



CITYLOOPS – KIERTO- TALOUTTA EDISTÄMÄSSÄ KANSAINVÄLISESTI

Hanne Soininen & Vuokko Malk (toim.)



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Hanne Soininen & Vuokko Malk (toim.)

CITYLOOPS – KIERTOTALOUTTA EDISTÄMÄSSÄ KANSAINVÄLISESTI



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No. 821033.

Disclaimer: The sole responsibility for any error or omissions lies with the editor. The content does not necessarily reflect the opinion of the European Commission. The European Commission is also not responsible for any use that may be made of the information contained herein.

XAMK KEHITTÄÄ 221

KAAKKOIS-SUOMEN AMMATTIKORKEAKOULU
MIKKELI 2023

Mikkeli oli mukana kansainvälisessä CityLoops – Closing the loop for urban material flows -hankkeessa, jossa seitsemän eurooppalaista kaupunkia – Apeldoorn, Bodø, Mikkeli, Porto, Sevilla, Høje-Taastrup ja Roskilde – pilotoivat uusia kiertotalouskokeiluja. Demonstraatiot keskittyivät Euroopan kahteen tärkeimpään jätevirtaan: rakennus- ja purkujätteeseen sekä biojätteeseen. Tavoitteena oli vauhdittaa kaupunkien siirtymää kiertotalouteen. Hankkeen toteutuksesta Mikkeliissä vastasivat Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu Xamk ja Mikkelin kehitysyhtiö Miksei Oy. Hanke alkoi 1.10.2019 ja päättyi 30.9.2023. Hanketta koordinoi saksalainen ICLEI – Local Government for Sustainability, ja se sai rahoitusta Euroopan unionin Horisontti 2020 -tutkimus- ja innovaatio-ohjelmasta (Grant Agreement No. 821033).

© Tekijät ja Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

Kannen kuva: Manu Eloaho

Taitto ja paino: Grano Oy

ISBN: 978-952-344-541-3 (PDF)

ISSN: 2489-3102 (verkko)

julkaisut@xamk.fi

TIIVISTELMÄ

Rakennus- ja purkujäte sekä biojäte ovat kaksi tärkeää jätevirtaa Euroopassa. Suomessa sekajätteen joukossa on edelleen noin kolmannes biojätettä, joka päätyy polttoon sekajätteen mukana. Erilliskeräystä tehostamalla biojätteestä voidaan tuottaa yhä enemmän biokaasua, multatuotteita ja kierrätyslannoitteita. Purettavia rakennuksia taas voidaan pitää jätteen sijaan materiaalipankkeina. Kierrättämällä ja uudelleenkäyttämällä materiaaleja voidaan vähentää neitseellisten materiaalien tarvetta sekä minimoida energiankulutus ja päästöt uusien materiaalien valmistuksessa.

Mikkeli oli mukana kansainvälisessä CityLoops – Closing the loop for urban material flows -hankkeessa (Grant Agreement No. 821033), jossa seitsemän eurooppalaista kaupunkia pilotoivat uusia rakennus- ja purkujätteeseen sekä biojätteeseen liittyviä kiertotalouskokeiluja. Mikkeliissä haluttiin tehostaa biojätteen lajittelua sekä optimoida biokaasuprosessia ja ravinteiden talteenottoa. Peitsarin pilot-alueella toteutettu tiedotuskampanja biojätteen lajittelun tehostamiseksi toimi onnistuneesti, sillä biojätteen osuus sekajätteessä laski 35 prosentista 27 prosenttiin ja erilliskerätyn biojätteen määrä kasvoi keskimäärin 47 prosenttia asukasta kohden lähtötasoon verrattuna. Biojätteen lajitteluun kannustavaa viestintää tehtiin myös laajemmin koko Mikkelin alueella useissa tapahtumissa.

Laboratorio- ja pilot-mittakaavan kokeissa testattiin muun muassa biohiilen vaikutusta biokaasun määrään ja laatuun ja elektrokemiallista menetelmää fosforin talteenottoon mädätteen nestejakeesta. Pullopanoskokeissa onnistuttiin yhden prosentin biohiililäisyyksellä vähentämään kolmannes muodostuneesta rikkivedystä verrattuna rinnakkaisreaktoriin, johon ei ollut lisätty biohiiltä. Biojättemädätteen nestejakeesta onnistuttiin saostamaan fosfaattia elektrokemiallisesti, mutta menetelmä vaati moniportaisen esikäsittelyn, mikä on vielä haaste kustannustehokkaalle täyden mittakaavan prosessille. Biojätteen mädänteille tehtiin myös rakeistus-, ekotoksisuus- ja kasvatuskokeita.

Rakennus- ja purkujätteen demonstraatioissa seurattiin kahden Mikkelin kaupungin purku-kohteen, Pankalammen terveyskeskuksen ja Tuukkalan sairaalan, purkuprosessia. Kohteissa kokeiltiin materiaalivirtojen seurantaan uusia työkaluja, kuten purkukartoitusta, drone-monitorointia ja 3D-mallinnusta, sekä selvitettiin purkamisen ympäristö- ja terveysvaikutuksia. Droonien hyödyntäminen ja tilavuuksien määrittäminen kuva-aineistosta muodostetusta 3D-mallista voi olla kustannustehokas vaihtoehto materiaalimäärien arvioinnille. Purkutyön vaikutus näkyi selvästi Pankalammen työmaalta otetuissa hulevesinäytteissä, ja tulevaisuuden rakennus- ja purkuhankkeissa tulisi kiinnittää huomiota hulevesien laatuun erityisesti herkkien vesistöjen läheisyydessä. Kiertotalouden kehittämiseksi järjestettiin useita webinaareja ja työpajoja, luotiin uusia liiketoimintamalleja ja laadittiin hankintaohjeita, jotka edistävät kestävästä kehityksestä periaatteiden mukaisia hankintoja.

CityLoops-hanke antoi hienon mahdollisuuden nähdä, miten kiertotalous kehittyy eri puolilla Eurooppaa. Kansainvälinen yhteistyö nosti esiin useita uusia tutkimus- ja kehitystarpeita, joiden parissa työskentelyä jatketaan Mikkelissä.

Asiasanat: kiertotalous, biojätteet, biokaasu, rakennusjätteet, monitorointi, 3D-mallinnus, droonit, ympäristövaikutukset, kansainvälisyys, Eurooppa

ABSTRACT

Construction and demolition waste and biowaste are two of Europe's most important waste streams. In Finland, approximately one-third of mixed waste is biowaste that ends up incinerated. By improving the separate collection of biowaste, more biogas, soil products and recycled fertilizers can be produced from biowaste. Buildings to be demolished can be seen as material banks instead of waste. By recycling and reusing materials, the need for virgin materials can be reduced, and energy consumption and emissions in the production of new materials can be minimized.

Mikkeli was involved in the international 'CityLoops - Closing the loop for urban material flows' project (Grant Agreement No. 821033), where seven European cities piloted actions to close the loop of construction and demolition waste, and biowaste. In Mikkeli, the aim was to improve biowaste collection and optimize the biogas process and nutrient recovery. The campaigning in the Peitsari pilot area was successful: the proportion of biowaste in mixed household waste decreased from 35 % to 27 %, and the amount of separately collected biowaste increased by an average of 47 % per resident compared to the baseline. Further, the sorting of biowaste was promoted at several other events throughout Mikkeli.

The laboratory and pilot-scale experiments were carried out to test, among other things, the effect of biochar on the production and quality of biogas and the recovery of phosphorus by electrochemical method from the liquid fraction of digestate. The addition of 1 % biochar reduced about one-third of the hydrogen sulfide from biogas in the bottle batch reactors compared to a parallel reactor where no biochar was added. It was possible to electrochemically precipitate phosphate from the liquid fraction of biowaste digestate. Still, the method required many pre-treatment steps, which is a challenge for a cost-effective full-scale process. Granulation, ecotoxicity, and growth tests were also performed on biowaste digestates.

The demonstration of construction and demolition waste involved the demolition of two public buildings: Pankalampi Health Care Center and Tuukkala Hospital. New tools for monitoring material flows, such as pre-demolition audit, drone monitoring, and 3D modeling were demonstrated at the sites, and the environmental and health effects of demolition were investigated. Using a drone and 3D modeling to monitor demolition waste flows can be a cost-effective alternative in evaluating the amounts of material flows. The impact of the demolition work was visible in the stormwater samples taken from the Pankalampi demolition site. In future construction and demolition projects, attention should be paid to the quality of stormwater, especially in the vicinity of vulnerable water bodies. To develop the circular economy, several webinars and workshops were organized, and new business cases were created. Procurement guidelines were drawn up to promote sustainable development in public procurement.

The CityLoops project provided an excellent opportunity to see how the circular economy is developing in different parts of Europe. The international cooperation highlighted many new research and development needs, which will be studied in Mikkeli in the future.

Keywords: circular economy, biowaste, biogas, construction waste, monitoring, 3D modeling, drones, environmental effects, internationality, Europe

KIRJOITTAJAT

JONNE GRÅSTEN, FM, kehityspäällikkö
Metsäsairila Oy

KIMMO HAAPEA, KTM, kehityspäällikkö
Mikkelin kehitysyhtiö Miksei Oy

SAIJA HIMANEN, rakennuttajapäällikkö
Mikkelin kaupunki

LASSE HÄMÄLÄINEN, insinööri (AMK), tutkimusinsinööri
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

MIIKA HÄMÄLÄINEN, tradenomi (AMK), projektitutkija
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

SHILA JAFARI, TkT, tutkimusinsinööri
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

JANNE JUNNINEN, FM-opiskelija, tutkimusapulainen
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

JOHANNA JÄRVINEN, ympäristötekniikan insinööri, kiertotalousasiantuntija
Mikkelin kehitysyhtiö Miksei Oy

HENRI KETTUNEN, insinööri (AMK), projektitutkija
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

TOMMI KUVAJA, kiinteistöpäällikkö
Mikalo Oy

ANNE LAITINEN, insinööri (AMK), jäteneuvoja
Metsäsairila Oy

ILKKA LILJANDER, hankinta-asiantuntija
Mikkelin kehitysyhtiö Miksei Oy

VUOKKO MALK, FM, TKI-asiantuntija

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

MINTTU PAAKKARI, insinööri (AMK), tutkimusapulainen

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

LEENA PEKURINEN, insinööri (YAMK), projektitutkija

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

TIINA SAARIO, DI, projektitutkija

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

SARI SEPPÄLÄINEN, ins. (AMK), laboratorioinsinööri

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsätalouden ja ympäristötekniikan koulutusyksikkö

HANNE SOININEN, TkT, tutkimusryhmäpäällikkö

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

JUHA VIHAVAINEN, insinööri (AMK), tutkimusinsinööri

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ.....	3
KIRJOITTAJAT	7
CITYLOOPS-HANKKEELLA KEHITETTIIN KIERTOTALOUTTA KANSAINVÄLISESTI.....	11
Vuokko Malk & Hanne Soininen & Kimmo Haapea & Johanna Järvinen & Ilkka Liljander	
BIOJÄTTEIDEN KERÄYS JA KIERRÄTYS SUOMESSA JA MIKKELISSÄ	15
Vuokko Malk & Leena Pekurinen	
BIOJÄTTEEN LAJITTELUN KEHITTÄMINEN PEITSARIN PILOT-ALUEELLA.....	36
Vuokko Malk & Hanne Soininen & Tiina Saario & Johanna Järvinen & Anne Laitinen & Jonne Gråsten & Tommi Kuvaja	
KUINKA VIESTIÄ BIOJÄTTEISTÄ KIINNOSTAVASTI?	51
Johanna Järvinen	
TÄYSIMITTAISEN BIOKAASULAITOKSEN PROSESSI JA TOIMINTA – BIOSAIRILA OY	55
Leena Pekurinen & Vuokko Malk & Hanne Soininen & Jonne Gråsten	
BIOJÄTTEEN LAADUN JA KÄSITTELYN VAIKUTUS BIOKAASULAITOKSEN OPTIMOINNISSA.....	62
Tiina Saario & Vuokko Malk & Hanne Soininen & Shila Jafari	
BIOKAASULAITOKSEN MÄDÄTTEEN TUOTTEISTAMINEN LANNOITERAKEIKSI JA KASVUALUSTOIKSI.....	79
Vuokko Malk & Tiina Saario & Janne Junninen & Hanne Soininen	
ALIIVIBRIO FISCHERI -EKOTOKSISUUSTESTIT APUNA TUOTTEIDEN TURVALLISEN KÄYTÖN VARMISTAMISESSA	94
Vuokko Malk & Minttu Paakkari	
FOSFORIN TALTEENOTTO MÄDÄTTEEN NESTEJAKEESTA ELEKTROKEMIALLISELLA MENETELMÄLLÄ	111
Janne Junninen & Leena Pekurinen	
PURKUTYÖMAIDEN PÖLYPÄÄSTÖJEN YMPÄRISTÖ- JA TERVEYSVAIKUTUKSIEN MONITOROINTI	140
Juha Vihavainen & Lasse Hämäläinen & Sari Seppäläinen & Vuokko Malk & Hanne Soininen & Saija Himanen & Jonne Gråsten	

PURKUTYÖMAAN HULEVESIEN MONITOROINTIA.....	160
Juha Vihavainen & Lasse Hämäläinen & Vuokko Malk & Hanne Soininen	
RAKENNUSMATERIAALIEN HAITTA-AINEET.....	176
Leena Pekurinen & Juha Vihavainen & Vuokko Malk	
DEMONSTRAATIOKOKOITA RAKENNUSTEN PURKUTYÖMAIDEN MATERIAALIVIRTOJEN MONITOROINNISTA DROONEILLA	185
Juha Vihavainen & Henri Kettunen & Vuokko Malk	
SOVELLUSKEHITYKSEN VALMISTELU.....	201
Miika Hämäläinen	
PURKUMATERIAALIEN KIERRÄTYKSEN JA UUDELLEENKÄYTÖN VAIKUTUKSET CO ₂ -PÄÄSTÖIHIN.....	205
Vuokko Malk	

CITYLOOPS-HANKKEELLA KEHITETTIIN KIERTOTALOUTTA KANSAINVÄLISESTI

Vuokko Malk & Hanne Soininen & Kimmo Haapea
& Johanna Järvinen & Ilkka Liljander

Mikkeli oli mukana kansainvälisessä CityLoops – Closing the loop for urban material flows -hankkeessa, jossa seitsemän eurooppalaista kaupunkia – Apeldoorn, Bodø, Mikkeli, Porto, Sevilla, Høje-Taastrup ja Roskilde – pilotoivat uusia kiertotalouskokeiluja. Demonstraatiot keskittyivät Euroopan kahteen tärkeimpään jätevirtaan: rakennus- ja purkujätteeseen sekä biojätteeseen. Tavoitteena oli vauhdittaa kaupunkien siirtymää kiertotalouteen. Hankkeen toteutuksesta Mikkeliissä vastasivat Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu Xamk ja Mikkelin kehitysyhtiö Miksei Oy. Hanke alkoi 1.10.2019 ja päättyi 30.9.2023. Hanketta koordinoi saksalainen ICLEI – Local Government for Sustainability, ja se sai rahoitusta Euroopan unionin Horisontti 2020 -tutkimus- ja innovaatio-ohjelmasta (Grant Agreement No. 821033).

BIOJÄTTEEN LAJITTELULLA ENERGIA JA RAVINTEET KIERTOON

Mikkelin biojätedemonstraatioiden tavoitteena oli edistää biokaasun ja ravinteiden talteenottoa biojätteestä ja luoda liiketoimintamahdollisuuksia paikallisille yrityksille. Demonstraatiossa 1 aktivoitiin alueen asukkaita lajittelemaan biojätteitä tehokkaammin. Peitsarin pilot-alueella asukkaille jaettiin paperisia biojätepusseja ja tietoa lajittelusta. Lisäksi tehtiin sekajätteen koostumustutkimuksia sekä monitoroitiin sekajätteen ja erilliskerätyn biojätteen määriä. Biojätteen lajitteluun kannustavaa viestintää tehtiin myös laajemmin koko Mikkelin alueella useissa tapahtumissa.

Demonstraatio 2 puolestaan keskittyi biokaasuprosessin optimointiin ja lopputuotteiden hyödyntämiseen. Laboratorio- ja pilot-mittakaavan kokeissa tutkittiin muun muassa biohiilen vaikutusta biokaasun määrään ja laatuun ja elektrokemiallista menetelmää fosforin talteenottoon mädätteen nestejakeesta. Lisäksi mädätteille tehtiin rakeistus-, ekotoksisuus- ja kasvatuskokeita. Liiketoimintaedellytyksiä arvioitiin teknistaloudellisen arvioinnin avulla ja kaupungille laadittiin hankintaohjeita kiertotalouden huomioimiseksi julkisissa hankinnoissa.

Demonstraatioiden toimenpiteiden tuloksia on jalkautettu alueellisesti, kansallisesti ja kansainvälisesti eri toimijoiden kesken. Tuloksia on esitelty webinaareissa, seminaareissa, Mikkelin kiertotalouspäivillä ja sidosryhmäpalaverissa.

PURKAMISESTA KIERTOTALOUTEEN

Rakennus- ja purkujätteen demonstraatiossa seurattiin kahden Mikkelin kaupungin purku-kohteen, Pankalammen terveyskeskuksen ja Tuukkalan sairaalan, purkuprosessia. Kohteissa kokeiltiin materiaalivirtojen seurantaan uusia työkaluja, kuten purkukartoitusta, drone-monitorointia ja 3D-mallinnusta. Materiaalitiedoille kehitettiin datapankki ja kierto-*fi*-kauppapaikka. Uudelleenkäytöllä ja kierrätyksellä saavutettavia päästöhyötyjä arvioitiin CO₂-päästölaskureilla.

Kohteissa selvitettiin myös purkamisen ympäristö- ja terveysvaikutuksia. Sisäpurkuvaiheen aikana tehtiin työhygieenisii mittauksia ja koneellisen ulkopurun aikana mitattiin purkutyömaiden aiheuttamaa ulkoilman pölylaskeumaa. Pankalammen terveyskeskuksen purkutyömaalta otettiin lisäksi näytteitä työmaan aikaisista hulevesistä ja purkukohteiden materiaalinäytteistä analysoitiin haitallisia aineita.

Kiertotalouden kehittämiseksi järjestettiin useita webinaareja ja työpajoja (kuva 1), joissa jaettiin tietoa kansallisista ja kansainvälisistä kiertotalouskokeiluista ja keskusteltiin yrittäjien, viranomaisten ja päätöksentekijöiden kanssa toimenpiteistä rakennusmateriaalien kierrätyksen ja uudelleenkäytön edistämiseksi. Kiertotalousliiketoiminnan lisäämiseksi luotiin uusia liiketoimintamalleja. Kaupungin purkuprojekteja varten laadittiin hankinta-ohjeet, jotka edistävät kestäväⁿ kehityksen periaatteiden mukaisia hankintoja.



KUVA 1. CityLoops-hankkeen toimijoita loppuwebinaarissa ja työpajassa, joka järjestettiin Mikkeliissä 6.9.2023 (kuva Salla Pulliainen).

YHTEISTYÖSSÄ ALUEEN YRITYSTEN JA MUIDEN TOIMIJOIDEN KANSSA

Demonstraatiot toteutettiin yhteistyössä sidosryhmien kanssa, joita olivat muun muassa Mikkelin kaupunki, purku-urakoitsijat, jätehuolto-yritys Metsäsairila Oy, biokaasuyhtiö BioSairila Oy, kunnallinen vuokratiloyhtiö Mikalo Oy, Lassila & Tikanoja Oyj, Etelä-Savon Energia Oy, Etelä-Savon ELY-keskus, Mikkelin seudun ympäristöpalvelut, Mikkelin Toimintakeskus ry, Etelä-Savon ammattiopisto Esedu sekä Mikkelin asukkaat. Sidosryhmät olivat aktiivisesti mukana demonstraatioiden suunnittelussa ja toteutuksessa.

CityLoops-hanke antoi hienon mahdollisuuden nähdä, miten kiertotalous kehittyy eri puolilla Eurooppaa. Eri pilot-kaupungeissa toteutettiin mielenkiintoisia demonstraatioita, joista on mahdollisuus ottaa oppia Mikkeliissä myös CityLoops-hankkeen jälkeen. Hankkeen kansainväliset tulokset on koottu verkkosivulle www.cityloops.eu.

Nelivuotisen hankkeen aikana on voitu selvästi havaita, miten Mikkelissä on edetty siirtymässä kohti kiertotaloutta. CityLoops-hankkeen alussa Mikkelin kaupunki allekirjoitti kaupunkien kiertotalousjulistuksen. Biojätteen kiertotalous ja materiaalien kierrätys rakentamisessa on myös nostettu selvästi esiin kaupungin ilmasto-ohjelmassa vuosille 2022–2035. Työ kiertotalouden kehittämiseksi Mikkelissä jatkuu yhteistyökumppaneiden kanssa. CityLoops-hanke nosti esiin useita uusia tutkimus- ja kehitystarpeita, joiden parissa työskentelyä jatketaan uusissa avauksissa.

CityLoops-hankkeen toteuttajat kiittävät rahoittajaa, hankekumppaneita ja sidosryhmiä aktiivisesta osallistumisesta ja yhteisen tutkimus- ja kehittämistoiminnan mahdollistamisesta.

BIOJÄTTEIDEN KERÄYS JA KIERRÄTYS SUOMESSA JA MIKKELISSÄ

Vuokko Malk & Leena Pekurinen

Jätteiden lajittelu on kiertotalouden ydin. Suomessa jätteiden lajittelu on hyvällä tasolla, mutta meillä on vielä matkaa hallituksen ja EU:n asettamien tavoitteiden saavuttamiseen. CityLoops-hankkeen aikana Suomen jätelainsäädäntö ja valtakunnallinen jätesuunnitelma ovat uudistuneet kuten myös Mikkelin jätehuoltomääräykset. Lisäksi hankkeen aikana Mikkeli aloitti toimintansa uusi biojätteitä käsittelevä biokaasulaitos. Näillä uudistuksilla on ollut merkittäviä vaikutuksia biojätteiden kiertotalouteen niin valtakunnallisesti kuin alueellisesti.

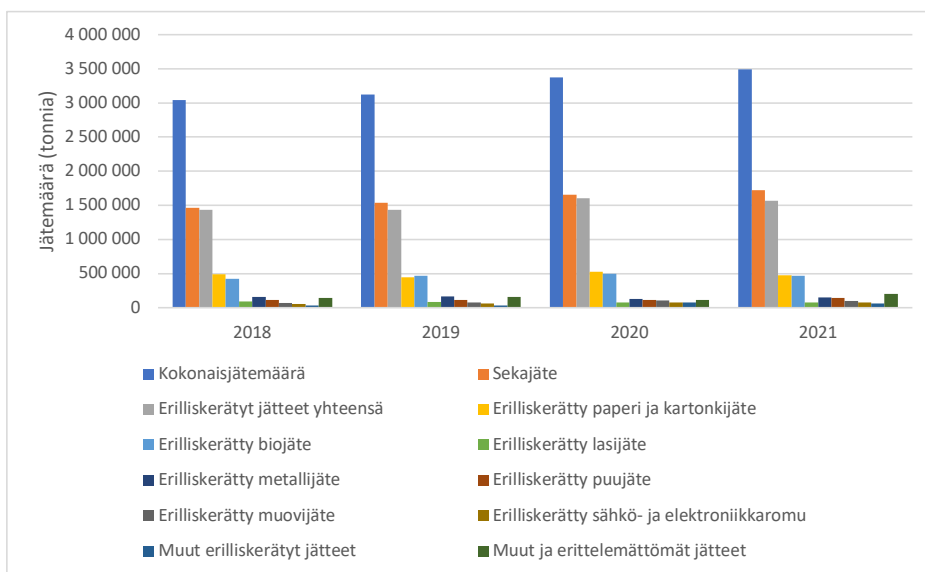
Tässä artikkelissa kerrotaan Suomen jätehuollosta, jätemääristä ja erityisesti biojätteen keräyksen ja käsittelyn järjestämisestä. Erikseen on tarkasteltu jätteiden keräystä ja käsittelyn järjestämistä Mikkeli. Lisäksi on koottu tietoa Suomessa ja Mikkeli aikaisemmin toteutetuista lajittelukokeiluista ja koostumustutkimuksista. Nämä tiedot toimivat taustatietona CityLoops-hankkeen demonstraatioiden suunnittelussa. Artikkelin tietolähteinä on käytetty kirjallisuutta, tilastotietoja ja sidosryhmien (jäteyhtiö ja Mikkelin kaupunki) tietoja.

Suomen jätepolitiikan tavoitteena on edistää luonnonvarojen kestäväää käyttöä ja varmistaa, että jätteistä ei aiheudu haittaa terveydelle eikä ympäristölle. Jätehierarkian mukaan on ensisijaisesti pyrittävä välttämään jätteen syntymistä. Syntynyt jäte tulisi mieluiten käyttää uudelleen. Jos tämä ei ole mahdollista, jäte tulee ottaa talteen uusien tuotteiden aineena (primäärinen) tai muuntaa energiaksi (sekundäärinen). Vain ei-hyödynnettävä jäte voidaan sijoittaa kaatopaikalle. (Ympäristöministeriö s.a.a.) Jätehuollossa on käytettävä parasta käyttökelpoista tekniikkaa sekä torjuttava mahdollisimman hyvin jätteiden aiheuttamia ympäristö- ja terveyshaittoja. (Ympäristöministeriö 2023)

YHDYSKUNTAJÄTEMÄÄRÄT SUOMESSA

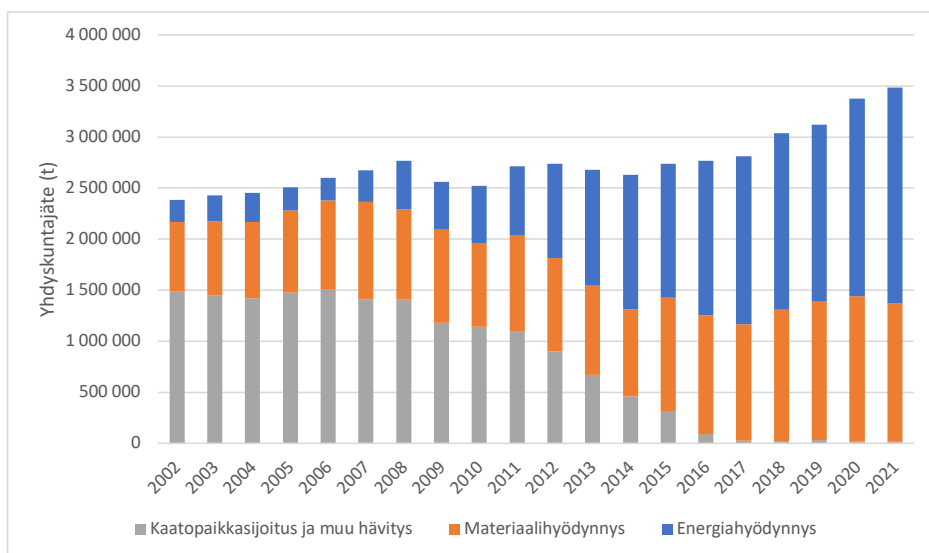
Suomessa Tilastokeskus ylläpitää jätetilastoa, joka kuvaa muun muassa jätemäärien ja jätteiden käsittelytapojen muutoksia. Tiedot kerätään useista lähteistä ja päivitetään teollisuuden osalta kerran vuodessa, muutoin epäsäännöllisesti. (Tilastokeskus 2023) Viimeisin jätetilasto on vuodelta 2021. Sen mukaan vuonna 2021 yhdyskuntajätettä kertyi lähes 3,5 miljoonaa tonnia (kuva 1). Yhdyskuntajätteeksi katsotaan asumisessa syntyvien jätteiden

lisäksi niihin rinnastettavat kaupan, teollisuuden ja palveluiden jätteet, kuten toimistoista ja ruokaloista kertyvät jätteet. Yhdyskuntajätteen määrä on ollut kasvussa Suomessa. Esimerkiksi vuonna 2018 yhdyskuntajätteen määrä oli noin 550 kiloa ja vuonna 2021 jo 609 kiloa asukasta kohden laskettuna. (Tilastokeskus 2022) Erilliskerätyn biojätteen määrä on pysynyt viimeisten tilastointivuosien ajan suhteellisen tasaisena. Vuonna 2021 määrä pieneni hieman edellisvuoteen verrattuna.



KUVA 1. Kiinteä yhdyskuntajäte Suomessa vuosina 2018–2021 (lähde: Tilastokeskus 2023, Jätetilasto).

Yhdyskuntajätteestä puolet on sekajätettä, joka käsitellään jätteenpolttolaitoksissa. Jätteiden energiahyödyntäminen on vuodesta 2012 asti ollut merkittävin yhdyskuntajätteen käsitelymuoto. Vuonna 2021 sen osuus kasvoi 62 prosenttiin. Jätteiden materiaalihyödynnyksen osuus vuonna 2021 oli 37 prosenttia, ja määrä laski edellisvuodesta. Vähentämää vastaava jätemäärä ohjautui energiahyödyntämiseen. Vuonna 2021 kaatopaikkasijoituksen entuudestaan jo hyvin pieni osuus väheni noin 0,4 prosenttiin yhdyskuntajätteen kokonaismäärästä. (Tilastokeskus 2022) Kuvassa 2 on esitetty, kuinka yhdyskuntajätteet on käsitelty Suomessa vuosina 2002–2021.



KUVA 2. Yhdyskuntajäte käsittelytavoittain Suomessa vuosina 2002–2021 (lähde: Tilastokeskus 2023, Jätetilasto).

KOTITALOUSJÄTTEET

Tilastokeskuksen jätetilastosta ei saada alueellista tietoa jätteen kertymisestä eikä esimerkiksi kotitalousjätteen kierrätysasteesta tai kotitalouksissa syntyvän biojätteen määristä. Suomen ympäristökeskus on osana EU-rahoitteista Circwaste-hanketta selvittänyt yhdyskuntajätteen määrää ja kierrätysastetta eri kunta-alueilla. Tiedot yhdyskuntajätteistä kotitalousjätteineen toimittivat jätehuoltoyhtiöt seitsemältä kunnalliselta alueelta: Hyvinkää, Joensuu, Jyväskylä, Kuopio, Lappeenranta, Porvoo ja Riihimäki. Tutkituilla kunta-alueilla kotitalousjätteen määrä vuonna 2017 oli keskimäärin 342 kiloa asukasta kohden ja kierrätysaste oli hieman yli 51 prosenttia. Vuonna 2016 vastaavat luvut olivat 344 kiloa ja vajaat 50 prosenttia. (Suomen ympäristökeskus 2018)

Kotitalouksien biojätteen keskimääräinen vuotuinen määrä yllä mainituilla kunta-alueilla oli 54 kiloa asukasta kohden, josta erilliskerätyn biojätteen osuus oli keskimäärin 50 prosenttia (taulukko 1). Kunta-alueiden välillä oli suuria eroja sekä biojätteen määrässä että kierrätysasteessa. Biojättemäärien laskennan tietolähteinä olivat jätehuoltoyhtiöiltä saadut tiedot ja arviot kotikompostoitujen ruokajätteiden määrästä. Kierrätysaste on saatu jakamalla erilliskerätyn biojätteen ja kotikompostoitujen ruokajätteiden määrä kotikompostoitujen ruokajätteiden ja sekajätteen sisältämän biojätteen määrällä. (Circwaste 2018) Tarkemmat laskentakriteerit löytyvät Circwaste-hankkeen verkkosivuilta osoitteesta <https://www.materiaalitkiertoon.fi/fi-FI/Seuranta/Kotitalousjatteen>.

Taulukko 1. Kotitalouksien biojätteen määrä ja kierrätysaste seitsemällä kunta-alueella (Circwaste 2018).

	2016				2017			
	Kierrätetty	Ei-kierrätetty	Biojätteen kokonais-määrä	Kierrätys-aste %	Kierrätetty	Ei-kierrätetty	Biojätteen kokonais-määrä	Kierrätys-aste%
	kg / asukas	kg / asukas	kg / asukas		kg / asukas	kg / asukas	kg / asukas	
Hyvinkää	14	26	40	35 %	13	26	39	33 %
Joensuu	20	20	40	50 %	23	21	44	52 %
Jyväskylä	53	25	78	68 %	54	24	78	69 %
Kuopio	39	37	76	51 %	38	41	79	48 %
Lappeen-ranta	43	22	65	66 %	44	21	65	68 %
Porvoo	16	20	36	44 %	15	20	35	43 %
Riihimäki	14	26	40	35 %	13	26	39	33 %
Keskiarvo	28	25	54	50 %	29	26	54	50 %

LAINSÄÄDÄNNÖN VAATIMUKSET JA KIERRÄTYKSEN TAVOITTEET

Lainsäädäntöä kehitetään jatkuvasti vastaamaan yhteiskunnan muutoksia ja tarpeita. Lainsäädäntö on avainasemassa myös ympäristönsuojelutavoitteiden saavuttamisessa. Kansallinen lainsäädäntö noudattaa tiukasti EU-lainsäädäntöä.

EU-DIREKTIIVIT

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivit kuuden jätealan direktiivin uudistamisesta julkaistiin EU:n virallisessa lehdessä 14.6.2018. Jätedirektiivien uudistuksen keskeisenä tavoitteena oli asettaa uudet, nykyistä kunnianhimoisemmat tavoitteet yhdyskuntajätteen ja pakkausjätteen uudelleenkäytön valmistelulle ja kierrätykselle sekä yhdyskuntajätteen kaatopaikkakäsittelyn vähentämiselle. (Ympäristöministeriö s.a.a.)

Lainsäädännössä on asetettu muun muassa yhdyskuntajätteen uudelleenkäyttöä ja kierrätystä lisäävät tavoitteet jäsenmaille: 55 prosenttia vuoteen 2025 mennessä, 60 prosenttia vuoteen 2030 mennessä ja 65 prosenttia vuoteen 2035 mennessä. Jäsenmaiden on tammikuun 2025 alkuun mennessä otettava käyttöön erilliskeräykset tekstiileille ja kotitalouksissa syntyneelle vaaralliselle jätteelle ja varmistettava, että 31.12.2023 mennessä biojäte joko kerätään erik-

seen tai kierrätetään sen syntypaikalla esimerkiksi kotikompostoimalla. Pakkausjätteelle on myös määritetty kierrätystavoitteet. Lainsäädäntö sisältää myös kaatopaikkasijoituksen vähentämistavoitteen ja vähimmäisvaatimukset laajennetun tuottajavastuun järjestelmille. (Eurooppa-neuvosto 2018)

Suomessa yhdyskuntajätteen kierrätysaste on pysynyt useita vuosia 40 prosentin tuntumassa. Kaatopaikoille sijoitettavan jätteen määrä on alle yksi prosentti, kun EU:n tavoite on alle kymmenen prosenttia. Suomessa on myös saavutettu pakkausjätteiden yleinen kierrätystavoite 65 prosenttia, vaikka yksittäisten jätelajien, kuten muovipakkausten, kierrätyksessä on parannettavaa. Suomen panttipullojärjestelmä sekä puulavojen uudelleenkäyttö- ja korjausjärjestelmä on nostettu esiin hyvinä esimerkkeinä muille EU:n jäsenmaille. (Valtioneuvosto 2023)

Erityisesti biojätteen ja muovin keräystä ja kierrätystä tulisi lisätä Suomessa. Myös jätteen määrää pitäisi vähentää uudelleenkäyttöä lisäämällä. Komissio on ehdottanut Suomelle kierrätyksen lisäämiseksi taloudellisia ohjauskeinoja, kuten jätteenpolton verottamista tai muuta maksua polttoon päätyvälle jätteelle. Lisäksi uusien jätettä polttavien laitosten rakentaminen tulisi estää. Jätteiden lajittelun kannustamiseksi suositellaan valtakunnallisia viestintäkampanjoita. (Valtioneuvosto 2023)

VALTAKUNNALLINEN JÄTESUUNNITELMA

EU:n jätepuitedirektiivi (2008/98/EY) edellyttää strategista jättesuunnitelmaa, jolla valvotaan syntyvän jätteen määrää ja vähennetään jätteen haitallisuutta kansallisella tasolla. Suomessa jättesuunnittelusta vastaa ympäristöministeriö ja suunnitelman käytäntöönpanosta Suomen ympäristökeskus. Uusin valtakunnallinen jättesuunnitelma astui voimaan vuonna 2022. Siinä esitetään jätehuollon ja jätteen synnyn ehkäisyn tavoitteita vuonna 2030 ja yksityiskohtaiset tavoitteet vuoteen 2027 sekä toimenpiteet tavoitteiden saavuttamiseksi. Tavoitteena on kierrätysasteen nostaminen vähintään EU:n kierrätystavoitteiden tasolle. Jättesuunnitelman toteutumista seurataan määrällisin indikaattorein sekä selvittämällä toimien toteutumista. Suomen ympäristökeskus kokoaa määrälliset indikaattoritiedot vuosittain. (Ympäristöministeriö s.a.b)

Jättesuunnitelma sisältää neljä painopistealuetta: yhdyskuntajätteet, biohajoavat jätteet, sähkö- ja elektroniikkalaiteromu sekä rakentamisen jätteet. Näissä jätevirroissa on erityisiä haasteita jätteen määrän ja haitallisuuden vähentämisessä sekä kierrätyksen edistämässä tulevien vuosien aikana. Biohajoavien jätteiden osalta todetaan, että biokaasun tuotantoa on tarpeen lisätä merkittävästi ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi. Suurin osa tuotetusta biokaasusta käytettäisiin polttoaineena liikenteessä, erityisesti raskaassa liikenteessä. Toimialan oman arvion mukaan ilmastotavoitteen saavuttaminen edellyttää vuoteen 2030 yli sataa uutta biokaasulaitosta eri puolille Suomea. (Ympäristöministeriö 2022)

Toimenpiteissä on lueteltu useita CityLoops-hankkeeseenkin kytkeytyneitä toimenpiteitä, muun muassa kiertotalouden edistäminen julkisten hankintojen avulla, neuvontapalveluiden kehittäminen ja viestintäkampanjat lajittelun lisäämiseksi, koostumustutkimukset jätteen koostumuksen selvittämiseksi, tutkimus- ja kehitystoiminta ravinteiden talteenoton tehostamiseksi sekä erilaiset (muun muassa digitaaliset) toimenpiteet seurantatiedon keräämiseksi.

Valtakunnallisen jätesuunnitelman lisäksi Suomessa on tehty erilaisia strategioita ja ohjelmia, jotka sivuavat jätehuoltoa ja valtakunnallista jätesuunnitelmaa. Esimerkiksi valtioneuvosto teki periaatepäätöksen kiertotalouden strategisesta ohjelmasta 8.4.2021. Tavoitteena on muutos, jolla kiertotaloudesta luodaan talouden perusta vuoteen 2035 mennessä. Ohjelmalla hallitus haluaa vahvistaa Suomen roolia kiertotalouden edelläkävijänä. (Ympäristöministeriö 2022)

KANSALLINEN LAINSÄÄDÄNTÖ

Suomen jätelainsäädäntö seuraa Euroopan unionin jätelainsäädännön kehitystä. Joiltain osin Suomen lainsäädäntö on kuitenkin EU-säädöksiä laaja-alaisempi ja tiukempi. Yleisiä säädöksiä ovat jätelaki (646/2011), valtioneuvoston asetus jätteistä (978/2021 sekä asetuksen muutos (526/2022) ja ympäristönsuojelulaki (527/2014) ja -asetus (713/2014). (Ympäristöministeriö s.a.c)

Jätelaki uudistettiin vuonna 2021. Uudistetun lain mukaan biojätteen keräys tulee pakolliseksi kaikille yli 10 000 asukkaan taajamissa asuville. Vuoden 2022 heinäkuusta lähtien biojätteen erilliskeräys on ollut pakollista myös taajamien vähintään viiden huoneiston rivi- ja kerrostaloissa. Biojätteen erilliskeräysvelvoite kaikille taajamissa asuville asukkaille astuu voimaan vuoden 2024 heinäkuusta. (Lampinen 2021) Biojätteen erilliskeräyksen voi korvata kiinteistöllä tapahtuvalla kompostoinnilla. Kompostoinnista on tehtävä kompostointi-ilmoitus kunnan jätehuoltoviranomaiselle.

Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista (331/2013) säädettiin vuonna 2013, ja biohajoavan ja orgaanisen jätteen sijoittamista kaatopaikalle koskevat rajoitukset tulivat sovellettavaksi 1.1.2016. Orgaanisen jätteen kaatopaikkakiellon takia yhdyskuntajätteen sijoittaminen kaatopaikalle on vähentynyt merkittävästi. Kiellon tavoitteena on edistää kierrätystä ja kehittää uusia jätteenkäsittelymenetelmiä. (Korhonen ym. 2018)

JÄTEHUOLLON JÄRJESTÄMINEN JA KUNNALLISET JÄTEHUOLTOMÄÄRÄYKSET

Jätehuollon järjestämisestä vastaa ensisijaisesti jätteen haltija. Lisäksi kunnilla sekä eräiden tuotteiden valmistajilla ja maahantuojilla on myös osaltaan vastuu jätehuollon järjestämisestä. Kunnilla on velvollisuus järjestää asumisessa syntyvän jätteen sekä kunnan hallinto- ja palvelutoiminnassa syntyvän yhdyskuntajätteen jätehuolto. Monet kunnat ovat antaneet

suurimman osan jätehuoltotehtävistään alueellisille jätehuoltoyhtiöille, jotka hankkivat tarvitsemansa palvelut yleensä kilpailuttamalla yksityisiä jätehuoltoyrittäjiä. Kunnat perivät jätehuollosta aiheutuvat kustannukset jätteen haltijalta. Jättemaksun täytyy kannustaa vähentämään jätteen määrää sekä huolehtimaan jätteistä jätelain etusijajärjestyksen mukaisesti. Tämän vuoksi useissa kunnissa lajitellusta, kierrätykseen kelpaavasta jätteestä peritään pienempi käsittelymaksu kuin sekalaisesta jätteestä. (Ympäristöministeriö 2023)

Kunnalliset jätehuoltomääräykset ovat paikallisia säännöksiä, jotka täydentävät jätelainsäädäntöä. Jätehuoltomääräysten tavoitteena on edistää jätelain ja sen uudistusten toimeenpanoa paikalliset olosuhteet huomioon ottaen. Kunnan jätehuoltoviranomainen hyväksyy jätehuoltomääräykset. Niillä on tärkeä asema jätehuollon käytännön toimeenpanossa kunnassa. Jätehuoltomääräykset koskevat esimerkiksi jätteiden lajittelua, keräämistä, kuljettamista sekä roskaantumisen ehkäisemistä. (Mikkelin kaupunki 2023)

Jätehuoltomääräykset koskevat kiinteistöjä, joiden jätehuolto kuuluu jätelain mukaisesti kunnan jätehuollon järjestämisvastuulle. Siten kaikkien kunnan asukkaiden sekä asumiseen ja kuntien julkiseen hallinto- ja palvelutoimintaan tarkoitettujen kiinteistöjen omistajien ja haltijoiden sekä soveltuvilta osin myös muiden toimijoiden on noudatettava jätehuoltomääräyksiä. Jätehuoltomääräyksillä voidaan laajentaa tai perustellusta syystä supistaa jäteasetuksessa määritettyjä erilliskeräysvelvoitteita. (Mikkelin kaupunki 2023)

BIOJÄTTEEN LAJITTELUN HAASTEET

Biojätteen erilliskeräyksellä on keskeinen rooli kierrätyksen lisäämisessä. Tällä hetkellä puolet suomalaisista käyttää biojäteastiaa tai kotikompostoria, mutta niitä tulisi käyttää tehokkaammin. (Suomen Kiertovoima ry 2020) Suomessa yli 30 prosenttia biojätteestä poltetaan sekajätteen mukana. Biojäte sekajätteen joukossa alentaa sekajätteen lämpöarvoa, ja biojätettä sisältävä sekajäte tuottaa vähemmän energiaa kuin sekajäte ilman biojätettä. Biojäte painaa paljon sen sisältämän kosteuden vuoksi, mikä lisää kuljetuskustannuksia. Kattilassa biojäte aiheuttaa korroosiota, kulumista ja nokea. Polttolaitoksia on huollettava useammin, mikä lisää kustannuksia. (Lounais-Suomen jätehuolto Oy s.a., Yle 2014) Biojätteen lajittelun haasteita on tunnistettu eri puolilla Suomea, ja samanlaiset haasteet ja syyt lajittelun tehottomuuteen toistuvat koko maassa.

Biorent-hanke teki kyselyn pääkaupunkiseudun vuokra-asuntoyhtiöistä. Kyselyn mukaan suurimmaksi haasteeksi biojätteen lajittelussa koettiin biojäteastian puuttuminen tai huonolaatuisuus. Biojätepussit olivat epäkäytännöllisiä tai muuten ongelmallisia. Osa vastaajista arvioi, että biojätettä syntyy kotitaloudessa niin vähän, että lajittelua ei katsottu tarpeelliseksi. Biojätteen lajitteluun liittyi myös erilaisia epävarmuustekijöitä, ja se koettiin epämurheelliseksi, aikaa vieväksi ja sotkuiseksi. (Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä 2018)

Ympäristöministeriö sekä maa- ja metsätalousministeriö selvittivät Kuudes Helsinki Oy:n kanssa kotitalouksien suurimpia haasteita ja kannusteita lisätä biojätteen lajittelua ja vähentää ruokahävikkiä. Selvityksen mukaan biojätteen lajittelua pidetään vähemmän tärkeänä kuin muiden kodin jätteiden eikä jätteen jatkokäyttöä tunneta. Biojätteen uskotaan maatuvan sekajätteen joukossa. Lajittelun hyödyllisyyttä voidaan kyseenalaistaa, ja ajatus toisista ihmisistä vapaamatkustajina sekä muiden välinpitämättömyys voivat heikentää omaa lajitteluintoa. Toisaalta sosiaalinen paine esimerkiksi työpaikalla tai lähipiirissä kannustaa lajitteluun. Sopivan tilan tai lajitteluastioiden puute tai epäkäytännöllisyys hankaloittaa lajittelun aloittamista ja lajitteluintoa. Biojätettä pidetään inhottavana ja haisevana. Joidenkin vastausten mukaan biojätettä ei edes synny, vaikka pelkkiä kahvinporoja syntyy useassa taloudessa paljon. (Valtioneuvosto 2020)

Mikkelissä haasteet ovat samanlaisia kuin muuallakin maassa. Lajittelun puutteen pääsyyksi on arvioitu ihmisen tietämättömyyttä. Yleinen käsitys on, että lajittelu ei kannata, koska jätteet menevät sekaisin keräysautossa. Jäteautoissa on kuitenkin omat osastot erilaisille jätteille. (Mikkelin kaupunkilehti 2020)

KERÄYSJÄRJESTELMÄT OMAKOTITALOALUEILLA JA HAJA-ASUTUSALUEILLA

Jätelain uudistuksen myötä biojätteen erilliskeräysvelvoite kaikille taajamissa asuville asukkailla astuu voimaan vuoden 2024 heinäkuusta. Toistaiseksi, jos kunnallinen jätehuoltomääräys ei edellytä biojätteen erilliskeräystä, biojätettä ei tarvitse kerätä erikseen omakotitalokiinteistöistä. Kompostoinnin puuttuessa ruokajätteet päätyvät sekajätteeseen. Alueelliset erot ovat olleet huomattavia. (Yle 2020)

Taajamassa biojätteen lajittelua omakotitaloissa vaikeuttavat pienet pihakoot; pienelle pihalle ei saa sijoittaa toista astiaa sekajättesäiliön lisäksi. Säiliön kokoa pienentämällä tarvitaan vähemmän tilaa, mutta tällöin tyhjennysväliä voidaan joutua lyhentämään. Yksi jäteastia voi riittää, jos se on moniosastoinen. Se vaatii kuitenkin jätteenkuljetusyritykseltä kaksiosastaisen kuorma-auton, jota ei välttämättä ole saatavilla. (Yle 2017) Biojätteen kerääminen taloudellisesti kannattavalla tavalla on haastavaa, koska biojätteen määrä omakotitaloalueilla on pieni (Yle 2014).

SYKE on selvittänyt yhdyskuntajätteen kierrätystä ja sen tehokkuutta Suomessa. Euroopan komissio suosittelee Suomen kierrätysasteen nostamista selkeyttämällä vastuita ja lisäämällä eri toimijoiden välistä yhteistyötä. Nykyjärjestelmässä jokaisella jätejakeella on oma astia ja omat keräysautot, mikä on kallista. Uusia menetelmiä, kuten moniosastokeräystä, yhteiskeräystä (jaettu jäteastia) tai kierrätyskelpoisten jätejakeiden yhteiskeräystä, tulisi kokeilla omakotitaloalueilla ja taajamien reuna-alueilla. (Valtioneuvosto 2019)

Suomen sääolosuhteet asettavat haasteita biojätessäiliön tyhjentämiselle. Kylmässä lämmin biojätepussi jäätyy helposti astiaan eikä säiliö aina tyhjene kokonaan. Tyhjennyksen yhteydessä säiliö voi rikkoutua pakkasessa. Vaihteleisiin sääoloihin ei voida vaikuttaa, ja asukkaiden vastuulla on varmistaa, että jäteastia voidaan tyhjentää kaikissa sääolosuhteissa. Ylimääräisen vaivan vuoksi asukkaat voivat helposti sijoittaa biojätteensä sekajätteeseen. (Mustankorkea Oy 2022)

ESIMERKKEJÄ UUSIEN KERÄYSJÄRJESTELMIEN PILOTOINNISTA

Eri puolilla Suomea on tehty kokeiluja biojätteen lajittelun tehostamiseksi ja pilotoitu muun muassa erilaisia keräysjärjestelmiä. Esimerkiksi Lahden Kariston omakotitaloalueella on otettu käyttöön yhteisastia-biojätekeräys. Biojätteen keräyksestä vastaavan Mikael Takalan mukaan yhteiskeräyksen ansiosta lajittelu on tehokkaampaa ja jättekustannukset ovat pienemmät, sillä sekajätteiden tyhjennyskertoja on voitu vähentää. Se on myös asukkaille vaivatonta. Biojätteen keräysastiat ja kuljetukset järjestää Päijät-Hämeen Jätehuolto Oy. (Yle 2020)

Ympäristökonsultointi EcoChange Oy toteutti vuosina 2013 ja 2014 hankkeen, jossa testattiin pääkaupunkiseudun biojätteen yhteiskeräystä ja Joensuun aluekeräystä. Hankkeeseen osallistuivat Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY, Puhas Oy ja Jätelaitosyhdistys ry. Pääkaupunkiseudulla yhteiset biojäteastiat otettiin käyttöön Helsingin Käpylän ja Kumpulan alueilla. Käpylässä biojätettä kertyi yhteiseen biojäteastiaan 60–90 kiloa (2–3 kiloa per henkilö) viikossa. Kumpulassa määrät olivat 30 kiloa ja 2,3 kiloa. Kokeeseen osallistuneiden mielestä yhteiskeräys oli vaivatonta, ja he halusivat jatkaa sitä kokeilun jälkeen. Joensuussa biojätteen aluekeräystä testattiin vuoden ajan. Alueellinen keräyspiste varustettiin kahdella biojäteastialla. Ne kuitenkin varastettiin ja kokeilua jatkettiin yhdellä biojätessäiliöllä. Alueen keräyspisteen käyttäjät olivat pääosin vapaa-ajan asukkaita. Biojätettä syntyi keskimäärin 48 kiloa viikossa eli noin kaksi kiloa henkilöä kohden. Kokeilun jälkeen tehtiin aluekeräyspisteen käyttäjille kysely. Alle kolmasosa vastaajista piti biojätteen keräämistä aluekeräyspisteessä hyvänä asiana, ja lajittelusta ja kompostoinnista tarvittiin lisää tietoa. Koska alueen keräyspiste ei ollut kaikkien reitin varrella, biojäte kuljetettiin pysyvään kotikompostoriin. Kompostointia pidettiin yleisesti parhaana tapana käsitellä biojätteitä. (Runsten 2014, 21–24)

Pirkanmaan jätehuolto Oy:n keväällä 2019 tekemässä kokeessa selvitettiin, miten biojätteen määrät muuttuvat ja miten erilaiset biojätepusstit toimivat kotikäytössä ja teollisessa biojätteen käsittelyssä. Kaukajärvellä jaettiin asukkaille ilmaisia biojätepusseja ja testaajille tehtiin kysely biojätteen lajittelusta. Kokeen alussa kodeissa syntyvästä biojätteestä lajiteltiin 42 prosenttia. Kokeen perusteella harkittiin biojätepuskien laajempaa jakelua. (Mäkinen 2019)

Kotitalousjätteiden moniosastolajittelukokeita on tehty monissa hankkeissa eri puolilla Suomea. Esimerkiksi Itä-Uudellamaalla tehty kokeilu tähtäsi kokonaisvaltaiseen kierrätyspalveluun omakotiasukille. Kokeilu kesti vuoden, ja siihen osallistui 190 kotitaloutta. Eri jätteiden kierrätysasteet paranivat moniosastojärjestelmän myötä, ja kasvihuonekaasupäästöjen laskettiin olevan jopa kolme kertaa pienemmät kuin perinteisellä jätteenkeräyksellä. (Heikkinen ym. 2018)

JÄTTEIDEN KOOSTUMUSTUTKIMUKSET

Jätteen koostumustutkimuksilla saadaan tärkeää tietoa esimerkiksi sekajätteen koostumuksesta, minkä avulla voidaan muun muassa edistää jätteen määrän vähentämistä, lajittelua ja kierrätystä sekä suunnitella jätehuollon toimintaa (Suomen Kiertovoima 2022). Koostumustutkimuksessa otetaan otanta sekajätteestä ja tutkitaan näytteiden koostumus lajittelemalla sekajätteen sisältämät jätejakeet erilleen (Ympäristöministeriö 2022).

Vuosina 2013–2016 toteutetussa Laatu-jäte-hankkeessa määritettiin menetelmä sekajätteen koostumustutkimusten toteuttamiseksi ja kehitettiin [koostumustietopankki](#) tutkimusten tulosten valtakunnalliseksi kokoamiseksi. Menetelmä on luonut tämän jälkeen yhteisen valtakunnallisen pohjan luotettavan koostumustiedon tuottamiseksi. (Suomen Kiertovoima 2022) Koostumustietopankkiin on tallennettu Suomessa 2000-luvulla toteutettujen kotitalouksien sekajätteen koostumustutkimusten tuloksia.

Vertailukelpoisten tutkimustulosten perusteella on laskettu sekajätteen keskimääräinen valtakunnallinen koostumus. Laskennassa on huomioitu kuuden eri puolilla Suomea vuosina 2015–2019 toteutettujen sekajätteen koostumustutkimusten tulokset. Biojätteen osuus sekajätteessä oli keskimäärin 32,8 prosenttia. Biojäte jakautui keittiöjätteisiin (25,1 prosenttia), puutarhajätteisiin (3,4 prosenttia) ja muuhun biojätteeseen (4,5 prosenttia). (Suomen Kiertovoima s.a.)

BIOJÄTTEEN KOOSTUMUSTUTKIMUKSET

Suomessa on 2000-luvulla tehty useita tutkimuksia biojätteen koostumuksesta. Niiden tulokset on tallennettu koostumustietokantaan ja eri jätelajien suhteet on laskettu vertailukelpoisten tutkimustulosten perusteella. Osuudet on esitetty luokituksen karkeimmalla tasolla. Lajiteltu biojäte sisälsi 11,8 prosenttia paperia, 3,7 prosenttia muovia ja 1,6 prosenttia sekalaista jätettä, lasia ja metallia. (JLY – Jätelaitosyhdistys ry. s.a.)

BIOJÄTTEEN HYÖDYNTÄMINEN SUOMESSA

Vuonna 2021 Suomessa käsiteltiin 470 848 tonnia biojätettä. Tästä 395 446 tonnia (84,0 prosenttia) kompostoitii ja mädätettiin ja 51 385 tonnia (10,9 prosenttia) hyödynnettiin energiaksi. Materiaalina hyödynnettiin 22 089 tonnia (4,7 prosenttia), ja biojätteestä 1 900 tonnia (0,4 prosenttia) päätyi kaatopaikalle. Poltettavaksi päätyi 28 tonnia biojätettä. (Tilastokeskus 2023)

Vuonna 2021 tuotettiin biokaasua noin 750 GWh ja biometaania noin 156 GWh. Biokaasun tuotanto lähti kasvuun vuonna 2018, ja kasvu jatkuu edelleen. Myös lukumäärällisesti isojen yhteiskäsittelylaitosten ja maatilakohtaisten laitosten määrät ovat olleet kasvussa viime vuosina, ja olemassa oleviin yhteiskäsittelylaitoksiin on tehty tuotantokapasiteetin laajennuksia. (Suomen Biokierto ja Biokaasu ry s.a.)

Tyypillisesti suomalaisilla biokaasulaitoksilla tuotetaan liikennepolttoainetta, lämpöä ja sähköä. Ravinteet kierrätetään maanparannusaineiksi. Biojätteen sisältämä energia hyödynnetään tehokkaasti biokaasulaitoksessa. Humus, hiili ja arvokkaat ravinteet palautetaan kiertoon. Komposti muodostuu mädätteestä, biojätteestä ja tukiaineesta, ja sitä kypsytetään ja käytetään maisemointiin maaperän raaka-aineena tai maatalouden maanparannusaineena. (Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä s.a.)

Lähivuosina biojätteen erilliskeräysvelvoitteet tiukkenevat ja uutta kierrätyskapasiteettia valmistuu eri puolille Suomea. Mikäli kaikki yhdyskuntien biojäte kierrätettäisiin liikennebiokaasuksi, sillä ajaisi vuosittain 113 000 henkilökaasuajoneuvoa. Kierrätys tehostuu kuitenkin vasta sitten, kun biojätteen keräysinnostusta saadaan lisättyä jätteen syntypäässä. Jatkossa huomio tulee keräystehokkuuden ohella olemaan myös kerättävän biojätteen laadussa; edelleen lajitellun biojätteen joukossa olevat epäpuhtaudet, kuten muovipakkaukset, vähentävät biojätteen kierrätyksen tehokkuutta. (Suomen Biokierto & Biokaasu ry. 2021)

JÄTEHUOLTO MIKKELISSÄ

Mikkelin kaupungissa jätehuoltoviranomainen on kaupungin kehittämislautakunta. Jätehuollon valvontaviranomaisia ovat Mikkelin seudun ympäristölautakunta ja Etelä-Savon ELY-keskus. Jätehuoltovastaavana toimii jätetarkastaja. Mikkelin kaupungin omistama jätehuoltoyhtiö Metsäsairila Oy hoitaa jätehuollon lakisääteisiä palvelutehtäviä, kuten jätteenkäsittelylaitoksen kunnossapidon, hyödynnettävän jätteen kierrätyksen, vaarallisten jätteiden jätehuollon sekä jäteteiden kunnossapidon ja verkoston kehittämisen harvaan asutuilla alueilla. Yritys tarjoaa myös alueen jätehuoltoon liittyvää kehitystä, neuvontaa ja tietoa. Kaupungin hankintaosasto vastaa tarjouskilpailuista muun muassa ravintolapalveluista, biokaasukäyttöisistä jäteautoista ja linja-autoista sekä viheralueiden maaperätuotteista.

Mikkelin kaupungin alueella noudatetaan kaupungin jätehuoltomääräyksiä, ja ne hyväksyy kaupungin kehittämislautakunta (Mikkelin kaupunki 2023).

JÄTTEIDEN KERÄYS JA KULJETUS

Mikkelin kaupungin jätehuoltoyhtiö Metsäsairila Oy huolehtii lakisääteisten jätehuoltopalveluiden järjestämisestä mukaan lukien biojätteen keräys ja käsittely. Kaikkien asuin- ja vapaa-ajan kiinteistöjen sekä kuntien hallinto- ja palvelutoiminnan kiinteistöjen on kuuluttava kunnan jätehuoltojärjestelmään. Liittyminen jätteenkuljetukseen toteutetaan kiinteistökohtaisella jäteastialla, lähikiinteistöjen yhteisellä jäteastialla (kimppa) tai aluekeräyspisteen kautta. Yksittäisillä asuinalueilla on lisäksi käytössä korttelikeräysjärjestelmä tai vastaava. (Mikkelin kaupunki 2023)

Mikkelissä on ollut voimassa niin sanottu kaksoisjärjestelmä, jossa jätteenkuljetus on järjestetty kiinteistön haltijan sopimana kuljetuksena taajama-alueilla ja kaupungin järjestämänä haja-asutusalueilla. Tästä kaksoisjärjestelmästä ollaan kuitenkin luopumassa, ja jätteenkuljetus ja sen kilpailuttaminen siirtyvät kunnallisen jäteyhtiön vastuulle 1.2.2025.

Jätehuoltomääräyksissä määritellyillä kiinteistöillä on oltava sekajätteen lisäksi erikseen jäteastiat kierrätettävälle jätteille, kuten biojätteelle, kartonkipakkauksille, lasipakkauksille, muovipakkauksille ja metallille. Jos niille ei ole kiinteistökohtaista lajitteluaustiaa, ne toimitetaan kunnallisen jäteyhtiön tai tuottajan järjestämiin keräyspisteisiin. Vaaralliset jätteet pidetään erillään muista jätteistä ja toimitetaan kunnallisen jäteyhtiön tai tuottajan vastaanottopaikkoihin. (Mikkelin kaupunki 2023)

BIOJÄTTEEN KERÄYS

Jätehuoltomääräysten mukaisesti kaikilla kiinteistöillä on järjestettävä jäteastia erilliskerättäville biojätteelle. Astia voi olla myös lähikiinteistöjen yhteinen niin sanottu biokimppa-astia. Biojäte voidaan myös kompostoida kiinteistöillä. Metsäsairila Oy on perustanut eri puolille Mikkeliiä bioaluekeräyspisteitä, joiden käyttö on vaihtoehto biojätteen keräykselle kiinteistöltä tai biokimppa-astiasta sekä kompostoinnille. (Mikkelin kaupunki 2023)

Uusien jätehuoltomääräysten mukainen biojätteen erilliskeräys kunnan järjestämänä koko Mikkelin alueella alkaa 1.1.2024. Biojäte tulee pakata ennen sen laittamista biojäteastiaan ja biojätteen pakkauksen tulee olla biohajoava. (Mikkelin kaupunki 2023) Mikkelissä biojätteen lajitteluvollisuus on ollut jo ennen jätelain uudistusta, mutta lakiuudistuksen myötä biojätteen erilliskeräys laajeni alueellisesti ja sitä valvotaan tarkemmin.

BIOJÄTTEEN KOMPOSTOINTI KIINTEISTÖLLÄ

Biojätettä saa kompostoida kiinteistöllä, jos se ei aiheuta haittaa tai vaaraa terveydelle tai ympäristölle. Kiinteistöt voivat käyttää yhteistä kompostoria. Biojätettä saa kompostoida vain sitä varten suunnitellussa, lämpöeristetyssä, tarkoitukseen sopivassa, suljetussa, tukevarakenteisessa ja hyvin ilmastoidussa kompostorissa, jossa on kansi sekä pohja tai pohjaverkko. Haittaeläinten pääsy kompostoriin on oltava estetty. (Mikkelin kaupunki 2023)

Ympärivuotisessa kompostoinnissa kiinteistön haltijan on varmistettava, ettei kompostori pääse pitkäaikaisesti jäätymään. Kompostorin voi tyhjentää vasta, kun biojäte on maatunut. Tarvittaessa kompostoitunut massa jälkikompostoidaan ennen hyödyntämistä. Näin toimitaan esimerkiksi Bokashi-menetelmässä, joka yksin ei ole riittävä biojätteen käsittelyyn. Kompostoituneen massan voi hyödyntää omatoimisesti tai toimittaa Metsäsairilan lajittelu- ja kierrätyskeskukseen. (Mikkelin kaupunki 2023)

1.1.2023 alkaen jätteen haltijalla on ollut lainsäädännöllinen velvollisuus antaa tiedot kiinteistöllä tapahtuvasta pienimuotoisesta biojätteen käsittelystä kunnan jätehuoltoviranomaiselle kompostointirekisteriin. Toukokuuhun 2023 mennessä Mikkelin alueelle oli rekisteröity 7 600 kompostojaa. Määrä on todennäköisesti suurempi, sillä kaikki eivät ole vielä rekisteröineet kompostointiaan.

MIKKELISSÄ AIEMMIN TEHTYJÄ TUTKIMUKSIA BIOJÄTTEEN LAJITTELUN JA JÄTTEEN LAADUN ANALYSOIMISEKSI

Biojätteen lajittelu- ja keräysvelvollisuudesta huolimatta suuri osa biojätteestä päättyy edelleen sekajätteeksi. CityLoops-hankkeen alussa (2018) mikkeliäisten vuosittain tuottamasta 6 900 tonnista biojätteitä vain 38 prosenttia kierrätettiin pääasiassa kompostina (Metsäsairila Oy). Sekajäte kuljetetaan Mikkelistä Leppävirralle ja Kotkaan poltettavaksi. Sekajätteessä oleva biojäte aiheuttaa vahinkoa polttolaitoksessa ja heikentää poltettavan materiaalin lämpöarvoa. Lisäksi se aiheuttaa ylimääräistä kuljetusta.

Sekajätteen koostumusta Mikkelissä on ennen CityLoops-projektia tutkittu vuosina 2008–2009 toteutetussa koostumustutkimuksessa. Tutkituissa näytteissä biojätteen osuus oli keskimäärin 28 prosenttia. Eniten biojätettä oli taajama-alueen kevätotoksessa, jossa sitä oli noin 54 painoprosenttia. Sekä taajamissa että haja-asutusalueilla biojätettä oli talvinäytteissä selvästi enemmän kuin muina aikoina. Kesänäytteissä sen sijaan taajamien jätekuormissa oli keskimääräistä enemmän palavaa jätettä ja keräyspaperia. Energiajätekuormat sisälsivät pääasiassa energiajakeita. (Teirasvuo 2010)

Keväällä 2019 Mikkelin seudun ympäristöpalvelut yhdessä Metsäsairila Oy:n ja Mikkelin jätekeskuksen kanssa selvittivät omakotitalojen biojätteen käsittelyä viidessä kaupungi-

nosassa. Kyselyyn vastasi 430 asukasta valituilta alueilta. Vastausten mukaan Rantakylässä, Riutassa ja Launialassa vain 7–10 prosenttia biojätteestä jäi kierrättämättä. Lähemällä 16 prosenttia vastaajista laittoivat vähintään osan biojätteestä sekajätteeseen. Urpolassa vastaavasti yli viidesosa jätti biojätteensä lajittelematta. Noin joka kolmas vastaaja lajitteli biojätteen biojäteastiaan, ja kaksi viidestä kompostoi biojätteensä. Noin kymmenellä prosentilla vastaajista oli yhteisastia toisen kiinteistön kanssa. 41 prosenttia vastaajista oli kiinnostunut biojätteen aluekeräyspisteestä, varsinkin jos kuljetusetäisyys oli alle kilometri. (Yle 2019)

JÄTTEEN KÄSITTELYTAVAT

Metsäsairila Oy:lle toimitetut erilliskerätyt jätejakeet käsitellään Metsäsairilan lajittelu- ja kierrätyskeskuksessa, josta ne tarvittaessa toimitetaan muualle käsiteltäväksi. Taulukossa 2 on esitetty erikseen kerättyjen jätteiden käsittely jätelajeittain.

Taulukko 2. Erilliskerättyjen jätteiden käsittely. Lähes kaikki jätelajit voidaan kierrättää materiaalina tai hyödyntää energiana. (Metsäsairila Oy s.a.)

JÄTELAJI	KÄSITTELY
Biojäte	Ennen 2021: Kompostointi Metsäsairilan lajittelu- ja kierrätyskeskuksessa. 2021 alkaen: Mädätys ja kompostointi BioSairila Oy:n biokaasulaitoksessa ja kompostointilaitoksella. Biojäte voidaan kompostoida myös omalla kiinteistöllä.
Metallit	Hyödyntäminen materiaalina metalliteollisuudessa.
Lasi ja keramiikka	Hyödyntäminen Metsäsairilan lajittelu- ja kierrätyskeskuksessa maarakennuksessa.
Pakkauslasi	Keräys Rinki-ekopisteillä, väliaikainen varastointi, uusien lasipullojen ja -purkkien valmistus.
Pakkauskartonki	Kierrätys uusien pahvituotteiden, kuten aaltopahvin, pakkauskartongin, kirjekuorten, laminaattipaperin ja hylsyjen, materiaalina.
Paperi	Kierrätys paperitehtaiden kierrätyspaperin raaka-aineena.
Muovipakkaus	Hyödyntäminen kierrätysmuovin raaka-aineena, josta voidaan valmistaa mm. jätekärryjä ja -pusseja, putkia, levyjä ja kestäviä profiileja rakennuskäyttöön.
Sekajäte	Energiahyötykäyttö Leppävirran Riikinvoiman ekovoimalaitoksella ja Kotkan hyötyvoimalaitoksella.
Kotitalouksien puutarhajätteet ja oksat	Voidaan viedä Metsäsairilan lajittelu- ja kierrätyskeskukseen. Oksat murskataan kompostin tueksi ja puutarhajätteet kompostoidaan.

SEKAJÄTTEEN JA ORGAANISEN JÄTTEEN MÄÄRÄT MIKKELISSÄ

Mikkelissä jätteet kuljetetaan Metsäsairilan lajittelu- ja kierrätyskeskukseen. Taulukossa 3 on yhteenveto yhdyskuntajätteen ja orgaanisen jätteen määristä vuosina 2018–2022. Sekajätettä syntyy keskimäärin 216 kg asukasta kohden vuodessa. Erilliskerätyn biojätteen määrä puolestaan on keskimäärin 45 kg asukasta kohden vuodessa. Lisäksi biojätettä ja puutarhajätettä kompostoidaan kiinteistöillä. Sekajätteen joukossa on arvioitu olevan noin 30 prosenttia biojätettä, mikä vastaa kansallista keskiarvoa (Metsäsairila Oy 2020a).

Taulukko 3. Sekajätteen ja orgaanisen jätteen määrät Mikkelissä 2018–2022 (Metsäsairila Oy 2020b).

	Yksikkö	2018	2019	2020	2021	2022
Asukasmäärä (lähde: Tilastokeskus)		53 818	53 134	52 583	52 122	51 980
Erilliskerätty kotitalouksien biojäte	t/a	2 494	2 473	2 320	2 176	2 295
Puutarhajäte	t/a	1 589	1 733	1 900	1 453	1 664
Sekajäte	t/a	12 128	11 174	11 354	12 550	9 813
Ravinteiden talteen- ottopotentiali: (arvio: biojätteen osuus seka- jätteessä 30 %)	t/a	3638	3352	3406	3765	2944
Sekajätteen määrä per asukas	kg/a	225	210	216	241	189

ARVIO BIOJÄTTEEN SISÄLTÄMÄSTÄ RAVINTEIDEN MÄÄRÄSTÄ MIKKELISSÄ

Mikkelissä sekajätteen joukkoon päätyvän biojätteen sisältämien ravinteiden määrää arvioitiin kirjallisuuden perusteella. Tehokkaammalla biojätteen kierrätyksellä nämä ravinteet voitaisiin hyödyntää lannoitekäytössä. Kotitalouksien biojätteen ominaisuuksia on analysoitu Forssan kaupungissa (Heaven ym. 2011). Mitatut ominaisuudet on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Kotitalouksien biojätteen ominaisuudet Suomessa (Heaven ym. 2011).

Ominaisuus	Yksikkö	Forssa
pH		5,3
TS	%	27,0
VS	% TS	92,3
Lipidit	% VS	15,6
Proteiinit	% VS	16,2
TKN	g/kg TS	23,9
P	g/kg TS	2,7
K	g/kg TS	10,0
C	% TS	49,4

Tällä hetkellä noin 3 500 tonnia biojätettä päätyy kiinteään yhdyskuntajätteeseen Mikkelin alueella vuosittain. Kun biojätteen kokonaiskiintoainepitoisuus Forssan tutkimuksen perusteella on 945 t/TS, se tuottaa noin 22,6 tonnia typpeä, noin 2,6 tonnia fosforia ja noin 9,5 tonnia kaliumia vuodessa. Arvioissa on käytetty Forssan kotitalouksien biojätteen ominaisuuksia (ravinnepitoisuus ja TS %) (taulukko 4).

KIERTOTALOUTEEN SIIRTYMINEN

Mikkelin kaupunki on allekirjoittanut Circular Cities Declaration -sopimuksen (ICLEI Europe 2020) vuonna 2020, ja kaupunki pyrkii kiertotalouden edelläkävijäksi. Kaupunki on rakentanut EcoSairilan kehitysalustaa mahdollistamaan suljetun materiaalikierron ja tukemaan uusien kestävän kehityksen yritysten kehittymistä. Mikkelin kaupunki on edistänyt ja investoinut erityisesti vesiteknologian, materiaalikiertojen ja uusiutuvan energian tutkimukseen, kehittämiseen ja infrastruktuuriin, mukaan lukien uusi biokaasulaitos BioSairila.

Kaupunginvaltuusto on hyväksynyt kaupunkistrategian vuosille 2022–2025 (Mikkelin kaupunki 2021a). Yksi tämän strategian tärkeimmistä painopisteistä on kiertotalous ja vihreä talous. Mikkelin kehitysyhtiö Miksei Oy kannustaa yrityksiä käynnistämään omia ekotehokkuus- ja kestävän kehityksen hankkeita.

Kaupunki on hyväksynyt ilmasto-ohjelman vuosille 2022–2035 (Mikkelin kaupunki 2021b). Biojätteen kiertotalouden päätavoitteet ovat seuraavat:

- Jätehuollon tärkein kehittämiskohde on biojätteen parempi keräys ja lajittelu.
- Paikallisesti tuotetun liikennebiometaanin käyttöä lisätään.
- Kaupunki hankkii vain biokaasulla tai sähköllä toimivia autoja.
- Biojätteen lajittelua ja keräystä tehostetaan niin, että sekajätteen joukkoon päätyy vähemmän biojätettä (biojätteen osuus vuonna 2025 on enintään 20 prosenttia ja vuonna 2030 enintään 15 prosenttia).

- Biomassan käsittelyä ja ravinteiden kierrätystä on tehostettu ja biomassasta jalostettuja tuotteita kehitetään edelleen.
- Kunta on sitoutunut sisällyttämään kiertotalousasiat kaikkiin ammatillisen koulutuksen opetussuunnitelmiin.
- 25 prosentissa rakennus- ja purkujätteitä sekä biojätteitä koskevista julkisista tarjouskilpailuista tulisi sisältää ilmastoon liittyviä vaatimuksia.

Mikkelissä biomateriaaleihin liittyvä kiertotaloussiirtymä oli alkanut jo ennen CityLoops-hanketta. Kaupunkiin suunniteltiin uuden biokaasulaitoksen rakentamista, ja ensimmäiset biokaasukäyttöiset jäteautot oli hankittu. CityLoops-hankkeen demonstraatiotoimet suunniteltiin vastaamaan kriittisimpiin haasteisiin. Suurin haaste oli biojätteen keruun tehostaminen ja ihmisten aktivoiminen lajittelemaan biojätteitä, mikä on ratkaisevan tärkeää, jotta Mikkelissä voidaan tuottaa ja jakaa enemmän biopolttoaineita. Demonstraatio 1 vastasi tähän ongelmaan tunnistamalla biojätteen lajitteluun liittyviä haasteita sekä keinoja biojätteen lajittelun tehostamiseen. Ihmisiä aktivoitiin tehokkaampaan biojätteiden lajitteluun monipuolisilla kampanjoilla.

Toinen haaste liittyi biojätteen käsittelyyn ja erityisesti käsittelyn lopputuotteiden hyödyntämisen parantamiseen ja liiketoimintamahdollisuuksien edistämiseen. Tavoitteena oli optimoida uuden biokaasulaitoksen toimintaa biokaasun tuotannon maksimoimiseksi sekä parantaa ravinteiden kierrätystä lannoitteiksi. Demonstraatio 2 tarttui näihin haasteisiin tekemällä laboratorio- ja pilot-testauksia biokaasun tuotantoprosessin ja lopputuotteiden optimoimiseksi sekä tunnistamalla uusia liiketoimintamahdollisuuksia. Lisäksi demonstraatio 2:ssa tehtiin ohjeistuksia kiertotalouden huomioimiseen julkisissa hankinnoissa, sillä hankinnat toimivat käytännön työkaluina, joiden kautta voidaan toteuttaa kiertotaloutta kaupungissa lisäämällä tuotettujen biokaasu- ja maaperätuotteiden kysyntää ja myyntiä.

LÄHTEET

Circwaste. 2018. Kotitalousjätteen määrä ja biojätteen keräys. Päivitetty 12.10.2020. Saatavissa: <https://www.materiaalikiertoon.fi/fi-FI/Seuranta/Kotitalousjatteen> [viitattu 14.10.2020].

Eurooppa-neuvosto. 2018. Jätehuolto ja kierrätys: neuvostolta uudet säännöt. Lehdistöiedote 22. toukokuuta 2018. Saatavissa: <https://www.consilium.europa.eu/fi/press/press-releases/2018/05/22/waste-management-and-recycling-council-adopts-new-rules/> [viitattu 31.8.2023].

Heaven, S., Zhang, Y., Arnold, R., Paavola, T., Vaz, F. & Cavinato, C. 2011. Compositional analysis of food waste from study sites in geographically distinct regions of Europe. D2.1, Valorisation of food waste to biogas. Saatavissa: [http://www.valorgas.soton.ac.uk/Deliverables/VALORGAS_241334_D2-1_rev\[1\]_130106.pdf](http://www.valorgas.soton.ac.uk/Deliverables/VALORGAS_241334_D2-1_rev[1]_130106.pdf).

Heikkonen, V., Klaus, T., Salojärvi, T., Hedman, Å., Hoang, H., Ahokas, M. 2018. Monilokerokeilu. Kotitalousjätteen kierrätysasteen nostaminen monilokeroastiapalvelulla Itä-Uudellamaalla vuosina 2017–2018. Loppuraportti 20.9.2018. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.rosknroll.fi/assets/Yhtiosivut/ML-2-Loppuraportti.pdf> [viitattu 1.12.2020].

Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä. 2018. Kysely biojätteen lajittelusta. BIORENT-hanke. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://vanha.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/jatehuolto/tutkimusjakehitys/Documents/kyselytutkimus2018.pdf> [viitattu 20.11.2020].

Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä. s.a. Biojätteen hyödyntäminen. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.hsy.fi/jatteen-ja-kierratys/biojateen-hyodyntaminen/> [viitattu 27.10.2020].

ICLEI Europe 2020. Circular Cities Declaration. Saatavissa: <http://circularcitiesdeclaration.eu>

JLY – Jätelaitosyhdistys ry. s.a. Kotitalouksien sekajätteen koostumus. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://vanha.jly.fi/jateh71-koti.php?treeviewid=tree2&nodeid=71> [viitattu 14.10.2020].

Korhonen, M.-R., Pitkänen, K., Niemistö, J. 2018. Selvitys orgaanisen jätteen kaato-paikkakiellon vaikutuksista. Suomen ympäristö 3/2018. Ympäristöministeriö. PDF-dokumentti. Päivitetty 29.6.2018. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/160946/SY_03_3018_Orgaanisen_jatteen_kaatopaikkakiello.pdf?sequence=4&isAllowed=y [viitattu 3.11.2020].

Lampinen. 2021. Ajantasainen jätelaki, tämän sinun tulisi tietää. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.molok.com/fi/blogi/ajantasainen-jatelaki> [viitattu 3.8.2021].

Lounais-Suomen Jätehuolto Oy. s.a. Nesteet kiusana biojätekuljetuksissa. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.lsjh.fi/fi/neuvonta/biojate-tutuksi/nesteet-kiusana-biojate-kuljetuksissa/> [viitattu 23.11.2020].

Metsäsairila Oy. 2020a. Vuosikertomus 2019.

Metsäsairila Oy. 2020b. Taulukko vuosien 2018 ja 2019 jätemääristä.

Metsäsairila Oy. s.a. Lajittelu. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.metsasairila.fi/tietopankki/lajittelu.html> [viitattu 20.11.2020].

Mikkelin kaupunki. 2021a. Mikkelin kaupunkistrategia 2022–2025. Saatavissa: <https://mikkeli.fi/tietoja-mikkelista/hyvinvointi-strategia-ja-talous/strategia/>

Mikkelin kaupunki. 2021b. Mikkelin ilmasto-ohjelma 2022–2035. Saatavissa: https://mikkeli.fi/wp-content/uploads/2022/11/Mikkelin_ilmasto-ohjelma_22-35_Valmis.pdf

Mikkelin kaupunki. 2023. Jätehuoltomääräykset 1.7.2023 alkaen. Kaupunkikehityslautakunta 23.5.2023 §79. Saatavissa: <https://mikkeli.fi/wp-content/uploads/2023/06/Mikkelin-kaupungin-jatehuoltomaaraykset-1.7.2023-alkaen-1.pdf>.

Mikkelin kaupunkilehti. 2020. Biojätteen tarve kasvaa. WWW-dokumentti. Päivitetty 2.3.2020. Saatavissa: <https://www.mikkelinkaupunkilehti.fi/paikalliset/4012249> [viitattu 14.10.2020].

Mustankorkea Oy. 2022. Biojäte jäätyy astian pohjaan. WWW-dokumentti. 9.12.2022. Saatavissa: <https://www.mustankorkea.fi/biojate-jaatyy-astian-pohjaan/>.

Mäkinen, P. 2019. Kokeilu alkaa: Kaukajärvellä jakoon uudenlaisia biojätepusseja. Tamperelainen 7.3.2019. Saatavissa: <https://www.tamperelainen.fi/paikalliset/1386613> [viitattu 1.12.2020].

Runsten, S. 2014. Biojätteen kimppa- ja aluekeräyksen mahdollisuudet. Ympäristökonsultointi EcoChange Oy. PDF-dokumentti. Päivitetty 19.12.2014. Saatavissa: http://vanha.jly.fi/Runsten_2014.pdf [viitattu 1.12.2020].

Suomen Biokierro & Biokaasu ry. 2021. Tiedote 16.12.2021: Suomessa petrattavaa biojätteiden kierrätyksessä. Saatavissa: <https://biokierro.fi/suomessa-on-edelleen-petrattavaa-biojatteiden-kierratyksessa/>.

Suomen Biokierro & Biokaasu ry. s.a. Tilastot – Biokaasun ja biometaanin tuotanto. Saatavissa: <https://biokierro.fi/tilastot/> [viitattu 23.8.2023].

Suomen Kiertovoima ry. 2020. Uusi kampanja päivittää suomalaisten tietämyksen biojätteen lajittelusta. WWW-dokumentti. Päivitetty 29.10.2020. Saatavissa: <https://kivo.fi/uusi-kampanja-paivittaa-suomalaisten-tietamyksen-biojatteen-lajittelusta/> [viitattu 23.11.2020].

Suomen Kiertovoima ry. 2022. Opas sekajätteen koostumustutkimuksiin. Versio 9.5.2022. Saatavissa: <https://kivo.fi/wp-content/uploads/Opas-sekaj%C3%A4tteen-koostumustutkimuksiin-Versio3-220509.pdf>.

Suomen Kiertovoima ry. s.a. Kotitalousjätteen keskimääräinen valtakunnallinen koostumus. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://kivo.fi/ymmaramme/koostumustietopankki/kotitalousjätteen_koostumus_yhteenvedo/ [viitattu 15.10.2020].

Suomen ympäristökeskus. 2018. Kotitalouksien tuottamasta jätemäärästä ja kierrätysinnosta uutta tietoa. WWW-dokumentti. Päivitetty 13.12.2018. Saatavissa: [https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Kotitalouksien_tuottamasta_jatemaarasta_\(48791\)](https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Kotitalouksien_tuottamasta_jatemaarasta_(48791)) [viitattu 14.10.2020].

Teirasvuo, N. 2010. Syntypaikkalajitellun sekajätteen lajittelututkimus Mikkelin seudulla. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Ympäristötekniikan koulutusohjelma. Ympäristötekniikan kandidaatintutkielma ja seminaari. PDF-dokumentti. Päivitetty 20.1.2010. Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/59226/nbn-fi-fe201002111370.pdf?sequence=3&isAllowed=y> [viitattu 12.11.2020].

Tilastokeskus. 2022. Yhdyskuntajätteen määrä pysyi edellisvuoden tasolla vuonna 2021 – yhä suurempi osa jätteistä hyödynnettiin energiana. Tiedote 8.12.2022. Jätetilasto 2021. Saatavissa: <https://stat.fi/julkaisu/cktwkksr43wo20b61h94063h3>.

Tilastokeskus. 2023. Jätetilasto. Yhdyskuntajätteet Suomessa käsittelytavoittain muuttujina Vuosi, Jätejäte ja Tiedot. PxWeb (stat.fi). Saatavissa: <https://stat.fi/tilasto/jate>.

Valtioneuvosto. 2019. Selvitys: Erityisesti biojätteen ja muovipakkausten kierrätystä lisäävä. WWW-dokumentti. Päivitetty 15.2.2019. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/-/10616/selvitys-erityisesti-biojatteen-ja-muovipakkausten-kierratysta-lisattava> [viitattu 15.10.2020].

Valtioneuvosto. 2020. Suomalaiset laiskoja lajittelemaan biojätettä – erilliskeräyksen ympäristöhyötyjä ei tunnisteta. Maa- ja metsätalousministeriö, Ympäristöministeriö. Tiedote 21.10.2020. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/-/1410903/suomalaiset-laiskoja-lajittelemaan-biojatetta-erilliskerayksen-ymparistohyotyja-ei-tunnisteta-1>.

Valtioneuvosto. 2023. EU:n komissio: Suomen lisättävä yhdyskuntajätteen kierrätystä ja vähennettävä jätteen polttamista. Ympäristöministeriön tiedote 8.6.2023. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/-/1410903/eu-n-komissio-suomen-lisattava-yhdyskuntajatteen-kierratysta-ja-vahennettava-jatteen-polttamista> [viitattu 31.8.2023].

Yle. 2014. Biojäte menee hukkaan jätteenpolttolaitoksissa – märkä jäte syö lämpöarvoa. WWW-dokumentti. Päivitetty 2.12.2014. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-7662567> [viitattu 23.11.2020].

Yle. 2017. Uusi lajittelu haastaa pienet pihat: Energia- ja biojätteet tarvitsevat omat astiansa. WWW-dokumentti. Päivitetty 26.10.2017. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-9900208> [viitattu 22.10.2020].

Yle. 2019. Mikkeliässä suurin osa omakotitaloista kierrättää biojätteensä – kyselyn perusteella Rantakylässä, Riutassa ja Launialassa lajitellaan ahkerasti. WWW-dokumentti. Päivitetty 29.5.2019. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-10805613> [viitattu 27.10.2020].

Yle. 2020. Sekajäteastioihin päätyy yhä liikaa biojätettä – pian myös omakotiasujien tulee kerätä ruuantähteensä erikseen. WWW-dokumentti. Päivitetty 29.4.2020. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-11324764> [viitattu 15.10.2020].

Ympäristöministeriö. 2022. Kierrätyksestä kiertotalouteen: Valtakunnallinen jätesuunnitelma vuoteen 2027. Ympäristöministeriön julkaisuja 2022:13. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-266-2>.

Ympäristöministeriö. 2023. Jätehuollon järjestäminen ja jätemaksut. Ympäristöhallinnon verkkopalvelu. Päivitetty 17.5.2023. Saatavissa: <https://www.ymparisto.fi/fi/kestava-kierto-ja-biotalous/kierratys-ja-jatteet/jatehuollon-jarjestaminen> [viitattu 21.8.2023].

Ympäristöministeriö. s.a.a. Jätteet. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://ym.fi/jatteet> [viitattu 15.10.2020].

Ympäristöministeriö. s.a.b. Ympäristöministeriön hallinnonalan lait, asetukset ja ohjeet. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://ym.fi/lainsaadanto-kiertotalous> [viitattu 15.10.2020].

Ympäristöministeriö. s.a.c. Jätelainsäädäntö. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://ym.fi/jatelainsaadanto> [viitattu 15.10.2020].

BIOJÄTTEEN LAJITTELUN KEHITTÄMINEN PEITSARIN PILOT-ALUEELLA

Vuokko Malk & Hanne Soininen & Tiina Saario & Johanna Järvinen & Anne Laitinen & Jonne Gråsten & Tommi Kuvaja

Biojätteellä on tärkeä merkitys kiertotalouden kehittämisessä. Suomessa sekajätteen joukossa on edelleen noin kolmannes biojätettä, joka päättyy polttoon sekajätteen mukana. Jätteen poltossa biojäte on kuitenkin huonoa polttoainetta. Erilliskerätystä biojätteestä voidaan sen sijaan tuottaa biokaasua ja biojätteen sisältämät ravinteet voidaan kierrättää multatuotteiksi ja kierrätyslannoitteiksi.

CityLoops-hankkeessa haluttiin tehostaa biojätteen lajittelua Mikkeliissä, vähentää sekajätteeseen päätyvän biojätteen määrää sekä parantaa erilliskerättävän biojätteen laatua. Tehokkaammalla lajittelulla yhä suurempi osa biojätteestä voidaan tuotteistaa biokaasuksi ja mullaksi. Mikalo Oy:n Peitsarin kerrostalot toimivat hankkeen pilot-alueena. Demonstraatiot toteutettiin yhteistyössä Mikalo Oy:n ja jätehuolto-yhtiö Metsäsairila Oy:n kanssa.

Peitsarin pilot-alueella järjestettiin asukastapahtumia, joissa jaettiin tietoa ja kannustettiin biojätteen lajitteluun. Lisäksi asukkaille jaettiin paperisia biojätepusseja biojätteen lajittelun tehostamiseksi. Viestintä asukkaille on tärkeää, sillä vaikka biojätteen erilliskeräysveloite on Peitsarin kaltaisilla kerrostaloalueilla ollut jo vuosien ajan, moni silti laittaa biojätteet yhä sekajätteen joukkoon.

Tiedotuskampanjan vaikutuksia seurattiin toteuttamalla alueella sekajätteen koostumustutkimuksia. Ensimmäinen koostumustutkimus tehtiin lokakuussa 2020 ennen tiedotuskampanjan aloitusta. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää sekajätteen koostumuksen lähtötilanne ja erityisesti kierrätyskelpoisen biojätteen osuus, joka erilliskerättyinä voitaisiin hyödyntää biokaasulaitoksella. Samalla kerättiin tietoa sekajätteen sisältämästä muusta kierrätyskelpoisesta materiaalista. Sekajätteen koostumuksen muutosta tutkittiin toistamalla koostumustutkimus syksyllä 2021. Lisäksi alueella seurattiin erilliskerätyn biojätteen ja sekajätteen kokonaismääriä.

PEITSARIN PILOT-ALUE

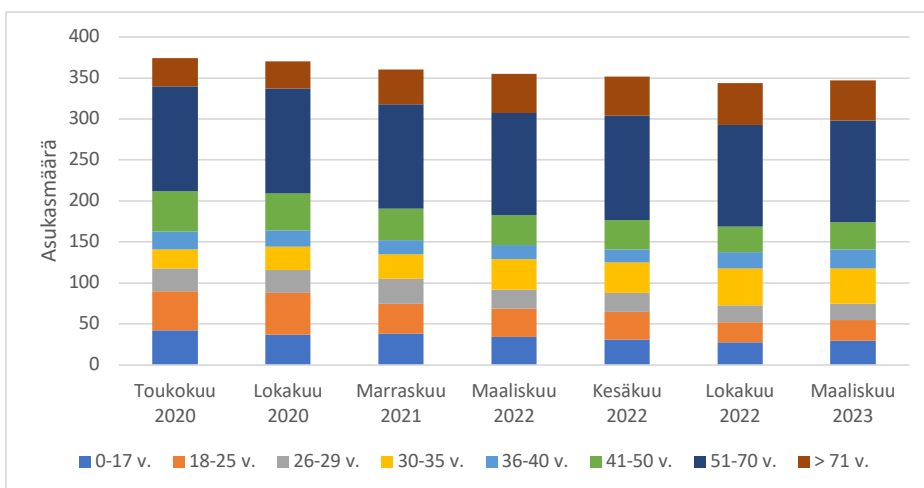
Mikkelin Peitsarin alueella sijaitsevat Mikalo Oy:n kerrostalot (kuva 1) valittiin hankkeen pilot-alueeksi yhteistyössä sidosryhmien kanssa. Alueella on ainoastaan asuinkiinteistöjä, ja jätteet sisältävät vain kotitalouksien jätteitä. Tutkimusalueen kerrostalojen jätekatoksissa on astiat biojätteelle, pahville, paperille, lasille, metallille, muoville ja sekajätteelle.

Pilot-alueella on seitsemän kerrostaloa, joissa on yhteensä 278 asuntoa. Asunnot ovat yksioita, kaksioita ja kolmioita. Huoneistojen keskimääräinen pinta-ala on 53 m² ja keskimääräinen huoneistokohtainen asukasmäärä noin 1,3 asukasta/huoneisto. (Mikalo Oy)

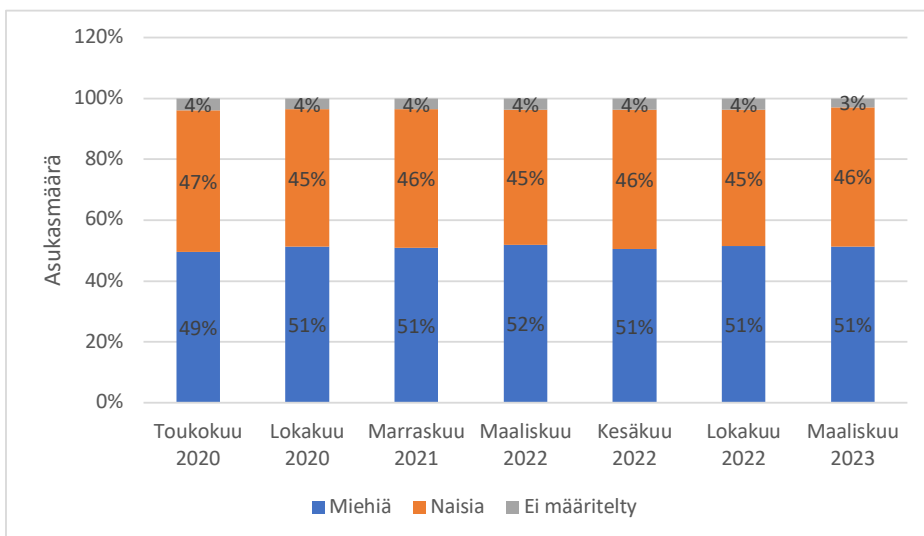


Kuva 1. Peitsarin pilot-alue (kuva Esa Hannus).

Alueen asukasmäärä on laskenut hankkeen aikana (2020–2023) 374:stä 347:ään. Suurin osa (n. 35 %) asukkaista on 51–70-vuotiaita (kuva 2). Miehiä on alueella hieman enemmän kuin naisia (kuva 3). Alueen ikä- ja sukupuolijakaumassa ei ole tapahtunut merkittäviä muutoksia hankkeen aikana. (Mikalo Oy)

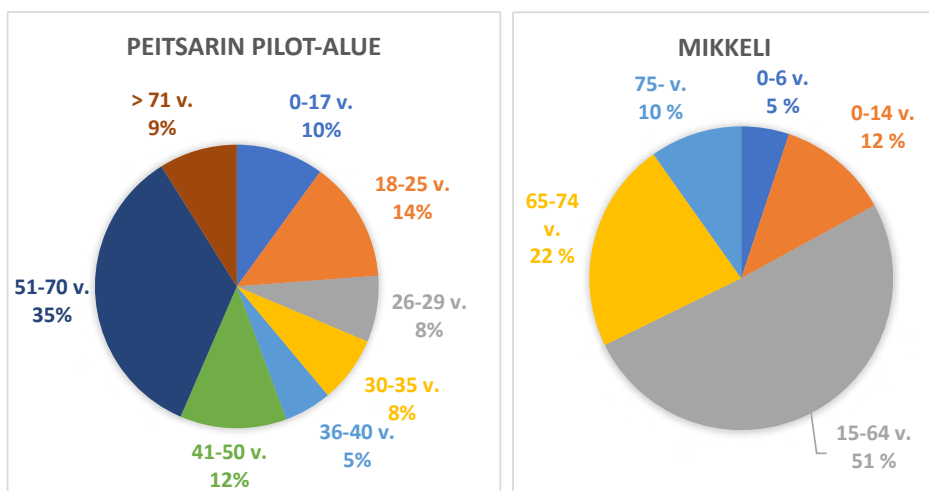


Kuva 2. Peitsarin pilot-alueen asukasmäärä ja asukkaiden ikäjakauma vuosina 2020–2023 (Mikalo Oy).



Kuva 3. Peitsarin pilot-alueen asukkaiden sukupuolijakauma vuosina 2020–2023 (Mikalo Oy).

Koko Mikkelin ikärakenteeseen verrattuna Peitsarin alueella on vähemmän lapsia ja nuoria kuin kaupungissa keskimäärin. Myös vanhuksia on hieman vähemmän. Erilaisen tilastoinnin vuoksi Mikkelin ja tutkimusalueen ikärakennetta ei pysty suoraan vertaamaan keskenään (kuva 4).



Kuva 4. Peitsarin pilot-alueen asukkaiden ikäjakauma lokakuussa 2020 (vasemmalla, lähde Mikalo Oy) ja Mikkelin ikäjakauma vuoden 2019 lopussa (oikealla, lähde Tilastokeskus). Asukkaiden ikä vuosina.

ASUKKAIDEN AKTIVOINTI BIOJÄTTEEN LAJITTELUUN

Peitsarin alueen asukkaita motivoitiin lajittelemaan biojätteitä jakamalla heille paperisia biojätepusseja ja pusseille sopivia kehikoita sekä tietoa lajittelusta yhdessä Metsäsairila Oy:n kanssa (kuva 5). Biohajoavasta muovista valmistetut biojätepusset aiheuttavat biokaasulaitoksella ongelmia, koska ne eivät ehdi hajota mädätyksen aikana ja lisäksi ne takertuvat kiinni sekoittajiin. Tämän vuoksi Mikkelissä halutaan lisätä paperisten biojätepuskien käyttöä.

Hankkeen aikana Peitsarin alueella järjestettiin neljä asukastapahtumaa (16.6.2021, 14.9.2021, 6.9.2022 ja 25.5.2023). Tapahtumissa asukkaille jaettiin Metsäsairila Oy:n tarjoamia biojätepusseja ilmaiseksi noin vuoden tarpeeseen. Asukkaille opetettiin myös biojätepuskin taittelua sanomalehdestä ja keskusteltiin lajitteluun liittyvistä haasteista ja kiertotalouden hyödyistä. Tapahtumissa oli tarjolla myös virvoitusjuomia ja pientä purtavaa. Lapset oli huomioitu muun muassa saippuakuplilla. Viimeisessä tapahtumassa asukkaita kiitettiin yhteistyöstä tuomalla alueelle Metsäsairila Oy:n multaa ja kukkien taimia, joista asukkaat saivat tehdä kukkaistutuksia. Tapahtumista tiedotettiin etukäteen talojen ilmoitustaululla. Lisäksi tiedotteita ja biojätepusseja jaettiin postiluukkuihin ja Mikalo Oy jakoi pusseja ja lajitteluohjeita uusille asukkaille muuttojen yhteydessä.



Kuva 5. Peitsarin alueella järjestettiin asukasiloja, joissa asukkaille jaettiin paperisia biojättepusseja sekä tietoa biojätteen lajittelusta (kuvat Hanne Soininen).

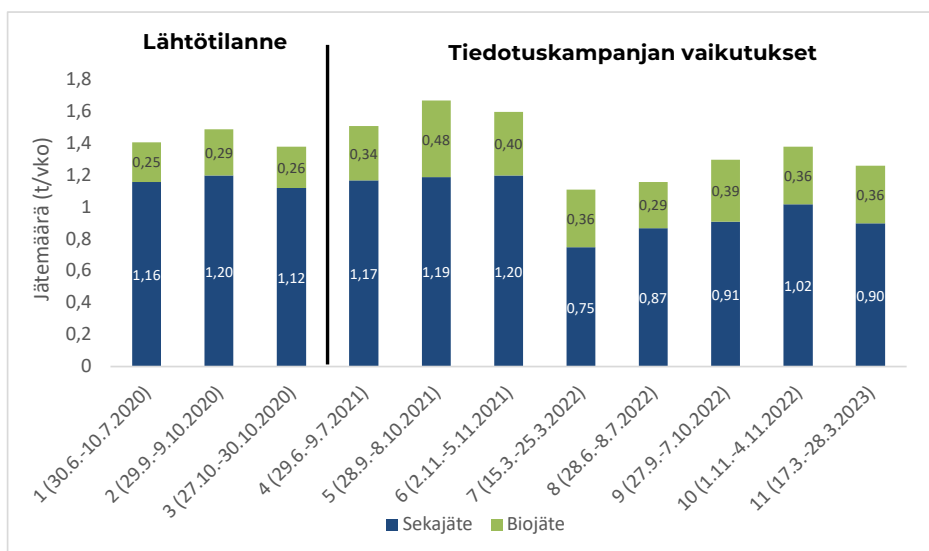
JÄTEMÄÄRIEN SEURANTA

Tutkimusalueen seka- ja biojätteen määriä seurattiin tilaamalla Lassila & Tikanoja Oy:ltä erilliset jäteastioiden tyhjennyskierrokset Peitsarin tutkimusalueelle. Jäteauto keräsi kuormaansa pelkästään tutkimusalueen jätteet, jotka punnittiin Metsäsairila Oy:n lajittelu- ja kierrätyskeskuksen vaaka-asemalla. Tutkimusalueella on yhteensä 16 kpl 660 litran seka-jäteastioita, jotka tyhjennetään kaksi kertaa viikossa. Biojäteastioita (240 l) on seitsemän, ja ne tyhjennetään kerran viikossa.

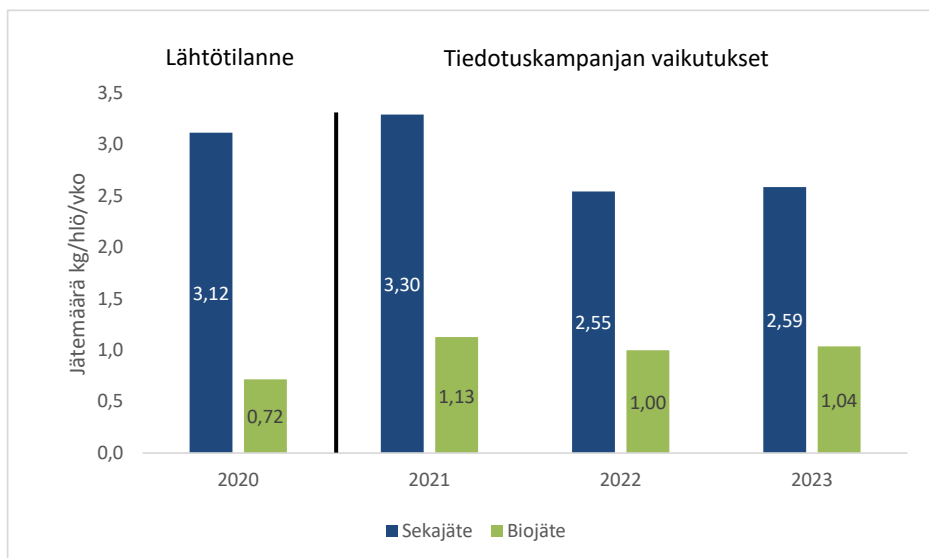
Jättemääriä seurattiin yhteensä 11 ajankohtana vuosina 2020–2023. Monitorointijakson kesto oli 1–2 viikkoa kerrallaan. Vuoden 2020 jättemäärät edustavat lähtötilannetta ennen hankkeen toimenpiteitä, ja vuoden 2021–2023 jättemäärät osoittavat tiedotuskampanjan vaikutukset.

Vuonna 2020 alueella kertyi sekajätettä keskimäärin 1,16 ja biojätettä 0,27 tonnia viikossa (kuva 6). Keskimääräinen vuosittainen jättemäärä oli tulosten perusteella laskettuna 60 t/vuosi sekajätettä ja 14 t/vuosi biojätettä. Asukaskohtaiset jättemäärät olivat noin 162 kg/hlö/vuosi sekajätettä ja 37 kg/hlö/vuosi biojätettä.

Erilliskerätyn biojätteen määrä asukasta kohden kasvoi tiedotuskampanjoinnin aikana vuosina 2021–2023 keskimäärin 47 prosenttia vuoden 2020 alku tilanteeseen verrattuna (kuva 7). Näin ollen alueella toteutettu tiedotuskampanja ja biojättepusien jakaminen tuottivat tulosta ja lisäsivät asukkaiden biojätteen lajittelua. Sekajätteen määrä laski erityisesti vuonna 2022 vuosien 2020–2021 tasoon verrattuna, mutta varmaa syytä tähän ei ole tiedossa. Vuonna 2023 CityLoops-hankkeen aikana ehdittiin tehdä vain yksi jätteiden monitorointikierros maaliskuussa.



Kuva 6. Biojätteen ja sekajätteen määrät (tonnia/viikko) Peitsarin alueella monitorointiajanjaksoilla 2020–2023.



Kuva 7. Biojätteen ja sekajätteen asukaskohtaiset määrät (kg/hlö/viikko) Peitsarin alueella monitorointiajanjaksoilla 2020–2023.

SEKAJÄTTEEN KOOSTUMUSTUTKIMUKSET

Koostumustutkimusten tavoitteena oli selvittää sekajätteen koostumus Peitsarin pilot-alueella ja erityisesti sekajätteen joukossa oleva biojätteen osuus, joka voitaisiin erilliskerättynä hyödyntää biokaasulaitoksella ja tuotteistaa biokaasuksi ja maanparannusaineiksi. Samalla kerättiin tietoa myös muista sekajätteen kierrätysmateriaaleista. Jätehuoltoyhdistys ry (Järelaitosyhdistys ry, myöhemmin Suomen Kiertovoima KIVO ry) on julkaissut koostumustutkimusoppaan (JLY 2017), jota hyödynnettiin yhdyskuntajätteen koostumustutkimuksen suunnittelussa.

TUTKIMUSTEN AJANKOHDAT

Ensimmäinen koostumustutkimus tehtiin ennen tiedotuskampanjaa syksyllä 2020. Tutkimus toistettiin syksyllä 2021, jotta voitiin arvioida viestinnän vaikutusta biojätteen lajitteeluun. Tulosten vertailukelpoisuuden varmistamiseksi tutkimukset toteutettiin molempina vuosina samalla viikolla (viikko 44). Ensimmäinen koostumustutkimus toteutettiin 23.–27.10.2020 kerätyistä jätteistä. Lajittelu suoritettiin 27.10.2020. Toinen koostumustutkimus toteutettiin 29.10.–2.11.2021 kerätyistä jätteistä. Lajittelu suoritettiin 2.11.2021.

Molemmissa toteutetuissa koostumustutkimuksissa kuormassa oli mukana neljän päivän jätteet. Jätteet olivat kertyneet perjantaista tiistaiamuun, eli otos sisälsi sekä viikonlopun että arkipäivien jätteitä. Sekajäteastiat tyhjennetään tutkimusalueella kaksi kertaa viikossa, tiistaisin ja perjantaisin. Tutkimukset tehtiin tyhjennettävistä jätteistöistä tiistaina, joka on normaali astioiden tyhjennyspäivä.

Koostumustutkimuksen ajankohdan tulisi edustaa keskimääräistä jätteen kertymistä, ja koostumustutkimuksen ajankohdan valinnassa suositellaan välttämään juhlapyyhiä ja lomakausia tai muita tilanteita, joilla tiedetään olevan merkittävä vaikutus tutkittavan jätteen koostumukseen (JLY 2017). Kummankaan tutkimuksen ajankohtaan ei osunut juhlapyyhiä, mutta edeltävä viikko oli Mikkelin alueella syyslomaviikko molempina vuosina.

VALMISTELUT

Lajittelu tapahtui Metsäsairilan lajittelu- ja kierrätyskeskuksella pressuhallissa. Edellisenä päivänä rakennettiin pöydät lajittelua varten jätekeskuksen puujätteestä poimituista ovista ja kuormalavoista.

Lajiteltaville jätėjakeille varattiin 240 litran jäteastiat ja pienemmille jäte-erille saavit, jotka vuorattiin jätėsäkeillä/-pusseilla ja punnittiin. Tyhjien astioiden painot kirjattiin teipillä astioiden kylkeen. Astiat järjestettiin riviin seinän viereen ja seinään/astiaan teipattiin lajitteluohjeet.

OTANTA

Jätteet kerättiin kohdennetusti Peitsarin alueelta erillisellä L&T:ltä tilatulla kierroksella. Lajittelupäivän aamuna jäteauto toi kerätyn jätekuorman Metsäsairilan lajittelu- ja kierrätyskeskukselle ja kuorma punnittiin vaaka-asemalla. Vuoden 2020 tutkimuksessa kuorman kokonaisjättemäärä oli 0,64 tonnia ja vuoden 2021 tutkimuksessa 0,66 tonnia.

Kuorma kaadettiin kasaksi sekajätteen kentälle (kuva 8). Kasasta valittiin otos poimimalla satunnaisesti pusseja 660 litran jäteastiaan. Kuormasta otettiin kaksi rinnakkaista 660 litran näytettä. Kasaa levitettiin lapiolla, jotta pusseja voitiin poimia mukaan myös kasan pohjalta. Pussien lisäksi jätekasoissa oli mukana irtomateriaalia, kuten vaatteita, ja myös tätä materiaalia otettiin satunnaisesti mukaan näytteisiin. Isoja kappaleita, kuten vaahtomuovipatjoja ja tyynyjä, ei otettu mukaan lajitteluun eikä niitä punnittu, mutta ne huomioitiin valokuvissa ja muistiinpanoissa.



Kuva 8. Jäteauto purki jätteet kasaksi kentälle (kuva vuoden 2020 koostumustutkimuksesta) (kuva Hanne Soininen).

Kauhakuormaaja kuljetti jäteastiat pressuhalliin, jossa lajittelu tapahtui. Täydet 660 litran jäteastiat punnittiin pumppuvaa'alla (Ravas 2200 kg) (kuva 9). Lajittelun jälkeen astiat punnittiin tyhjänä samalla vaa'alla.



Kuva 9. Jätekuormasta poimittiin satunnaisesti jätepusseja ja muuta jätettä 660 litran jäteastioihin, jotka punnittiin pumppuvaa´alla ennen lajittelua (kuva Anne Laitinen).

LAJITTELU

Lajitteluun osallistui viidestä kuuteen henkilöä. Lajittelijat käyttivät suojavarusteita (turvakengät, suojahaalarit, ffp3-hengityssuojaimet, visiirit, kumihanskat ja viiltosuojahanskat). Jätepusseja avattiin lajittelupöydällä puukolla. Jätteet lajiteltiin JLY:n (2017) oppaan mukaisesti 11 pääjakeeseen:

- Biojäte
- Paperi
- Kartonki ja pahvi
- Puu
- Muovit
- Lasi
- Metallit
- Tekstiilit ja jalkineet
- Sähkölaitteet ja akut
- Vaaralliset kemikaalit
- Sekalaiset jätteet.

Ensimmäisessä koostumustutkimuksessa vuonna 2020 Metsäsairila Oy:n jäteneuvoja opasti lajittelussa. JLY:n (2017) oppaasta poiketen keramiikka ja posliini lajiteltiin lasijätteeseen ja papereista piirustus- ja askartelupaperit, muistilaput, kuitit, lahjapaperit sekä paperiset tapetit sekalaiseen jätteeseen Metsäsairila Oy:n ohjeistuksen mukaisesti. Lajiteltavan jätteen seassa ei kuitenkaan ollut keramiikkaa tai posliinia eikä myöskään askartelu- tai lahjapapereita tai tapetteja, joten muutos ei juurikaan vaikuta tuloksiin.

Kaikissa tapauksissa materiaaleja ei voitu erottaa eri jakeisiin, jolloin lajittelu tapahtui päämateriaalin mukaan. Esimerkiksi muovi- ja kartonkipakkaukset sisälsivät usein biojätettä epäpuhtautena. Nämä materiaalit lajiteltiin pakkausmateriaalin mukaan (esimerkiksi muoviset jogurttipurkit muovijätteeseen). Pakkaukset, joissa suurin osa painosta oli ruokaa (esim. avaamattomat ruokapakkaukset), lajiteltiin biojätteeseen. Pehmopaperit olivat merkittävä osa paperijätteessä.

Jätteet lajiteltiin ensin pöydällä oleviin ämpäreihin, joista ne tyhjennettiin isompiin punnitusastioihin (240 litran jäteastioihin tai saaveihin) (kuva 10). Jäteastian pohjalla oleva irtoaines tyhjennettiin lajittelupöydälle kauhalla. Lopuksi pöydän päälle jäänyt hienoaines harjattiin pöydältä sekajätteeseen.

Kun koko jäteastia oli lajiteltu omiin jakeisiin, eri jakeet punnittiin (vaaka EKS, tarkkuus 50 g). Myös tilavuudet arvioitiin. Isompien jäte-erien tilavuudet arvioitiin karkeasti 240 litran jäteastian räyttöasteen perusteella. Yhteen saaviin oli tehty mitta-asteikko tilavuuksille, ja sen avulla pienempien jäte-erien tilavuudet voitiin arvioida. Kaikkein pienimpien jäte-erien tilavuudet arvioitiin mittalasiin avulla.

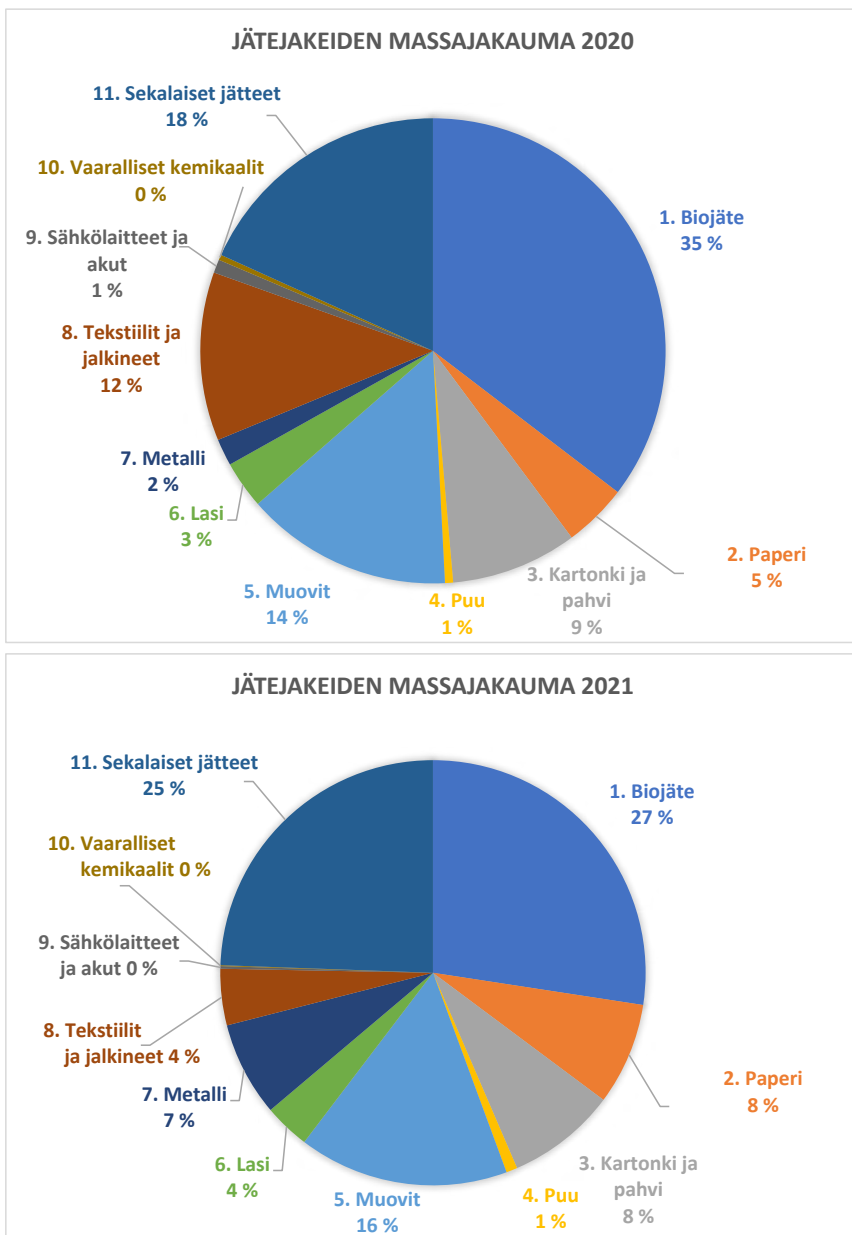
Punnitusten ja tilavuuksien arvioinnin jälkeen punnitusastioihin vaihdettiin puhtaat jättepussit ja lajittelu toistettiin toiselle 660 litran jäteastialle. Kahden näyteastian jätteet lajiteltiin ja punnittiin erikseen (2 rinnakkaista näytettä). Kaiken kaikkiaan lajittelu kesti näytteiden otannasta viimeisiin punnituksiin ja tilavuuksien arviointiin noin neljä tuntia. Tämän jälkeen lajittelupöydät purettiin ja lajitellut jätteet toimitettiin asianmukaiseen käsittelyyn lajittelu- ja kierrätyskeskuksen keräyslavoille.



Kuva 11. Jätteiden lajittelua (kuva Anne Laitinen).

SEKAJÄTTEEN KOOSTUMUSTUTKIMUSTEN TULOKSET

Vuonna 2020 lähtötilanteessa toteutetussa sekajätteen koostumustutkimuksessa biojätteen osuus sekajätteessä oli 35 prosenttia. Vuonna 2021 biojätteen osuus oli laskenut 27 prosenttiin. Molempina vuosina biojäte oli massaltaan suurin jätelaji. Biojäte oli käytännössä kokonaan keittiöbiojätettä. Seuraavaksi suurimmat jätelajit (kuva 12) olivat sekalaiset jätteet (18–25 %) ja muovit (14–16 %).



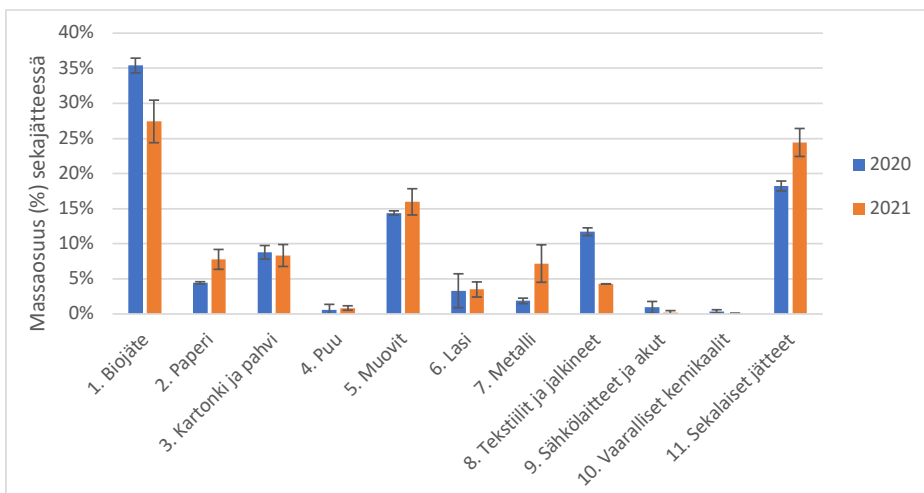
Kuva 12. Jätelajien massajakauma Peitsarin alueella vuoden 2020 (yläkuva) ja vuoden 2021 (alakuva) sekajätteen koostumustutkimuksissa.

Tulokset vastasivat hyvin valtakunnallisia tuloksia (taulukko 1). Suomessa 2000-luvulla toteutetuissa kotitalouksien sekajätteen koostumustutkimuksissa biojätteen osuus on ollut keskimäärin 33 prosenttia, sekalaisten jätteiden 18 prosenttia ja muovien 17 prosenttia (Suomen Kiertovoima ry. s.a.).

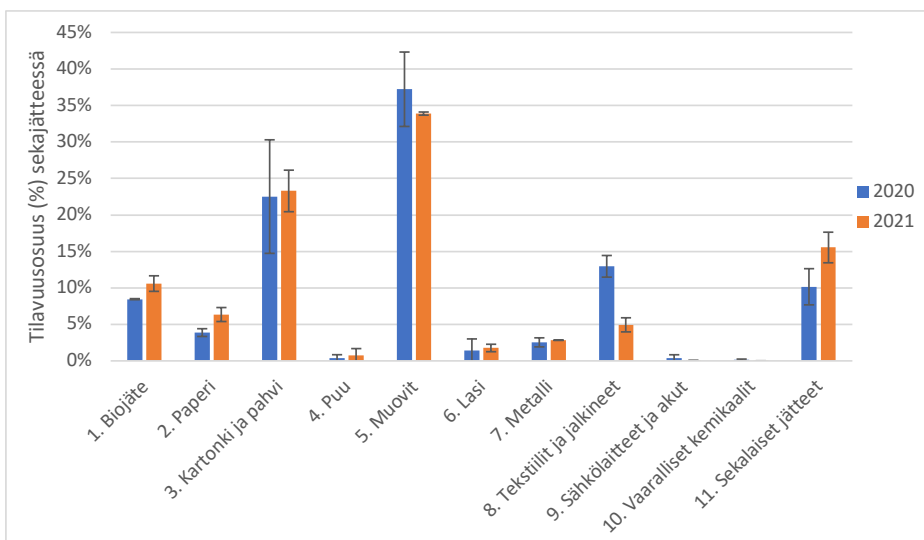
Taulukko 1. Sekajätteen koostumus Peitsarin alueella verrattuna Suomessa 2000-luvulla toteutettujen sekajätteen koostumustutkimusten keskimääriin massaosuuksiin (%) (lähde Suomen Kiertovoima Ry. s.a.).

Jätejae	Peitsari 2020 (%)	Peitsari 2021 (%)	Valtakunnallinen keskiarvo (%)
1. Biojäte	35,4	27,4	32,8 % (24,0–42,8 %; n=6)
2. Paperi	4,4	7,8	8,3 (5,3–12,1 %; n=6)
3. Kartonki ja pahvi	8,8	8,3	8,2 (6,6–11,0 %; n=6)
4. Puu	0,6	0,8	1,5 (0,8–2,3 %; n=6)
5. Muovit	14,4	16,0	16,7 (14,0–23,0 %; n=6)
6. Lasi	3,3	3,5	2,4 (1,5–3,7 %; n=6)
7. Metalli	1,9	7,2	2,3 (1,4–3,1 %; n=6)
8. Tekstiilit ja jalkineet	11,7	4,3	5,9 (3,9–10,4 %; n=6)
9. Sähkölaitteet ja akut	0,9	0,2	1,1 (0,5–2,7 %; n=6)
10. Vaaralliset kemikaalit	0,4	0,1	0,4 (0,1–0,9 %; n=6)
11. Sekalaiset jätteet	18,2	24,4	18,4 (13,3–25,4 %; n=6)

Tilavuudeltaan suurimmat jätejakeet olivat muovit (34–37 %) sekä kartonki ja pahvi (23 %) (kuva 21). Jäte-erien tilavuudet perustuvat karkeaan arvioon etenkin isompien jäte-erien osalta. Muutokset jätejakeiden massa- ja tilavuusosuuksissa vuosien 2020 ja 2021 koostumustutkimuksissa on esitetty kuvissa 13–14.



Kuva 13. Jättejakeiden massaosuuksien muutos lähtötilanteessa (vuosi 2020) ja biojätteiden lajittelua tehostavan tiedotuskampanjan jälkeen (vuosi 2021). Kuvassa on esitetty rinnakkaisnäytteiden keskiarvot ja keskihajonnat.



Kuva 14. Jättejakeiden tilavuusosuuksien muutos lähtötilanteessa (vuosi 2020) ja biojätteiden lajittelua tehostavan tiedotuskampanjan jälkeen (vuosi 2021). Kuvassa on esitetty rinnakkaisnäytteiden keskiarvot ja keskihajonnat.

JOHTOPÄÄTÖKSET

Peitsarin pilot-alueella toteutettu tiedotuskampanja biojätteen lajittelun tehostamiseksi oli onnistunut, sillä biojätteen osuus sekajätteessä laski 35 prosentista (2020) 27 prosenttiin (2021). Samaan aikaan (2020–2021) erilliskerätyn biojätteen määrä kasvoi 53 prosenttia jätemäärien punnituskierrosten perusteella. Vuosina 2021–2023 erilliskerätyn biojätteen määrä kasvoi keskimäärin 47 prosenttia asukasta kohden lähtötasoon (2020) verrattuna. Asukkaiden aktivointia tarvitaan kuitenkin koko ajan. Lisäksi erilliskerätyn biojätteen laatua pitäisi edelleen parantaa, sillä biojätteen joukossa on edelleen muovia ja muita epäpuhtauksia.

Viestintä on keskeisessä roolissa, jotta ihmiset saataisiin lajittelemaan jätteitä entistä paremmin. Asukastapahtumien järjestäminen Peitsarin alueella oli helppo tapa viestiä ihmisille, mutta haasteena oli kuitenkin, että kaikkia alueen asukkaita ei tavoitettu tapahtumissa. Tietoa jaettiin myös talojen ilmoitustaululla ja asukaslehdessä ja jakamalla biojätepusseja ja lajitteluohjeita suoraan asuntojen postiluukkuihin. Tehokkain toimenpide oli varmasti jätehuolto-yhtiö Metsäsairila Oy:n tarjoamien ilmaisten biojätepusseiden jakaminen asukkaille. Koostumustutkimukset sekä erilliskerätyn biojätteen ja sekajätteen määrien seuranta punnituskierrosten avulla toimivat hyvin tiedotuskampanjan onnistumisen ja biojätteen lajittelutehokkuuden mittaamisessa.

LÄHTEET

JLY 2017. Opas sekajätteen koostumustutkimuksiin - versio 2, 31.1.2017. Jätelaitosyhdistys ry. Saatavissa: http://www.kivo.fi/wp-content/uploads/Opas_sekajatteen_koostumustutkimuksiin_versio2.pdf

Mikalo Oy. Mikalo Oy:ltä saadut tilastotiedot Peitsarin alueen asukasmääristä ja asukkaiden ikä- ja sukupuolijakaumasta 2020–2023.

Suomen Kiertovoima ry. s.a. Kotitalousjätteen keskimääräinen valtakunnallinen koostumus. Saatavissa: https://kivo.fi/ymmaramme/koostumustietopankki/kotitalousjätteen_koostumus_yhteenveto/ Viitattu 28.10.2020.

KUINKA VIESTIÄ BIOJÄTTEISTÄ KIINNOSTAVASTI?

Johanna Järvinen

Nykypäivänä eletään viestien kyllästämää elämää. Tietoa on saatavana aiheesta kuin aiheesta helposti, nopeasti ja jopa pyytämättä. Eri tahot taistelevat saadakseen kuulijoilta hetken huomion omalle viestinnälleen, oli sitten kyse markkinoinnista, tiedottamisesta tai uutisoinnista. Myös hankkeiden viestintään tulee panostaa, jotta saataisiin halutunlaisia muutoksia aikaiseksi eli suuri yleisö omaksuisi viestin ja toteuttaisi sitä omassa elämässään. Näin voidaan lisätä hankkeen vaikuttavuutta.

TYÖPAJASSA IDEOITIIN KEINOJA VIESTIÄ BIOJÄTTEEN LAJITTELUSTA

Biojätteistä on helppoa viestiä asiapohjaisesti, mutta saadaanko sillä suuren yleisön huomio. Onko aihe tarpeeksi kiinnostava vai hukkuuko se kaiken muun kilpailevan viestinnän alle? Muun muassa tätä ongelmaa pyrittiin ratkomaan CityLoops-hankkeen työpajassa ”Biojätteiden lajittelun ja keräyksen tehostaminen Mikkeliissä” marraskuussa 2021 hankkeesta vastaavien toimijoiden Mikkelin kehitysyhtiö Miksein ja Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun vetämänä. Työpajassa pyrittiin löytämään palvelumuotoilun keinoin tapoja, joilla saataisiin erilliskerättyä yhä paremmin biojäte talteen mikkeliläisiltä kotitalouksilta, jotta biojäte ei päätyisi sekajätteen joukossa poltettavaksi.

Yksi tärkeimmistä työpajan viestintää koskevista ideoista oli, että viestinnässä voi käyttää huumoria ja uusia kontekstista poikkeavia keinoja, jotta se huomattaisiin informaatiotulvasa. Työpajassa tuli esille ajatus, että CityLoops-hanke sekä sen yhteistyökumppanit voisivat osallistua erilaisiin tapahtumiin, joissa kävijöitä voitaisiin neuvoa ja ohjeistaa ja varsinkin lapsille voitaisiin kertoa biojätteiden kierrätyksestä hausalla ja luovalla tavalla. Ideoinnin tuloksena hankkeen toimijat ja kumppanit osallistuivat lasten Hulivilikarnevaaleille Mikkeliissä vuoden 2022 kesällä.

INNOSTAVAA VIESTINTÄÄ LAPSILLE

Hulivilikarnevaaleilla kerrottiin lapsille, mitä on biojäte, miten sitä tulisi erilliskerätä ja kierrättää ja kuinka siitä valmistetaan paikallista biokaasua, jolla autot, bussit ja jäteautot voivat kulkea. Sanoma saatiin paketoitua hauskoihin peleihin sekä jäteautoon tutustumisen ja Biokeijun ja erilaisten hahmojen tarinoinnin kautta helposti ymmärrettävään muotoon

(kuvat 1–3). Isossa tapahtumassa kävijöitä oli tuhansia, joten hankkeen viesti tavoitti suuren määrän lapsia sekä heidän vanhempiaan. Tämä ei olisi ollut mahdollista ilman vakiintunutta ja vetovoimaista Hulivilikarnevaali-tapahtumaa ja yhteistyökumppaneita, kuten Metsäsairila Oy:tä sekä Lassila ja Tikanoja Oy:tä.



Kuva 1. Hulivilikarnevaaleilla lapsille opetettiin biojätteen lajittelua ja kerrottiin biokaasusta biojätepelin keinoin (kuvat Tiina Saario, Xamk).



Kuva 2. Lapset saivat tutustua biokaasulla kulkevaan jäteautoon (kuvat Juha Vihavainen, Xamk).



Kuva 3. Lapsille suunnatussa viestinnässä hyödynnettiin satuhahmoja. Esimerkiksi Biokeiju opetti lapsille, että biojätteestä saadaan "biovoimaa" (kuva Tiina Saario, Xamk).

KAIKKI IKÄLUOKAT HUOMIOON

Samalla idealla toteutettiin muitakin hankkeen promootiotapahtumia eri ikäluokille. Hanke osallistui nuorille tarkoitettuun Kierrätystori-tapahtumaan vuonna 2021, ja sitä oli järjestämässä Mikkelin kaupungin nuorisopalvelut. Muita tapahtuman järjestäjätahoja olivat Yhdessä-hanke, Ohjaamo Olkkari, Sosped-säätiön Kulttuuripaja Kajo ja Mikkelin Nuorten työpajat. Olikin järkevää mennä juuri sinne, missä kierrätyksestä kiinnostuneet nuoret oli mahdollista tavoittaa ja missä kasvotusten tapahtuva viestintä saavuttaisi heidät. Nuoria tavoitettiin myös Aalto-yliopistossa ja Xamkissa, ja kierrätyksestä päästiin kertomaan oppilaitosten omissa tilaisuuksissa.

Viestiminen eri ikäluokille juuri heille sopivalla tavalla kehittyi hankkeen toimintatavaksi. Aikuisia lähestyttiin tieteen, tutkimuksen ja asiapohjan kautta ja keskustelemalla muun muassa Mikkelin torin Mikkomarkkinoilla Energiansäästöviikolla syksyllä 2021. Tapahtuma järjestettiin yhteistyössä ProAgrian, LUT-yliopiston ja Metsäkeskuksen kanssa, ja Energiansäästöviikon päätavoitteena oli jakaa tarkempaa tietoa muun muassa biojätteistä saatavasta biokaasusta sekä selvittää niitä tekijöitä, joiden takia ihmiset eivät kierrätä biojätteitä toivotulla tavalla. Kasvokkain tapahtuvassa kiireettömässä keskusteluilmapiiirissä asiaan oli mahdollista paneutua, ja osallistujakumppanien laajan energiaosaamisen ansiosta myös kaikkein haastavimpiin kysymyksiin pystyttiin vastaamaan.

CITYLOOPS-HANKKEEN OPIT VIESTINTÄÄN

Hankkeessa havaittiin, että vaikuttavaan viestintään tarvitaan seuraavia asioita:

- Muuntautumiskykyä ja viestin muokkaamista kuulijakunnalle sopivaksi esimerkiksi paloittelemalla ja kohdentamalla viestintä eri ikäryhmille sopivaksi.
- Luovaa, hauskaa toimintaa ja aktiviteettia sanoman yhteyteen ja rohkeaa heittäytymistä, varsinkin kun tavoitellaan lapsiperheitä. Lapset ovat vastaanottavaisia ja oppivat leikin kautta, ja aikuiset malttavat kuunnella sanoman siinä ohessa.
- Laajaa yhteistyötä ja verkostoitumista eri toimijoiden kanssa kaupungissa ja osallistumista vetovoimaisten tapahtumien luontiin, sillä niissä sanoma tavoittaa suuren kuulijakunnan. Verkostoyhteistyötä on helppo hyödyntää, ja vastavuoroisuutta voidaan harjoittaa myös muissa tapahtumissa ja tilaisuuksissa.

Hankeviestinnästä ymmärrettiin tärkeimpänä asiana se, että viestinnän ei tarvitse olla pakopullaa, vaan se voi olla myös hauskaa. Kun itse toimii viestijänä positiivisella ja avoimella mielellä, sanoma välittyy kuulijalle siten, että se jättää positiivisen ja syvän muistijäljen. Juuri tällainen on vaikuttavaa hankeviestintää.

TÄYSIMITTAISEN BIOKAASU- LAITOKSEN PROSESSI JA TOIMINTA – BIOSAIRILA OY

Leena Pekurinen & Vuokko Malk & Hanne Soininen & Jonne Gråsten

Mikkeli on jo vuosia kierrättänyt biojätteitä maanparannustuotteiksi kompostoimalla, mutta vuodesta 2021 lähtien biojätteet on kierrätetty BioSairila Oy:n biojalostamossa (kuva 1) biokaasuksi. BioSairila Oy:n biojalostamossa käsitellään Mikkelin talousalueella syntyvä biojäte ja jätevesilietteet sekä maatalouden ja teollisuuden sivuvirtoja. Puhdistamoliete ja biojäte käsitellään erikseen, koska puhdistamolietteen lopputuotteille lannoite- ja maanparannuskäytössä on eri lainsäädäntö ja vaatimukset, ja ne voivat sisältää enemmän haitallisia aineita.



KUVA 1. Biojäte käsitellään BioSairila Oy:n biokaasulaitoksella. Perinteinen kompostilaitos tukee biokaasulaitoksen toimintaa (kuva Metsäsairila Oy).

Biojalostuksen lopputuotteita ovat liikennebiokaasuksi jalostettu biometaanin sekä lannoitteet ja maanparannustuotteet. BioSairila Oy:n tehdas tuottaa täydellä kapasiteetilla noin 1,5 Mm³ (1 000 tonnia, 15 GWh) liikennebiokaasua, joka vastaa noin 2 000 henkilöauton vuosikulutusta. Liikennebiokaasua jaetaan viidellä biokaasuasemalla Mikkeliin ja Kuortissa. Biokaasun tuotannon sivutuotteista ravinnerikas mädäte muuttuu maanparannusaineiksi ja lannoitteiksi. Biokaasua tuottamalla ja käyttämällä kaupunki pystyy vähentämään

fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Ravinteiden talteenotto biokaasuprosessin lingotusta mädätteestä puolestaan vähentää tarvetta käyttää neitseellisiä lannoitekemikaaleja.

Mikkelin Haukivuoressa sijaitsee BioSairila Oy:n biokaasulaitos Biohauki. Se on suunniteltu tuottamaan metaania karjanlannasta ja lähialueiden heinästä. Siellä tuotettua biokaasua käytetään myös liikennebiokaasuna. Biokaasulaitoksen sivutuotteet kuljetetaan takaisin tiloille käytettäväksi maanparannusaineina kasvien viljelyssä. Laitos ei ole tällä hetkellä tuotannossa.

BioSairila Oy:n Mikkelin Metsäsairilan lajittelu- ja kierrätyskeskuksessa sijaitsevalla biokaasulaitoksella on käytössä kolme reaktoria: yksi jätevesilietteelle ja kaksi biojätteille. Vuonna 2023 biojalostamon käyttöasteen arvioidaan olevan noin 90 prosenttia ja vuonna 2024 sata prosenttia. Vuodesta 2024 alkaen laitoksella tullaan käsittelemään Mikkelin jätevesilietteet ja noin 25 kunnan biojätteet. Niiden lisäksi on mahdollista käsitellä teollisuuden ja maatalouden sivuvirtoja. (Liukkonen 2022)

Biokaasulaitoksella käytetään raaka-aineina jätevesilietettä, nurmea sekä erilliskerättyä biojätettä ja kaupan/teollisuuden biojätettä. Jätevesilietettä (TS noin 22 %) käytetään 4 000–6 000 tonnia, nurmea (TS 35–40 %) käytetään 1 000 tonnia ja erilliskerättyä biojätettä ja kaupan/teollisuuden biojätettä (TS 25–35 %) käytetään 6 000–12 000 tonnia vuodessa. Jätevesiliete tulee läheiseltä jätevedenpuhdistamolta, ja biojätteet ovat Mikkelin talousalueelta erilliskerättyä biojätettä. (Heinonen 2022) Nurmiraaka-aineena käytetään niittyjen niittoheinää, mutta sitä voidaan myös tuottaa erikseen.

Mädätejäännöksestä valmistetaan multatuotteita ja maanparannusainetta. Biojätteen mädätyksestä syntyvä mädäte separoidaan neste- ja kuivajakeiksi. Jätevesilietteestä syntyvällä mädätteellä tehdään gravitaatioon ja aikaan perustuvaa laskeutusta nestejakeen erottamiseksi (Heinonen 2022). Perinteinen kompostilaitos tukee biokaasulaitoksen toimintaa. Esimerkiksi mädätteen kuivafraktio kompostoidaan ja hyödynnetään maanparannusaineena. Vuonna 2022 tuotanto ulkoistettiin kaupalliselle toimijalle Kekkilä Oy:lle.

Biosairilan Oy:n biokaasulaitokset omistaa kunnallinen jäteyhtiö Metsäsairila Oy (60 prosenttia) ja energiayhtiö Etelä-Savon Energia Oy (40 prosenttia). Metsäsairila Oy:n ja Etelä-Savon Energia Oy:n omistaa Mikkelin kaupunki. Mikkelin kaupunki järjesteli biokaasulaitosten omistuksen uudelleen vuoden 2023 alusta. Kaasuasemat ja Biohauki Oy:n biojalostamo siirtyivät BioSairila Oy:lle. Uuteen yhtiöön kuuluu kaksi biokaasulaitosta eli BioSairila ja BioHauki sekä kaasunjakeluasemat. Metsäsairila Oy on uuden yhtiön enemmistöomistaja ja ESE vähemmistöomistaja. CityLoops-hankkeessa painopiste oli kotitalouksien biojätteen käsittelyssä ja BioSairilan biokaasulaitoksen prosesseissa.

BIOKAASULAITOKSEN PROSESSIT

BioSairila Oy:n biokaasulaitoksella toimii kaksi erillistä linjaa. Toisessa mädätetään jätevesilietettä ja toisessa biojätteitä. Kummassakin prosessissa voidaan käyttää syötteenä lisäksi pieniä määriä nurmiheinää. Prosessissa käytettävät raaka-aineet esikäsitellään ennen reaktorimädätystä.

Mädätysprosessissa syntyvä raakabiokaasu varastoidaan kaasukupuun, minkä jälkeen se jalostetaan liikennebiokaasuksi ja paineistetaan. Reaktoreissa syntyvät mädätteet hyödynnetään maanparannuksessa ja multatuotteina. Kuvassa 2 on esitetty biokaasulaitoksen alueen kokonaisuus.



KUVA 2. Ilmakuva BioSairila Oy:n kaasuntuotantoprosessista (kuva Mikko Liukkonen).

RAAKA-AINEIDEN VASTAANOTTO JA ESIKÄSITTELY

Biokaasulaitoksella raaka-aineina käytettävät biojäte ja jätevesiliete otetaan vastaan niille varattuihin siiloihin. Kummallekin raaka-aineelle on oma siilonsa. Biojätteen seassa on usein muun muassa muoveja ja muita mätänemättömiä jätteitä, minkä vuoksi se murskaataan ja seulotaan ennen siirtoa mädätysreaktoriin. Biojäte kuljetetaan ruuvikuljettimien avulla murskaimen ja seulan kautta bunkkeriin. Bunkkeri toimii välivarastona virka-ajan ulkopuolella tapahtuvaa syöttöä varten (Heinonen 2022). Bunkkerista biojäte annostellaan annosteluruuvien avulla mäntäpumppuun ja siitä edelleen männän avulla esilämmitykseen. (BioSairila Oy s.a.) Ennen mädätystä biojäte esilämmitetään 40 °C:seen jatkuvatoimisesti.

Jätevesiliete vastaanotetaan bunkkeriin, josta se kuljetetaan annosteluruuvin avulla jätevesilietepumpulle. Pumpun kautta jätevesiliete johdetaan hygienisointiyksikköön, jossa se hygienisoidaan jatkuvatoimisesti 70 °C:n lämpötilassa tunnin ajan ennen biokaasureaktoriin syöttämistä.

Nurmisyöte otetaan vastaan bunkkeriin, josta se syötetään liikkuvan lattian ja hajotustelan kautta keräysruuville ja edelleen murskaimelle. Murskaimelta nurmisyöte annostellaan erilaisten kuljettimien avulla biokaasureaktoreihin.

MÄDÄTYSPROSESSI

Esikäsiteltyt syötteet ohjataan biokaasureaktoreihin hapettomiin olosuhteisiin. BioSairilassa mädätys tapahtuu mesofilisessa (lämpötila noin 39–42 °C), jatkuvatoimisessa kuivamädätysprosessissa. Jäteveden mädätysprosessissa syötteen kuiva-ainepitoisuus (TS, Total Solids) on noin 20–25 prosenttia. Jätevesilietteen toimittaja mittaa kuiva-ainepitoisuuden viikoittain. Biojätteen kuiva-ainepitoisuutta ei sen heterogeenisuuden vuoksi voida arvioida täsmällisesti. Jatkuvatoimisessa prosessissa raaka-ainetta syötetään jatkuvasti reaktoriin, jonka sisällä sekoittimet siirtävät sitä hitaasti eteenpäin. Mädätetty massa ohjataan ulos reaktorin toisesta päästä. (BioSairila Oy s.a.)

Mädätysprosessi kestää noin 25–35 vuorokautta, ja siinä on neljä vaihetta: hydrolyysi, asidogeneesi, asetogeneesi ja metanogeneesi. Biojättereaktoreiden rikkivedyn määrää hallitaan myös syöttämällä happea reaktorin peräpäästä. (Heinonen 2022)

Mädätysprosessissa syntyy raakabiokaasua, joka sisältää metaania, hiilidioksidia, vettä ja pieniä määriä muita kaasuja. Kaasu kulkeutuu putkea pitkin kaasukupuun, jossa se väli-varastoidaan jatkokäsittelyä varten. (BioSairila Oy s.a.) Jäljelle jäävä liete on mädätettä. Mädäte ohjataan vielä separointiyksikköön, jossa se erotellaan ruuvipuristimella neste- ja kuivajakeiksi.

BIOKAASUPROSESSISSA SYNTYVIEN TUOTTEIDEN KÄSITTELY

Biokaasuprosessin reaktiotuotteita ovat raakabiokaasu ja mädäte. Raakabiokaasusta valmistetaan liikennebiokaasua ja mädätteet hyödynnetään lannoite- ja multatuotteina. Vuonna 2021 raakabiokaasua syntyi noin 684 000 m³. Siitä jalostettua liikennebiokaasua myytiin noin 306 000 m³. Sekä jätevesiliete että biojättereaktorissa syntyvä raakabiokaasu varastoidaan kaasuvaraan. Kaasuvaraan vallitsee lievä ylipaine, jotta sen pyöreä muoto pysyy silloinkin, kun se ei ole täynnä biokaasua. Raakabiokaasusta 50–60 prosenttia on metaania. Se puhdistetaan, jalostetaan ja paineistetaan liikennebiokaasuksi, jonka metaanipitoisuus on jopa yli 96 prosenttia. Kaasuun lisätään myös hajuste, jotta mahdolliset

vuodot on helpompi havaita. Kaasu paineistetaan yli 200 bariin ja pullotetaan pullovarastoon tai siirtokonttiin odottamaan kuljetusta kaasunjakeluasemille. (BioSairila Oy s.a.) Raakabiokaasusta käytetään aina osa omaan lämmöntuotantoon, millä varmistetaan muun muassa hygienisointiprosessien, reaktoreiden ja tilojen lämmitys. Lämmöntuotantoon on mahdollista käyttää myös kevyttä polttoöljyä, mutta sitä ei haluta käyttää taloudellisista ja ympäristösyistä. (Heinonen 2022)

Jäteveden biokaasureaktorissa syntyy vuodessa 3 000–5 000 tonnia mädätejäännöstä, jonka kuiva-ainepitoisuus on 12–16 prosenttia. Se siirretään varastosäiliöön odottamaan jatkokäyttöä. (Heinonen 2022)

Biojätteen biokaasureaktorista syntyvä mädätejäännös jälkihygienisoidaan 170 m³:n hygienisointiyksikössä 70 °C:n lämpötilassa tunnin ajan. Sieltä se johdetaan 45 kW:n Bellmer Kufferath -ruuvipuristimeen, jossa neste- ja kuivajakeet erotellaan toisistaan. Ruuvipuristimen seulaverkon kautta puristettu nestejake ohjataan pumpulle, jonka avulla se pumpataan säiliöön odottamaan jatkokäyttöä peltolannoitteena. Seulaverkon aukkojen halkaisija on rummun sisäpuolelta katsoen 18 mm ja ulkopuolelta katsoen 6 mm. Ruuvipuristimella saavutetaan nestejakeen kuiva-ainepitoisuus (TS) noin 4–8 prosenttia ja kiintojakeen kuiva-ainepitoisuus noin 35–45 prosenttia. (Heinonen 2022)

MÄDÄTYSPROSESSISSA SYNTYVIEN TUOTTEIDEN HYÖDYNTÄMINEN

Mädätysprosessin lopputuotteeksi jalostettu liikennebiokaasu toimitetaan lähialueen kaasunjakeluasemille biokaasua hyödyntävien kulkuneuvojen tankattavaksi. Mikkelin seudulla kaasunjakeluasemat sijaitsevat Graanin kauppakeskuksen yhteydessä, Tuskussa Insinöörinkadulla, Haukivuorella asemankylän läheisyydessä ja Pertunmaan Kuortissa ja Metsäsairilan lajittelu- ja kierrätyskeskuksessa. (e-kaasuasemat s.a.)

Biojätteen mädätysprosessin mädätejäännöksestä eroteltu kuivajake menee energiahyötykäyttöön. Nestejake päättyy peltolannoitteeksi. Jätevesiliikkeen mädätysprosessin mädätejäännös puolestaan hyödynnetään mullantuotannossa. (Heinonen 2022)

BIOSAIRILA OY – BIOKAASULAITOKSEN TULOKSET

Demonstraatiovaiheen aikana BioSairila Oy:n biokaasulaitokselta noudetusta reaktorimädätteestä sekä biokaasulaitoksella erotelluista neste- ja kuivajakeista teetettiin kemialliset analyysit ALS Finland Oy:n laboratoriossa. Kemiallisten analyysien tulokset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Kemiallisen analyysin tulokset raaka-aineena käytetystä biokaasureaktorimädätteestä sekä siitä BioSairila Oy:ssä erotelluista neste- ja kuivajakeista. (ALS Finland Oy) Pitoisuudet on ilmoitettu kuiva-ainetta (k.a.) kohden.

Ominaisuus	Yksikkö	Mädäte	Kiinteä jae	Nestejae
Ammonium	mg/kg k.a.	46 900	12 000	109 000
Ammoniumtyppi	mg/kg k.a.	36 400	9 310	84 300
Nitriitit	mg/kg k.a.	<6,58	<0,050	<0,050
Nitriittityppi	mg/kg k.a.	<2,00	<0,020	<0,020
Nitraatit	mg/kg k.a.	<133	<20	<20
Nitraattityppi	mg/kg k.a.	<30,0	<4,0	<4,0
Kokonaistyyppi	mg/kg k.a.	88 100	25 200	123 000
Kokonaistyyppi	mg/L	3 910	945	4 020
Kokonaisfosfori	mg/kg k.a.	9 370	15 300	6 460
Liukoinen fosfori	mg/L	70,3	15,2	71,1
C/N-suhde		3,82	14,5	2,96
Palavat yhdisteet	% k.a.	67,2	72,9	73,1
Sähkönjohtavuus	mS/m	4 300	612	4 880
Kuiva-aine 105 °C	%	12,3	35,9	5,54
Orgaaninen kuivapaino	% k.a.	67,2	72,9	73,1
pH (H ₂ O)		8,0	8,5	8,3

BioSairilan biokaasulaitoksella ruuvikuivausprosessissa on päästy 35,9 prosentin kuiva-ainepitoisuuteen, kun mädätteen kuiva-ainepitoisuus on ollut 12,3 prosenttia. Ammonium ja ammoniumtyppi sitoutuivat enimmäkseen (noin 90 %) mädätteen nestejakeeseen. Nitriitti- ja nitraattipitoisuuksille ei saatu kunnollisia tuloksia, koska näytteiden ominaisuuksien vuoksi määrittämisrajoja on eri näytteille jouduttu nostamaan. Luvut kertovat kuitenkin näytteiden sisältämän ravinteen enimmäismäärän. Kokonaistyyppipitoisuus on ilmoitettu pitoisuutena kuiva-aineessa ja litrassa näytettä. Kokonaistypestä 83 prosenttia on sitoutunut nestejakeeseen. Liukoisesta tuestä vastaava luku on 81 prosenttia. Kokonaisfosforista 70 prosenttia on sitoutunut kuivaan jakeeseen, mutta liukoisesta fosforista 82 prosenttia on nestejakeessa. Palavat yhdisteet ovat pieninä partikkeleina, jotka jakautuvat melko tasaisesti neste- ja kuivajakeisiin. Hiilen ja typen suhde on siten kuivajakeessa huomattavasti suurempi kuin nestejakeessa. pH on hieman noussut sekä kuiva- että nestejakeessa verrattuna mädätteeseen, josta jakeet on eroteltu.

LÄHTEET

BioSairila Oy. s.a. Biokaasujalostamo ja biokaasun tuotantoprosessi. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://biosairila.fi/prosessi/>.

e-kaasuasemat s.a. Mikä on e-kaasuasemat? WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://e-kaasuasemat.fi/e-kaasuasemat/>.

Heinonen, A. 2022. BioSairila Oy:n prosessikuvaukset ja muu sähköpostitse saatu tieto helmi–huhtikuussa 2022.

Liukkonen, M. 2022. Biokaasusta vauhtia Etelä-Savoon -webinaari 22.2.2022. PPT-esitys.

Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 331/2013.

BIOJÄTTEEN LAADUN JA KÄSITTELYN VAIKUTUS BIOKAASULAITOKSEN OPTIMOINNISSA

Tiina Saario & Vuokko Malk & Hanne Soininen & Shila Jafari

Biojätteiden käsittely biokaasulaitoksella vaatii paljon optimointia, jotta laitoksella saavutetaan paras mahdollinen kaasuntuottopotentiaali. Laboratoriomittakaava on turvallinen ja taloudellinen tapa tehdä esiselvitystä esimerkiksi haitallisten aineiden käyttäytymisestä biokaasuprosessissa ilman, että vaarannetaan laitosmittakaavan reaktorin toiminta. Nämä tulokset voidaan usein monistaa käyttäntöön demonstraatio- ja laitosmittakaavassa.

Xamkin ympäristölaboratoriossa testattiin CityLoops-hankkeen aikana erilaisia käsittelymenetelmiä, joiden tavoitteena on optimoida biokaasuprosessin toimintaa. Tutkimuksissa käsiteltiin muun muassa syötemateriaalien esikäsittelyn vaikutusta, biojätteen vuosivaihtelun merkitystä ja biohiilen monia käyttökohteita biokaasuprosessissa.

BIOKAASUPROSESSIN OPTIMOINTIA

Biokaasua tuotetaan anaerobisissa olosuhteissa mädättämällä orgaanista materiaalia, kuten biojätettä, lantaa ja erilaisia jätevesilietteitä. Muodostuva biokaasu sisältää pääasiassa metaania ja hiilidioksidia, mutta myös pieniä määriä rikkivetyä ja ammoniakkaa. Syntyvää metaania käytetään lämmön- ja sähköntuotannossa sekä biopolttoaineena.

Biokaasuprosessin optimoinnissa tulee ottaa huomioon lukuisia muuttuvia tekijöitä. Reaktorin pH ja lämpötila ovat helpoimmin määritettävissä. Syötteellä ja sen ominaisuuksilla on merkittävä vaikutus reaktorin toimintaan. Prosessin toimintaan vaikuttavat muun muassa syötteen koostumus, ravinne- ja haitta-ainepitoisuudet, palakoko, hiilityppisuhde ja se, onko syöte sellaista, johon reaktorin metanogeenit ovat tottuneet. Näihin ominaisuuksiin voidaan osittain vaikuttaa esimerkiksi syötemateriaalin esikäsittelyllä. Lisäksi syötteiden ja prosessin optimoinnissa tulee ottaa huomioon lopputuotteiden käyttö.

Biokaasuprosessi tuottaa myös sille itselleen haitallisia aineita. Nämä samat aineet voivat haitata prosessin toimintaa ja lopputuotteiden käyttöä. Jos reaktori tuottaa esimerkiksi suuria määriä rikkivetyä, vaatii biokaasun jatkojalostus erilaisia suodatusratkaisuja ennen kuin sitä voidaan käyttää liikennepolttoaineena.

Biohiilen käyttöä rikkivedyn poistossa on tutkittu paljon. Biohiilellä on useita ominaisuuksia, kuten suuri ominaispinta-ala, huokoisuus ja kationinvaihtokapasiteetti (Sun ym. 2018), jotka tekevät siitä tehokkaan materiaalin lukuisiin eri käyttökohteisiin. Biohiiltä on testattu parantamaan metaanin saantoa biokaasuprosessissa (Dudek ym. 2019, Inthapanya ym. 2012). Lisäksi biohiiltä on testattu ehkäisemään muiden haitallisten aineiden, kuten ammoniakkin ja haihtuvien rasvahappojen (VFA), vaikutusta (taulukko 1). Biohiilen toimivuus prosessissa riippuu sen ominaisuuksista. Käytännössä jokainen biohiilityyppi vaatii testauksen.

Taulukko 1. Biohiilen käyttö biokaasulaitoksella (lähteet: ^a Lü ym. 2016, ^b Su ym. 2019, ^c Wang ym. 2017, ^d Lü ym. 2019, ^e Lim ym. 2020, ^f Yu ym. 2021, ^g Wang ym. 2021, ^h Kaur ym. 2020).

Biohiilen raaka-aine	Pyrolyysiolosuhteet	Biohiili-annos	Syöte	Reaktoriolosuhteet	Inhiboivat tekijät (pitoisuus)	Lisäaineen vaikutus
Hedelmäpuu ^a	800–900 °C	10 g/l	Ammonium-jätevesi	35 °C	Ammonia (jopa 7 g-N/l)	Maks. metaanin tuotantonopeus kasvoi 23,5–47,1 % riippuen biohiilen partikkelikoosta
Macadamia-pähkinä kuori ^b	350 °C 2 h	3 g/l	Ruokajäte	Huone-lämpö	Ammonia (yli 1,5 g/l)	COD:n poistotehokkuus nousi 90 %:iin
Mato-komposti ^c	500 °C 2 h	24 g/l	Kananlanta ja keittiöjäte	35 ± 1 °C	VFAs (yli 12 g/l)	TVFA laski 10,8 g/L à 4 g/l
Mänty ^d	800 °C 8 h	10 g/l (jauhe)	Öljy	55 ± 1 °C 90 rpm	VFA (0,5 g DOC/l)	Metaanisaanto kasvoi 13,3 %
Mänty ^d	800 °C 8 h	10 g/l (rae)	Öljy	35 ± 1 °C 90 rpm	-	Metaanisaanto kasvoi 32,5 %
Puuhake ^e	800 °C	5 g/l	Ruokajäte	55 °C	VFA (yli 3 g/l)	Metaanisaanto kasvoi 18 %
Riisinkuori ^f	550 °C 2 h	10 g/l	Maissin-korjuujäte ja kananlanta	Mesofiilinen	Ammonia (yli 6 g/l)	Volumetrinen metaanin tuotantonopeus parani 27,8–96,4 %
Sahan-purujäte ^g	500 °C, 1,5 h	20 g/l	Ruokajäte ja liete	35 °C	VFA (57,9 g COD /l)	Butyraatti laski 68,9 %, metaanipitoisuus nousi yli 70 %
Vehnäolki-pelletti ^h	550 °C	10 g/l	Ruokajäte ja liete	35 °C, 80 rpm	VFA (yli 40 g/l)	Propionihappo laski arvoon 1,46 g/l, metaanisaanto parani 24 %

BIOJÄTE BIOKAASUKSI YMPÄRISTÖLABORATORIOSSA

CityLoops-hankkeen aikana tehtiin Xamkin ympäristölaboratoriossa yhdeksän biokaasukoesarjaa. Kokeissa testattiin muun muassa erilaisia ymppejä ja niiden soveltuvuutta biojätteen mädätykseen sekä biokaasulaitokselle toimitettua erilliskerättyä biojätettä ja ravintolan biojätettä. Kokeissa testattiin erilaisia tukiaineita sekä niiden mahdollisesti sisältämiä haitallisia aineita ja niiden vaikutuksen ehkäisyä. Seuraavassa taulukossa 2 on esitetty yhteenvedo tutkituista aihealueista.

Taulukko 2. Biokaasukokeiden aihealueet ja testatut materiaalit.

Tutkimuskohde	Idea	Materiaalit
Syötteen esikäsittely	Syötemateriaalin esikäsittely seulomalla ja murskaamalla. Vaikutus biokaasuntuotantoon ja lopputuotteistamiseen.	Ymppe (biojäte syötteenä) Biojäte Puutarhajäte
Syötteen optimointi	Biojätteen vuosivaihtelun vaikutus biokaasutuotantoon	Biojäte
	Syötemateriaalit biojätteen rinnalla	Biojäte Puutarhajäte Jätevesiliete
	Haitallisten aineiden vaikutus	Biojäte Sitruhedelmät
Tuotannon optimointi	Sekoituksen vaikutus biokaasuntuotantoon	Biojäte Puutarhajäte
Biohiili biokaasuprosessin tukiaineena	Biohiilen vaikutus metaanintuotantoon	Biojäte Koivupohjainen biohiili
	Biohiilen vaikutus haitallisten aineiden vaikutuksen ehkäisyssä	Biojäte Sitruhedelmät Koivupohjainen biohiili
	Biohiilen vaikutus rikkivety-pitoisuuteen	Biojäte Koivupohjainen biohiili
	Biohiilen vaikutus ammonium-pitoisuuteen	Biojäte Koivupohjainen biohiili

Laboratoriokokeita varten raaka-aineet ja testattavat materiaalit vaativat esikäsittelyä. Esikäsittelymenetelminä käytettiin käsin seulontaa, murskausta, koneellista hienonnusta ja pilkkomista. Raaka-aineista seulottiin pois muun muassa muoveja tai koesarjoja haittaavia ainesosia, kuten hajoamattomia biomuovipusseja. Murskausta ja pilkkomista käytettiin pääsääntöisesti biojätteelle ja biohiilelle, jotta saavutettiin laboratoriokokeisiin sopiva alle 12 mm:n palakoko. Kokeiden raaka-aineet sekä tuotetut mädätteet analysoitiin Xamkin ympäristölaboratoriossa sekä ulkopuolisessa laboratoriossa.

Laboratoriomittakaavan biokaasukokeet toteutettiin panosperiaatteella joko kahden litran pulloreaktoreilla tai pilot-mittakaavan 15 litran reaktoreilla (kuva 1). Mädätys tapahtui mesofilisissä olosuhteissa noin 40 °C:n lämpötilassa. Pulloreaktoreiden sekoitus tapahtui manuaalisesti viitenä päivänä viikossa. Pilot-mittakaavan 15 litran reaktoreissa oli jatkuva 20 rpm:n sekoitus niissä koesarjoissa, joissa sekoitus oli käytössä.

Biokaasupotentiaalit määritettiin kahden litran panoskoesarjoista tilavuusmittauksen perusteella. Pullokokeissa muodostuva biokaasu kerättiin kaasupusseihin, joista määritettiin tuotetun kaasun tilavuus vesivaa'alla. Pilot-mittakaavan 15 litran reaktoreissa on käytössä automaattiset kaasukellot. Molempien koelaitteistojen metaanipitoisuudet määritettiin kaasukromatografilla.

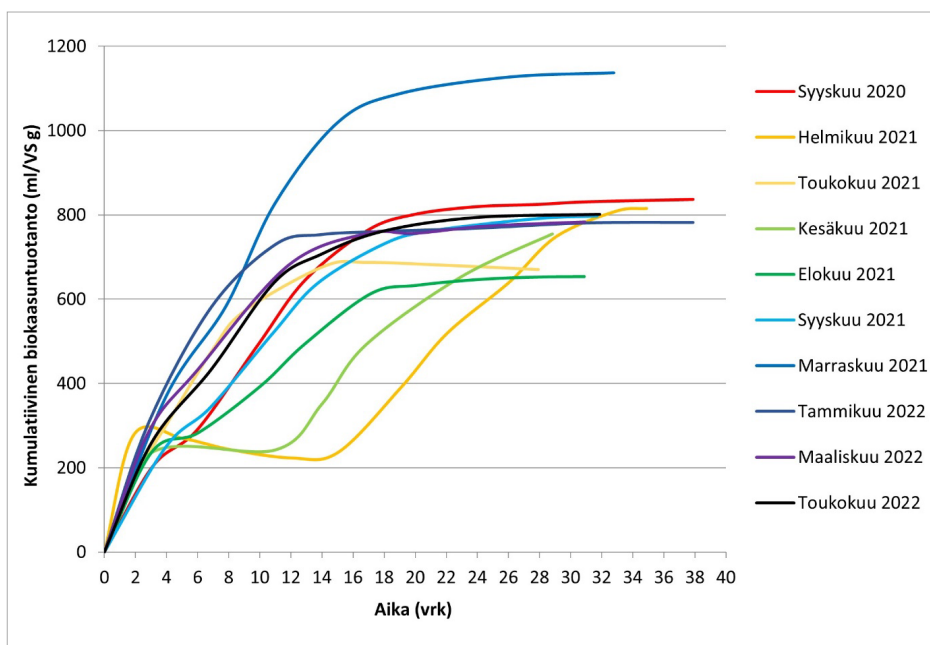


Kuva 1. Kuvassa vasemmalla pulloreaktorit lämpökaapissa ja oikealla lämmityksellä, sekoituksella ja tuotetun biokaasun tilavuusmäärityksellä varustetut 15 litran biokaasureaktorit (kuvat Tiina Saario ja Manu Eloaho).

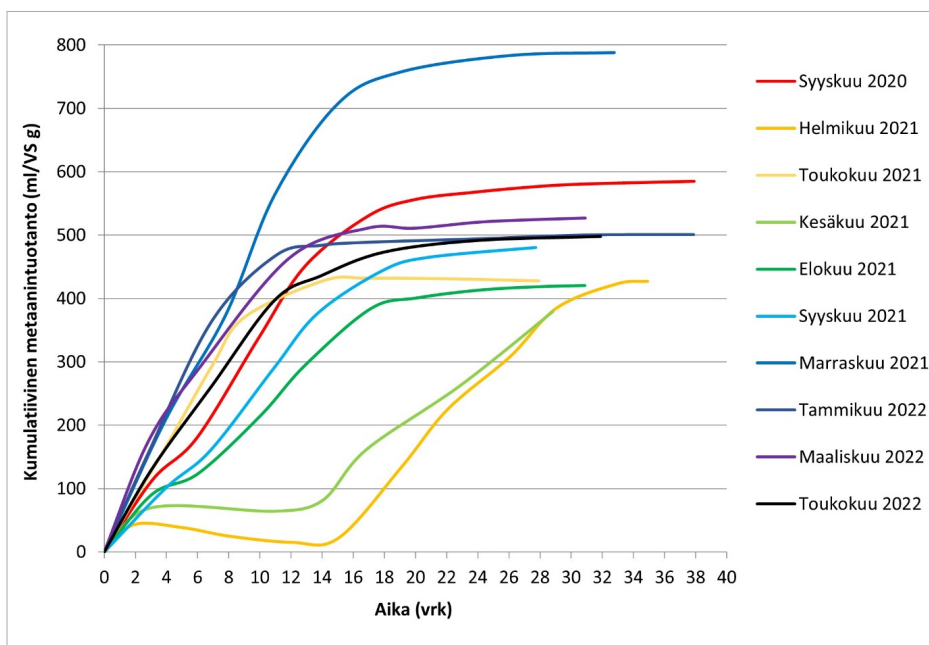
SYÖTEMATERIAALI BIOKAASULAITOKSEN PROSESSIN OPTIMOINNISSA – BIOJÄTTEEN VUOSIVAIHTELUN VAIKUTUS

Kaasuntuotannon kannalta on tärkeää kiinnittää huomiota biokaasulaitoksessa käytettäviin raaka-aineisiin ja niiden seoksiin. Vaikka biojätettä on saatavilla ympäri vuoden, sen laatu ja määrä vaihtelevat. CityLoops-hankkeen kokeet olivat käynnissä ympäri vuoden, mikä mahdollisti eri vuodenaikoina kerätyn biojätteen biokaasuntuotantojen vertailun. Biojätteen koostumus, kuten kuiva-aine, vaihteli kuukausittain ja koe-eräkohtaisesti.

Kaasuntuotanto osoitti materiaalin heterogeenisyyden (kuvat 2 ja 3). Biokaasuntuottopotentiaalin keskiarvo oli $805 \text{ m}^3_{\text{biokaasu}}/\text{tVS}$ (vaihteluväli $654\text{--}1\,137 \text{ m}^3_{\text{biokaasu}}/\text{tVS}$) ja metaanintuottopotentiaalin keskiarvo oli $514 \text{ m}^3_{\text{metaani}}/\text{tVS}$ (vaihteluväli $420\text{--}788 \text{ m}^3_{\text{metaani}}/\text{tVS}$). Vaihtelu ei näkynyt kuitenkaan vain kaasun kokonaistuotannossa, vaan myös kaasuntuotannon käynnistymisnopeudessa ja tuotantovaihteluissa. Tämä osoittaa muun muassa vaihtelua syötemateriaalin ainesosien, kuten proteiinin ja rasvan, määrissä.



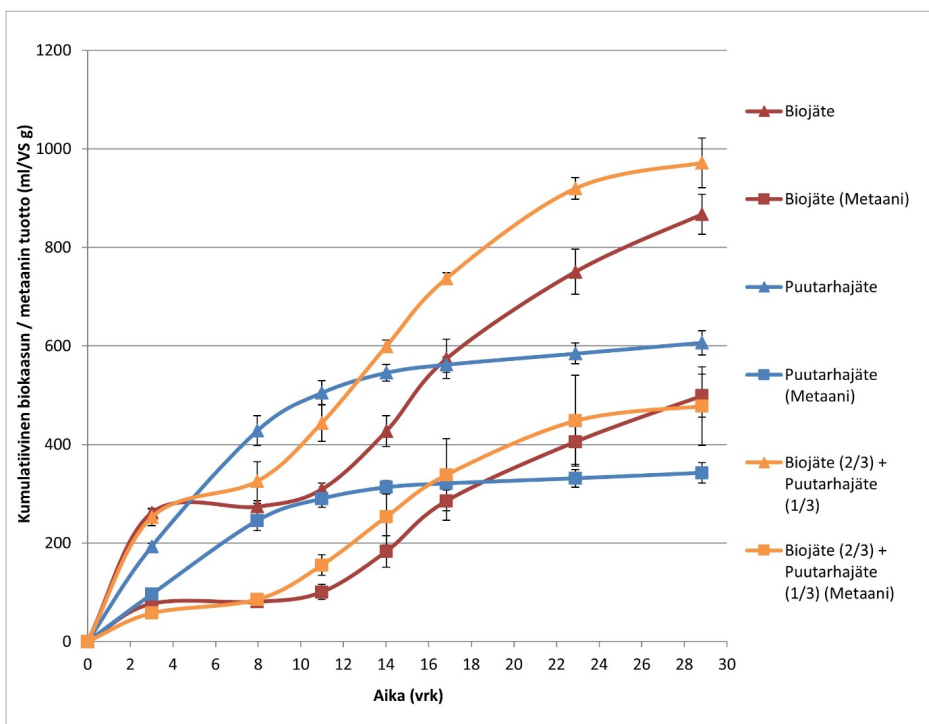
Kuva 2. Biojätteen kumulatiivisen biokaasuntuoton vuosivaihtelu hankkeen aikana.



Kuva 3. Biojätteen kumulatiivisen metaanintuoton vuosivaihtelu hankkeen aikana.

SYÖTEMATERIAALI BIOKAASULAITOKSEN PROSESSIN OPTIMOINNISSA – PUUTARHAJÄTE BIOJÄTTEEN TUKIAINEENA

Xamkin ympäristölaboratoriossa tutkittiin biojätteen ja puutarhajätteen biokaasuntuotantoa. Erilliskerätyllä biojätteellä ja puutarhajätteellä oli merkittävä ero sekä tuotettavan kaasun määrässä että kaasuntuotannon etenemisessä (kuva 4). Syötemateriaalien seoksen (biojäte 2/3 ja puutarhajäte 1/3) kaasuntuotanto käynnistyi tehokkaammin kuin pelkällä biojätteellä syötetyllä reaktorilla. Pelkkää puutarhajätettä sisältävän reaktorin kaasuntuotanto ylitti seoksen kaasuntuotannon muutamassa päivässä, mutta sen kaasuntuotanto loppui selkeästi nopeammin. Tulosten pohjalta voidaan todeta, että puutarhajäte voisi olla hyvä materiaali tasapainottamaan biojätteen kaasuntuotantovaihteluita. Pelkän biojätteen biokaasuntuotopotentiaali oli $755 \text{ m}^3_{\text{biokaasu}}/\text{tVS}$ ja puutarhajätteen $494 \text{ m}^3_{\text{biokaasu}}/\text{tVS}$, kun taas näiden seoksen potentiaali oli $860 \text{ m}^3_{\text{biokaasu}}/\text{tVS}$. Metaanintuottopotentiaalit taas olivat biojätteellä $469 \text{ m}^3_{\text{metaani}}/\text{tVS}$, puutarhajätteellä $312 \text{ m}^3_{\text{metaani}}/\text{tVS}$ ja seoksella $448 \text{ m}^3_{\text{metaani}}/\text{tVS}$.



Kuva 4. Biojätteen, puutarhajätteen ja näiden seoksen kumulatiivinen biokaasun- ja metaanintuotto.

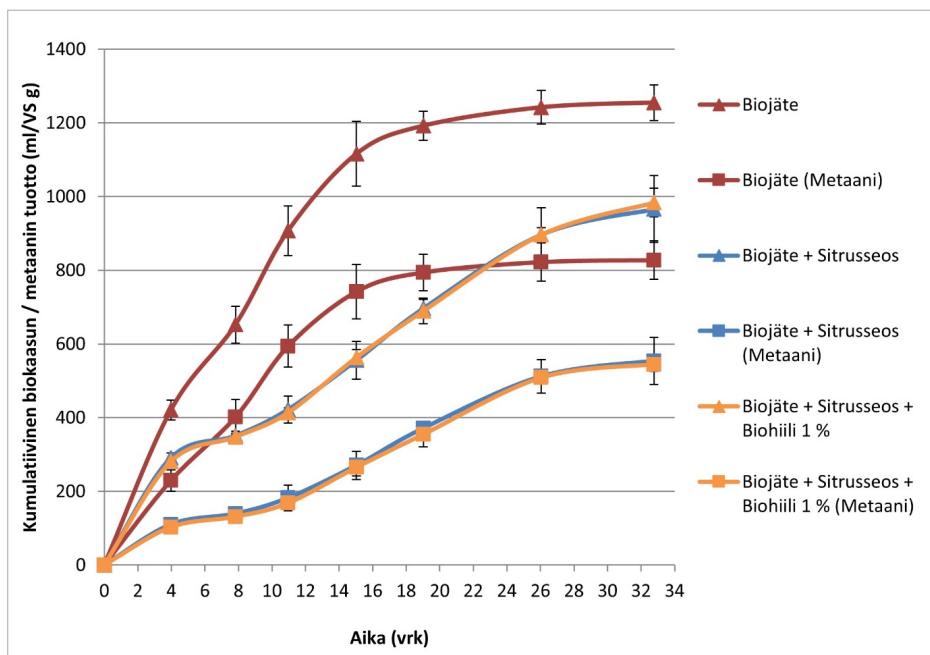
SYÖTEMATERIAALI BIOKAASULAITOKSEN PROSESSIN OPTIMOINNISSA – BIOJÄTTEEN SISÄLTÄMIÄ HAITALLISIA MATERIAALEJA

Biojätteen mukana voi reaktoriin kulkeutua myös aineita, jotka voivat olla haitallisia biokaasuprosessille. Tällaisia ovat esimerkiksi sitrushedelmät, erityisesti niiden sisältämä limoneneeni. Limoneenilla on bakteereita tuhoava vaikutus, minkä takia se voi inhiboida metaanin tuotantoa biokaasuprosessissa hyökkäämällä metanogeneja vastaan (Millati ym. 2018).

Xamkin ympäristölaboratoriossa tutkittiin appelsiinia, sitruunaa ja limeä sisältäneen seoksen vaikutusta biokaasuprosessiin. Tulokset osoittivat, että sitrushedelmät heikentävät biokaasutuotantoa (kuva 5). Pelkkää biojätettä sisältäneiden reaktoreiden biokaasuntuottopotentiaali tässä sarjassa oli keskimäärin $1\,137\text{ m}^3_{\text{biokaasu}}/\text{tVS}$ ja metaanintuottopotentiaali $788\text{ m}^3_{\text{metaani}}/\text{tVS}$, kun taas sitrushedelmää sisältäneiden reaktoreiden biokaasuntuottopotentiaali oli $849\text{ m}^3_{\text{biokaasu}}/\text{tVS}$ ja metaanintuottopotentiaali $515\text{ m}^3_{\text{metaani}}/\text{tVS}$. Vaikka sitrushedelmiä sisältävät reaktorit sisälsivät 25 prosenttia enemmän orgaanista ainetta kuin pelkkää biojätettä sisältävät reaktorit, ne tuottivat kolmanneksen vähemmän metaania. Sitrushedelmiä sisältävän reaktorin biokaasuntuottopotentiaali oli 25 prosenttia ja metaa-

nintuottopotentialia 35 prosenttia pienempi kuin pelkällä biojätteellä. Lisäksi kaasuntuotto käynnistyi huomattavasti hitaammin kuin biojättereaktoreilla.

Koesarjassa tutkittiin myös, että voisiko koivupohjainen biohiili inhiboida sitrushedelmien haitallisia vaikutuksia. Tuloksista voidaan havaita, että sitrushedelmien inhiboiva vaikutus oli liian voimakas koejärjestelyssä käytetylle biohiillelle. Näiden reaktoreiden tuottopotentialit olivat biokaasulle $850 \text{ m}^3_{\text{biokaasu}}/\text{tVS}$ ja metaanille $517 \text{ m}^3_{\text{metaani}}/\text{tVS}$, jotka ovat lähes identtiset sitrushedelmäseosta sisältäneiden, biohiilettömien reaktoreiden kanssa.



Kuva 5. Sitrushedelmää sisältävän biojätteen biokaasun tuotanto vs. pelkän biojätteen kaasuntuotanto.

SEKOITUKSEN MERKITYS BIOKAASUNTUOTANNON TEHOSTAMISESSA

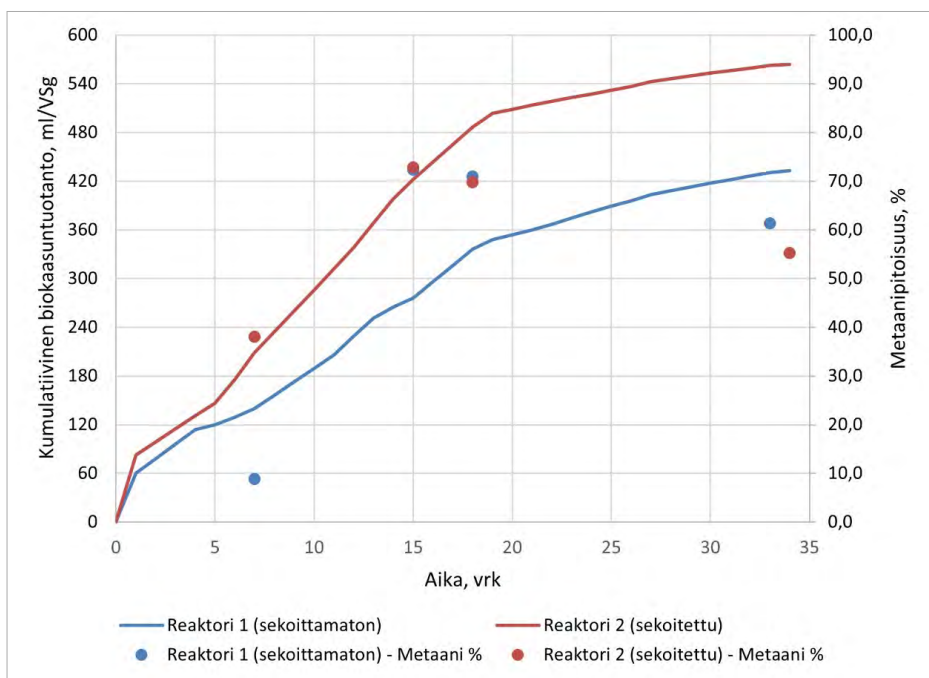
Sekoitus on tärkeä osa biokaasulaitoksen optimointia: jos sekoitus on heikkoa tai sitä ei ole lainkaan, metanogeenit eivät pääse tasaisesti käsiksi raaka-aineeseen. Lisäksi raaka-aine voi kuorettua reaktorin pinnalle tai vajota pohjalle, jolloin osa sen kaasuntuottopotentialista jää käyttämättä. Jos sekoitus on liian voimakasta, se voi myös hajottaa muodostuneet flokit ja heikentää näin kaasuntuotantoa. Liian voimakas sekoitus voi myös hajottaa märkämenetelmään pohjautuvan biokaasureaktorin biologista rikinpoistokerrosta.

Sekoituksen vaikutus nähtiin selvästi pilot-mittakaavan koesarjassa, jossa tutkittiin sekoituksen vaikutusta biokaasun ja metaanin tuotantoon. Käytössä olleista 15 litran biokaasureaktoreista toisessa oli jatkuva 20 rpm:n sekoitus, ja toista ei sekoitettu kokeen käynnistymisen jälkeen. Panosreaktorit olivat käynnissä 34 päivän ajan. Sekoituksella varustettu reaktori sai hajotettua koeaikana lähes kaiken orgaanisen materiaalin. Sekoittamattoman reaktorin massa jakaantui eri faaseihin, eivätkä metanogeenit pystyneet hyödyntämään kaikkea saatavilla olevaa orgaanista ainesta (kuva 6).

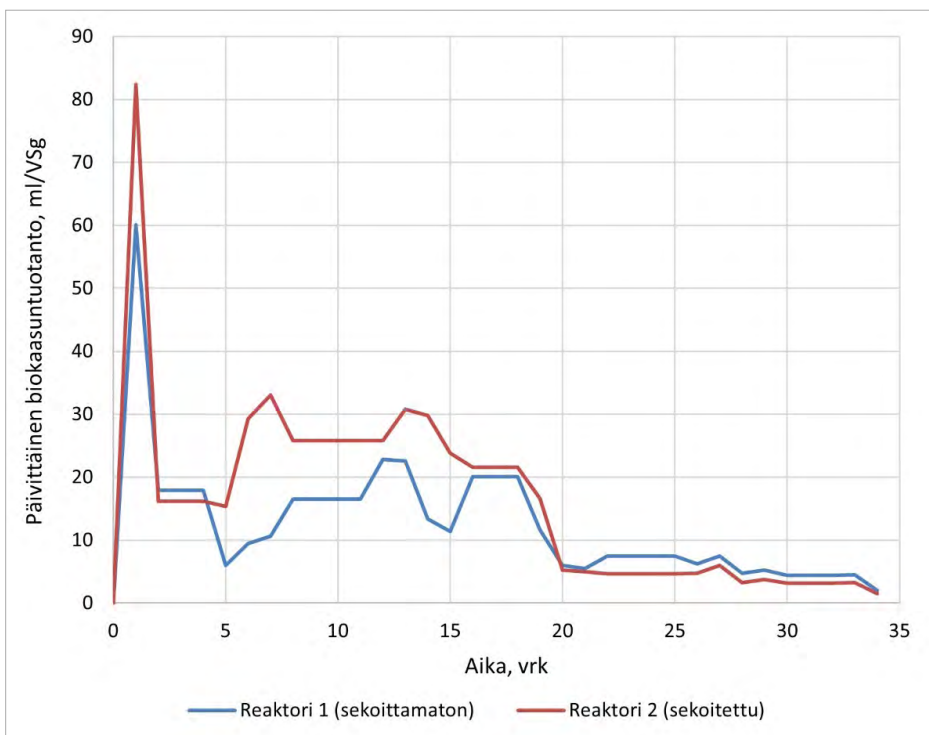


Kuva 6. Syötemateriaalin kerrostuma 34 päivän jälkeen sekoitetussa (vas.) ja sekoittamattomassa reaktorissa (oik.) (kuvat Tiina Saario).

Kuvassa 7 on esitetty sekoitetun ja sekoittamattoman biokaasureaktorin biokaasuntuotannot sekä mitatut metaanipitoisuudet kokeen aikana. Biokaasuntuotanto oli selvästi suurempaa sekoitetulla reaktorilla. Sekoitetun reaktorin biokaasupotentiaali oli $564 \text{ m}^3_{\text{biokaasu}}/\text{tVS}$, kun taas sekoittamattoman reaktorin potentiaali oli vain $433 \text{ m}^3_{\text{biokaasu}}/\text{tVS}$. Kuvassa 8 on esitetty päiväkohtainen biokaasuntuotanto. Ensimmäiset kaksi–kolme viikkoa päiväkohtaiset biokaasutuotot ovat paremmat sekoitetulla reaktorilla. Tämän jälkeen sekoittamattoman reaktorin päiväkohtainen biokaasuntuotanto on korkeampi kuin sekoitetulla reaktorilla.



Kuva 7. Sekoitetun vs. sekoittamattoman biokaasureaktorin kumulatiivinen biokaasuntuotanto ja metaanikonsentraatiot kokeen aikana.



Kuva 8. Sekoitetun vs. sekoittamattoman biokaasureaktorin päiväkohtainen biokaasuntuotanto kokeen aikana.

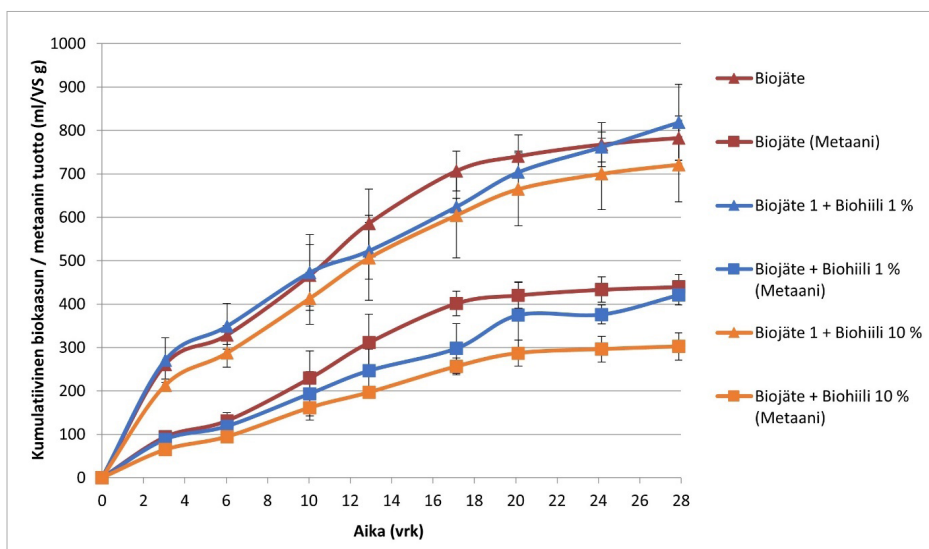
BIOHIILEN UUDET KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET BIOKAASUN TUOTANNOSSA

Biohiilellä voidaan muun muassa tehostaa metaanintuotantoa ja auttaa poistamaan rikkivetyä biokaasuprosessissa. Biohiilen vaikutus prosessiin riippuu sen ominaisuuksista, kuten sen raaka-aineesta, käsittelyolosuhteista, polttoprosessista ja lämpötilasta. Taulukossa 3 on esitetty biohiilen käyttöä rikkivedyn poistossa biokaasusta.

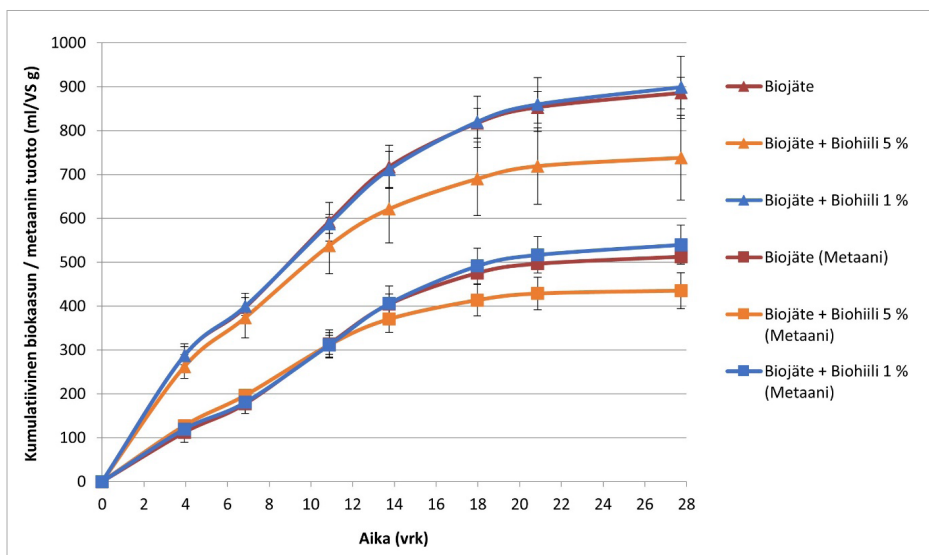
Taulukko 3. Biohiilen käyttö biokaasun rikkivedyn poistossa (lähteet: ^a Xu ym. 2014, ^b Cao & Harris 2010, ^c Choudhury & Lansing 2020, ^d Kanjanarong ym. 2017, ^e Hervy ym. 2018, ^f Ma ym. 2021).

Biohiilen raaka-aine	Pyrolyysiolo-suhteet	Rikkivedyn poistoteho
Jätevesiliete ^{a, b}	500 °C, 4 h	44,0 mg H ₂ S / g
Maissin korjuujäte ^c	500 °C, 10 min	10,8 mg H ₂ S / g
Maissin korjuujäte ^c	500 °C, 10 min + rautakyllästys	238 mg H ₂ S / g
Puuhake ja anaerobin jäänös ^d	600 °C	273,2 ± 1,9 mg H ₂ S / g 98,0 ± 1,2 % (maks. pitoisuus 1 020 ppmv)
Puulava, käytetty ^e	700 °C, 30 min	12,9 mg H ₂ S / g
Ruokajäte, koagulaatio-flokkulaatioliete ^e	700 °C, 30 min	66,6 mg H ₂ S / g
Sahanpuru ja urea-fosfaatti ^f	700 °C, 2 h	54,8 mg H ₂ S / g
Sianlanta ^{a, b}	500 °C, 4 h	59,6 mg H ₂ S / g
Vaahtera ^c	500 °C, 10 min	269 mg H ₂ S / g
Vaahtera ^c	500 °C, 10 min + rautakyllästys	219 mg H ₂ S / g

CityLoops-hankkeen laboratoriokokeissa testattiin koivupohjaisen biohiilen vaikutusta biokaasuprosessissa eri tavoin. Ensimmäisessä vaiheessa selvitettiin optimaalista biohiiliannosta. Kokeissa havaittiin, että biohiilen määrällä prosessissa on suuri merkitys. Ensimmäisessä koesarjassa testattiin kymmenen prosentin ja yhden prosentin lisäystä biojätteen massa suhteutettuna (kuva 9). Toisessa sarjassa puolitettiin biohiilen määrä viisi prosenttia ja toistettiin yhden prosentin määrä (kuva 10).



Kuva 9. Koivubiohiilen vaikutus biokaasun ja metaanintuotantoon. Annostus yksi ja kymmenen prosenttia biojätteen määrästä.



Kuva 10. Koivubiohiilen vaikutus biokaasun ja metaanintuotantoon. Annostus yksi ja viisi prosenttia biojätteen määrästä.

Tuloksista huomattiin, että biohiilen määrä prosessissa on erityisen tärkeää ottaa huomioon (taulukko 4). Ensimmäisessä koesarjassa (kuva 9) kymmenen prosentin lisäys biohiiltä alensi biokaasuntuottopotentialia noin $50 \text{ m}^3_{\text{biokaasu}}/\text{tVS}$ ja metaanipotentiaalia $135 \text{ m}^3_{\text{metaani}}/\text{tVS}$. Toisessa sarjassa puolitettiin biohiilen määrä viiteen prosenttiin ja biokaasuntuottopoten-

tiaali laski noin $150 \text{ m}^3_{\text{biokaasu}}/\text{tVS}$ ja metaanipotentiaali noin $80 \text{ m}^3_{\text{metaani}}/\text{tVS}$. Käytettäessä yhden prosentin annostusta biokaasuntuottopotentiaali hieman kasvoi ja metaanintuottopotentiaali pysyi lähes samalla tasolla kuin pelkällä biojätteellä.

Taulukko 4. Panosreaktorien keskimääräiset biokaasu- ja metaanipotentiaalit biojätettä ja koivubiohiiltä sisältäneissä reaktoreissa (lähteet: ^a Ranta-Korhonen ym. 2018, Achinas & Euverink 2019, ^b Ranta-korhonen ym. 2018, Huovari ym. 2008, Lehtomäki ym. 2007).

	Raaka-aine	Biokaasuntuotto- potentiaali $\text{m}^3_{\text{biokaasu}}/\text{tVS}$	Metaanintuotto- potentiaali $\text{m}^3_{\text{metaani}}/\text{tVS}$
Koesarja 1	Biojäte	654	420
	Biojäte + Biohiili 10 %	599	285
	Biojäte + Biohiili 1 %	727	426
Koesarja 2	Biojäte	798	480
	Biojäte + Biohiili 5 %	649	403
	Biojäte + Biohiili 1 %	808	482
Biojäte (kirjallisuus)		430–920 ^a	450–600 ^b

CityLoops-hankkeen kokeissa testattu koivupohjainen biohiili toimi hyvin rikkivedyn poistossa, kun biohiili lisättiin suoraan mädätettävän materiaalin joukkoon. Pullopanoskokeissa onnistuttiin yhden prosentin biohiililisäyksellä vähentämään kolmannes muodostuneesta rikkivedystä verrattuna rinnakkaisreaktoriin, johon ei ollut lisätty biohiiltä.

Koejärjestely toistettiin myös 15 litran pilot-reaktoreilla. Rikkivetypitoisuus mitattiin kerätyistä kaasusta Optima 7 biogas -kenttäanalysaattorilla. Kokeen ensimmäisen viikon aikana kerätyistä kaasusta havaittiin, että rikkivedyn määrä biohiiltä sisältäneessä reaktorissa oli noin neljänneksen matalampi kuin rinnakkaisreaktorissa.

Toinen biokaasuprosessissa muodostuva, kaasuntuottoa haittaava kaasu on ammoniakki. Myös tämän haitallisen kaasun ehkäisyä prosessissa testattiin lisäämällä koivubiohiiltä 15 litran pilot-mittakaavan biokaasureaktoreihin. Mittauksissa havaittiin reaktorista muodostuvan biokaasun sisältävän ammoniakkia. Reaktoreiden mädätteistä määritettiin ulkopuolisesa laboratoriossa muun muassa kokonaistyyppi-, ammonium-, nitraatti- ja nitriittipitoisuudet (taulukko 4). Nitraatti- ja nitriittipitoisuudet olivat molemmissa reaktoreissa alle määrittäysrajan, mutta kokonaistyyppi- ja ammoniumpitoisuudet olivat biohiiltä sisältävän reaktorin mädätteessä hieman pienemmät (noin 2–5 %) kuin rinnakkaisreaktorin mädätteessä.

Taulukko 4. Reaktorimädätteiden ravinneanalyysitulokset (ALS Global Oy).

Analyysi	Yksikkö	Reaktori 1	Reaktori 2 (biohiili)
Kokonaistyyppi (IR)	mg/l	2 290	2 190
Kokonaistyyppi (Kjehdahl)	mg/l	2 000	1 950
Ammonium	mg/l	2 830	2 730
Ammoniumtyyppi	mg/l	2 190	2 120
Nitriitit	mg/l	< 0,750	< 1,50
Nitriittityyppi	mg/l	< 0,188	< 0,375
Nitraatit	mg/l	< 2,00	< 2,00
Nitraattityyppi	mg/l	< 0,500	< 0,500
Kokonaisfosfori, P	mg/l	91,1	110
Fosfori (P ₂ O ₅)	mg/l	209	252
Kokonaisfosfaatti (PO ₄ ³⁻)	mg/l	280	337
Kokonaiskalium	mg/l	1 760	1 710

LÄHTEET

Cao, X., Harris, W. 2010. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation. *Bioresource Technology* 101. 5222–5228.

Choudhury, A., Lansing, S. 2020. Biochar addition with Fe impregnation to reduce H₂S production from anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 306.

Dudek M, Świechowski K, Manczarski P, Koziel AJ, Białowiec A. 2019. The effect of biochar addition on the biogas production kinetics from the anaerobic digestion of brewers' spent grain. *Energies*. 12 (8).

Hervy, M., Minh, D.P., Gérente, C., Weiss-Hortala, E., Nzihou, A., Villot, A., Le Coq, L. 2018. H₂S removal from syngas using wastes pyrolysis chars. *Chemical Engineering Journal* 334. 2179–2189.

Huovari, N., Rautanen, J., Wihersaari, M. 2008. Biokaasulaitosten energiatase maatalojen biomassoja hyödyntävissä laitoksissa. Motiva Oy.

Inthapanya S, Preston TR, Leng RA. 2012. Biochar increases biogas production in a batch digester charged with cattle manure. *Livestock Research for Rural Development* 24.

Kanjanarong, J., Giri, B.S., Jaisi, D.P., Oliveira, F.R., Boonsawang, P., Chaiprapat, S., Singh, R.S., Balakrishna, A., Khanal, S.K. 2017. Removal of hydrogen sulfide generated during anaerobic treatment of sulfate-laden wastewater using biochar: Evaluation of efficiency and mechanisms. *Bioresource Technology* 234. 115–121.

Kaur, G., Johnravindar, D., Wong, J.W.C. 2020. Enhanced volatile fatty acid degradation and methane production efficiency by biochar addition in food waste-sludge co-digestion: A step towards increased organic loading efficiency in co-digestion. *Biorecource Technology* 308, 1–8.

Kettunen, H., Laurila, N., Heinonen, A. 2022. Demonstraatiokokeita biokaasun haitta-aineiden suodattamisesta biohiilellä hyödyntäen DMS-teknologiaa suodatuskyvyn todentamisessa. BIOGO - Biohiilellä puhdasta kaasua ja kasvuvoimaa. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. 96–111.

Lehtomäki, A., Paavola, T., Luostarinen, S., Rintala, J. 2007. Biokaasusta energiaa maatalouteen – raaka-aineet, teknologiat ja lopputuotteet. Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja 85.

Lim, E.Y., Tian, H., Chen, Y., Ni, K., Zhang, J., Tong, Y.W. 2020. Methanogenic pathway and microbial succession during start-up and stabilization of thermophilic food waste anaerobic digestion with biochar. *Bioresource Technology* 314.

Lü, F., Liu, Y., Shao, L., He, P. 2019. Powdered biochar doubled microbial growth in anaerobic digestion of oil. *Applied Energy* 247. 605–614.

Lü, F., Luo, C., Shao, L., He, P. 2016. Biochar alleviates combined stress of ammonium and acids by firstly enriching *Methanosaeta* and then *Methanosarcina*. *Water Research* 90. 34–43.

Ma, Q., Chen, W., Jin, Z., Chen, L., Zhou, Q., Jiang, X. 2021. One-step synthesis of microporous nitrogen-doped biochar for efficient removal of CO₂ and H₂S. *Fuel* 289.

Millati, R., Lukitawesa, Permanasari, E.D., Sari, K.W., Cahyanto, M.N., Niklasson, C., Taherzadeh, M.J. 2018. Anaerobic digestion of citrus waste using two-stage membrane bioreactor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 316.

Ranta-Korhonen, T., Soininen, H., Saario, T., Särkkä, H. 2018. Lääke- ja kemikaalijäämien vaikutus biokaasuntuotantoon. *Metsä, ympäristö ja energia – Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Vuosijulkaisu* 2018, 43–54.

Saario, T., Laurila, N. 2019. Biohiili prosessikaasujen puhdistajana. Biohiilellä puhtaampi ympäristö ja uutta liiketoimintaa Etelä-Savoon. *Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu*. 32–39.

Su, C., Zhao, L., Liao, L., Qin, J., Lu, Y., Deng, Q., Chen, M., Huang, Z. 2019. Application of biochar in a CIC reactor to relieve ammonia nitrogen stress and promote microbial community during food waste treatment. *Journal of Cleaner Production* 209. 353–362.

Sun, X., Atiyeh, H.K., Kumar, A., Zhang, H. & Tanner, R.S. 2018. Biochar enhanced ethanol and butanol production by *Clostridium carboxidivorans* from syngas. *Bioresource Technology*.

Wang, D., Ai, J., Shen, F., Yang, G., Zhang, Y., Deng, S., Zhang, J., Zeng, Y., Song, C. 2017. Improving anaerobic digestion of easy-acidification substrates by promoting buffering capacity using biochar derived from vermicompost. *Bioresource Technology* 227. 286–296.

Wang, G., Li, Q., Yuwen, C., Gong, K., Sheng, L., Li, Y., Xing, Y., Chen. 2021. Biochar triggers methanogenesis recovery of a severely acidified anaerobic digestion system via hydrogen-based syntrophic pathway inhibition. *International Journal of Hydrogen Energy* 46. 9666–9677.

Xu, X., Cao, X., Zhao, L., Sun, T. 2014. Comparison of sewage sludge- and pig manure-derived biochars for hydrogen sulfide removal. *Chemosphere* 111. 296–303.

Yu, Q., Sun, C., Liu, R., Yellezuome, D., Zhu, X., Bai, R., Liu, M., Sun, M. 2021. Anaerobic co-digestion of corn stover and chicken manure using continuous stirred tank reactor: The effect of biochar addition and urea pretreatment. *Bioresource Technology* 319.

BIOKAASULAITOKSEN MÄDÄTTEEN TUOTTEISTAMINEN LANNOITERAKEIKSI JA KASVUALUSTOIKSI

Vuokko Malk & Tiina Saario & Janne Junninen & Hanne Soininen

Biokaasuprosessin lopputuotteena syntyvä mädäte voidaan tuotteistaa kaupallisiksi kierrätyslannoitteiksi, maanparannusaineiksi ja kasvualustoiksi. Mädätteen sisältämissä ravinteissa piilee enemmän kaupallista potentiaalia kuin mitä tällä hetkellä vielä hyödynnetään. Uusia kierrätystuotteita tarvitaan yhä enemmän, sillä kivennäislannoitteiden hinnat nousevat ja omavaraisuuden merkitys korostuu epävakaassa maailmantilanteessa.

Tällä hetkellä Mikkelissä BioSairila Oy:n biojätteen mädätyksessä syntyvä mädätejäänös erotellaan kuiva- ja nestejakeeksi. Mädätteen kuivajae kompostoidaan ja siitä tuotetaan multatuotteita. Nestejake hyödynnetään sellaisenaan lannoitteena. Ravinteiden kierrätyksen tehostamiseksi ja kiertotalousliiketoiminnan kasvattamiseksi tarvitaan kuitenkin vielä tutkimus- ja kehitystyötä.

CityLoops-hankkeen tuotteistamiskokeissa demonstroitiin laboratoriomittakaavassa uusien tuotteiden valmistusta biojättemädätteestä. Kokeet toteutettiin yhteistyössä paikallisten sidosryhmien ja yritysten kanssa. Rakeistuskokeissa biokaasulaitoksen biojättereaktorin mädätteen kuivajakeesta valmistettiin mädäterakeita. Kasvatuskokeilla testattiin kuivajakeesta valmistettujen kasvualustojen sekä mädäterakeiden vaikutusta kasvien kasvuun.

RAKEISTUSKOEET

Rakeistuskokeilla haluttiin testata mädätteen soveltuvuutta lannoiterakeiden valmistamiseen. Lannoiterakeet voivat toimia helposti levitettävänä lannoitetuotteena. Rakeistuksella voidaan myös ratkaista esimerkiksi kierrätyslannoitetuotteiden varastointiin, kuljetukseen ja tasaiseen levittämiseen liittyviä haasteita.

Rakeiden valmistukseen käytettiin BioSairila Oy:n biokaasulaitoksen mädätteen kuivajatetta. Kyseisen reaktorin syötemateriaalina käytettiin biojätettä. Biokaasulaitoksella kuivajae oli erotettu mädätteestä ruuvipuristimen avulla. Xamkin ympäristölaboratoriossa kuivajae seulottiin ensin 16 mm:n seulalla ja tämän jälkeen uudelleen 8 mm:n seulalla ennen

rakeistamisen aloittamista. Käytetyn kuivajakeen kuiva-ainepitoisuus oli 35,9 prosenttia. Rakeistuskokeissa käytettiin sideaineena vettä ja puupolttoaineita käyttävän energiatuotantolaitoksen lentotuhkaa.

LAITTEISTOT

Rakeistus suoritettiin kerrostavalla rakeistusmenetelmällä käyttäen laitteistona laboratoriomittakaavaista rakeistuslautasta. Rakeistuslautasen ominaisuudet on esitetty taulukossa 1. Rakeistuslautasen nopeus ja kulma olivat säädettäviä. Teoreettinen kapasiteetti C (t/h) voidaan arvioida kaavalla, jossa D on lautasen halkaisija (m).

Taulukko 1. Rakeistuslautasen päämitat ja tärkeimmät toimintasuureet.

	Yksikkö	Arvo
Halkaisija	m	0,395
Reunan korkeus	m	0,09
Kaltevuus	°	55
Lautasen kierrosnopeus	1/min	30
Teoreettinen kapasiteetti	t/h	0,156

Rakeiden puristuslujuus määritettiin käyttämällä penetrometriä (kuva 1), jota ohjattiin WinAGS Lite -ohjelmalla. Penetrometri on Xamkin ympäristölaboratorion materiaalin-testauslaitteisto (Shimadzu). Puristuslujuuden määrittämiseen valittiin samankokoisia ja mahdollisimman tasalaatuisia rakeita.



Kuva 1. Penetrometri (kuva Tiina Saario).

Penetrometrillä mitatun puristuslujuuden arvoon (N) vaikuttaa myös mitatun rakeen koko. Pelletin koko vaihtelee käytännössä, joten vaadittavaa minimilujuusarvoa on vaikea määrittää. Erään suosituksen mukaan pienimmät, noin 1–2 millimetrin pelletit kestävät käsittelyä, kun ne kestävät noin 5 N puristusvoiman. Suurempien pellettien puristuslujuuksien tulee olla suurempia, esimerkiksi noin 5 mm:n pellettien puristuslujuuksien on oltava noin 10 N.

KOEMENETELMÄT JA RAKEISTUS

Rakeistuskokeet aloitettiin sekoittamalla tunnettu määrä seulottua mädätteen kuivajaa, vettä ja mahdollista sideainetta keskenään. Vettä lisättiin pienissä erissä sekoituksen aikana. Materiaaleja sekoitettiin käsin. Sekoittamista jatkettiin, kunnes materiaali oli tasaisen kostea. Kostea seosta lisättiin pyörivälle lautasrakeistimelle (kuva 2). Kun märkäpellettien koko ja virtaukset lautasella olivat tasoittuneet materiaalia lautaselle jatkuvasti syötettäessä, kerättiin näytteet määrittäystä varten. Rakeistuksen aikana lisättiin vettä lautasella olevaan materiaaliin sumuttamalla, jotta materiaalin koostumus saatiin optimaaliseksi.

Ensimmäinen koe-erä valmistettiin käyttämällä pelkkää seulottua kuivajaa ja vettä. Näillä saatiin muodostettua pieniä kiiltäväpintaisia ytimiä, mutta rakeiden todettiin vaativan sideainetta. Toisessa erässä sekoitettiin mädätteen kuivajaa 330 grammaa, johon lisättiin vettä ja 33,3 grammaa sideaineena käytettävää lentotuhkaa. Sideaineen määrä oli noin kymmenen prosenttia seoksen kokonaismäärästä. Materiaalit sekoitettiin käsin ennen kuin seos siirrettiin rakeistuslautaselle. Rakeistuksen aikana seos muuttui kiiltäväpintaiseksi, mutta siitä saatiin muodostettua rakeita. Muodostuneet rakeet olivat muodoltaan ja koostumukseltaan epäheterogeenisiä lähtömatriisista johtuen. Rakeet jätettiin kuivumaan huoneilmaan. Rakeista määritettiin myös kuiva-ainepitoisuus.



Kuva 2. Seos pyörimässä rakeistuslautasella (kuvat Tiina Saario).

RAKEIDEN ANALYYSITULOKSET

Molemmista rakeistuseristä otettiin näytteet ja niistä määritettiin kuiva-ainepitoisuudet. Ensimmäisen erän rakeiden kuiva-ainepitoisuus oli 28,3 prosenttia rakeistuksen jälkeen. Toisessa erässä käytettiin sideaineena lentotuhkaa, ja erän kuiva-ainepitoisuus oli 30,5 prosenttia rakeistuksen jälkeen.

Rakeiden puristuslujuus määritettiin toisen erän huonekuivatuille, halkaisijaltaan noin 6 mm:n rakeille (kuva 3). Puristuslujuuden määrittämisessä testipään halkaisija oli 8 mm. Puristuslujuus määritettiin kahdeksan rakeen perusteella, ja puristuslujuuksien keskiarvo oli 38,5 N. Toisen koe-erän rakeita testattiin lannoitekäytössä kasvatuskokeiden toisessa koesarjassa.



Kuva 3. Puristuslujuuskokeissa käytettyjä rakeita (kuva Tiina Saario).

KASVATUSKOEET

Biojätämädätteen kuivajakeesta valmistettiin multaseoksia. Kasvatuskokeilla testattiin kasvien kasvua näissä tuotteissa. Kokeissa testattiin myös mädätteestä valmistettujen lannoiterakeiden sekä biohiilen vaikutusta kasvien kasvuun.

Kasvibiotesteistä on olemassa useita standardeja eri tarkoituksiin ja eri kestoisina, ja myös kasvibiotesteihin soveltuvia kasvilajeja on runsaasti saatavilla. Standardeja on kehitetty ennen kaikkea fytotoksisuustesteiksi, ja orgaanisten lannoitevalmisteiden kasvua edistäviä vaikutuksia todentavia kasvibiotestejä olisikin tarpeen kehittää edelleen. Testit ovat perustoteutukseltaan kuitenkin samankaltaisia: testikasvien siemenet kylvetään kasvustasiassa olevaan tutkittavaan tuotteeseen, kasveja kasvatetaan kontrolloiduissa olosuhteissa määrätyn ajan ja lopuksi kasvatulosta verrataan kontrollikäsitteeseen. Tyypillisimmillään kasvibiotestit kestävät parista viikosta kuukauteen. Testikasvien tulisi olla yleisiä kasveja levinneisyydeltään ja lajijominaisuuksiltaan sekä riittävän herkkiä reagoimaan kasvatavallaan muutoksiin. (Salo ym. 2013)

KASVUALUSTAMATERIAALIT JA KOESARJAT

Laboratoriomittakaavan tuotteistamiskokeissa tehtiin kaksi kasvatuskoesarjaa (taulukko 2). Tuotteistamisessa käytettiin BioSairila Oy:n biokaasulaitoksen biojätelinjan mädätteen kuivajaeetta. Muina seosaineina käytettiin Kekkilän lannoittamatonta ja kalkitsematonta luonnon turvetta, hiekkaa, koivupohjaista biohiiltä sekä GreenCaren hienoa puutarhakalkkia. Biohiili oli samaa, jota käytettiin myös biokaasukokeissa. Lisäksi toisessa koesarjassa testattiin kuivajakeesta tehtyjen mädäterakeiden vaikutusta kasvuun.

Taustaverrokkina (kontrollina) käytettiin kaupallista Biolanin kylvö- ja taimimultaa. Koesarjassa 2 oli käytössä myös toinen kaupallinen tuote, Kekkilän istutusmulta PLUS, jossa on käytetty BioSairila Oy:n kompostia.

Mädätteen kuivajae seulottiin <12 mm:n seulalla käyttäen täryseulaa. Hiekka seulottiin <2 mm:n seulalla. Koesarjassa 1 tuoteseokset valmistettiin 15.6.2022. Seosten pH säädettiin kalkilla seuraavana päivänä 16.6.2022. Ennen puutarhakalkin lisäämistä materiaaliseoksille tehtiin pH:n säätökokeet, jotta saatiin selville lisättävän kalkin määrä. Materiaalit sekoitettiin käsin erillisessä astiassa.

Koesarjassa 2 tuotteet A ja B valmistettiin samoilla seossuhteilla kuin koesarjassa 1, mutta multaseosten annettiin kypsyä kaksi viikkoa ennen kokeiden käynnistystä. Kalkkilisäys oli pienempi, sillä multaseosten pH nousi kahden viikon kypsyamisajan aikana.

Taulukko 2. Koesarjoissa 1 ja 2 testatut tuotteet.

Koesarja 1 (16.–30.6.2022)	Koesarja 2 (7.–21.9.2022)
Tuote A: – mädätteen kuivajae 10 til-% – hiekkaa 30 til-% – turvetta 60 til-% – Seoksen pH oli 4,6. Kalkkia lisättiin 15 m-%, minkä jälkeen pH oli 6,7.	Tuote A: – mädätteen kuivajae 10 til-% – hiekkaa 30 til-% – turvetta 60 til-% – Seoksen pH oli 4,2. Kalkkia lisättiin 5,5 m-%. Viikkoa myöhemmin pH oli 6,7 ja kaksi viikkoa myöhemmin 7,4.
Tuote B – mädätteen kuivajae 9 til-% – hiekkaa 27 til-% – turvetta 55 til-% – biohiiltä 9 til-% – Seoksen pH oli 4,5. Kalkkia lisättiin 15 m-%, minkä jälkeen pH oli 6,7.	Tuote B – mädätteen kuivajae 9 til-% – hiekkaa 27 til-% – turvetta 55 til-% – biohiiltä 9 til-% – Seoksen pH oli 4,3. Kalkkia lisättiin 5,3 m-%. Viikkoa myöhemmin pH oli 6,6 ja kaksi viikkoa myöhemmin 7,4.
	Biolan + rae 5 m-% – Biolanin kylvö- ja taimimulta – Mädätteen kuivajakeesta valmistettuja rakeita 5 m-%
	Biolan + rae 10 m-% – Biolanin kylvö- ja taimimulta – Mädätteen kuivajakeesta valmistettuja rakeita 10 m-%
	Kekkilän istutusmulta PLUS: Kaupallinen multaseos, joka sisältää BioSairila Oy:n kompostia.
Kontrolli: Biolan kylvö- ja taimimulta	Kontrolli: Biolan kylvö- ja taimimulta

Koesarjoissa käytettyjen kaupallisten tuotteiden valmistajien ilmoittamat ominaisuudet on esitetty taulukoissa 3–5.

Taulukko 3. Tuoteseoksissa A ja B käytetyn Kekkilän luonnonturpeen tuotetiedot ja ominaisuudet (Kekkilä s.a.a.).

Tuotetieto	Arvo
Tyypinimi	Maanparannusturve
Raaka-aineet	Rahkaturve, maatuneisuus von Post H 2–4
Karkeusaste	Keskikarkea, seulottu kiekoseulalla 60 x 12 mm
Johtokyky	4,0 mS/m
pH	4,2
Tilavuuspaino	230 g/l

Taulukko 4. Kontrollina käytetyn Biolanin Kylvö- ja taimimullan tuotetiedot ja ominaisuudet (Biolan Oy s.a.) (k.a.: kuiva-aine).

Tuotetieto	Arvo
Tyypinimi	Pakattu seosmulla
Käyttötarkoitus	Kasvualusta
Kompostoidut raaka-aineet (FIC020-001159/2006)	Kompostiseos (broilerinlanta, vaalea kasvuturve)
Muut raaka-aineet	Vaalea kasvuturve, kasvualustasammal, hiekka, <i>Glomus</i> sp. >108 pmy/l, mykorritsa <i>Glomus intraradices</i> > 40 kpl/l
Kalkitusaine	Mg-pitoinen kalkkikivijauhe 4 kg/m ³
Karkeusaste	< 15 mm
Johtokyky	30 mS/m
pH	6,2
Tilavuuspaino	400 g/l
Kosteus	45 %
Typpi (N) vesiliukoinen	100 mg/l (420 mg/kg k.a.)
Fosfori (P) liukoinen	70 mg/l (300 mg/kg k.a.)
Kalium (K) liukoinen	400 mg/l (1680 mg/kg k.a.)

Taulukko 5. Kontrollina käytetyn Kekkilän istutusmulla PLUS -tuotteen tuotetiedot ja ominaisuudet (Kekkilä s.a.b.).

Tuotetieto	Arvo	Vaihteluväli
Tyypinimi	Yleiskasvualusta	
Raaka-aineet	Hienojakoinen kivennäismaa, komposti, turve	
Lisäaineet	Kalkki sekä muut tarvittavat lisäaineet	
Johtokyky	35 mS/m	10–60 mS/m
pH	6	5,5–7
Tilavuuspaino	700 kg/m ³	1 000 < kg/ m ³
Orgaaninen aines	12 massa-%	8–14 massa-%
Typpi (N) vesiliukoinen	60 mg/l	20–250 mg/l
Fosfori (P)	10 mg/l	20 < mg/l
Kalium (K)	150 mg/l	200 < mg/l

KOKEIDEN TOTEUTUS

Laboratoriomittakaavan kasvatuskokeissa hyödynnettiin VTT:n kompostin kypsyystestien ohjetta (Itävaara ym. 2006), jossa esitetty fytotoksisuustesti on muunneltu OECD:n standarditestistä Terrestrial Plants, Growth Test, Guideline 208. Kasvatuskokeissa testattiin muun muassa mädätteen fytotoksisia, kasveille haitallisten yhdisteiden vaikutuksia. Koekasvina kasvatuskokeissa käytettiin vihanneskrassia (*Lepidium sativum*). Siementen itävyys oli 92 prosenttia, ja takuu-aika oli voimassa.

Jokaisesta testatusta koesarjasta tehtiin kuusi rinnakkaista näytettä (kasvatusastiaa). Kasvatusastioina käytettiin 0,3 litran muoviruukkuja. Kasvatusastioihin mitattiin 3 dl testattavia tuotteita ja materiaali paineltiin kevyesti ruukkuun. Ruukut asetettiin alumiinivuokiin. Näytteet kasteltiin vesijohtovedellä niin, että vesi tuli ruukkujen läpi. Jokaiseen ruukkuun kylvettiin 50 vihanneskrassin siemenentä. Siemenet aseteltiin pinseteillä tasaisesti ruukkuihin. Siemenet peitettiin vermikuliittirouheella tasaisen itämisen varmistamiseksi. Lopuksi kasvatusruukut peitettiin tuorekelmulla (kuva 4).



Kuva 4. Vasemmassa kuvassa materiaaliin on kylvetty vihanneskrassin siementä. Kylvämisen jälkeen pintaan lisättiin vermikuliittirouhetta (kuva oikealla). Ruukut peitettiin tuorekelmulla tasaisen kosteuden ja itämisen varmistamiseksi (kuvat Vuokko Malk).

Kasvatuskokeet suoritettiin olosuhdekaapissa (Aralab, Fitoclima Bio, S600) (kuva 5). Kokeen aikana olosuhdekaapissa oli 16 tuntia vuorokaudesta kasvuvuorokaudella (valoteho 60 %) lämpötilan ollessa +20 astetta. Pimeänä aikana (8 tuntia) kaapin lämpötila laski +15 asteeseen ja kaapin valot olivat pois päältä. Olosuhdekaapin kosteus oli säädetty 70 prosenttiin ja ilmanvaihto 40 prosenttiin. Kasvatuskokeen aikana seurattiin itämistä ja kasvua ja ruukut kasteltiin 2–3 päivän välein tarvittaessa 5–20 ml vesijohtovettä. Kokeiden aikana näytteille ei annettu lisäravinteita. Tuorekelmu poistettiin näyteastioiden päältä, kun taimet olivat itäneet.



Kuva 5. Kasvatuskokeet tehtiin olosuhdekaapissa, johon oli säädetty 16 h (20 °C) – 8 h (15 °C) valo–pimeä-rytmi (kuva Tiina Saario).

Itäneet taimet laskettiin seitsemän vuorokauden kuluttua ja loppulaskenta tehtiin 14 vuorokauden jälkeen. Loppulaskennassa itäneet taimet katkaistiin juuresta, laskettiin taimet ja punnittiin kunkin ruukun kasvumassa. Kasveista määritettiin kasvuindeksi ja itävyys, kasvualustasta kuiva-aine, orgaaninen aines, pH ja johtokyky.

ITÄVYYDEN LASKENNALLINEN TARKASTELU

Kasvatuskokeiden aikana tarkasteltiin näytteen taimettumista ja taimien kasvua seitsemän vuorokautta kasvatuskokeiden aloituksesta. Näyteastioihin kasvaneiden taimien lukumäärä laskettiin jokaisesta koe-erästä (kasvatusruukusta) ja lisäksi jokainen koe-erä kuvattiin. Siementen itävyys laskettiin seuraavasti:

$$\text{Itävyysprosentti} = \text{itäneet siemenet (kpl)} / \text{kylvetyt siemenet (kpl)} \cdot 100 \, \%.$$

Kun kylvöstä oli kulunut 14 vuorokautta, taimet leikattiin tarkasti mullan pinnasta, minkä jälkeen määritettiin taimien tuorepaino ja kuiva-ainepitoisuus. Lisäksi jokainen taimi-koe-erä kuvattiin, jotta voitiin tehdä jälkeinpäin havaintoja kasvin koosta, ulkonäöstä ja mahdollisista poikkeavuuksista. Kasvuindeksi laskettiin kuivapainoa kohden seuraavasti:

$$\text{Kasvuindeksi} = \text{kasvu näyteseoksessa (g)} / \text{kasvu taustakontrollissa (g)} \cdot 100 \, \%.$$

ANALYYSIMENETELMÄT

Tuoteseoksista määritettiin pH, johtokyky ja kuiva-ainepitoisuus. pH- ja johtokykymäärittämiä varten tuotteista valmistettiin vesisuspensiot 1:5 massasuhteessa punnitsemalla 10 g näytettä ja lisäämällä 50 ml ultrapuhdasta vettä. Seoksia ravisteltiin 30 minuutin ajan tasoravistelijassa huoneenlämmössä, minkä jälkeen näytteet analysoitiin.

Kuiva-ainemääritys tehtiin standardin SFS-EN 13040 mukaisesti $+103 \, ^\circ\text{C} \pm 2 \, ^\circ\text{C}$:n lämpötilassa. Tyhjä ja esihehkutettu upokas punnittiin, minkä jälkeen upokkaaseen annosteltiin näytettä ja punnittiin astian ja näytteen yhteispaino. Näytteitä kuivattiin $+105 \, ^\circ\text{C}$:n lämpötilassa uunissa yön yli. Näytteet jäähdytettiin eksikaattorissa, minkä jälkeen punnittiin kuivattu näyte. Näytteistä tehtiin kolme rinnakkaista määrittystä.

Itäneiden kasvien kuivapaino määritettiin kuivattamalla kasvit tyhjässä ja esihehkutetussa alumiinivuoassa $+103 \, ^\circ\text{C} \pm 2 \, ^\circ\text{C}$:n lämpötilassa yön yli. Tämän jälkeen määritettiin kuivuneiden kasvien ja astian yhteispaino, josta vähennettiin ennalta määritetty tyhjän astian massa.

TULOKSET

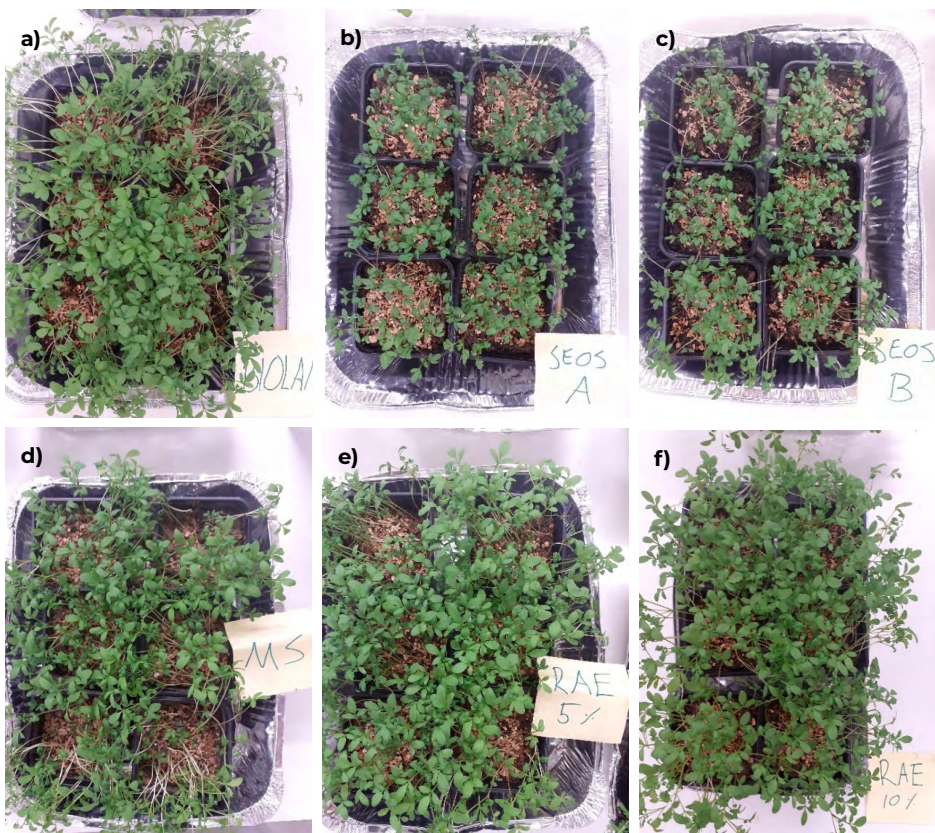
Itävyys oli selkeästi heikompaa tuotteissa A ja B kontrolliin verrattuna. Taustakontrollina käytetyssä Biolanin kylvö- ja taimimullassa taimien itävyys oli 92–96 prosenttia (taulukko 6). Tuloksia pidetään luotettavina, kun itävyys taustakontrollissa on vähintään 90 prosenttia.

Kasvuindeksi oli tuotteissa A ja B 45–49 prosenttia, eli tuotteet eivät saavuttaneet kontrollin veroista kasvua kummassakaan koesarjassa (taulukko 6). Jos kasvuindeksi on alle 80 prosenttia, voidaan kasvua pitää alentuneena (Itävaara ym. 2006). Alentunut kasvu tuotteissa A ja B voidaan havaita selvästi myös valokuvissa (kuva 6). Koesarjojen välillä oli jonkin verran eroavaisuuksia tuloksissa. Tuotteiden A ja B itävyys ja kasvu olivat suurempia koesarjassa 1. Tuotteiden A ja B välillä ei ollut suurta eroa tuloksissa kummassakaan koesarjassa, eli biohiililisäyksellä ei ollut tässä kokeessa merkittävää vaikutusta kasvien kasvuun.

Kekkilän verrokkinäytteessä kasvuindeksi oli 91 prosenttia, eli kasvu ei ollut merkittävästi alentunut kontrolliin verrattuna. Rakeita viisi prosenttia sisältävän Biolanin mullan kasvuindeksi oli 97 prosenttia, ja kymmenen prosenttia rakeita sisältävän Biolanin mullan kasvuindeksi oli 88 prosenttia. Rakeet eivät merkittävästi alentaneet kasvua.

Taulukko 6. Itävyys ja kasvuindeksi testatuissa tuotteissa koesarjoissa 1 ja 2.

Tuote	Itävyys (%)	Kasvuindeksi (%)
Koesarja 1		
Kontrolli	92	-
Tuote A	94	49
Tuote B	92	49
Koesarja 2		
Kontrolli	96	-
Tuote A	82	45
Tuote B	85	48
Kekkilä	89	91
Biolan + Rae 5 %	90	97
Biolan + Rae 10 %	92	88



Kuva 6. Kasvatuskokeet 14 vrk siementen kylvämisen jälkeen, sarja 2 a) kontrolli (Biolan multa), b) tuote A, c) tuote B, d) Kekkilän tuote, e) Biolan multa + mädäteraie 5%, f) Biolan multa + mädäteraie 10 % (kuvat Janne Junninen).

Tuotteiden A ja B ominaisuuksissa oli monia eroja kontrollinäytteeseen verrattuna, mikä selittää osaltaan kasvien heikompaa kasvua. Tuotteiden A ja B pH oli korkeampi ja johtokyky puolestaan selvästi alhaisempi kuin kontrollissa (taulukko 7). Mädäterakeiden lisäys Biolanin mullan joukkoon nosti pH-arvoja ja myös johtokykyä.

pH nousi ja johtokyky laski kaikissa näytteissä kasvatuskokeen aikana, tosin kontrollista johtokyky mitattiin vain kokeen lopussa. Koesarjassa 2 tuotteita A ja B kysytettiin kaksi viikkoa seosten valmistuksen ja kalkkilisäyksen jälkeen ennen kokeen aloitusta, ja pH:n nousu oli tällöin selvästi vähäisempää kuin koesarjassa 1.

Taulukko 7. Tuotteistettujen materiaaliseosten pH ja johtokyky koesarjoissa 1 ja 2 ennen ja jälkeen kasvatuskokeiden.

Materiaaliseos	Ennen kasvatuskoetta		Kasvatuskokeen jälkeen	
	pH	Johtokyky (mS/m)	pH	Johtokyky (mS/m)
Koesarja 1				
Kontrolli	5,23	-	5,66	117
Tuote A	6,69	46	7,61	21
Tuote B	6,73	39	7,77	18
Koesarja 2				
Kontrolli	5,23	-	6,18	112
Tuote A	7,45	36	7,58	23
Tuote B	7,38	32	7,78	19
Kekkilä	5,79	71	6,25	45
Biolan + rae 5 %	5,66	181	6,32	156
Biolan + rae 10 %	5,79	218	6,76	156

Kuiva-ainepitoisuus oli tuotteissa A ja B sekä myös Kekkilän tuotteessa suurempi kuin kontrollissa, eli kontrollimulta oli kosteampaa huolimatta siitä, että kaikkia koesarjoja kasteltiin kokeen aikana samalla tavalla (taulukko 8). Vastaavasti hehkutushäviö oli kaikissa testatuissa tuotteissa pienempi kuin kontrollissa, eli muissa tuotteissa oli vähemmän orgaanista ainetta kontrolliin verrattuna.

Kuiva-ainepitoisuus nousi kaikissa näytteissä kasvatuskokeen aikana. Hehkutushäviö eli orgaanisen aineksen määrä puolestaan laski erityisesti kontrollinäytteissä. Koesarjassa 2 orgaanisen aineksen määrä kasvoi kokeen aikana biohiiltä sisältävässä tuotteessa B sekä raeseoksessa. Tulos on päinvastainen tuotteen B osalta koesarjan 1 kanssa.

Taulukko 8. Tuotteistettujen materiaaliseosten TS (%) ja VS (%) koesarjoissa 1 ja 2 ennen ja jälkeen kasvatuskokeiden.

Materiaaliseos	Ennen kasvatuskoetta		Kasvatuskokeen jälkeen	
	TS (%)	VS (%)	TS (%)	VS (%)
Koesarja 1				
Kontrolli	45,42	44,21	51,07	28,86
Tuote A	85,36	12,44	88,86	12,86
Tuote B	84,41	18,11	85,90	12,76
Koesarja 2				
Kontrolli	45,42	44,21	66,96	24,78
Tuote A	85,16	21,43	89,64	11,40
Tuote B	87,02	14,39	90,37	14,71
Kekkilä	81,07	7,50	ei tulosta	ei tulosta
Biolan + rae 5 %	46,02	22,51	66,96	24,78
Biolan + rae 10 %	48,46	24,24	ei tulosta	ei tulosta

JOHTOPÄÄTÖKSET

Kokeet osoittivat, että mädätteen kuivajaetta on mahdollista rakeistaa kerrostavalla rakeistusmenetelmällä lannoiterakeiksi. Jos halutaan saavuttaa käsittelyn kestäviä vahvempia rakeita, tulisi rakeissa käyttää sideaineita. Sideaineen määrä riippuu rakeistettavan orgaanisen materiaalin ominaisuuksista. Sen optimaalinen määrä voi siis vaihdella 5–20 prosentin välillä riippuen lopputuotteen halutuista ominaisuuksista.

Seulottu mädäte oli erittäin heterogeenistä, ja se sisälsi edelleen myös muun muassa epäpuhtauksia. Materiaalin esikäsittely ennen rakeistusta on tärkeässä roolissa. Olisi myös suositeltavaa toteuttaa materiaalin hienontamista, esimerkiksi murskausta, jos halutaan valmistaa kuluttajille suunnattuja tasalaatuisia tuotteita. Materiaalien ollessa tasalaatuisia onnistuu myös rakeistaminen ja muu tuotteistaminen paremmin.

Biojätämädätteen kuivajakeesta valmistettua multaseosta sekä mädäterakeita kokeiltiin lannoitekäytössä kasvatuskokeissa kahdessa koesarjassa. Kasvatuskokeet soveltuvat hyvin kasvualusta- ja lannoitetuotteiden kehitykseen ja optimointiin. Vaikka koesarjojen 1 ja 2 tulokset erosivat hieman toisistaan, lopputulos oli samansuuntainen: Tuotteiden A ja B toimivuus kasvualustana oli heikko verrattuna kaupallisiin tuotteisiin. Kasvuindeksi jäi noin viiteenkymmeneen prosenttiin verrattuna Biolanin ja Kekkilän multaseoksiin. Ero oli selvästi nähtävissä kasveista kasvatuskokeen aikana. Mädäterakeet eivät lisänneet eivätkä merkittävästi alentaneet kasvua viiden ja kymmenen massaprosentin lisäyksinä.

Tuotteita A ja B ei voida suositella käytettäväksi kasvatusalustana sellaisenaan. Rakeet eivät paranna kaupallisen kasvualustan toimivuutta, mutta niiden käyttöä voitaisiin mahdollisesti tulevaisuudessa tutkia ravinnepöyhemmän kasvualustan paranteena.

LÄHTEET

Biolan Oy s.a. Biolan Kylvö- ja Taimimulta. Tuotetiedot. Saatavilla: <https://www.biolan.fi/tuotteet/biolan-kylvo-ja-taimimulta.html>

Itävaara, M., Vikman, M., Kapanen, A., Venelampi, O., Vuorinen, A. 2006. Kompostin kypsyytestit – Menetelmäohjeet. VTT tiedotteita – Research notes 2351. ISBN 951.38.6814.1 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Kekkilä s.a.a. Kekkilä Luonnonturve -tuotekortti. Saatavilla: <https://www.kekkila.fi/tuotteet/luonnonturve/>

Kekkilä s.a.b. Kekkilä Istutusmulta PLUS -tuotekortti. Saatavilla: <https://www.kekkila.fi/tuotteet/istutusmulta/>

Salo, T., Palojärvi, A., Kukkonen, S., Vestberg, M., Kapuinen, P., Tontti, T., Ylivainio, K., Parikka, P., Nummila, M., Maunuksela, L., Lindström, K., Orasmaa, S., Paulin, L. 2013. Orgaanisten lannoitevalmisteiden vaikutus kasvien kasvuun – testimenetelmät. MTT Raportti 101. ISBN: 978-952-487-468-7. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-487-468-7>

ALIIVIBRIO FISCHERI -EKOTOKSISUUSTESTIT APUNA TUOTTEIDEN TURVALLISEN KÄYTÖN VARMISTAMISESSA

Vuokko Malk & Minttu Paakkari

Mädärteen käyttäminen lannoitteena mahdollistaa ravinteiden ja orgaanisen aineksen kierrättämisen ja palauttamisen maaperään ja vähentää mineraalilannoitteiden käytön tarvetta. Mädärteiden levittäminen pelloille voi kuitenkin aiheuttaa myös ympäristöriskejä, kuten ravinnepäästöjä ja kuormitusta vesistöihin tai pohjaveteen, raskasmetallien ja orgaanisten haitta-aineiden kertymistä, korkeaa suolapitoisuutta tai kontaminaatiota patogeenisilla bakteereilla (Natalio ym. 2021, Malhotra ym. 2022, Pivato ym. 2016). Lannoitevalmisteiden laatua ja turvallisuutta säädelään lainsäädännön avulla (EU:n lannoitevalmisteasetus 2019/1009, lannoitelaki 711/2022). Maa- ja metsätalousministeriön asetuksessa lannoitevalmisteista 24/11 on annettu haitallisten aineiden enimmäispitoisuudet.

Kemiallisten pitoisuusanalyysien rinnalla ekotoksisuustestit antavat tietoa eri haitta-aineiden yhteisvaikutuksesta ja biosaatavuudesta. Ekotoksisuustesteillä tutkitaan haitta-aineiden ja ympäristönäytteiden toksisuutta eliöille. Aina ei ole tiedossa, mitä eri haitta-aineita tutkittavassa näytteessä esiintyy, tai kaikkien aineiden pitoisuuksia ei pystytä analysoimaan kemiallisesti. Lisäksi kemikaalien hajoamistuotteet voivat olla alkuperäisiä haitta-aineita myrkyllisempiä. Ekotoksisuustestit antavat tietoa myös näiden aineiden toksisuusvaikutuksista sekä kemikaaliseosten yhteisvaikutuksista.

CityLoops-hankkeessa tutkittiin biojätepohjaisten mädärteiden sekä koivupohjaisen biohiilen ekotoksisuutta tuotteiden turvallisen käytön varmistamiseksi. Testimenetelmäksi valittiin *Aliivibrio fischeri* -toksisuustesti.

KIRJALLISUUSKATSAUS MÄDÄRTEIDEN EKOTOKSISUUS-TUTKIMUKSISTA

Mädärteiden ekotoksisuutta on tutkittu toistaiseksi melko vähän eikä vaikutuksia maaperäeliöstöön tunneta kovin hyvin. Lisäksi mädärteen koostumus ja ominaisuudet ja siten myös ekotoksikologiset vaikutukset vaihtelevat huomattavasti riippuen esimerkiksi mädätetystä raaka-aineesta (Pivato ym. 2016) ja myös mädätysprosessin olosuhteista (Di Maria 2014, Da Ros 2018 mukaan).

Kirjallisuudesta löytyy jonkin verran mädätteillä tehtyjä ekotoksisuustutkimuksia. Useimmat tutkimukset on tehty maatalousperäisistä mädätteistä (esim. Pivato ym. 2016, Tigini ym. 2016), mutta tutkimuksia on tehty myös esimerkiksi ruokajätteen mädätteestä (Natalio ym. 2021). Monissa tutkimuksissa on tutkittu mädätteiden toksisuutta kasveille (fytotoksisuutta) (esim. Da Ros ym. 2018) sekä vaikutuksia lieroihin (esim. Natalio ym. 2021, Monaird ym. 2021). Lisäksi tutkimuksia on tehty myös vesieliöillä ja valobakteereilla (esim. Tigini ym. 2016, Pivato ym. 2016).

Lierotesteissä ekotoksisuustestien tulokset ovat olleet vaihtelevia. Mädätteen levityksen on havaittu sekä vähentävän että lisäävän lierojen määrää, tai biomassaa ja saman mädätteen vaikutukset ovat voineet vaihdella eri alueilla. Negatiivisten vaikutusten syyksi on epäilty mädätteen suoloista johtuvaa osmoottista stressiä, mädätteen biologisesta ja kemiallisesta hapenkulutuksesta aiheutuvaa hapettomuutta sekä haihtuvista rasvahapoista johtuvia pH-muutoksia (Natalio ym. 2021).

Monairdin ym. (2021) tutkimuksessa maatalousperäisen mädätteen (ja karjanlannan) todettiin aiheuttavan kuolleisuutta lieroille lyhyellä aikavälillä. Syynä kuolleisuuteen oli korkea ammoniakkipitoisuus. Kuitenkin pitkällä aikavälillä (kahdesta viikosta kahteen vuoteen) vaikutus oli neutraali tai positiivinen, ja mädäte lisäsi lierojen määrää kemialliseen lannoitteeseen verrattuna.

Fytotoksisuustesteissä mädätteiden on yleensä havaittu stimuloivan kasvien kasvua alhaisilla pitoisuuksilla, mutta korkeissa pitoisuuksissa kasvien itävyys tai kasvu on heikentynyt. Esimerkiksi Da Rosin ym. (2018) tutkimuksessa mädäte stimuloi keltasinapin (*Sinapis alba*) ja durran (*Sorghum saccharatum*) itämistä ja kasvua pitoisuuksilla 3,15–6,25 % v/v, mutta korkeissa pitoisuuksissa vaikutus oli toksinen. Yleensä itävyys korreloi negatiivisesti johtokyvyn ja ammoniumpitoisuuden kanssa. Korkea ammoniumpitoisuus aiheuttaa usein fytotoksisuutta, mutta vaikuttavaa pitoisuustasoa ei tunneta hyvin. Di Marian ym. (2014) tutkimuksessa ammonium inhiboi vihanneskrassin (*Lepidium sativum*) siementen itämistä pitoisuustasolla 16–25 g N-NH₄⁺/kgTS, kun taas Tiginin ym. (2016) tutkimuksessa inhiboiva vaikutus vihanneskrassilla ja kurkulla havaittiin vasta pitoisuudessa yli 2 000 mg/L N-NH₄⁺. (Da Ros ym. 2018)

Suolaisuus rajoittaa monien kasvien itämistä osmoottisten vaikutusten tai ionitoksisuuden kautta. Yli 2,0–2,6 mS/cm oleva saliniteettitaso heikensi salaatin siementen itävyyttä Boludan ym. (2011) tutkimuksessa. Korkea johtokyky puolestaan on korreloinut heikentyneen itävyyden kanssa useissa tutkimuksissa. Korkean johtokyvyn taustalla on yleensä korkeat natriumin, kloorin, ammoniumin ja myös metallien pitoisuudet. (Da Ros ym. 2018)

Fytotoksisuus voi riippua myös mädätysprosessin olosuhteista. Erityisesti korkea kuormitustaso (organic loading rate, OLR) ja lyhyt viipymä (hydraulic retention) voivat johtaa

korkeisiin haihtuvien rasvahappojen pitoisuuksiin, mikä voi heikentää kasvien itävyyttä (Di Maria ym. 2014, Da Ros 2018 mukaan).

Useilla eri eliölajeilla tehdyt ekotoksisuustutkimukset mahdollistavat eri lajien herkkyyserojen vertailun. Tigrini ym. (2016) tutkivat sianlannasta tuotetun mädätteen ekotoksisuutta seitsemällä ekotoksisuustestillä (*Vibrio fischeri* – luminesenssin inhibitio, *Raphidocelis subcapitata* – levän kasvun inhibitio, *Lemna minor* – vesikasvin kasvun inhibitio, biomassa ja lehtien määrä *Cucumis sativus* and *Lepidium sativum* – fytotoksisuustestit, *Daphnia magna* – vesikirpunan liikkumattomuus, *Artemia franciscana* – nauplius-toukkien kuolleisuus). Mädäte oli toksista kaikille testatuille eliölajeille. EC50-arvot olivat 0,77–14,22 %. Toksisuuden aiheuttajana olivat korkea ammoniumpitoisuus, saliniteetti, kemiallinen hapenkulutus, fosfaattipitoisuus sekä väri. Mädätteen todettiin olevan hyvin toksista ja aiheuttavan erittäin korkean ympäristöriskin ilman esikäsittelyä.

Pivaton ym. (2016) tutkimuksessa tutkittiin mädätteen suoria vaikutuksia lieroille ja kasveille sekä mädätteen vesiutteen vaikutuksia vesikirpulle (*Daphnia magna*), äyriäiselle (*Artemia sp.*) ja valobakteerille (*Vibrio fischeri*). Liero- ja kasvitestissä ei havaittu negatiivisia vaikutuksia alhaisissa pitoisuuksissa (15 % ja 20 % kasville). Vesikirpputestissä LC50-arvo oli 13,61 tilavuus-%, mutta *Artemia sp.*- ja *Vibrio*-testeissä toksisuutta ei havaittu.

Kirjallisuuden perusteella voidaan todeta, että mädätteiden käytössä lannoitteena ja maanparannusaineena pitää kiinnittää erityistä huomiota oikeaan annostukseen ja levitysmäärään, jotta saadaan esiin positiiviset lannoitevaikutukset, mutta toisaalta varmistetaan turvallisen käyttö maaperän ekosysteemeille (Rózyło ym. 2015, Da Ros ym. 2018 mukaan). Eri mädätetuotteiden toksisuuden ennustaminen on vaikeaa vaihtelevista ominaisuuksista johtuen, ja tuotteet tulee testata tapauskohtaisesti. Myös mädätysprosessin olosuhteisiin tulee kiinnittää huomiota.

CityLoops-hankkeessa biohiiltä tutkittiin apuaineena biokaasuprosessissa. Biohiiltä hyödynnetään usein myös kasvualustoissa ja multatuotteissa, koska se voi edistää muun muassa veden ja ravinteiden pidätyskykyä. Myös biohiilen ominaisuudet vaihtelevat huomattavasti raaka-aineesta ja valmistusprosessista riippuen. Joissain tapauksissa on mahdollista, että pyrolyysiprosessissa raaka-aineen sisältämät mahdolliset myrkylliset aineet rikastuvat prosessin tuotteena syntyvään biohiileen tai itse prosessissa voi syntyä haitallisia PAH-yhdisteitä ja dioksiineja (Domene ym. 2015). Näin ollen on tärkeää varmistaa myös biohiilituotteiden turvallinen käyttö.

ALIIVIBRIO FISCHERI -VALOBAKTEERITESTI

Aliivibrio fischeri on meriympäristön bioluminisoiva bakteeri, jota on laajasti käytetty ekotoksisuustesteissä. Haitta-aineet aiheuttavat valontuoton heikkenemisen, joka voidaan mitata luminometrillä. Testin on todettu osoittavan hyvin erityyppisten haitta-aineiden toksisuuden. Lisäksi sen on havaittu korreloivan korkeammilla eliölajeilla, kuten kaloilla, tehtyjen toksisuustestien kanssa, mutta sen toteuttaminen on eettisesti hyväksyttävämpää. Testin toteuttaminen on myös nopeaa ja kustannustehokasta. (Parvez ym. 2006) Testiä käytetään yleisesti esimerkiksi kompostin kypsytyden määrittämisessä (Itävaara ym. 2006). Lisäksi sitä on käytetty muun muassa useissa jätevesilietteiden toksisuutta selvittäneissä tutkimuksissa (esim. Kapanen 2012).

Aliivibrio fischeri -valobakteeritesti on tarkoitettu alun perin vesinäytteiden toksisuuden määrittämiseen (ISO 11348), mutta SFS-ISO 21338 -standardin mukainen kineettinen versio testistä on kehitetty erityisesti värillisten ja kiinteiden näytteiden toksisuuden määrittämiseen. Näin ollen kineettinen menetelmä soveltuu hyvin myös mädätteiden ekotoksisuuden määrittämiseen.

TUTKITUT NÄYTTEET

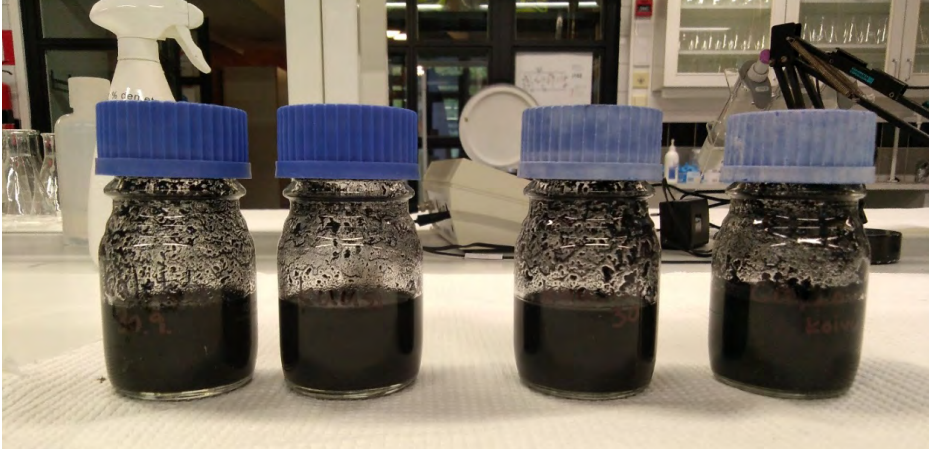
BIOHIILI

Koivupohjainen biohiili saatiin paikalliselta SoilCare-yritykseltä. Pyrolyysilämpötila oli 480 °C. Biohiili oli samaa, jota käytettiin myös CityLoops-hankkeen biokaasukokeissa ja kasvatuskokeissa. Ekotoksisuustestiä ja laboratorioanalyysijä varten biohiili murskattiin ensin veitsen ja vasaran avulla, minkä jälkeen se kuivattiin yön yli 104 °C:ssa ja jauhettiin leikkaavalla IKA MF 10.1 -myllyllä (seulakoko 1 mm) (kuva 1).



Kuva 1. Koivupohjaista biohiiltä (kuvat Tiina Saario ja Vuokko Malk).

Ekotoksisuustestiiä varten jauhetusta biohiilinäytteestä tehtiin suspensio ultrapuhtaaseen veteen kymmenen prosentin massasuhteessa (kuva 2). Näytettä ravisteltiin kevyesti kädessä minuutin ajan ja sekoitettiin lusikalla. Biohiilinäytteestä tehtiin kolme rinnakkaista suspensiota.



Kuva 2. Biohiili-vesi-suspensioita (kuva Vuokko Malk).

MÄDÄTTEET

Ekotoksisuustestejä tehtiin CityLoops-hankkeen laboratorio- ja pilot-mittakaavan biokaasukokeiden mädätteistä sekä täyden mittakaavan biokaasulaitoksen mädätteistä (taulukko 1). Kaikki mädätteet olivat biojättepohjaisia. Osassa laboratorio- ja pilot-mittakaavan kokeiden mädätteistä oli mukana myös biohiiltä.

Taulukko 1. *Aliivibrio fischeri* -testillä testatut mädäthenäytteet.

Mädäthenäyte	Raaka-aineet	Koesarja/laitos
Mädäte 1	Biojäte	Pullopanoskoe
Mädäte 2	Biojäte + sitrus 25 %	Pullopanoskoe
Mädäte 3	Biojäte + sitrus 25 % + biohiili 1 %	Pullopanoskoe
Mädäte 4	Biojäte	15 l pilot-reaktori
Mädäte 5	Biojäte + biohiili 1 %	15 l pilot-reaktori
Mädäte 6	Biojäte	Biokaasulaitos, nestejäte
Mädäte 7	Biojäte	Biokaasulaitos, kuivajäte

Mädätteet 1–3 olivat laboratoriossa toteutetusta pullopanoskokeesta, jossa raaka-aineena käytettiin ravintolan biojätettä. Lisäksi pullopanoskokeesta oli testattu sitrushedelmien ja biohiilen vaikutusta biokaasuprosessiin. Sitrushedelmien on tutkimuksissa todettu inhiboivan kaasuntuotantoa. Biohiili taas voi ehkäistä sitrushedelmien inhiboivaa vaikutusta. Sitrushedelmäseos koostui appelsiinista (50 %), sitruunasta (25 %) ja limeistä (25 %), ja se sisälsi kaikkien hedelmien hedelmälihaa, kuorta ja mehua. Ekotoksisuustestejä varten mädätenäytteet pakastettiin biokaasukokeiden purun yhteydessä.

Mädätteet 4–5 olivat 15 litran puoliautomaattisissa reaktoreissa toteutetusta biokaasukokeesta. Reaktorin syöremateriaalina käytettiin ympin ja biojätteen lisäksi kiinankaalia ja jauhelihaa, joilla haluttiin nostaa reaktorin typpipitoisuutta. Ekotoksisuustestejä varten mädätenäytteet pakastettiin biokaasukokeiden purun yhteydessä.

Mädätteet 6–7 olivat täyden mittakaavan biokaasulaitokselta. Näytteet otettiin erikseen biojätteen mädätteen neste- ja kuivajakeesta. Nestejakeen kuiva-ainepitoisuus (TS %) oli seitsemän prosenttia ja kuivajakeen 43 prosenttia. Mädätejäänäös oli jälkihygienisoitu hygienisointiyksikössä 70 °C:n lämpötilassa tunnin ajan. Näytteen 7 korkean kuiva-ainepitoisuuden vuoksi siitä tehtiin suspensio ultrapuhtaaseen veteen kymmenen prosentin massasuhteessa. Suspensiota ravisteltiin kevyesti kädessä minuutin ajan ja sekoitettiin lusikalla.

Biohiili- ja mädätenäytteistä analysoitiin muun muassa ravinnepitoisuudet, pH ja johtokyky biokaasukokeiden yhteydessä. Osa analyyseistä teetettiin ulkopuolisessa laboratoriossa (ALS Finland Oy). Xamkin ympäristölaboratoriossa tehdyissä analyyseissä kokonaistyyppi määritettiin Kjeldahl-menetelmällä. Ammoniumin ja kokonaistypen määrittelyä tehtiin myös spektrofotometrisesti kyvettitestillä (Hach® LCK cuvette tests).

TESTIN TOTEUTUS

Testit toteutettiin standardin SFS-ISO 21338 mukaisesti. Testeissä käytettiin BioTox™-kitiä (Aboatox Oy, Turku).

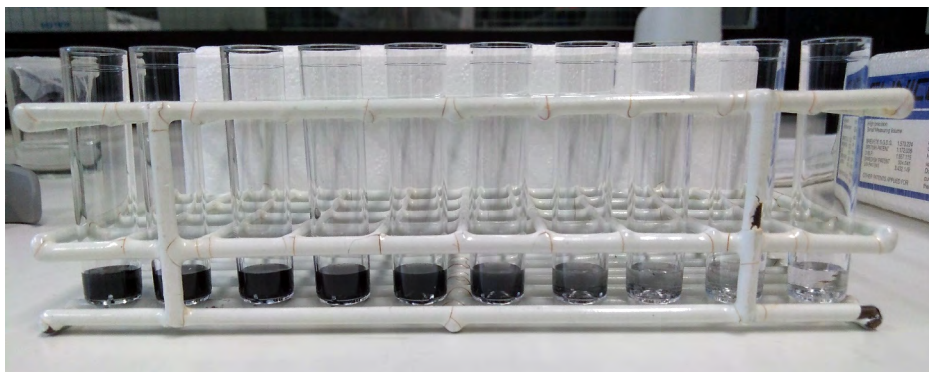
NÄYTTEIDEN PH:N JA NaCl-PITOISUUDEN SÄÄTÖ

Testiä varten näytteiden pH mitattiin ja NaCl-pitoisuus säädettiin. Testissä pH:n tulee olla 6–8,5. Jos pH poikkeaa tästä, se tulee säätää välille $7 \pm 0,2$ tai alueen ylä- tai alarajalle (SFS-ISO 21338). Tässä tapauksessa ainoastaan mädätteen 7 pH piti säätää. pH (n. 9) säädettiin tasolle 8,2–8,4 1,5 M HCl:llä. Muiden näytteiden pH-arvot olivat 7,5–8,4.

Aliivibrio fischeri on meriympäristön bakteeri, joten testissä näytteiden NaCl-pitoisuus tulee olla kaksi prosenttia. Näytteiden NaCl-pitoisuus säädettiin lisäämällä 50 ml:n näytetilavuuteen 1 g NaCl. Toksisuusmittaukset tehtiin saman päivän aikana.

LAIMENNOSSARJOJEN VALMISTUS

Näytteistä valmistettiin laimennossarjat kahden prosentin NaCl-liuokseen (kuva 3). Jokaisesta näytteestä tehtiin kymmenen laimennosta. Vahvin testattu liuos oli laimentamaton biohiili-vesi-suspensio tai mädäte. Näyte kuitenkin laimenee mittauksen yhteydessä bakteerisuspension kanssa. Laimennokset tehtiin mittauskyvetteihin, ja lopullinen tilavuus oli 400 µl. Jokaisesta näytteestä tehtiin kaksi rinnakkaista laimennossarjaa luminesenssimittausta varten. Laimennossarjojen annettiin stabiloitua vähintään 15 minuuttia ennen mittausta.

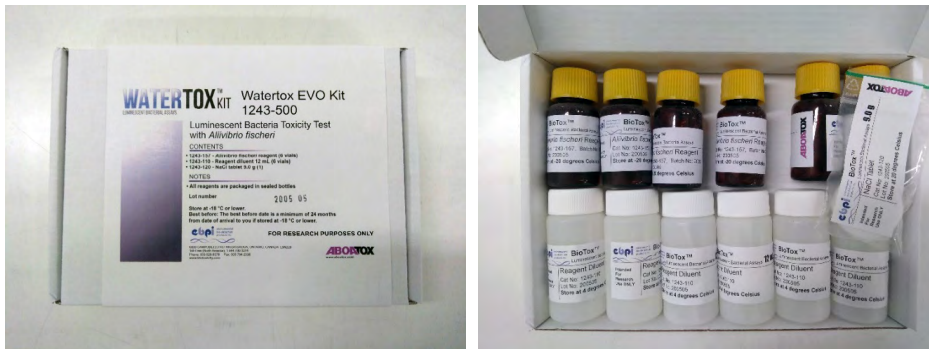


Kuva 3. Biohiili-vesi-suspensiosta valmistettu laimennossarja (kuva Vuokko Malk).

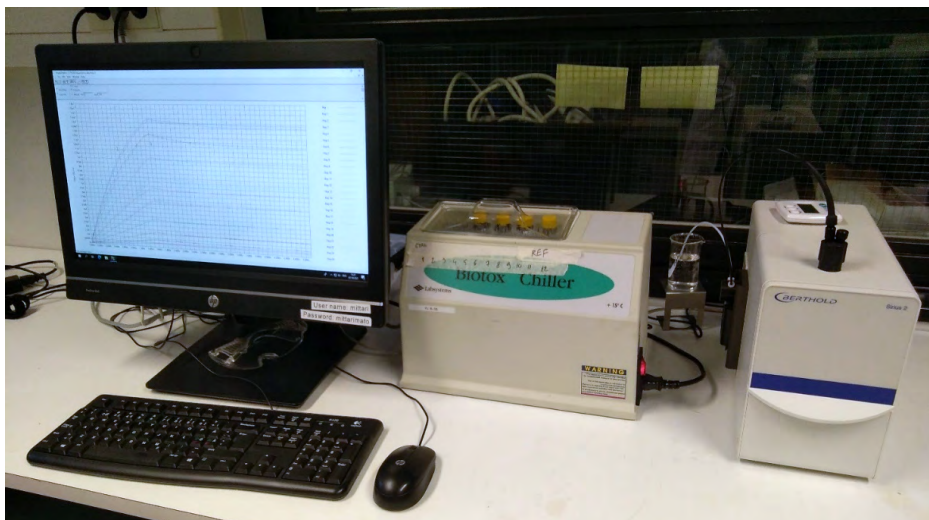
LUMINESENSIN MITTAUS

BioTox™-kitin (kuva 4) kylmäkuivattu bakteeri ”herätettiin” sekoittamalla siihen laimennusreagenssi. Bakteeriliuos pidettiin vähintään 30 minuuttia kylmiössä, minkä jälkeen sen annettiin stabiloitua noin 30 minuutista viiteen tuntiin 15 °C:ssa inkubaattorissa (Biotox Chiller, Labsystems).

Bakteerisuspensio injektointiin näytteisiin luminometrin (Berthold LB 9526 Sirius 2 Single Tube Luminometer) annostelijalla alkutilannemittauksen yhteydessä (kuva 5). Luminometri mittaa valontuoton siitä hetkestä lähtien, jolloin bakteerisuspension annostelu näytteeseen alkaa, ja sitä jatketaan viisi sekuntia. Testin olosuhteet ja mittaussparametrit on esitetty taulukossa 2. Kontaktiajan (30 min) jälkeen valontuotto mitattiin uudelleen kyvetteistä samassa järjestyksessä kuin alkutilanteessa. Mittaussparametrit olivat samat kuin alkutilanteessa, mutta ilman bakteerin injektointia. Bakteerikittien välillä oli vaihtelua niiden toiminnassa, mikä vaikutti injektioilavuuteen, referenssiliuoksen pitoisuuteen sekä inkubointilämpötilaan, jossa näytteet stabiloitiin ja pidettiin kontaktiajan aikana. Referenssiliuoksena käytettiin 3,5-dikloorifenolia ($C_6H_4OCl_2$) ja kontrollina 2 %:n NaCl-liuosta ($pH\ 7 \pm 0,2$).



Kuva 4. BioTox™-kitti, joka sisältää kylmäkuivatun bakteerin, laimennosreagenssin sekä NaCl-tabletin (kuva Vuokko Malk).



Kuva 5. Mittauslaitteisto: oikealla Berthold LB 9526 Sirius 2 Single Tube -luminometri ja keskellä Biotox Chiller -inkubaattori (kuva Vuokko Malk).

Taulukko 2. Testin olosuhteet ja mittausparametrit.

Parametri	Arvo
Injektorin viive	1,0 s
Injektiotilavuus	400 µl (biohiilinäytteet ja mädätteet 1–3) / 100 µl (mädätteet 4–7)
Mittauksen viive	1,000 s
Mittauksen aikaväli	0,100 s
Mittauksen kesto	5,000 s
Tausta (background)	0 RLU/s
Inkubointilämpötila	15 °C (biohiilinäytteet ja mädätteet 1–3) / huoneenlämpö (mädätteet 4–7)
Referenssiluoksen (3,5-dikloorifenoli) pitoisuus	3,4 mg/l (biohiilinäytteet ja mädätteet 1–3) / 8,5–13,6 mg/l (mädätteet 4–7). Pitoisuuksissa on huomioitu laimeneminen bakteerisuspension kanssa.

TULOSTEN KÄSITTELY JA LASKUKAAVAT

Tulokset laskettiin standardin SFS-ISO 21338 mukaisesti käyttäen AboaTox Oy:n toimittamaa Excel-laskentapohjaa. Kontrollinäytteen luminesenssiarvoista laskettiin korjauskerroin (KF-arvo), joka osoittaa, kuinka paljon luminesenssin tuotto muuttuu kontrollinäytteessä kontaktiajan aikana (kaava 1). Näytteiden tulosten perusteella laskettiin luminesenssin inhibitioprosentit (kaava 2). Laite mittasi luminesenssin intensiteettiä 0,1 sekunnin välein viiden sekunnin ajan. Luminesenssin intensiteettiarvoina (huippuarvo) käytettiin aikavälin 1,8–2,4 sekuntia keskiarvoa, mikä oli määritetty laitetoimittajan kanssa sopivaksi mittausalueeksi.

Kaava 1: $KF = IC_{30} / IC_0$

Kaava 2: $INH\% = 100 - 100 \times IT_{30} / (KF \times IT_0)$

KF	Korjauskerroin (rinnakkaisten kontrollinäytteiden keskiarvo)
IC30	Luminesenssin intensiteetti kontrollinäytteessä 30 minuutin kontaktiajan jälkeen
IC0	Luminesenssin intensiteetti kontrollinäytteessä alkutilanteessa
INH%	Luminesenssin inhibitio testinäytteessä
IT30	Luminesenssin intensiteetti testinäytteessä 30 minuutin kontaktiajan jälkeen
IT0	Luminesenssin intensiteetti testinäytteessä alkutilanteessa

EC50-arvot (Effective Concentration 50 %) laskettiin käyttäen lineaarista regressiota. EC50-arvot voitiin laskea vain niille näytteille (mädätteille), joilla annos–vaste-suhde luminesenssin inhibitiossa oli havaittavissa. Laskennassa otettiin huomioon ne laimennokset, joissa inhibitioprosentti oli positiivinen ja joilla alkuluminesenssiarvo oli vähintään kymmenen prosenttia kontrollin vastaavasta arvosta.

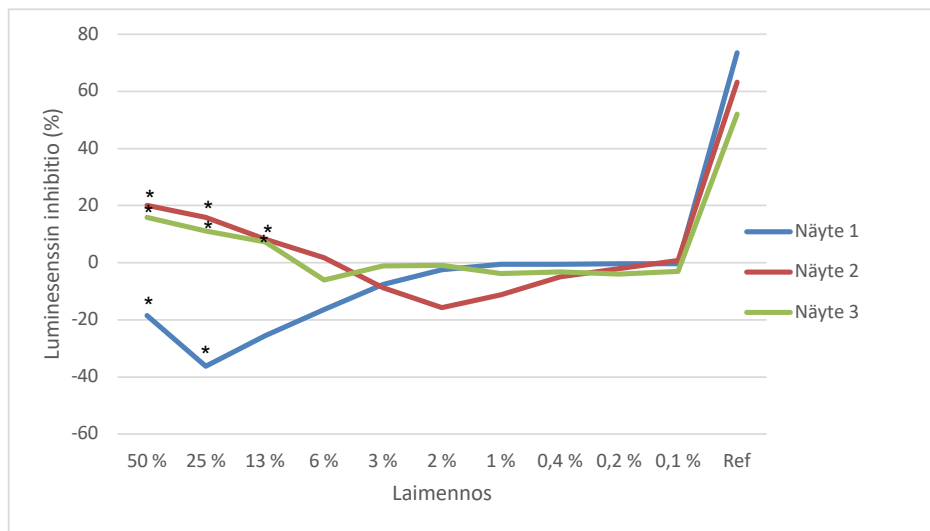
TULOKSET JA TARKASTELU

BIOHIILINÄYTTEEN EKOTOKSISUUS

Biokaasuprosessissa testatussa koivupohjaisessa biohiilessä ei havaittu ekotoksisuutta *Aliivibrio fischeri* -toksisuustestissä. Laimentamattoman vesisuspension inhibitio kolmessa rinnakkaisessa näytteessä oli keskimäärin 5,9 prosenttia. Standardin mukaan alhaisin vaikuttava pitoisuus, LID (Lowest Ineffective Concentration), on suurin näytepitoisuus, jossa valontuoton estyminen on ≤ 20 prosenttia. Muissa laimennoksissa keskimääräiset inhibitioprosentit olivat negatiivisia, eli näytteet lisäsivät bakteerien luminesenssin tuottoa (kuva 6). Valontuotannon lisäys voi johtua näytteen sisältämistä hiilestä ja ravintoaineista (Kapanen 2012).

Rinnakkaisnäytteiden välillä oli suhteellisen paljon hajontaa tuloksissa erityisesti vahvimmissa laimennoksissa. Yksi hajontaa aiheuttava tekijä voi olla näytteiden väri. Näytteen voimakas väri (erityisesti ruskea tai punainen väri) voi aiheuttaa luminesenssin inhibitiota, joka ei johdu näytteen toksisuudesta (ISO 11348-3). Menetelmä SFS-ISO 21338 on tarkoitettu erityisesti värikkäiden ja kiinteiden näytteiden toksisuuden määrittämiseen, eikä menetelmässä tarvita värikorjausta. Näytteiden alkuluminesenssin tason tulisi kuitenkin olla vähintään kymmenen prosenttia kontrolliin verrattuna. Biohiilinäytteen vahvimmissa laimennoksissa väri oli niin voimakas, että alkuluminesenssin taso oli alle kymmenen prosenttia kontrolliin verrattuna. Näin ollen kolmen vahvimman laimennoksen inhibitioprosentteja ei voida pitää täysin luotettavina. Väriin vaikutus kuitenkin lähinnä yliarvioi toksisuutta. Voidaan siis luotettavasti todeta, että toksisuutta ei näytteissä havaittu.

Kontrollinäytteiden KF-arvo oli testeissä 0,66–0,76 ja referenssinäytteen inhibitio 52–73,5 prosenttia. Molemmat olivat standardin vaatimalla tasolla (KF 0,6–1,8, referenssinäytteiden inhibitio 20–80 %, ISO 21338), joten testit olivat valideja.



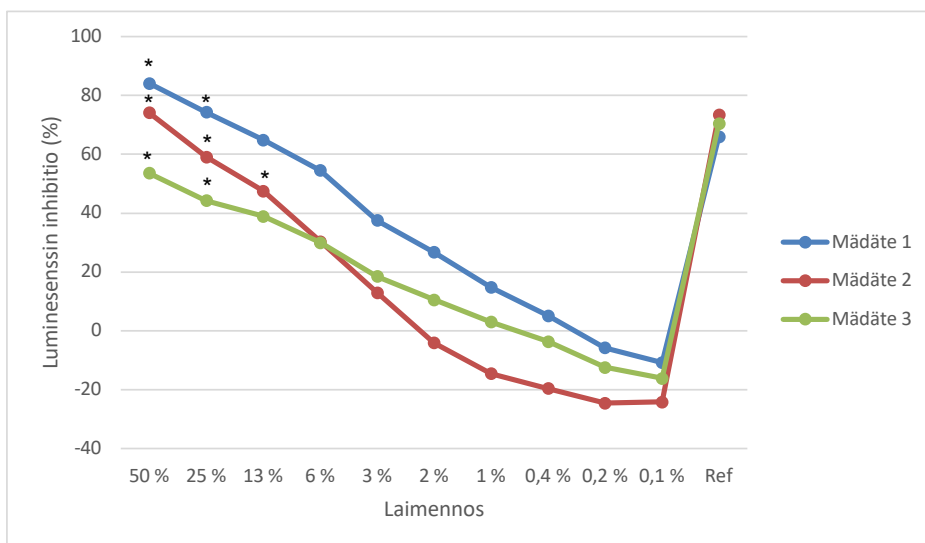
Kuva 6. Luminesenssin inhibitio koivupohjaisesta biohiilestä valmistetun vesisuspension laimennoksissa. Näytteet 1–3 ovat samasta biohiilestä tehty rinnakkaiset biohiili-vesi-suspensiot. Referenssiaineena (ref) 3,5-dikloorifenoli 3,4 mg/l. *Vahvimmissa laimennoksissa väri voi vaikuttaa tuloksiin.

MÄDÄTTEIDEN EKOTOKSISUUS

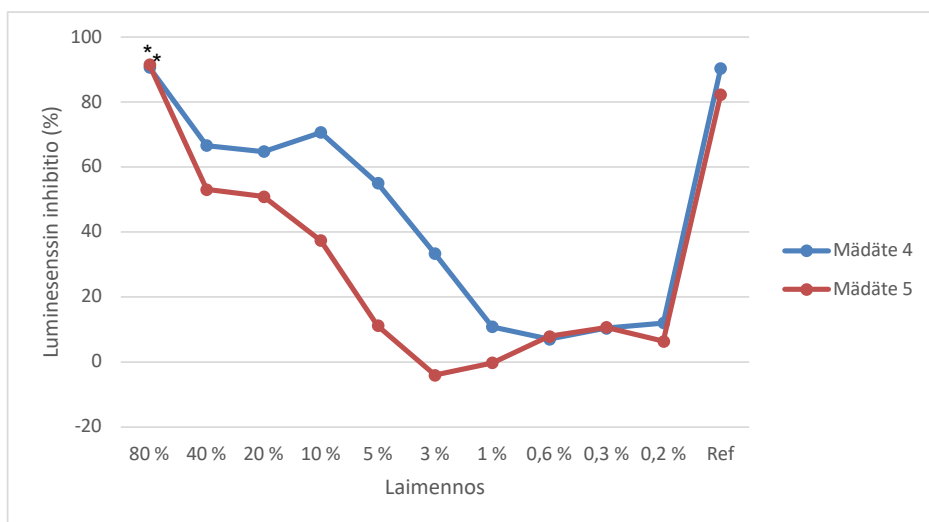
Mädäntenäytteissä havaittiin selvästi voimakkaampaa luminesenssin inhibitiota kuin biohiilen vesisuspensiossa. Vahvimmissa laimennoksissa luminesenssin inhibitiot olivat 54–91 prosenttia, mikä osoittaa selvää toksisuutta (kuvat 7–10). Kuten biohiilen vesisuspensiossa, myös mädäntenäytteissä (biokaasulaitoksen mädätteen kuivajäätettä, mädänte 7, lukuun ottamatta

ta) vahvimmissa laimennoksissa väri oli niin voimakas, että luminesenssin alkuintensiteetti oli alle kymmenen prosenttia kontrolliin verrattuna. Näin ollen vahvimpien laimennosten inhibitioprosentteja ei voida pitää täysin luotettavina. Selvää luminesenssin inhibitiota havaittiin kuitenkin myös laimeammissa laimennoksissa, joissa ei ollut värin vaikutusta.

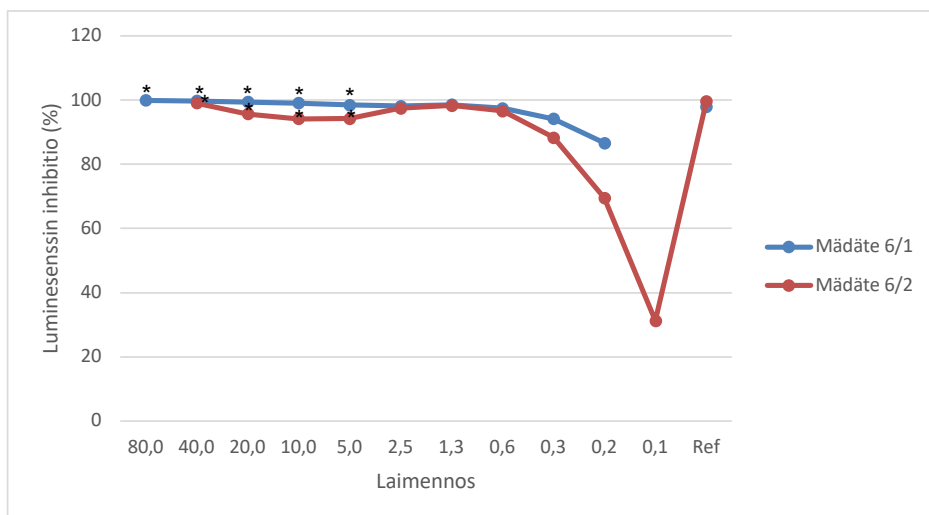
Kontrollinäytteiden KF-arvo oli mädätteiden 1–3 testeissä 0,51–0,55 eli hieman alhaisempi verrattuna standardin vaatimaan tasoon (0,6–1,8). Referenssinäytteen inhibitio oli kuitenkin 66–74 prosenttia, mikä on standardin vaatimalla tasolla (20–80 %, ISO 21338). Mädätteiden 4–7 testeissä kontrollinäytteiden KF-arvot olivat 0,68–0,92 eli standardin vaatimalla tasolla.



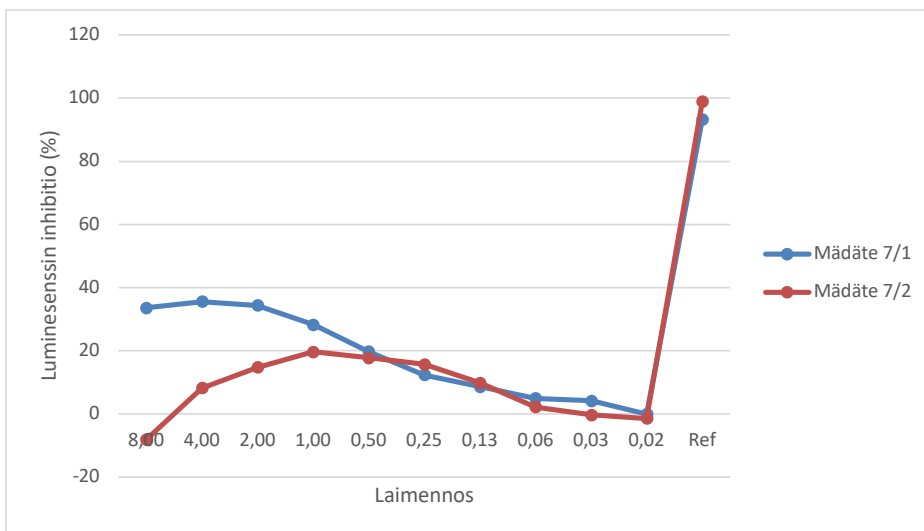
Kuva 7. Luminesenssin inhibitio mädätteissä 1–3. Referenssiaineena 3,5-dikloorifenoli 3,4 mg/l. *Vahvimmissa laimennoksissa väri voi vaikuttaa tuloksiin.



Kuva 8. Luminesenssin inhibitio mädähteissä 4–5. Referenssiaineena 3,5-dikloorifenoli 8,5 mg/l. *Vahvimmissa laimennoksissa väri voi vaikuttaa tuloksiin.



Kuva 9. Luminesenssin inhibitio täyden mittakaavan biokaasulaitoksen biojätämädätteen nestejakeen (mädäte 6) laimennoksissa. Näytteestä tehtiin kaksi rinnakkaista testausta. Referenssiaineena 3,5-dikloorifenoli 13,6 mg/l. *Vahvimmissa laimennoksissa väri voi vaikuttaa tuloksiin.



Kuva 10. Luminesenssin inhibitio täyden mittakaavan biokaasulaitoksen biojäte-mädätteen kuivajakeesta (määdäte 7) valmistetun vesisuspension laimennoksissa. Näytteestä tehtiin kaksi rinnakkaista testausta. Referenssiaineena 3,5-dikloorifenoli 13,6 mg/l.

Tulosten perusteella lasketut EC50-arvot mädäthenäytteille olivat 0,01–28 % (taulukko 3). Mittausten perusteella alhaisin EC50-arvo ja suurin toksisuus olivat täyden mittakaavan biokaasulaitoksen mädätteen nestejakeessa (määdäte 6). Kuivajakeessa luminesenssin inhibitio oli vähäisempää kuin nestejakeessa. Kuivajakeen rinnakkaisten näytteiden välillä oli ero tuloksissa (kuva 10), ja toisen rinnakkaisen perusteella EC50-arvoa ei voitu määrittää. Vaihtelevat tulokset johtuvat todennäköisesti näytteen heterogeenisuudesta. Rinnakkaisten välisestä vaihtelusta huolimatta tulokset osoittavat selvästi, että kuivajakeen toksisuus oli selvästi alhaisempi nestejakeeseen verrattuna.

Laboratoriomittakaavan kokeiden mädätteissä alhaisimmat EC50-arvot ja suurin toksisuus olivat mädätteissä 1 ja 4, joissa raaka-aineena oli pelkkä biojäte. Korkein EC50-arvo eli vähäisin toksisuus oli mädätteessä 3, jonka raaka-aineena oli biojätteen lisäksi sitrushedelmiä ja biohiiltä. Vaikka sitrushedelmät laskivat jossain määrin biokaasuntuottoa biokaasukokeissa, ne eivät kuitenkaan lisänneet mädätteiden toksisuutta valobakteereille. Biohiili lasi hieman toksisuutta sekä pullopanoskokeiden että pilot-reaktorikokeiden mädätteissä. Mädätteistä analysoiduissa ominaisuuksissa on vain pieniä eroja biohiiltä sisältävän ja pelkän biojätteen mädätteen välillä.

Taulukko 3. Määdäntenäytteiden EC50-arvot (laimennos-%) *Aliivibrio fischeri* -testissä sekä pH, sähkönjohtavuus, ammonium- ja kokonaistyyppipitoisuudet.

Näyte	EC50 <i>Aliivibrio fischeri</i>	pH	Sähkön- johtavuus (mS/cm)	Ammonium	Kokonais- typpi
Biohiili	-	8,2	0,163	<0,5 mg/ kg k.a.	0,11 mg/l
Mädäte 1	5,97 %	7,7	18,1	-	109 g/kg
Mädäte 2	16,47 %	7,8	17,9	-	114,2 g/kg
Mädäte 3	27,97 %	7,8	18,2	-	108,3 g/kg
Mädäte 4	5,66 %	8,0	17,8	2830 mg/l	2000 mg/l
Mädäte 5	11,89 %	8,0	17,3	2730 mg/l	1950 mg/l
Mädäte 6	0,01-0,09 %	8,3	41,7	9240 mg/l	131 g/kg
Mädäte 7	11,98 % / -	9,0	2,3	321 mg/l	24 g/kg

Kirjallisuuden perusteella mädätteiden toksisuutta voivat aiheuttaa esimerkiksi ammoniakki, haihtuvat orgaaniset yhdisteet, suolat ja raskasmetallit (Nkoa 2014, Franchinon ym. 2016 mukaan). Määdäntenäytteistä ei analysoitu ammoniakkia, raskasmetalleja, VOC-yhdisteitä tai orgaanisia haitta-aineita, joten toksisuuden syitä on vaikea arvioida. Voimakkain luminesenssin inhibitio havaittiin biokaasulaitokselta haetun mädätteen nestejakeessa, jossa myös oli näytteistä selvästi korkein johtokyky, ammonium- ja kokonaistyyppipitoisuus (taulukko 3). Nämä tekijät näyttäisivät ainakin osaltaan selittävän korkeampaa toksisuutta.

Myös useimpien muiden näytteiden johtokyky oli korkea, ja korkean johtokyvyn on todettu esimerkiksi kasvitesteissä heikentäneen kasvien itävyyttä. Korkean johtokyvyn taustalla ovat yleensä korkeat natriumin, kloorin, ammoniumin ja myös metallien pitoisuudet (Da Ros ym. 2018). Määdäntenäytteissä 4–6 ammoniumpitoisuus oli korkea (näytteistä 1–3 ammoniumia ei analysoitu). Lisäksi mädätteet olivat peräisin kotitalous- ja ravintolabiojätteestä, joka todennäköisesti sisältää suolaa, ja tämä voi selittää ainakin osan näytteiden korkeasta johtokyvystä.

Tiginin ym. (2016) tutkimuksessa sianlannan mädätteen EC50-arvoksi *Vibrio fischeri* -testissä määritettiin 1,66 prosenttia ja toksisuus todettiin kaikilla seitsemällä testatulla eliölajilla. Toksisuus on samalla tasolla kuin osassa CityLoopsin näytteissä. Sen sijaan Pivaton ym. (2016) tutkimuksissa maatalousperäisen mädätteen vesiuutteessa ei havaittu toksisuutta *Vibrio fischeri* -testissä eikä myöskään liero-, kasvi- ja *Artemia* sp. -testeissä. Pivaton ym. (2016) tutkimuksessa testatussa mädätteessä oli selvästi alhaisempi johtokyky, kokonaistyyppi- ja ammoniumpitoisuus kuin Tiginin ym. (2016) testaamassa mädätteessä, joten nämä ominaisuudet voivat selittää vaihtelevat tulokset (taulukko 4). Haitta-aineiden pitoisuuksia ei tutkimuksissa analysoitu.

Taulukko 4. Eri tutkimuksissa saatujen *Vibrio fischeri* -toksisuustestien tulosten sekä mädätteiden ominaisuuksien vertailua.

	CityLoops	Tigini ym. 2016	Pivato ym. 2016
<i>Vibrio fischeri</i> -toksisuustesti			
Standardimenetelmä	ISO-21338	ISO-11348-3	ISO-11348-3
Näyte	Mädäte	Mädätteen vesiute	Mädätteen vesiute
EC50-arvo	0,05–27,97 %	1,66 %	Ei toksisuutta
Mädätteen ominaisuudet			
Mädätetty materiaali	Biojäte (biohiili)	Sianlanta	Lehmänlanta, vilja
pH	7,7–9,0	8,0	8,23
Johtokyky	2,3–41,7 mS/cm	27 mS/cm	1,65 mS/cm
COD	Ei analysoitu	17 600 mg/l	Ei analysoitu
Nitraatti NO ₃ ⁻ -N	< 0,5 mg/l (mädätteen 4–5)	229,5 mg/l	Ei analysoitu
Ammonium NH ₄ ⁺ -N	321–9240 mg/l	2 050 mg/l	935 mg/l
Kokonaistyyppi	2 190–10 040 mg/l	3 355 mg/l	72,2 mg/l
Fosfaatti	280–337 mg/l (mädätteen 4-5)	319 mg/l	62,6 mg/l (TP)

JOHTOPÄÄTÖKSET

Aliivibrio fischeri -toksisuustestillä testattiin koivupohjaisen biohiilen ja biojätteen mädätteen ekotoksisuutta. Biohiilen vesisuspensiossa ei havaittu toksisuutta, mutta mädätyksessä EC50-arvot olivat noin 0,01–28 prosenttia. Toksisuuden syytä ei aineiston perusteella voida varmasti arvioida, mutta kirjallisuuden perusteella toksisuuden aiheuttajia voivat olla esimerkiksi ammoniakki, haihtuvat orgaaniset yhdisteet, suolat tai raskasmetallit. Voimakas luminesenssin inhibitio havaittiin biokaasulaitokselta haetun mädätteen nestejakeessa, jossa myös oli näytteistä selvästi korkein johtokyky, ammonium- ja kokonaistyyppipitoisuus. Nämä tekijät näyttäisivät ainakin osaltaan selittävän korkeampaa toksisuutta sekä tässä tutkimuksessa että kirjallisuudessa.

Näytteiden välillä oli vaihtelua toksisuudessa, ja suurimmassa osassa näytteistä noin 0,2–2 prosentin laimennos ei aiheuttanut merkittävää inhiboivaa vaikutusta, vaan jopa stimuloi bakteerin valontuotantoa. Mädätteen annosteluun lannoitekäytössä onkin kiinnitettävä huomiota ja annostelun tulee olla riittävän alhainen akuuttien toksisuusvaikutusten välttämiseksi. Usein mädäte kompostoidaan, ja kompostin kypsyessä toksisuusvaikutukset voivat hävitä. Biohiili näytti laskevan mädätteiden toksisuutta hieman.

Tulosten varmistamiseksi toksiisuustestejä tulisi tehdä lisää eri eliölajeilla. CityLoops-hankkeessa tehtiin myös vihanneskrassilla kasvatuskokeita, joissa testatut kasvualustatuotteet sisälsivät mädätteen kuivajaetta.

LÄHTEET

Boluda, R., Roca-Pérez, L., Marimón, L., 2011. Soil plate bioassay: an effective method to determine ecotoxicological risks. *Chemosphere* 84, 1–8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.02.013>.

Da Ros, C., Libralato, G., Ghirardinia, A.V., Radaelli, M. & Cavinato, C. 2018. Assessing the potential phytotoxicity of digestate from winery wastes. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 150, 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.12.029>

Di Maria, F., Sordi, A., Cirulli, G., Gigliotti, G., Massaccesi, L., Cucina, M., 2014. