nimi/Lyhenne	Jätevesien ravinteiden ja hiilen kokonaisvaltainen talteenotto / RAHI2	
Toteuttaja:	Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY	
Y-tunnus	2274241-9	
Yhteyshenkilöt / vastuulliset vetäjät:	Sini Reuna / Linda Röman	
Yhteystiedot	Sini Reuna sini.reuna@hsy.fi +358 50 4123 159	Linda Röman linda.roman@hsy.fi +358 50 3795 225
Hankeaika:	1.1.2023-31.10.2025	
Rahoittajat:	Ympäristöministeriö Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY	

Hanke on saanut rahoitusta ympäristöministeriön 1.1. - 28.2.2022 auki olleesta avustushausta yhdyskuntien jätevesien ravinteiden kierrätyksen ja talteenoton hankkeille (hakutiedote ja -ohje 15.12.2021; <https://ym.fi/-/avustushaku-yhdyskuntien-jatevesien-ravinteiden-kierratyksen-ja-talteenoton-hankkeille-1.1.-28.2.2022->).

Hanke on Euroopan unionin osarahoittama ja se on saanut rahoitusta NextGenerationEU -tukivälineestä (RRF) ja toteuttaa osaltaan myös Suomen kestävä kasvun ohjelmaa.

2 Hankkeen tausta

HSY on tehnyt pitkäjänteistä työtä yhdyskuntajäteveden ravinteiden talteenottoon liittyen. Kierrätysravinteita hyödyntämällä voidaan saavuttaa myönteisiä ympäristövaikutuksia ja parantaa ravinteiden saatavuutta ja toimitusvarmuutta. On tärkeää, että pohjoismaisiin olosuhteisiin ja erikokoisille puhdistamoille soveltuvia teknologioita jäteveden ravinteiden talteenoton ja kierrätyksen toteuttamiseen on käytettävissä.

HSY:n ravinteiden talteenottoon liittyvässä kehitystyössä lähtökohtana on fosforiravinnejakeen eriyttäminen lietejakeesta, mikä mahdollistaa samalla sekä ravinteiden tehokkaan talteenoton että jätevesien entistä tehokkaamman puhdistamisen. HSY:n kehittämässä RAVITA™-prosessissa (jatkossa RAVITA) jäteveden sisältämä fosfori otetaan talteen jätevedenpuhdistusprosessin lopuksi. RAVITA-prosessin avulla on mahdollista saada talteen jätevedenpuhdistamolle tulevasta fosforikuormasta jopa 60 %. Noin kolmasosa puhdistamolle tulevan jäteveden fosforista sitoutuu puhdistusprosessissa biolietteeseen. Biolietteen fosforin tehokasta hyödyntämistä varten HSY on tutkinut lietehiilen tuottamista pyrolyysillä.

Jätevesien hiilen ja ravinteiden kokonaisvaltainen talteenotto eli RAHI 2 -hanke koostuu kolmesta toisiaan täydentävästä osatehtävästä, jotka ovat jatkoa vuosina 2021–2022 käynnissä olleiden RAHI-hankkeen osatehtäviin. RAHI 2 -hankekokonaisuudessa jatketaan ravinteiden talteenoton teknologioiden kehittämistä kohti käytännön soveltamista suomalaisilla puhdistamoilla.

Hankekokonaisuuden ensimmäinen osatehtävä keskittyi fosforin talteenoton valtakunnalliseen potentiaaliin ja kemiallisen, fosforipitoisen lietteen hyödyntämiseen suoraan teollisuudessa. Toisessa osatehtävässä tutkittiin ja jatkokehitettiin fosforin talteenottoa RAVITA-prosessilla laboratoriomittakaavassa ja Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla sijaitsevalla 1000 AVL:n pilot-laitteistolla. Tämän lisäksi tutkittiin pyrolyysillä valmistetun lietehiilen käyttöä haitta-aineiden poistossa. Kolmannessa osatehtävässä jatkettiin puhdistamolietteen pyrolyysin kehitystyötä keskittyen prosessin optimointiin ja lopputuotteen laadun parantamiseen. Lisäksi tarkasteltiin pyrolyysissä muodostuvan lietehiilen markkinoita, lainsäädäntöä ja käyttöturvallisuutta eri käyttökohteiden kautta.

3 Hankkeen toteutus ja tulokset

3.1 Osatehtävä 1

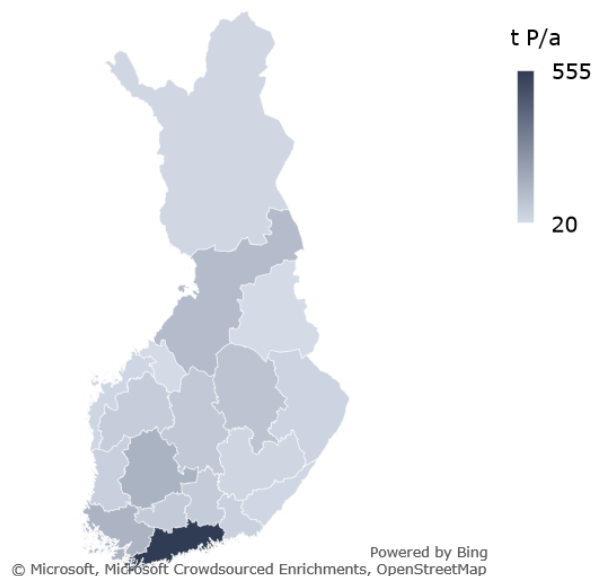
3.1.1 Fosforin valtakunnallinen talteenottopotentiaali

Osatehtävässä 1 selvitettiin valtakunnallista potentiaalia fosforin talteen ottamiseksi RAVITA-teknologialla suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla. Selvitys toteutettiin vuonna 2024. Tavoitteena oli tuottaa mahdollisimman selkeä ja ajankohtainen kuva yhdyskuntajäteveden fosforin talteenoton potentiaalista Suomessa sekä maantieteellisesti että teknisesti. Työkokonaisuus toteutettiin konsulttiselvityksenä.

Osatehtävän työstäminen aloitettiin tammikuussa 2024 ja toteuttavaksi konsultiksi valittiin AFRY Oy. Työn sisältö koostui kolmesta osasta, joissa tarkasteltiin talteen otettavan fosforin määrää, mahdollisia jatkokäyttökohteita, kun lannoitekäyttö on rajattu tarkastelun ulkopuolelle,

sekä keskitettyjen käsittelylaitosten optimaalisia sijainteja. Työstä laadittu raportti *Selvitys fosforin valtakunnallisesta talteenottopotentialista ja jatkokäyttökohteista* valmistui kesällä 2024.

Selvityksen perusteella yli 10 000 asukasvastineluvun (avl) laitoksilla fosforin talteenottopotentiali on valtakunnallisesti arviolta 1700 t P/a, kun oletetaan 50 %:n talteenottoaste tulevasta fosforikuormasta. Kuva 1 havainnollistaa, että suurin potentiali on alueilla, joihin väestö on keskittynyt. Selvityksen perusteella mahdollisista jatkokäyttökohteista lupaavin on fosforipitoisen lietteen hyödyntäminen metsäteollisuuden jätevedenpuhdistuksen lisäravinteena. Tässä käyttötarkoituksessa kemiallisen lietteen käyttö todennäköisesti vaatisi jatkokäsittelyksi ainoastaan fosforin saattamisen liukoiseen muotoon. Selvityksessä todettiin, että metsäteollisuuden näkökulmasta kemiallisen jätevesilietteen käyttöön voi myös liittyä haasteita, minkä vuoksi hyötykäyttö vaatii lisäselvityksiä. Muut tunnistetut fosforin hyötykäyttömahdollisuudet eri teollisuuden aloilla vaativat kuitenkin kemiallisen lietteen fosforin jatkojalostamisen esimerkiksi fosforihapoksi.



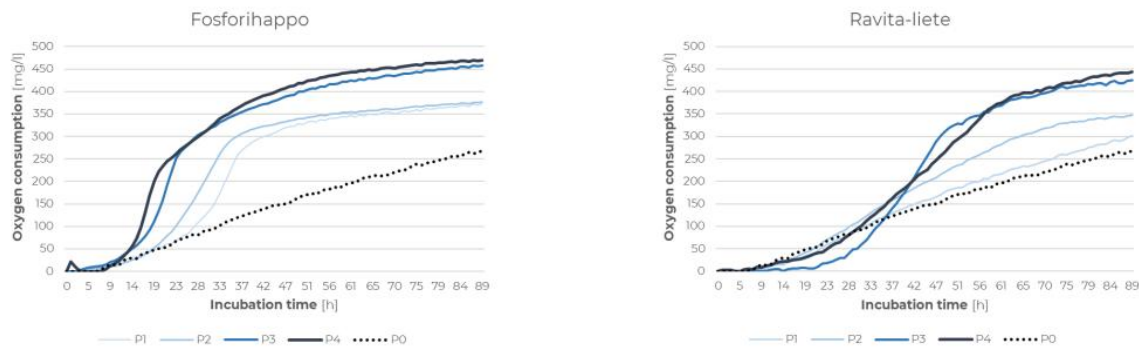
Kuva 1. Fosforin talteenottopotentiali maakunnittain (kuva: AFRY Oy)

3.1.2 Kemiallisen lietteen hyödyntäminen teollisuudessa

Tarkastelua kemiallisen lietteen hyödyntämisestä teollisuudessa jatkettiin Toihan Oy:n laati- milla selvityksillä vuonna 2025. Ensimmäisessä selvityksessä testattiin laboratoriokekein ke- miallisen lietteen soveltuvuutta fosforin lähteeksi sellu- ja paperiteollisuuden jätevedenkäsitte- lyprosesseissa. Kuvassa 2 esitetyissä tuloksissa nähdään lyhyt viive, jonka aikana mikrobiyh- teisö sopeutuu uudentyypiseen ravinnelähteeseen, mutta kolmen ensimmäisen päivän jäl- keen yhteisö saavuttaa saman kasvunopeuden kuin epäorgaanisella ravinnelähteellä. Tämän perusteella kemiallinen liete soveltuu käytettäväksi ravinnelähteeksi metsäteollisuuden jäte- vesiprosessissa.

Käytännössä myös useat muut näkökohdat vaikuttavat merkittävästi kemiallisen lietteen käy- tettävyyteen. Näitä näkökohtia ovat mm. tuotanto- ja kuljetuskustannukset, ravinnevirtojen kestävyys ja kapasiteetti sekä ravinteiden tarvitsema jatkokäsittely annostelua varten. Näitä näkökohtia tarkasteltiin toisessa selvityksessä kemiallisen lietteen lisäksi rejektiveden typen osalta. Selvityksen perusteella HSY:n puhdistamoilla tuotettavan kemiallisen lietteen fosfori riittäisi kattamaan koko Suomen metsäteollisuuden fosforitarpeen. Tarkastelun perusteella ke- miallinen liete sopii myös muun laatunsa perusteella lähtökohtaisesti hyvin hyödynnettäväksi

metsäteollisuuden jätevedenpuhdistuksessa, vaikka tehdaskohtainen tarkastelu toki tarvitaan aina. Tehdaskohtaisesti tulisi myös ratkaista mm. se, miten kemiallinen liete voidaan annostella prosessiin tasalaatuisesti. Tämä todennäköisesti vaatii kemiallisen lietteen liuottamisen ennen annostelua. HSY:n tuottaman rejektiveden tyypellä voitaisiin korvata kolmannes metsäteollisuuden typpitarpeesta, mutta rejektiveden hyödyntäminen edellyttää sen konsentroidusta, jotta kuljettaminen olisi järkevää.



Kuva 2. Metsäteollisuuden jätevesiprosessin mikrobien sopeutuminen uuteen ravinnelähteeseen (oik.) ja vertailukohteena fosforihappo (vas.). (Kuva Toihan Oy)

3.2 Osatehtävä 2

Hankkeen toisessa osatehtävässä keskityttiin RAVITA:n fosforin talteenotto-prosessin jatkokehittämiseen ja optimointiin. RAHI-hankkeessa (2021–2022) tunnistettiin prosessin optimointiin liittyviä kehityskohteita, joihin paneuduttiin tässä hankekokonaisuudessa. Osatehtävässä myös kehitettiin prosessin jatkuvatoimisuutta. Osatehtävän tavoitteena on optimoida prosessia teknologian skaalausta varten. Toisena kokonaisuutena osatehtävässä on tutkittu käyttökohteita lieteille, joka on tuotettu pyrolysoimalla HSY:n omalla teollisen mittakaavan pilotlaitoksella.

3.2.1 Pilot-mittakaavan linkokokeet Viikinmäessä

Viikinmäen 1000 avl:n pilot-laitoksella suoritettiin vuoden 2023 lopulla kemiallisen lietteen kuivaukseen liittyviä linkokoeajoja. Aiemmassa RAHI-hankkeessa kiekkosuodatuksessa muodostuvaa tertiäärilietettä kuivattiin onnistuneesti Jyväskylän Puhdistamo Oy:n Nenäinniemen jätevedenpuhdistamolla täydessä mittakaavassa. Koejärjestelyjen vuoksi testauksessa ei kuitenkaan voitu tavoitella maksimaalista kuiva-ainepitoisuutta. Kuivauksen tarkastelua jatkettiin mm. tämän osalta nyt Viikinmäen koeajoissa. Koetulosten perusteella todettiin, että lietettä on mahdollista kuivata yli 10 % kuiva-ainepitoisuuteen dekantterilingolla.

3.2.2 Liuotuskokeet

3.2.2.1 Fosforihappoliuotus ja kiintoaineen poisto 2023

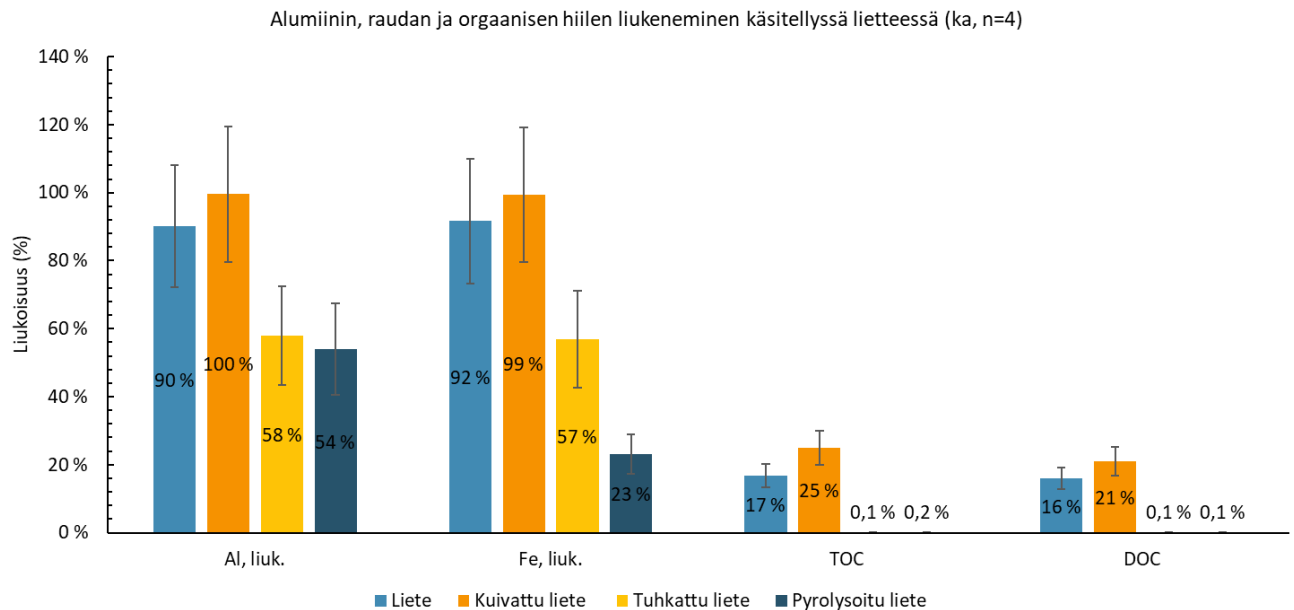
Yhteistyössä Teollisuuden Vesi Oy:n (TeVe) kanssa kesällä 2023 Viikinmäessä toteutettiin liuotuskokeita aiemmassa RAHI-hankkeessa valmistetulla liuotussäiliöllä (30 l). Kokeiden tarkoituksena oli selvittää liuotuksen lämmitystarve, sillä aiemmat kokeet antoivat viitteitä siitä, että lämmitys sinällään voi olla tarpeeton. Saatuja liuotustuloksia analysoitiin tilastollisesti, mutta yhdestäkään analysoidusta vasteesta ei saatu tilastollisesti merkitsevää tulosta. Tulosten perusteella lämmitystä ei voitu todeta tarpeettomaksi. Yksittäisten liuotuksien osalta alumiinin liukoisuus vaihteli 73–108 %:n välillä. Fosforin osalta liukoisuus jäi matalaksi kaikissa kokeissa. Tästä syystä liuotuskokeita jatkettiin laboratoriomittakaavassa testaten eri lietetyyppejä ja niiden tulokset on esitelty seuraavissa kappaleissa.

