

**SAVONIA**

ammattikorkeakoulu



■ TEKNIIKAN ALA

# BIOSFÄÄRI POHJOIS-SAVO: BIOMASSAN JA BIOJALOS- TUSTEKNOLOGIOIDEN HYÖ- DYNTÄMINEN LIIKETOIMIN- NAN KASVATTAMISESSA

TOIMITTANEET **Henna Hyttinen, Sanna Antikainen, Harri Auvinen, Maarit Janhunen  
ja Eevi Minkkinen**

# Biosfääri Pohjois-Savo: Biomassan ja biojalostus- teknologioiden hyödyntäminen liiketoiminnan kasvattamisessa

Toimittaneet

Savonia-ammattikorkeakoulu Oy, Bio- ja kiertotalouden vahvuusala:

Tki-asiantuntija Henna Hyttinen  
Tki-asiantuntija Sanna Antikainen  
T&K-päällikkö Harri Auvinen  
Tki-asiantuntija Maarit Janhunen  
Tutkimusinsinööri Eevi Minkkinen

Kuopio 2023

Savonia-ammattikorkeakoulu  
Julkaisutoiminta  
PL 6  
70201 KUOPIO  
julkaisut@savonia.fi

Copyright © tekijät ja Savonia-ammattikorkeakoulu  
Teksti, kuvat ja taulukot CC BY-SA 4.0

1. painos

Tekijät

**Savonia-amk:** Tki-asiantuntija Henna Hyttinen, Tki-asiantuntija Sanna Antikainen, T&K-päällikkö Harri Auvinen, Tki-asiantuntija Maarit Janhunen ja Tutkimusinsinööri Eevi Minkkinen  
Savonia-ammattikorkeakoulu Oy, Bio- ja kiertotalouden vahvuusala, PL 6 (Microkatu 1), 70201 Kuopio

**Luonnonvarakeskus:** tutkija Mari Rätty<sup>1</sup>, tutkija Maarit Termonen<sup>1</sup>, tutkimusinsinööri Johanna Nikama<sup>2</sup>, erikoistutkija Kirsi Järvenranta<sup>1</sup>, erikoistutkija Helena Soine<sup>3</sup>, erityisasiantuntija Juha Hyvönen<sup>4</sup>, ryhmäpäällikkö, johtava asiantuntija Mikko Järvinen<sup>1</sup> ja erikoistutkija Riikka Keskinen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Luke, Halolantie 31 A, 71750 Maaninka, <sup>2</sup> Luke, Tietotie 4, 31600 Jokioinen, <sup>3</sup> Luke, Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki, <sup>4</sup> Luke, Ounasjoentie 6, 96200 Rovaniemi

**Itä-Suomen yliopisto:** väitöskirjatutkija Noora Jokinen, väitöskirjatutkija Umme Sara Santana, tutkijatohtori Ayobami Salami, väitöskirjatutkija Kimmo Laitinen, projektitutkija Isa Lyijynen ja professori Reijo Lappalainen  
Itä-Suomen yliopisto (UEF), Teknillisen fysiikan laitos, Yliopistonranta 8, 70210 Kuopio

ISBN 978-952-203-320-8 (PDF)  
ISSN 2343-5496

Savonia-ammattikorkeakoulun julkaisusarja 10/2023

Kustantaja: Savonia-ammattikorkeakoulu  
Taitto ja ulkoasu: Tapio Aalto  
Kansikuva: Panu Korhonen, Luke 8.6.2021

# SISÄLLYS

<b>1 TIIVISTELMÄ</b> .....	<b>4</b>
<b>2 TEOLLISUUDEN SIVUVIRRAT HYÖTYKÄYTTÖÖN KASVATUSKOKEIN</b> .....	<b>6</b>
2.1 Kasvatuskokeiden lähtökohdat .....	6
2.2 Kasvatuskokeiden tulokset kasvukaudelta 2021 .....	6
2.3 Kasvatuskokeiden tulokset kasvukaudelta 2022 .....	8
2.4 Yhteenveto 2022 kasvatuskokeista .....	12
<b>3 MIKROBIPOHJAISEN BIOVEDYN TUOTTAMINEN KASVIBIOMASSOISTA</b> .....	<b>13</b>
3.1 Biovedyntuotannon mikrobiologiset tekijät .....	14
3.2 Biovedyntuottopotentialin tulokset .....	15
3.3 Yhteenveto biovedyn tuotannosta ja kannattavuudesta .....	17
<b>4 METSÄTEOLLISUUDEN SIVUVIRROISTA PERÄISIN OLEVIEN MAANPARANNUSKUITUJEN KÄYTTÖ KARKEILLA KIVENNÄISMAILLA</b> .....	<b>20</b>
4.1 Tausta .....	20
4.2 Kenttäkokeen toteuttaminen .....	21
4.3 Laboratoriokoesarjojen toteuttaminen .....	22
4.4 Nostoja laboratoriokoeosion tuloksista .....	23
4.5 Nostoja kenttäkoeosion tuloksista .....	26
4.6 Yhteenveto .....	30
<b>5 LAAJAN KAUPALLISEN KÄYTÖN KANNALTA KRIITTISTEN TEKIJÖIDEN SELVITTÄMINEN</b> .....	<b>34</b>
5.1 Tuhkan käyttömahdollisuudet .....	34
5.2 Biohiilten ja -nesteiden valmistus .....	35
5.3 Kasvatuskokeet .....	37
5.4 Biohiilikomposiitit .....	38
5.5 Lietelannan kaasupäästöjen vähentäminen .....	39
<b>6 JOHTOPÄÄTÖKSET</b> .....	<b>46</b>

# 1 TIIVISTELMÄ

Biosfääri -hankkeessa selvitettiin ja demonstroitiin Pohjois-Savossa syntyvien sivuvirtojen jatkojalostusmahdollisuuksia. Lisäksi hankkeessa tarkasteltiin valmiuksia sivuvirtojen kaupallistamiselle maanparannusaineiden ja kierrätyslannoitteiden raaka-aineina tai muissa sovelluksissa. Hanke toteutettiin tiiviissä yhteistyössä maakunnan keskeisten sivuvirtojen tuottajien, potentiaalisten kaupallistajien ja loppukäyttäjien kanssa. Biosfäärihanke-konsortioon ovat kuuluneet Savonia-ammattikorkeakoulu (luvut 2 ja 3), Luonnonvarakeskus (luku 4) sekä Itä-Suomen yliopisto (luku 5).

Savonia-ammattikorkeakoulu keskittyi tutkimuksissaan kasvatuskokeisiin ja mikrobipohjaisen biovedyn tuotantoon. Hankkeessa testattiin ja demonstroitiin kesän kasvukausilla erilaisia sivuvirtoja maanparannusaineena. Pilotituotteiden toimivuutta testattiin astiamittakaavan demonstraatioissa kasvatuskokein käyttäen italianraiheinää viljelykasvina. Kasvatuskokeiden tavoitteena on paikallisten Pohjois-Savossa syntyvien teollisuuden sivuvirtojen soveltuvuuden testaaminen kierrätyslannoitteiksi tai maanparannusaineiksi.

Mikrobipohjainen biovedyntuotanto ja biojalostusteknologia tarjoaa monia mahdollisuuksia toisaalta erilaisten biomassojen jalostamiseen ja toisaalta energiantuotantoon. Sekä Euroopan mittakaavassa että Suomessa vetymarkkinat niin tuotannon kuin kysynnänkin suhteen ovat vielä kehitysvaiheessa. Tutkimukset Suomen energiaomavaraisuuden lisäämiseksi olivat yksi Biosfääri-hankkeen tavoitteita. Tulokset vaikuttivat lupaavilta kasvibiomassojen osalta ja tullaan raportoimaan osittain yksityiskohtaisemmin tieteellisessä artikkelissa.

Luonnonvarakeskus (Luke) tuotti hankkeessa tutkittua ja käytännönläheistä tietoa metsäteollisuudesta peräisin olevien kuitupitoisten sivuvirtojen käytöstä maanparannusaineina karkeilla kivennäismailla. Kolmivuotisen kenttäkokeen ja erillisten laboratoriokoesarjojen avulla selvitettiin maanparannuskuitujen vaikutuksia satoon, liukoisen typen käytettävyyteen, maan ravinteisuuteen ja hiilipitoisuuteen sekä karkeiden peltomaiden vedenpidätysominaisuuksiin. Lisäksi tarkasteltiin kuitulisäysten vaikutusta kenttäkokeelta levitysvuonna nostettujen maamonoliittien läpivaluntaveden laatuun. Laboratoriokokeissa oli kuitujen lisäksi mukana myös muita orgaanisia lisäysmateriaaleja (biohiilet, kuiva-ainepitoinen jae). Tässä raportissa on maanparannuskuitujen osalta esitetty esimerkkituloksia, ja tulokset tullaan esittämään kattavammin tieteellisissä julkaisuissa.

Itä-Suomen yliopiston keskeisiä tehtäviä hankkeessa oli erilaisten biomassojen prosessointi biohiileksi ja -nesteiksi, prosessoitujen tuotteiden ja sivuvirtojen analytiikka sekä testaukset sovelluksissa. Tarkasteltuja sovelluksia olivat kasvualusta, maanparannusaineet, hiilen käyttö komposiiteissa ja lietelannasta vapautuvien kasvihuonekaasupäästöjen pienentäminen lietteen biohiili- tai biomassakatteen ja tisleiden avulla. Kussakin sovelluskohteessa saatuja tuloksia verrattiin olemassa oleviin tuotteisiin tai kirjallisuuteen. Tulokset

vaikuttivat lupaavilta ja tullaan raportoimaan osittain yksityiskohtaisemmin tieteellisissä artikkeleissa.

Tutkimukset on toteutettu ”Biosfääri Pohjois-Savo; Biomassan ja biojalostusteknologioiden hyödyntäminen liiketoiminnan kasvattamisessa (No. A75980)” -hankkeessa, jonka päärahoitus on saatu Euroopan aluekehitysrahastosta (EAKR) Pohjois-Savon liiton kautta. Kiitos hankkeen päärahoittajalle Pohjois-Savon liitolle, kuntarahoittajalle Kuopion Kaupungille sekä yksityisille rahoittajille sekä koetoimintaan biomateriaaleja toimittaneille yhteistyökumppaneille Navitas Kehitys Oy:lle, Gasum Oy:lle, Iisveden Metsä Oy:lle, Kuopion Energia Oy:lle, Stora Enso Oyj:n Varkauden kartonkitehtaalle, Pekka Vehviläiselle, Jätekuukko Oy:lle, Tuusniemen Teollisuus Oy:lle, Ylä-Savon Jätehuolto Oy:lle, Premix Oy:lle, MTK-Pohjois-Savolle, Kuopion Vesi Oy:lle, ProAgria Keskusten Liitto ry:lle, Rx3 Studio Oy:lle, Iso-Kallan panimo Oy:lle ja Kuopion yrittäjät ry:lle.

## 2 TEOLLISUUDEN SIVUVIRRAT HYÖTYKÄYTTÖÖN KASVATUSKOKEIN

Henna Hyttinen, Sanna Antikainen, Harri Auvinen, Maarit Janhunen ja Eevi Minkkinen, Savonia-ammattikorkeakoulu Oy, Bio- ja kiertotalouden vahvuusala, PL 6 (Microkatu 1), 70201 Kuopio.

Muuttunut maailmantilanne aiheuttaa muutosvaikutuksia niin maatalojen kannattavuuteen kuin energian- ja elintarviketuotantoon. Biosfääri-hankkeessa selvitettiin astiamittakaavassa paikallisten alihyödynnettyjen sivuvirtojen soveltuvuutta maanparannusainekäyttöön sekä kierrätyslannoitteiksi. Testattavina substraatteina olivat mm. metsäteollisuuden tuhkat, sivuvirroista valmistetut biohiilet sekä erilaiset kompostoidut materiaalit. Lisäksi metsäteollisuuden tuhkien soveltuvuutta maaperän neutralointiin kaupallisten aineiden korvaajana testattiin astiamittakaavassa.

### 2.1 Kasvatuskokeiden lähtökohdat

Kasvatuskokeiden tavoitteena oli paikallisten Pohjois-Savossa syntyvien sivuvirtojen soveltuvuuden testaaminen kierrätyslannoitteiksi tai maanparannusaineiksi. Kasvatuskokeiden tuloksia voidaan hyödyntää potentiaalisesti kierrätyslannoitteiden tai maanparannusaineiden tuotteistamisessa ja kaupallistamisessa, tukien näin kiertotaloutta ja ympäristöystävällistä maataloutta.

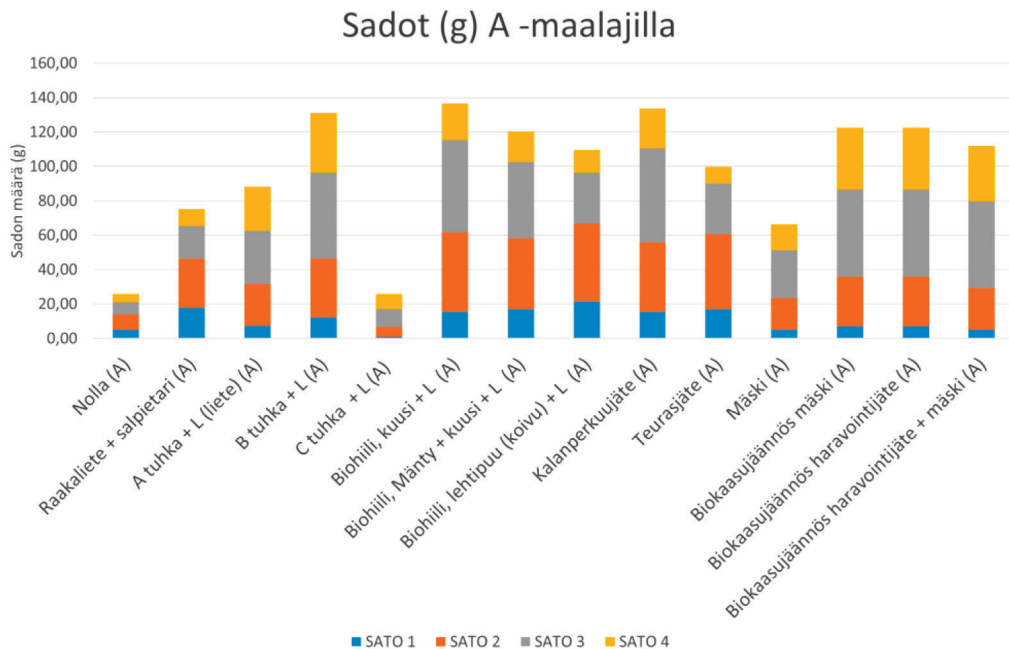
Kasvatuskokeet toteutettiin kasvihuoneessa altakasteluruukuissa, jolloin kasvuolosuhteita pystyttiin kontrolloimaan. Viljeltävänä kasvina toimi nopeasti itävä ja kehittyvä italianraiheinä, jota käytetään yleisesti tutkimustoiminnassa. Ennen kasvatuskokeiden käynnistystä tutkittavista materiaaleista teetettiin tarvittavat ravinne- ja hivenaineanalyysit. Tulosten perusteella jokaiselle tutkittavalle materiaalille laskettiin vertailukelpoiset lannoitus suunnitelmat sekä täydennettiin mahdollisesti puuttuvia ravinteita ravinneliuosten avulla.

### 2.2 Kasvatuskokeiden tulokset kasvukaudelta 2021

Kasvukaudella 2021 testattiin ruukkukokeena erilaisia orgaanisia aineita ja lannoitteita. Koeasetelmassa testauksessa oli mukana erilaisia tuhkia, biohiiliä, teurasjätteistä koostuvia lannoitteita ja biokaasuprosessin mädätejäänöksiä. Ruukkukokeen tarkoituksena oli testata, kuinka eri aineet toimisivat, jos aineita käytettäisiin maatilatasolla. Koska mukana oli aineita, jotka ovat vähäravinteisia, kuten tuhka ja biohiili, ruukkuihin lisättiin mukaan naudan lietettä (+L). Ruukkukokeen verrokkina toimivat nollaruukku (ei mitään lannoitusta) ja naudan liete ja salpietari, joka on yleinen lannoitustapa kotieläintiloilla.

Orgaanisten maanparannusaineiden ja lannoitteiden toimivuutta testattiin kahdella eri maalajilla, A-maalaji oli vähäravinteisempi ja B-maalaji ravinteikkaampi. Koeasetelmassa oli kolme kerrannetta. Sadonkorjuussa italianraihnat leikattiin 2 cm korkeudelta ja sato korjattiin kolmesti kesän aikana noin 28 vuorokauden välein. Kasvihuoneen olosuhteiden sisäisten eroavaisuuksien vuoksi jokaisen sadonkorjuun jälkeen ruukkujen paikkoja vaihdettiin olosuhteiden eroavaisuuksista johtuvien kasvun erojen välttämiseksi.

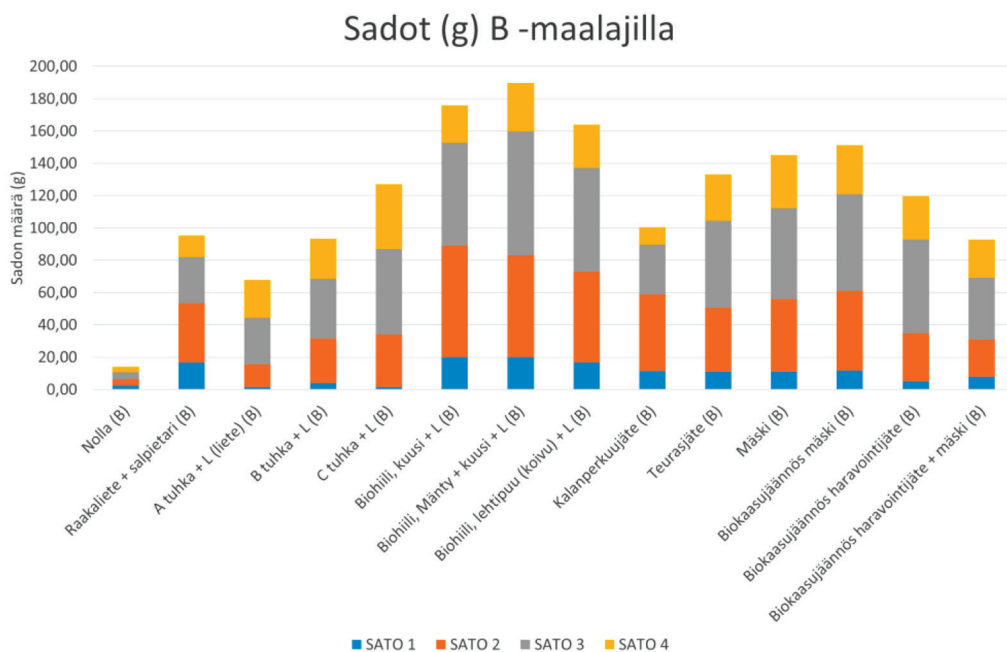
Seuraavissa kuvioissa (Kuvio 1 ja Kuvio 2) on kuvattu 4:n eri sadon ja kokonaissatojen määrää maalajeilla A ja B. Ensimmäinen sato oli pieni, mutta toisessa ja kolmannessa sadossa sadon määrä nousi, johtuen mahdollisesti orgaanisten aineiden (ja lietteen) ravinteiden vapautumisesta myöhemmin kasvukaudella. Suurimmat kokonaissadot olivat B-maalajilla. A-maalajilla suurimmat (yli 120 g) kokonaissadot olivat B tuhkalla, biohiilillä kuusi ja kuusi + mänty, kalanperkuujätteellä ja biokaasuprosessin mädätejäännöksillä mäski ja haravointijäte. B-maalajilla biohiilet (kuusi, mänty + kuusi ja lehtipuu) tuottivat yli 160 g kokonaissadon.



**Kuvio 1.** Kasvukauden 2021 maalajin A satomäärät grammoina testattavien materiaalien välillä.

A-maalajilla A tuhka (+L) tuotti suurimmat sadot tuhkista (kokonaissato 131 g). Biohiili kuusi (+L) tuotti suurimman sadon biohiilistä (kokonaissato 136 g) ja teurasjätteistä kalanperkuujäte tuotti isomman sadon kuin teurasjäte (kokonaissato 133 g). Biokaasuprosessin mädätejäännöksistä mäski ja haravointijäte tuottivat isoimmat sadot (kokonaissato molemmilla 122 g). Mäskin kokonaissato verrattuna naudanliete + salpietari koejäseneen oli matala A-maalajilla.





**Kuvio 2.** Kasvukauden 2022 maalajin B satomäärät grammoina testattavien materiaalien välillä.

B-maalajilla C tuhka (+L) tuotti suurimmat sadot tuhkista (kokonaissato 127 g). Biohiili mänty + kuusi (+ L) oli biohiiliaineista paras (kokonaissato 189 g) ja kompostoiduista materiaaleista teurasjäte oli parempi satotasoltaan kuin kalanperkuujäte (kokonaissato 133 g). Biokaasujäännöksistä mäski tuotti korkeimman sadon (kokonaissato 151 g). B-maalajilla mäskin kokonaissato oli parempi kuin A-maalajilla.

