

# pulina



## Puhdistamolietteen arvokomponentit

### Loppuraportti

18.12.2025

Hankkeen toteuttajat: LAB-ammattikorkeakoulu Oy, Helsingin yliopisto

Hankkeen kesto: 1.6.2023-30.11.2025

Rahoitus: Ympäristöministeriö (65 %)



LAB University of  
Applied Sciences



Ympäristöministeriö  
Miljöministeriet  
Ministry of the Environment

## Tiivistelmä

PULINA-hankkeessa (1.6.2023–30.11.2025) LAB-ammattikorkeakoulu ja Helsingin yliopisto kehittivät ratkaisuja, joilla yhdyskuntien puhdistamolietteen arvokomponentteja voidaan hyödyntää nykyistä tehokkaammin. Tavoitteena oli edistää ravinteiden kierrätystä, PHA-biomuovien tuotantoa sekä liettehiilen valmistusta ja luoda perustaa monistettavalle biojalostamokonseptille, joka parantaa re-sursitehokkuutta ja huoltovarmuutta suomalaisissa olosuhteissa. PHA-tuotannon osalta hankkeessa optimoitiin hydrolyysin ja bakteerien rikastuksen prosesseja pienessä pilot-mittakaavassa. Kokeet osoittivat pH:n, hapen ja rautasuolojen merkityksen VFA-tuotantoon sekä PHA:n kertymiseen. Prosessin skaalaus 500–1000 litran siirrettävään konttiin valmisteltiin, mutta varsinaiset pilot-kokeet siirtyvät toteutettavaksi jatkohankkeessa vuoden 2026 alussa. Tulosten perusteella tarvittavat parametrit ja prosessivaiheet ovat nyt selkeitä, mikä mahdollistaa pilotoinnin turvallisesti ja suunnitelmallisesti. Fosforin talteenottoa tutkittiin laajasti happo- ja emäksäsittelyjen avulla eri liete-fraktioista. Kokeilla pyrittiin selvittämään olosuhteet, joissa fosfori liukenee parhaiten, jotta se voidaan myöhemmin saostaa ja hyödyntää. Tulosten tilastollinen analyysi jatkuu, ja lupaavimpia menetelmiä valmistellaan pikkupilottia varten vuonna 2026. Pyrolyysikokeissa tuotettiin biohiiltä sekä mädätetystä lietteestä että hydrolyysisakasta. Biohiilen ominaisuuksia analysoitiin laajasti, ja tulokset osoittivat, että pyrolyysi vähentää tehokkaasti PFAS-yhdisteitä ja tuottaa pääosin lainsäädännön raja-arvot alittavia tuotteita. Joissakin näytteissä havaittiin PAH-yhdisteiden ylityksiä, mikä liittyi pääasiassa prosessin olosuhteisiin. Lisäksi tarkasteltiin biohiilen soveltuvuutta maanparannuskäyttöön sekä fosforin liukoisuutta eri uutomenetelmillä ja näytteen ikääntymisen vaikutusta. Taloudellisessa tarkastelussa arvioitiin PHA-muovin, biohiilen ja muiden arvokomponenttien markkinapotentiaalia. Globaalit markkinat ovat kasvussa, ja erityisesti biohiilen kysyntää vauhdittavat hiilikrediittimarkkinat sekä kestävyteen liittyvät tavoitteet. PHA-muovin tuotannon aikaisemmat laskelmat osoittavat, että sen valmistus jäteveden hiilestä voi olla Suomessa kannattavaa. Biohiilen kohdalla kannattavuus riippuu erityisesti investointien suuruudesta ja markkinahinnasta. Metallien talteenoton todettiin vaativan jatkotutkimusta. Lainsäädäntöselvitykset ja sidosryhmäkyselyt täydensivät teknisiä tuloksia. Viljelijöiden ja muiden toimijoiden näkemyksissä korostuivat kiinnostus kiertotalouteen ja ravinteiden kierrätykseen, mutta myös huoli tuotteiden turvallisuudesta, saatavuudesta ja kustannuksista. Viestinnällä ja yhtenäisillä käytännöillä arvioidaan olevan merkittävä rooli hyväksyttävyyden parantamisessa. Kokonaisuutena hanke tuotti laaja-alaista tietoa puhdistamolietteen hyödyntämismahdollisuuksista ja loi vahvan perustan teknologioiden jatkokehitykselle ja pilotoinnille tulevaisuuden hankkeissa. Hanke edisti merkittävästi tietopohjaa kohti toimivaa, suomalaisiin olosuhteisiin soveltuvaa biojalostamokonseptia puhdistamolietteen tehokkaaseen hyödyntämiseen.

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä .....	1
1. Hankkeen tausta.....	3
1.1. Tarve ja relevanssi.....	3
1.2. Tavoitteet.....	4
2. Hankkeen toteutus .....	5
2.1. Toteutetut toimenpiteet.....	5
2.2. Muutokset hankkeen toteutuksessa .....	9
2.3. Positiiviset huomiot ja haasteet.....	9
2.4. Viestintä.....	10
3. Hankkeen tulokset.....	12
3.1. TP1. PHA:n valmistus biomuovin raaka-aineeksi.....	12
3.2.2 Hydrolyysi.....	13
3.1.2 PHA:ta akkumuloivien bakteerien rikastus ja akkumulaatio .....	16
3.2.2 3.1.3 500-1000 L pilot-mittakaavan kokeet .....	19
3.2. TP2. Ravinteiden talteenotto puhdistamolietteestä.....	21
3.2.2 Fosforin talteenotto lannoitteita varten .....	24
3.2.2 Fosforin liukoisuuskokeet.....	27
3.2.2 Puhdistamolietteestä tuotetun biohiilen maanparannuskäytön ympäristövaikutusten arviointi Suomen olosuhteissa.....	28
3.3. TP3. Tuotteiden turvallisuus.....	29
3.2.2 Lopputuotteiden analysointi ja haitta-ainemääritys.....	29
3.4. TP4. Uusien menetelmien kustannustehokkuus ja liiketoimintapotentiaali .....	32
3.2.2 Markkinaselvitys eri fraktioille.....	32
3.2.2 Liiketoimintapotentiaalin arviointi.....	33
3.2.2 Selvitys lainsäädännöstä.....	34
3.2.2 Haastattelut sidosryhmille .....	35
4. Hankkeen vaikutukset.....	36
5. Talousraportti .....	37
6. Yhteenveto .....	38
Viitteet.....	39

## 1. Hankkeen tausta

Puhdistamolietteen arvokomponentit (PULINA)-hankkeen toimenpiteiden tavoitteena oli edistää yhdyskuntien puhdistamolietteen monipuolista hyödyntämistä niin ravinteiden kierrätyksessä kuin korkeamman jalostusasteen tuotteiden raaka-aineena. LAB-ammattikorkeakoulu Oy (LAB) ja Helsingin yliopisto (HY) toteuttivat hankkeen yhteistyössä Lahti Aqua Oy:n kanssa.

### 1.1. Tarve ja relevanssi

Hankkeen tarvelähtöisyys liittyy sekä vesistöjen ravinnekuormituksen vähentämiseen että ravinne- ja energiahuoltovarmuuden turvaamiseen. Tällä hetkellä ruuantuotannon kannalta välttämättömien ravinteiden, typen ja fosforin, tuotanto ja käyttö eivät ole kestävällä tasolla (EEA 2020). Euroopassa yleisimmin typen lähteenä käytettävän ammoniumnitraatin valmistus on hyvin energiaintensiivistä ja usein sidottu fossiilisten polttoaineiden käyttöön. Valmistuksessa syntyy myös kasvihuoneilmiötä voimistavia typpioksiduulipäästöjä. Kaivannaisfosforin louhinta kuormittaa ympäristöä, ja lisäksi se on uusiutumaton luonnonvara, joka on lisätty EU:n kriittisten aineiden listalle. Ympäristöongelmia aiheuttaa myös lannoitteiden käytöstä, kun osa pellolle levitetystä tpeestä haihtuu ilmaan. Tyypeä ja fosforia huuhtoutuu vesistöihin paitsi pelloilta, myös teollisuuden ja yhdyskuntien jätevesien mukana aiheuttaen rehevöitymistä ja happikatoa. Haasteena on myös, että huomattavan suuri osa epäorgaanisista lannoitteista tuodaan Euroopan ulkopuolelta, mikä heikentää huoltovarmuutta etenkin vallitsevan maailmanpoliittisen tilanteen takia.

Jätevesien sisältämät arvokkaat ravinteet tulisi saada hyödynnettyä paljon nykyistä tehokkaammin. Tällä hetkellä käytössä olevat käsittelytekniikat soveltuvat huonosti tähän tarkoitukseen. Noin 70 % fosforista ja alle 10 % tpeestä saadaan talteen. Käsittelyprosessin aikana fosfori kuitenkin saostuu niukkaliukoiseen muotoon ja on siten heikosti hyödynnettävissä kasvien käyttöön. Puhdistamolietteen käyttöön lannoitevalmisteena liittyviä haasteita ovat myös sen mahdollisesti sisältämät haitta-aineet, kuten raskasmetallit, lääkeaineet ja mikromuovit. Puhdistusmenetelmiä kehitetään, mutta niiden kustannustehokkuudesta ja lopputuotteiden turvallisuudesta tarvitaan lisää tutkimustietoa. Viimeisimpien tutkimustulosten perusteella lietteen pyrolysointi lietehiileksi vaikuttaa lupaavalta vaihtoehdolta.

Heinäkuussa 2022 voimaan astuneen EU:n lannoitevalmisteasetuksen tavoitteena on edistää orgaanisten ja kierrätyslannoitevalmisteiden markkinoita, samalla varmistuen niiden käyttöturvallisuuden. Asetuksessa on määritelty ainesosaluokat, joita voidaan lisätä delegoiduilla säädöksillä. Tämän tekee EU:n komissio lannoitevalmistekomitean avustuksella. Tällä hetkellä puhdistamoliete ei kuulu sallittuihin ainesosiin. Riittävän tutkimusnäytön perusteella käsitelty puhdistamoliete voitaisiin esittää lisättäväksi asetukseen, mikä mahdollistaisi laajemmat markkinat EU-alueella.

Ravinteiden talteenoton kustannustehokkuutta voidaan parantaa hyödyntämällä puhdistamolietteen sisältämiä eri arvokomponentteja korkeamman jalostusasteen tuotteissa. Yhdistelmälaitoksessa tuotantoa voidaan ohjata sen mukaan, mikä on taloudellisesti kannattavaa. Puhdistamoliettestä voidaan tuottaa biokaasua tai etanolia mm. energiaksi (kaukolämpö tai hajautettu sähköntuotanto) tai vaihtoehtoisesti polyhydroksyalcanoaatteja (PHA) biomuovien raaka-aineeksi. PHA:n tuotantoprosessissa lietteen sisältämät orgaaniset yhdisteet muunnetaan lyhytketjuisiksi rasvahapoiksi (VFA), jotka mikro-organismit muuntavat edelleen PHA:ksi. Menetelmää pilotoitiin 5 litran fermentorissa osana Biosykli - *Päijät-Hämeen biokierratous* -hanketta. Tulosten perusteella PHA:n tuotanto puhdistamoliettestä todettiin taloudellisesti kannattavaksi verrattuna PHA:n maailmanmarkkinahintaan.

PULINA-hankkeessa kasvatettiin PHA:n tuotannon mittakaava 500–1000 litraan siirrettävässä kontissa. Samalla kehitetään PHA:n eristysmenetelmä perustuen liuotinuuttoon vihreän kemian (green chemistry) tavoitteita noudattaen.

## 1.2. Tavoitteet

Hankkeen tavoitteena oli selvittää Suomen olosuhteisiin parhaiten soveltuvat menetelmät puhdistamolietteen käsittelylle; teknologia ravinteiden kierrätykseen, biomuovien raaka-aineen (PHA) talteenotolle sekä lietehiilen valmistukselle. Hankkeen keskeinen tarkoitus oli tuottaa tietoa kotimaiseen jätevesien käsittelyprosessiin soveltuvista menetelmistä sekä viedä käytäntöön tutkimustietoa, joka edistäisi resurssien tehokkaampaa hyödyntämistä puhdistamolietteestä. Tuotetun tiedon avulla voidaan luoda edellytyksiä monistettavalle biojalostamokonseptille.

Hankkeen tavoitteet

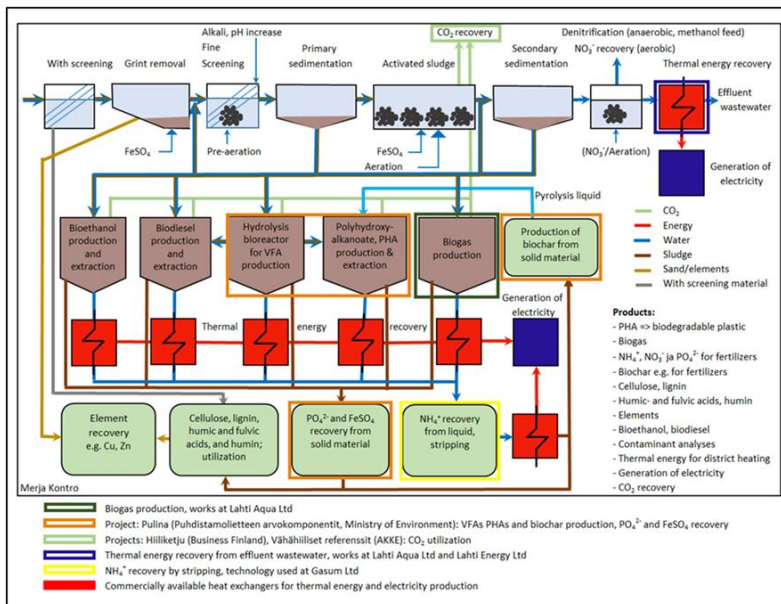
- Polyhydroksyalcanoattien (PHA) tuotantoprosessin optimointi ja tuotannon siirtäminen laboratoriomittakaavasta siirrettävään konttiin (500–1000 l). Samalla kehitetään PHA:n puhdistusta siten, että jäteveden haitalliset yhdisteet eivät päädy biohajoavan muovin raaka-aineeseen.
- Tuottaa tietoa Suomen jäteveden käsittelyprosessiin parhaiten soveltuvista menetelmistä ravinteiden kierrätyksen symbiooseihin ottaen huomioon mm., että fosforin saostus tapahtuu kemiallisesti biologisen prosessiyksikön sijaan, sekä pohjoisen talven viileät olosuhteet.
- Varmistaa lopputuotteiden käyttöturvallisuus.
- Luoda uusia kiertotaloutta edistäviä liiketoimintamahdollisuuksia. Samalla tavoitteena on kartoittaa esteet ravinteiden kierrätykselle ja muiden puhdistamolietteen resurssien hyödyntämiselle.



Kuva 1. Ilmakuva Lahti Aqua Oy:n Ali-Juhakkalan jätevedenpuhdistamosta.

## 2. Hankkeen toteutus

Hankkeen aikana lietettä hyödynnettiin erilaisten lisäarvotuotteiden valmistuksessa, samalla pyrkien tehostamaan ravinteiden talteenottoa ja tuottamaan uusiutuvaa energiaa. Lopullisena tavoitteena on kehittää biojalostamo jätevedenpuhdistamolle, kuten kuvassa 2 [katso viite 1] on esitetty.



Kuva 2. Ali-Juhakkalan jätevedenpuhdistamo Lahdessa ja biojalostamon kehittäminen jätevedenpuhdistamolla sekä siihen liittyvät hankkeet.

Hankkeen toimenpiteet toteutettiin neljässä työpaketissa:

1. PHA:n valmistus biomuovin raaka-aineeksi
2. Ravinteiden talteenotto puhdistamolietteestä
3. Tuotteiden turvallisuus
4. Uusien menetelmien kustannustehokkuus ja liiketoimintapotentiali

Hankkeen toimenpiteet kohdistuivat erityisesti jätevedenpuhdistamoihin ja uusien, kiertotalouteen pohjautuvien liiketoimintamahdollisuuksien kehittämiseen niiden ympärille. Työpakettikohtaiset toimenpiteet on esitetty alla olevissa kappaleissa.

### 2.1. Toteutetut toimenpiteet

TP1. PHA:n valmistus biomuovin raaka-aineeksi

TP1.1. Puhdistamolietteen hydrolyysin ja PHA:n tuottotilavuuden suurentaminen (vastuutaho: HY)

TP1.1 toimenpiteet liittyivät jätevesilietteen hydrolyysin ja PHA:n tuottotilavuuden suurentamiseen 5 litrasta 500/1000 litran bioreaktoriin siirrettävässä kontissa, joka sijoitetaan Kariniemen jätevedenkäsittelylaitoksen yhteyteen. Mittakaavan suurentamista varten 500-1000 litraan HY ja LAB ovat hankkineet tutkimuskäyttöön merikontin, jossa on 4 kpl tuhannen litran IBC-säiliötä ja niihin ostettiin kaksi sekoitinta (Denios, Bad Oeynhausen, Germany), toinen hydrolyysibioreaktoriin ja toinen PHA:n tuotobioreaktoriin. Lietteen siirtämistä varten säiliöstä toiseen ja jätevedenpuhdistamolta säiliöihin sekä

pois ostettiin pumppu (KMV-products, part of West Invest Group). Pilottilaitoksen toimintaa ei ehditty käynnistää hankkeen aikana, mutta työ jatkuu Horizon Europe-rahoitteen CircSyst-hankkeen puitteissa. Seuraavat laitehankinnat tullaan tekemään vielä joulukuussa 2025:

- pH-mittari ja happo/emäs annostelija ovat tarjouspyyntökilpailutuksessa.
- Lisäksi PHA:ta keräävien bakteerien rikastuksen ja PHA:n akkumulaation säiliöihin hankitaan ilmas-timet (Air compressor ACO-318, Hailea, China).
- Kaasudetektoreiksi hankitaan vastaavat kuin on Lahti Aqua Oy:llä käytössä.
- Tarvittavat putkistot ostetaan K-raudasta, siten että ne ovat valmiina asennettuna tammikuussa 2026.
- PHA:ta akkumuloitunut biomassa erotetaan lingolla (Evedosc, type 10, Germany).