Jo RAHI-hankkeessa todettiin RAVITA-prosessin vaativan liuotuksen jälkeisen kiintoaineen poiston. Tästä syystä kokeissa tuotetulla metallifosfaattiliuoksella testattiin teollisuudessa jo käytössä olevaa SOFI Filtration Oy:n SF200-suodatinpilottia kiintoaineen poistoon. Metallifosfaattiliuoksen suodatus laitteistolla ei kuitenkaan onnistunut, vaan suodatin tukkeutui. Voidaan siis todeta, että em. suodatusmenetelmä ei ainakaan yksinään sovellu metallifosfaattiliuoksen käsittelyyn.

3.2.2.2 Fosforihappoliuotus 2024

Aiemmassa RAHI-hankkeessa tunnistettiin RAVITA-prosessin kehityskohteiksi fosforihappoliuotuksen fosforitaseen optimointi, liuotuksessa jäljelle jäävän kiintoaineen ja orgaanisen hiilen poisto sekä uutun ajoparametrien optimointi. Vuonna 2024 tutkittiin lietteen kuivauksen, tuhkimuksen ja pyrolysoinnin vaikutusta prosessin fosforitaseeseen. Samalla arvioitiin eri käsittelyjen vaikutusta orgaanisen hiilen pitoisuuteen fosforihappoliuoksessa liuotuksen jälkeen, sillä orgaanisen hiilen on todettu olevan ongelmallinen uuttoprosessissa. Tutkimusta varten RAVITA-pilotilla tuotettua kemiallista lietettä lähetettiin LAB-ammattikorkeakoululle pyrolysoitavaksi ja Savonia-ammattikorkeakoululle tuhkatavaksi.

Kuvassa 3 on esitetty käsiteltyjen materiaalien liukeneminen fosforihappoon (0,5 M), kun liuotusparametrit ovat kaikissa kokeissa vakiot. Kuvasta nähdään, että tuhkimattu liete ja pyrolysoitu liete vaativat suuremmat happomäärät liuotukseen, koska sekä alumiini että rauta liukenevat heikommin. Lietteestä ja ilmakeivästä lietteestä (n. 70 TS-%) liukenee orgaanista hiiltä lähes saman verran, joten lietteen ilmakeiväisyys ei sinällään toimi orgaanisen hiilen liukenevuuden vähentämisessä. Sen sijaan tuhkatusta tai pyrolysoidusta lietteestä orgaanista hiiltä ei käytännössä enää liukene. Pienempi orgaanisen hiilen pitoisuus liuoksessa estää uuttoprosessissa tapahtuvan vaahtoutumisen. Tästä syystä seuraavissa kokeissa keskityttiin optimoimaan tuhkan ja pyrolysoidun lietteen liuotusta.



Kuva 3. Alumiinin, raudan ja orgaanisen hiilen liukeneminen käsitellyssä lietteessä (ka, n=4). Liutusolosuhteet 0,5 M fosforihappo, happoannostus 30 ml/g kuiva-ainetta, liutusaika 60 min ja lämmitys 60 °C.

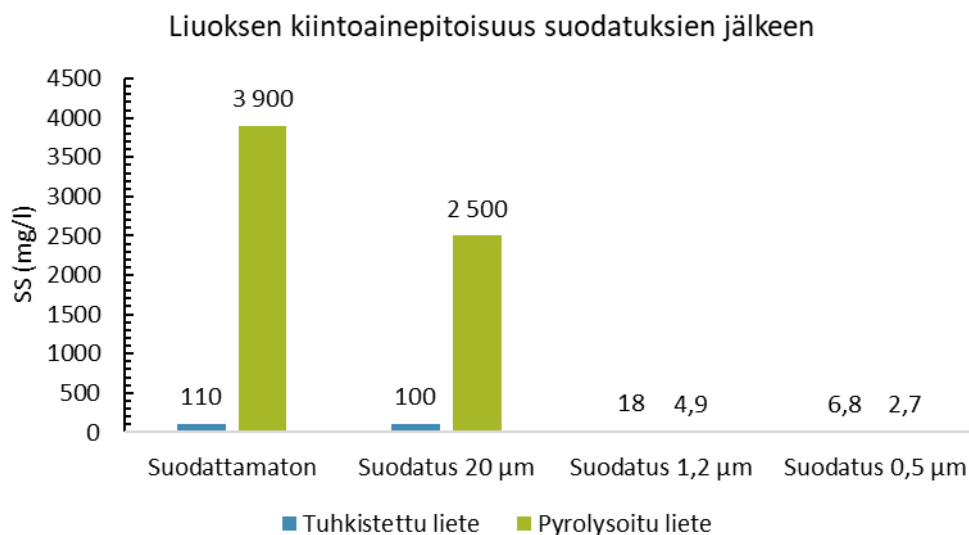
Tuhkatulle ja pyrolysoidulle lietteelle tehtiin fosforihappoliuotuksen optimointikokeet, joilla etsittiin optimaalisia liutusolosuhteita. Koesuunnittelussa hyödynnettiin tilastollista analyysiä, jossa tutkittavina muuttujia olivat nesteen ja kiinteän aineen suhde (LS), hapon pitoisuus ja liutusaika. Vasteena kokeissa käytettiin liuenneen alumiinin pitoisuutta. Tulokset analysoitiin käyttäen R-ohjelmistoa.

Taulukossa 1 on esitetty kummallekin materiaalille ennen tilastollista analyysiä valitut muuttujien arvot, tilastollisen mallin ehdottamat muuttujien optimiarvot ja validointikokeessa saadut tulokset kyseisille arvoille. Pyrolysoidun lietteen kohdalla mallin ennustamat optimiarvot muuttujille tuottavat paremman liukoisuuden kuin aiemmin käytetyt arvot. Optimiarvojen käyttö vaatisi kuitenkin selkeästi sekä suurempaa annosta että korkeampaa fosforihapon pitoisuutta. Tästä syystä ei ole mielekäästi liuottaa pyrolysoitua lietettä fosforihappoon. Tilastollisella analyysin perusteella tuhkatulla lietteellä jo ennen optimointia käytössä olleet liuotuksen muuttujien arvot tuottavat parhaimman mahdollisen liuotustuloksen.

Kuvassa 4 on esitetty suodatuksen vaikutus liuksien kiintoainepitoisuuksiin, kun on liuotettu joko tuhkistettua tai pyrolysoitua lietettä. Molemmassa tapauksissa suodatus 0,5 µm:n suodatimen läpi riittää laskemaan kiintoainepitoisuuden riittävän alas uuttoprosessiin.

Taulukko 1. Tuhkistetun ja pyrolysoidun lietteen fosforihappoliuotuksen käytetyt muuttujien arvot, tilastollisen analyysin ehdottamat optimiarvot kullekin muuttujalle sekä mallin ennuste alumiinin liukoisuudelle ja toteutunut liukoisuus.

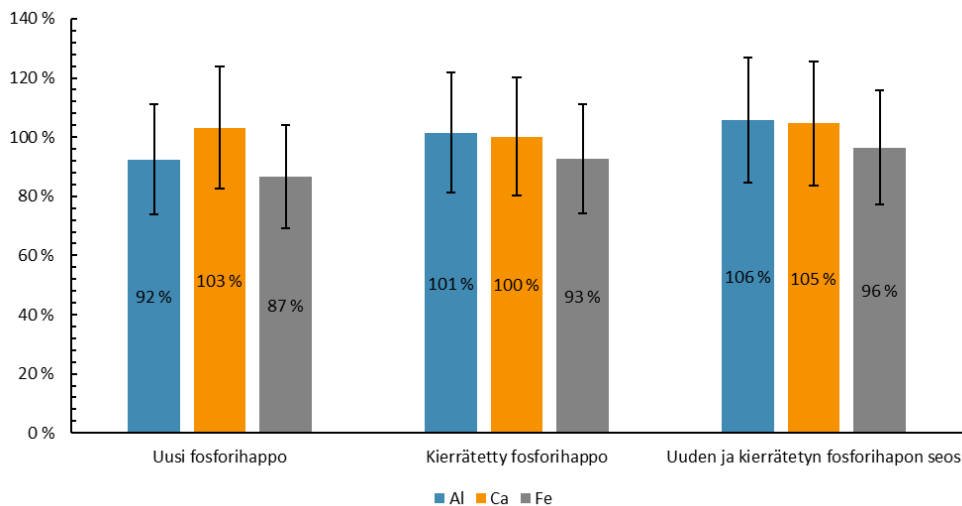
	LS (ml/g ka)	Aika (min)	Hapon pitoisuus (mol/l)	Ennuste (Al %)	Toteutunut (Al %)
Tuhkattu liete					
Optimiarvot	50	155	0,63	98,6	109
Nykyiset arvot	50	60	0,5	88	110
Pyrolysoitu liete					
Optimiarvot	75	198	0,95	114	111
Nykyiset arvot	60	60	0,5	81	76



Kuva 4. Tuhkistetusta ja pyrolysoidusta lietteestä valmistettujen liuoksien kiintoainepitoisuus suodatusten jälkeen (n=1)

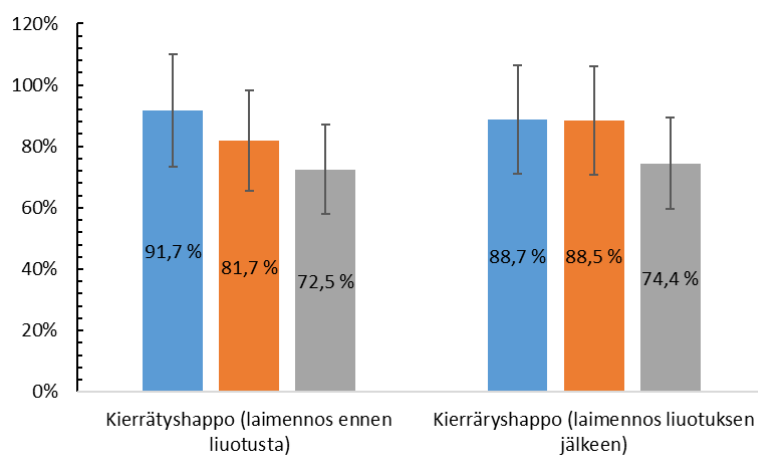
3.2.2.3 Kierrätetyn fosforihapon testaus liuotuksessa 2024–2025

Kappaleessa 4.2.3.3 esitetyn uuttokoeajon tuottamaa fosforihappoliuosta käytettiin uudelleen tuhkan liuotuksessa. Vertailuksi kokeessa liuotettiin tuhkattua lietettä uudella fosforihapolla, kierrätetyllä fosforihapolla ja seoksella, jossa käytettiin kierrätettyä fosforihappoa (95 tilavuus-%) ja uutta fosforihappoa (5 tilavuus-%). Kuvassa 5 on esitetty liuennon alumiinin, raudan ja kalsiumin määrä. Tulosten perusteella voidaan todeta, että kierrätetty fosforihappo toimii, kun uuttoprosessi on erottanut alumiinin riittävän tehokkaasti.



Kuva 5. Liuenneen alumiinin, raudan ja kalsiumin määrä, kun liuotuksessa käytetään uutta fosforihappoa, uutossa tuotettua kierrätettyä fosforihappoa tai näiden seosta (kierrätettyä fosforihappoa (95 til.-%) ja uutta fosforihappoa (5 til.-%)) (n=4, hapon määrä 60 ml/g ka, hapon pitoisuus 0,5 M ja liuotusaika 60 min ja lämmitys 50 °C)

Keväällä 2025 jatkettiin kierrätetyn fosforihapon käytön tutkimuksia. Käytettävä kierrätys-happo tulee liuotusta varten laimentaa samaan pitoisuuteen kuin prosessin käynnistyksessä käytettävä uusi fosforihappo. Tässä kokeessa tarkasteltiin miten veden lisääminen ennen tai jälkeen liuotuksen vaikuttaa liuotustulokseen. Kuvassa 6 on esitetty alumiinin, raudan ja kalsiumin liukenevuus. T-testin perusteella ei ole vaikutusta sillä laimennetaanko kierrätys-happo oikeaan pitoisuuteen ennen tai jälkeen liuotuksen. Liuotuksen toteuttamisen kannalta on kuitenkin käytännöllisempää tehdä laimennus ennen hapon käyttöä kemiallisen lietteen liuotuksessa.



Kuva 6. Liuenneen alumiinin, raudan ja kalsiumin määrä, kun liuotuksessa käytetään uutossa tuotettua kierrätettyä fosforihappoa (n=3, hapon määrä 50 ml/g ka, hapon pitoisuus 0,5 M ja liuotusaika 60 min ja lämmitys 50 °C)

3.2.2.4 Typpihappoliuotukset 2024

Hankkeen aikana tarkasteltiin myös mahdollisuutta vaihtaa fosforihappo toiseen happoon liuotuksessa. Vaihtoehtoiseksi hapoksi valittiin typpihappo ja sen toimivuutta liuotuksessa testattiin kuivatulla kemiallisella lietteellä ja tuhkatulla lietteellä.

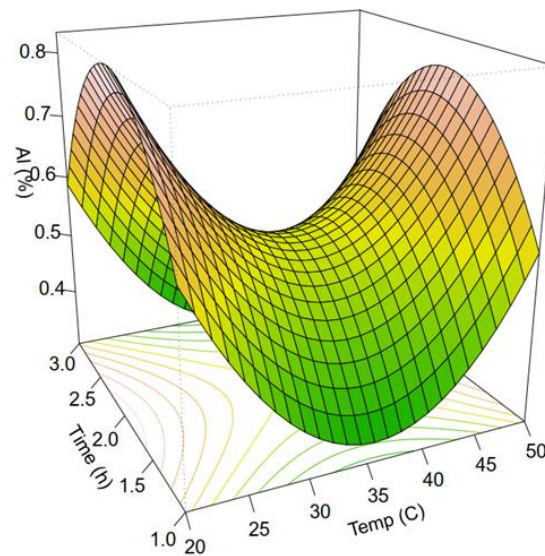
Kuivatulle kemialliselle lietteelle (98 TS-%) määritettiin optimiarvot typpihappoliuotuksessa toteuttamalla tilastolliseen suunnitteluun perustuva koesarja. Tutkittavina muuttujia olivat nesteen ja kiinteän aineen suhde (LS) (5–30 ml/g ka), typpihapon pitoisuus (0,1–0,5 M), liuotusaika (1–3 h) ja liuotuksen lämpötila (20–50 °C). Vasteena kokeissa käytettiin liunneen alumiinin ja fosforin pitoisuutta ja tulokset analysoitiin käyttäen R-ohjelmistoa. Tutkitulla koealueella ei löydetty mallia, joka antaisi vasteelle maksimaalisen tuloksen, koska mallin muuttujien toisen asteen vaikutukset muodostavat ns. satulan. Kuva 7 havainnollistaa satulan, kun vasteena on alumiinin liukeneminen ja muuttujina aika ja lämpötila. LS-suhde ja hapon pitoisuus ovat kuvaajassa vakiot. Vaikka varsinaista maksimaalista fosforin liukoisuutta ei saada määritettyä, niin voidaan todeta, että taulukossa 2 esitetyillä muuttujien arvoilla saavutetaan 86 % fosforin liukoisuus.

Kuivatulle tuhkatulle lietteelle määritettiin optimiarvot typpihappoliuotuksessa toteuttamalla tilastolliseen suunnitteluun perustuva koesarja. Tutkittavina muuttujia olivat nesteen ja kiinteän aineen suhde (LS) (30–60 ml/g ka), typpihapon pitoisuus (0,25–0,75 M) ja liuotusaika (1–3 h). Liuotuksen lämpötila pidettiin vakiona 50 °C. Vasteina kokeissa käytettiin liunneen alumiinin pitoisuutta ja liunneen fosforin massaa ja tulokset analysoitiin käyttäen R-ohjelmistoa. Tutkitulla koealueella löydettiin malli, jolla saavutetaan maksimaalinen liukeneminen fosforille. Kyseinen koepiste ennustaa kuitenkin reilusti yli 130 prosentin saantoa, joten tuotetun mallin avulla etsittiin muuttujille realistisemmat arvot. Taulukkoon 2 on esitetty muuttujien arvot, joilla fosforin liukenevuus ennustetaan olevan 100 %. Malli ennustaa fosforin liukenevuuden yläkanttiin, siitä syystä, että yksittäisissä koepisteissä saavutettiin fosforin liukenevuudeksi yli 100 % suhteessa tuhkan sisältämään määrään fosforia. Tämä johtuu sekä tuhkan että typpihappoliuosten analyysien mittausepävarmuuksista.

Typpihappoliuotuksella saadaan fosfori liukenemaan onnistuneesti sekä lietteestä, että tuhkasta. Haasteena kuitenkin on liuotuksessa muodostuvan HNO₃/H₃PO₄-seoksen hyödynnettävyys. Tällä hetkellä sille ei ole tiedossa käyttökohteita, minkä takia kyseisen prosessivaihtoehdon tutkiminen pidemmälle ei ole kannattavaa.

Taulukko 2. Kuivatun kemiallisen lietteen ja tuhkatun lietteen optimiarvot typpihappoliuotukselle ja mallien antama ennuste fosforin liukoisuudelle kyseisillä arvoilla.

	LS (ml/g ka)	Aika (min)	Typpihapon pitoisuus (mol/l)	Lämmitys (°C)	Liukoisuus (P %)
Kemiallinen liete	30	60	0,5	20	86
Tuhkattu liete	45	60	0,5	50	100



Slice at LS = 17.5, Conc = 0.3

Kuva 7. Ajan ja liuotuksen lämpötilan vaikutus alumiinin liukoisuuteen (%) kemiallisesta lietteestä kuvattuna vastepintana, kun LS-suhde ja typpihapon pitoisuus ovat vakioita.

3.2.3 Uttokokeet

3.2.3.1 Jatkuva toiminen uuttokoeajo 2023

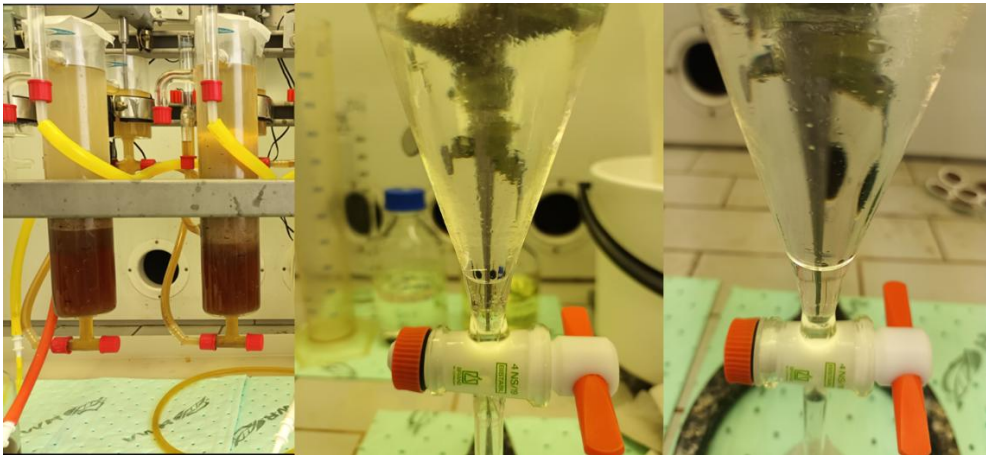
Vuonna 2023 RAVITA™-prosessin viimeistä yksikköprosessia eli neste-neste-uttoa kehitettiin laboratoriomittakaavassa. Vuosi aloitettiin uuton koeajojen osalta ns. benchmarking-ajolla, jonka tarkoituksena oli ajaa Viikinmäen laboratorion pöytämittakaavan uuttolaitteistoa silloisilla optimiparametreilla mahdollisimman pitkään. Uutossa käytetty metallifosfaattiliuos tuotettiin liuottamalla pieniä eriä tertiärilietettä laboratoriossa. Tuotettu metallifosfaattiliuos esikäsiteltiin sentrifugoimalla ennen syöttämistä uuttoon. Koeajoa pystyttiin ajamaan n. 36 tunnin verran, mikä vastaa seitsemää orgaanisen väliaineen sykliä. Yksi orgaanisen väliaineen sykli kuvaa tilannetta, jossa orgaaninen liuos on kiertänyt koko laitteiston läpi. Seitsemän syklin jälkeen uutossa tapahtuva vaahtoutuminen aiheutti sen, että koe piti päättyä. Tästä syystä koeajo jäi suunniteltua lyhyemmäksi. Tulokset olivat kuitenkin lupaavia, sillä alumiinin uuttoteho vaihteli 60–75 %:n välillä, mikä on aiempiin kokeisiin (50–58 %) verrattuna parempi tulos. Alumiinin takaisinuton teho nousi välille 30–44 %, aiemman n. 20 % sijaan mutta oli edelleen riittämättömällä tasolla.

Uuton optimointia jatkettiin kokeissa siten että nesteiden kontaktaikaa pidennettiin laskemalla pumppujen syöttönopeuksia. Pidemmän kontaktaijan ansiosta alumiinin uuttoteho nousi yli 80 %:n (86–95 %) ja takaisinuton teho oli 60–70 %. Vaahtoutuminen aiheutti kuitenkin sen, ettei tätäkään ajoa kyetty jatkamaan seitsemää orgaanista sykliä pidempään.

Vuonna 2023 ensimmäisessä uuttokoeajossa tuotettua fosforihappoa testattiin myös lietteen liuotuksessa. Kolmen rinnakkaisen kokeen perusteella alumiinia liukeni 47 % ja fosforia 11 %. Matala fosfortulos viittaa siihen, että näissä kokeissa ensimmäisenä lietteestä liukenee alumiinihydroksidi, jonka jälkeen alumiinifosfaatti alkaa liueta. Tässä kokeessa oli kuitenkin käytössä fosforihappoliuos, josta ei kaikkea alumiinia ollut poistettu, joten se on osaltaan myös heikentänyt tulosta.

3.2.3.2 Uuton panoskokeet 2024

Kappaleessa 3.2.2.2 esitettyjen optimiarvojen pohjalta valmistettiin tuhkistetusta ja pyrolysoidusta lietteestä fosforihappoliuoksia, joita käytettiin uuton panoskokeissa vesifaasina. Liuokset tuotiin kontaktiin RAVITA-prosessissa käytettävän orgaanisen faasin kanssa siten että vesifaasi-orgaaninen faasi -tilavuussuhde oli 1:3. Tuhkatusta lietteestä valmistetulla liuoksella saavutettiin alumiinin uuttumiselle 76 %:n uuttoteho ja pyrolysoidulle lietteelle 78 %:n teho. Lisäksi todettiin, että kummassakaan tapauksessa ei muodostunut uuton aikana prosessia häiritsevää sakkaa faasien väliin, kuten kuvasta 8 havaitaan.

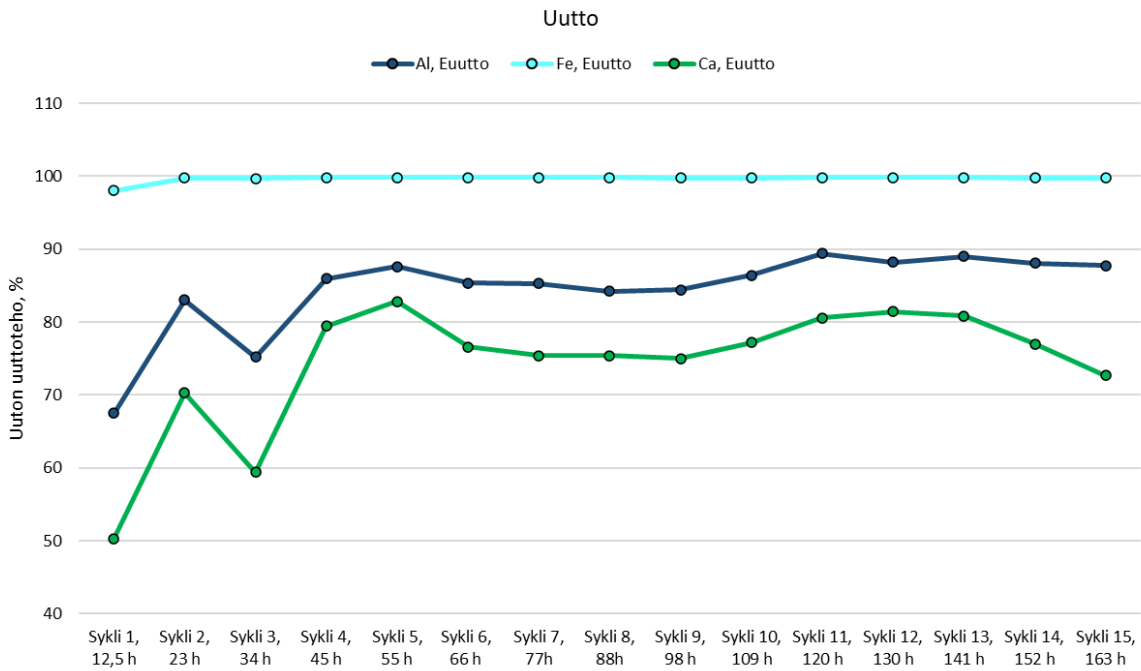


Kuva 8. Vasemmalla kemiallisesta lietteestä valmistetun liuoksen koeajouutto, jossa on sakkaa. Keskellä panosuutto, jossa vesifaasi on valmistettu tuhkatusta lietteestä ja oikealla panosuutto, jossa vesifaasi on valmistettu pyrolysoidusta lietteestä.

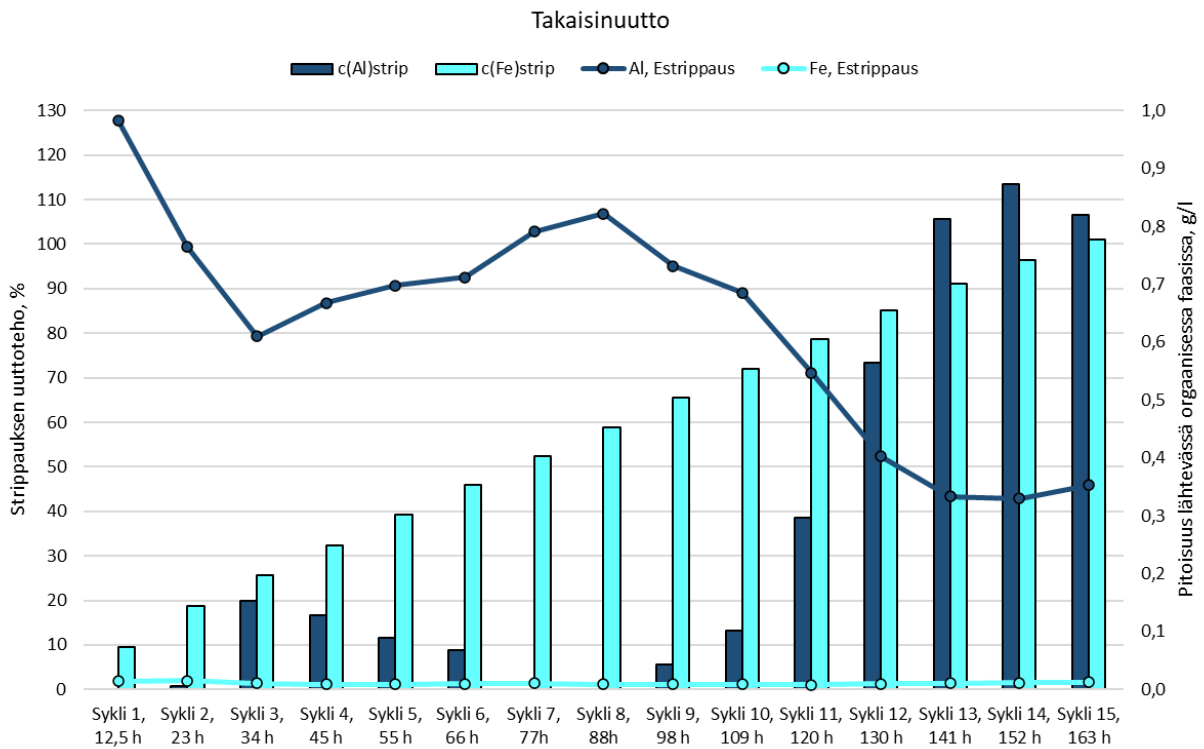
3.2.3.3 Jatkuvatoiminen uuttokoeajo 2024

Tuhkistetusta lietteestä valmistetulla metallifosfaattiliuoksella toteutettiin jatkuvatoiminen uuttokoe laboratoriomittakaavan koelaitteistolla. Kokeen kesto oli 15 orgaanista sykliä, missä yksi sykli tarkoittaa, että orgaaninen faasi kiertää koko uuttoprosessin läpi. Faasien rajapinnoille ei koko kokeen aikana (n. 162,5 h) muodostunut lainkaan aiemmissa koeajoissa havaittua sakkaa tai vaahtoa.

Kuvassa 9 nähdään kokeessa määritettyjen alkuaineiden uuttotehot. Alumiinin uuttoteho säilyi prosessin tasapainottumisen jälkeen korkealla tasolla (80–90 %). Tulos on parempi kuin aiemmin vastaavissa kokeissa on saavutettu. Rauta, jota on huomattavasti pienempi pitoisuus liuoksessa, uuttui koeajossa kokonaisuudessaan. Kuvassa 10 on esitetty alumiinin ja raudan takaisinuuuton teho ja niiden pitoisuudet orgaanisessa faasissa kussakin syklissä. Kuten kuvasta 10 havaitaan, rauta ei uutu pois orgaanisesta faasista vaan pitoisuus kasvaa koko koeajon ajan. Mahdollisesti raudan kertymisen seurauksena myös alumiinin takaisinuuuttumisen tehossa havaitaan notkahdus kahdeksannen syklin jälkeen. Vastaavaa ei ole havaittu aiemmissa kokeissa, joiden kesto oli lyhyempi.



Kuva 9. Jatkuvatoimisen uuttokoeajon 2024 uuttotehot (%) alumiinille, raudalle ja kalsiumille.

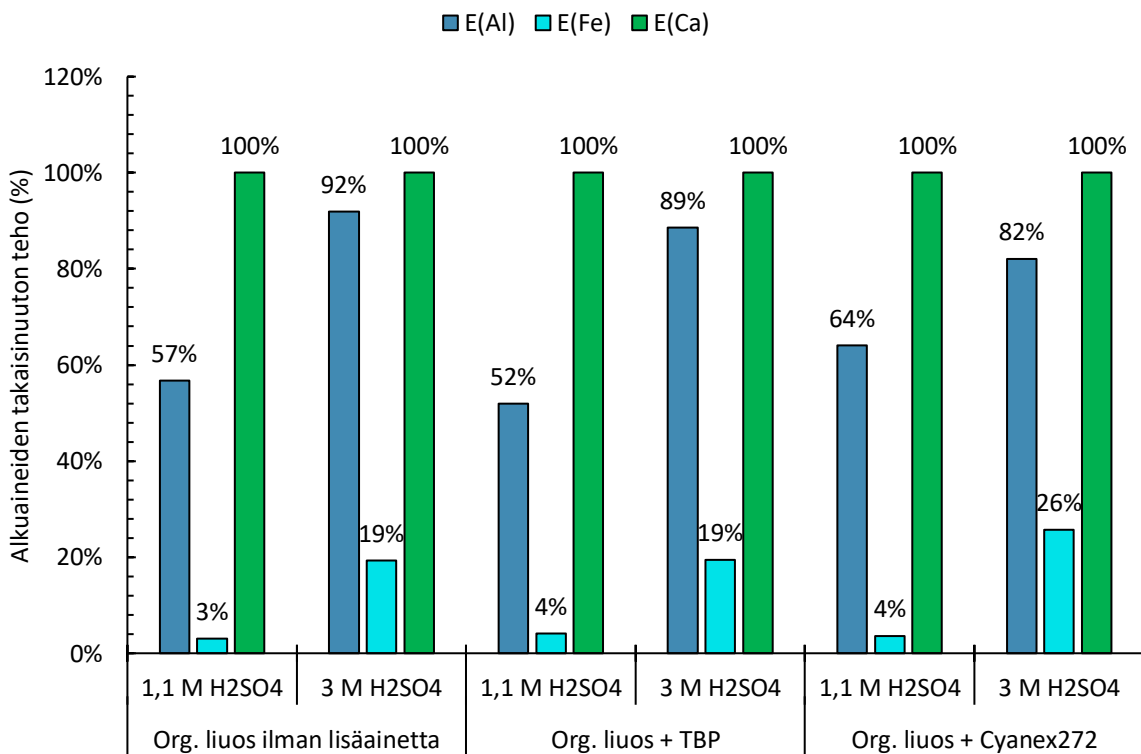


Kuva 10. Alumiinin ja raudan takaisinuuuton (strippauksen) teho (viiva) jatkuvatoimisessa koeajossa. Pylväskaaviona esitetty alumiinin ja raudan pitoisuudet orgaanisessa faasissa.

3.2.3.4 Raudan takaisinuuton parantaminen 2024

Laboratoriomittakaavan uuttokoeajossa raudan todettiin kertyvän orgaaniseen faasiin. Tämä saattaa aiheuttaa jatkuvatoimisessa prosessissa häiriöitä myös alumiinin uuttotehoon, joten raudan takaisinuuttoa orgaanisesta liuoksesta on tärkeää parantaa. Kirjallisuuskatsauksen perusteella lisäaineen käyttö orgaanisessa liuoksessa voi tehostaa raudan takaisinuuttumista. Esiselvitysten pohjalta testattaviksi lisäaineiksi valittiin tributyylifosfaatti (TBP) ja dialkyylnifosfiinihappo (Cyanex 272).

Kuvassa 11 on esitetty alumiinin, raudan ja kalsiumin takaisinuuttuminen orgaanisista faaseista, joissa on käytetty eri lisäaineita. Takaisinuuton vesifaaseina käytettiin 1,1 molaarista rikkihappoa, jota on käytetty koeajoissa aiemmin, ja väkevämpää 3 molaarista rikkihappoa. Raudan takaisinuutto paranee, kun käytössä on väkevämpi rikkihappoliuos ja orgaanisessa faasissa on lisäaineena käytössä Cyanex 272. Näiden tulosten perusteella vuonna 2025 toteutettavassa jatkuvatoimisessa koeajossa orgaaniseen faasiin lisätään Cyanex 272:ta ja käytetään takaisinuutossa väkevämpää rikkihappoa (3 M).



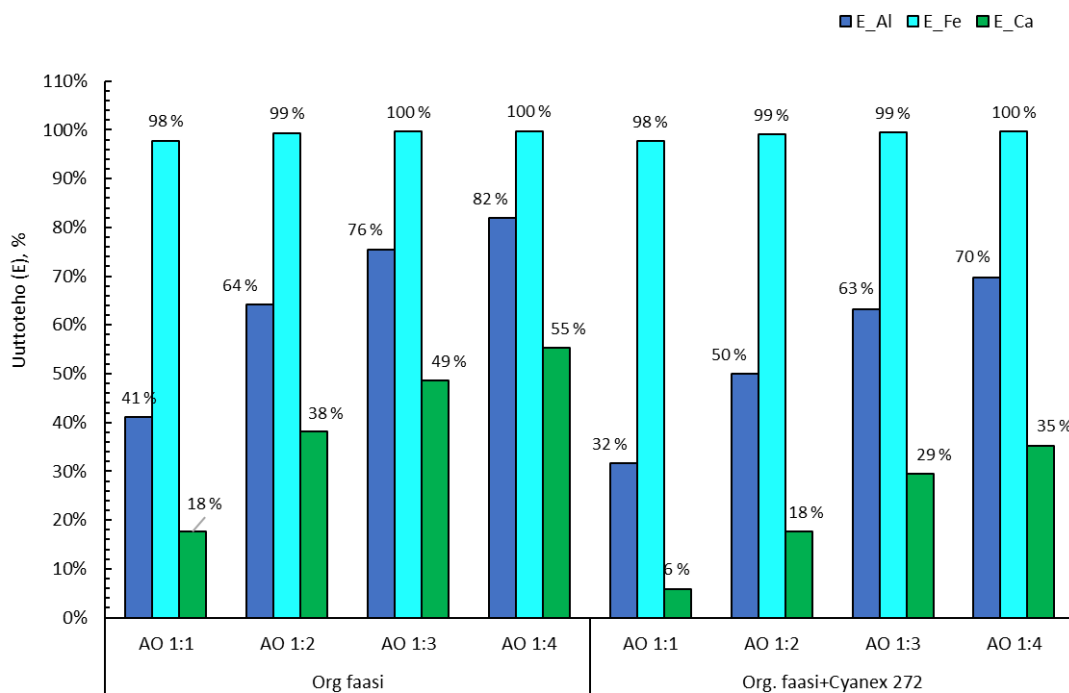
Kuva 11. Lisäaineiden vaikutus alumiinin, raudan ja kalsiumin takaisinuuton toimivuuteen, kun vesifaasina käytetään joko 1,1 M tai 3 M rikkihappoa (ka, n=2) ja AO-suhde on 1:1.

3.2.3.5 Uuton ja takaisinuuton panoskokeet 2025

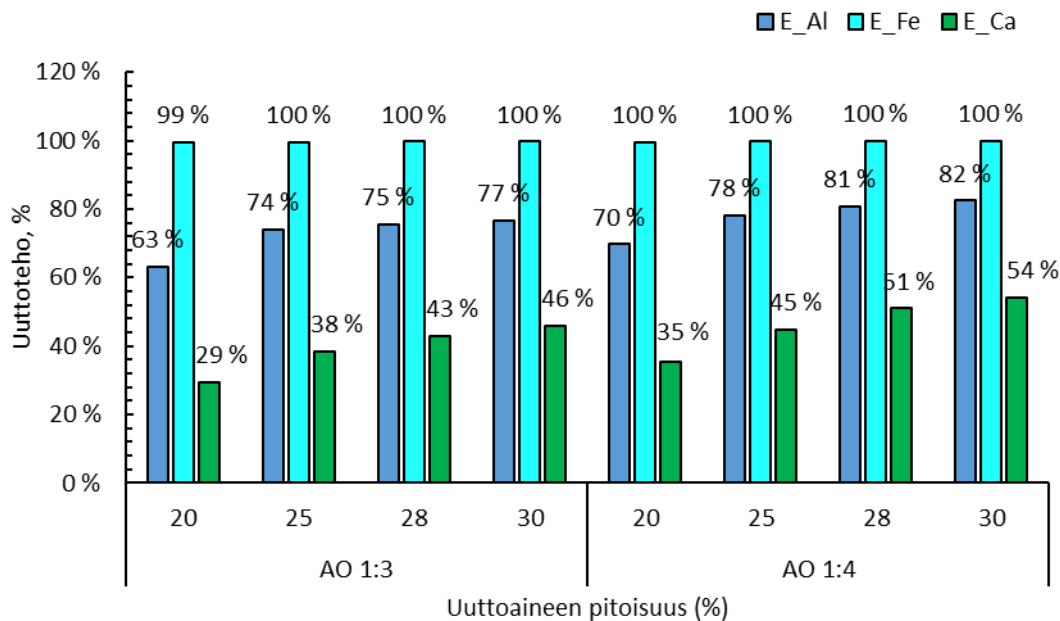
Vuoden 2025 jatkuvatoimiseen koeajoon valittiin lisäaineeksi orgaaniseen faasiin Cyanex 272, jonka tarkoitus on parantaa raudan takaisinuuttoa. Lisäaine ei voi kuitenkaan heikentää alumiinin uuttotehoa uuttoprosessin aikana, joten lisäaineen vaikutuksia uuttoon tarkasteltiin panoskokein eri AO-suhteilla (vesifaasin suhde orgaaniseen faasiin) ja eri orgaanisen faasin pi-

toisuuksilla. Kuvassa 12 on esitetty AO-suhteen muutoksen vaikutus alumiini, raudan ja kalsiumin uuttotohtoon. Kuvasta 12 nähdään, että lisääineen kanssa alumiinin uuttotohto on hieinan matalampi. Tästä syystä jatkuvatoimiseen koeajoon on myös nostettava orgaanisen faasin uuttoaineen pitoisuutta.

Kuvassa 13 on esitetty tulokset orgaanisille faaseille, joissa on eri pitoisuus uuttoainetta ja lisääinetta Cyanex 272 vakiomäärä. Näissä kokeissa tutkittiin kahta AO-suhdetta 1:3 ja 1:4 koska ne antoivat parhaimman uuttotohton alumiinille lisääineen kanssa. Kuvan 13 perusteella AO-suhde 1:4 nostaisi alumiinin uuttotohtoa hivenen korkeammalle, mutta teknisesti kyseisen AO-suhteen toteuttaminen jatkuvatoimisella uuttolaitteistolla ei ole mahdollista. Pienemmällä AO-suhteella (1:3) alumiinin uuttotohto nousee, kun uuttoaineen pitoisuus orgaanisessa liuoksessa nousee 20 tilavuusprosentista 25 tilavuusprosenttiin. Sitä suuremmilla pitoisuuksilla alumiinin uuttotohto ei enää merkittävästi nouse. Täten jatkuvatoimiseen koeajoon valitaan AO-suhde 1:3 ja orgaanisen faasin uuttoaineen pitoisuudeksi 25 tilavuusprosenttia ja lisääineeksi Cyanex 272.



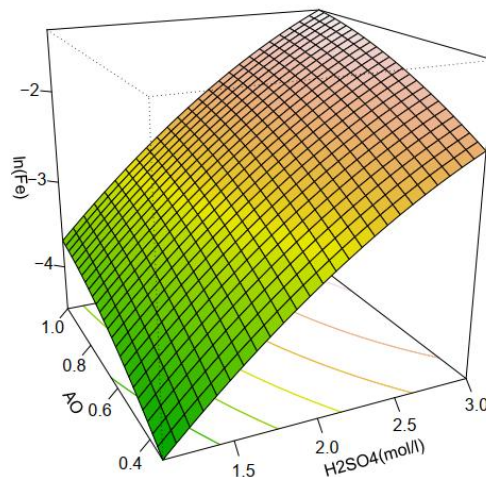
Kuva 12. AO-suhteiden vaikutus alumiinin, raudan ja kalsiumin uuttotohtoon ilman Cyanex 272 lisäystä (vas.) ja Cyanex 272 lisäyksellä (n=2)



Kuva 13. Uttoaineen pitoisuuden vaikutus alumiinin, raudan ja kalsiumin uuttotehoon AO-suhteilla 1:3 ja 1:4 (n = 2)

Seuraavaksi panoskokeissa tarkasteltiin uuden lisäaineen vaikutusta alumiinin, raudan ja kalsiumin takaisinuuuttoon eli kyseisten alkuaineiden siirtymiseen takaisin orgaanisesta faasista vesifaasiin, joka RAVITA-prosessissa on rikkihappo. Koe toteutettiin faktorianalyysinä, jossa tutkittavia muuttujia olivat rikkihapon pitoisuus (1,1–3 M), AO-suhte (1:1–1:3) ja lisäaineen pitoisuus (0–11 %). Lämpötila (50 °C) ja kontakiaika (20 min) pidettiin kokeessa vakiona. Vasteena kokeissa käytettiin alumiinin ja raudan takaisinuuuttotehoa ja tulokset analysoitiin käyttäen R-ohjelmistoa. Kalsiumin todettiin takaisinuuuttuvan kaikissa koepisteissä kokonaan, joten sille ei tehty erillistä analyysiä.

Alumiinin takaisinuuuttoteho kasvoi, kun rikkihapon pitoisuutta nostettiin. Paras raudan takaisinuuuttoteho saavutettiin, kun sekä rikkihapon että lisäaineen pitoisuus oli suurimmillaan ja AO-suhdetta kasvatetaan. Kuvassa 14 on esitetty vastepinta-kuvaaja raudan takaisinuuuttotehosta, kun lisäaineen pitoisuus on 11 tilavuusprosenttia. Siitä nähdään, että AO-suhteen ja hapon pitoisuuden kasvaessa takaisinuuuttoteho kasvaa. Aiemmissa kokeissa on kuitenkin todettu, että myös pitkä kontakiaika vesifaasin ja orgaanisen faasin välillä tehostaa takaisinuuuttotehoa raudalla ja alumiinilla. Tästä syystä koeajoon haluttiin mahdollisimman pitkä kontakiaika, jolloin pumpun syöttönopeuksien takia AO-suhteeksi valittiin takaisinuuutolle AO-suhte 1:1,5.



Kuva 14. AO-suhteen ja rikkihapon pitoisuuden (mol/l) vaikutus raudan takaisinuu-ton tehoon vastepintana, kun lisäaineen pitoisuus on 11 tilavuusprosenttia. (Kuvassa luonnollinen loga-ritmi raudan takaisinuu-ton tehosta)

3.2.3.6 Jatkuvatoiminen uuttokoeajo ja fosforihapon kierrätys 2025

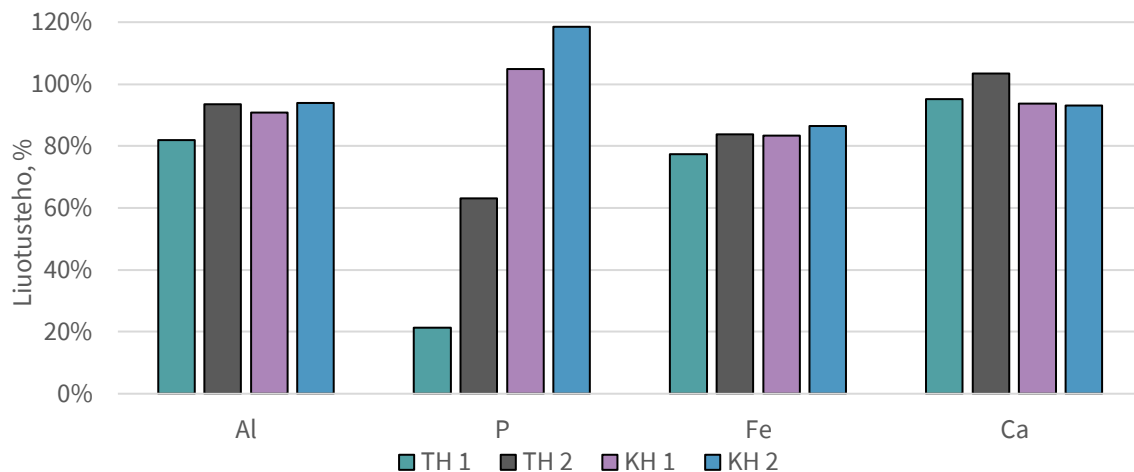
Vuonna 2025 toteutettiin uuttoprosessin koeajo laboratoriomittakaavan laitteistolla, jonka tavoitteena oli testata fosforihapon kierrätystä liuotukseen, sekä parantaa uuttoa ja takaisinuu-ton tehoja alumiinin ja raudan osalta. Kokeessa käytettiin kappaleessa 3.2.3.5 esiteltujen panos-kokeiden perusteella valittuja optimiarvoja. Kokeen kesto oli 15 orgaanista sykliä (n. 187,5 h), missä yksi sykli tarkoittaa, että orgaaninen faasi kiertää koko uuttoprosessin läpi.

Kuvassa 15 on esitetty tuoreella fosforihapolla (TH) ja kierrätetyllä fosforihapolla (KH) toteutettujen liuotusten toimivuus prosentteina. Kummallakin hapolla tehtiin kaksi liuotuskertaa. Alumiinin, kalsiumin ja raudan liuotustehot pysyivät hyvinä kierrätetyn hapon liuotuksissa. Fosforin liuotusteho kasvoi kierrätetyllä hapolla. Kuvassa 16 on esitetty miten alumiinin, fosforin, kalsiumin ja raudan pitoisuudet kasvavat kierrätysshappoa käytettäessä.

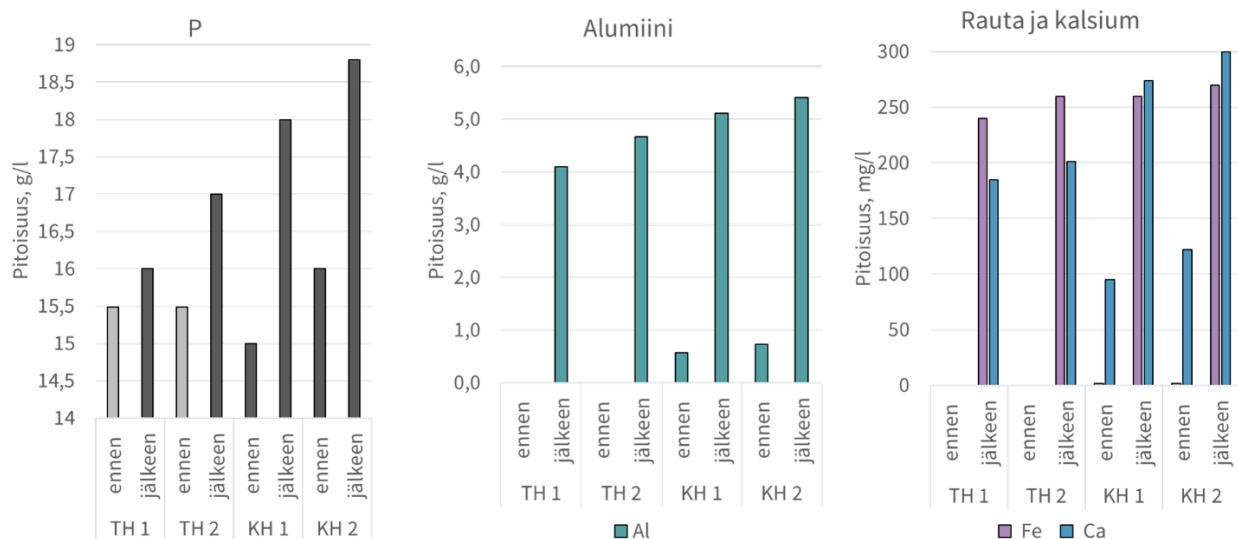
Kuvassa 17 nähdään alumiinin, raudan ja kalsiumin uuttotehot sekä orgaaniseen faasiin ker-tyneet pitoisuudet kutakin alkuainetta kussakin syklissä. Kaikkien kolmen uuttotehot pysyvät tasaisena koko koeajon ajan. Alumiinin uuttoteho (83–86 %) jää hieman panoskokeiden poh-jalta tehtyä ennustetta (91 %) pienemmäksi, mutta on vastaavalla tasolla kuin vuoden 2024 koeajossa. Kalsiumilla uuttoteho on (37–54 %), ja se jää ennustettua uuttotehoa (57 %) pie-nemmäksi. Rauta uuttuu edelleen täysin (≥ 99 %), kuten aiemmassakin koeajossa. Kuva 16 havainnollistaa, että syklin 10 jälkeen alumiinin pitoisuus orgaanisessa faasissa kasvaa. Ky-seisessä kohdassa koeajoa on siirrytty käyttämään kierrätetyllä fosforihapolla valmistettua syöttöliuosta. Kierrätysshapolla valmistetussa liuoksessa alumiinin pitoisuus on korkeampi, jol-loin sitä siirtyy enemmän orgaaniseen faasiin. Lisäksi takaisinuu-tossa alumiinin uuttoteho heikkenee (kts seuraava kappale).

Kuvassa 18 on esitetty alumiinin, raudan ja kalsiumin takaisinuu-totehot ja orgaanisen faasin pitoisuudet kullekin alkuaineelle kussakin syklissä takaisinuu-ton jälkeen. Kalsium uuttuu lähes täysin (≥ 98 %) takaisinuu-tossa. Alumiinin uuttoteho (92–100 %) on lähes täydellistä ensim-mäisen 10 syklin aikana, jolloin käytössä on tuoreella hapolla valmistettu metallifosfaattiliuos. Tämän jälkeen syklien 11–15 aikana nähdään notkahdus takaisinuu-ton tehossa (61–87 %). Heikentyminen on vastaavanlainen mikä havaittiin vuoden 2024 koeajossa, mutta tällä kertaa notkahdus ei ole yhtä voimakas kuin silloin (takaisinuu-toteho vuonna 2024 alumiinille 43–71

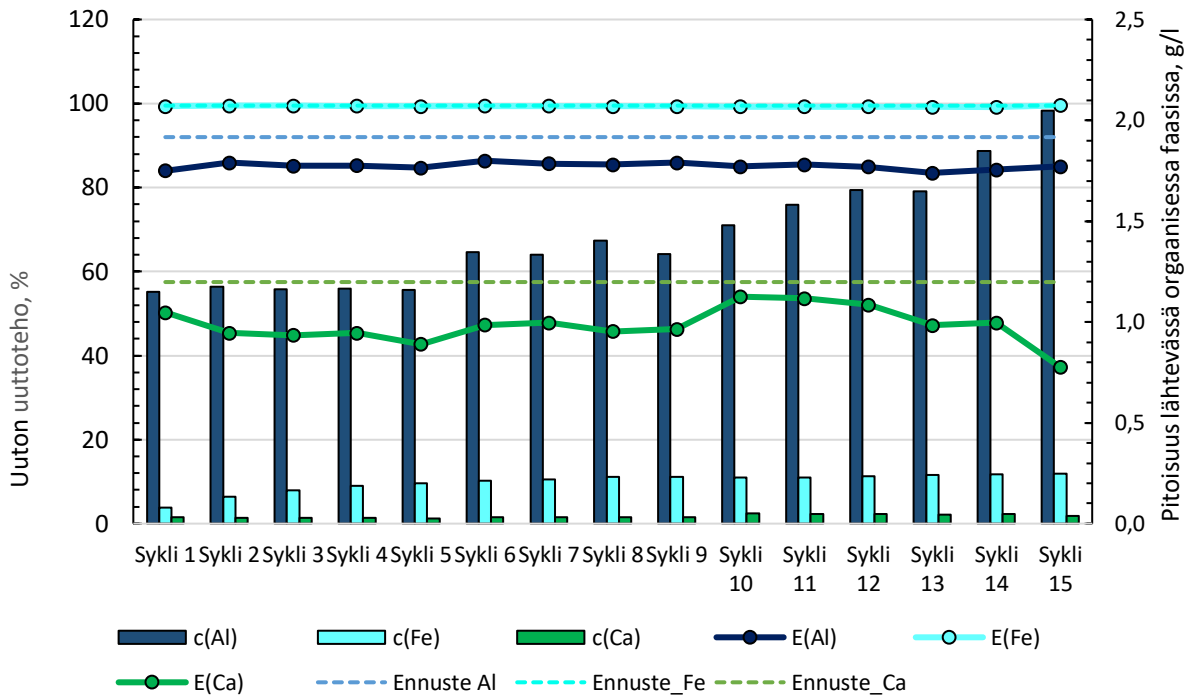
%). Tämä takaisinuuuttotehon lasku johtuu siitä, että alumiinin pitoisuus metallifosfaattiliuoksessa kasvaa siirryttäessä käyttämään kierrätysshappoa (kuva 16). Tällöin orgaaniseen faasiin siirtyy uutossa enemmän alumiinia, mutta takaisinuuutossa rikkihappo ei kykene uuttamaan ylimäärää alumiinia takaisin vesifaasiin. Tämän seurauksena alumiinin määrä kasvaa joka syklin aikana näin edelleen heikentäen takaisinuuuton tehoa. Tästä syystä seuraavissa koeajoissa tulee tarkemmin laimentaa kierrätysshappoa, jotta alumiinin pitoisuus ei kasva liian suureksi.



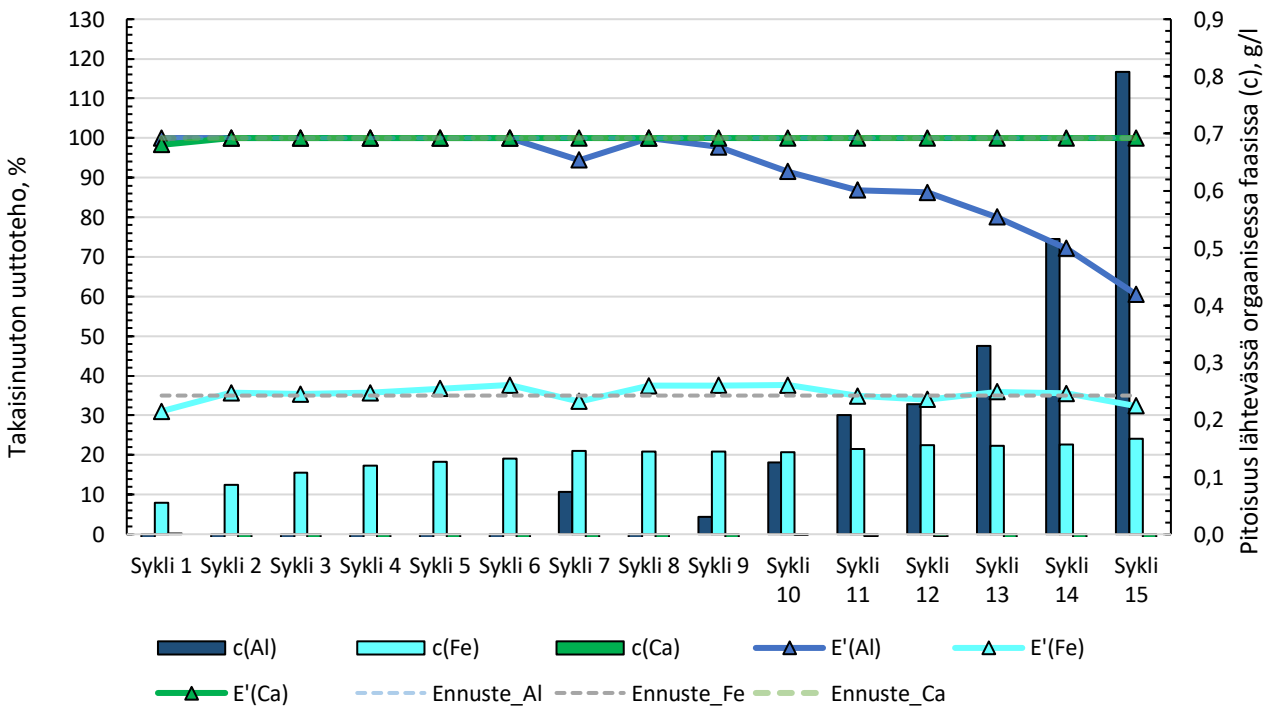
Kuva 15. Alumiinin, raudan, fosforin ja kalsiumin liutustehot prosentteina tuoreen fosforihapon (TH) ja kierrätetyn fosforihapon (KH) kanssa



Kuva 16. Alumiinin, fosforin, kalsiumin ja raudan pitoisuuksien muutos tuoreen fosforihapon (TH) ja kierrätetyn fosforihapon (KH) liutuksissa



Kuva 17. Alumiinin, kalsiumin ja raudan uuton teho (viiva) jatkuvatoimisessa koeajossa. Pylväskaaviona esitetty alumiinin ja raudan pitoisuudet orgaanisessa faasissa ja katkoviivalla panoskokeiden perusteella laskettu uuttotehon ennuste



Kuva 18. Alumiinin, kalsiumin ja raudan takaisinuuuton teho (viiva) jatkuvatoimisessa koeajossa. Pylväskaaviona esitetty alumiinin ja raudan pitoisuudet orgaanisessa faasissa ja katkoviivalla panoskokeiden perusteella laskettu takaisinuuuton tehon ennuste

3.2.4 Lietehiilen aktivointi ja käyttö jäteveden haitta-aineiden poistossa

3.2.4.1 Panoskokeet

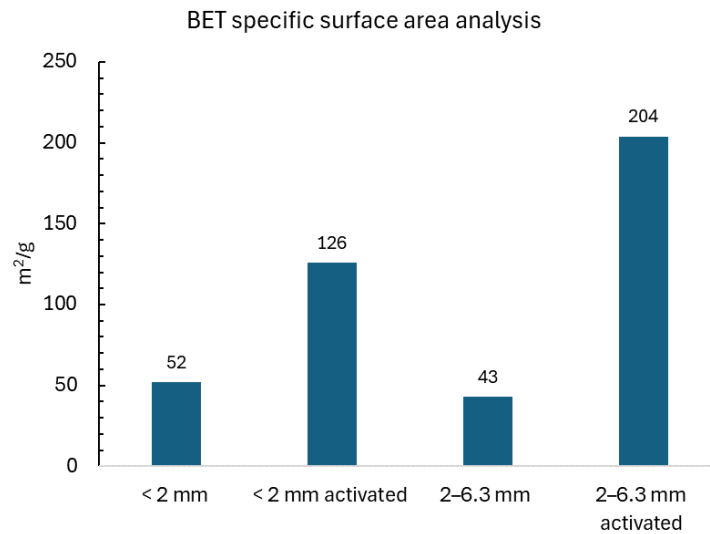
HSY:n Ämmässuon koetoimintalaitoksella pyrolyysillä valmistetun lietehiilen aktivointia ja sen käyttöä jäteveden haitta-aineiden poistossa tutkittiin opinnäytetyönä vuonna 2024 (Kasanen, 2024). Työn toteutti Niilo Kasanen Lappeenranta-Lahden teknillisestä yliopistosta. Lietehiilen aktivointi ja siihen liittyvät analyysit tilattiin Biosampo-tutkimuskeskukselta, joka on osa Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulua (Xamk). Lähtevän jäteveden haitta-aineiden adsorptiokokeet toteutettiin Viikinmäen jätevedenpuhdistamon laboratoriossa. Kokeissa tarkasteltiin aktivoitujen lietehiilen partikkelikoon (<2 mm ja 2–6 mm), hiilen annoksen (5–60 g/l) ja kontaktiajan (20–120 min) vaikutusta haitta-aineiden reduktioon. Kokeissa määritettiin uudessa EU:n yhdyskuntajätevesidirektiivissä listatut 12 haitta-ainetta ja niiden reduktiot aktivoitulla lietehiilellä. Haitta-ainemääritykset tilattiin Eurofins Environmental Testing Finland Oy:ltä.

Kuvassa 19 on esitetty Brunauer-Emmett-Teller (BET) analyysin eli ominaispinta-alan mittauksen tulokset lietehiilen partikkelikoon mukaan. Kuten kuvasta nähdään, aktivointi onnistui molemmilla partikkelikokoluokilla. Aktivoitujen lietehiilen ominaispinta-ala jää kuitenkin selvästi pienemmäksi kuin tavanomaisen, kivihiilipohjaisen aktiivihien ominaispinta-ala (900–1100 m²/g). Tästä huolimatta haitta-aineiden poistokokeet onnistuivat, ja pienimmälläkin annoskolla (5 g/l) saavutettiin n. 90 %:n reduktio kaikille mitatuille haitta-aineille.

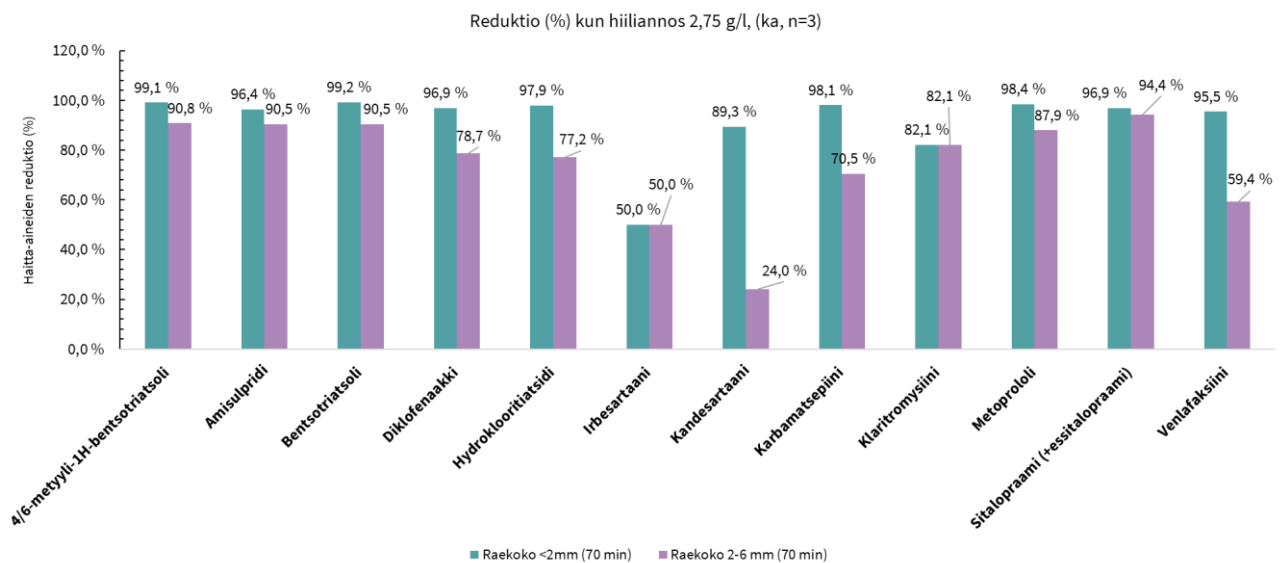
Opinnäytetyön lupaavien tulosten pohjalta toteutettiin syksyllä 2024 lisää haitta-aineiden adsorptiokokeita, joissa tarkasteltiin aiempaa pienemmän annoskoon (0,5–5 g/l) vaikutusta haitta-aineiden poistoon, sekä mitattiin absorbanssi aallonpituudella UV 254nm. Kuvassa 20 on esitetty adsorptiokokeiden ns. keskipisteen tulokset, jossa lietehiilen annos on 2,75 g/l ja kontaktiaika 70 minuuttia. Pienemmällä partikkelikolla (< 2 mm) saavutetaan hyvä poistuma kaikilla kahdeksalla haitta-aineella, joita havaittiin kokeessa. Suuremman partikkelikoon (2–6 mm) poistoteho oli selkeästi heikompi karbamatsepiinin ja venlafaksiinin kohdalla.

Tilastollisen analyysin perusteella muiden haitta-aineiden kohdalla poistotehossa ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa partikkelikokojen välillä, mutta kahden edellä mainitun yhdisteen kohdalla pienempi partikkelikoko on tehokkaampi. Analyysin pohjalta luotujen mallien perusteella arvioitiin, että mikäli 20 minuutin kontaktiajalla halutaan, että kaikkien haitta-aineiden poistuma on vähintään 80 % panoskokeessa, niin silloin aktivoitujen lietehiilen määrä tulisi olla 4 g/l.

Absorbanssin mittaamisella pyrittiin selvittämään soveltaisiko sen reduktio mahdollisesti toimimaan tietyissä tilanteissa korvaavana analyysinä haitta-ainemäärityksille. Jokaisen haitta-aineen reduktio sovitettiin absorbanssin reduktion funktiona. Seitsemälle yhdisteelle korrelaatio oli hyvä ($R^2 > 80\%$). Korrelaatioyhtälöiden perusteella absorbanssin reduktion ollessa 70 % tai enemmän niin haitta-aineiden poistuman olisi yli 80 %. Tuloksen validointia varten datan keruuta on vielä kuitenkin jatkettava.



Kuva 19. Lietehiilen ja aktivoituneen lietehiilen ominaispinta-ala BET-analyysin perusteella (n=1).



Kuva 20. Haitta-aineiden reduktio, kun lähtevää jätevettä käsitellään aktivoituneella lietehiilellä

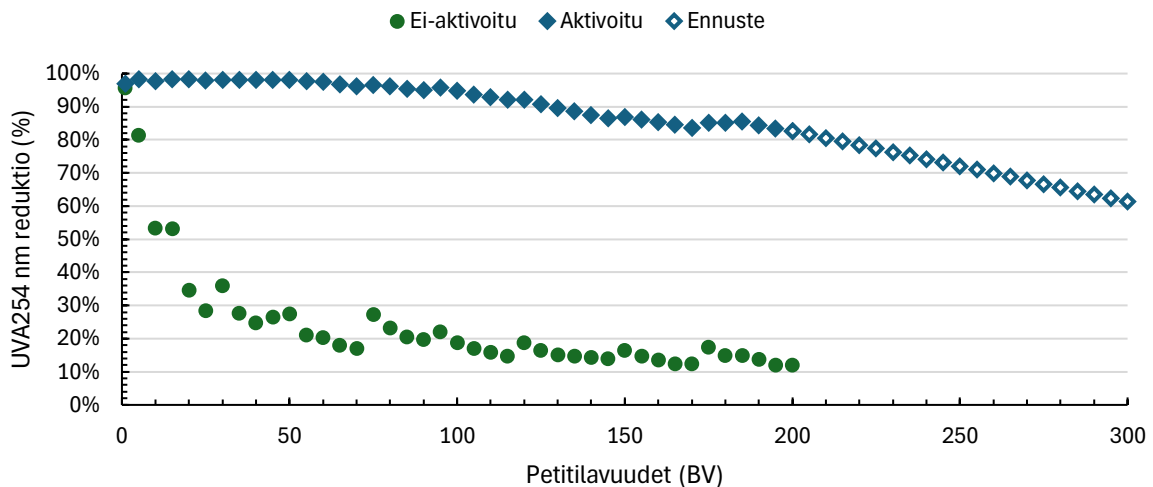
3.2.4.2 Kolonnikoe

Pienen mittakaavan kolonnikokeet toteutettiin elokuussa 2025 pienemmän partikkelikoon (< 2 mm) aktivoituneella ja aktivoimattomalla lietehiilellä. Kokeissa Viikinmäen lähtevää jätevettä pumputtiin kolonnien läpi, siten että kontaktaika oli 20 minuuttia. Kolonnin läpi tullut lähtevä jätevesi kerättiin näytteeksi ja siitä analysoitiin absorbanssi, fosfori ja raskasmetallipitoisuudet. Ennen kokeen aloitusta kolonnit huuhdeltiin 100 ml ionivaihdettua vettä, joka kerättiin näytteeksi.

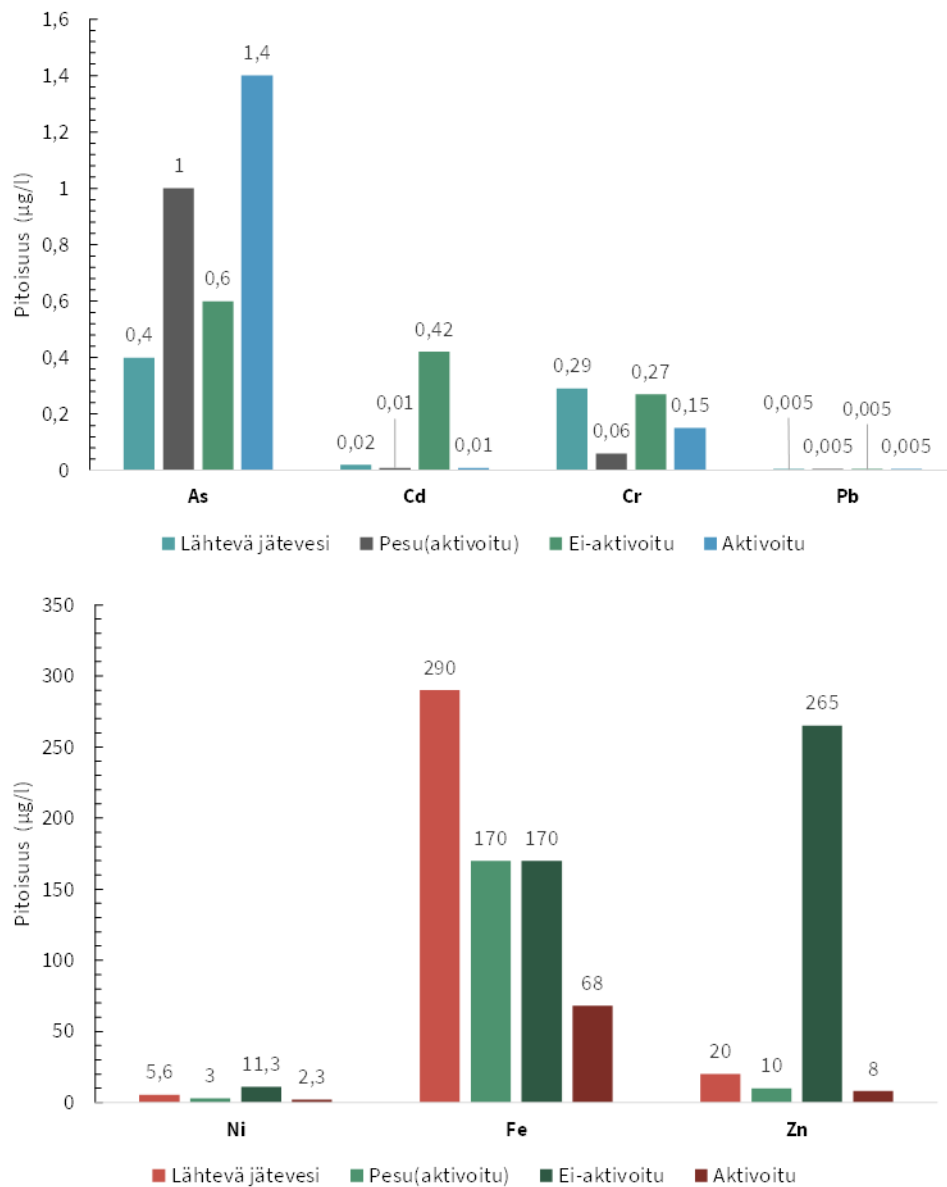
Kuvassa 21 nähdään absorbanssin reduktion muutos koeajon edetessä. Aktivoimattoman lietehiilen kohdalla reduktio tippuu jo ensimmäisten kymmenien petitilavuuksien (BV) aikana. Tämä viittaa vahvasti siihen, että aktivoimaton lietehiili ei toimi haitta-aineiden poistossa. Aktivoitulla lietehiilellä absorbanssin reduktio pysyy korkealla 100 petitilavuuteen saakka, jonka jälkeen se alkaa hitaasti laskea. Koeajoa jatkettiin 200 petitilavuuteen asti, jonka jälkeen absorbanssin reduktion etenemistä arvioitiin excelin ennuste-funktion avulla 300 petitilavuuteen asti. Kyseisessä pisteessä absorbanssin reduktio saavuttaa 70 %, joka indikoisi, että myös haitta-aineita alkaisi tulla tämän jälkeen suodattimen lävitse. Kaupalliset aktiivihiilet kestävät yleensä kymmeniä tuhansia petitilavuuksia, joten lietehiili on tämän suhteen melko heikohko materiaali haitta-aineiden poistamiseen.

Raskasmetallit määritettiin koeajossa kolonniin pesuvedestä ja ensimmäisen päivän näytteestä. Kuvassa 22 on esitetty raskasmetallien pitoisuudet ja siitä nähdään, että alkuvaiheessa aktivoitua lietehiilestä vain arseeni huuhtoutuu koeajossa. Aktivoimattomalla lietehiilellä huuhtoutuvia metalleja ovat kadmium, nikkeli ja sinkki. Jatkokokeissa raskasmetallien huuhtoutumista on seurattava koko koeajon ajan, jotta nähdään, tapahtuuko huuhtoutumista enemmänkin.

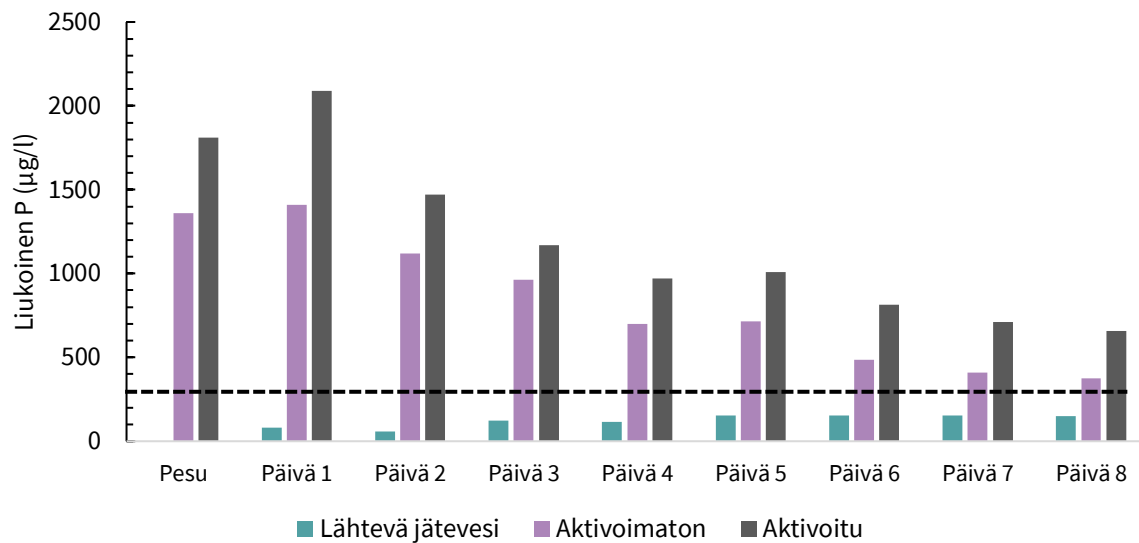
Fosforin mahdollista huuhtoutumista seurattiin koeajon jokaisena päivänä ja tulokset on esitetty kuvassa 23. Kuten kuvasta nähdään, fosforia huuhtoutuu koko koeajon ajan ja pitoisuudet ylittävät Viikinmäen luparajan (0,3 mg/l) molemmilla lietehiilillä. Tämä seurauksena lietehiili ei tämän kokeen perusteella sovellu sellaisenaan haitta-aineiden poistoon.



Kuva 21. Absorbanssin (UV254 nm) reduktio kolonnikoeajon aikana aktivoitulla ja aktivoimattomalla lietehiilellä



Kuva 22. Raskasmetallien pitoisuudet lähtevässä jätevedessä, aktivoitun lietehiilikolonnin pesuvedessä ja jätevedessä, joka on käsitelty aktivoitulla tai aktivoimattomalla lietehiilellä. Kookoomanäyte ensimmäiseltä koepäivältä.



Kuva 23. Fosforin pitoisuudet lähtevässä jätevedessä, pesuvedessä ja kolonnilla käsitellyssä lähtevässä jätevedessä (aktivoitu ja aktivoimaton). Aktivoitu ja aktivoimaton -näytteet ovat kokoomanäytteitä kultakin koepäivältä. Musta katkoviiva on Viikinmäen luparaja (0,3 mg/l) fosforille.

3.2.4.3 Lietehiilen regenerointi

Kolonnikoeajossa käytettyä aktivoitua lietehiiltä (< 2 mm) regeneroitiin Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n toimesta ja samalla aktivoitiin uusi erä lietehiiltä kahdella eri partikkelikoolle (< 2 mm ja > 2 mm).

Aktivointi kahdelle partikkelikoolle onnistui hyvin ja BET-arvoksi saatiin 196 m²/g isommalle partikkelikoolle (> 2 mm) ja 163 m²/g pienemmälle partikkelikoolle (< 2 mm). Saadut arvot vastaavat odotetusti aiemman aktivointikokeen tuloksia, sillä aktivointiolosuhteet pyrittiin pitämään samankaltaisina. Saannot aktivointikokeessa olivat 75 % isommalle partikkelikoolle ja 72 % pienemmälle partikkelikoolle.

Käytetyn lietehiilen regenerointi onnistui erinomaisesti, sillä BET-arvoksi saatiin 123 m²/g, mikä on hyvin lähellä alkuperäistä 126 m²/g BET-arvoa. Myös saanto regeneroidulle lietehiillelle oli korkea (97 %). Tulokset viittaavat alustavasti siihen, että regenerointi onnistuu eli siltä osin aktivoidun lietehiilen käyttö suodatinmateriaalina olisi mahdollista. Aktivoidun lietehiilen käyttöä haitta-aineiden poistossa tullaan jatkamaan RAHI 3 -hankkeessa, jossa käsittelyä testataan laboratoriomittakaavan kolonnilla. Isommalla mittakaavalla toteutettavalla koeajolla pystytään varmentamaan tässä hankkeessa toteutetun pienen kolonnikokeen tulokset.

3.3 Osatehtävä 3

3.3.1 Pyrolyysiprosessin elinkaariarvio

Pyrolyysiprosessin elinkaariarvioinnin toteutti konsulttitoimisto Ecobio Oy. Taustatietoina käytettiin RAHI-hankkeessa (2021–2022) Ämmäsuon pyrolysoinnin koetoimintalaitoksella tuotettuja energiankulutus- ja päästötietoja ja muuta HSY:lle jo aikaisemmin tuotettua tietoa. Selvityksessä vertailuun sisällytettiin nykyinen pilottilaitos, täyden mittakaavan prosessi sekä nykyiset lietteen käsittelytavat eli Metsäpirtin multatuotanto ja lietteen käsittely Ämmäsuolla. Selvityksessä tarkasteltiin mahdollisuutta saada sertifioitua krediittejä Puro Earth -standardin mukaan. Selvityksen työstäminen aloitettiin lokakuussa 2023, ja loppuraportti valmistui helmikuussa 2024.

Selvityksessä arvioitiin lietebiohiilen elinkaaren aikaista ilmastovaikutusta ja hiilensidontaa. Arvioinnissa vertailtiin nykyistä pilottituotantoa, täysimittaista tulevaisuuden laitosta sekä nykyisiä lietteen kompostointimenetelmiä Metsäpirtissä ja Ämmäsuolla hyödyntäen Puro Standard Biochar Methodology -menetelmää, mikä mahdollistaisi HSY:lle CO₂-poistotodistusten (CORC) hakemisen. Selvityksessä kävi ilmi, että lietebiohiilen tuotanto pilottilaitoksella aiheuttaa suuremman ilmastovaikutuksen ja hiilidioksidipäästöt kuin mitä lietebiohiileen voidaan sitoa, mikä johtuu erityisesti sähkönkulutuksesta ja sähköntuotannon päästöistä. Täysimittaisessa laitoksessa nettohiilensidonta olisi kuitenkin positiivinen, sähkönkulutus on suhteellisesti pienempi, ja laitoksen oletetaan käyttävän tuulivoimaa, joka olisi parempi kuin nykyinen käytössä oleva uusiutuva energia. Lietebiohiilen tuotannon hiilensidontaan vaikuttaa merkittävästi tuotetun biohiilen kokonaisorganisen hiilen (TOC) pitoisuus, joka lietebiohiilellä on noin 30 %, mutta puupohjaisessa biohiilessä jopa yli 80 %.

Tulokset osoittivat, että pilottilaitoksen tuotanto aiheuttaa enemmän päästöjä kuin tuotettu lietebiohiili sitoo pääasiassa sähkönkulutuksen vuoksi. CORC-todistusten hakeminen pilottilaitokselle ei siis ole tässä tapauksessa tarkoituksenmukaista. CORC-todistusten hakeminen pilottilaitoksen biohiilen tuotannolle edellyttäisi nykyistä energiatehokkaampaa prosessia. Täysimittaisessa laitoksessa tilanne on kuitenkin toinen, ja hiiltä olisi mahdollista sitoa enemmän. Selvityksessä todettiin myös, että täysimittaisessa laitoksessa päästöt olisivat kompostointia pienemmät. Tulevaisuudessa täysimittaisen laitoksen osalta olisi mahdollista harkita CO₂-poistojen hyödyntämistä liiketoiminnassa, mutta investointeihin liittyen on seurattava EU:n ja globaalin lainsäädännön kehitystä päästökompensaation osalta.

3.3.2 Pyrolyysilaitoksen koetoiminta

Pyrolyysipilottilaitoksen koetoiminta jatkuu vuoden 2024 loppuun sovitun koeohjelman mukaisesti. Koeohjelmassa tutkittiin eri lämpötilojen, puumäärän vaihtelun ja pidempien ajojaksojen vaikutuksia prosessiin ja lopputuotteeseen keskittyen erityisesti lietebiohiilen laatuun, haitta-aineisiin sekä pölyn muodostumisen hallintaan. Koetoimintajakson perusteella voitiin todeta, että tulokset olivat hyvin samansuuntaisia vuoden 2021 kokeiden kanssa.

Puun osuuden lisääminen vähensi energiankulutusta, mutta vaikutti samalla syöttönopeuteen negatiivisesti. Optimaaliseksi seossuhteeksi määrittyi puu 20–30 % ja jätevesiliete 70–80 %, lämpötilan ollessa noin 600 °C. Laitteiston toimivuuden kannalta liian matalat lämpötilat (esim. 450 °C) aiheuttivat haasteita prosessin stabiilisuudelle. PFAS-yhdisteitä ei havaittu hiilessä, mutta niitä löytyi lentotuhkasta. PAH-arvot pysyivät alle 4,1, kun lietettä oli enemmän kuin puuta. Koeajoissa havaittiin, että korkeampi pyrolyysilämpötila vähensi arseenin ja alumiinin pitoisuuksia lopputuotteessa.

Prosessin taloudellisuuden ja PAH-arvojen välillä on löydettävä tasapaino, ja yli 600 °C lämpötila voi olla suositeltava PAH-arvojen hallinnan kannalta. Parhaat seokset pyrolyysin pilotlaitoksella saavutettiin, kun puumäärä oli 20–30 %. PAH-arvot pysyivät alle 6,3 silloin, kun lietettä oli enemmän kuin puuta seoksessa.

Kokonaisuutena pyrolyysipilotin tulokset osoittavat, että prosessia voidaan säätää niin, että lopputuote täyttää lainsäädännön vaatimukset ja soveltuisi siten ruokaviraston esittämiin vaatimuksiin, mutta pitkäaikaisvaikutuksista ja liukoisuudesta tarvitaan vielä jatkotutkimuksia ennen laajempaa käyttöönottoa.

Selvitys lietehiilen jatkokäyttömahdollisuuksista

Selvitys lietehiilen jatkokäyttömahdollisuuksista markkinoiden, lainsäädännön ja käyttöturvallisuuden kannalta toteutti konsulttitoimisto AFRY Oy. Taustatietoina käytettiin RAHI-hankkeessa (2021–2024) Ämmässuon pyrolysoinnin koetoimintalaitoksella tuotettuja tuotettua tietoa.

Selvityksen työstäminen aloitettiin huhtikuussa 2025, ja loppuraportti valmistui elokuussa 2025. Selvityksessä tarkasteltiin lietehiilen potentiaalisia jatkokäyttökohteita markkinoiden, lainsäädännön ja käyttöturvallisuuden näkökulmista. Työssä keskityttiin erityisesti kolmeen pääasialliseen loppukäyttöön: maanparannus- ja lannoitekäyttöön, suodatusmateriaalina hyödyntämiseen sekä teollisuuden raaka-aineena, erityisesti sementin korvaajana betonin valmistuksessa. Selvityksen perusteella lietehiilelle potentiaalisin markkina on maanparannus- ja lannoitekäytössä, sillä lietehiili sisältää fosforia ja hiiltä, jotka ovat tärkeitä ravinteita maaperälle. Lietehiilen fosfori on kuitenkin vähemmän kasveille käyttökelpoisessa muodossa kuin lietepohjaisissa maanparannusaineissa, mikä asettaa haasteita sen hyödyntämiselle lannoitteena. Pyrolysointi parantaa lietehiilen stabiilisuutta ja vähentää orgaanisten haitta-aineiden sekä patogeenien määrää, mutta samalla fosforin käyttökelpoisuus heikkenee.

Suodatusmateriaalina lietehiili tarjoaa mahdollisuuksia erityisesti hulevesien ja jätevesien käsittelyssä, mutta käyttöturvallisuuden ja materiaalin stabiilisuuden varmistaminen edellyttää vielä lisätutkimuksia ja koekäyttöä. Lietehiilen käyttö teollisuuden raaka-aineena, kuten sementin osittaisena korvaajana betonissa, on myös tunnistettu potentiaalisiksi, mutta materiaalin pitkäaikaiskäyttäytymisestä ja mahdollisista haitta-aineiden liukenemisesta tarvitaan lisää tutkimustietoa.

Käyttöturvallisuuden osalta pyrolysointi tuhoaa patogeeneja ja vähentää haitta-aineiden määrää, mutta lietehiili on pölyävää ja itsesytyvää, mikä tulee huomioida varastoinnissa, kuljetuksessa ja käytössä. Raskasmetallien on todettu konsentroituvan lietehiileen, mutta niiden liukoisuus on pieni. Haitta-aineiden liukenemisesta tarvitaan kuitenkin lisää tutkimustietoa eri jatkokäyttökohteissa.

Lietehiilen eri loppukäyttökohteiden lainsäädännölliset puitteet perustuvat tällä hetkellä pitkälti tapauskohtaisiin arviointeihin. Jätetatuksen poistamiseen soveltuu todennäköisimmin ei enää jätettä (EEJ) -menettely, sillä sivutuoteluokittelu ei yleensä täytä vaadittuja kriteerejä lietehiilen osalta. Lietehiilen REACH-kelpoisuutta ei välttämättä voi osoittaa yhdistämällä sitä puuhiilen rekisteröintiin, koska näiden aineiden kemialliset ominaisuudet eroavat toisistaan. Rakennusmateriaalikäytössä lietehiili voi saada EBC-sertifioinnin, mutta tätä sertifikaattia ei voi myöntää lietehiilelle lannoite- tai suodatusmateriaalikäytössä. Lannoitekäyttö on näistä kolmesta tarkastellusta loppukäyttövaihtoehdosta tällä hetkellä eniten säädelty. Suomen lainsäädännön mukaan jätevesiperäistä lietehiiltä voidaan käyttää lannoitteena ja maanparannuksessa, jos se täyttää Ruokaviraston ainesosaluettelon sekä kyseisen tuoteluokan vaatimukset.

4 Muutokset alkuperäiseen hanke-suunnitelmaan

HSY ehdotti 24.6.2024 päivätyssä muutoshakemuksessa RAHI 2-hankkeen hankekauden pidentämistä siten että hankkeen päättymispäivämäärä on 31.10.2025. Hankkeen alkuperäisellä aikataululla toteutuvat kokonaiskustannukset olisivat arvion mukaan jääneet budjetoitua pienemmiksi, koska investointeja oli toteutettu suunniteltua vähemmän. Lisäksi myös henkilökustannukset olivat jääneet suunniteltua pienemmiksi. Odotettua pienempien toteutuneiden kustannusten vuoksi ehdotettiin, että hankkeessa toteutetaan sille määritettyjä tavoitteita tukevia lisätoimia. Toimien toteutus vaati kuitenkin lisääaikaa.

YM hyväksyi muutoshakemuksen, jossa HSY esitti, että jäljellä oleva rahoitus käytetään vuodelle 2025 suunnitelluissa hankkeen tavoitteita tukevista lisätoimista. Vuoden 2025 suunnitelmaan sisältyi toimet, joissa edennetään lietehiilen tuotantoa ja aktivoitua lietehiilen käyttöä, testataan kemiallisen lietteen hyödyntämistä metsäteollisuudessa ja jatketaan fosforin talteenoton kehittämistä.

Osatehtävässä 1 toteutettiin Toihan Oy:n kanssa laboratoriomittakaavassa tutkimus yhdyskuntajätevedenpuhdistamon tertiäärilietteen sisältämän fosforin hyödynnettävyydestä metsäteollisuuden puhdistamoilla. Lisäksi Toihan Oy toteutti selvityksen RAVITA-prosessilla tuotettavan kemiallisen lietteen ja rejektiveden sisältämän typen sopivuudesta ravinnelähteiksi metsäteollisuuden puhdistamoilla.

Osatehtävässä 2 toteutettiin muutoksena alkuperäiseen suunnitelmaan pienemmän lietehiilimäärän panoskokeet ja kolonnikokeet aktivoitulle lietehiilelle. Lisäksi fosforin talteenoton jatkokokehityksessä toteutettiin keväällä 2025 uuttokoeajo.

Päivitettyssä suunnitelmassa jätettiin pois fosforin talteenottoon liittyvä ultrasuodatuspilotointi vuodelta 2024. Ultrasuodatuksen testaus todettiin tarpeettomaksi saatujen koetulosten perusteella ja hankkeen tavoitteiden saavuttamiseksi. Pilotoinnin tarkoituksena oli testata tertiäärilietteestä valmistetun metallifosfaattiliuoksen kiintoaineen ja orgaanisen hiilen (TOC) poistoa ultrasuodatuksen ja aktiivihiihen avulla. Orgaaninen hiili ja kiintoaine aiheuttavat RAVITA-prosessin uuttovaiheessa liuoksien vaahoutumista, mistä syystä niiden poistaminen käsiteltävästä metallifosfaattiliuoksesta on tarpeellista. Tuhkatusta lietteestä valmistetusta metallifosfaattiliuoksesta ei kuitenkaan enää tarvitse erillisellä aktiivihiihikäsittelyllä poistaa orgaanista hiiltä. Lisäksi myös kiintoaineenpoisto pystytään toteuttamaan ultrasuodatusta yksinkertaisemmillä menetelmillä.

Osatehtävässä 3 jatkettiin syksyllä 2024 pyrolyysiprosessin tutkimista koeajoilla ja koeajosuhteiden vaikutuksista lopputuotteeseen sekä varmennettiin vuonna 2021 tehtyjä tuloksia. Vuonna 2025 muutoksena alkuperäiseen hankesuunnitelmaan laadittiin konsultin toimesta selvitys lietehiilen jatkokäyttömahdollisuuksista lainsäädännön, markkinoiden ja käyttöturvallisuuden kannalta.

5 Viestinnän toteutuminen

Hankkeeseen liittyvää viestintää on toteutettu hankesuunnitelman mukaisesti. Hankkeessa on toteutettu seuraavat toimenpiteet:

- Lehdistötiedote hankkeen aloituksesta ja tavoitteista keväällä 2023
- Hankkeen kotisivujen päivitys (suomeksi ja englanniksi)
- Hankkeen esittely valtakunnallisilla Vesihuoltopäivillä 2023 (Jyväskylä), 2024 (Oulu) ja 2025 (Tampere)
- Hankkeen esittely HSY:n ja yhteistyökumppaneiden sisäisissä viestintäkanavissa sekä sidosryhmätilaisuuksissa
- Hankkeen esittely WEF/IWA Innovations in Process Engineering –konferenssissa (Portland, USA) kesäkuussa 2023
- Hankkeen esittely pohjoismaisessa jätevesikonferenssissa NORDIWA:ssa (Göteborg, Ruotsi) syyskuussa 2023
- Hankkeen tuloksien esittely Nutrients in European Research Meeting (NERM) 2024-konferenssissa (Bryssel, Belgia) huhtikuussa 2024
- Hankkeen tuloksien esittely IWA:n Leading Edge of Technology (LET) -konferenssissa (Essen, Saksa) kesäkuussa 2024
- Hankkeen esittely YGOFORUM:in tilaisuudessa: Biohiilen käyttö infra- ja viherrakentamisessa toukokuussa 2024
- Hankkeen tuloksien esittely 2nd Swedish Conference on Sewage Sludge Biochar -konferenssissa (Malmö, Ruotsi) lokakuussa 2024
- Hankkeen tuloksien esittely IWA:n Resource Recovery -konferenssissa (Leeuwarden, Alankomaat) toukokuussa 2025
- Hankkeen tuloksien esittely pohjoismaisessa jätevesikonferenssissa NORDIWA:ssa (Oslo, Norja) syyskuussa 2025

Edellä mainituilla toimenpiteillä on tavoitettu hankkeen pääkohderyhmät, joita ovat mm. toiset vesilaitokset, kansalliset ja kansainväliset asiantuntijat ja alan tutkijat, asiakassidosryhmät sekä mm. kiertotalouden alan yritystoimijat. Hankkeen loputtua julkaistaan tiedote hankkeesta saavutetuista tuloksista HSY:n nettisivuilla. Lisäksi hankkeen lietehiilikokeiden tuloksista laaditaan tieteellinen artikkeli, jota tarjotaan kansainväliseen vertaisarvioituun julkaisuun.

6 Hankkeen vaikutukset

Hankkeen välittömät työllisyysvaikutukset ovat kohdistuneet hankkeen toteuttajatahoihin sekä yhteistyökumppaneihin. HSY:n palveluksessa työskenteleviä hanke on työllistänyt kokonaisuudessaan 4,8 henkilötyövuotta (htv) hankekauden 1.1.2023-31.10.2025 aikana, joista 3,95 htv on käyttänyt hankkeelle palkatut kaksi määräaikaista työntekijää. Lisäksi yksi määräaikainen opinnäytetyön tekijä on työllistynyt 0,46 henkilötyövuoden verran. Vakituksia työntekijöitä hanke on työllistänyt 0,29 htv. Välillisesti hanke on työllistänyt useita henkilöjä, sillä hankkeen aikana on ostettu palveluja alan konsulttitoimistoilta.

Hankkeen aikaiset ympäristövaikutukset ovat olleet vähäiset. Osatehtävien toteutukseen on kuulunut konsulttiselvityksiä, joihin ei liity merkittäviä päästöjä. Myöskään hankkeen toteutukseen kuuluneiden laboratoriotöiden tai laboratoriomittakaavan sekä 1000 avl:n pilotmittakaavan tutkimukseen ei liity merkittävässä määrin päästöjä. Hankkeen pilot-toiminnasta syntyvät jätevedet on käsitelty asianmukaisesti voimassa olevan luvan mukaisesti ja muut syntyneet jätejakeet on toimitettu käsiteltäviksi jätealan yrityksille. Hankkeen energiankulutuksessa on käytetty uusiutuvaa sähköä, sillä kaikki HSY:n käyttämä sähkö on uusiutuvaa, joko omaa tuotantoa tai ostosähköä.

Pyrolyysikoelaitoksen savukaasut puhdistettiin vaadittujen päästörajojen mukaisesti. Toiminnan ympäristövaikutuksia on tarkkailtu Ämmässuon alueen kattavien ympäristötarkkailujen yhteydessä. Lisäksi AFRY on tehnyt laitoksen toiminnasta päästömittauksia vuonna 2023 ja 2024 savu- ja poistokaasuista, ilmanlaatuun tai haju- ja melutasoihin laitoksen vaikutukset arvioidaan hyvin pieniksi. AFRY:n toteuttamien vuoden 2023 ja 2024 päästömittausten perusteella useimpien päästökomenttien, kuten TVOC:n, elohopean (Hg), raskasmetallien ja hiilimonoksidin (CO), pitoisuudet alittivat jätteenpoltoasetuksen (VNa 151/2013) raja-arvot molemmissa mittaustilanteissa, myös mittausepävarmuus huomioiden. Vetyfluoridin (HF), suolahapon (HCl) ja PCDD/F:n osalta jätevesilietteen ollessa raaka-aineena ei mittausepävarmuuden vuoksi voida varmuudella todeta, alittavatko vai ylittävätkö pitoisuudet asetuksen raja-arvot. Typen oksidien (NOx) pitoisuudet ylittivät raja-arvot, samoin rikkidioksidi SO₂, kun mittausepävarmuus otetaan huomioon. Ilmanlaatuun ja melutasoihin laitoksen vaikutukset arvioidaan hyvin pieniksi. Viemäriin johdettavien vesien teollisuusjätevesisopimuksen mukaiset raja-arvot eivät ole ylittyneet tutkituilta osin vuosien 2021–2024 mittauksissa, eikä vesien laatu ole tutkittujen parametrien osalta muuttunut vuoden 2020 mittauksista (pyrolyysilaitoksen osuus Ämmässuon alueen jätevesimäärästä on ollut 0,03–0,15 %). Pyrolyysilaitos tuottaa suuren osan tarvitsemastaan lämpöenergiasta, mutta se tarvitsee ulkoista sähköenergiaa ja tukipolttoaineena nestekaasua.

Hankkeessa tehdyn tutkimus- ja kehitystyön tavoitteena on merkittävien positiivisten ympäristövaikutusten saavuttaminen pitkällä aikavälillä. Täyden mittakaavan RAVITA-prosessilla pystyttäisiin hankkeessa saavuttujen tulosten perusteella ottamaan talteen 40–50 % tulevan jäteveden sisältämästä fosforista. Saostuskemikaalina käytetyn alumiinin sisäinen kierrätysaste takaisin RAVITA-prosessiin oli 60–70 %. Saatujen tulosten mukaan ja laaditun elinkaariarvioinnin perusteella täyden mittakaavan pyrolyysiteknologia mahdollistaa hiilensidonnin, jolloin laitoksella olisi mahdollisuus ansaita hiilikrediittejä. Liitteessä 1 on esitetty hankkeen vaikutusten arviointilomake ja liitteessä 2 on arvioitu hankkeen DNSH-arvion (do no significant harm) toteutumista.

7 Talousraportti

7.1 Osatehtävä 1

Hankkeen osatehtävän 1 kulut ovat muodostuneet palkkakuluista ja konsulttitoiden kustannuksista. Kokonaisuudessaan osatehtävän 1 kulut ovat 44 384,33 EUR vastaavat 79,3 % koko osatehtävän toteutukseen varatusta summasta aikavälillä 1.1.2023-31.10.2025.

Aikavälin 1.1.2025-31.10.2025 kokonaiskustannukset ovat 19 197,36 EUR, josta Ympäristöministeriön osuus 9 406,71 EUR.

7.2 Osatehtävä 2

Hankkeen osatehtävän 2 kulut ovat muodostuneet palkkakuluista, matkakuluista sekä tarvikke- ja palveluostoista. Kokonaisuudessaan osatehtävän 2 kulut ovat 483 541,42 EUR vastaavat 81,6 % koko osatehtävän toteutukseen varatusta summasta aikavälillä 1.1.2023-31.10.2025.

Aikavälin 1.1.2025-31.10.2025 kokonaiskustannukset ovat 135 909,96 EUR, josta Ympäristöministeriön osuus 66 595,88 EUR.

Osatehtävän 2 kustannukset joulukuulta 2024 poikkesivat arvioidusta (ylitys 843 e). Vuoden 2025 kokonaiskuluihin on osatehtävässä 2 lisätty joulukuulta 2024 kaksi analyysipalvelujen laskua, jonka takia kustannuserittelyn loppusumma eroaa vuoden 2025 kirjanpito-otteesta. Ohjausryhmässä 7.3.2025 sovittiin, että nämä vuoden 2024 kulut voidaan laskuttaa loppuraportoinnin yhteydessä. Vahvistunut kirjanpito-ote joulukuulta 2024, jossa näkyvät kyseiset kulut (Metropolilabin laskut: 215470, 216359) on erillisenä liitteenä.

7.3 Osatehtävä 3

HSY:n kustannukset osatehtävässä 3 koostuvat palkkakustannuksista ja konsulttiselvityksistä. Kokonaisuudessaan osatehtävän 3 kulut ovat 69 030,89 EUR vastaavat 73,8 % koko osatehtävän toteutukseen varatusta summasta aikavälillä 1.1.2023-31.10.2025.

Aikavälin 1.1.2025-31.10.2025 kokonaiskustannukset ovat 33 558,19 EUR, josta Ympäristöministeriön osuus 16 443,5 EUR.

Osatehtävän 3 kustannukset joulukuulta 2024 poikkesivat arvioidusta (ylitys 612,06 e). Vuoden 2025 kokonaiskuluihin on osatehtävässä 3 lisätty joulukuulta 2024 kaksi matkakulua, jonka takia kustannuserittelyn loppusumma eroaa vuoden 2025 kirjanpito-otteesta. Ohjausryhmässä 7.3.2025 sovittiin, että nämä vuoden 2024 kulut voidaan laskuttaa loppuraportoinnin yhteydessä. Vahvistunut kirjanpito-ote joulukuulta 2024, jossa näkyvät kyseiset kulut (Matkakulujen laskut: 3504909536, 3504909536) on erillisenä liitteenä.

7.4 Kokonaiskustannukset

RAHI 2 -hankkeen kokonaiskustannukset aikavälillä 1.1.2023-31.10.2025 olivat 596 956,63 EUR, josta Ympäristöministeriön tukema osuus on 49 %, joka vastaa summana 292 508,75 EUR.

Aikavälin 1.1.2025-31.10.2025 kokonaiskustannukset olivat 188 665,51 EUR, josta Ympäristöministeriön tukema osuus on summana 92 446,10 EUR. Kokonaiskustannukset on esitetty kustannuslaskentataulukossa (RAHI2_ Kustannuserittely_2025_loppuraportti), joka on liitteenä 3. Liitteessä 4 on esitetty tilintarkastajan lausunto ja liitteessä 5 hankkeen tuntikirjaukset.

8 Yhteenveto

Jätevesien ravinteiden ja hiilen kokonaisvaltainen talteenotto eli RAHI 2-hanke edistää HSY:n strategisia tavoitteita edistämällä Itämereen johdettavan ravinnekuormituksen hallintaa ja kiertotaloutta. Hanke jakautui kolmeen osatehtävään, joissa ensimmäinen keskittyi fosforin valtakunnalliseen talteenottopotentiaaliin ja kemiallisen lietteen hyödyntämiseen, toinen osatehtävä RAVITA-prosessin optimointiin ja kolmas osatehtävä puhdistamolietteen pyrolysointiin.

Ensimmäisessä osatehtävässä vuonna 2024 arvioitiin fosforin talteenoton potentiaalia suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla RAVITA-teknologialla. AFRY Oy:n toteuttama työssä arvioitiin fosforimäärä, mahdolliset jatkokäyttökohteet (pois lukien lannoitekäyttö) sekä mahdollisten käsittelylaitosten sijainti. Selvityksen mukaan yli 10 000 asukasvastineluvun laitoksilla fosforia voitaisiin ottaa talteen noin 1700 tonnia vuodessa, kun oletetaan laitoksille tulevan fosforin talteenottoasteeksi 50 %. Suurin talteenottopotentiaali on tiheästi asutuilla alueilla. Lupaa-
vin jatkokäyttövaihtoehto kemialliselle lietteelle on sen hyödyntäminen metsäteollisuuden jätevedenpuhdistuksessa ravinnelähteenä.

Vuonna 2025 toteutettiin laboratoriomittakaavan koe, jossa arvioitiin kemiallisen lietteen (alumiinifosfaatti) käyttökelpoisuutta metsäteollisuuden jätevedenkäsittelyprosessin mikrobeille. Laboratoriotulokset osoittavat lyhyen viiveen, jonka aikana mikrobiyhteisö sopeutuu uudentyyppiseen ravinnelähteeseen, mutta kolmen ensimmäisen päivän aikana yhteisö saavuttaa saman kasvunopeuden kuin epäorgaanisella ravinnelähteellä. Syksyllä 2025 toteutettiin selvitys (Toihan Oy) kemiallisen lietteen ja rejektiveden tyyppien sopivuudesta ravinnelähteiksi metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamoilla. Selvityksen perusteella määrällisesti fosfori riittäisi kattamaan koko metsäteollisuuden fosforitarpeen, ja se soveltuu lähtökohtaisesti hyödynnettäväksi metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamoilla myös muun laatunsa perusteella. Kemiallinen liete on kuitenkin todennäköisesti ensin liuotettava tasalaatuisen annostelun varmistamiseksi. Myös lietteenkäsittelyssä syntyvä rejektivesi sopii laatunsa ja korkean typpisisältönsä puolesta hyödynnettäväksi metsäteollisuuden jätevedenpuhdistusprosessissa, mutta käyttö edellyttää rejektiveden konsentroimista kuljetuskustannusten vähentämiseksi.

Toisessa osatehtävässä optimoitiin RAVITA-prosessin toimintaa. Aikaisemmissa vaiheissa uuttoprosessiin todettiin muodostuvan prosessia häiritsevää vaahtoa, joka aiheutui prosessiin syötettävän metallifosfaattiliuoksen sisältämästä orgaanisesta hiilestä. Ratkaisuna tässä hankkeessa tutkittiin kemiallisen lietteen tuhkestusta ja pyrolysointia orgaanisen hiilen poistamiseksi. Tuhkistus todettiin näistä kahdesta koko prosessin kannalta toimivammaksi vaihtoehdoksi. Täten hankkeen kaksi viimeistä uuttokoeajoa toteutettiin tuhkatusta lietteestä valmistetulla metallifosfaattiliuoksella. Kyseiset kaksi uuttokoeajoa saatiin toteutettua suunnitellusti. Ensimmäisessä tuhkatun lietteen koeajossa todettiin raudan kertyvän uuttoprosessin orgaaniseen faasiin, joten kirjallisuuden ja panoskoekiden perusteella hankkeen viimeiseen uuttokoeajoon lisättiin orgaaniseen faasiin lisäainetta (Cyanex 272) tehostamaan raudan poistamista prosessista. Jälkimmäisessä koeajossa testattiin myös ensimmäisen kerran prosessissa tuotetun fosforihapon kierrätystä takaisin liuotusvaiheeseen. Kierrätysshapon käyttö ei

heikentänyt liuotustehoa ja rautaa saatiin poistettua 40 % uuttoprosessista ilman, että alumiinin uuttoteho heikkeni. Tulevaisuudessa tarkoituksena on parantaa raudan takaisinuuuttotehoa sekä validoida nyt saavutettuja tuloksia tekemällä kestoaltaan pidempi yhtäjaksoinen koeajo.

Toisena kokonaisuutena osatehtävässä 2 tutkittiin aktivoitujen lietehiilien käyttöä jäteveden haitta-aineiden poistossa. Panoskokeissa saatiin lupaavia tuloksia, kun uudistetussa jätevesidirektiivissä listatut haitta-aineet poistuivat lähes 90 %:n tasolle. Laboratoriomittakaavan kolumnikoeajossa lietehiilien sisältämän fosforin todettiin kuitenkin liukenevan käsiteltävään jäteveeseen, minkä seurauksena fosforin pitoisuus käsitellyssä jätevedessä nousi yli tason 0,3 mg/l. Suunnitellussa jatkotutkimuksessa tarkastellaan, voidaanko fosfori huuhtoa ennen lietehiilien käyttöä adsorptiomateriaalina. Mikäli näin ei ole, aktivoitu lietehiili ei sellaisenaan sovellu adsorptiomateriaaliksi jäteveden haitta-aineiden poistoon jälkikäsitelyvaiheessa.

Vuonna 2024 kolmannessa osatehtävässä toteutettiin pyrolyysiprosessin elinkaariarviointi (EcoBio Oy) hyödyntäen RAHI-hankkeen ja HSY:n aiempia tietoja. Selvityksessä vertailtiin pilottilaitosta, täyden mittakaavan laitosta sekä nykyisiä lietteen käsittelymenetelmiä (Metsäpirtin kompostointi ja Ämmäsuon käsittely). Arviointi osoitti, että täysimittaisessa laitoksessa nettohiilensidonta olisi positiivinen ja päästöt olisivat pienemmät kuin pilottilaitoksessa. Lisäksi tuulivoiman käyttö parantaisi energiatehokkuutta.

Vuonna 2025 osatehtävässä 3 laadittiin AFRY Oy:n toimesta skenaarioselvitys lietehiilien markkinoista, lainsäädännöstä sekä käyttöturvallisuudesta eri käyttökohteiden kautta. Selvityksen mukaan lietehiille suurin markkinapotentiaali on maanparannuksessa ja lannoitteena, mutta myös suodatinmateriaalina ja betonin raaka-aineena toimiminen ovat mahdollisia käyttökohteita. Lietehiilien sopivuus näihin käyttökohteisiin vaatii vielä kuitenkin lisätutkimusta ja lainsäädännön selkeyttämistä.

Vuoden 2024 pyrolyysipilottilaitoksen koeajot vahvistivat vuoden 2021 kokeissa saadut keskeiset havainnot ja syvensivät niitä. Molemmissa todettiin, että puun lisääminen parantaa energiataloutta, mutta rajoittaa syöttönopeutta, ja liian matalat lämpötilat (n. 450 °C) heikentävät prosessin stabiilisuutta. Vuoden 2024 kokeissa varmistettiin, että optimaalinen lämpötila on lähempänä 600 °C:tta haitta-aineiden hallinnan ja PAH-arvojen vähentämiseksi, ja lisäksi tutkittiin puun osuuden vaikutusta eri seossuhteilla. Tulosten perusteella paras tasapaino pilotilla saavutettiin, kun puuta oli 20–30 % ja loput lieteä.

RAVITA-prosessin kehitystyö ja lietehiilien käytön tutkiminen haitta-aineiden poistossa jatkuu RAHI 3-hankkeessa (11/2025–10/2026). Hanke tulee edistämään ravinteiden talteenoton teknologioiden tuomista kohti käytännön sovelluksia suomalaisilla puhdistamoilla. Myös RAHI 3-hanke tulee jakautumaan kolmeen osatehtävään, joista ensimmäisessä tarkastellaan suunnitelmatasolla ja mahdollisella pilotoinnilla jäteveden ravinteiden kokonaisvaltaista talteenottoa laitosmittakaavassa ja toisessa osatehtävässä jatketaan RAVITA-prosessin optimointia pitkäkestoisella koeajolla. Kolmas osatehtävä jatkaa lietehiilien käytön tutkimista haitta-aineiden poistossa.

Kirjallisuus

Kasanen, N., *Activation of sludge biochar and its use as adsorbent in wastewater treatment*, LUT School of Engineering Sciences, Lappeenranta-Lahti University of technology LUT, 2024. (<https://lutpub.lut.fi/handle/10024/168044>)