## 2.3 Kasvatuskokeiden tulokset kasvukaudelta 2022

Kasvukaudella 2022 testattiin ruukkukokeessa biohiilen lisäystä sekä kahta erilaista kompostoitua teurasjätettä. Ensimmäisessä koeasetelmassa testattiin erilaisten biohiiliaineiden ja eri määrien vaikutusta italianraiheinän kasvuun. Toisessa koeasetelmassa testattiin kompostoidun teurasjätteen fosforin lannoitusvaikutusta italianraiheinään. Koeasetelmassa oli neljä kerrannetta ja kylvömääränä käytettiin 128 kpl italianraiheinän siementä/ruukku.

### Biohiili ruukkukoe

Biohiilikokeeseen maalajiksi valittiin runsasmultainen hieno hietä, joka kalkittiin ennen kylvöä (20 g puutarhakalkkia/ruukku). Erilaisia biohiiliaineita oli viisi (kuusi, mänty-kuusi, lehtipuu, hamppu 1 ja hamppu 2) ja hamppubiohiilistä tehtiin lisäksi kaksi eri lisäsporrasta (high ja low). Biohiililisäyksiä verrattiin 0-ruukkuun, jossa ei ollut biohiililisäystä, mutta lannoitus oli samanlainen kuin kaikilla muilla koejäsenillä. Kaikki ruukut lannoitettiin samalla

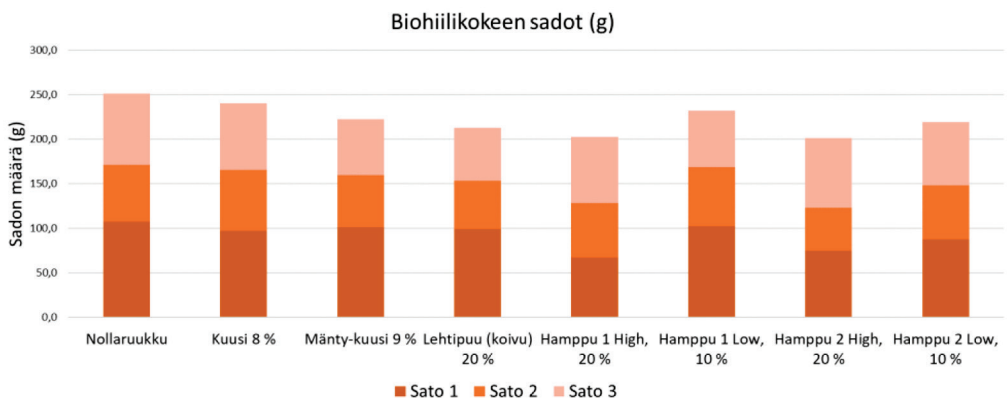
tavalla ja lannoitus annettiin ravinneliuoksina (fosfori, typpi, kalium ja rikki). Lannoitus tehtiin kylvön yhteydessä ja jokaisen sadonkorjuun jälkeen. Seuraavassa taulukossa on esitetty biohiilikokeiden lannoitukset kylvön aikana.

**Taulukko 1.** Biohiilikokeen lannoitus kylvön aikana, ensimmäisen ja toisen sadonkorjuun jälkeen (mg/ruukku).

Ravinne	Kylvön aikana	1 sadonkorjuun jälkeen	2 sadonkorjuun jälkeen
Typpi, N	1 250	1 000	800
Fosfori, P	500	0	0
Kalium, K	1 250	1 000	800
Rikki, S	375	0	0

Sadot korjattiin 3 kertaa kasvukaudella jolloin italianraiheinä leikattiin 2 cm korkeudelta. Sadot korjattiin 28 vuorokauden välein. Jokaisesta ruukusta punnittiin ja kuivattiin sadot. Suurin kokonaissato oli nollaruukulla (251 g) ja biohiilistä kuusi -koejäsen tuotti korkeimman kokonaissadon (240 g) (Kuvio 3). Hamppu biohiilistä suurimman kokonaissadon tuotti Hamppu 1 low. Hampu 1 low ja 2 low olivat kokonaissadoltaan parempia kuin Hampu 1 ja 2 high.

Biohiilikokeen ensimmäisessä sadossa suurimman sadon tuotti nollaruukku (107,9 g). Hamppu 1 low ja Hamppu 2 low olivat satotasoltaan parempia ensimmäisessä sadossa kuin Hamppu 1 high (34 g matalampi) ja Hamppu 2 high (13 g matalampi). Ensimmäisen niiton jälkeen tehty lannoitus ravinneliuoksella, jossa oli liian korkea pH, saattoi vaikuttaa kasvien kasvuun negatiivisesti, joten toisen ja kolmannen sadon tulokset ovat suuntaa antavia. Toisessa sadossa Hamppu 1 low ja Hamppu 2 low tuottivat edelleen suuremman sadon kuin Hamppu 1 high ja Hamppu 2 high. Kolmannessa sadossa Hamppu 1 high ja Hamppu 2 high sadot olivat korkeammat kuin Hamppu 1 low ja Hamppu 2 low koejäsenissä.



**Kuvio 3.** Biohiilikokeen satotulokset (g).

## Fosfori -ruukkukoe

Fosforikokeessa maalajina oli vähän fosforia sisältävä multava hiue, joka kalkittiin (12 g puutarhakalkkia/ruukku). Koeasetelmassa verrattiin kahden erilaisen kompostoidun materiaalin (teurasjäte ja kalanperkuujäte) fosforin lannoitusvaikutusta. Kompostoituja materiaaleja verrattiin kemialliseen fosforilannoitukseen (superfosfaatti). Koeasetelmassa käytettiin kahta erilaista fosforilannoitustasoa P100 ja P300 (P100=100 mg/kg ka ja P300= 300 mg/kg ka) (Taulukko 2). Lisäksi koeasetelmassa oli 0-ruukku, johon lisättiin typpi-, kalium- ja rikkilannoitteet mutta ei fosforia. Lannoitus (NPKS) tehtiin kylvön yhteydessä ja jokaisen sadonkorjuun jälkeen ruukut lannoitettiin typellä ja kaliumilla (NK). Kylvön yhteydessä laskettiin teurasjätteestä tulevat ravinteet ja ravinteiden määrä täydennettiin ravinneliuoksilla.

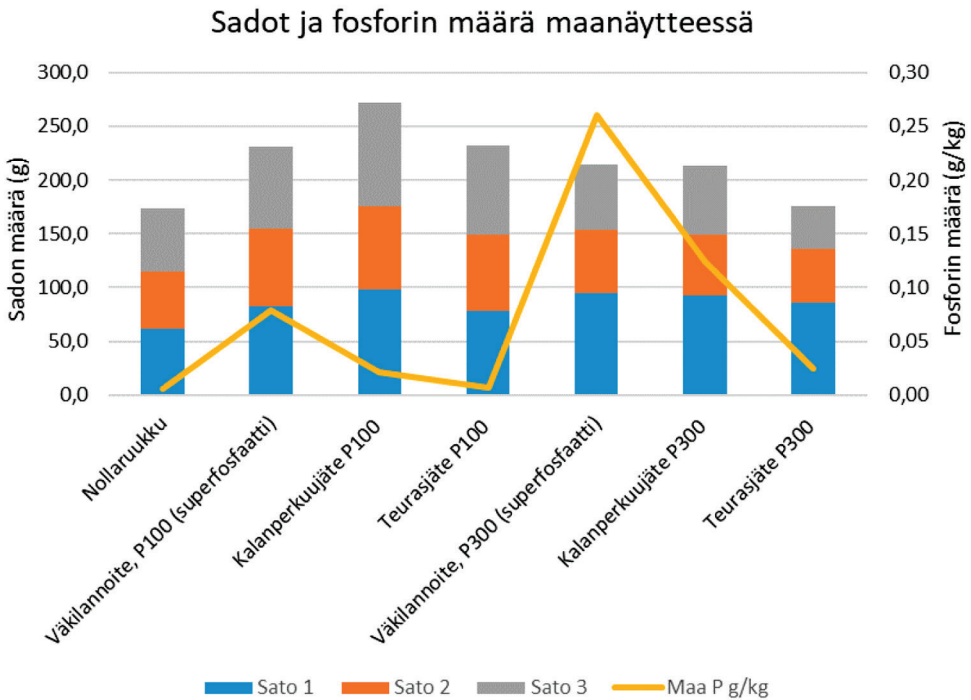
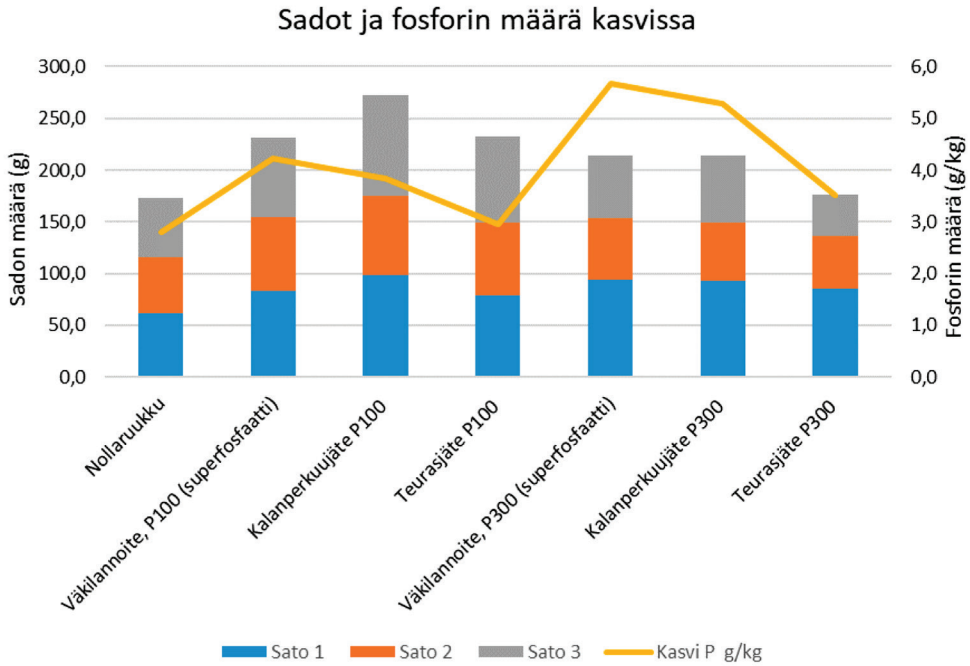
**Taulukko 2.** Fosforikokeen lannoitus kylvön aikana, ensimmäisen ja toisen sadonkorjuun jälkeen (mg/ruukku)

Ravinne	Kylvön aikana	1 sadonkorjuun jälkeen	2 sadonkorjuun jälkeen
Typpi, N	1 250	1 000	800
P100	500	0	0
P300	1 500	0	0
Kalium, K	1 250	1 000	800
Rikki, S	375	0	0

Ruukkukokeen sadot korjattiin 3 kertaa kasvukaudella jolloin italianraiheinä leikattiin 2 cm korkeudelta. Sadot korjattiin 28 vuorokauden välein. Jokaisesta ruukusta punnittiin ja kuivattiin sadot. Sadot laskettiin 4 ruukun keskiarvoina. Kasvin laatuanalyysiä varten koejäseniä jouduttiin yhdistämään, jotta kasvinäytettä oli tarpeeksi analyysiä varten. Maanäyteanalyysiin lähetettiin 2 maanäytettä/aine, joita ei yhdistelty. Maa- ja kasvinäytteiden fosforitulokset seuraavalla sivulla olevassa kuviossa (Kuvio 4) ovat suuntaa antavia.

Kalanperkuujäte P100 tuotti suurimman kokonaissadon (39 g korkeampi). Väkilannoite P100 ja Teurasjäte P100 olivat seuraavaksi suurimmat ja olivat kokonaissadoltaan lähes yhtä korkeita (erotus 0,4 g). P100 fosforilannoituksella olevat aineet ja väkilannoite tuottivat korkeamman kokonaissadon kuin P300 –fosforilannoitus tasolla olevat aineet ja väkilannoite. Nollaruukku tuotti pienimmän kokonaissadon.

Ensimmäisessä sadossa suurimman sadon tuotti Kalanperkuujäte P100 (98 g). Yli 90 g satoihiin ylsivät myös Väkilannoite P300 ja Kalanperkuujäte P300. Alhaisimman sadon tuotti nollaruukku (62 g). Ensimmäisen niiton jälkeen tehty lannoitus ravinneliuoksella, jossa oli liian korkea pH, saattoi vaikuttaa kasvien kasvuun negatiivisesti, joten toisen ja kolmannen sadon tulokset ovat suuntaa antavia. Toisessa ja kolmannessa sadossa P100 fosforilannoituksella lannoitetut koejäsenet olivat satotasoltaan parempia (näistä korkeimmat sadot tuottivat Kalanperkuujäte P100) kuin P300 fosforilannoituksella olevat koejäsenet. Kasvissa olevaa fosforia oli enemmän väkilannoite koejäsenissä (väkilannoite P100 ja P300). Maanäytteessä väkilannoite koejäsenissä (väkilannoite P100 ja P300) oli eniten fosforia.



Kuvio 4. Fosfori ruukkukokeen sadot ja fosforin määrä kasvissa ja maanäytteessä.

## 2.4 Yhteenveto 2022 kasvatuskokeista

Kasvukauden 2022 kokeissa oli vaihtelevuutta biohiilien välillä. Parhaimman kokonaissadon tuotti nollaruukku, johon ei ollut lisätty biohiiltä. Biohiilen määrällinen sekä laadullinen lisäys tuotti eroja kokonaissatoihin, mutta lisäyksillä ei saatu sadonlisää tässä kokeessa. Vastaavasti kasvukaudella 2022 kompostoidut materiaalit lannoittivat yhtä hyvin kuin väkilannoite. P100 fosforilannoituksella saatiin parhaat kokonaissadot. Kasville oli riittävästi fosforia saatavilla ja se hyödynsi fosforin paremmin. P300 fosforilannoituksella maahan ja kasviin jäi enemmän fosforia kuin P100 fosforilannoitustasolla eli isommalla fosforilannoitusmäärällä ei saatu sadonlisää.

### 3 MIKROBIPOHJAISEN BIOVEDYN TUOTTAMINEN KASVIBIOMASSOISTA

Henna Hyttinen, Sanna Antikainen, Harri Auvinen, Maarit Janhunen ja Eevi Minkkinen, Savonia-ammattikorkeakoulu Oy, Bio- ja kiertotalouden vahvuusala, PL 6 (Microkatu 1), 70201 Kuopio.

Pimeäfermentaatio on otollinen tekniikka uusiutuvan biovedyn tuottamiseksi. Vedyn tuotanto on orgaanisen aineksen hajottamista anaerobisesti eli hapetomasti mikrobien, yleensä *Clostridia*-, *Esheria*-suvun bakteerien toimesta. Bakteerit käyttävät hiilihydraatteja, proteiineja ja lipidejä substraatteina muodostaen asidogeneesin kautta lopputuotteena happoja, vetyä ja hiilidioksidia. Anaerobinen hajoaminen on kolmivaiheinen prosessi tuotettaessa biovetyä, joissa eri mikrobiryhmät hajottavat lähtömateriaalin pienemmiksi yhdisteiksi. Prosessin ensimmäinen vaihe on hydrolyysi, jossa prosessin raaka-aineen hiilihydraatit, rasvat ja valkuaisaineet hajoavat liukoiksi yhdisteiksi, kuten pitkäketjuisiksi rasvahapoiksi, aminohapoiksi ja yksinkertaisiksi sokereiksi. Hajoaminen tapahtuu hydrolyyttisten bakteerien avulla. Tämä prosessin vaihe on myös pullonkaula biovedyn muodostumiselle, sillä ilman tätä vaihetta eivät kaksi seuraavaa vaihetta pysty käynnistymään (Ferreira & Gouveia 2020, Ghimirea et al., 2015, Audiopek Oy ym., 2013, Abdelgadir et al., 2014).

Hydrolyysiä seuraa happokäyminen, jota kutsutaan myös asidogeneesiksi, jossa bakteerit hajottavat hydrolyysissä syntyneet liuenneet aineet haihtuviksi rasvahapoiksi (VFA), hiilidioksidiksi ( $\text{CO}_2$ ) ja vedyksi ( $\text{H}_2$ ). Pääasiallisia happokäymisen aineenvaihduntatuotteita ovat propionihappo (propaanihappo), butyraatti (voihappo), valeerihappo sekä ammoniakki (Zhang et al., 2014, Abdelgadir et al., 2014).

Kolmas prosessin vaihe on etikkahappokäyminen eli asetogeneesi, joka voi edetä olosuhteitten mukaan kahta eri reittiä. Asetogeneesissa asetogeneettiset bakteerit hajottavat haihtuvat rasvahapot ja muut asidogeneesin lopputuotteet hiilidioksidiksi, vedyksi ja asetaatiksi (etikkahappo) tai muokkaavat hiilidioksidista sekä vedystä asetaattia (Abdelgadir et al., 2014).

Vedyn tuotannon raaka-aineiksi soveltuvat erilaiset materiaalit, jotka biohajoavat anaerobisesti. Tärkeitä kriteerejä substraatin valinnalle biovedyn tuotantoon ovat raaka-aineen kestävyys kestävä kehityksen näkökulmasta, saatavuus, hinta, orgaaninen koostumus sekä biohajoavuus. Tutkimukset ovat myös osoittaneet, että vedyn saanto on suurempi liukoisesta orgaanisesta aineesta, kuin kiinteästä orgaanisesta aineesta, sillä liukoiset orgaaniset ainekset hajoavat helpommin. Helposti biohajoavista yhdisteistä, kuten hiilihydraateista koostuvat raaka-aineet, ovat osoittautuneet vedyn tuotannon kannalta parhaimmiksi. Monimutkaisemmista yhdisteistä, kuten rasvoista ja proteiineista koostuvia raaka-aineita pidetään haasteellisempina ja niiden tuottamat vetysaannot ovat toistaiseksi melko vähäisiä. Puhtaat hiilihydraattilähteet eivät kuitenkaan sellaisenaan ole kannattavia substraatteja vedyn tuotantoon.

Sen sijaan erityyppiset orgaaniset jättemateriaalit tarjoavat suuremman taloudellisen potentiaalin kiertotalousnäkökulman huomioiden. Näitä jättemateriaaleja ovat esimerkiksi biojätteet, teurasjätteet, kotitalouksien ja teollisuuden jätevedet, jätevesilietteet, lannat sekä kasvijätteet (Tähti & Rintala, 2010, Pandey et al., 2013).

### 3.1 Biovedyntuotannon mikrobiologiset tekijät

Fermentaatioprosessin raaka-aineen koostumus vaikuttaa vedyn tuotannon tehokkuuteen. Fermentaation tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat myös mikrobit ja niiden aineenvaihdunnan tuottamat metaboliatuotteet. Mikrobien aineenvaihdunta muuttuu olosuhteiden mukaan, joten olosuhteet vaikuttavat myös muodostuviin välituotteisiin. Bioreaktorissa vallitsevilla olosuhteilla on siis merkittävä vaikutus fermentaatioon ja fermentaatiolla tuotettavan vedyn saantoon (Pandey et al., 2019).

Yksi vedyn tuotantoon vaikuttava parametri on pH, sillä se vaikuttaa organismien metaboliareitteihin, vaikuttamalla erilaisten solventsyymien toimintaan. Jokaisella entsyymillä on oma optimaalinen pH-arvo, jossa kyseisen entsyymin aktiivisuus on suurin. Syötteen pH vaikuttaa mm. hydrogenaasin aktiivisuuteen, joka on keskeinen entsyymi vedyn tuotannossa. Mikäli happokonsentraatio kasvaa bioreaktorissa, johtaa se pH-arvon laskemiseen. Tämä puolestaan laukaisee aineenvaihdunnan muutoksen kohti happojen muuttamista alkoholeiksi, jolloin vedyn tuotanto heikkenee. Hydrogenaasin toiminta siis estyy alhaisissa pH-arvoissa. Optimaalinen pH vedyn tuotantonopeuden maksimoimiseksi riippuu siis mikro-organismista sekä substraatista. Erilaiset tutkimukset ovat osoittaneet, että optimaalinen pH-arvo vedyn saannon kannalta olisi välillä 5,0-8,0 (Pandey et al., 2019, Liu & Shen, 2004).