#### TP1.2. PHA:n tuotto-prosessin tehostaminen (vastuutaho HY)

TP 1.2 toimenpiteet liittyivät PHA:n tuotto-prosessin tehostamiseen parantamalla PHA:ta keräävien bakteerien rikastusta samalla kun ravinteita lisätään ja suurennetaan akkumuloivien bakteerien määrää. Hankkeessa saatiin runsaasti tietoa eri prosessiparametreista ja niiden säädöstä liittyen biomassan hydrolyysiin ja PHA:n tuottoon, minkä pohjalta on hyvä lähteä suurentamaan mittakaa-vaa.

Hydrolyysiin liittyen on tutkittu seuraavat asiat.

- Emäksinen ja neutraali hydrolyysi tutkittu pienillä pilot-kokeilla (32,5-44,0 kg)
- Emäksinen hydrolyysi, pH 8 ylläpidetty 3-4 päivää, jonka jälkeen pH:n lasku 7:ään VFA:n tuotolla.
- Hydrolyysin pH:n säätö ammoniumilla, natriumhydroksidilla, natriumbikarbonaatilla ja urealla.
- Hydrolyysi ilman pH-säätöä.
- Hydrolyysin kemikaalien valinta 500-1000 litran pilot-kokeisiin.
- Ilmastuksen/sekoituksen vaikutus VFA:n tuottoon.
- Riittävästi toistoja, jotta lietteen koostumuksen vaihtelun vaikutus on pystytty arvioimaan.

PHA:n tuottoon liittyen on tutkittu seuraavat asiat PHA:ta akkumuloivien bakteerien rikastus- ja ak-kumulaatiobioreaktoreissa.

- PHA:n rikastuksen/akkumulaation optimaalinen pH
- Fosforirajoitteisuuden ylläpito saostamalla fosfori raudalla
- Fosforia saostavan kemikaalin valinta ja käyttö
- pH:n säädössä käytettävien kemikaalien valinta ja tarpeen arviointi
- Ilmastuksen säätö PHA:n tuotossa
- VFA:n tuottoliuoksen syöttö PHA:n rikastus/akkumulaatiokasvatukseen
- Bakteerien rikastusta ja akkumulaatiota tukevien olosuhteiden valinta
- Ravinnelisäykset
- Fosforin poisto ennen VFA-liuoksen syöttöä rikastus/akkumulaatiobioreaktoreihin

TP1.3. Tuotannon ja saannon tehostaminen sekä taloudellisen kannattavuuden parantaminen (vastuutaho HY)

TP1.3 toimenpiteet liittyivät kasvatuslietteen konsentroimiseen niin, että orgaanisen aineen määrä hydrolyysibioreaktorissa ja PHA:ta keräävien mikrobien määrä akkumulaatiobioreaktorissa on mahdollisimman korkea, mikä parantaa tuotannon tehokkuutta ja saantoa/fermentaatio sekä kannattavuutta. Kerääntyneen PHA:n määrää voidaan kasvattaa konsentroimalla aktiivilietettä ennen akkumuloivien bakteerien rikastusta sekä akkumulaatioon. Hydrolyysissä käytetyn lietteen konsentroidi todettiin hankalaksi. Koska hydrolyysi tapahtuu vain kevyessä sekoituksessa, hydrolyysisäiliön täyttöastetta voidaan pitää korkeana, jolloin saadaan enemmän VFA:ta/hydrolyysi. Hydrolyysi voidaan tehdä avoimessa paineettomassa astiassa, jolloin ei tarvita anaerobitekniikan vaatimia teknisesti kalliita laitteita. Käytettäessä  $\text{FeCl}_3$  (pKa 2.46)/ $\text{Fe}(\text{OH})_2$  (pKa 17) paria fosforin saostuksessa ja samanaikaisesti pH:n säädössä vältytään muiden happojen ja emästen käytöltä.

TP1.4. Analyysit bioreaktoreista (vastuutaho HY)

TP1.4 toimenpiteinä HY teki bioreaktoreista seuraavat analyysit: kuiva-aine, orgaaninen aine, polyhydroksyalkanoaatit (PHA) ja fosfolipidien rasvahapot (PLFA). Lisäksi määritettiin fosfori VFA-liuoksessa, jotta sen määrä pystytään pitämään rajoitteisena akkumulaatioreaktorissa. Lietteistä määritettiin kuivapaino, orgaaninen aines, sekä pH:ta, lämpötilaa ja  $\text{O}_2$  (ilma) on seurattu koko ajan hydrolyysien ja akkumulaatiobioreaktoreiden toiminnan ajan.

Työpaketti 2. Ravinteiden talteenotto puhdistamolietteestä

TP2.1. Puhdistamolietteen pyrolyysikokeet kiertotalouslaboratoriossa (vastuutaho LAB)

TP2.1 toimenpiteiden tarkoituksena oli selvittää pyrolyysimenetelmän soveltuvuutta puhdistamolietteen käsittelyyn maanparannusaineeksi. LAB toteutti pyrolyysikokeet mädätetylle puhdistamolietteelle ja hydrolyysisakalle. LAB tutki myös pyrolyysin vaikutusta fosforin liukoisuuteen. Näytteen vanhentumisen vaikutusta fosforin liukenevuuteen tutkittiin toteuttamalla kokeet kuukauden välein (yhteensä 4 kk) ja sitten vielä 3 kk kuluttua.

TP2.2. Parhaiten Suomen olosuhteisiin soveltuvat menetelmät fosforin talteenottoon (vastuutaho HY)

HY kartoitti fosforin talteenottomenetelmiä. Lupaavat lähestymistavat:

1. Fosforin happo- tai emäsluotus lietteestä ja sen jälkeen saostus nestefaasista esim.  $\text{FeSO}_4$ :llä neutraaleissa olosuhteissa.
2.  $\text{FeSO}_4$ :n käyttö fosforin saostuksessa. Rauta saostuu sulfidina ja fosfori jää liukseen happo/emäskäsittelyn jälkeen.

Happo-emäskäsittelyt (pH:t noin 2, 4, neutraali, 9, 10.5, 12) tehtiin syötteelle biokaasun tuottoon, lietteelle biokaasun tuoton jälkeen, lingotulle lietteelle biokaasun tuoton jälkeen ja linkouksessa saadulle nesteelle. Kaikista käsittelyistä määritettiin alkuaineet, fosfaatti, ammonium ja sulfaatti. Nyt käsitellään tuloksia tilastollisesti ja arvioidaan parhaita olosuhteita fosfaatin talteenotolle, joista tullaan tekemään pikkupilotit keväällä 2026.

TP2.3. Puhdistamolietteestä tuotetun biohiilen maanparannuskäytön ympäristövaikutusten arviointi Suomen olosuhteissa (vastuutaho LAB)

LAB toteutti arvioinnin puhdistamolietteestä tuotetun pyrolyysihiilen maanparannuskäytön ympäristövaikutuksia erityisesti Suomen olosuhteissa. Tietoa tuotettiin vertailemalla kolmella eri tavalla käsitellyn puhdistamolietteen käyttöä, mädätysjäännöksenä, pyrolysoituna mädätysjäännöksenä ja pyrolysoituna hydrolyysisakkana osana PHA-arvoketjua. Tuloksista kirjoitettiin artikkeli, joka julkaistaan LABin verkkolehdessä RDI Journal.

### Työpaketti 3. Tuotteiden turvallisuus

#### TP3.1. Parhaat menetelmät PHA-muovien eristämiseen (vastuutaho HY)

TP3.1 toimenpiteiden tarkoituksena oli määrittää parhaat menetelmät PHA-muovien eristämiseen. PHA:n uuttomenetelmien kartoitus on työn alla ja uuton laboratoriokokeet tehdään keväällä 2026.

#### TP3.2. Lopputuotteiden analysointi ja haitta-ainemääritys (vastuutaho LAB ja HY)

TP3.2 toimenpiteiden tarkoituksena oli määrittää puhdistamolietteestä tuotetun pyrolyysihiilen ominaisuudet ja soveltuvuus maanparannusaineeksi sekä varmistaa PHA-tuotteen turvallisuus ja soveltuvuus käyttötarkoitukseen. LAB teetti määritykset alkuaineista ja keskeisimmistä haitta-aineista TP2 tuotetuille pyrolyysihiilille. Lisäksi LAB toteutti fosforin liukoisuuskokeet mädätetystä puhdistamolietteestä tuotetulle hiilelle. Liukoisuuskokeiden tuloksista kirjoitettiin artikkeli, joka julkaistaan LABin verkkolehdessä LAB Pro. PHA:n tuotanto jäi hankkeen aikana vähäiseksi. Näin ollen PHA-muovin ominaisuuksien analysointia tai haitta-ainemäärityksiä ei päästy toteuttamaan.

### Työpaketti 4. Uusien menetelmien kustannustehokkuus ja liiketoimintapotentiaali

#### TP4.1 Liiketoimintapotentiaalin arviointi (vastuutaho LAB)

Työpaketin toimenpiteiden tarkoituksena oli viedä käytäntöön tutkimustietoa, joka parantaa puhdistamolietteen arvokomponenttien talteenoton taloudellista kannattavuutta ja edistää resurssien tehokasta hyödyntämistä. LAB teki biohiiltä ja biomuovia (PHA) koskevan markkinaselvityksen, joka julkaistiin hankkeen nettisivuilla. Lisäksi LAB arvioi puhdistamolietteen arvokomponenttien talteenoton ja biojalostamokonseptin lopputuotteiden taloudellista kannattavuutta perustuen kirjallisuustietoihin. Arvioon sisältyi biokaasu, mädätysjäännös, PHA-muovi, pyrolyysihiili, kupari ja sinkki. HY arvioi fosforin talteenoton taloudellista kannattavuutta.

#### TP4.2. Lainsäädäntö ja sidosryhmähaastattelut.

TP4.2 toimenpiteiden tarkoituksena oli tunnistaa mahdollisia esteitä ravinteiden kiertotaloudelle ja puhdistamolietteen resurssien hyödyntämiselle. LAB toteutti puhdistamolietettä, kierrätyslannoitteita ja biomuoveja koskevan lainsäädännön nykytilaa koskevan selvityksen syksyllä 2023. Selvitykseen sisältyi Suomen ja EU:n lainsäädännön asettamat vaatimukset ja velvoitteet puhdistamolietteen käsittelylle, lannoitteiden valmistukselle ja käytölle sekä biomuovien valmistukselle ja käytölle. Lainsäädännön uudistuksia ja niiden vaikutuksia arvioitiin uudelleen hankkeen loppuvaiheessa. LAB toteutti viljelijöille suunnatun kierrätyslannoitteiden käyttöä koskeva Webropol-kysely keväällä 2024 ja keväällä 2025. Lisäksi LAB toteutti aiheesta syventävät haastattelut eri sidosryhmille. Tuloksista laadittiin tieteellisen artikkelin käsikirjoitus.

Työpakettien keskeisimmät tulokset on esitetty tämän raportin luvussa 3.

## 2.2. Muutokset hankkeen toteutuksessa

Liittyen hankkeen sisältöön, PHA:n tuotossa tarvittavat parametrit saatiin kartoitettua niin, että keväällä 2026 pystytään siirtymään 500-1000 litran pilot-vaiheeseen. Hydrolyysi ja akkumulaatiobioreaktoreiden yhteensovittaminen oli työläämpi kuin aluksi arvioitiin ja niiden parametrien säätö oli helpointa tehdä pikkupiloteilla 5-40 L tilavuuksissa, mikä on nyt saatu pääosin valmiiksi. Haasteellisen työstä lisäksi teki aikataulutus, sillä yhden hydrolyysin kesto aika on 1-2 viikkoa sekä PHA:ta akkumuloivien bakteerien rikastukseen ja PHA:n akkumulaatioon menee molempiin helposti yksi kuukausi. Mittakaavan suurentaminen aloitetaan vuoden 2026 alussa EU-Horizon hankkeen CircSyst rahoituksella ja tavoitteena on saada 500-1000 L bioreaktorikonaisuus toimimaan keväällä 2026. PHA:n tuotanto jäi hankkeen aikana vähäiseksi. Näin ollen PHA-muovin ominaisuuksien analysointia tai haitta-ainemääriä ei toteutettu.

## 2.3. Positiiviset huomiot ja haasteet

Hankkeen aikana on vahvistunut käsitys siitä, että tietoa kierrätyslannoitteiden mahdollisuuksista tarvitaan, koska mielikuvat puhdistamolietteestä saattavat osin olla negatiivisia juuri tiedonpuutteen vuoksi. Tutkimustiedon tuottaminen ja tehokkaiden käsittelymenetelmien kehittäminen lisäävät puhdistamolietteestä valmistettujen lannoitteiden sekä maanparannusaineiden luotettavuutta ja turvallisuutta. Lisäksi hankkeen aikana lainsäädäntöä on uudistettu, mikä lisää osaltaan tarvetta viestinnälle.

Yhteistyötä on rakennettu eri toimijoiden kanssa. Muun muassa MTK:n ja HSY:n kanssa on pidetty palaveri ja vaihdettu tietoa liittyen TREASoURcE- ja Lietehiili-hankkeisiin. Lahti Aqua Oy on osallistunut aktiivisesti jätevesilietteen hyödyntämistutkimuksiin jakamalla lietettä ja lietetietoutta. Fosforin talteenoton yhteydessä on keskustelut Gasum Oy:n kanssa tavoitteena yhdistää fosforin talteenotto heillä jo toiminnassa olevaan ammoniumin talteenottoon. Mari Eronen osallistui TREASoURcE-hankkeen järjestämään kierrätyslannoiteaiheiseen työpajaan 13.2.2024. MTK myös auttoi markkinoimaan PULINA-hankkeen kyselyä kohderyhmälle. Keväällä 2025 järjestettiin työpaja hankkeen sidosryhmille. Aiheena oli orgaanisen materiaalin kierrätys biohajoavan muovin raaka-aineeksi. Osallistujina oli mm. Muovipoli, Muoviyhdistys, Gasum, Päijät-Hämeen liitto, Lahden kaupunki, Heinolan kaupunki sekä muovialan yrityksiä. Hankkeen tuloksia esiteltiin myös sidosryhmille työpajassa 5.11.2025 osana CircSyst-hankkeen konsortiotapaamista.



Kuva 3. Keskustelua sidosryhmille järjestetyssä työpajassa 27.5.2025.

PHA:n tuoton osalta on kehitetty aivan uutta prosessia ja alun perin sellaisen aikataulutusta on erittäin vaikea arvioida. Projektin parametrien säätöön liittyvät tutkimukset oli ensin ajateltu tehtäväksi jo 500-1000 L bioreaktoreissa, mutta käytännössä osoittautui, että ne ovat helpointa mitoittaa ensin pikkupiloteilla, joka onkin nyt saatu suurelta osin kuntoon ja se on erittäin positiivinen huomio. Positiivista on myös EU-Horizon hanke, jonka rahoituksen puitteissa työtä voidaan jatkaa ja bioreaktorit saadaan erittäin todennäköisesti suurennettua 500-1000 L mittakaavaan.

Haasteita ilmeni myös laboratorioanalyysien toteutuksessa. Pyrolyysihiilen alkuainemääritykset ja PAH-analyysit oli tarkoitus toteuttaa LABin analyysilaboratoriossa. Luotettavia tuloksia ei kuitenkaan onnistuttu saamaan, joten hydrolyysisakasta tuotetun hiilen analyysit teetettiin ostopalveluna. Lietehiilen osalta päädyttiin osittain hyödyntämään aiempia tutkimustuloksia kirjallisuudesta.

## 2.4. Viestintä

Hankkeen toteutuksesta ja tuloksista on viestitty monipuolisesti eri kanavien kautta.

Taulukko 1. Hankkeen julkaisut.

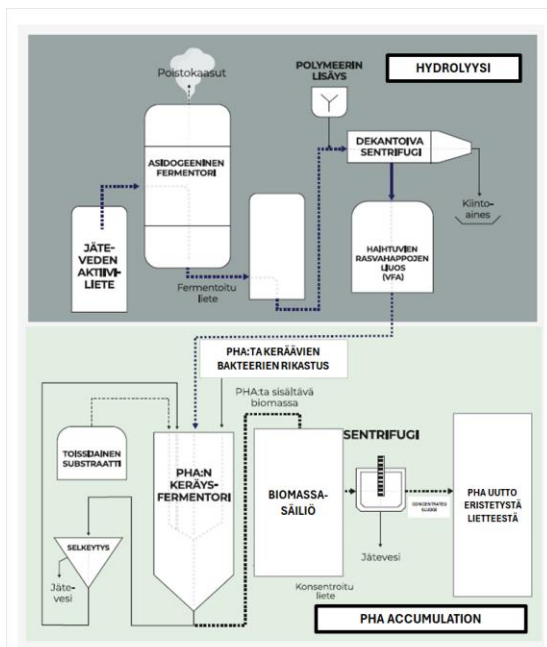
Julkaisun nimi	Kanava	Päivämäärä
Puhdistamoliete tehokkaammin hyötykäyttöön	LAB Focus - blogi	10/2023
Lainsäädäntökatsaus	Nettisivut	11/2023
Markkinaselvitys: Biohiili ja biomuovi	Nettisivut	2024
Jäteveden puhdistamosta biojalostamoksi (artikkeli)	Uusiouutiset	10/2024
Jätevesiliete jalostuu biomuoviksi, kierrätysravinteiksi ja biohiileksi (mainos)	Uusiouutiset uutiskirje 15/2024	10/2024

Ghazi M., Liu L., Puhakka M., Kontro M. Transforming Sewage Sludge Carbon to Polyhydroxyalkanoates, a Biodegradable Plastic Material. Abstract and presentation, Lahti Science Day	Lahden tiedepäivä	11/2024
Biohiilestä ratkaisu moniin kestävyysaasteisiin	LAB Focus -blogi	11/2024
Kerpo Maija-Stiina, Production of Polyhydroxyalkanoates from Wastewater Sludge Using Microbes. University of Helsinki	Master's thesis	5/2024
Ghazi Mubina, Phosphorus Limitation and pH Effect in Cultivating Polyhydroxyalkanoates Accumulating Microbial Inoculum. University of Helsinki	Master's thesis	5/2024
Näytteenkäsittelytekniikan seminaarissa esittelyssä uusimmat laboratorion analyysi- ja esikäsittelylaitteet	LAB Pro	8/2025
Biohajoavista muoveista ratkaisu muovikriisiin – Päijät-Häme suunnan näyttäjänä	MuoviPlast -lehti	9/2025
Kierrätyslannoitteiden käytön haasteet ja mahdollisuudet. Abstrakti ja esitys Lahden tiedepäivä.	Lahden tiedepäivä	11/2025
Pyrolysoidun puhdistamolietteen fosforin liukoisuustutkimusten tuloksia	LAB Pro	12/2025
Puhdistamolietteen hyödyntäminen kiertotaloudessa	LAB RDI Journal	12/2025
Marjo Keränen, Economical phosphorus recovery and recycling from wastewater in Finland. University of Helsinki.	Master's thesis	12/2025
Drivers and barriers of nutrient recycling	Käsikirjoitus	12/2025
Helsingin yliopiston patenttihakemus PHA: tuotolle fosforirajoitteisessa bioreaktorissa	Hakemus jätetty	6/2025
Raportti PAH-määrityksen esikäsittelymenetelmän kehittämisestä	Nettisivut	11/2025
Karppinen, A., Kontro, M. pH dependent phosphorus release from wastewater sludge before and after digestion	Manuscript, peer-review	Under preparation
Karppinen, A., Kontro, M. pH dependent phosphorus release from digested and dewatered sludge and its retentate.	Manuscript, peer-review	Under preparation
Ghazi, M., Kontro, M. Optimal pH and FeSO <sub>4</sub> addition for polyhydroxyalkanoate accumulation.	Manuscript, peer-review	Under preparation
Ghazi, M., Kontro, M. Base and pH control during sludge hydrolysis.	Manuscript, peer-review	Under preparation
Liu, L., Kontro, M.H. Microbial hydrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin in high volatile or fixed solid bioreactors at different pH values. Industrial Crops & Products.	Manuscript under revision	Under revision

### 3. Hankkeen tulokset

#### 3.1. TP1. PHA:n valmistus biomuovin raaka-aineeksi

Polyhydroksialkanoaatteja (PHA) voidaan tuottaa jäteveden hiilestä biohajoavien/kompostoitavien muovien raaka-aineeksi. PHA:t ovat bakteerien varastolipidejä, jotka kerääntyvät solujen sisään. PHA:iden tuotanto tapahtuu kahdessa vaiheessa: Ensimmäisessä vaiheessa biomassa hydrolysoidaan haihtuviksi rasvahapoiksi (VFA), jotka sitten syötetään PHA:ta keräävien bakteerien rikastuslaitokseen ja rikastuksen jälkeen bioreaktoriin, jossa PHA:t kerääntyvät bakteerisolujen sisään. Lopuksi PHA:t erotetaan uuttamalla (Kuva 4). PHA:n tuottoprosessi kehitettiin ensin pienissä 5-44 L pilot-mittakaavan bioreaktoreissa, joissa hydrolyysibioreaktoreiden tilavuudet olivat 32,5-44,0 kg ja säiliön koko oli 60 litraa. PHA:ta keräävien bakteerien rikastuksessa ja PHA:n keräämisessä käytettiin 5 L fermentoria. Mittakaavan suurentaminen kohti 500-1000 litraa on työn alla.



Kuva 4. Polyhydroksialkanoaattien (PHA) tuottoprosessi: Biomassan hydrolyysi, PHA:ta keräävien bakteerien rikastus, ja PHA:n akkumulaatio.



Kuva 5. Pienen pilottimittakaavan hydrolyysi (vasen) ja PHA:ta keräävien bakteerien rikastus ja akkumulaatiobioreaktori (oikea).

## Hydrolyysi

### Menetelmät

Hydrolyysit tehtiin avoimessa 60 litran säiliössä 32,5–44,0 kg:lla lietettä, jonka kuivapaino oli 2,0–4,2 % märkäpainosta (Kuva 5). Hydrolyysibioreaktoreita sekoitettiin hitaasti, jotta mikro-organismit saivat ravinteet käytettäväksi (Taulukko 2). Kalliin anaerobisen teknologian välttämiseksi hydrolyysiä ei tehty täysin anaerobisessa bioreaktorissa, joita käytetään biokaasun tuotannossa. Tähän mennessä on tehty yhteensä 15 hydrolyysikoetta, joissa on käytetty eri happipitoisuuksia, pH:n säätöaineita ja pH:n säätöaikatauluja. pH mitattiin ja säädettiin kerran päivässä aamuisin, ja näytteet kerättiin samanaikaisesti VFA-analyysiä ja pH-mittausta varten. Hydrolyysikokeiden lopussa VFA:ta sisältävä neste erotettiin sentrifugoimalla 4000×g:n voimalla 20 minuutin ajan. Jäännösfosfori saostettiin sen jälkeen ylimääräisellä rautasulfaatilla ( $\text{FeSO}_4$ , 2,4 g/l) fosforirajoitisuuden ylläpitämiseksi rikastus- ja kertymisbioreaktorissa VFA:iden syötön aikana.

VFA:t, eli etikka-, propioni-, voi-, valeriaana- ja kapronihapot, määritettiin kolmena rinnakkaisnäytteenä 200 µl:n bioreaktorinäytteistä, jotka oli sekoitettu 1800 µl:aan ultrapuhdasta vettä mikrosentrifugiputkessa. Liuksen pH säädettiin happamaksi alle pH 3:n lisäämällä 100 µl muura-haishappoa. Seosta sentrifugoitiin 20 000×g:llä 5 min, ja supernatantti siirrettiin analyysiä varten kaasukromatografiapullon. Ulkoiset kalibroitistandardit sisälsivät etikka-, propioni-, voi-, va-

leriaana- ja kapronihappojen seosta pitoisuuksina 10, 50, 100, 250, 500, 750 ja 1000 mg/l. Kaa-sukromatografinen (GC) erotus suoritettiin käyttämällä Agilent 6890 GC -laitetta, joka oli varus-tettu liekki-ionisaatiodetektorilla (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA) ja ZB-FFAP-ko-lonnilla (Zebron; 30 m, sisähalkaisija 0,25 mm, kalvon paksuus 0,25 µm, Phenomenex, Torrance, CA, USA). Kantajakaasu oli helium ja täydennyskaasu typpi; kolonnin virtausnopeus oli 1,5 ml/min; injektointilavuus oli 1 µl; ja injektorin ja detektorin lämpötilat olivat 250 °C. Uunin läm-pötila oli aluksi 80 °C 4 min ajan, sitten se nostettiin 140 °C:een nopeudella 5 °C/min ja sitten 220 °C:een nopeudella 25 °C/min, joka lämpötila pidettiin yllä 2 min ajan.

Fosfaattipitoisuus määritettiin APHA:han [2] julkaisuun perustuvalla askorbiinihappo-menetel-mällä. Pakastetut näytteet sulatettiin vesihauteessa ( $43 \pm 1,5$  °C) ja nestemäinen faasi erotettiin sentrifugoimalla (Heraeus 1S-R, DJB Labcare, Buckinghamshire, Iso-Britannia; 3000 ×g, 20 min). Näytteet laimennettiin suhteessa 1:5, ja kahdeksan kalibroitistandardia, joiden pitoisuudet oli-vat 0, 2, 10, 50, 100, 250, 500, 1000 µg P/l, laimennettiin kontrolliliuoksesta (1 mg P/l). Kolorimet-ristä analyysiä varten näytteisiin lisättiin 400 µl sekä askorbiinihappoa (50 g/l) että molybdaatti-reagenssia, joka sisälsi 130 g/l ammoniumheptamolybdaattia, 3500 mg/l kaliumantimoni(III)ok-sitartraattia ja rikkihappoa (40,6 %). Näytteiden fosfaattipitoisuus analysoitiin spektrofotometrillä 700 nm:n absorbanssilla 15–30 minuuttia reagenssien lisäämisen jälkeen (Shimadzu UV-2401 PC, Kioto, Japani).

### *Tulokset*

Ensimmäisessä hydrolyysissä H1 pH pidettiin välillä 8,0–8,2, kun taas H2:ssa pH pidettiin välillä 8,1–8,5 neljän päivän ajan, minkä jälkeen se laski hydrolyysin lopussa arvoon 7,5 VFA-tuotannon vuoksi. H3:ssa ja H4:ssä aluksi välillä 7,7–8,9 pidetty pH laski 2–3 päivän jälkeen ja oli kokeen lopussa pH-arvoon 6,6–6,9 (Taulukko 2). Sitten sama hydrolyysimenettely kuin H3:ssa ja H4:ssä toistettiin H9:ssä eli noin pH 8,0 pidettiin aluksi 3–4 päivää, minkä jälkeen pH:n annettiin laskea noin arvoon 7 VFA-tuotannon vuoksi. Tämän seurauksena VFA-pitoisuus H3:ssa, H4:ssä ja H9:ssä nousi alkuperäisestä  $6,5 \pm 0,7$  g/l:sta  $17,3 \pm 0,4$  g/l:aan  $6,5 \pm 0,7$  päivässä, mikä oli yksi korkeimmista mitatuista pitoisuuksista.

Hapen vaikutusta VFA-pitoisuuteen tutkittiin hydrolyyseissä H7 ja H8 käyttäen samaa pH-sää-tömenetelmää kuin hydrolyyseissä H3, H4 ja H9, joissa pH 8:aa ylläpidettiin noin 3–4 päivän ajan, jonka jälkeen pH:n annettiin laskea noin pH-arvoon 7, sillä poikkeuksella, että lietettä se-koitettiin voimakkaasti 10 minuuttia ennen näytteenottoa (Taulukko 2). Emäksistä pH-arvoa käy-tetään yleisesti biokaasun tuotannossa jätevedenpuhdistamoissa. Tämän seurauksena VFA-saanto oli korkein  $7,1 \pm 0,2$  g/l  $7,5 \pm 2,1$  päivän kuluttua, mikä osoittaa, että happipitoisuuden kasvaessa VFA-yhdisteitä voidaan nopeasti hyödyntää aerobisessa hengityksessä. Lisäksi arvioi-tiin myös urean (H5) ja natriumbikarbonaatin (H6) käyttöä pH-säädössä. Urea hajosi melko hi-taasti ammoniakiksi, mikä vaikeutti pH-säätöä. Natriumbikarbonaattia voitiin liuottaa vain lai-meraan 1 M liuokseen, kun taas muita emäksiä käytettiin 3,6–6 M liuoksissa. Näin ollen riittävän pH-säädön saavuttamiseksi oli käytettävä suuria määriä natriumbikarbonaattia, mikä ei ollut toi-vottavaa.

Ammoniakin käyttöä pH-säädössä tutkittiin hydrolyyseissä H10, H11, H12 ja H13, koska ammoni-akkia otetaan jo talteen retentaatista biokaasun tuotannon jälkeen strippaamalla (Gasum Oy) ja

sitä olisi mahdollista kierrättää prosessissa (Taulukko 2). Säättöprofiili pH:lle oli sama kuin natriumhydroksidilla, eli pH pidettiin 7,6–8,4:ssä 3–4 päivän ajan, minkä jälkeen sen annettiin laskea arvoon 7,0–7,4 VFA-tuotannon vuoksi. Tämän seurauksena VFA-pitoisuudet  $11,0 \pm 0,4$  g/l saavutettiin  $8,3 \pm 2,4$  päivässä, mikä osoittaa, että VFA-pitoisuus pysyi alhaisempana ja saavutettiin myöhemmin kuin käytettäessä natriumhydroksidia pH-säätöön.

Lopuksi tutkittiin hydrolyysiä ilman pH-säätöä H14:ssä, jossa pH laski vain 7,1:stä 6,7:ään VFA-tuotannon vuoksi, joka oli  $11,9 \pm 1,3$  g/l (Taulukko 2). Tämä osoittaa, että lietteellä on vahva puskurointikyky lähellä neutraalia pH:ta. Koska PHA:n kertyminen käytettäessä VFA:ita hiilenlähteenä tapahtuu parhaiten pH-arvoissa 5,5–6,5, tämä tarkoittaa, että happoa ei tarvita lisättyjen emästen neutraloimiseksi, jos hydrolyysi suoritetaan neutraalissa lietteen pH:ssa. Tämä pH valittiin jatkoarviointia varten.

Taulukon 2 tulosten tarkempi tarkastelu osoittaa, että lietteen VFA-pitoisuus vaihteli suuresti kokeiden alussa välillä 1,7–13,0 g/l, lietteen pH ennen hydrolyyseyä vaihteli välillä 6,3–7,1 ja haihtuvien kiintoaineiden määrä vaihteli välillä 68,5–77,0 % kuivapainosta. Koska lietteiden koostumukset vaihtelevat luontaisesti näinkin paljon, eri hydrolyysimenetelmien kokonaistehokkuutta on vaikea arvioida, ja luotettavan hydrolyysiarvion saamiseksi tarvitaan useita toistoja. Lahti Aqua Oy:ssä lietettä ei pumpata jatkuvasti biokaasun tuotantoon, vaan se voi seistä putkistoissa ja säiliöissä ennen syöttöä. Tämä tarkoittaa, että lietemateriaalin hydrolyysi voi olla jo käynnissä eri vaiheissa lietteen keruun aikana, ja tämä vaikuttaa hydrolyysi aikaan tutkimusbioreaktoreissa, vaikka lopulliset saannot heijastavatkin edelleen lietteen kokonaishydrolyysikapasiteettia.

VFA-profiileissa voidaan havaita myös melko suuria vaihteluita, jotka voivat johtua lietteen koostumuksen ja pH:n säätöön käytetyn emäksen vaihteluista. Hydrolyyseissä, joissa pH 8 säädettiin alussa 3–4 päiväksi natriumhydroksidilla ja pH:n annettiin sen jälkeen laskea arvoon 7 VFA-tuotannon vuoksi, asetaatin prosenttiosuus vaihteli välillä 48,8–67,7 %, propionaatin prosenttiosuus 10,5–26,7 %, butyraatin prosenttiosuus 12,5–13,1 %, valeraatin prosenttiosuus 6,7–7,0 % ja kaproaatin prosenttiosuus 2,0–5,0 %. Kun pH:n säätöön käytettiin ammoniakkaa, asetaattipitoisuus nousi 76,1–80,6 %:iin, kun taas propionaatin (5,3–6,5 %), butyraatin (7,2–9,2 %), valeraatin (3,4–4,7 %) ja kaproaatin (1,9–4,0 %) prosenttiosuudet laskivat verrattuna hydrolyyseihiin, joissa pH:n säätöön käytettiin natriumhydroksidia. Asetaattipitoisuus nousi vielä enemmän  $90,0 \pm 0,6$  %:iin hydrolyysikokeessa ilman pH-säätöä. Näin ollen pH-säädössä käytettyä emästä voidaan käyttää VFA-koostumuksen säätämiseen.

Taulukko 2. Yhteenveto hydrolyysikokeiden tuloksista. Hydrolysoidun lietteen tilavuudet kilogrammoina, kuivapaino (% märkäpainosta), haihtuvat kiintoaineet (% kuivapainosta) ja pH. Säädetyt pH-arvot kokeiden alussa ja lopussa sekä kokeen kesto, pH:n säätöön käytetyn emäksen määrät, haihtuvien rasvahappojen (VFA) enimmäismäärät ja aika maksimipitoisuuden saavuttamiseen.

Hydrolysis	Volume (kg)	Feed to biogas		Sludge	pH		Base mol	VFAs begin (g/L)	VFAs highest	
		Dry weight (% of wet wt)	Volatile solids (% of dry wt)		Hydrolysis				Day	(g/L)
					Begin	End (day)				
H1	44,04	4,2 ± 0,3	74,9 ± 0,7	6,8	8,2	8,2 (12)	2,9 (NaOH)	5,22 ± 0,36	8	8,16 ± 0,47
H2	37,81	3,1 ± 0,1	74,9 ± 0,5	6,4	8,1	7,5 (7)	3,7 (NaOH)	11,36 ± 0,13	6	20,51 ± 1,32
H3	34,34	3,3 ± 0,1	75,2 ± 0,1	6,5	8,9	6,9 (7)	2,3 (NaOH)	5,78 ± 0,08	6	18,11 ± 0,85
H4	34,89	3,3 ± 0,1	74,7 ± 0,1	6,5	8,5	6,6 (7)	1,4 (NaOH)	7,87 ± 1,43	7	16,75 ± 0,04
H5	32,46	2,7 ± 0,1	72,7 ± 0,2	6,3	8,4	8,4 (7)	2,4 (Urea)	13,00 ± 0,02	4	15,57 ± 0,24
H6	32,46	2,6 ± 0,1	77,0 ± 0,3	6,5	7,2	8,4 (20)	6,0 (NaHCO <sub>3</sub> )	3,44 ± 0,06	4	6,06 ± 0,17
H7	36,66	2,9 ± 0,1	71,9 ± 0,2	6,8	7,6	7,2 (7)	2,3 (NaOH)	1,69 ± 0,31	6	7,44 ± 0,67
H8	36,84	2,0 ± 0,1	70,6 ± 0,2	6,7	8,0	7,1 (7)	1,2 (NaOH)	3,88 ± 0,03	9	6,65 ± 0,38
H9	36,32	3,2 ± 0,1	76,8 ± 0,1	6,4	8,1	7,2 (7)	3,1 (NaOH)	5,88 ± 1,10	9	16,54 ± 0,34
H10	35,22	3,1 ± 0,1	74,5 ± 0,1	6,8	7,6	7,0 (8)	0,9 (NH <sub>4</sub> OH)	4,00 ± 1,04	8	8,83 ± 0,90
H11	34,55	3,3 ± 0,1	74,0 ± 0,7	6,5	8,4	7,3 (10)	1,1 (NH <sub>4</sub> OH)	7,47 ± 3,71	10	11,17 ± 0,27
H12	33,10	3,3 ± 0,1	71,3 ± 0,2	6,5	8,0	7,4 (10)	1,6 (NH <sub>4</sub> OH)	8,75 ± 0,25	10	13,02 ± 0,87
H13	35,79	3,2 ± 0,1	69,2 ± 0,4	6,8	8,4	7,2 (10)	1,0 (NH <sub>4</sub> OH)	7,23 ± 1,19	5	10,99 ± 0,12
H14	35,37	2,6 ± 0,1	68,5 ± 0,2	7,1	7,1	6,7 (10)	No	6,24 ± 0,61	10	11,92 ± 1,28

Taulukko 3 Haihtuvien rasvahappojen (VFAs) prosenttiosuudet lietteessä suurimmassa pitoisuudessa, mukaan lukien asetaatti, propionaatti, butyraatti, valeraatti ja kaproaatti

Hydrolysis	VFAs (%)				
	Acetate	Propionate	Butyrate	Valerate	Caproate
H1	62,0 ± 0,6	21,4 ± 0,9	11,3 ± 0,3	5,3 ± 0,2	0,0 ± 0,0
H2	45,7 ± 1,4	24,9 ± 1,7	17,0 ± 0,2	6,8 ± 0,2	5,7 ± 0,2
H3	76,5 ± 0,4	NA	23,5 ± 0,4	NA	NA
H4	48,8 ± 0,1	26,7 ± 0,1	12,5 ± 0,1	7,0 ± 0,1	5,0 ± 0,1
H5	54,4 ± 0,6	21,9 ± 0,3	13,6 ± 0,7	5,7 ± 0,2	4,4 ± 0,1
H6	51,5 ± 0,6	23,4 ± 0,1	10,3 ± 0,2	7,6 ± 0,2	7,2 ± 0,2
H7	70,9 ± 0,6	22,4 ± 0,4	3,9 ± 0,1	1,4 ± 0,1	1,4 ± 0,1
H8	51,6 ± 1,4	18,5 ± 0,2	11,1 ± 0,4	9,4 ± 0,4	9,4 ± 0,4
H9	67,7 ± 0,7	10,5 ± 0,3	13,1 ± 0,1	6,7 ± 0,2	2,0 ± 0,2
H10	80,6 ± 0,9	5,3 ± 0,3	7,2 ± 0,1	3,8 ± 0,2	3,2 ± 0,3
H11	78,0 ± 0,3	6,5 ± 0,1	7,4 ± 0,1	4,1 ± 0,1	4,0 ± 0,1
H12	76,1 ± 0,7	6,3 ± 0,2	9,2 ± 0,1	4,7 ± 0,2	3,7 ± 0,3
H13	79,6 ± 0,7	5,9 ± 0,3	9,2 ± 0,3	3,4 ± 0,1	1,9 ± 0,1
H14	90,0 ± 0,6	3,1 ± 0,3	5,2 ± 0,1	1,5 ± 0,1	0,2 ± 0,1

### 3.2.2 PHA:ta akkumuloivien bakteerien rikastus ja akkumulaatio

#### Menetelmät

Yleisesti ottaen PHA:ta keräävien bakteerien rikastaminen ja PHA:n kerääminen saavutettiin luomalla kasvua rajoittavat olosuhteet fosforin saostamisella. PHA:ta keräävien bakteerien rikastus ja PHA:n kertyminen suoritettiin 8 litran Labfors 3 -fermentorissa (Infors HT, Bottmingen, Sveitsi), jonka työtilavuus oli 5 litraa (Kuva 3). PHA:ta keräävien bakteerien rikastusalustana käytettiin Lahti Aqua Oy:n Ali-Juhakkalan jätevedenpuhdistamosta peräisin olevaa kolminkertaisesti väkevoityä aktiivilietettä. Fermentaatioiden aikana on tutkittu erilaisia säätöstrategioita.

Kokeet 1. Fosforin saostus 3-kertaisesta aktiivilietteestä käyttämällä  $\text{FeSO}_4$ :a, kun asetaattia syötettiin VFA:na pH-arvoissa  $>7,0$  (natriumhydroksidikontrolloitu) ja pH-arvoissa 5,5–6,5  $\text{FeSO}_4$ :n lisäyksellä ja ilman. Näissä kokeissa käytettiin 150 rpm:n sekoitusnopeutta ja samanaikaista ilmastusta Sera Precision air 550 R plus -pumpulla (Sera, Immenhausen, Saksa).

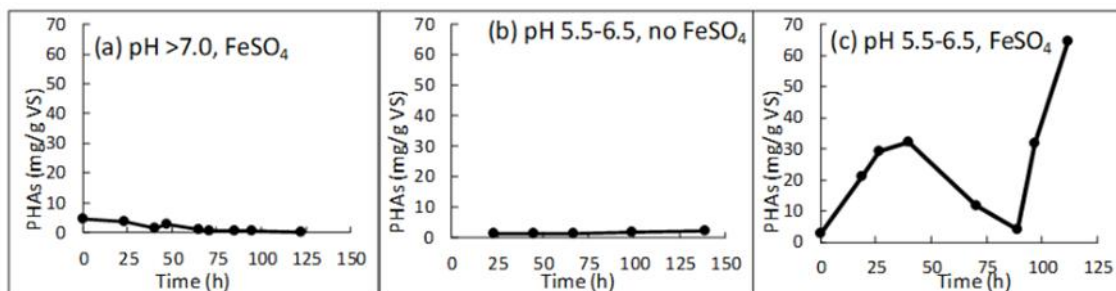
Kokeet 2. (a) Fosforin saostus rikastus-/keräysbioreaktorista käyttämällä  $\text{FeSO}_4$ -ylimäärää (2,4 g/l hydrolysoitua lietettä; liete syötöstä biokaasun tuottoon) samalla, kun VFA-liuosta syötettiin. Tässä kokeessa käytettiin 250 rpm:n sekoitusta fermentorissa. (b) Fosforin saostus erotetusta VFA-liuoksesta hydrolyysin jälkeen ja ennen fermentoriin syöttöä käyttämällä  $\text{FeSO}_4$ -ylimäärää (2,4 g/l hydrolysoitua lietettä; syöttö biokaasuun). Tässä kokeessa sekoitusta pidettiin yllä 150 rpm:n nopeudella fermentorissa tehokkaan ilmastuksen lisäksi käyttäen ACO-318-ilmakompressorilla (Hailea, Kiina).

Kokeet 3. Suolahapon tarpeen arviointi (a) hydrolyysibioreaktoreissa tapahtuvan emäksen lisäyksen ja (b) ammoniakkin vapautumisen vuoksi proteiineista ja ureasta. Näissä kokeissa käytettiin 150 rpm:n sekoitusnopeutta ja samanaikaista ilmastusta ACO-318-ilmakompressorilla.

Kokeet 4. Aktiivilietteen syöttämisen vaikutus ravinteena PHA-pitoisuuksiin samanaikaisesti hydrolyysistä saatujen VFA-yhdisteiden syöttämisen kanssa. Näissä kokeissa käytettiin fermentorin sekoitusta 150 rpm:n nopeudella ja ilmastusta ACO-318-ilmakompressorilla (Hailea, Kiina).

## Tulokset

Kokeet 1. PHA:n tuoton bioreaktoreissa käytettiin fosforin saostusta  $\text{FeSO}_4$ :lla luomaan kasvua rajoittavat olosuhteet, joissa PHA:t voivat kerääntyä VFA-asetaatia syötettäessä hiilen lähteenä. Arvioitiin alhaisen (pH 5,5–6,5) ja korkean ( $>7,0$ ) pH:n vaikutuksia PHA:n kertymiseen. Kun fosfori saostettiin kolminkertaisesta aktiivilietteestä kokeen alussa käyttämällä  $\text{FeSO}_4$ -ylimäärää ja VFA-asetaatia syötettiin pH-arvoissa yli 7,0, PHA:ta ei kertynyt (Kuva 4a). Vastaavasti ilman  $\text{FeSO}_4$ :n lisäystä pH-arvoissa 5,5–6,5 PHA-pitoisuudet pysyivät alhaisina, kun VFA-asetaatia syötettiin hiilen lähteenä (Kuva 4b). Kuitenkin, kun fosfori saostettiin  $\text{FeSO}_4$ :lla alhaisessa pH-arvossa 5,5–6,5, PHA-pitoisuudet alkoivat nousta merkittävästi hiililähde VFA-asetaatin syötön myötä, mikä viittaa siihen, että PHA:n kertyminen ilmeisimmin johtuu fosforin rajoituksesta alhaisissa pH-arvoissa (Kuva 4c). Tämän on osoitettu pitävän paikkansa aiemmin, ja nämä tulokset on esitetty patentissa (Yhdysvaltain patenttihakemus 19/232 487, jätetty kesäkuu/2025).



Kuva 6. PHA-pitoisuus 3-kertaisesti väkevöidyissä aktiivilieterikastusviljelmässä (a) korkeissa pH-arvoissa rautasulfaatin kanssa, (b) matalissa pH-arvoissa ilman rautasulfaattia ja (c) matalissa pH-arvoissa rautasulfaatin kanssa.

Kokeet 2. Tutkimuksissa, joissa hydrolysoitujen VFA-yhdisteiden syöttö yhdistettiin PHA:ta keräävien mikrobien rikastukseen ja PHA:n kertymiseen, fosfori saostui syötettäessä ylimäärä FeSO<sub>4</sub> samanaikaisesti hydrolysoitujen VFA-yhdisteiden syötön kanssa. Tämän seurauksena viljelmä muuttui mustaksi sulfaattia pelkistävien bakteerien (SRB) muodostaman ferrosulfidisaostuman vuoksi. Bakteerit käyttivät VFA:ita pelkistäväenä energialähteenä sulfaatin pelkistykseen. Siten PHA:n kertymiseen ja sulfaatin pelkistykseen osallistuvat bakteerit kilpailivat samasta hiilen lähteestä. Koska sulfaatin pelkistys tapahtuu yleensä parhaiten anaerobisissa olosuhteissa, lisättiin ilmastuspumppu (Air Compressor ACO-318) sulfaatin pelkistymisen estämiseksi. Kun fosfori saostetaan PHA:n tuotannossa käyttämällä FeSO<sub>4</sub> ylimäärää, SRB:n rikastumisriski suurten bioreaktorien anaerobisissa taskuissa on kuitenkin edelleen olemassa. Siksi on tärkeää arvioida PHA:n tuotannon aikana käytettävän ylimääräisen saostuskemikaalin vaihtoehtoja, samalla kun tiedetään, että jätevedenpuhdistuksessa käytetty ferrosulfaatti ei ilmeisesti ole ongelma, koska sitä ei lisätä ylimäärin. Lisäksi voi olla parempi tehdä fosforin saostus jo hydrolyysin lopussa, jotta vältetään suurten saostuneen fosforin määrien kertyminen PHA:n rikastus-/keräysbioreaktoreihin, joissa tarvitsee ylläpitää fosforirajoitusta. Tätä lähestymistapaa on käytetty seuraavissa kokeissa.

Kokeet 3. PHA:ta keräävien bakteerien rikastuksen aikana laskettiin suolahapon lisäystarpeet, jotka liittyivät (a) hydrolyysikokeiden aikana lisätyn ammoniakkin tai natriumhydroksidin neutralointiin ja (b) proteiineista ja ureasta hydrolyysin aikana vapautuvan ammoniakkin neutralointiin. Arvioitiin, että hydrolyysin aikana lisätyn ammoniakkin/natriumhydroksidin neutraloimiseksi tarvitaan stoikiometrisesti yhtä suuri määrä suolahappoa. Hydrolyysin aikana proteiineista ja ureasta muodostuneen ammoniakkin neutraloimiseksi tarvittavan suolahapon määräksi laskettiin  $38,7 \pm 7,9$  mmol/L, perustuen suolahapon ylimäärään sen jälkeen, kun hydrolyysissä lisätty ammoniakki/natriumhydroksidi on neutraloitu. Yhteenvedona voidaan todeta, että hydrolyysin suorittaminen emäksisissä olosuhteissa neutraalien olosuhteiden sijaan vaatii paljon enemmän happoja ja emäksiä. Kemikaalien (ammoniakki, natriumhydroksidi, suolahappo) käytön minimoimiseksi ja resurssien taloudellisen käytön saavuttamiseksi tavoitteeksi tuli fosforin saostaminen käyttämällä rautakloridia (FeCl<sub>3</sub>; happo, jonka pKa-arvo on 2,46) ja rautahydroksidia (Fe(OH)<sub>2</sub>; emäs, jonka pKa-arvo on 17), joita voidaan käyttää samanaikaisesti pH:n säätöön.

Kokeet 4. PHA:ta keräävien bakteerien rikastuksen aikana aktiivilietesyöttöä tarvitaan ravinteiden lähteeksi tehostamaan keräävien bakteerien rikastumista. Tärkeimmäksi kerääväksi bakteerisuvuksi on aiemmin määritetty *Xanthobacter* (myös muut kannat), joka voi kerätä sekä fosforia että PHA:ta. Suku voi kasvaa solunsisäisen varastofosforin ansiosta, vaikka fosforia saostuu, kun muut bakteerit ovat stationäärifaasissa/lepotilassa. Kun fosforia on saatavilla aktiivilietesyötön kautta, fosforia keräävät bakteerit ovat aktiivisemmassa kasvuvaiheessa verrattuna ei-kerääviin bakteereihin, ja ne voivat nopeasti hyödyntää aktiivilietteen kanssa samanaikaisesti syötettyä fosforia, kun taas muut bakteerit ovat vielä stationäärisessä kasvuvaiheessa. Aktiivilietteen optimaaliset syöttöajat ja määrät saatiin laskettua tehtyjen kokeiden perusteella.

Kaiken kaikkiaan viimeisessä pienen pilottimittakaavan kokeessa tutkitaan ferrikloridin ja rautahydroksidin käyttöä pH-arvon säätelyyn, kun taas VFA-yhdisteet syötetään neutraalin hydrolyysin hydrolysoidusta nesteestä ilman kemikaalilisäyksiä. Rauta(III)kloridin happamat ja rautahydroksidin emäksiset ominaisuudet voisivat korvata ammoniakkin, natriumhydroksidin ja suolahapon pH-arvon säätelyssä, samalla kun rauta saostaisi fosforia kasvua rajoittavien olosuhteiden

ylläpitämiseksi. Kun ferrosulfaattia ei lisätä liikaa, SRB ei rikastu asianmukaisesti ilmastetuissa bioreaktoreissa. Muita kemikaaleja voidaan käyttää pH:n säätämiseen tarvittaessa. Mittakaava nostetaan sitten 500–1000 litraan tammikuusta 2026 alkaen EU Horizon projektissa CircSyst.

#### 500-1000 L pilot-mittakaavan kokeet

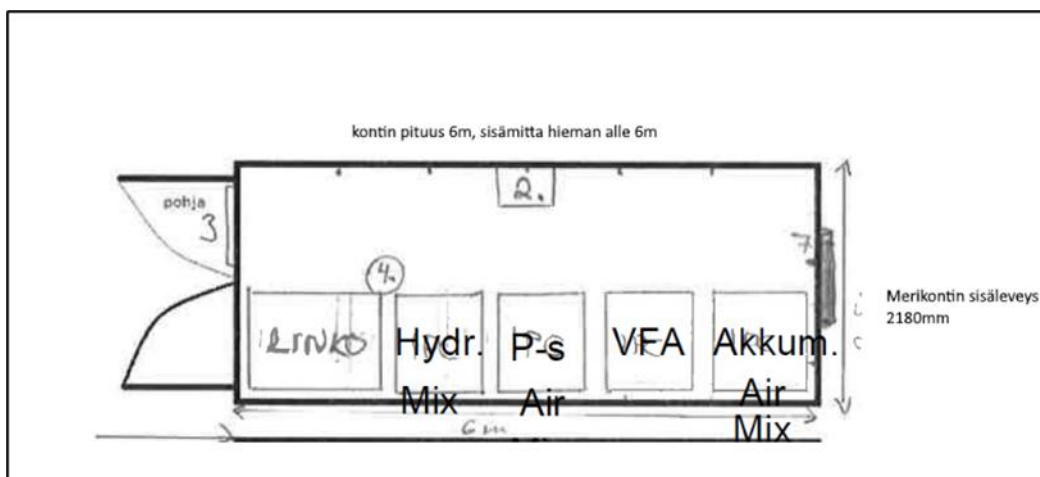
PHA-tuotantoa kasvatetaan parhaillaan 500–1000 litran pilot-mittakaavaan kontissa, ja laitteiden hankinta on käynnissä (Kuvat 7 ja 8). Bioreaktorit ja varastosäiliöt VFA-liuosta varten koostuvat neljästä IBC-säiliöstä, joista kahdessa on sekoitin, ja ne on hankittu Deniosilta (Bad Oeynhausen, Saksa). Hydrolyysin ja PHA:n akkumulaation jälkeinen liete erotetaan linkolla, joka on jo olemassa (Evedos, tyyppi 10, Saksa). Lietteen ja nesteen pumppaamiseksi säiliöstä/altaasta toiseen on hankittu epäkeskoruuvipumppu KMV:ltä (KMV-products, osa West Invest Groupia). Konttiin kuljetetaan lisäksi pieni pakastin näytteiden varastointia varten (jo saatavilla). PHA:ta keräävän bioreaktorin pH-säätöyksikkö on kartoituksen alla. Putket ja putkiliitännät hankitaan rautakau-pasta (K-Rauta, Suomi).

Tarkkaa tutkimusajataulua oli aluksi haastavaa arvioida täysin uuden prosessin kehittämisen vuoksi. Prosessiparametrien testaaminen pienessä pilottimittakaavassa kesti jonkin verran alun perin arvioitua kauemmin, koska parametrien testaaminen pienessä pilottimittakaavassa oli helpompaa kuin 500–1000 litran bioreaktoreissa. Tärkeitä testattavia parametreja olivat mikrobiyhteisön kasvun ohjaaminen VFA-tuotantoon anaerobisen biokaasun tuotannon sijaan (ratkaisu: mikroaerobiset olosuhteet) ja PHA:ta keräävien bakteerien rikastaminen sulfaattia pelkistävien bakteerien sijaan (ratkaisu: aerobiset olosuhteet, FeSO<sub>4</sub>:n käytön vähentäminen). Lisäksi kemikaalien käyttöä optimoitiin ja minimoitiin kannattavuuden maksimoimiseksi. Nyt parametrien säätö näyttää olevan valmis, mikä luo hyvän pohjan 500–1000 litran pilottimittakaavan kokeiden aloittamiselle vuoden 2026 alussa. Koska bioreaktorikokeet vaativat tyypillisesti päivittäistä seuranta-aikaa, usein myös viikonloppuisin, kokeet alkavat vasta tammikuussa 2026, koska joulun ja uuden vuoden aikaan on lukuisia pyhäpäiviä, mikä vaikeuttaa tarvittavien toimenpiteiden suorittamista ongelmatilanteissa. Pilottiprojektien odotetaan valmistuvan keväällä 2026.

Kontin pohjapiirros on esitetty kuvassa 8, ja sen mitat ovat seuraavat: pituus 6 m, leveys 2,18 m ja korkeus 2,3 m. Linko on sijoitettu nurkkaan ovien viereen vahvistetulle lattialle, ja sen vieressä on vierekkäin neljä IBC-säiliötä (1200 mm x 800 mm). Ensimmäinen säiliö on hydrolyysiä varten, toinen ja kolmas hydrolysoidun ja erotetun nesteen varastointia ja fosforin poistoa varten, ja neljäs PHA:ta keräävien bakteerien rikastamista ja PHA:n kertymistä varten. Vesihanat, allas ja pakastin sijaitsevat vastakkaisella seinällä. Jätevedenpuhdistusprosessista peräisin oleva liete johdetaan sisään ja ulos putkien kautta, jotka kulkevat seinäluukun läpi.



Kuva 7. Kuva kontista ulkoa ja sisältä (yläkuvat). Tarvittavat laitteet: linko lietteelle, 4 IBC-säiliötä (1000 l), 2 sekoitinta, pakastin näytteitä varten ja pumppu Demo 5:tä varten.



Kuva 8. Kontin pohjasuunnitelma

### 3.2. TP2. Ravinteiden talteenotto puhdistamolietteestä

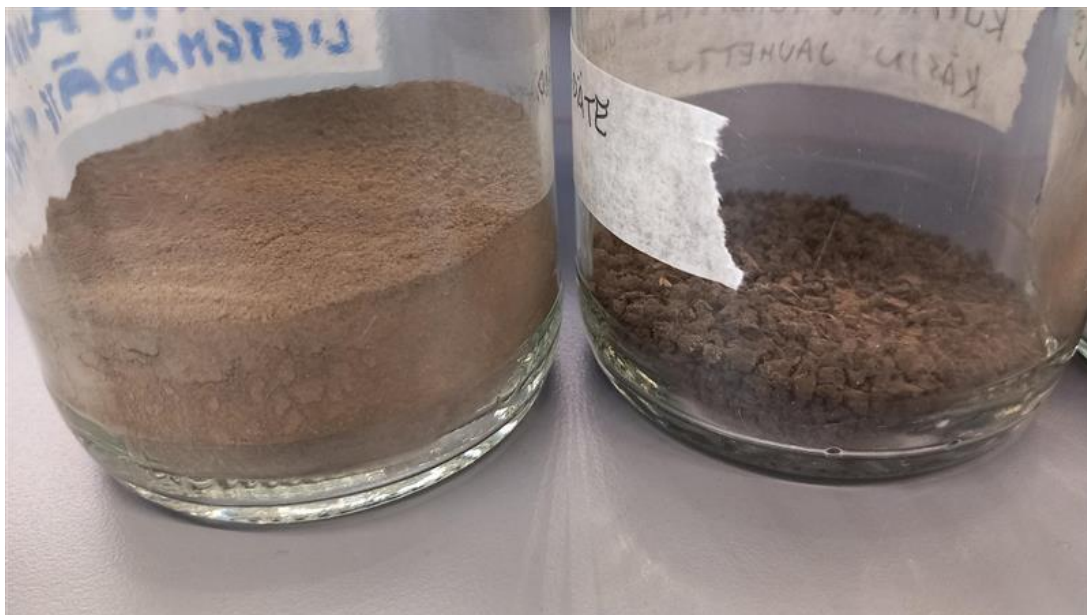
Puhdistamolietteen pyrolyysikokeet kiertotalouslaboratoriossa

Toimenpiteiden tarkoituksena oli selvittää pyrolyysimenetelmän soveltuvuutta puhdistamolietteen käsittelyyn. Pyrolyysiprosessi eli kuivatus tapahtuu hapettomissa olosuhteissa, tyypillisesti 150–700 °C lämpötilassa alipaineistettuna. Lopputuotteena syntyy biohiiltä, pyrolyysiöljyä ja kaasua. Pulina-hankkeessa pyrolyysikoeajot toteutettiin LABin kiertotalouslaboratoriossa panostoimisella pyrolyysilaitteella (kuva 8). Syötteenä käytettiin mädätettyä puhdistamolietettä ja PHA:n tuotantoprosessissa syntyvää hydrolyysijäännöstä. Tarkoituksena oli tuottaa tietoa sekä aerobisen (PHA) että anaerobisen (biokaasu) prosessin vaikutuksesta puhdistamolietteen sisältämän fosforin hyödyntämiseen. Ammonium-typpeä on nestemäisessä jakeessa, josta se erotetaan strippauksella. Lisäksi tarjoutui mahdollisuus tutkia metsäteollisuuden biolietteestä märkäpyrolyysillä tuotettua HTC-hiiltä. Samaa materiaalia pyrolysoitiin myös LABin pyrolyysilaitteella, jolloin voitiin vertailla lopputuotteiden ominaisuuksia.

Ennen pyrolyysiä näytteet esikuivatiin uunissa 20 % kosteuteen. Koeajot mädätetylle jätevesilietteelle toteutettiin kahdella eri maksimilämpötilalla 500 °C ja 650 °C. Muiden näytteiden osalta maksimilämpötila oli 650 °C. Määritykset tehtiin pyrolyysiprosessin energian kulutuksesta ja tuotejakaumasta. Pyrolyysikoeajojen tulokset on esitetty taulukossa 4. Lietteen orgaanisten haitta-aineiden hajomista pyrolyysissä tutkittiin laboratorioanalyysillä (TP3).



Kuva 9. Panostoiminen pyrolyysilaitte LAB-ammattikorkeakoulun kiertotalouslaboratoriossa.



Kuva 10. Kuivattu puhdistamoliete.



Kuva 11. Pyrolyysihili mädätetystä puhdistamolietteestä



Kuva 12. HTC-hiili biolietteestä



Kuva 13. Pyrolyysihiili hydrolyysisakasta. Tässä näytteessä oli enemmän jauhemaista pölyävää hiiltä.

Taulukko 4. Pyrolyysikoeajot.

	Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3	Näyte 4	Näyte 5	Näyte 6
Syöte	Mädätetty puhdistamoliete	Mädätetty puhdistamoliete	Mädätetty puhdistamoliete	Hydrolyysisakka	Hydrolyysisakka	Bioliete
Kosteus, m-%	72,4	72,2	66,9	80,0	80,1	84,6
Panoksen määrä, kg	8	8,2	11,8	10,0	4,4	76,3
Lämpötilan nostot, °C/h	50/200/350/500	50/200/350/500/650	100/200/350/500/650	100//200/350/500/650	100//200/350/500/650	100//200/350/500/650
Pitoaika max lämpötilassa	2 h	2 h	2 h	2 h	2 h	2 h
Energian kulutus, kWh	68	92	95	93	97	156
Hiilen määrä, kg	1,2	1,1	2	0,6	0,3	5,0
Öljyn määrä, kg	6,0	6,4	7,7	8,7	3,7	71,1
Hiili, %	14,8	13,5	18,1	6,1	6,9	6,7
Öljy, %	75,1	77,8	65,5	85,8	84,9	93,1
Kaasu, %	10,1	8,7	16,4	8,1	8,1	0,2

## Fosforin talteenotto lannoitteita varten

Ammoniakkia otetaan jo talteen jätevedestä teollisessa mittakaavassa strippaamalla nesteestä biokaasun tuotannon jälkeen (Gasum Oy), joten se ei ole lannoitteiden talteenoton painopiste tässä tutkimuksessa. Sitä vastoin fosforin talteenottoa ei ole kehitetty Suomessa. Maissa, joissa biologinen fosforin talteenotto on käytössä, bakteerit keräävät fosforia solun sisään, josta se sitten vapautuu biokaasun tuotannon aikana anaerobisissa olosuhteissa. Koska fosfori ja ammoniakki biokaasun tuotannon jälkeen ovat nestemäisessä faasissa, ne on helppo saostaa struviittina ( $\text{NH}_4\text{MgPO}_4$ ) magnesiumin lisäämisen jälkeen. Suomessa ja monissa muissa maissa fosfori saostetaan kuitenkin raudalla, eikä sitä voida käyttää struviittien tuotantoon, koska fosfori ei ole nestemäisessä faasissa. Näin ollen saostuneen fosforin liukenemistä tutkittiin sen arvioimiseksi, missä olosuhteissa liukoisen fosfaatin talteenotto olisi helpointa suorittaa. Lietteiden happo- tai emäsluotuksen jälkeen fosforin on mahdollista ottaa talteen saostamalla nestefaasista esim.  $\text{FeSO}_4$ :llä neutraaleissa olosuhteissa. Vaihtoehtoisesti  $\text{FeSO}_4$ :n rauta voidaan saostaa sulfidina, jolloin fosfori jää liuokseen happo/emäskäsittelyn jälkeen.

Tässä työssä happo- ja emäskäsittelyt on tehty (pH:t noin 2, 4, 6-8, 10 ja 12), ja saostetuista litteistä ja nestefaaseista on määritetty epäorgaaniset yhdisteet, sekä fosfaatti, ammonium ja sulfaatti. Nyt arvioidaan eri lähestymistapoja fosforin talteenottoon, jonka jälkeen lupaavimmat lähestymistavat voidaan pilotoida pienessä mittakaavassa. Käsitellyt lietteet olivat syöte mädätykseen, mädätetty liete, lingottu mädätetty liete ja sen rejektivesi.

### Materiaalit

Fosforin talteenottoa tutkittiin litteistä ennen biokaasun tuotantoa ja sen jälkeen, sekä lingotusta litteestä biokaasun tuotannon jälkeen ja samalla erotetusta vedestä. Kaikki lietemateriaalit kerättiin

Lahti Aqua Oy:ltä (Lahti, Suomi). Materiaalien kuivapainot (5-10 g näytettä 105 °C:ssa 16 h ajan), haihtuvat kiintoaineet (kuivattujen näytteiden kuumentaminen 105 °C:ssa 4 h ajan) ja pH (5 g:sta lietettä sentrifugoinnin jälkeen) määritettiin keräyspäivänä. Sen jälkeen punnittiin 500 ml kutakin materiaalia kahden litran purkkeihin kolmena rinnakkaisena pH-yksikköä kohden, lukuun ottamatta kuivattua lietettä, josta 125 g punnittiin kahden litran purkkeihin, jonka jälkeen lisättiin 375 g ultrapuhdasta vettä. Lietteet sekoitettiin huolellisesti ja pakastettiin -20 °C lämpötilaan liuotuskokeita varten. Fosforin liuotuskokeet koostuivat lietenäytteiden happo- ja emäksisittelyistä, joita seurasi kiinteän aineen ja nesteen erottelu sentrifugoimalla, sekä fosfori, ammoniakki, sulfaatti ja alkuainemääritykset. Alkuaineet analysoitiin Eurofins Oy:ssä (Lahti, Suomi).

Liuotuskokeita varten pakastetut purkit sulatettiin hitaasti vesihauteessa ( $43 \pm 1,5$  °C), minkä jälkeen kokeet suoritettiin huoneenlämmössä  $21 \pm 2$  °C. Happoliuotus suoritettiin käyttämällä 5,0 M rikkihappoa pH:n laskemiseksi arvoihin 2 ja 4. Emäksisissä liuotuskokeissa pH-arvot säädettiin arvoihin 9,5 ja 10,5 käyttämällä 9,0 M ammoniumhydroksidia, ja pH 12 saavutettiin lisäämällä 6,0 M natriumhydroksidia. pH:ta seurattiin koko pH-säädön ajan sentrifugoimalla 5 g:n näytettä (Heraeus 1S-R, DJB Labcare, Buckinghamshire, Iso-Britannia) ja mittaamalla pH. pH-säädön jälkeen purkkeja huuhdeltiin tippikaasulla muutaman minuutin ajan anaerobisten olosuhteiden luomiseksi (Domnick Hunter Scientific LCMS30-1, Hertfordshire, Iso-Britannia), minkä jälkeen purkkeja ravisteltiin varovasti nopeudella 50 rpm (Edmund Bühler GmbH SM 30 A, Bodelshausen, Saksa) 150 minuutin ajan. Ravistamisen jälkeen näytteet kerättiin 50 ml:n sentrifugiputkiin ja säilytettiin -20 °C:ssa jatkoanalyysijä varten.

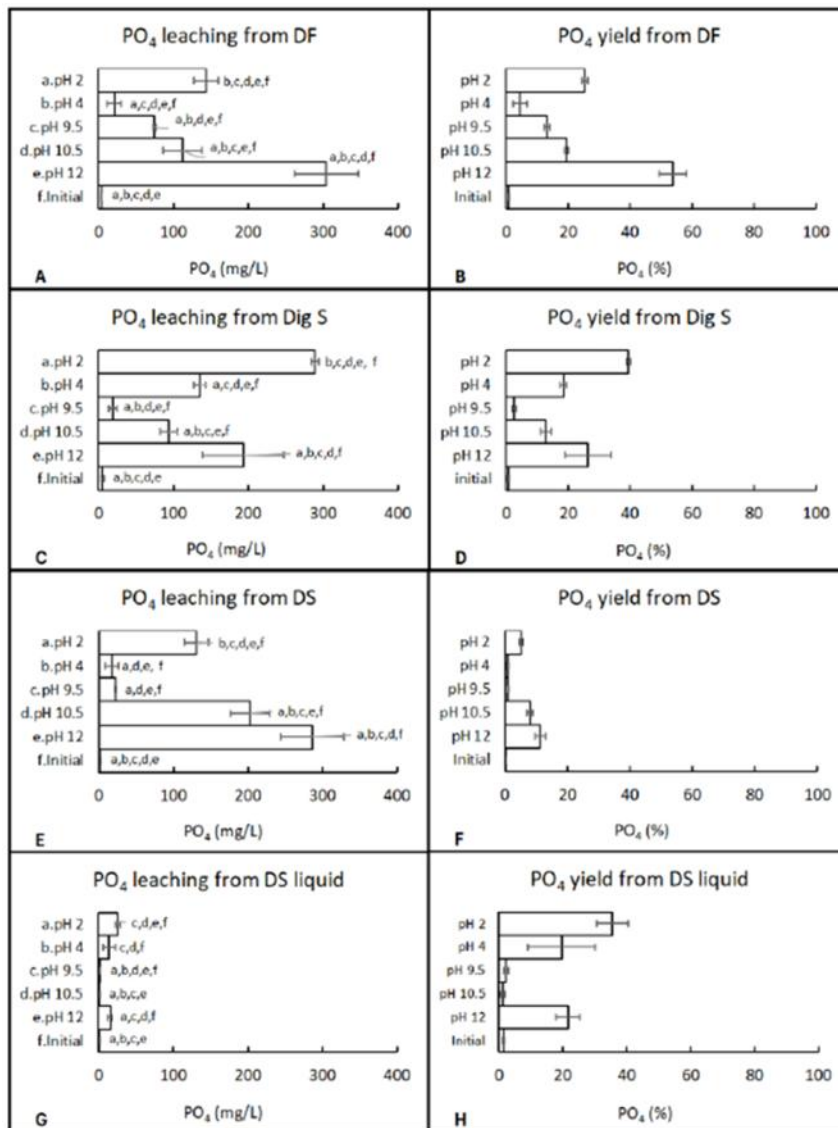
Liuennut fosfori analysoitiin nestefaasista 20 minuutin sentrifugoinnin jälkeen  $3000 \times g$ :n voimalla, minkä jälkeen se laimennettiin suhteessa 1:10-1:1000. Menetelmä on esitetty edellä hydrolyysikokeiden yhteydessä.

Sulfaattipitoisuus analysoitiin standardoidulla turbidimetrisellä menetelmällä (APHA, 2012). Kun näytteet oli sulatettu huoneenlämpöön ( $21 \pm 2$  °C) vesihauteessa ( $44 \pm 1,5$  °C), nestemäinen faasi erotettiin sentrifugoimalla (Heraeus 1S-R, DJB Labcare, Buckinghamshire, Iso-Britannia) nopeudella  $3000 \times g$  20 minuutin ajan. Näytteet laimennettiin laimentamattomasta näytteestä suhteeseen 1:1000, ja standardiliuokset 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40  $\mu g$  SO<sub>4</sub>/l laimennettiin standardi-sulfaattiliuoksesta (100  $\mu g$  SO<sub>4</sub>/ml). Puskuriliuos sisälsi 30 g/l magnesiumkloridi-heksahydraattia, 5 g/l natriumasetaatitrihydraattia, 1,0 g/l kaliumnitraattia ja 20 ml/l etikkahappoa (99 %). Turbidimetristä analyysiä varten liuokseen pipetoitiin 2 ml puskuriliuosta ja lusikan kärjellä lisättiin 0,02–0,03 ml bariumkloridikiteitä. Näytteitä sekoitettiin magneettisekoittimella  $60 \pm 2$  sekunnin ajan ja analysoitiin spektrofotometrillä absorbanssilla 420 nm  $5 \pm 0,5$  minuuttia myöhemmin (Shimadzu UV-2401 PC, Kioto, Japani).

Ammoniumpitoisuudet nestemäisissä faaseissa mitattiin käyttämällä Holmesin ym. [3] menetelmästä mukailtua o-ftaalialdehydifluoresenssimenetelmää Helsingin yliopiston ympäristö-laboratoriossa (Lahti, Suomi). Näytteet sulatettiin huoneenlämpöön ( $21 \pm 2$  °C) edellä kuvatulla tavalla. Standardit, jotka sisälsivät 50, 100, 500, 1000 ja 2500  $\mu g$  N/l, laimennettiin ammoniakkistandardiliuoksesta (10 mg N/l). Kutakin näytettä ja standardia pipetoitiin 250  $\mu l$  mikrotiiterilevyille. Reagenssiliuos sisälsi 947,9 ml/l natriumtetraboraattipuskuria (40 g/L), 4,74 ml/l natriumsulfidia (8 g/l) ja 47,39 ml/l OPA-liuosta (40 g/l orto-ftaalialdehydiä laimennettuna etanoliin (99 %)). Analyysiä varten pipetoitiin 1000  $\mu l$  reagenssiliuosta jokaiseen kuoppaan. Levyjä inkuboitiin huoneenlämmössä ( $21 \pm 2$  °C) 165–210 minuuttia valolta suojattuna. Fluoresenssi mitattiin mikrolevynlukijalla 420 nm:ssä (Tecan, Zürich, Sveitsi).

## Tulokset

Korkeimmat fosforipitoisuudet (mg/l) liukenevat syötteestä biokaasun tuottoon (kuva 8a) ja lingo-  
tusta lietteestä (kuva 8e) pH-arvossa 12, ja lietteestä biokaasun tuoton jälkeen pH-arvossa 2. Talteen-  
ottoprosenttien arvioinnissa parhaat tulokset saatiin syötteestä biokaasun tuottoon (kuva 8b). Näiden  
lietteiden kuivapainot vaihtelivat kuitenkin melko paljon (taulukko 4), ja kokonaistulosten lisäarviointi  
on käynnissä. Fosforipitoisuuksia verrataan ammoniakkin, sulfaatin ja alkuaineiden pitoisuuksiin käyt-  
tämällä erilaisia tilastollisia analyysejä (korrelaatiot, varianssianalyysi t-testillä, Kruskal-Wallis-Mann-  
Whitney-testi, pääkomponenttianalyysi jne.) parhaiden fosforin talteenotto-olosuhteiden määrittä-  
miseksi.



Kuva 14. Liuenneen fosfaatin pitoisuudet mg PO<sub>4</sub>/l syötteessä biokaasun tuottoon (A), biokaasun tuoton jälkei-  
sessä lietteessä (C), lingo-  
tussa lietteessä (E) ja lingo-  
tun lietteen nesteessä (G) eri pH-arvoilla, sekä fosfaatin liuke-  
nemistehokkuus prosentteina lietteen kokonaisfosforista syötteessä biokaasun tuottoon (B), biokaasun tuoton jäl-  
keisessä lietteessä (D), lingo-  
tussa lietteessä (F) ja lingo-  
tun lietteen nesteessä (H) eri pH-arvoilla. Virhepalkit osoit-  
tavat keskihajonnan (n=3). Virhepalkkien vieressä olevat kirjaimet osoittavat tilastollisesti merkitseviä eroja (Krus-  
kal-Wallis-testi, jota seuraa Mann-Whitney-testi).

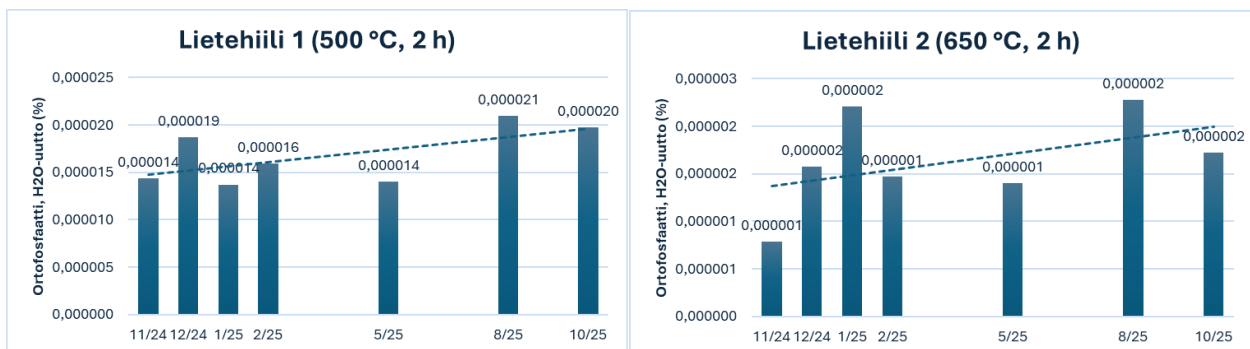
Taulukko 5. Syötteen biokaasun tuottoon (DF), biokaasun tuoton jälkeinen liete (Dig S), lingottu liete (DS) ja lingotun lietteen neste (DS-neste) ja niistä määritetyt kuivapainot (DW), haihtuvat kiintoaineet (VS) ja kiinteät kiintoaineet (FS).

	DF	Dig S	DS	DS liquid
DW (g/g)	0.025 ± 0.00016	0.021 ± 0.0010	0.28 ± 0.0012	0.0016 ± 0.00011
VS (g/g)	0.77 ± 0.0010	0.64 ± 0.0026	0.63 ± 0.0018	0.54 ± 0.033
FS (g/g)	0.23 ± 0.0011	0.36 ± 0.0026	0.37 ± 0.0018	0.46 ± 0.033

### Fosforin liukoisuuskokeet

Lisäksi LAB tutki pyrolyysin vaikutusta fosforin liukoisuuteen. Nestemäisiä näytteitä voi analysilaboratoriossa tutkia fotometrisillä kyvetitesteillä käyttäen näkyvän valon Hach DR 3900 -spektrofotometriä. Ensimmäiset fosforin liukoisuuskokeet lietehiillelle tehtiin marraskuussa 2024, ja ne toistettiin 1 kk välein (yhteensä 4 kertaa), ja sen jälkeen vielä 3 kk välein, jolloin voitiin tutkia myös näytteen vanhentamisen vaikutusta. Koejärjestelyt pohjautuivat standardiin SFS-EN 15957, joka opastaa neutraaliin ammoniumsitraattiin liukenevan fosforin uuttamiseen lannoitteista. Lisäksi määritettiin biohiilistä veteen liukeneva fosfori ravistelemalla biohiiliä ionivaihdetussa, ultrapuhdistetussa vedessä. Kyvetitesteinä olivat ortofosfaatin ( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ) määrittämiseen soveltuvat LCK049 ja sen Addista-standardiliuos LCA703 sekä LCK549 ja sen standardiliuos LCA549. Samassa yhteydessä määritettiin myös biohiiltien pH-arvo ja sähkönjohtavuus.

Ravisteluliusten pH-arvot vaihtelivat eri kuukausina 5,94–6,30 (Lietehiili 1) ja 4,22–4,51 (Lietehiili 2). Sähkönjohtavuus vaihteli eri kuukausina 799–961  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Lietehiili 1) ja 2225–2495  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Lietehiili 2). Lietehiili 1:n kokonaisfosforin määrä oli 39 000 mg/kg ka ja Lietehiili 2:n 45 000 mg/kg ka. Liukoisen fosforin osuutta määritettäessä oletettiin, että kokonaisfosforin määrä oli pysynyt näytteissä samana koko mittausarjan ajan. Ammoniumsitraattiuutossa liuenneen ortofosfaatin prosenttiosuus kokonaisfosforista vaihteli mittausarjan aikana 0,081–0,088 % (Lietehiili 1) ja 0,011–0,025 % (Lietehiili 2). Vesiutossa liuenneen ortofosfaatin prosenttiosuus kokonaisfosforista vaihteli mittausarjan aikana 0,000014–0,000021 % (Lietehiili 1) ja 0,000001–0,000002 %. Näytteen vanhentumisen vaikutusta fosforin liukenevuuteen ei ollut selkeästi havaittavissa kummallakaan menetelmällä (Kuva x). kahden tunnin ajan 650 celsiusasteessa. Mittausepävarmuuden syitä mittausarjan aikana olivat muun muassa biohiiltien heterogeisuus, standardin soveltaminen, lämpötilan vaihtelu NAC-uuton aikana ja magneettisekoituksen epätasaisuus näytteittäin.



Kuva 15. Vesiutossa liuenneen ortofosfaatin osuus kokonaisfosforista prosentteina.



Suomessa on paljon vähäravinteisiä peltomaita ja lyhyt kasvukausi, mikä tukee biohiilen hyödyntämistä Suomen olosuhteissa. Ilmastonmuutoksen edetessä on myös olennaista, että voidaan vähentää fossiilisten maanparannusaineiden käyttöä. Biohiili voi parantaa maaperän laatua ja vähentää fossiilisten maanparannusaineiden tarvetta Suomen olosuhteissa merkittävästi.

Arvioinnin tulokset on julkaistu artikkelissa ”Puhdistamolietteen mahdollisuudet kiertotaloudessa”.

### 3.3. TP3. Tuotteiden turvallisuus

#### Lopputuotteiden analysointi ja haitta-ainemääritys

Toimenpiteiden tarkoituksena oli määrittää puhdistamolietteestä tuotetun pyrolyysihiilen ominaisuudet ja soveltuvuus maanparannusaineeksi (Taulukko 6). Tuotetusta lieteihiilestä tehtiin seuraavat alkuainemääritykset: hiili, typpi, vety, fosfori, arseeni, elohopea, kadmium, kromi, kupari, sinkki, lyijy ja nikkeli. Lisäksi määritettiin pH ja sähkönjohtavuus. Haitallisten metallien pitoisuudet alittivat lainsäädännön asettamat raja-arvot (MMM 964/2023). Tavoitteena oli analysoida myös hiilen, vedyn, typen, rikin ja hapen pitoisuudet CHNSO-menetelmällä, mutta laitteen teknisten ongelmien takia tämä ei onnistunut. Ympäristövaikutusten arvioinnissa (TP3.2) hyödynnettiin aiempia tutkimustuloksia kirjallisuudesta.

Taulukko 6. Lietehiilen alkuainemääritykset.

	Lietehiili 1	Lietehiili 2	Raja-arvo (MMM 964/2023)
pH	5,9	4,4	
Sähkönjohtavuus ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	799	2230	
Fosfori (mg/kg ka)	39000	45000	
Arseeni (mg/kg ka)	5	5	40
Elohopea (mg/kg ka)	0,19	0,19	1
Kadmium (mg/kg ka)	0,59	0,21	1,5
Kromi (mg/kg ka)	41	58	300
Kupari (mg/kg ka)	480	520	600
Sinkki (mg/kg ka)	990	1100	1500
Lyijy (mg/kg ka)	29	29	100
Nikkeli (mg/kg ka)	14	22	70

Laajemmat analyysit teetettiin hydrolyysisakasta ja biolietteestä tuotetulle pyrolyysihiilelle sekä HTC-hiilelle. Näytteille tehtiin seuraavat määritykset liittyen käyttökelpoisuuteen maanparannusaineena: kuiva-ainepitoisuus, pH, sähkönjohtavuus, tilavuuspaino, tuhkapitoisuus, hiili (%), typpi (%), vety (%), nitraattityppi, ammoniumtyppi, kokonaisfosfori, liukoinen fosfori. Lannoitelainsäädännön mukaiset haitalliset metallit arseeni, elohopea, kadmium, kromi, kupari, sinkki, lyijy ja nikkeli sekä PAH<sub>16</sub>. Lisäksi analysoitiin dioksiinit ja furaanit (PCDD/F). Hydrolyysisakasta tuotettu pyrolyysihiili ylitti sallitut pitoisuudet nikkelin ja PAH-yhdisteiden osalta. On kuitenkin syytä huomioda, että PAH-yhdisteiden muodostuminen johtuu enimmäkseen prosessista, ei lähtöaineesta. Myös biolietteestä tuotettu pyrolyysihiili ylitti nikkelin sallitun pitoisuuden. Muilta osin haitta-aineiden pitoisuudet olivat lainsäädännön sallimissa rajoissa. Tulokset on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Pyrolyysihiilien (hydrolyysisakka, bioliete) ja HTC-hiilen analyysitulokset.

	Hydrolyysisakka	Hiili 1 (hydrolyysisakka)	Bioliete	Hiili 2 (bioliete)	HTC-hiili (bioliete)	Raja-arvo
Kuiva-aine (%)	14	98	15	100	95	
pH	NA	6,1	NA	9,9	6,9	
Sähkönjohtavuus ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	NA	382,5	NA	215,3	64,9	
Tilavuuspaino (g/l)	1077	935	1062	655	490	
Hiili (%)	NA	16,7	NA	49,4	39,1	
Typpi (%)	NA	1,3	NA	2,6	1,9	
Vety (%)	NA	0,5	NA	1,1	5,1	
Fosfori (mg/kg ka)	29000	24000	8500	19000	31000	
Liukoinen fosfori (mg/kg ka)	21	<10	59	<10	<10	
Nitraattityppi (mg/kg)	<3	<3	<3	<3	5	
Ammoniumtyppi (mg/kg)	11100	200	7400	<15	420	
Arseeni (mg/kg ka)	4	3,5	1	<3	<3	40
Elohopea (mg/kg ka)	<0,1	<0,04	0,13	<0,04	0,27	1
Kadmium (mg/kg ka)	0,31	0,33	1,2	<0,3	0,77	1,5
Kromi (mg/kg ka)	22	81	8,6	28	28	300
Kupari (mg/kg ka)	180	290	15	16	330	600
Sinkki (mg/kg ka)	540	780	430	780	420	1500
Lyijy (mg/kg ka)	7,4	10	5,1	8,3	26	100
Nikkeli (mg/kg ka)	27	120	27	79	17	70
PAH <sub>16</sub> (mg/kg ka)	ND	11	ND	0,34	<13	6
PCDD/F (ng/kg ka)	6,11	2,45	7,23	0,9	10,6	20

Lisäksi hydrolyysisakasta ja siitä tuotetusta pyrolyysihiilestä analysoitiin perfluoratut alkylyyhdisteet (PFAS), palonestoaineet (PBB/PBDE) ja muovien rakennusaineena käytetty bisfenoli A. Nämä yhdisteet on todettu kaikkein pysyvimmiksi (Vieno et al. 2018) [4]. PFAS-yhdisteiden pitoisuudet vähenivät pyrolyysin aikana (taulukko 8). Vastaava tulos todettiin HSY:n Lietehiilihankkeessa. Muiden analysoitujen yhdisteiden osalta pitoisuudet jäivät alle määrittämissä sekä hydrolyysisakassa että pyrolyysihiilessä.

Taulukko 8. Hydrolyysisakasta ja siitä tuotetusta pyrolyysihiilestä analysoitujen PFAS-yhdisteiden pitoisuudet yksikössä  $\mu\text{g}/\text{kg ka}$ .

	Hydrolyysisakka	Pyrolyysihiili (hydrolyysisakka)
PFDoS (Perfluorododekaanisulfonihappo)	<4,3	<1
PFHpA (Perfluoroheptaanihappo)	<0,13	<0,03
PFHxA (Perfluoroheksaanihappo)		0,22
PFHxS (Perfluoroheksaanisulfonihappo)	<0,13	<0,03
PFBS (Perfluorobutaanisulfonihappo)	<0,13	<0,03
PFOA (Perfluoro-oktaanihappo)		0,24
PFNA (Perfluorononaanihappo)		0,17
PFDA (Perfluorodekaanihappo)	<0,43	<0,1
PFOSA (Perfluoro-oktaanisulfonamidi)	<0,43	<0,1
PFBA (Perfluorobutaanihappo)	<0,43	<0,1
PFHpS (Perfluoroheptaanisulfonihappo)		0,13
PFOS (Perfluoro-oktaanisulfonihappo)		3,7

8:2 FTS (Fluorotelomeerisulfonaatti)	<0,43	<0,1
PFHxDA (Perfluoroheksadekaanihappo)	<0,13	<0,03
4:2 FTS (Fluorotelomeerisulfonaatti)	<0,13	<0,03
PFPeA (Perfluoroheptaanihappo)	<0,13	<0,03
FOSAA (Perfluoro-oktaanisulfonamidoetikkahappo)	<0,43	<0,1
MeFOSAA (N-metyyliperfluoro-oktaanisulfonamidoetikkahappo)	0,63	<0,030
EtFOSE (N-etyyliperfluoro-oktaanisulfonamidoetanoli)	<0,43	<0,1
MeFOSE (N-metyyliperfluoro-oktaanisulfonamidoetanoli)	1,4	0,035
EtFOSA (N-etyyliperfluoro-oktaanisulfonamidoetikkahappo)	<0,86	<0,2
MeFOSA (metyyliperfluoro-oktaanisulfonamidi)	<0,13	<0,03
PFTTrDA (Perfluorotridekaanihappo)	<0,43	<0,1
EtFOSAA (N-etyyliperfluoro-oktaanisulfonamidoetikkahappo)	1,4	<0,1
PFDS (Perfluorodekaanisulfonihappo)	<0,13	<0,03
PFUnA (Perfluoroundekaanihappo)	<0,43	<0,1
PFDoA (Perfluorododekaanihappo)	<0,43	<0,1
PFTeDA (Perfluorotetradekaanihappo)	0,17	<0,03
P37DMOA (Perfluoro-3,7-dimetyylioktaanihappo)	<2,2	<0,5
HPFHpA (7H-Perfluoroheptaanihappo)	<0,43	<0,1
6:2 FTS (Fluorotelomeerisulfonaatti)	0,31	<0,03
PFPeS (Perfluoropentaanisulfonihappo)	<0,43	<0,1
PFNS (Perfluorononaanisulfonihappo)	<0,86	<0,2
PFTTrDS (Perfluorotridekaanisulfonihappo)	<4,3	<1
PFUnDS (Perfluoroundekaanisulfonihappo)	<4,3	<1
PFAS 4 summa, sis. ½ LOQ	4,2	0,079
PFAS summa, sis. ½ LOQ	20	2,9

LAB selvitti myös PAH-määrityksen esikäsittelymenetelmän kehittämistä pyrolyysihille. Pyrolyysihille ei ole suoraa standardimenetelmää, tästä syystä sen esikäsittelyyn sovellettiin standardia SFS-EN 17503:2022:en "Soil, sludge, treated biowaste and waste - Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) by gas chromatography (GC) and high performance liquid chromatography (HPLC)", joka on yhtenevä EBC-ohjeistuksen kanssa. PAH-analytiikan esikäsittelyyn kokeiltiin ensin toluenuuttoa Soxhlet-uuttolaitteella. Ravistelumenetelmä todettiin kuitenkin tehokkaammaksi. Toluenin vapaan haihtumisen kestoa typpikonsentraattorin käytön vähentämiseksi testattiin, mutta todettiin epävarmaksi. Rinnakkaisten näytteiden sisäisten standardien piikkien pinta-alat erosivat toisistaan, mikä osoitti, että esikäsittely ei toiminut kuten pitäisi, jolloin näytteissä tapahtui PAH-yhdisteiden hävikkiä esikäsittelyn aikana. GC-MS-ajolla saatuihin tuloksiin ei tämän vuoksi voinut luottaa, minkä vuoksi esikäsittelymenetelmän kehittämistä täytyy jatkaa. Tarkemmat tiedot kokeista on julkaistu raportissa PAH-määrityksen esikäsittelymenetelmän kehittämisestä hankkeen nettisivuilla.

PHA:n tuotanto jäi hankkeen aikana vähäiseksi. Näin ollen PHA-muovien ominaisuuksien analysointia tai haitta-ainemäärityksiä ei päästy toteuttamaan. PHA:n uuttomenetelmien kartoitus on työn alla ja uuton laboratoriokokeet tehdään keväällä 2026.

### **3.4. TP4. Uusien menetelmien kustannustehokkuus ja liiketoimintapotentiaali**

Hankkeen aikana selvitettiin puhdistamolietteen arvokomponenttien talteenoton taloudellista kannattavuutta. Puhdistamolietteestä tuotetulle PHA-muoville ja pyrolyysihielelle laadittiin markkinaselvitys, joka julkaistiin hankkeen nettisivuilla. Tavoitteena oli laatia kustannusanalyysi eri fraktioille. Keskeisimmät tulokset on esitetty alla olevissa kappaleissa.

#### Markkinaselvitys eri fraktioille

Biohiiltä ja PHA-muovia koskeva markkinaselvitys julkaistiin sekä suomen- että englanninkielisenä hankkeen nettisivuilla. Keskeisimmät tulokset: Biohiilen arvo perustuu sen käyttöön maanparannusaineena ja hiilinieluna. Teollisuudesta löytyy myös muita mahdollisia käyttösovelluksia, joiden odotetaan yleistyvän tulevaisuudessa. Biohiilen maailmanmarkkinoiden arvo vuonna 2022 oli 184,90 miljoonaa dollaria ja sen on odotettu kasvavan 450,58 miljoonaan dollariin vuoteen 2030 mennessä. (Fortune Business Insights 2023) [6]. Tulevaisuuden biohiilimarkkinoilla merkittävä rooli tulee oletettavasti olemaan päästökompensaatioilla, joita yritykset ja yksityiset henkilöt voivat ostaa. Investoijat ovat tyypillisesti suuria tekniikan alan yrityksiä, jotka ostavat päästöoikeuksia. Suomessa toimii tällä hetkellä useita biohiiltä valmistavia yrityksiä. Alalla on kasvavaa kilpailua ja EBC-standardin ehdot täyttäviä yrityksiä tulee jatkuvasti lisää. Euroopassa biohiilimarkkina kasvoi 80 % vuonna 2021 ja sen on ennustettu kasvavan edelleen. Markkinoille pääsy edellyttää lisäarvon luomista tuotteelle esim. lannoitekäytön kannalta. EBC-standardi on useimmissa maissa vapaaehtoinen, mutta se toimii takuuna kestävästä ja turvallisesta tuotteesta ja lisää luotettavuutta kuluttajien näkökulmasta. Tämän lisäksi tuotannossa ja liiketoiminnan kehittämisessä on huomioitava sekä kansalliset että kansainväliset säädökset mm. sallittujen raaka-aineiden ja lopputuotteen laatuvaatimusten osalta. Kustannuksia huomattavasti nostava REACH-menettely koskee kaupallisia toimijoita, joiden tuotanto ylittää 1000 kg vuodessa. Liiketoiminnan kannattavuuteen vaikuttaa olennaisesti myös raaka-aineiden saatavuuden ja laadun varmistaminen. Pyrolyysilaitosten investointikustannusten arviointi on yksi suurimmista haasteista toimialalla ja taloustutkimusta aiheesta tarvitaan lisää.

Biomuoveilla (esim. PLA, PHA, PBAT) voidaan korvata fossiilista raaka-aineista valmistettuja muoveja lukuisissa eri käyttötarkoituksissa, kuten pakkausmateriaalina ja kodintarvikkeissa. Polyhydroksyalcanoateista (PHA) valmistettuja muovituotteita on jo markkinoilla saatavilla, ja tuotannon odotetaan kasvavan lähitulevaisuudessa. Kehityksen tärkeimpiä vaikuttavia tekijöitä ovat erilaisten uusiutuvien raaka-aineiden saatavuus, käyttömahdollisuudet ja kasvava kysyntä ympäristöystävällisille pakkausmateriaaleille sekä EU:n kiertotalousstrategian mukaiset tavoitteet, kuten muovidirektiivi. Viime vuosina yhä useammat yritykset ovat siirtyneet käyttämään kasvipohjaisia muoveja tuotteidensa pakkausmateriaaleina. Kestävyyssuhteiden täyttymisen kannalta tuotteiden kehittämisessä on olennaisen tärkeää huomioida materiaalin kierrätysmahdollisuudet käytöstä poistamisen jälkeen. Globaalilla tasolla biomuovimarkkinoiden koko oli 8,4 miljardia dollaria vuonna 2022, ja sen odotetaan kasvavan 19,2 miljardiin dollariin vuoteen 2030 mennessä. Tällä hetkellä koko maailman biomuovituotannosta noin neljännes sijoittuu Eurooppaan, mutta tulevaisuudessa tuotannon ennustetaan painottuvan Aasian maihin. Puhdistamolietteen käyttö PHA:n raaka-aineena on arvioitu taloudellisesti kannattavaksi Suomessa.

## Liiketoimintapotentialin arviointi

### PHA-muovi

PHA-muovin osalta hyödynnettiin aiempia Biosykli- Päijät-Hämeen biokiertoalouden -hankkeen tuloksia. Hankkeen aikana toteutettiin teknistaloudellinen arviointi jätevedestä tuotetun PHA-biomuovin tuotannon taloudellisesta kannattavuudesta Suomessa (Sharbaf 2022). Oletuksena oli, että biomassaa kuljetettiin jätevedenpuhdistamoilta yhteiseen käsittelylaitokseen, jossa tuotantokapasiteetti oli 5000 t PHA-biomuovia vuodessa. Tulokset osoittivat, että PHA:n tuotantokustannus oli 3,40–3,76 €/kg, kun taas markkinahinnaksi arvioitiin 3,50–4,50 €/kg. Näin ollen tuotanto arvioitiin taloudellisesti kannattavaksi. Kuljetuskustannuksia pidettiin merkityksettöminä, kun taas suurimmat kustannukset muodostuivat sähkö- ja lämmityskuluista.

### Lietehiili

LAB keräsi tietoja lietehiilen tuotannon taloudellisesta kannattavuudesta kirjallisuudesta sekä haastatteleamalla alan asiantuntijoita. Tuotantokustannuksiin vaikuttaa olennaisesti syötteen korkea kosteuspitoisuus. Ennen pyrolyysiä liete on kuivattava, mikä kuluttaa huomattavan määrän energiaa. Tavoite kosteuspitoisuus syötteelle on enintään 20 %. Toinen merkittävästi vaikuttava tekijä on lietehiilen myyntiarvo, jossa on paljon vaihtelua. HSY on laskenut koepyrolyysilaitoksen kokemusten perusteella täysmittakaavan laitoksen käsittelykustannuksia. Vuosittainen käsittelykapasiteetti oli oletettu 50 000 t mädätettyä jätevesilietettä (30 % ka) ja tukipolttoaineena 10 000 t puumurskettä. Lietehiilen myyntiarvoksi oletettiin 10 €/t ja sähkön hinnaksi 50 €/MWh. Tulos oli, että investointi on lähes 38 miljoonaa euroa ja käsittelykustannukset 77 -78 €/t ja hiilikrediitin kanssa 56 – 57 €/t. Pyrolyysilaitoksen investointikustannuksia on myös hyvin haasteellista arvioida. Vertailutietoja haettiin Tanskasta (Stiesdal SkyClean) käyttäen esimerkkinä kahta 20 MW pyrolyysilaitosta, joissa käytetään syötteenä mädätysjäännöstä. Investointikustannukset olivat näissä 20,1-34 miljoonaa euroa. Tuoreessa väitöskirjatutkimuksessa liittyen typen talteenottoon jätevesilietteestä arvioitiin yhtenä menetelmänä lietteen pyrolyysiä. Laskelmien lähtötietoina käytettiin Rovaniemellä toimivan lietettä käsittelevän polttolaitoksen investointikustannusta 30 €/t lietettä. Skenaario, jossa tyyppi otettiin talteen jätevedestä sekä lietteen kuivausprosessista striippaamalla ja mädätetty liete pyrolysoitiin lietehiileksi, arvioitiin taloudellisesti kannattavaksi. Lähtöarvona tutkimuksessa oli käytetty Helsingin Viikinmäen jätevesilaitoksen vuosittain käsittelemää lietemäärää.

### Metallit

LAB selvitti metallien talteenoton taloudellista kannattavuutta. Yleisesti ottaen lietteen raskasmetalleja pidetään epäpuhtauksina, jotka estävät lietteen turvallisen käytön lannoitteena. Geopoliittisista syistä ja kestävästi metallintuotannon vuoksi toissijaisia metalleja sisältäviä lähteitä on kuitenkin viime aikoina pidetty arvokkaina kriittisten metallien, kuten kuparin ja sinkin, lähteinä. Metalleja voidaan erottaa esim. kuivatusta lietteestä, tuhkasta tai lietehiilestä. Kirjallisuudesta ei ole saatavilla tietoja kuivatusta ja pyrolysoidusta lietteestä. HY:n kokeiden tulokset osoittivat, ettei huuhtoutumista tapahdu, joten erottelu ei ole mahdollista. Toisaalta polttoprosessi on vakiintunut ja metallurgiset yritykset pyrkivät luomaan tehokkaita menetelmiä metallien talteenottoon poltosta saatavasta tuhkasta. Näin ollen hankkeen aikana arvioitiin potentiaalia metallien erottamiseen tuhkasta. Lietteen metallien uuttamisprosessin oletetaan sisältävän kolme vaihetta: 1. lietteen poltto, 2. metallien liuotus lentotuhkasta ja 3. Cu:n ja Zn:n selektiivinen liuotinuutto.

### Johtopäätökset:

Prosessien teknistaloudellisten arviointien tekeminen ei kuitenkaan ollut mahdollista puuttuvien tietojen vuoksi: laskelmia varten tarvitaan ohjelmisto, joka pystyy piirtämään prosessien ulkoosan, mukaan lukien pää- ja tukitoiminnot (esim. liuotus, jatkuva liuotinuutto sekoitintasauslaitteilla). Sopiva

ohjelmisto on Metson kehittämä HSC-simulaattori. CAPEX-investointien kannalta laitosten rakentaminen "0"-pisteestä on hyödytöntä. Verkosto/ekosysteemi tulisi luoda biokaasun tuottajien, polttolaitosten (kuten yhdyskuntajätteen polton) ja hydrometallurgisten yritysten välille. Massataseen laa-  
timinen prosesseille, kuten kuparin ja sinkin liuotukselle ja uutolle, vaatii laboratorioskokeita. Kirjalli-  
suustietoja ei voida soveltaa suoraan; esimerkiksi kirjallisuudessa esitetyt liuotustulokset, jotka on  
saatu metallipitoisuuden analysoinnin standardimenetelmällä, jossa liuotukseen käytetty aika on 20–  
24 tuntia, eivät ole realistisia teollisuus-/pilottiolosuhteissa.

### Selvitys lainsäädännöstä

Puhdistamolietettä, kierrätyslannoitteita ja biomuoveja koskeva lainsäädäntöselvitys on julkaistu hankkeen nettisivuilla 12/2023. Lisäksi lainsäädännön uudistuksia arvioitiin hankkeen loppuvaiheessa. Lainsäädännön roolia käsiteltiin myös sidosryhmähaastattelussa. Viljelijät eivät kokeneet, että lan-  
noitelainsäädännön uudistuksilla olisi suurta merkitystä. Asiantuntijoiden näkemys oli, että kierrätys-  
lannoitteiden tulisi olla jakeluelvoite tai sekoitelvelvoite, ei käyttövelvoitetta. Verotuksellisia ohjaus-  
keinoja ei kannatettu. Kierrätyslannoitteiden käytön edistämiseen tarvittaisiin enemmän yhteisiä pe-  
lisääntöjä ja strategista linjaa, ei pelkästään lainsäädäntöä. Viljelijöille tarvitaan myös tietoa kierrätys-  
lannoitteita koskevasta lainsäädännöstä. Pulina-hankkeessa kehitettävän biojalostamokonseptin lop-  
putuotteita koskeva keskeisin lainsäädäntö on esitetty taulukossa 8. PHA-muovin osalta on otettava  
huomioon suunniteltua käyttökohdetta koskeva tuotelainsäädäntö. Esim. hygieniatuotteissa ja elin-  
tarvikepakkauksissa on rajoitettu jätteperäisten raaka-aineiden käyttöä. On kuitenkin odotettavissa,  
että kertakäyttömuovien kieltö Euroopassa ja Valtakunnalliseen jätesuunnitelmaan kirjatut suunnitel-  
lut toimet kertakäyttömuovien vähentämisestä tulevat lisäämään uusien biohajoavien PHA-muovien  
markkinapotentiaalia.

Taulukko 9. Biojalostamon lopputuotteita koskeva keskeisin lainsäädäntö.

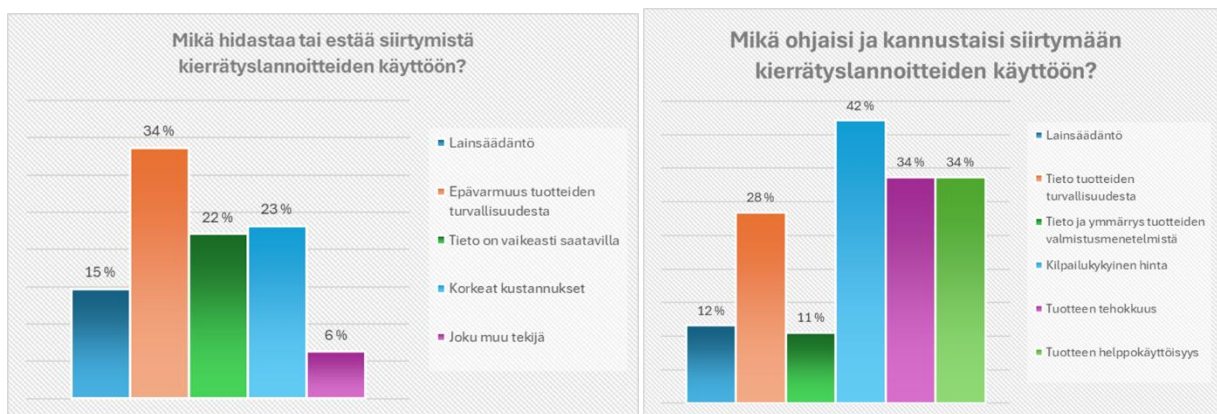
Taso	Säädös	Vaatimukset
EU	EU Circular Economy Action Plan (Euroopan komissio).	Edistää siirtymistä kiertotalouteen sekä materiaalien uudelleenkäyttöä ja kierrätystä.
EU	Jätepolitiikan puitedirektiivi (2008/98/EY) (Euroopan parlamentti ja EU:n neuvosto).	Jätehierarkian luominen, jossa ennaltaehkäisy ja kierrätys asetetaan etusijalle.
EU	Lannoitevalmisteasetus (2019/1009/EC)	Säätelee käsittelyprosessien ja -tekniikoiden vaatimuksia sekä CE-merkittyjen EU-lannoitevalmisteiden vaatimuksia.
EU	Muoviasetus (EU) 10/2011	Määrittelee erityisiä toimenpiteitä ja toimii esimerkkinä kriteereistä, jotka määriteltäisiin myös muille materiaaleille.
EU	Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2019/904, annettu 5 päivänä kesäkuuta 2019, tiettyjen muovituotteiden ympäristövaikutuksen vähentämisestä	Tiettyjen (kertakäyttöisten) muovituotteiden ympäristövaikutusten vähentäminen.
Kansallinen	Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista (964/2023)	Sääntelee lannoitevalmisteiden luokkia ja niiden erityisvaatimuksia; lannoitevalmisteiden laatua, merkintöjä, pakkaamista, kuljetusta, varastointia ja käyttöä koskevat vaatimukset; lannoitevalmisteiden sal- littuja raaka-aineita.

## Haastattelut sidosryhmille

Viljelijöille suunnattu Webropol-kysely kierrätyslannoitteiden käytöstä toteutettiin keväällä 2024 ja keväällä 2025. Kyselyyn saatiin vastauksia 11 kpl. Lannoitteiden valintaan vaikuttavista prioriteeteista hinta ja lannoitustehokkuus oli merkitty tärkeimmäksi kriteeriksi, toisena tuotteen turvallisuus, ja levitystapa oli näkyvässä kolmanneksi tärkein. Valmistusmaata ja tuotteiden tuttuutta ei koettu tärkeäksi. Kierrätyslannoitteiden tai maanparannusaineiden valmistukseen käytettävistä ainesosista suosituin oli eläinperäiset sivutuotteet, esim. lanta (75% vastaajista), seuraavaksi kasviperäiset sivutuotteet (63%). Vastaajista 50% oli kiinnostunut tuhkasta ja elintarviketeollisuuden sivutuotteista (esim. viljankuori), kun taas 25% oli valinnut yhdyskuntien/kotitalouden biojätteen, yhdyskuntien puhdistamolietteen tai muun metsäteollisuuden sivutuotteen, esim. kuituliete. Vastaajista 13% ei ollut kiinnostunut mistään edellä mainituista.

Vastaajilta kysyttiin myös eri lannoitevalmisteiden vahvuuksista ja heikkouksista. Mineraalilannoitteiden eduksi koettiin tehokkuus, luotettavuus, saatavuus, tunnettuus, ja vaadittava työmäärä. Kierrätyslannoitteiden etuina taas olivat hinta, vaikutukset maaperään ja tieto tuotantoprosessista. Kierrätyslannoitteiden heikkoutena mainittiin eritysti haju, työmäärä, luotettavuus, saatavuus, tunnettuus ja tuotannon sijainti. Kun kysyttiin kierrätyslannoitteiden käyttöä edistäviä tekijöitä, esille nousivat tuotannon hinta, tuotteen luotettavuus, kuluttajien asettamat vaatimukset sekä lainsäädäntö. Hidastavina tekijöinä taas nähtiin tuotteen turvallisuus, tieto ja ymmärrys sekä viljaostajan asettamat vaatimukset.

Webropol-kyselyn vähäisen vastausmäärän vuoksi kysely toteutettiin myös kolmen eri tapahtuman yhteydessä: Sänkisäpinät 2023, Pellonpiennarpäivät 2025 ja Sänkisäpinät 2025. Paperinen kyselylomake oli pelkistetty versio nettipohjaisesta kyselystä. Lopulta tuloksena oli yhteensä 95 vastausta. Enemmistö vastaajista ei ollut käyttänyt kierrätyslannoitteita, mutta oli kiinnostunut kokeilemaan. Kiertotalouden ja ravinteiden kierrätyksen edistäminen ja omavaraisuuden parantaminen nähtiin tärkeimpinä syinä edistää kierrätyslannoitteiden käyttöä. Olennaisimpia hidastavia tekijöitä olivat epävarmuus tuotteiden turvallisuudesta, korkeat kustannukset ja vaikeasti saatavilla oleva tieto (Kuva 16a). Vastaavasti tieto tuotteiden turvallisuudesta ja kilpailukykyinen hinta nousivat tärkeimmiksi käytössä edistäviksi tekijöiksi helppokäyttöisyyden ja tehokkuuden ohella (Kuva 16b).



Kuva 17. Viljelijöille suunnatun kyselyn tuloksia.

Sidosryhmähaastattelut toteutettiin suunnitelman mukaisesti. Tavoitteena oli kerätä näkemyksiä ja kokemuksia kierrätyslannoitteiden käyttöön liittyvistä haasteista ja mahdollisuuksista. Haastatteluun osallistui yhteensä 17 henkilöä. Viljelijät, lannoitevalmistajat, elintarviketeollisuus, ja muita asiantunti-

joita. Vastaukset anonymisoitiin ja aineistolle toteutettiin laadullinen temaattinen analyysi. Vastauksista voitiin tunnistaa usein toistuvia teemoja ja ne tukivat kyselyn tuloksia. Suurimmat haasteet liittyvät käytettävyyteen ja logistiikkaan, ja nämä tekijät ovat yhteydessä myös lannoituksen hintaan. Puhdistamolietepohjaisten tuotteiden käyttöä rajoittavat merkittävimmin viljanostajoen asettamat ehdot ja vientisopimukset. Erilaiset epäpuhtaudet ja haitta-aineet sekä näihin liittyvä sosiaalinen hyväksyttävyys nähtiin pullonkauloina. Tietämyksen lisääminen olisi avainasemassa käytön edistämisen kannalta. Tuotannon hajauttamisen kautta voitaisiin parantaa alueellista saatavuutta. Kustannustehokkuuden kannalta tulisi miettiä vähäpäästöisten lannoitteiden näkyvyyttä tuotteiden hinnoissa. Hiilikrediitit voisivat tuoda uusia ansaintamahdollisuuksia. Kyselyiden ja haastatteluiden tuloksista laadittiin tieteellisen artikkelin käsikirjoitus. Tuloksia esiteltiin myös Lahden tiedepäivässä 13.11.2025.

## 4. Hankkeen vaikutukset

Hankkeessa kehitetyt toimintamallit edistävät siirtymää kohti kiertotaloutta ja siihen liittyviä uusia liiketoimintamahdollisuuksia. Ympäristön kannalta keskeisimmät vaikutukset liittyvät jäteveden ravinteiden tehokkaampaan talteenottoon, mikä vähentää vesistöjen ravinnekuormitusta, rehevöitymistä ja happikadon syntymistä. Tällä hetkellä fosforia ei oteta talteen Lahti Aquan puhdistamoilla, vaan se päätyy lietteen mukana mädättämöön rautasulfaatti mukanaan. Lisäksi parannettiin ravinteiden talteenoton kustannustehokkuutta tuottamalla jätevedestä raaka-aineita korkeamman jalostusarvon tuotteisiin eli biomuoviin. Näin voidaan vähentää sekä fossiilisten raaka-aineiden käyttöä että muovijätteen määrää. Puhdistamolietteestä tuotetut biomuovit ja lietehiili voidaan nähdä hiilineluina, jotka auttavat hillitsemään ilmaston lämpenemistä. Hankkeessa tuotettiin myös tietoa kierrätyslannoitteisiin liittyvistä haasteista ja mahdollisuuksista. Tietoa voidaan hyödyntää, kun etsitään ratkaisuja kierrätyslannoitteiden käytön lisäämiseen ja siten edistetään siirtymää kohti kestävämpää ruokajärjestelmää. Hankkeessa luotiin edellytykset biojalostamokonseptille, joka on laajennettavissa ja monistettavissa sekä kansallisella että kansainvälisellä tasolla. Konseptin kehittämistä ja tuotantoprosessien optimointia jatketaan digitaalisen mallintamisen avulla parhaillaan käynnissä olevassa CircSyst-hankkeessa.

Arvio hankkeen vaikutuksista on toimitettu loppuraportin liitteenä. Arviointiin sisällytettiin työllisyysvaikutukset, uusien toimintamallien selvitykset ja pilotointi, hankkeeseen osallistuneet toimijat, järjestetyt tilaisuudet ja tapahtumat, hankkeen esittely muiden järjestämissä tilaisuuksissa, ja tuotettu viestintämateriaali. Ympäristövaikutuksia ei arvioitu, koska TKI-hankkeen kohdalla suoria vaikutuksia ei muodostu.

### *Käynnistyneet jatkohankkeet*

EU:n Horizon Europe ohjelman rahoittama CircSyst - *Circular Systemic Solutions for Plastic, Packaging, Bio-Waste, and Water* -hanke toteutetaan aikavälillä 1.6.2024-31.5.2027. Hankkeessa demonstroidaan erilaisia kiertotalousratkaisuja biojätteiden hyödyntämiseen, vesihuollon kehittämiseen sekä muoveihin ja pakkausmateriaaleihin liittyviin haasteisiin. Tiedonsiirto ja hyvien käytäntöjen jakaminen ovat keskeisessä roolissa CircSyst-hankkeessa, jossa on mukana partnereita kahdeksasta

eri maasta. PULINA-hankkeessa aloitettua työtä jatketaan mm. kehittämällä biomuovin jalostusprosessia ja digitaalista mallinnusta, jonka avulla prosessin kustannustehokkuus voidaan optimoida.

EAKR-hanke Kasvibiomassan hiili uusiutuviksi materiaaleiksi (HUUMA), alkoi vuonna 2025, konsortiossa Helsingin yliopisto, LAB-ammattikorkeakoulu ja Muovipoli Oy, sekä erittäin pitkä lista yrityksiä sidosryhmässä.

## 5. Talousraportti

LAB: Hankkeelle ovat työskennelleet projektipäällikkö Mari Eronen (koko hankkeen organisointi, sidosryhmähaastattelut), TKI-asiantuntija Mervi Pulkkinen (laboratorioanalyysit), TKI-asiantuntija Alexandra Maksheeva (markkinaselvitys, sidosryhmähaastattelut), laboratorioinsinööri Kusti Ruokamo (pyrolyysikokeet), kehitysinsinööri Raisa Pajarinen (lietehiilen analysointi) ja lisäksi johtavat asiantuntijat Annakaisa Elo (lietehiilen analyysit, biojalostamokonseptin kehittäminen) ja Svetlana Butylina (PHA:n tuotanto ja hyödyntäminen, metallien talteenotto, biojalostamokonseptin kehittäminen).

HY: Helsingin yliopiston työntekijöistä hankkeelle töitä tekivät Anna-Lea Rantalainen (laboratoriotöiden kokonaiskoordinointi), Merja Kontro (koko hankkeen organisointi, kokeiden suunnittelu ja toteutus), Kaisa Soikkeli (laboratoriotyöt liittyen hankkeeseen; laitteistojen ylläpito ja huolto. Palkkaa maksettiin myös Lei Liulle 4 kk:lta (fermentaatioiden pystytys, ylläpito ja seuranta). Lisäksi hankkeella on ollut fermentaatioiden toteutuksesta pro gradu-työntekijä Mubina Ghazi (ulkopuolinen apuraha).

Hankkeen aikana tehtiin budjettimuutoksia. LABin osalta budjettimuutokset tehtiin syksyllä 2024 ja syksyllä 2025. Budjettimuutokset johtuivat siitä, että ostopalveluita ja välinehankintoja tarvittiin suunniteltua enemmän. Suunniteltujen analyysien lisäksi päätettiin toteuttaa fosforin liukoisuuskokeet pyrolyysihielelle niin, että seurattiin myös näytteen vanhenemisen vaikutusta liukoisuuteen. Tätä varten tehtiin kokeet samalle näytteelle kuukauden välein (yhteensä 4 kk ajan). Tähän tarvittiin lisää välineitä, mitä ei oltu huomioitu alkuperäisessä budjetissa. Lisäksi ostopalveluna teetettävien analyysien kustannukset olivat arvioitua suuremmat. LABin ensimmäinen budjettimuutos toteutettiin siirtämällä palkkakustannuksista rahaa 10 000 euroa väline- ja laitekustannuksiin sekä ostopalvelukustannuksiin. Toinen budjettimuutos koski 3000 euron siirtämistä palkkakustannuksista ostopalvelukustannuksiin. Samalla tehtiin HY:n budjettimuutos, jossa siirrettiin palkkakustannuksista väline- ja laitehankintoihin 1 247 euroa. Molemmissa tapauksissa budjettimuutoksesta keskusteltiin valvojan kanssa ja hyväksyntä saatiin sähköpostilla. Hankkeen toteutuneet kustannukset on esitetty taulukossa 10. Palkkakustannuksia kertyi budjetoitua vähemmän, kun taas ostopalvelukustannusten osalta budjetti ylittyi. Kokonaisuudessaan hankkeen budjetti ylittyi 244 eurolla.

Taulukko 10. Hankkeen toteutuneet kustannukset.

LAB	Toteuma 30.11.2025	Budjetti 2023-2025	Erotus
Palkkakustannukset	157 346	154 987	-2 359
Väline- ja laitekustannukset	9 368	9 368	0
Ostopalvelukustannukset	12 221	11 132	-1 089
Yleiskustannukset	24 621	26 324	1 703
Yhteensä	203 556	201 811	-1 746

HY	Toteuma 30.11.2025	Budjetti 2023-2025	Erotus
Palkkakustannukset	259 801	268 637	8 836
Väline- ja laitekustannukset	33 387	34 212	825
Ostopalvelukustannukset	27 302	18 000	-9 302
Yleiskustannukset	48 074	48 127	53
Yhteensä	368 564	368 976	412

KOKO HANKE YHTEENSÄ	Toteuma 30.11.2025	Budjetti 2023-2025	Erotus
Palkkakustannukset	417 147	423 624	6 477
Muut kulut (laitteet, ostopalv. jne)	81 189	72 712	-8477
Yleiskustannukset	72 695	74 451	1756
Yhteensä	571 031	570 787	-244

## 6. Yhteenvedo

Puhdistamolietteen arvokomponentit -hankkeessa selvitettiin Suomen olosuhteisiin parhaiten soveltuvia menetelmiä puhdistamolietteen resurssien tehokkaaseen hyödyntämiseen. Näihin kuuluivat ravinteiden kierrätys, biomuovien raaka-aineen (PHA) talteenotto sekä lietehiilen valmistus. PHA:n tuotantoprosessia optimoitiin ja pilotoitiin pienessä mittakaavassa. Tavoitteena oli siirtää hankkeen aikana tuotanto laboratoriomittakaavasta siirrettävään konttiin. Tätä varten hankittiin merikontti, joka sijoitettiin Lahti Aquan jätevedenpuhdistamolle. Tuotannon käynnistäminen ei toteutunut hankkeen aikana, mutta työ jatkuu osana Horizon Europen rahoittamaa CircSyst-hanketta. Hankkeessa saatiin runsaasti tietoa eri prosessiparametreista ja niiden säädöstä liittyen biomassan hydrolyysiin ja PHA:n tuottoon, minkä pohjalta on hyvä lähteä suurentamaan mittakaavaa. Hankkeessa määritettiin myös parhaita olosuhteita fosforin talteenottoon lietteestä. Pyrolyysikokeet toteutettiin kahdella eri tavalla käsitellylle puhdistamolietteelle. Pyrolyysihiilien ominaisuudet analysoitiin ja tulosten perusteella arvioitiin niiden soveltuvuutta maanparannuskäyttöön. Pyrolyysiprosessin todettiin pienentävän PFAS-yhdisteiden pitoisuuksia, joka on tunnistettu yhtenä merkittävänä esteenä puhdistamolietteen hyödyntämiselle. PHA:n tuotanto jäi hankkeen aikana vähäiseksi, joten PHA-muovia ei ollut mahdollista valmistaa ja analysoida. Hankkeessa kehitettävien menetelmien kustannustehokkuutta ja liiketoimin-

tapotentiaalia arvioitiin hankkeen tulosten ja kirjallisuustietojen perusteella. Prosessien teknistaloudellisten arviointien tekeminen ei kuitenkaan ollut mahdollista puuttuvien ohjelmistojen vuoksi. Lisäksi tehtiin selvitys lopputuotteiden käyttöä koskevasta lainsäädännöstä. Kansallinen lainsäädäntö mahdollistaa puhdistamolietteen hyödyntämisen tietyin rajoituksin maanparannusaineena mädätettynä ja pyrolysoituna. PHA-muovin osalta olennaista on suunniteltua käyttötarkoitusta koskeva tuotelainsäädäntö. Kertakäyttömuovien kieltä Euroopassa ja Valtakunnalliseen jätesuunnitelmaan kirjatut suunnitellut toimet kertakäyttömuovien vähentämisestä tulee oletettavasti myös lisäämään uusien biohajoavien PHA-muovien markkinapotentiaalia. Sosiaalista hyväksyttävyyttä kierrätyslannoitteiden ja -maanparannusaineiden osalta tutkittiin toteuttamalla kysely viljelijöille ja sidosryhmähaastattelut. Suurimmat haasteet liittyvät käytettävyyteen, logistiikkaan ja lannoituksen hintaan. Puhdistamolietteen osalta käyttöä rajoittavat myös viljan ostajien asettama kieltä käytölle ja yleinen huoli haitta-aineista. Hankkeessa kehitetty konsepti auttaa ratkaisemaan näitä haasteita.

## Viitteet

- [1] Dou, Y., Du, Y., Xu, Y., Li, Y., Wu, X., Wang, D. 2025. Phosphorus recovery from sewage sludge: Progress, challenges, policies, and future directions. *Chemical Engineering Journal*, 520, 165735.
- [2] APHA. 2012. Standard methods for the examination of water and wastewater (22nd ed.). E. W. Rice, R. B. Baird, A. D. Eaton and L. S. Clesceri (Eds). American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Environment Federation (WEF), Washington, D.C., USA.
- [3] Holmes, M., Aminot, A., Kérouel, R., Hooker, B.A. & Peterson, B.J. 1999. A simple and precise method for measuring ammonium in marine and fresh-water ecosystems. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 56, 1801–1808.
- [4] Vieno, N., Sarvi, M., Salo, T., Rämö, S., Ylivainio, K., Pitkänen, T., Kusnetsov, J. 2018: Puhdistamolietteiden sisältämien haitta-aineiden aiheuttamat riskit lannoitekäytössä. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 58/2018. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 129 s. [https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/543281/luke-luobio\\_58\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/543281/luke-luobio_58_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [5] Ippolito, J.A., Cui, L., Kamman, C. *et al.* Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. *Biochar* 2, 421–438 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x>
- [6] Fortune Business Insights. 2023. Biohiilen maailmanmarkkinoiden arvo vuonna 2022 oli 184,90 miljoonaa dollaria ja sen on odotettu kasvavan 450,58 miljoonaan dollariin vuoteen 2030 mennessä. Summary. Käytetty 2 syyskuuta 2024. Saatavilla: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/biochar-market-100750>