Sekoituksen avulla varmistetaan, että bioreaktorissa hajottamista suorittavat mikro-organismit pääsevät kosketuksiin bioreaktoriin syötettävän materiaalin kanssa, tasataan pH:ta ja lämmön sekä ravinteiden jakautuminen sekä lisäksi varmistetaan kaasun eteneminen kaasunkeräykseen. Sekoittamisen avulla estetään lisäksi sedimenttien muodostuminen eli syötteen kerrostuminen. Mikäli bioreaktoriin syötettävää materiaalia ei sekoiteta tarpeeksi, eliömassa kerrostuu reaktorin pohjalle ja suurin osa syöttestä kertyy lähelle pintaa, jolloin biovedyn tuotanto saattaa heikentyä. Sekoittaminen ennalta ehkäisee myös raskaista materiaaleista, kuten hiekasta muodostuvien saostumien muodostumista bioreaktorin pohjalle. Sekoittamista ei kuitenkaan saisi suorittaa liian voimakkaasti tai liian paljon, sillä näiden on havaittu vaikuttavan kaasuntuottoon alentavasti (Audiopek Oy ym., 2013, Morimoto et al., 2004).

Fermentatiivisessa vedyn tuotannossa viipymäaika on ratkaiseva tekijä vedyn tuotantopotentiaalin näkökulmasta. Viipymäaika on aika, jonka syöte on bioreaktorissa; se kuitenkin vaihtelee hiukan bioreaktoriin eriaikaan syötettävien materiaalien sekoittumisen ja massojen poistamisen vuoksi. Viipymäaika on avaintekijä mikro-organismien toiminnassa, niiden kasvunopeuden perusteella (Ghimirea et al., 2015).

Etenkin jatkuvatoimisten reaktoreiden kohdalla kuormitus vaikuttaa suuresti vedyntuottopotentiaaliin. Vedyn tuotannon kannalta korkeampi kuormitus on edullisempi, mutta kuormituksen noustessa liian korkeaksi vedyntuottopotentiaali pienenee. Ylikuormitus voi aiheuttaa vedyn osapaineen nousemisen ja laskee pH:n, joiden seurauksena vedyn tuotanto voi laskea, koska olosuhteet muuttuvat edullisemmaksi vetyä käyttäville bakteereille. Osa substraatista voi jäädä hyödyntämättä tai prosessi voi alkaa muodostaa alkoholeja, mikäli ylikuormitus jatkuu liian pitkään (Van Ginkel & Logan, 2001, Fan & Chen, 2004).

Fermentatiivisessa vedyn tuotannossa metabolisten lopputuotteiden tiedetään vaikuttavan vetysaantoon. Yleisimmät näistä metabolisista liukoisista lopputuotteista ovat asetaatti, etanoli, butanoli, butyraatti ja propionihappo. Vedyn saannon maksimoimiseksi tulisi prosessi suunnata tuottamaan haihtuvia rasvahappoja, pelkistyneiden aineenvaihduntatuotteiden sijaan. Vetyä saadaan teoreettisesti enintään 4 mol H<sub>2</sub>/mol glukoosia, kun lopputuotteena on asetaatti ja lopputuotteen ollessa butyraatti teoreettinen maksimisaanto on 2 mol H<sub>2</sub>/mol glukoosia. Teoriassa suurin vedyn saanto saadaan lopputuotteen ollessa asetaatti, mutta todellisuudessa suurin vedyn saanto saadaan asetaatin ja butyraatin sekoituksella. Haihtuvien rasvahappojen runsas kerääntymisen prosessiin aiheuttaa kuitenkin pH:n laskemista, joka voi inhiboida vedyn tuotantoa. Esimerkiksi hydrogenaasi-entsyymin toiminta estyy alhaisessa pH:ssa, joten haihtuvien rasvahappoja tulisi poistaa prosessista, sillä niiden poistaminen lisää vedyn tuottoa (Pandey et al., 2019, Lee et al., 2002, Abdelgadir et al., 2014, Zhang et al., 2014, Levin et al., 2004).

### 3.2 Biovedyntuottopotentialin tulokset

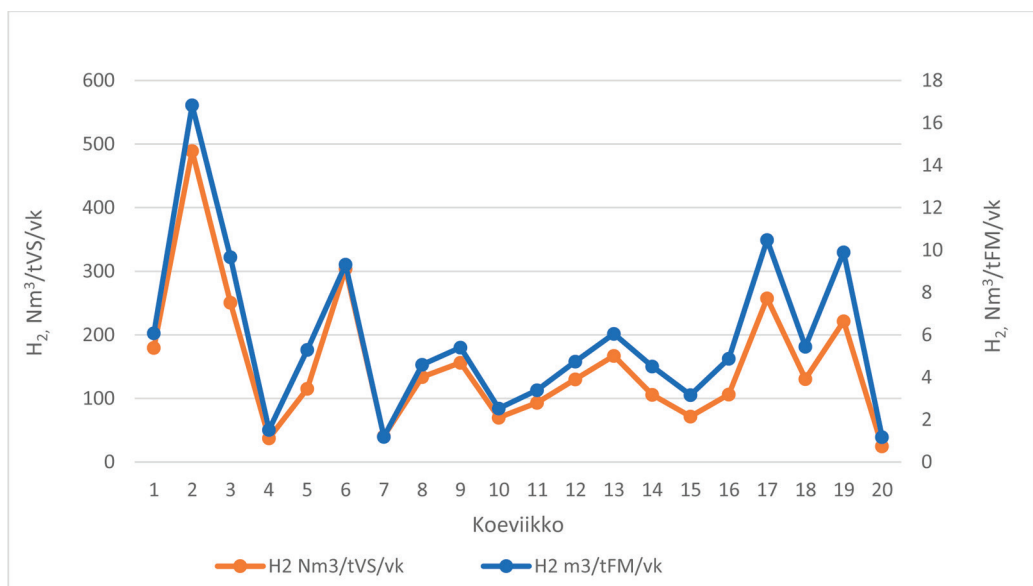
Vedyn tuottopotentialikokeet suoritettiin kahdella Eppendorfin laboratorio-mittakaavan BioFlo 120 fermentorilla, joka käsittää 5 litran vetoiset jatkuva-toimiset reaktorit. Syötteen kuiva-aineen (TS-%) ja orgaanisen aineen (VS-%) pitoisuuksien pohjalta laskettiin sopiva syöttötavoite (gVS) ja viipymäaika (pv). Syöttötavoitteen perusteella raaka-aineille laskettiin sopiva kuormitus (g/d) fermentaatioprosessin kannalta. Syöttötavoite (gVS) laskettiin raaka-aineiden VS-pitoisuuden (%) ja fermentorien 4 litran tehollisen tilavuuden perusteella. Sitten tutkittavat raaka-aineet sekä ympäristö lisättiin reaktoreihin ja suoritettiin lämpötilan, pH:n sekä sekoituksen (rpm) säätö halutulle tasolle. Pimeäfermentaation toteutumisen varmistamiseksi fermentorien reaktorit peitettiin foliolla, niin ettei valo pääsyt vaikuttamaan fermentaatioprosessiin.

Laboratorion koeajo koostui noin viikon kestävästä adaptointivaiheesta, jossa ympäristöä ja tutkittavaa materiaalia käsiteltiin reaktorissa sopivassa suhteessa. Ympäristönä kaikissa koeajoissa käytettiin biokaasulaitoksen lämpökäsiteltyä käsitteilyjäännöstä. Tätä seurasi noin viikon kestävä ylösajovaihe, jossa prosessia kuormitettiin 300 gFM/d. Kaikki koeajot toteutettiin mesofiilisellä lämpötila-alueella käyttäen mekaanista lapasekoitinta ja pH-alueena 5,0–5,5. Materiaalia vaihdettiin mekaanisesti viidesti viikossa (ei syötön vaihtoa viikonloppuisin).



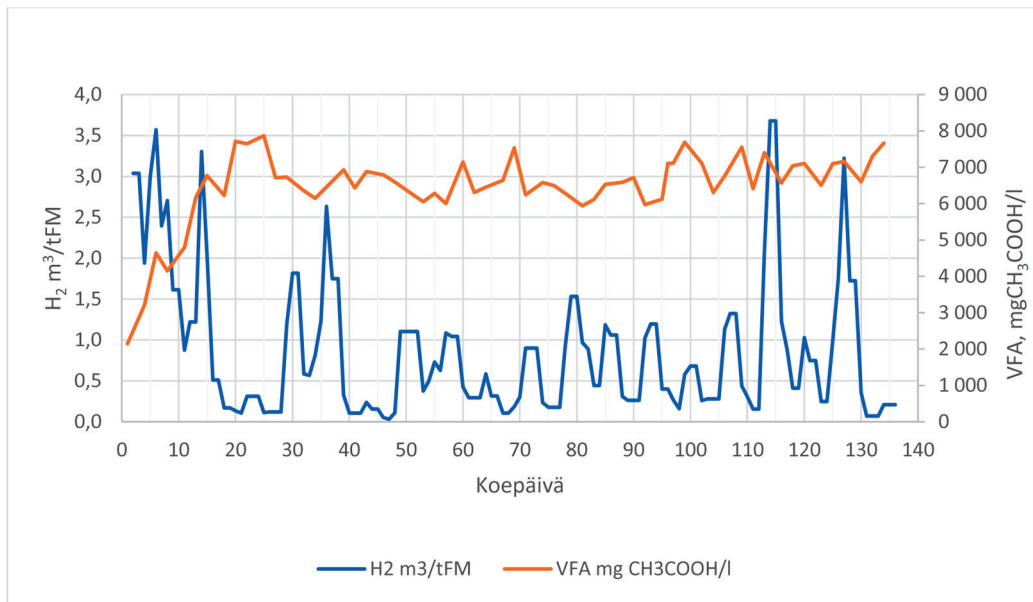
Sipulijätteen biovedyn tuottopotentiaalikokeet käynnistettiin kolme viikkoa kestävällä adaptoinnilla ja ylösajovaiheella. Prosessia ajettiin tasaisella 38,19 gVS/d kuormituksella vaihtaen materiaalia viidesti viikossa, viipymäajan ollessa 13,3 pv. Sipuli sisälsi kuiva-ainetta 13,42 % ja orgaanista ainetta 12,73 % ja siitä toteutettiin yhteensä 20 viikkoa kestävä biovedyntuottokoeajo. Sipulijätteen koeajoa toteutettiin ensin raa'alla sipulilla viiden viikon ajan, jonka jälkeen prosessiin otettiin mukaan entsyymattinen käsittely helpottamaan suurien molekyylien, kuten selluloosan ja ligniinin hajoamista sekä tehostamaan vedyntuottopotentiaalia. Entsyymeinä käytettiin luonnonmukaisesti biohajoavia ja bakteeripohjaisia kotimaisia entsyymejä. Sipulijätteen happamuus sekä sen sisältämä suhteellisen korkean konsentraation omaava rikki asetti haasteet mikrobiologiselle toiminnalle. Korkea rikkitaso asetti kilpailun biovetyä tuottavien ja sulfaattia pelkistävien bakteerien (SRB-kanta) välille. Rikin pelkistyminen prosessissa ja sulfaattia pelkistävien bakteerien akkumuloituminen estettiin rautakloridi ( $\text{FeCl}_3$ ) syötöllä.

Sipulijätteen vedyntuottopotentiaali vaihteli erittäin voimakkaasti koeajon aikana. Tuottopotentiaalin viikkokohtaisista tuloksista (Kuvio 5) havaitaan ylösajovaiheen ensimmäisten 3 viikon aikana ympin vaikutus tuottavuuteen. Tämän jälkeen on ajettu raakaa sipulia, jolloin prosessi alkoi hiipua. Viikosta 6 eteenpäin käytössä oli entsyymit osana koeajoa, aluksi entsyymejä annosteltiin 1 ml/100 g syötettä. Koepäivien 39–48 aikana testattiin entsyymien tupla-annostuksen vaikutusta prosessiin, jolloin havaittiin massan hajoavan liian nopeasti ja biovedyn tuoton hiipuvan. Tämän jälkeen loppukoeajon ajan entsyymejä syötettiin alkuperäinen annostus. Tarkasteltaessa biovedyntuottopotentiaalia koeviikkotasolla, saavutettiin vedyntuottopotentiaalissa keskiarvallisesti taso 5,81  $\text{Nm}^3/\text{tFM}/\text{vk}$ . Orgaanista ainetta kohden tämä tarkoitti keskiarvallisesti 154,3  $\text{Nm}^3/\text{tVS}/\text{vk}$ .



**Kuvio 5.** Sipulijätteen biovedyn viikkokohtaiset tuotantomäärät tuoretonnia ja orgaanisen aineen tonnia kohden ilmaistuna.

Bakteerien aineenvaihdunnan lopputuotteena muodostuu asetaattia, butyraattia, butanolia, etanolia, asetonia ja/tai 2-propanolia riippuen olosuhteista. Jotta biovedyntuotanto saataisiin maksimoitua, tulee bakteerien aineenvaihdunta saada suuntautumaan pois alkoholeista ja muista pelkistyneistä lopputuotteista ja saada ne tuottamaan haihtuvia rasvahappoja. Sipulijätteen biovedyntuottopotentiaalin mikrobiologisen hyvinvoinnin varmistamiseksi prosessista seurattiin kolmesti viikossa haihtuvien rasvahappojen (VFA, *Volatile Fatty Acids*) määrää ja niiden kehitystä prosessissa. Seuraava kuvio todentaa haihtuvien rasvahappojen määrän suhteessa muodostuneen biovedyn määrään. Koeajon aikana pystyttiin todentamaan hapoille optimaalinen raja-arvo, < 7 000 mg/l. Biovedyntuotanto on riippuvainen haihtuvien rasvahappojen muodostumisesta, mutta niiden aineenvaihdunnan tulee pystyä hyödyntämään happoja sitä mukaa kuin niitä muodostuu eli happojen osuus ei saa akkumuloitua prosessiin.



**Kuvio 6.** Sipulijätteen biovedyntuottopotentiaali tuorettonnia kohden sekä haihtuvien rasvahappojen määrä.

### 3.3 Yhteenveto biovedyn tuotannosta ja kannattavuudesta

Pimeäfermentaation laboratoriokeiden tavoitteena oli selvittää tutkittavien biopohjaisten aineksien biovedyntuottopotentiaalit ja pohtia tulosten perusteella soveltuisiko tutkittavat raaka-aineet potentiaaliseksi biovedyn lähteeksi. Korkein vedyntuottopotentiaali on tutkimusten mukaan peltokasveilla ja juureksilla. Mikrobiologisessa biovedyn tuotannossa rasvahappojen tuotanto on kilpaileva prosessi vedyn tuotannon kanssa ja siksi muodostuvien happojen monitorointi onkin ensiarvoisen tärkeää prosessin toimivuuden näkökulmasta arvioituna. Sipuli hajoaa kasvibiomassana suhteellisen tehokkaasti ja tulokset vaikuttavat lupaavilta. Oman haasteensa aiheuttaa kuitenkin sipulin happamuus sekä sen sisältämä rikin määrä. Sipulin biovedyn tuottopotentiaali vaih-

teli laboratorionkokeiden aikana 0,88 ml/gVS–100,05 ml/gVS välillä. Käytännössä tämä tarkoittaa, että tonnista sipulijätettä saadaan 1,92 kg vetyä. Vuoden 2022 energiahinnoilla ja käytetyllä laitteistolla vedyn tuotanto kustantaa keskimäärin 212 €/tFM.

## VIITTEET

Abdelgadir, Awad, Chen, Xiaoguang, Liu, Jianshe, Xie, Xuehui, Zhang, Jian, Zhang, kai, Wang, Heng & Liu. 2014. Characteristics, process parameters and inner components of anaerobic bioreactors. [Online] 2014.

[https://www.researchgate.net/publication/261141070\\_Characteristics\\_Process\\_Parameters\\_and\\_Inner\\_Components\\_of\\_Anaerobic\\_Bioreactors](https://www.researchgate.net/publication/261141070_Characteristics_Process_Parameters_and_Inner_Components_of_Anaerobic_Bioreactors)

Audiopek Oy, Motiva Oy, Luostarinen, Juha & Metener Oy. 2013. Biokaasun tuotanto maatilalla. 2/2013.

[https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun\\_tuotanto\\_maatilalla.pdf](https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_maatilalla.pdf)

Fan, Kuo-Shuh & Chen, Ya-Yun. 2004. H<sub>2</sub> production through anaerobic mixed culture: effect of. [Online] 2004.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653504006988>

Ferreira, Alice & Gouveia Luisa 2020. Microalgal biorefineries. Handbook of Microalgae Based Processes and Products. Verkkokirja. Academic Press,

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128185360000282>.

Ghimirea, Anish, Frunzo, Luigi, Pirozzi, Francesco, Trably, Eric, Escudie, Renaud, Lens, Piet N.L & Esposito. 2015. A review on dark fermentative biohydrogen production from organic biomass. [Online] 2015.

<https://www.sciencedirect.com/journal/applied-energy/vol/144/suppl/C>

Lee, Young Joon, Miyahara, Takashi & Noike, Tatsuya. 2002. Journal of Chemical Technology and Biotechnology. *Effect of pH on microbial hydrogen fermentation*. [Online] 2002.

[https://www.researchgate.net/publication/227848049\\_Effect\\_of\\_pH\\_on\\_microbial\\_hydrogen\\_fermentation](https://www.researchgate.net/publication/227848049_Effect_of_pH_on_microbial_hydrogen_fermentation)

Levin, David B., Pitt, Lawrence & Love, Murray. 2004. Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application. *International Journal of Hydrogen Energy*. [Online] 2004.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036031990200099X>

Liu, G. & Shen, J. 2004. Effects of culture and medium combinations on hydrogen production from starch using anaerobic bacteria. *Journal of biosciences and bioengineering*. [Online] 2004.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389172304002774>

Morimoto, M., Atsuko, M., Atif, A.A.Y., Ngan, M.A., Fakhru'l-Razi, A., Iyuke, S.E. & Bakir, A.M. 2004. International journal of hydrogen energy. *Biological production of hydrogen from glucose by natural anaerobic microflora*. [Online] 2004. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319903002489>

Pandey, Ashok, Chang, Jo-Shu, Hallenbeck, Patrick & Larroche, Christian. 2013. *Biohydrogen*. 1. painos, 2013.

Pandey, Ashok, Mohan, S. Venkata, Chang, Jo-Shu, Hallenbeck, Patrick C., & Larroche, Christian. 2019. *Biohydrogen*. 2. painos. Elsevier.

Tähti, Hanne & Rintala, Jukka. 2010. Biometaanin ja -vedyn tuotantopotentiaali Suomessa. [Online] 2010. <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/37062/T->

Van Ginkel, Steven., Sung, S. & Lay, J. J. 2001. Environmental sciences and technology. *Biohydrogen production as a function of pH and substrate concentration*. [Online] 2001. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11775145/>

Zhang, J. Z., Li, J., Li, Y. & Zhao, Y. 2014. Hydrogen generation, storage and utilization. [Online] 2014. <https://www.researchgate.net/publication/28594805>

## 4 METSÄTEOLLISUUDEN SIVUVIRROISTA PERÄISIN OLEVIEN MAANPARANNUSKUITUJEN KÄYTTÖ KARKEILLA KIVENNÄISMAILLA

Mari Rätty<sup>1</sup>, Maarit Termonen<sup>1</sup>, Johanna Nikama<sup>2</sup>, Kirsi Järvenranta<sup>1</sup>, Helena Soinne<sup>3</sup>, Juha Hyvönen<sup>4</sup>, Mikko Järvinen<sup>1</sup> ja Riikka Keskinen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Luke, Halolantie 31 A, 71750 Maaninka, <sup>2</sup> Luke, Tietotie 4, 31600 Jokioinen,

<sup>3</sup> Luke, Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki, <sup>4</sup> Luke, Ounasjoentie 6, 96200 Rovaniemi

### 4.1 Tausta

Orgaanista ainesta ja ravinteita sisältävät erilaiset lietteet muodostavat merkittävän metsäteollisuuden sivuvirran, josta huomattava osa on poltettu tuotantolaitosten omissa laitoksissa lämmön ja sähkön tuottamiseksi. Metsäteollisuudesta peräisin olevia kuitupitoisia sivuvirtoja on hyödynnetty maanparannusaineina kierrättämällä niiden sisältämää hiiltä ja ravinteita peltomaahan, mikä edistää myös kiertotaloutta. Erilaiset maanparannuskuidut voivatkin lisätä maan orgaanisen aineksen pitoisuutta, parantaa maan fysikaalisia ominaisuuksia, nostaa maan pH:ta ja toimia ravinteiden lähteenä (Camberato ym. 2006). Luonnonvarakeskuksen (Luke) Jokioisten kenttäkokeelta nostetuilla maamonoliiteilla toteutetussa sadesimulaatiokokeessa ravinteita sisältävät kuitulietteet ja ravinneköyhä nollakuitu ovat vähentäneet läpivaluntaveden kiintoaineksen ja siihen sitoutuneen fosforin pitoisuuksia, ja siten niillä on potentiaalia toimia maan rakenteellisten ominaisuuksien parantamisen kautta myös maatalouden vesiensuojelukeinona (Rasa ym. 2021). Sivuvirtakuitujen peltoviljelykäytössä mahdolliset negatiiviset vaikutukset voivat liittyä niiden sisältämän kadmiumin pitoisuuteen, joka voi rajata leviytyskertoja ja -määriä. Korkean hiili:typpi -suhteen omaavan orgaanisen aineksen hajotuksessa mineraalityppeä sitoutuu mikrobeihin (immobilisaatio), mikä voi johtaa lyhytaikaiseen sadonalenemaan. Tätä on kuitenkin mahdollista ehkäistä ja/tai vähentää riittäväällä mineraalityypitäydennyksellä sekä jättämällä kuitulevitysten ja kylvön väliin varoaika (Ajosenpää ym. 2021).

Viimeaikaiset tulokset kuitulietteiden ja nollakuitujen käytöstä maanparannusaineina suomalaisilla hienojakoisilla viljelymailla ovat olleet hyvin lupaavia (Kinnula ym. 2020, Rasa ym. 2021), kun taas tuloksia on puuttunut karkeilta kivennäismailta. Luke Maaningalla toteutetussa kolmivuotisessa kenttäkokeessa selvitettiin kahden erilaisen kuitulietteen vaikutuksia satoon (määrä ja laatu), liukoisen typen käytettävyyteen, maan hiilipitoisuuteen ja karkeiden kivennäismaiden vedenpidätysominaisuuksiin. Lisäksi tarkasteltiin kuituläpäysten vaikutusta kenttäkokeelta levitysvuonna nostettujen maamonoliittien läpivaluntaveden laatuun. Hankeaikana Luke Jokioisen toimipaikassa toteutettiin kolme erillistä laboratoriokoesarjaa. Laboratoriokokeilla selvitettiin lisäysmateriaalien vaikutuksia karkeiden maiden vedenpidätyskykyyn (pF-käyrä), lisätyn hiilen pysyvyyteen maassa (maahengityskoe) sekä maan helpoliukoisen typen määrään (mineralisaatiokoe). Osassa koesarjoista oli kui-

tujen lisäksi mukana myös muita lisäysmateriaaleja. Koeosiot suunniteltiin siten, että koko hankeajan kestävä kenttäkoe perustettiin heti hankkeen alussa ja laboratoriokoesarjat painottuivat hankkeen toiselle toteuttamisvuodelle.

Tässä raportissa kuitulietteilistä ja nollakuidusta käytetään yhteisnimitystä maanparannuskuidut, ja niiden osalta on esitetty lyhyesti esimerkkituloksia. Kenttäkokeelta peräisin olevia tuloksia on esitelty alustavasti Termonen ym. (2022) Maataloustieteen Päivien julkaisussa, ja niistä tullaan laatimaan myös kattava tieteellinen julkaisu. Laboratoriokoesarjojen maanparannuskuituihin liittyvät tulokset on kuvattu yksityiskohtaisesti julkaisussa Rätty ym. (2023).

## 4.2 Kenttäkokeen toteuttaminen

Kenttäkokeen koeasetelmana käytettiin lohkoittain satunnaistettua koetta neljänä kerranteena. Koealueella muokkauskerroksen (0–20 cm) maalaji oli multava karkea hieta, jonka pH (H<sub>2</sub>O) oli keskimäärin 6,0, kokonaishiilen pitoisuus 1,8 % ja kokonaistypen pitoisuus 0,13 %. Alkutilanteen maanäytteissä keskimääräinen fosforiluku (14 mg P/l maata) oli viljavuusluokassa tyydyttävä, kun ne olivat kaliumin (77 mg K/l maata), rikin (7,4 mg S/l maata), kalsiumin (1140 mg Ca/l maata) ja magnesiumin (95 mg Mg/l maata) osalta välttävissä luokassa. Keskimääräiset ravinnereservit olivat P:n, K:n ja Mg:n osalta viljavuusluokassa hyvä. Kenttäkokeessa oli mukana kaksi ravinnepitoista maanparannuskuitua. Toinen kuiduista oli tyypinimeltään kalkkistabiloitu puhdistamoliete (kalkkikuitu Kuopio; Fortum Waste Solution Oy; levitysmäärä 28 tuore-t/ha), kun taas toinen kuiduista oli stabiloimaton ja tuotteistamaton (Stora Enso Oyj, Varkaus; levitysmäärä 21 tuore-t/ha). Ennakkotietojen perusteella levitysmäärät pyrittiin rajaamaan siten, että keskimääräinen kadmiumin enimmäiskuormitus ei ylittyisi ja hiilimäärät (keskimäärin n. 3100 kg C/ha) olisivat koejäsenten kesken vertailukelpoisia. Levitetyt kuidut sisälsivät kokonaistyyppiä n. 146 kg/ha, liukoista tyyppiä n. 15 kg/ha, kokonaisfosforia n. 26 kg/ha, kaliumia n. 10 kg/ha. Rikin levitysmäärä oli Fortumin kuidun yhteydessä n. 22 kg S/ha ja Stora Enson kuidun n. 97 kg S/ha. Kenttäkokeen toimenpiteet on kuvattu tarkemmin Termonen ym. (2022) julkaisussa.

Molemmilla kuiduilla oli mukana mineraalityypen lannoitustasot 40 ja 80 kg N/ha. Kokeessa hyödynnettiin myös vertailukoejäsenenä toimineita mineraalityppiportaita (0, 40, 80, 120 kg N/ha). Typen lannoitustasot säilytettiin samoina koko kokeen ajan. Mineraalityppiportaat ja kuitukoejäsenet saivat vuosina 2021–2022 myös riittävän fosfori- ja kaliumlannoituksen mineraalilannoitteina. Kuitulevitykset tehtiin kertaluonteisesti alkukesällä 2020, jonka jälkeen levitettiin mineraalilannoitteet ja koealue äestettiin n. 7 cm:n syvyyteen. Seuraavana päivänä kylvettiin timotei-nurminatanurmi suojaviljan kanssa. Vuonna 2020 koekasvina oli ohra ja kuitulevitysten jälkivaikutusten seuranta vuosina 2021 ja 2022 koekasvina oli nurmi. Suojavilja korjattiin puimalla, ja sen yhteydessä määritettiin ruutusato sekä otettiin jyvänäytteet analyysyjä varten (vilja-analyysi, suppea kivennäisanalyysi, S:n pitoisuudet ja valikoituilta koejäseniltä Cd:n pitoisuudet). Nurmelta korjattiin kaksi satoa kasvukauden aikana, ja niiden yhteydessä määritettiin ruutusadot (kuiva-ainesato)

sekä otettiin analyysinäytteet (säilörehun raaka-aineanalyysi, laaja kivennäisanalyysi ja S:n pitoisuudet). Syksyisin jokaiselta käsittelyruudulta otettiin seurantaluntuotteet maanäytteet perusanalyyseihiin (viljavuusanalyysi, hiili- ja typpianalyysit, liukoinen epäorgaaninen tyyppi) sekä valikoiduilta koejäseniltä viipaloidut kairanäytteet irtotiheysmäärittämiä sekä hiili- ja typpianalyysijä varten. Syksyllä 2020 valikoiduilta koejäseniltä otettiin pintamaakerroksesta häiriintymättömiä sylinterinäytteitä, joista määritettiin maan vedenpidätyskyky ja kyllästetyn maan vedenjohtavuus. Syksyllä 2020 kenttäkokeelta nostettiin maamonoliitit (halkaisija 15 cm x korkeus 40 cm), joilla toteutettiin SIMU-olosuhdekammiossa läpivaluntakoe kevätvaluntaolosuhteissa (päivä: +10 °C, yö: -3 °C). Kenttäkapasiteettiin kostutettuja maamonoliitteja sadettiin 4 peräkkäisenä päivänä 25 mm/vrk, ja maan läpi suotautunut vesimäärä mitattiin (keskimäärin 81 mm). Vesinäytteistä määritettiin ravinteiden (P- ja N-jakeet, S, K, Ca, Mg), liukoisen orgaanisen hiilen ja kiintoaineksen pitoisuudet.

### 4.3 Laboratoriokoesarjojen toteuttaminen

Lisäysmateriaalien vaikutusta karkeiden maiden vedenpidätysominaisuuksiin tarkasteltiin laboratoriossa pakattujen sylinterinäytteiden avulla, joissa käytettiin 1-2 maalajiltaan karkeaa hietaa olevaa peltomaata (toinen maa oli peräisin kenttäkoealueelta). Lisäysmateriaaleina oli kahden kenttäkokeella käytetyn maanparannuskuidun (Fortum, Stora Enso) lisäksi myös Soilfood Oy:n nollakuitu, neljä erilaista UEF:n tuottamaa biohiiltä (koivun kuori, kuusen kuori, sipulinkuori, Stora Enson kuitu), Luken biohiili (paju) sekä Gasum Oy:n kuiva-ainepitoinen jae. Lisäysmateriaalit sekoitettiin maahan neljänä rinnakkaisena 10 tilavuus-%:n lisäystasyöillä ja kuiduilla oli mukana myös 20 tilavuus-%:n lisäystasyöt. Pakatuille sylinterinäytteille määritettiin vedenpidätyskäyrät eli ns. pF-käyrät. Määrittämissä oli mukana 13 eri pF-pistettä (0; 0,4; 1,5; 1,8; 2,0; 2,1; 2,3; 2,5; 2,8; 3,0; 3,5; 4,2; 5,6), ja siinä hyödynnettiin hiekkapeti-, painekattila- ja suhteellisen kosteuden menetelmiä. Vedenpidätyskäyrän avulla saadaan tietoa maan kyvystä pidättää vettä, ja se esittää maan vesipitoisuuden (tilavuus-%) ja maaveden painepotentiaalin välistä riippuvuutta. Tasapainotusten jälkeen vesipitoisuudet määritettiin gravimetrisesti näytesylinterit punnitsemalla (pF-pistekohtaiset tasapainotusajat vaihtelivat kolmesta päivästä kolmeen viikkoon), ja samalla sylintereistä mitattiin horisontaalisesti ja vertikaalisesti tapahtunutta näytteen kutistumista.

Typen mineralisaatiokokeessa ja maahengityskokeessa lisäysmateriaalit (kuidut: Fortum, Stora Enso, nollakuitu sekä Gasumin kuiva-ainepitoinen jae) sekoitettiin kenttäkoealueelta peräisin olevaan maahan kolmena rinnakkaisena purkukerta ja -koekohtaisesti. Fortunin ja Stora Enson kuidut sekoitettiin maahan 10 tilavuus-%:n lisäystasyöillä ilman typpilisää sekä typpilisän (100 mg N/kg maata ka) kanssa, jotta typen saatavuus ei rajoittaisi orgaanisen aineksen hajoamista koejakson aikana. Koska nollakuidulla oli huomattavan suuri C:N-suhde (926), sen kanssa käytettiin kahta eri typpilisäystasyötä (200 ja 400 mg N/kg maata ka). Gasumin kuiva-ainepitoinen jae sekoitettiin maahan typpisältöpohjaisesti (200 mg kok-N/kg maata ka). Seoksia inkuboitiin vakiokos-

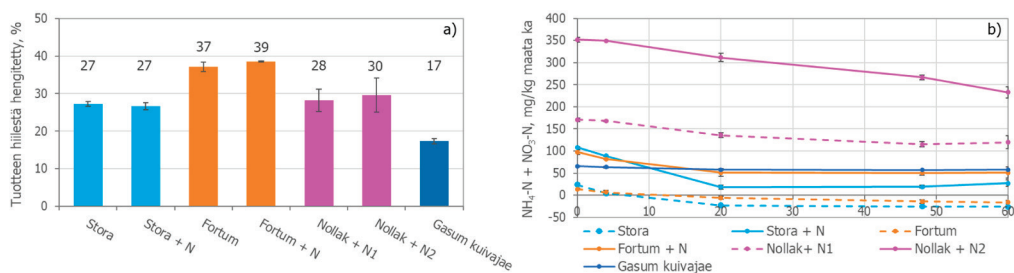
teudessa ja -lämpötilassa. Typpikoe toteutettiin avonaisissa astioissa ja siinä oli mukana 5 eri purkukertaa (0, 4, 20, 48 ja 60 vrk), jonka jälkeen näytteet pakastettiin. Tämän jälkeen näytteistä määritettiin helppoliukoisen mineraalitypen ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ) pitoisuudet KCl-uutolla. Maahengityskoe toteutettiin suljetuissa ilmatiiviissä inkubointiastioissa, joihin laitettiin näytteiden lisäksi NaOH-liuospullot maaperämikrobien hengityksessä syntyvän  $\text{CO}_2$ :n keräämiseksi. Muodostuneen  $\text{CO}_2$ :n määrä selvitettiin titraamalla (HCl) (1, 3, 7, 11, 15, 31 ja 63 vrk).

#### 4.4 Nostoja laboratoriokoeosion tuloksista

Kenttäkokeen rinnalla toteutettujen laboratoriokoesarjojen avulla tuotettiin lisätietoa maanparannuskuitujen vaikutuksista karkeiden peltomaiden ominaisuuksiin sekä tarkasteltiin kuitujen lisäksi myös muita orgaanisia lisäysmateriaaleja. Lisäysmateriaalien sisältämän orgaanisen aineksen potentiaalista hajoamista arvioitiin maahengityskokeen avulla, joka toteutettiin mikrobitoiminnalle optimaalisissa laboratorio-olosuhteissa. Erilaisilla lisäysmateriaaleilla ja niiden laadulla oli vaikutusta orgaanisen aineksen hajoamisen seurauksena muodostuvan  $\text{CO}_2$ :n tuottoon ja sen vapautumisen dynamiikkaan. Fortumin ja Stora Enson kuiduilla  $\text{CO}_2$ :n keskimääräiset vuorokausikohtaiset emissiohuiput esiintyivät ensimmäisen inkubointiviikon aikana (1-3 ja 3-7 vrk Fortum ja 3-7 ja 7-11 vrk Stora Enso), kun taas nollakuiduilla huiput esiintyivät hieman myöhemmin toisella inkubointiviikolla (7-11 ja 11-15 vrk). Gausumin kuiva-ainepitoisella jakeella helposti hajoava orgaaninen aines tuotti  $\text{CO}_2$ -huipun aivan inkubaatiojakson alussa (0-1 vrk), mutta se jäi suhteellisesti muita selvästi pienemmäksi. Tyypillisä tehosti Fortumin ja Stora Enson kuitujen labiilin orgaanisen aineksen hajoamista ja lisäsi  $\text{CO}_2$ -tuottoa inkubaation alkuvaiheessa, mutta nopeamman hajoamisvaiheen jälkeen hajoaminen hidastui, eikä sillä ollut vaikutusta  $\text{CO}_2$ :n kokonaistuottoon. Kuitujen mukana lisätystä hiilimäärästä vapautui koejakson aikana noin 27-39 % ja kuiva-ainepitoisen jakeen mukana lisätystä hiilimäärästä noin 17 %. Kuiva-ainepitoinen jae osoittautui siten lisäysmateriaaleista pysyvimmäksi (Kuva 1a).

Typen mineralisaatiokokeen tulosten perusteella kuitukoejäsenillä helppoliukoisen mineraalitypen ( $\text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$ ) pitoisuudet laskivat inkubointijakson aikana (Kuva 1b). Vastaavaa immobilisaatiotrendiä ei ollut havaittavissa Gausumin kuiva-ainepitoisella jakeella, ja kuivajaetta sekoitettaessa maahan oli kokonaisimmobilisaation %-osuus lisätystä mineraalitypestä selvästi pienin. Hajotusta kiihdyttänyt lisätyppi lisäsi typen immobilisaatiota kiivaan hajoatusjakson aikana (0-20 vrk), mutta hajotuksen hidastuttua (15-63 vrk) myös typenkulutus väheni ja Stora Enson kuitulisällä havaittiin jopa viitteitä typen vapautumisesta (mineralisaatio). Lisätyppi vaikutti lisäävän kokonaisimmobilisaatiota, mutta tilastollisesti merkitsevä ero typpitasojen välillä havaittiin vain nollakuidulla, jolla käytetty suuri tyypillisä osoittautui liioitelluksi. Kokeen aikainen maanparannuskuitujen aikaansaama nettoimmobilisaatio vastasi noin 5-10 mg mineraalityppeä lisättyä hiiligrammaa kohti.

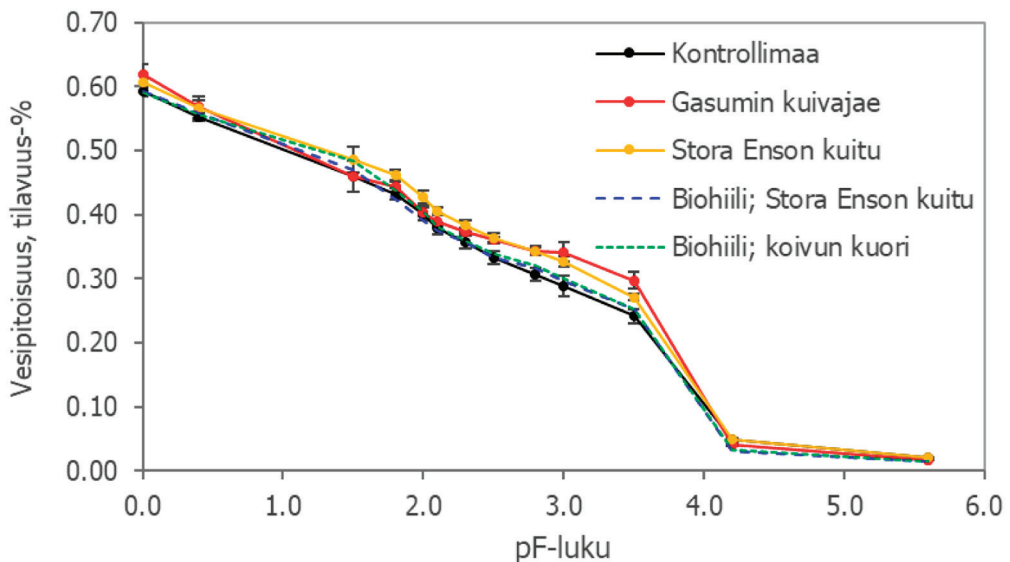




**Kuva 1a.** Materiaaleissa lisätyn orgaanisen aineksen mineraloituvuus, kun maanparannuskuituja (Fortum Waste Solution Oy, Stora Enso Oyj, nollakuitu; Soilfood Oy) ja Gasum Oy:n kuiva-ainepitoista jaeetta on sekoitettu kenttäkoemaahan. Koejakson aikana mikrobin hajotustoiminnan seurauksena näytteistä CO<sub>2</sub>:na vapautunut hiili on esitetty %-osuutena materiaaleissa lisätystä hielestä (%; keskiarvo ± keskihajonta, n = 3). **Kuva 1b.** Epäorgaanisen typen pitoisuudet (NH<sub>4</sub>-N + NO<sub>3</sub>-N, mg/ka maata ka; keskiarvo ± keskihajonta, n = 3) analyysihetkillä 0, 4, 20, 48 ja 60 vrk. Maanparannuskuidut on sekoitettu maahan 10 tilavuus-%:n lisäystasoilla ilman tyypillisää ja tyypillisän kanssa, kun taas kuiva-ainepitoinen jae on lisätty kokonaistypen mukaan (200 mg N/kg maata ka). Tämän takia lisätyissä hiilimäärissä ja liukoisen mineraalityypen pitoisuuksissa on käsittelyiden välillä eroja. Lisätyissä kuiva-ainemäärässä oli hiiltä ja mineraalityppeä (lisäystyyppi esitetty suluissa): Stora Enson kuitu: 7,4 g C/kg ja 32 mg Min-N/kg (+100 mg Min-N/kg), Fortumin kuitu: 7,8 g C/kg ja 13 mg Min-N/kg (+100 mg Min-N/kg), nollakuitu: 5,7 g C/kg (+200 ja 400 mg Min-N/kg) ja Gasumin kuiva-ainepitoinen jae: 1,4 g C/kg ja 42 mg Min-N/kg. Kontrollikäsitteilyinä olevan maa-aineksen (ei sisällä lisätyjä materiaaleja) mittaustulokset on vähennetty lisäysmateriaalien ja maan seoksista saaduista tuloksista tuotteiden vaikutuksen erottamiseksi.

Laboratoriossa pakattujen sylinterinäytteiden avulla tarkasteltiin, voidaan-ko erilaisten orgaanisten lisäysmateriaalien avulla parantaa karkeiden peltomaiden vedenpidätysominaisuuksia, etenkin hyötykapasiteettia. Hyötykapasiteetti kuvastaa kasvien käytettävissä olevaa vesimäärää, joka saadaan laskennallisesti kenttäkapasiteetin (pF 2) ja lakastumisrajan (pF 4,2) vesipitoisuuksien erotuksena. Kuvassa 2 on esitetty tulosnostoina Gasumin kuiva-ainepitoiselle jakeelle, Stora Enson kuidulle ja kahdelle erilaiselle biohiillelle (lähtömateriaaleina koivun kuori ja Storan Enson kuitu) määritetyt vedenpidätyskäyrät, kun lisäysmateriaalit oli sekoitettu kenttäkoemaahan 10 tilavuus-% lisäystasoilla. Kaikille maa-biohiiliseoksille määritetyt vedenpidätyskäyrät olivat varsin samankaltaisia ja lähellä kontrollimaiden käyriä, eikä tässä tutkimuksessa käytetyillä koemailloilla (2 erilaista KHt-maata) ja biohiilillä (5 erilaista biohiiltä) sekä niiden lisäystasolla ollut saavutettavissa parannusta karkeiden kivennäismaiden vedenpidätysominaisuuksiin. Tulokset biohiilien vaikutuksista maan fysikaalisiin ominaisuuksiin, etenkin maan vedenpidätysominaisuuksiin, ovat osin ristiriitaisia, ja riippuvat biohiilen lähtömateriaalista, tuotantoprosessista ja levitysmäärästä sekä maaperäominaisuuksista ja ympäristöolosuhteista (Mukherjee ja Lal 2013). Turusen ym. (2021) pakatuilla sylinterinäytteillä toteuttamassa tutkimuksessa jätevesilietepohjaisella biohiililisäyksellä (10 tilavuus-%) ei ollut vaikutusta hienojakoisen ja karkean kivennäismaan hyötykapasiteettiin. Vastaavalla tavalla toteutetussa tutkimuksessa Rasa ym. (2018) puolestaan havaitsivat, että pajupohjaisen biohiilen lisäys (5 massa-%) paransi 17–32 % aitosavimaan hyötykapasiteettia. Biohiilen katsottiin lisäävän maan huokoisuutta suorien vaikutusten kautta (biohiilen oma huokoisuus), mutta myös vaikuttamalla maan tekstuuriin ja struktuurin määräämään huokoisuuteen (välilliset vaikutukset).

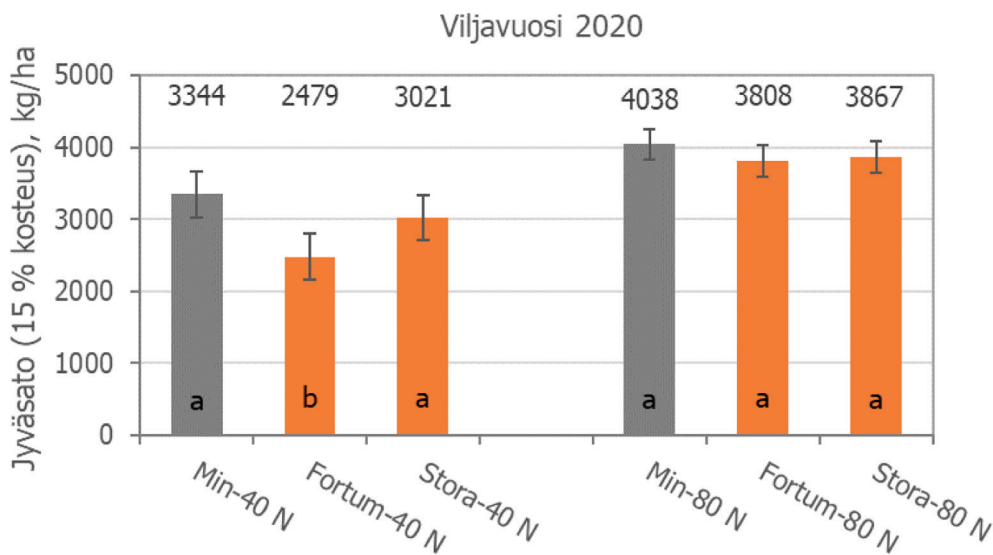
Tulosten perusteella kuiva-ainepitoisen jakeen (10 tilavuus-%) lisääminen karkeaan hietamaahan ei heijastunut laskennalliseen hyötykapasiteettiin, mutta lisäsi etenkin kasveille käyttökelpoisen veden alueella olevien keskiuurten huokosten osuutta ja siten niiden vedenpidätyskykyä (Kuva 2). Maanparannuskuidut (10 ja 20 tilavuus-% lisäysoaste) lisäsivät pääsääntöisesti maan kokonaishuokoisuutta sekä suurten (>30 µm) ja keskiuurten 30-0,2 µm) huokosten osuutta. Kuitulisäykset lisäsivät maan kykyä varastoida vettä kenttäkapasiteetissa keskimäärin noin 10-30 %, kun taas lakastumisrajaa vastaavassa vesipitoisuudessa muutokset olivat vähäisempiä. Yhtä poikkeusta lukuun ottamatta maanparannuskuitujen avulla saavutettiin keskimäärin 7-33 %:n kasvu maan hyötykapasiteetissa, joka riippui kuitutyypistä ja niiden lisäysoasteista. Erilaisten kuitulisäysten vaikutus sylinterin korkeutta vastaavan maakerroksen laskennalliseen vesivarastoon oli keskimäärin 1,9-3,3 mm ja suurimmillaan noin 5,5 mm. Vaikka pakatuille sylinterinäytteille määritetyt vedenpidätyskäyrät voivatkin poiketa häiriintymättömille näytteille määritetyistä käyristä (Salter ja Williams 1965), tulokset osoittavat, että maanparannuskuiduilla ja kuiva-ainepitoisella jakeella on potentiaalia parantaa maan kykyä varastoida kasveille saatavilla olevaa vettä. Maanparannuskuitujen osalta eri laboratoriokoesarjojen tulokset on kuvattu tarkemmin julkaisussa Rätty ym. (2023).



**Kuva 2.** Lisäysmateriaalien vaikutus karkeaan peltomaan vedenpidätyskykyyn kuvattuna vedenpidätyskäyrän (pF-käyrä) avulla, josta saadaan tietoa myös maan huokoskokojakaumasta. Vesipitoisuus on esitetty y-akselilla tilavuusprosenttina (keskiarvo ± keskihajonta, n = 4) ja x-akselilla painepotentiaali, joka on ilmaistu pF-lukuna. Vedenpidätyskäyrä on määritetty pakatuista sylinterinäytteistä (tilavuus n. 195 cm<sup>3</sup>), kun lisäysmateriaaleja on sekoitettu kenttäkoelueelta peräisin olevaan maahan (Kht) neljänä rinnakkaisena 10 tilavuus-% lisäysoasteilla. Esimerkkikuvassa lisäysmateriaaleina on käytetty Gasumin kuiva-ainepitoista jakeita, Stora Enson kuitua ja kahta erilaista biohiiltä, joiden lähtömateriaaleina on ollut Stora Enson kuitu ja koivun kuori.

## 4.5 Nostaja kenttäkoeosion tuloksista

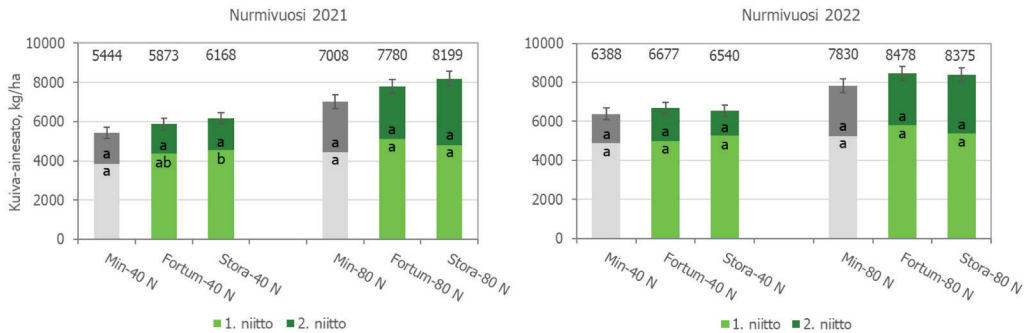
Kenttäkokeen perustamisvuonna puimalla korjatun ohran jyväsato (15 %:n kosteus) oli korkeammalla typpilannoitustasolla (80 kg N/ha) keskimäärin 3905 kg/ha, eivätkä kuitukoejäsenet poikenneet tilastollisesti merkitsevästi vastaavasta mineraalityppikoejäsenestä (Kuva 3). Typen immobilisaation takia kuitukoejäsenien sadot olivat 40 kg N/ha-lisäystasolla keskimäärin 595 kg/ha pienemmät kuin vastaavan liukoisen väkilannoitetyypin antamat sadot, ja Fortumin kuidun kohdalla sadonalenema oli tilastollisesti merkitsevä. Tässä tutkimuksessa kuitulevitykset tapahtuivat käytännön syistä samassa yhteydessä, kun nurmi perustettiin suojaviljaan. Kenttäkokeiden tulosten perusteella typpilisäyksellä voidaan kompensoida immobilisaatiota turvaten kasvin riittävä typensaanti ja ehkäisten typenpuutteesta aiheutuvaa sadonalenemaa. Maanparannuskuitujen levitys olikin mahdollista kylvön yhteydessä ilman merkitsevää sadonmenetystä, kun kuitujen liukoinen tyyppi täydennettiin riittäväällä mineraalityppitäydennyksellä. Kuitulevitysten ja kylvön väliin suositellaan yleisesti vähintään kahden viikon varoaikaa (Ajosenpää ym. 2021).



**Kuva 3.** Ohran jyväsato 15 %:n kosteudessa kokeen perustamisvuonna 2020 (kg/ha; keskiarvo ± keskivirhe, n = 4). Vasemmanpuoleiset kolme pylvästä edustavat mineraalityppitasoa 40 kg N/ha ja oikeanpuoleiset kolme pylvästä tasoa 80 kg N/ha. Maanparannuskuidut: Fortum Waste Solution Oy ja Stora Enso Oyj. Mineraalityppiportaatta 40 ja 80 kg N/ha (harmaat pylväät). Eri kirjaimilla merkityt sadot eroavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi mineraalityppitason sisällä ( $p < 0,05$ ).

Vuosina 2021 ja 2022 tarkasteltiin kuitulevitysten jälkivaikutuksia, kun nurmisato korjattiin kaksi kertaa kasvukaudessa. Vuonna 2021 kuitukoejäsenien kasvukauden keskimääräiset kokonaiskuiva-ainesadot olivat 40 kg N/ha-lisäystasolla 577 kg/ha ja 80 kg N/ha-lisäystasolla 982 kg/ha suuremmat kuin vastaavan liukoisen väkilannoitetyypin antamat sadot (Kuva 4). Matalammalla typpitasolla maanparannuskuitujen tuottama satohyöty oli suurempi 1. sadossa, jossa Stora Enson kuitu tuotti tilastollisesti merkitsevästi suuremman sa-

don. Myös nurmen toisena satovuotena kuitukoejäsenet tuottivat satohyötyä, joka oli kokonaiskuiva-ainesadon osalta 40 kg/ha-typpitasolla keskimäärin 221 kg/ha ja vastaavasti 80 kg/ha-typpitasolla keskimäärin 597 kg/ha. Korkeammalla typpitasolla Fortumin kuitu tuotti 1. sadossa suuremman satohyödyn kuin 2. sadossa, kun taas Stora Enson kuidulla tilanne oli satohyödyn osalta päinvastainen, mutta sadot eivät poikenneet toisistaan tilastollisesti merkitsevästi. Kuitujen tuottama sadonlisä on selitettävissä kuitujen sisältämän tyypin mineralisoitumisella, jolloin niiden sisältämää orgaanista typpeä vapautuu mineraalimuotoon ja kasvien käyttöön, sekä mahdollisesti myös kuitulevitysten tuottamalla muilla positiivisilla maanparannusvaikutuksilla.



**Kuva 4.** Nurmen kuiva-ainesato kuitulevitysten jälkiseurantavuosina 2021 ja 2022 (kg/ha; keskiarvot on esitetty 1. ja 2. niiton sadoille ± keskivirhe on esitetty kokonaissadolle, n = 4). Vasemmanpuoleiset kolme pylvästä edustavat mineraalityppitasoa 40 kg N/ha ja oikeanpuoleiset kolme pylvästä tasoa 80 kg N/ha. Maanparannuskuidut: Fortum Waste Solution Oy ja Stora Enso Oyj. Mineraalityppiportaavat 40 ja 80 kg N/ha (harmaat pylväät). Eri kirjaimilla merkityt sadot eroavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi niiton ja mineraalityppitason sisällä (p < 0,05).

Käsittelyvuoden syksyllä koeruuduilta nostetuilla maamonoliiteilla toteutussa sadetuskokeessa tarkasteltiin kuitulevitysten vaikutuksia valumaveden laatuun. Maanparannuskuiduilla ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta maapatsaan läpi suotautuneen valumaveden kiintoaineksen, kokonaisfosforin, liuenneena olevan fosforin ja liukoisen orgaanisen hiilen pitoisuuksiin (Taulukko 1), eikä myöskään kaliumin tai kalsiumin pitoisuuksiin, kun käsittelyjä verrattiin saman typpitason sisällä. Luke Jokioisilla toteutetuissa sade-simulaatiokokeissa maanparannuskuidut ovat leikanneet savimaalta nostettujen maamonoliittien läpivaluntaveden kiintoainespitoisuuksia jopa 60 % levitysvuotena, ja kiintoaineksen ja kokonaisfosforin pitoisuuksia vielä yli 25 %:lla neljäntenä vuonna levitysten jälkeen (Rasa ym. 2021). Jokioisen kuitukokeissa kuiduilla havaittiin suotuisa vaikutus myös peltomaan mikrobikoostumukseen, ja aktiivisen mikrobitoiminnan tuottamat sidosaineet paransivat mururakenteen kestävyttä ja vähensivät eroosioherkkyyttä. Maaningan osalta tulosta selittänee erilainen maalaji Jokioisiin verrattuna. Karkeilla kivennäismailla eroosio on lähtökohtaisesti pienempi ja oikovirtausten merkitys vähäisempi. Lisäksi pohjamaassa voi olla runsaasti alumiini- ja rautaoksideja, joihin fosfori sitoutuu tehokkaasti. Karkeilla peltomailla vesiensuojellisuuden hyöty olisi mahdollisesti saavutettavissa siten, että maanparannuskuitujen vaikutus heijastuu maan parantuneen kasvukunnon ja vesitalouden kautta kasvien sadontuottokykyyn, mikä taas parantaisi ravinteiden hyväksikäyttöä ja pienentäisi ravinteiden huuhtoutumisen riskiä.

Syksyllä 2020 otetuissa maanäytteissä maanparannuskuidut nostivat trendinomaisesti muokkauskerroksen nitraattitypen pitoisuuksia etenkin korkeammalla mineraalityypen täydennystasolla. Vaikutus näkyi voimakkaammin muokkauskerroksen alapuolella (20–40 cm), jossa nitraattitypen pitoisuus oli suurempi Fortumin kuitukäsittelyssä kuin muilla koejäsenillä. Tämä heijastui myös maamonoliittien läpivaluntaveden pitoisuuksiin, ja Fortumin kuitu lisäsi läpivaluntaveden nitraattipitoisuuksia ja siten myös kokonaistypen pitoisuuksia (Taulukko 1). Stora Enson kuidun mukana levitettävä rikkimäärä oli selvästi muita koejäseniä suurempi, mutta se ei heijastunut ohran jyvien tai nurmen rikkipitoisuuksiin. Molemmat kuidut nostivat muokkauskerroksen helppoliukoisen rikin pitoisuuksia, ja Stora Enson kuidun kohdalla vaikutus näkyi myös muokkauskerroksen alapuolisessa kerroksessa muita korkeampina pitoisuuksina. Nitraatin ohella sulfaatin pidättyminen maahiukkasiin on heikkoa, ja siten se huuhtoutuu helposti etenkin karkeiden ja hyvin vettä läpäisevien kivennäispeltojen maaprofiilissa alaspäin (Keskinen ym. 2022). Korkeimmat rikkipitoisuudet löytyivätkin Stora Enson monoliittivesistä, ja ero Fortumin kuitukoejäseneen ja vastaavaan mineraalityypikoejäseneen oli tilastollisesti merkitsevä. Huuhtoutuva sulfaatti saattaa edistää sedimenttiin sitoutuneen fosforin vapautumista takaisin veteen ja siten kiihdyttää sisäistä kuormitusta, minkä takia kipsin levitystä vesiensuojelutoimenpiteenä ei suositella järvien valuma-alueilla. Maanparannuskuitujen mukana peltohehtaarille lisätty rikkimäärä oli suurimmillaankin selvästi pienempi kuin mitä tyypillisesti lisätään kipsin mukana (Ekholm ym. 2022; noin 640 kg S/ha). Valtakunnallisessa seurantatutkimuksessa on toisaalta havaittu, että Pohjois-Suomea lukuun ottamatta orgaanisten ja kivennäispeltojen helppoliukoisen rikin pitoisuudet ovat kääntyneet selvään laskuun vuoden 1998 jälkeen. Peltomaiden rikkitaaset ovat yleisesti laskeneet lähelle nollaa tai negatiivisiksi rikkilaskeuman ja väkilannoitteiden käyttömäärien pienentymisen myötä (Keskinen ym. 2016). Siten maanparannuskuidut voivat toimia myös rikkilannoitteena. Maanparannuskuiduilla voi olla myös kalkitusvaikutusta. Tässä tutkimuksessa Fortumin kalkkistabiloitu kuitu nosti tilastollisesti merkitsevästi muokkauskerroksen pH:ta (0,5 pH-yksikköä), ja tämä positiivinen vaikutus maan pH-arvoon oli nähtävissä myös seurantavuosina.

**Taulukko 1.** Kenttäkokeelta nostettujen maamonoliittien läpi suotautuneen valumaveden kokonaisfosforin (Kok-P), liuenneen fosforin (Liuk-P), kokonaistypen (Kok-N), nitraattitypen (NO<sub>3</sub>-N), rikin (S), liukoisen orgaanisen hiilen (DOC) ja kiintoaineksen (TSS) keskimääräiset pitoisuudet (mg/l, n = 4). Eri kirjaimilla merkityt pitoisuudet eroavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi saman mineraalityypitason sisällä (p < 0,05). SEM = keskiarvon keskivirhe.

Koekäsittely	Kok-P	Liuk-P	Kok-N	NO <sub>3</sub> -N mg/l	S	DOC	TSS
Min-40 N	0,09	0,02	11,5 <sup>a</sup>	10,6 <sup>a</sup>	2,8 <sup>a</sup>	8,5	16
Fortum-40 N	0,09	0,02	13,8 <sup>a</sup>	12,8 <sup>a</sup>	3,6 <sup>a</sup>	8,7	3
Stora-40 N	0,10	0,03	12,8 <sup>a</sup>	11,8 <sup>a</sup>	11,3 <sup>b</sup>	7,8	40
Min-80 N	0,11	0,03	10,0 <sup>a</sup>	8,9 <sup>a</sup>	2,4 <sup>a</sup>	7,9	159
Fortum-80 N	0,10	0,05	27,0 <sup>b</sup>	24,5 <sup>b</sup>	4,3 <sup>a</sup>	9,2	13
Stora-80 N	0,06	0,03	15,6 <sup>a</sup>	14,3 <sup>a</sup>	16,5 <sup>b</sup>	8,5	12
Keskiarvo	0,09	0,03	15,1	13,8	6,8	8,4	41
SEM	0,023	0,013	2,84	2,58		1,05	54
P arvo	0,82	0,38	0,02	0,02	0,01	0,72	0,19

Vaikka suomalaisissa peltomaissa orgaanisen kokonaishiilen pitoisuudet ovat verrattain korkeat Euroopan mittakaavassa tarkasteltuina (Aksoy ym. 2016), ovat peltomaiden hiilivarastot meilläkin laskusuuntaisia. Pitkäaikaisseurannoissa vuosittaisen hävikin on havaittu olevan kivennäismaiden pintakerroksessa keskimäärin 0,4 %, mikä vastaa noin 220 kg C/ha/v (Heikkinen ym. 2013). Kenttäkokeen perustamisvaiheessa kuitulevitysten yhteydessä kertaluonteisesti lisätty hiilimäärä oli keskimäärin 3100 kg/ha, mikä vastasi karkeasti jopa 7 % muokkauskerroksen hiilivarastosta. Syksyllä 2020 otetuissa seurantanäytteissä kuitulevitykset nostivatkin muokkauskerroksen kokonaishiilen pitoisuutta tilastollisesti merkitsevästi korkeammalla typen lisäystasolla vastaavaan 80 kg N/ha -mineraalityypikoejäseneseen verrattuna, ja trendinomaisesti myös matalammalla 40 kg N/ha -lisäystasolla (C-lisäys noin 0,2-0,3 % yksikköä). Jälkivaikutusten seurantavuosina oli vielä havaittavissa trendinomainen hiililisäys etenkin Stora Enson kuitukoejäsenten kohdalla. Tämä oli selvemmin havaittavissa korkeammalta typpitasolta otettujen viipaloitujen kairanäytteiden ylimmässä 0-10 cm:n maakerroksessa, johon kuitulisäykset oli sekoitettu perustamisvaiheessa äestämällä. Samaan tapaan Rasa ym. (2021) raportoivat Luke Jokioisen kenttäkokeelta, jossa maanparannuskuitujen mukana lisätystä suurehkosta hiilimäärästä huolimatta (keskimäärin 8400 kg C/ha) savimaan hiilipitoisuuksissa oli havaittavissa enää pieni lisäys (0,02-0,18 C-%) neljän vuoden kuluttua lisäyksestä.

Yksittäisillä käsittelyillä aikaansaadut muutokset peltomaiden hiilipitoisuuksissa ovat yleensä varsin pieniä, ja hiilivarastossa tapahtuvat muutokset hyvin hitaita (Kätterer ym. 2011), minkä takia maan hiilivarastojen ylläpito/kasvattaminen vaatii pitkäjänteistä työtä. Lisäksi hiilivarastojen pienet muutokset ovat maanäytteillä vaikeasti todennettavissa, ja maanäytteisiin perustuva muutosten luotettava arviointi vaatii huomattavan suuren näytemäärän (Heikkinen ym. 2021a). Maanparannuskuitujen kertalevityksellä on mahdollista lisätä peltomaahan suurehko hiilimäärä verrattuna esimerkiksi naudan lietelantaan (35 t/ha levityksessä 945 kg C/ha; Luke Maaningan koeaineisto), ja kompensoida vuotuista hajotustoiminnan hiilihävikkiä, mutta lisäysmäärä ei välttämättä näy maan hiilivarastossa pitkäaikaisesti. Orgaanisten lisäysmateriaalien hiilen pysyvyys maassa riippuu materiaalin kemiallisen laadun lisäksi myös ilmasto- ja maaperätekijöistä sekä viljelymenetelmistä. Lisätystä orgaanisesta aineksestä voi hajota huomattava osa lyhyellä aikavälillä (nopeammin hajoava labiili aines), ja vain osa alkuperäisestä lisäysmäärästä muodostaa hitaammin hajoavan hiilisyötteen (hitaammin hajoava stabiili aines). Heikkinen ym. (2021b) tarkastelivat laboratoriokokeiden ja mallinnuksen avulla erilaisten orgaanisten materiaalien sisältämän hiilen pysyvyyttä maassa. Tulosten perusteella maanparannuskuitujen hiili oli hitaammin hajoavaa verrattuna tuoreeseen maanpäälliseen kasviainekseen, ja kärkepussikokeessa kompostoidun kuitumateriaalin orgaanisesta aineksestä oli vuoden jälkeen jäljellä 47 %. Kuitulietteiden orgaaninen aines hajoaa kahdessa vaiheessa, jossa lyhyellä aikavälillä (muutama kuukausi) tapahtuvaa nopean hajoamisen vaihetta seuraa pidemmällä aikavälillä tapahtuva hitaamman hajotuksen vaihe (Fierro ym. 2000). Tässä tutkimuksessa hajotustoiminnan seurauksena erilaisten kuitujen hiilestä poistui CO<sub>2</sub>:na keskimäärin noin 30 % kahden kuukauden laboratorioinkuboinnin aikana. Stora Enson kuidun hiili osoittautui hitaammin hajoa-

vaksi Fortumin kuituun verrattuna, mikä tukee myös kenttäkokeelta peräisin olevista maanäytteistä tehtyjä havaintoja. Koska maanparannuskuitujen haajoaminen on verrattain nopeaa aktiivisen mikrobitoiminnan seurauksena, olisi levityksiä uusittava suotuisten maanparannusvaikutusten ylläpitämiseksi (Foley ja Cooperband 2002).

## 4.6 Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin kahden erilaisen metsäteollisuudesta peräisin olevan kuitulietteen käyttöä maanparannusaineena karkeilla kivennäispeleloilla. Luonnonvarakeskus (Luke) Maaningalle perustettiin kolmivuotinen, lohkoittain satunnaistettu ja neljänä kerranteena toteutettu kenttäkoe kuitulietteiden sato-, hiilisyöte- ja maanparannusvaikutusten selvittämiseksi. Lisäksi Luke Jokioisissa toteutettiin kolme erilaista laboratoriokoesarjaa, joissa tarkasteltiin maanparannuskuitujen vaikutuksia karkeiden kivennäismaiden vedenpidätysominaisuuksiin ja lisätyn hiilen stabiilisuuteen sekä hajotuksen vaikutusta helppoliukoisen epäorgaanisen typen määrään. Inkubaatiokokeiden avulla tuotettiin lisätietoa maanparannuskuitujen vaikutuksista, mutta osassa kokeista oli mukana myös kuiva-ainepitoinen jae ja erilaisia biohiiliä.

Tässä tutkimuksessa kuitulevitykset tapahtuivat keväällä juuri ennen nurmen perustamista suojaviljaan, ja molemmilla kuiduilla oli mukana kaksi mineraalitypen lannoitustasoa (40 ja 80 kg N/ha). Matalammalla mineraalitypen lisäystasolla Fortumin kuitu tuotti pienemmän ohran jyväsadon kuin vastaava liukoinen väkilannoitetyppi-koejäsen. Typen immobilisaatiosta johtuva sadonalenema oli kuitenkin ehkäistävässä käytännön viljelyä vastaavalla tyyppilannoituksella, eikä kuitukäsittelyillä ollut vaikutusta jyväsatoon mineraalitypen korkeammalla täydennystasolla. Nurmivuosina tarkasteltiin kuitulevitysten jälkivaikutuksia, ja kuitulevitysten tuottama sadonlisä oli selitettävissä kuitujen sisältämän typen mineralisoitumisella sekä mahdollisesti myös kuitujen tuottamalla muilla maanparannushyödyillä. Fortumin kalkkistabiloidulla kuidulla oli kalkitusvaikutusta, ja käsittely nosti muokkauskerroksen pH:ta, ja tämä vaikutus säilyi myös seurantavuosien ajan.

Pohjois-Savossa esiintyy tyypillisesti karkeampia kivennäismaita (Hs, Ht Mr), kun taas hienojakoisten savimaiden osuus on verrattain pieni. Karkeilla kivennäismailla on yleensä hienojakoisia maita matalampi hiilipitoisuus ja heikompi kyky varastoida kasveille käyttökelpoista vettä. Pakatuilla sylinterinäytteillä toteutetussa laboratoriokokeessa maanparannuskuitujen ja kuiva-ainepitoisen jakeen avulla oli mahdollista modifioida karkean kivennäismaan huokoskoon jakaumaa ja vedensitomisoimaisuuksia siten, että se olisi suotuisampi kosteusolosuhteiden ja kasvien vedensaannin kannalta. Maanparannuskuiduilla oli myös potentiaalia kasvattaa laskennallista hyötykapasiteettia. Jos maa pystyy sitomaan enemmän kasveille saatavilla olevaa vettä, se voi helpottaa kasvien vedensaantia poutajaksojen aikana ja/tai lisätä kastelustrategian joustavuutta keinokasteluviljelyssä.

Orgaanisella aineksella on tärkeä merkitys peltomaan biologiselle, fysikaaliselle ja kemialliselle kasvukunnolle. Orgaaniset maanparannusaineet ja lannoitteet kierrättävät peltomaahan orgaanista ainesta, ja auttavat ylläpitämään ja mahdollisesti kasvattamaan maan hiilivarastoa. Perustamisvuoden syksyllä otetuissa maanäytteissä molemmat kuidut nostivat muokkauskerroksen kokonaishiilen pitoisuutta korkeammalla typen lisäystasolla vastaavaan 80 kg N/ha -mineraalityypikoejäseneneen verrattuna, ja trendinomaisesti myös matalammalla typen lisäystasolla. Jälkivaikutusten seurantavuosina oli vielä havaittavissa trendinomainen hiililisäys etenkin Stora Enson kuitukoejäsenten kohdalla. Laboratoriokokeet osoittivat, että hajotustoiminnan seurauksena maanparannuskuitujen hiilestä vapautui hiilidioksidina keskimäärin noin 30 % kahden kuukauden inkubaatiojakson aikana. Maanparannuskuitujen kertalevityksellä saavutettavat positiiviset maanparannusvaikutukset muuttuvat ja pienenevät ajan kuluessa.

Tämän tutkimuksen perusteella maanparannuskuitujen käyttö karkeilla kiivennäismailla on hyvin suositeltavaa. Levityksissä tulee kuitenkin huomioida raskasmetallien (etenkin kadmiumin) ja ravinteiden pitoisuuksiin (P ja N) liittyvät asetukset/määräykset sekä tarvittaessa levitysten ja kylvön välinen varoaika ja/tai riittävä typpitäydennys. Kuitulaadun valinnassa kannattaa huomioida myös lohkokohdaiset ominaisuudet ja viljavuusanalyysin tiedot. Jatkokysymyksenä olisi esimerkiksi tutkia runsashiilisten maanparannusaineiden vaikutuksia kasveille käyttökelpoisen veden määrään, ja edelleen parantuneiden vedenpidätysominaisuuksien muutoksia ajan suhteen sekä niiden merkitystä satovaikutusten kannalta maan eri kosteusolosuhteissa. Nurmenviljelyssä jatkokysymyksenä olisi esimerkiksi tarkastella tilannetta, jossa runsashiilisten maanparannusaineiden levitys toistetaan uusimisen yhteydessä ja nurmivuosien aikana hiilisyötettä ylläpidetään vuotuisella karjanlannan tai muiden orgaanisten lannoitteiden levityksellä.



## VIITTEET

Ajosenpää, T., Anttila, L., Ekholm, P., Heikkinen, J., Jaakkola, J., Kaseva, A., Kämmäri, M., Kääriä, J., Luodes-lampi, P., Malmilehto, S., Muurinen, S., Rasa, K., Soinne, H., Talola, S., Uusi-Kämppe, J. & Uusi-talo, R. 2021. Kipsi, kuitu ja rakennekalkki – opas viljelijöille. ProAgrian hankejulkaisut 10. 52 s.

<https://www.proagri.fi/kipsikuiturakennekalkki>

Aksoy, E., Yigini, Y. & Montanarella, L. 2016. Combining soil databases for top-soil organic carbon mapping in Europe. PLoS ONE 11: e0152098.

Camberato, J.J., Gagnon, B., Angers, D.A., Chantigny, M.H. & Pan, W.L. 2006. Pulp and paper mill by-products as soil amendments and plant nutrient sources. Canadian Journal of Soil Science 86: 641-653.

Ekholm, P., Ollikainen, M., Ala-Harja, V., Begum, K., Huttunen, M., Järvenranta, K., Kiirikki, M., Kuosa, H., Lötjönen, S., Riihimäki, J., Taskinen, A., Tikkanen, T. & Yli-Halla, M. 2022. Peltojen kipsikäsittely fosforikuormituksen hallinnassa – pilottina Savijoen valuma-alue. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 32 / 2022. 103 s.

Fierro, A., Angers, D.A. & Beauchamp, C.J. 2000. Decomposition of paper deinking sludge in a sandpit minesoil during its revegetation. Soil Biology & Biochemistry 32: 143-150.

Foley, B.J. & Cooperband, L.R. 2002. Paper mill residuals and compost effects on soil carbon and physical properties. Journal of Environmental Quality 31: 2086-2095.

Heikkinen, J., Ketoja, E., Nuutinen, V. & Regina, K. 2013. Declining trend of carbon in Finnish cropland soils in 1974-2009. Global Change Biology 19: 1456-1469.

Heikkinen, J., Keskinen, R., Regina, K., Honkanen, H. and Nuutinen, V. 2021a. Estimation of carbon stocks in boreal cropland soils – methodological considerations. European Journal of Soil Science 72: 934-945.

Heikkinen, J., Ketoja, E., Seppänen, L., Luostarinen, S., Fritze, H., Pennanen, T., Peltoniemi, K., Velmala, S., Hanajik, P. & Regina, K. 2021b. Chemical composition controls the decomposition of organic amendments and influences the microbial community structure in agricultural soils. Carbon Management 12: 359-376.

Keskinen, R., Ketoja, E., Heikkinen, J., Salo, T., Uusitalo, R. & Nuutinen, V. 2016. 35-year trends of acidity and soluble nutrients in cultivated soils of Finland. Geoderma Regional 7: 376-387.

Keskinen, R., Termonen, M., Salo, T., Luostarinen, S. & Rätty, M. 2022. Slurry acidification outperformed injection as an ammonia emission-reducing

technique in boreal grass cultivation. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 122: 139–156.

Kinnula, S., Toivonen, M., Soinnie, H., Jooa, J. & Kivelä, J. 2020. Effects of mixed pulp mill sludges on crop yields and quality. *Agricultural and Food Science* 29: 276–286.

Kätterer, T., Bolinder, M.A., Andrén, O., Kirchmann, H. & Menichetti, L. 2011. Roots contribute more to refractory soil organic matter than aboveground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 141: 184–192.

Mukherjee, A. & Lal, R. 2013. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. *Agronomy* 3: 313–339.

Rasa, K., Heikkinen, J., Hannula, M., Arstila, K., Kulju, S. & Hyväluoma, J. 2018. How and why does willow biochar increase a clay soil water retention capacity? *Biomass and Bioenergy* 119: 346–353.

Rasa, K., Pennanen, T., Peltoniemi, K., Velmala, S., Fritze, H., Kaseva, J., Jooa, J. & Uusitalo, R. 2021. Pulp and paper mill sludges decrease soil erodibility. *Journal of Environmental Quality* 50: 172–184.

Räty, M., Termonen, M., Soinnie, H., Nikama, J., Rasa, K., Järvinen, M., Lappalainen, R., Auvinen, H. & Keskinen, R. 2023. Improving coarse-textured mineral soils with pulp and paper mill sludges: functional considerations at laboratory scale. *Geoderma* 438:116617. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116617>

Salter, P.J. & Williams, J.B. 1965. The influence of texture on the moisture characteristics of soils. I. A critical comparison of techniques for determining the available-water capacity and moisture characteristic curve of a soil. *Journal of Soil Science* 16: 1–15.

Termonen, M., Keskinen, R., Nikama, J., Järvenranta, K., Soinnie, H., Järvinen, M., Rasa, K., Uusi-Kämpä, J., Auvinen, H., Lappalainen, R. & Räty, M. 2022. Metsäteollisuuden kuitulietteiden peltoviljelykäyttö karkeilla kivennäismailla. *Suomen Maataloustieteellisen Seuran Tiedote Nro 40. Maataloustieteen Päivät 2022.* <https://doi.org/10.33354/smst.115864>

Turunen, M., Hyväluoma, J., Keskinen, R., Kaseva, J., Nikama, J., Reunamo, A. & Rasa, K. 2021. Pore structure of wastewater sludge chars and their water retention impacts in different soils. *Biosystems Engineering* 206: 6–18.

## 5 LAAJAN KAUPALLISEN KÄYTÖN KANNALTA KRIITTISTEN TEKIJÖIDEN SELVITTÄMINEN

Noora Jokinen, Umme Sara Santana, Ayobami Salami, Kimmo Laitinen, Isa Lyijynen, Reijo Lappalainen, Itä-Suomen yliopisto (UEF), Teknillisen fysiikan laitos, Yliopistonranta 8, 70210 Kuopio

Hankkeen aikana selvitettiin hankkeessa kehitettävien uusien biotuotteiden laajan kaupallisen käytön kannalta kriittisiä tekijöitä kirjallisuus- ja taustaselvitysten sekä pienimuotoisten kokeilujen avulla. Selvityksissä tutkittiin sivuvirtojen potentiaalista käyttöä mm. seuraaviin aihepiireihin liittyen: tuhkan käyttömahdollisuudet (muihin sovelluksiin kuin maanparannus tai maanrakennus) ja siihen liittyvät rajoitukset, hiili-hiilikomposiitit ja lietalannan kaasupäästöjen vähentäminen biopelteillä. Komposiittimateriaaleista ja lietalannan kaasupäästöjen vähentämisestä toteutettiin myös kokeelliset tutkimukset, joiden tulokset on kuvattu tarkemmin jäljempänä. Lisäksi hankkeen aikana kartoitettiin tuoteturvallisuuteen ja ympäristövaikutusten huomioimiseen liittyviä testaustarpeita ja -mahdollisuuksia UEF:n Farmasian laitoksella. Nämä kartoitukset sisälsivät mm. hankkeessa valmistettujen biomateriaalien koostumuksen analysointia ydinmagneettisella resonanssispektroskopiolla (NMR) sekä Ames-testausta materiaalien mutageenisuuden määrittämiseksi.

### 5.1 Tuhkan käyttömahdollisuudet

Kivihiili- ja biomassapohjaisten tuhkien käyttömahdollisuuksia kartoittavan selvityksen (Jokinen, Tuhkan käyttö ja siihen liittyvät rajoitukset) perusteella mahdollisiksi tuhkan käyttökohteiksi tunnistettiin mm. rakennusmateriaalit, komposiitit, väriaineet, katalyytit/adsorbentit, nanopartikkelien tuotanto, ke-raamien ja lasin tuotanto sekä geopolymeerit. Esim. riisin akanoiden tuhkaa on käytetty terästeollisuudessa eristeenä hidastamaan teräksen viilentymistä ja edistämään sen tasaista jähmettymistä sekä sementin valmistuksessa parantamaan betonin mekaanisia ominaisuuksia, mm. lisäämään puristuslujuutta (M. N. N. Khan et al., 2015) (Bondioli et al., 2007) (Pereira et al., 2013). Myös kivihiilipohjaisella lentotuhkalla on havaittu samankaltaisia vaikutuksia betoniin lisättäessä tuhkaa sementtiin (Canpolat et al., 2004).

Keraamien valmistuksessa kvartsin korvaamisen riisin akanoiden tuhkas-ta eristetyllä piidioksidilla on todettu alentavan sintraantumislämpötilaa ja pienentävän lämpölaajenemista (Prasad, Maiti & Venugopal, 2001). Kivihiili-peräisen lentotuhkan on puolestaan todettu soveltuvan korvaamaan erilaisia oksideja ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) mm. keraamisten kalvojen valmistuksessa erilaisiin erottamisprosesseihin sekä lasi-keramisten rakennusmateriaalien valmistuksessa (Wei, Hou & Zhu, 2016) (Blissett, Rowson, 2012). Lentotuhkalla on myös havaittu positiivisia vaikutuksia kulkuvälinealan alumiinikomposiiteissa, mm. keveys, parempi kulutuksen kesto ja kovuus sekä vähäisempi lämpölaajeneminen (Rohatgi, Weiss & Gupta, 2006).

Nanopartikkelien tapauksessa vehnän akanoiden, bagassin ja sokeriteollisuuden tuhkasta sekä kivihiihlopohjaisesta lentotuhkasta valmistettua piitä on hyödynnetty mm. zeoliittien, huokoisen piin ja aérogeelien/vaahtojen valmistuksessa (Liu et al., 2016) (Lee et al., 2017). Näillä materiaaleilla on lukuisia sovelluskohteita mm. kemian-, kaivos-, lääke-, rakennus- ja elektroniikkateollisuuden aloilla sekä ympäristönsuojelussa (Lee et al., 2017) (Mostafa Hosseini Asl et al., 2018) (Thirumalai, Balachandran & Swaminathan, 2016) (Lu et al., 2015) (Mishra, Singh & Dhawan, 2013). Moni näistä sovelluksista perustuu materiaalien katalyyttisiin tai absorptio-ominaisuuksiin. Lentotuhkan absorptiokykyä on hyödynnetty myös mm. jätevesien ja pakokaasujen puhdistuksessa (Andersson, Eriksson & Norgren, 2011) (Zhou et al., 2019) (Blissett, Rowson, 2012).

Biopohjaisista tuhista valmistettua piidioksidia on kokeiltu raaka-aineena pigmentin valmistuksessa ja sen on havaittu olevan kilpailukykyinen biopohjainen vaihtoehto perinteiselle piidioksidin tuotantoprosessille sulatetusta kvartsihiekasta (Chindaprasirt, Rattanasak, 2020) (Bondioli et al., 2007). Kivihiihlopohjaista lentotuhkaa on puolestaan testattu valmistettaessa amorfisia tai puolikristallisia polymeerirakenteita, geopolymeereja, jotka ovat kevyitä, huokoisia, vahvoja ja kovia sekä hyvin tulta, lämpöä ja pintakulutusta kestäviä. Geopolymeereillä on monia käyttötarkoituksia erityisesti sementin korvaamisessa, mutta myös metallurgiassa sekä, kuljetus- ja rakennusaloilla (Blissett, Rowson, 2012).

Tuhkan käytön rajoituksista merkittävimmäksi todettiin sen sisältämät raskasmetallit, jotka voivat huuhtoutua ympäristöön vuorovaikuttaessaan veden kanssa, sekä radioaktiiviset isotoopit (Mostafa Hosseini Asl et al., 2018). Lisäksi tuhkan puuterimainen koostumus aiheuttaa pölypäästöjä, joita voidaan kuitenkin vähentää pelletöinnillä (Zhou et al., 2019). Tuhkan suorituskyky ei myöskään ole kaikissa sovelluksissa perinteisten materiaalien tasolla, mm. veden puhdistuksessa tuhkan absorptiokyvyssä ja laatuvaihteluissa on havaittu ongelmia (Zhou et al., 2019) (Blissett, Rowson, 2012). Sementin valmistuksessa puolestaan mekaanisten ominaisuuksien on havaittu tasaantuvan tuhkaa käytettäessä hyvin hitaasti, mikä aiheuttaa viivästyksiä ja lisäkustannuksia (Canpolat et al., 2004).

Metsäteollisuuden sivuvirtatuhkaa myös analysoitiin hankkeessa ja sen todettiin soveltuvan granuloituna esim. metsään levitettäväksi. Pelloille levitykseen tuhka sen sijaan ei soveltunut korkeiden raskasmetallipitoisuuksien (Cd, Zn) vuoksi.

## 5.2 Biohiilten ja -nesteiden valmistus

Hankkeessa valmistettiin biohiiliä ja -nesteitä eri biomassoista hidaspölyrolyysi- ja hydroterminen nesteytys (HTL) -prosesseilla. Molemmat ovat termokemiallisia menetelmiä, joissa biomassa prosessoidaan kiinteiksi, nestemäisiksi ja kaasumaisiksi lopputuotteiksi n. 250 – 350 °C lämpötilassa (Demirbaş, 2000) (Gollakota et al., 2018) (Kan et al., 2016) (Lachos-Perez et al., 2022)

(Pang, 2019). Menetelmien keskeisin ero on, että hidaspYROLYYSSISSA lähtöaine on suhteellisen kuivaa (n. 10 %) ja HTL-prosessissa selkeästi kosteampaa (n. 80 %). HTL-prosessi myös tuottaa enemmän nestemäisiä lopputuotteita kuin hidaspYROLYYSI ja HTL-prosessilla valmistettu hiili poikkeaa ominaisuuksiltaan perinteisestä biohiilestä. Molemmissa prosesseissa biohiilten ja -nesteidän ominaisuuksia pystytään säätämään jonkin verran prosessiparametreillä (Kan et al., 2016) (Möller et al., 2011) (Nachenius et al., 2013) (Pang, 2019). HidaspYROLYYSIÄ tehtiin sekä laboratoriomittakaavassa UEF:n tiloissa (panostoinen n. 10 L prosessi) että pienen kokoluokan (n. 2 m<sup>3</sup>) teollisilla laitteistoilla (Salohiili & Ecomation, ostopalvelu), ja HTL-prosessia UEF:n tiloissa panostoisessa n. 6 L reaktorissa (kuva 1). UEF:n laitteistoilla saadaan talteen vain kiinteät ja nestemäiset fraktiot, mutta ei kaasuja.



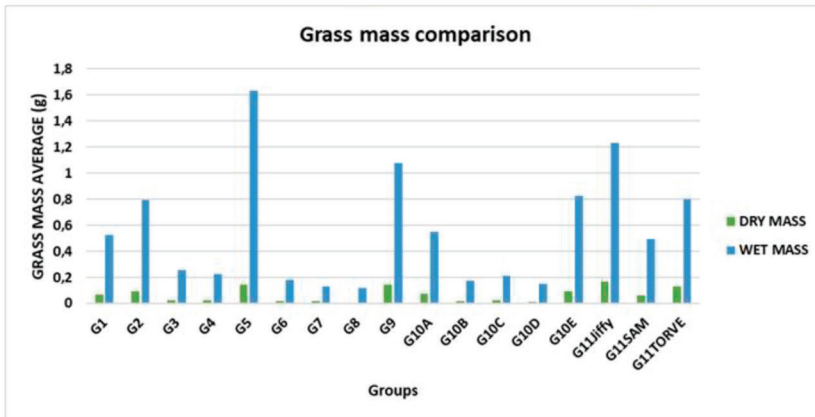
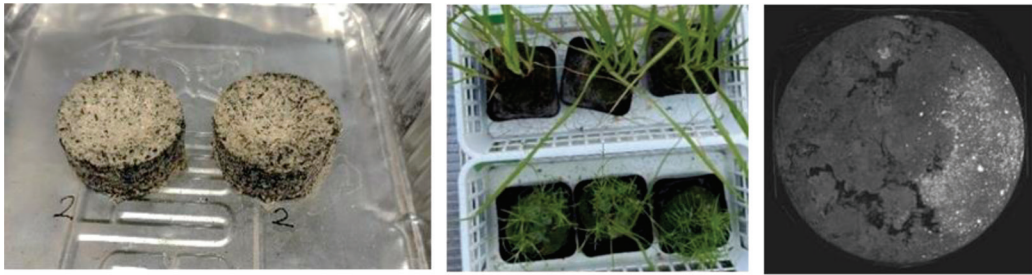
**Kuva 1.** Vas. ylhäällä: Biomassaa valmiina prosessoitavaksi UEF:n panostoisessa hidaspYROLYYSIREAKTORISSA. Vas. alhaalla: HidaspYROLYYSSILLA valmistettua biohiiltä. Kesk.: HTL-reaktori, UEF Joensuuun kampus. Oik.: HTL-prosessin lopputuotteita.

Lähtöaineina prosesseissa oli mm. koivun kuori, kuusen kuori, sipulin kuori, hamppu ja kuitusavi sekä erilaiset metsäteollisuuden sivuvirrat. Prosessista otettiin talteen sekä hiili että syntyvät nestemäiset tisleet ja hiilille tehtiin jatkokäsittelyjä, mm. lämpökäsittelyjä korkeammassa lämpötilassa sekä jauhamista/seulomista erilaisten partikkelikokojen erottelemiseksi. Hankkeen aikana koottiin laaja erilaisten biohiilinäytteiden sarja (yli 80 kpl), joka analysoitiin eri tekniikoilla hiilten käyttömahdollisuuksien arvioimiseksi eri sovelluksia silmällä pitäen, osittain ostopalveluna. Nämä analyysit sisälsivät mm. hiilten kemiallisen koostumuksen, tiheyden/huokoisuuden ja sähkönjohtavuuden tutkimusta. Biohiiliä hyödynnettiin hankkeessa monin tavoin ja niitä toimitettiin myös Savonian ja Luken kokeita varten. Myös nestemäisten tisleiden koostumus ja ominaisuudet analysoitiin eri tekniikoilla tisleiden käyttömahdollisuuksien arvioimiseksi, esim. kasvitautien torjunnassa ja lietelan-

nan pH:n säädössä sekä kaasupäästöjen minimoinnissa. Eräs mielenkiintoinen löydetty nestefraktio oli katekoli, jota onnistuttiin puhdistamaan CPC-kromatografiamenetelmällä, ja jolle sopivia käyttökohteita olisivat esim. pinnoitukset ja pintakäsittelyt. HTL-prosessilla valmistetuista nesteistä löydettiin mm. etikkahappoa ja erilaisia fenoleja, kun taas korkeamman molekyylipainon yhdisteet jäivät yleensä hiiliin. HTL-hiilistä pystytään erottamaan helposti tavanomaisilla liuottimilla hyödyntämiskelpoisia yhdisteitä talteen.

### 5.3 Kasvatuskokeet

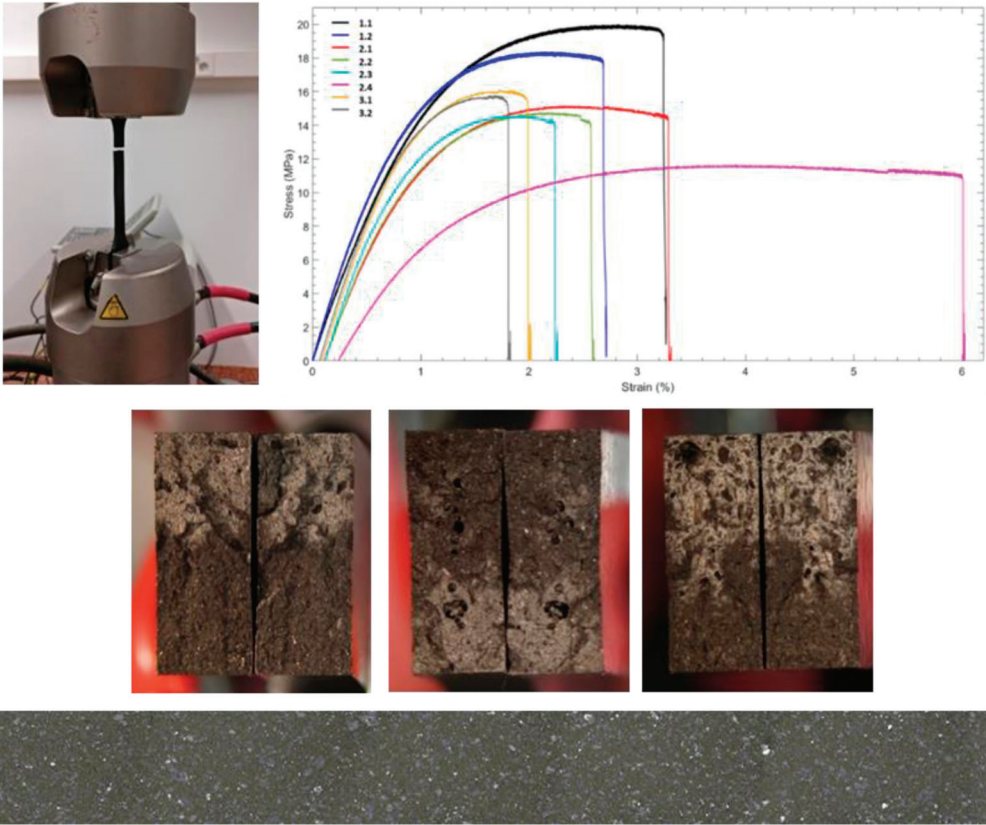
Osa edellä mainituista biohiilistä ja sivuvirroista hyödynnettiin myös Savonian ruukkukokeissa ja Luken maaperäkokeissa. Näiden lisäksi materiaaleja testattiin myös Itä-Suomen yliopistossa kasvatusnapeissa, joita tutkittiin vaihtoehtoina nykyään saatavilla oleville erilaisille kaupallisille kasvatusnapeille taimien esikasvatukseen esim. kotitarveviljelijöille. Merkittävä osa näistä kasvatusnapeista on turve- tai sammal pohjaisia, ja turpeen käytön vähentämiseen pyrittäessä olisi tärkeää löytää korvaavia materiaaleja. UEF valmisti hankkeen aikana kestävän kehityksen mukaisia turpeettomia kasvatusnappeja kahdessa eri kokoluokassa kotimaisista raaka-aineista (mm. biohiilestä) ja testasi niiden toimivuutta kasvatuskokeilla sekä kasvukaudella 2021 että 2022 (Kuva 2). Kasvatusnapeissa kasvatettiin italianraiheinää sekä kuusen taimia siemenestä kokonaisnäytelmäärän ollessa vuoden 2022 isommassa kasvatuskokeessa 136 kpl. Kokeiden tuloksina mitattiin raiheinän kuiva- ja märkämassat. Lisäksi kasvatusnappeja tutkittiin mm. mikroCT-tomografiamenetelmällä niiden sisäarakenteen selvittämiseksi (Kuva 2). Menetelmä soveltuu mm. kasvatusnappeiden vedenimeytyvyyden ja juurten kasvun tutkimiseen ja samaa menetelmää käytettiin hankkeessa myös Luken maanäytteiden tutkimiseen. Kasvatusnapeista tutkittiin myös haitallisen maksasammaleen kasvun eston tehokkuutta, joka havaittiin hyväksi. Kasvatuskokeissa taimien itävyyden ja kasvun havaittiin olevan kaupallisten turve- tai sammalnappiverrokkien tasolla tai osittain jopa parempaa (Kuva 2).



**Kuva 2.** Vas. ylhäällä: Sivuvirroista valmistettuja kasvatusnappeja. Kesk. ylhäällä: Italianraiheinää ja kuusentaimia kasvatusnappeissa. Oik. ylhäällä: Poikkileikekuva kasvatusnapista mikroCT-menetelmällä. Alhaalla: Kasvatusnappien kasvatuskokeiden tuloksia.

## 5.4 Biohiilikomposiitit

Hankkeessa toteutettiin tutkimus, jossa UEF:n tuottamia biohiiliä käytettiin polymeerikomposiittien raaka-aineena materiaalin lujittamiseksi sekä sähköisten ominaisuuksien räätälöimiseksi. Perinteisesti tähän tarkoitukseen käytetään hiilimustaa, jolle biohiili on biopohjainen vaihtoehto. Biohiilen sähkönjohtavuus riippuu monista tekijöistä, mm. hiilen valmistusprosessista, rakenteesta ja jälkikäsittelyistä (lämpökäsittelyt, jauhaminen/seulominen). Hankkeen aikana valmistettiin useita erilaisia biohiilieriä, joista Premix Oy valmisti komposiittinäytteitä, joiden mekaaniset sekä sähköiset ominaisuudet testattiin (kuva 3). Eri hiilieristä valmistettujen näytteiden välillä havaittiin selkeitä eroja, joista mekaanisten ominaisuuksien erot olivat selvästi jäljitettävissä näytteiden sisärakenteeseen (kuva 3), kuten huokoisuuteen, onkaloihin ja materiaalin epähomogeenisuuteen. Sähköisten ominaisuuksien erot puolestaan jäivät osin epäselviksi ja ovat kiinnostava optimoinnin kohde lisätutkimuksille. Mekaanisesti testattujen näytteiden murtopintoja tutkittiin mikroskopiamenetelmillä (optinen, SEM) ja näytteiden sisärakennetta kartoitettiin myös mikroCT-tomografiamenetelmällä.



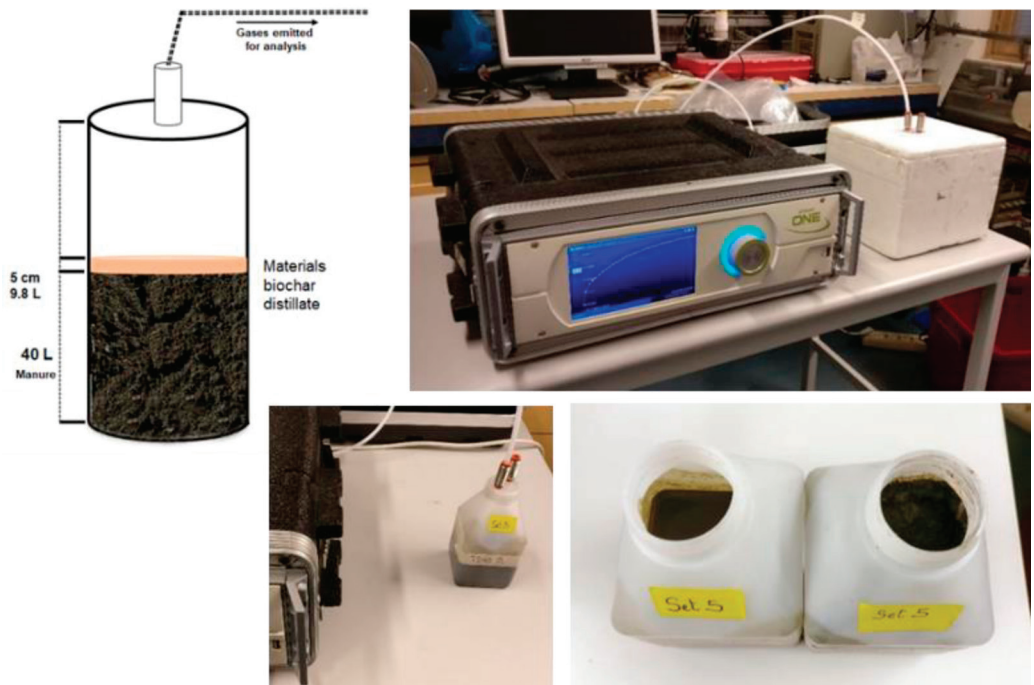
**Kuva 3.** Vas. ylhäällä: Biohiilikomposiittivetosauvan mekaaninen testaus vetokokeella. Oik. ylhäällä: Komposiittinäytteiden vetokokeiden tuloksena jännitys-venymäkäyrät, joissa näkyy selkeästi eroja eri näytesarjojen mekaanisissa ominaisuuksissa. Kesk.: Biohiilikomposiittivetosauvojen murtopintoja eri näytesarjoista. Alhaalla: mikroCT-leikekuva biohiilikomposiittivetosauvasta.

## 5.5 Lietelannan kaasupäästöjen vähentäminen

Lietelannan varastointi avosäiliöissä on maailmanlaajuisesti merkittävä kasvihuonekaasujen lähde, erityisesti metaanin, ammoniakkin, hiilidioksidin, typen oksidien ja vetysulfidin osalta (Kupper et al., 2020). Esim. vuonna 2020 maailman metaani- ja typen oksidipäästöistä hieman yli viidennes oli lähtöisin karjataloudesta (Olivier, 2022). Erityisesti metaani- ja ammoniakkipäästöt ovat haitallisia, koska metaani on merkittävä kasvihuonekaasu ja ammoniakki aiheuttaa mm. maaperän happamoitumista sekä ravinteiden kertymistä ympäristöön (Dingenen et al., 2018) (Bourzac, 2021) (Velthof et al., 2011) (Fowler et al., 2013) (Cape et al., 2009) (Sutton et al., 2011) (Krupa, 2003). Hankkeessa tehdyn kirjallisuusselvityksen perusteella aiemmin tutkittuja ratkaisuja ongelmaan ovat mm. lietalannan pH:n säätö esim. hapoilla, pyrolyysitiseillä tai auringonkukkaöljyllä, erilaisten katemateriaalien, kuten sahanpurun, turpeen, leca-soran tai pehkujen, käyttö, tai lietalannan lämpötilan laskeminen (Kavanagh et al., 2019) (Keskinen et al., 2018) (Matulaitis et al., 2015) (Meiirkhanuly et al., 2020) (Monteny et al., 2006). Tyypillisesti moni näistä menetelmistä tehoaa hyvin yksittäisen kaasun päästöihin, mutta samalla muiden kaasujen päästöt voivat jopa kasvaa.

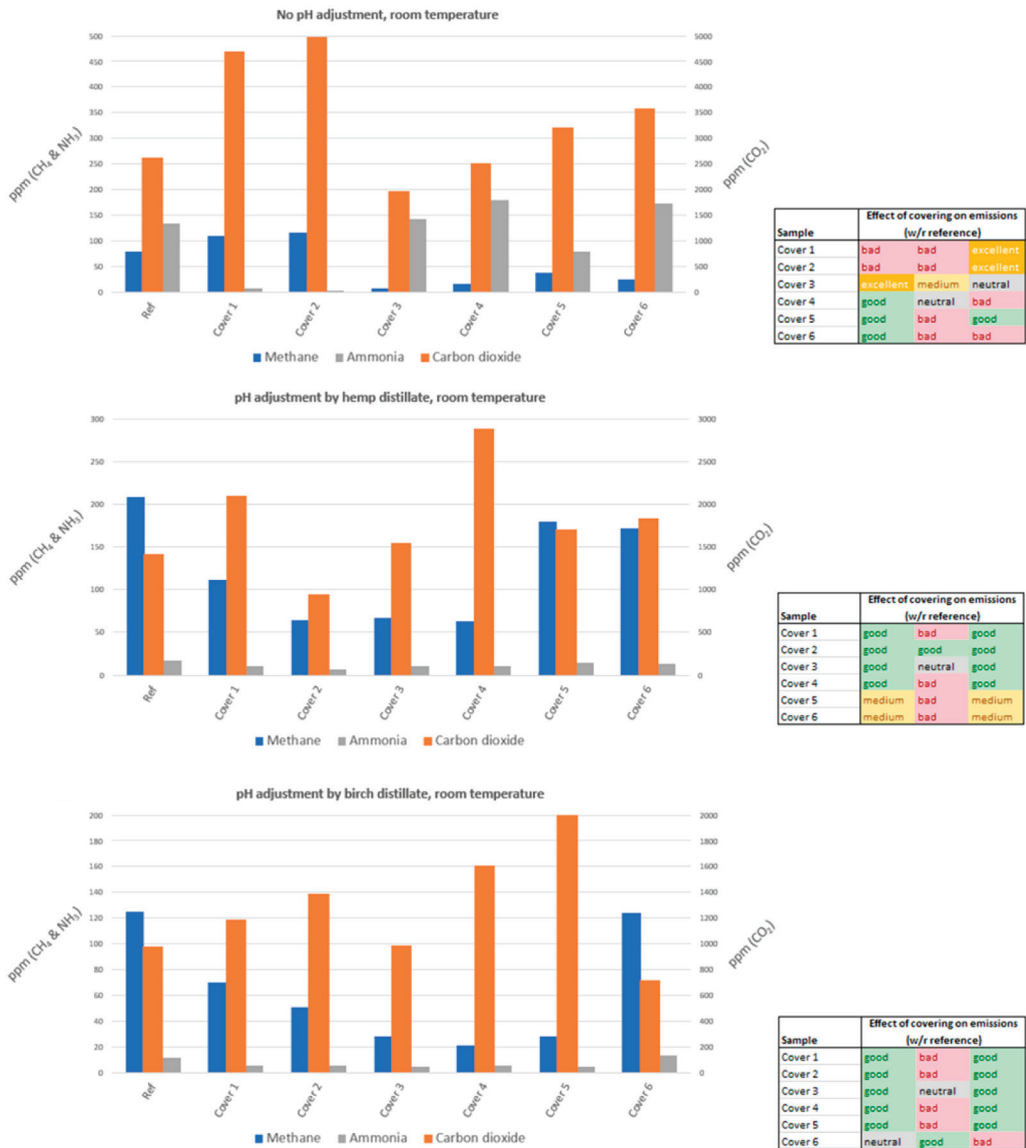


Hankkeen aikana UEF:ssa toteutetussa laboratoriomittakaavan testissä pyrolyysinesteiden ja biopohjaisten katemateriaalien tehoa lietalannan kaasupäästöjen sitomiseen testattiin 500 mL pullokoossa laittamalla pulloihin pyrolyysinesteillä (hamppu/koivutisleet) tai rikkihapolla pH-säädettyä lietalantaa ja katteeksi biopohjaisia materiaaleja, kuten biohiiltä tai sahanpurua (Kuva 4). Näytteistä vapautuvia metaani-, hiilidioksidi- ja ammoniakkipäästöjä mitattiin useiden viikkojen ajan päästöjen aikakehityksen seuraamiseksi. Testejä tehtiin sekä huoneenlämpötilassa että 10 °C lämpötilassa. Tutkimuksen pääasiallisina hypoteeseina olivat kaasupäästöjen merkittävä vähennys katemateriaalien avulla ja eri tisleiden sekä biohiilten toimivuuden välisten erojen osoittaminen. Merkittävimmät uutuusarvot aiempaan tutkimukseen verrattuna olivat tisleiden ja biohiilten yhdistäminen kaasupäästöjen sitomiseksi, hampupohjaisten tisleiden ja hiilten käyttö sekä HTL-menetelmällä valmistetun hiilen käyttö.



**Kuva 4.** Vas. ylhäällä: Lietelannan kaasupäästöjen mittauksen periaate (tutkimuksessa skaalattu 500 mL:n näytekokoon). Oik. ylhäällä: Kaasupäästöjen mittausta kaasuanalysaattorilla, 10 °C näyte lämpöeristetyssä laatikossa. Vas. alhaalla: Kaasupäästöjen mittaus näytepullosta huoneenlämpötilassa. Oik. alhaalla: lietalantanäyte ilman biohiilikatetta sekä biohiilellä katettuna.

Tutkimuksessa havaittiin selkeitä eroja eri pH:n säätömenetelmien ja katemateriaalien välillä kaasupäästöjen sitomiskyvyssä (Kuva 5). Useimmat menetelmät vähensivät tehokkaasti joko metaani- tai ammoniakkipäästöjä, mutta hiilidioksidipäästöjen osalta vaikutus oli yleensä joko neutraali tai negatiivinen. Tutkimuksessa löydettiin muutamia lupaavia materiaaliyhdistelmiä, jotka vähensivät tehokkaasti sekä metaani- tai ammoniakkipäästöjä yhtäaikaaisesti ja olivat neutraaleja hiilidioksidipäästöjen suhteen. Varsinkin hamppu- ja koivutisleillä pH-säädetyjen näytteiden testeissä havaittiin rinnakkaisnäytteiden toistettavuus hyväksi.



**Kuva 5.** Lietelannan kaasupäästöjen tutkimuksen tuloksia. Useimmat katemateriaalit tehosivat tyypillisesti hyvin joko metaani- tai ammoniakkipäästöihin tai molempiin.

## VIITTEET

Andersson, K.I., Eriksson, M. & Norgren, M. 2011. Removal of Lignin from Wastewater Generated by Mechanical Pulping Using Activated Charcoal and Fly Ash: Adsorption Isotherms and Thermodynamics. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 50: 7722–7732.

Blissett, R.S. & Rowson, N.A. 2012. A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. *Fuel* 97: 1–23.

Bondioli, F., Andreola, F., Barbieri, L., Manfredini, T. & Ferrari, A.M. 2007. Effect of rice husk ash (RHA) in the synthesis of (Pr,Zr)SiO<sub>4</sub> ceramic pigment. *Journal of the European Ceramic Society* 27: 3483–3488.

Bourzac, K. 2021. The other important greenhouse gas. *C&EN Global Enterprise* 99: 28–33.

Canpolat, F., Yilmaz, K., Köse, M.M., Sümer, M. & Yurdusev, M.A. 2004. Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production. *Cement and Concrete Research* 34: 731–735.

Cape, J.N., Van der Eerden, L.J., Sheppard, L.J., Leith, I.D. & Sutton, M.A. 2009. Evidence for changing the critical level for ammonia. *Environmental Pollution* 157: 1033–1037.

Chindaprasirt, P. & Rattanasak, U. 2020. Eco-production of silica from sugarcane bagasse ash for use as a photochromic pigment filler. *Scientific reports* 10: 9890.

Demirbaş, A. 2000. Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reactions of biomass. *Energy Conversion and Management* 41: 633–646.

Dingenen, R.V., Crippa, M., Maenhout, G., Guizzardi, D. & Dentener, F. 2018. Global trends of methane emissions and their impacts on ozone concentrations. JRC Science for policy report. European Commission office, Luxembourg.

Fowler, D., Pyle, J.A., Raven, J.A. & Sutton, M.A. 2013. The global nitrogen cycle in the twenty-first century: introduction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 368: 20130165.

Gollakota, A.R.K., Kishore, N., Gu, S. 2018. A review on hydrothermal liquefaction of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81: 1378–1392.

Kan, T., Strezov, V., Evans, T.J. 2016. Lignocellulosic biomass pyrolysis: a review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57: 1126–1140.

Kavanagh, I., Burchill, W., Healy, M.G., Fenton, O., Krol, D.J. & Lanigan, G.J. 2019. Mitigation of ammonia and greenhouse gas emissions from stored cattle slurry using acidifiers and chemical amendments. *Journal of Cleaner Production* 237: 117822.

Keskinen, R., Hyväluoma, J., Wikberg, H., Källi, A., Salo, T. & Rasa, K. 2018. Possibilities of Using Liquids from Slow Pyrolysis and Hydrothermal Carbonization in Acidification of Animal Slurry. *Waste and Biomass Valorization* 9: 1429–1433.

Khan, M.N.N., Jamil, M., Karim, M.R., Zain, M.F.M. & Kaish, A.B.M.A. 2015. Utilization of Rice Husk Ash for Sustainable Construction: A Review. *Research journal of applied sciences, engineering and technology* 9: 1119–1127.

Krupa, S.V. 2003. Effects of atmospheric ammonia (NH<sub>3</sub>) on terrestrial vegetation: a review, *Environmental Pollution* 124: 179–221.

Kupper, T., Häni, C., Neftel, A., Kincaid, C., Bühler, M., Amon, B. & VanderZaag, A. 2020. Ammonia and greenhouse gas emissions from slurry storage - A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 300: 106963.

Lachos-Perez, D., César Torres-Mayanga, P., Abaide, E.R., Zobot, G.L., De Castilhos, F. 2022. Hydrothermal carbonization and liquefaction: differences, progress, challenges, and opportunities. *Bioresource Technology* 343: Article 126084.

Lee, Y., Soe, J.T., Zhang, S., Ahn, J., Park, M.B. & Ahn, W. 2017. Synthesis of nanoporous materials via recycling coal fly ash and other solid wastes: A mini review. *Chemical Engineering Journal* 317: 821–843.

Liu, S.-W., Wei, Q., Cui, S.-P., Nie, Z.-R., Du, M.-H. & Li & Q.-Y. 2016. Hydrophobic silica aerogel derived from wheat husk ash by ambient pressure drying. *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 78: 60–67.

Lu, N.N., Wang, X.J., Meng, L.L., Ding, C., Liu, W.Q., Shi, H.L., Hu, X.S. & Wu, K. 2015. Electromagnetic interference shielding effectiveness of magnesium alloy-fly ash composites. *Journal of Alloys and Compounds* 650: 871–877.

Matulaitis, R., Juskiénė, V. & Juska, R. 2015. The effect of floating covers on gas emissions from liquid pig manure. *Chilean journal of agricultural research* 75: 232–238.

Meiirkhanuly, Z., Koziel, J.A., Chen, B., Białowiec, A., Lee, M., Wi, J., Banik, C., Brown, R.C. & Bakshi, S. 2020. Mitigation of Gaseous Emissions from Swine Manure with the Surficial Application of Biochars. *Atmosphere* 11: no. 11.

Mishra, M., Singh, A.P. & Dhawan, K. 2013. Expanded graphite-nanoferrite-fly ash composites for shielding of electromagnetic pollution. *Journal of Alloys and Compounds* 557: 244–251.

Monteny, G.-J., Bannink, A. & Chadwick, D. 2006. Greenhouse gas abatement strategies for animal husbandry. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 112: 163-170.

Mostafa Hosseini Asl, S., Ghadi, A., Sharifzadeh Baei, M., Javadian, H., Maghsudi, M. & Kazemian, H. 2018. Po-rous catalysts fabricated from coal fly ash as cost-effective alternatives for industrial applications: A review. *Fuel* 217: 320-342.

Möller, M., Nilges, P., Harnisch, F., Schröder, U. 2011. Subcritical water as reaction environment: fundamentals of hydrothermal biomass transformation. *ChemSusChem* 4:566-579.

Nachenius, R.W., Ronsse, F., Venderbosch, R.H., Prins, W. 2013. Biomass pyrolysis. Murzin, I.D.Y. (Ed.). *Advances in Chemical Engineering*. Academic Press: 75-139

Olivier, J.G.J. 2022. Trends in global CO<sub>2</sub> and total greenhouse gas emissions 2021 Summary report. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency publication.

Pang, S., Advances in thermochemical conversion of woody biomass to energy, fuels and chemicals. 2019. *Bio-technology Advances* 37: 589-597.

Pereira, C.L., Savastano, H., Payá, J., Santos, S.F., Borrachero, M.V., Monzó, J. & Soriano, L. 2013. Use of highly reactive rice husk ash in the production of cement matrix reinforced with green coconut fiber, *Industrial Crops and Products* 49: 88-96.

Prasad, C. S., Maiti, K.N. & Venugopal, R. 2001. Effect of rice husk ash in white-ware compositions. *Ceramics International* 27: 629-635.

Rohatgi, P.K., Weiss, D. & Gupta, N. 2006. Applications of Fly Ash in Synthesizing Low-Cost MMCs for Automotive and Other Applications, *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*, no. 58.

Sutton, M.A., Oenema, O., Erisman, J.W., Leip, A., van Grinsven, H., Winiwarer, W. 2011. Too much of a good thing. *Nature* 472: 159-161.

Thirumalai, K., Balachandran, S. & Swaminathan, M. 2016. Superior photocatalytic, electrocatalytic, and self-cleaning applications of Fly ash supported ZnO nanorods. *Materials Chemistry and Physics* 183: 191-200.

Velthof, G.L., van Bruggen, C., Groenestein, C.M., de Haan, B.J., Hoogeveen, M.W. & Huijsmans, J.F.M. 2011. A model for inventory of ammonia emissions from agriculture in The Netherlands. *The Journal of Agricultural Science* 4: 248-255.

Wei, Z., Hou, J. & Zhu, Z. 2016. High-aluminum fly ash recycling for fabrication of cost-effective ceramic membrane supports, *Journal of Alloys and Compounds* 683: 474-480.

Zhou, H., Bhattarai, R., Li, Y., Li, S. & Fan, Y. 2019. Utilization of coal fly and bottom ash pellet for phosphorus adsorption: Sustainable management and evaluation. *Resources, Conservation and Recycling* 149: 372-380.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Biosfääri-hankkeessa toteutettiin laaja-alaisesti pilotoiteja ja kenttätesta-uksia yhdistäen toteuttajaorganisaatioiden infraa ja osaamista uusien biopohjaisten materiaalien valmistuksessa, hyödyntämisessä ja kaupallistamisessa yhdessä paikallisten yritysten ja toimijoiden kanssa. Hankkeessa pystyttiin kehittämään ja pilotoimaan kustannustehokas toimintamalli hanketoimijoiden ja yritysten välille. Biopohjaisia materiaaleja pystyttiin prosessoimaan laaja-alaisesti konsortion laitekannalla sekä kehittämään ja testaamaan kiertolannoitteiksi, komposiittien raaka-aineiksi, turpeettomiksi kasvualustoiksi ja kasvitautien torjuntaan.

Savonia-ammattikorkeakoulun astiamittakaavan kasvatuskokeiden tavoitteena oli paikallisten alihyödynnettyjen sivuvirtojen testaaminen kierrätyslannoitteeksi tai maanparannusaineeksi. Kasvatuskokeiden tuloksia voidaan hyödyntää potentiaalisten tuotteiden tuotteistamisessa ja kaupallistamisessa tukien samalla sekä kiertotaloutta että kiristyneitä olosuhteita maataloudessa. Hankkeessa luotu tutkimusmenetelmä mahdollistaa testattavien sivuvirtojen turvallisen toimivuuden testaamisen ennen niiden laajentamista maataloilille laajempaan käyttöön.

Vety on lupaava energian varastointi- ja siirtoväline, jolla voi olla merkittävä rooli kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Mikrobiologisessa biovedyn tuotannossa rasvahappojen tuotanto on kilpaileva prosessi vedyn tuotannon kanssa ja siksi muodostuvien happojen monitorointi onkin ensiarvoisen tärkeää prosessin toimivuuden näkökulmasta arvioituna. Lisäksi muodostuneiden metaboliatuotteiden jakauma on tärkeä arvioitaessa biovedyn tuoton tehokkuutta. Erilaisista bakteerikannoista ja operointiolosuhteista riippuen erilaisten substraattien kohdalla lopputuotteet ja niiden jakaumat voivat olla hyvinkin erilaisia. Todennäköisyyslaskennan avulla prosessia arvioitaessa, havaittiin kaasukomponenttien biovedyn ja hiilidioksidin välillä suhteellisen korkea riippuvuus korrelaation ollessa 0,86 viikkotasolla.

Luonnonvarakeskuksen (Luke) hankeosiossa tarkasteltiin metsäteollisuudesta peräisin olevien kuitupitoisten sivuvirtojen käyttöä maanparannusaineina karkeilla kivennäismailla. Kolmivuotisen kenttäkokeen, maamonoliiteilla toteutetun läpivaluntakokeen ja erillisten laboratoriokoesarjojen avulla tuotettiin laaja-alaisesti tietoa maanparannuskuitujen sato- ja maaperävaikutuksista. Laboratoriokoesarjoissa oli mukana myös muita korkeahiilisiä lisäysmateriaaleja. Laboratoriokokeiden perusteella maanparannuskuiduilla, mutta myös kuiva-ainepitoisella jakeella oli potentiaalia parantaa karkean kivennäismaan kykyä varastoida kasveille saatavilla olevaa vettä. Jatkokysymyksenä olisikin tarkastella ruutukoemittakaavassa runsashiilisten maanparannusaineiden vaikutuksia kasveille käyttökelpoisen veden määrään karkeilla peltomailla. Positiivisten maaperävaikutusten sekä kuitulevitysten jälkiseurantavuosina saavutettujen satohyötyjen takia on maanparannuskuitujen käyttö karkeilla kivennäispelloilla suositeltavaa. Maanparannuskuitujen hajoaminen oli kuitenkin verrattain nopeaa aktiivisen mikrobitoiminnan seurauksena, minkä takia niiden levityksiä olisi uusittava suotuisten maanparannusvaikutusten yllä-

pitämiseksi. Nurmenviljelyssä jatkokysymyksenä olisi tutkia vaikutuksia, kun lohkolle soveltuvien maanparannuskuitujen levitys toistetaan nurmen perustamisen yhteydessä ja nurmivuosien aikana käytetään orgaanisia lannoitteita.

Itä-Suomen yliopiston hankeosuuden tuloksista tehtiin seuraavia johtopäätöksiä. Kivihiili- ja biomassapohjaisille tuhille löydettiin kirjallisuusselvityksen perusteella useita käyttömahdollisuuksia eri sovelluksissa, mutta toisaalta selvitysten perusteella tuhkan käytössä on useita huomioitavia rajoituksia ja mm. tuhkan raskasmetallipitoisuus rajoittaa pelloille levitettävän tuhkan määrää, kuten havaittiin tässäkin hankkeessa. UEF ja yhteistyökumppanit tuottivat hankkeen aikana suuren määrän ominaisuuksiltaan erilaisia biohiiliä ja -nestettä, joille on hankkeessa tehtyjen analyysien perusteella tiedossa lukuisia eri sovelluskohteita. Kasvatuskokeissa saavutettiin lupaavia tuloksia turpeettomilla kasvualustoilla, joissa taimien itävyys ja kasvu oli samalla tasolla tai jopa parempaa kuin kaupallisilla verrokeilla. Kasvualustakokeita kannattaa jatkaa yhdessä loppukäyttäjien kuten kasvihuoneyrittäjien ja metsäpuuntaimittajien kanssa. Biohiilikomposiittitutkimuksessa havaittiin, että eri hiilierilä on merkittävä vaikutus komposiittimateriaalin mekaanisiin ja sähköisiin ominaisuuksiin, ja varsinkin biohiilen sähkönjohtavuus on mielenkiintoinen jatkotutkimuskohde. Lietelannan kaasupäästöjen vähentämiseen liittyvässä tutkimuksessa erilaisilla tislekäsittelyillä ja biohiili- tai biomassakatteilla saavutettiin tietyillä materiaaliyhdistelmillä merkittäviä vähennyksiä varsinkin metaani- ja ammoniakkipäästöjen osalta. Vastaavan tutkimuksen toteutus isommassa mittakaavassa esim. maatilatason lietalantasäiliöllä talviaikana ja katemateriaalin vaikutuksen arvioiminen lietalannan peltolevityksen jälkeen ovat kiinnostavia jatkotutkimuksen aiheita.



## BIOSFÄÄRI POHJOIS-SAVO: BIOMASSAN JA BIOJALOSTUSTEKNOLOGIOIDEN HYÖDYNTÄMINEN LIIKETOIMINNAN KASVATTAMISESSA

**BIOSFÄÄRI-HANKKEEN** tavoitteena oli selvittää ja demonstroida Pohjois-Savossa syntyvien sivuvirtoja jatkojalostusmahdollisuuksia. Lisäksi hankkeessa tarkasteltiin valmiuksia sivuvirtojen kaupallistamiselle maanparannusaineiden ja kierrätyslannoitteiden raaka-aineina tai muissa sovelluksissa. Hanke toteutettiin tiiviissä yhteistyössä maakunnan keskeisten sivuvirtojen tuottajien, potentiaalisten kaupallistajien ja loppukäyttäjien kanssa. Biosfääri-hankeconsortioon kuuluivat Savonia-ammattikorkeakoulu, Itä-Suomen yliopisto ja Luonnonvarakeskus ja sitä toteutettiin aikavälillä 1.4.2020 – 31.3.2023. Biosfääri-hanke on saanut rahoituksen Pohjois-Savon Liitosta.

**BIOSFÄÄRI-HANKKEESSA** toteutettiin laaja-alaisesti pilotoineja ja kenttätestauksia yhdistäen toteuttajaorganisaatioiden infra ja osaamista uusien biopohjaisten materiaalien valmistuksessa, hyödyntämisessä ja kaupallistamisessa yhdessä paikallisten yritysten ja toimijoiden kanssa. Hankkeessa pystyttiin kehittämään ja pilotoimaan kustannustehokas toimintamalli hanketoimijoiden ja yritysten välille.

**ASTIAMITTAKAAVAN** kasvatuskokein testattiin ja tunnistettiin paikallisia alihyödynnettyjä sivuvirtoja kierrätyslannoitteena ja maanparannusaineena. Mikrobipohjaista biovedyn tuotantoa testattiin kasvibiomassoista ja vety nähdään lupaavana energian varastointi- ja siirtovälineenä. Biohiiliä ja nestejakeita tuotettiin termokemiallisilla prosessointimenetelmillä ja sivuvirroista prosessoituja tuotteita testattiin mm. komposiittien komponentteina, kasvualustoissa sekä kasvihuonekaasupäästöjen pienentämiseksi. Kolmivuotisen kenttäkokeen, erillisten laboratoriokoesarjojen ja maamonoliiteilla toteutetun läpivaluntakokeen avulla selvitettiin metsäteollisuudesta peräisin olevien kuitupitoisten sivuvirtojen käyttöä maanparannusaineina karkeilla kivennäispelloilla.



Euroopan unioni  
Euroopan aluekehitysrahasto  
Euroopan sosiaalirahasto

Vipuvoimaa  
EU:lta  
2014–2020

Pohjois-Savon liitto tukee  
maakunnan  
menestystä



Luke  
LUONNONVARAKESKUS

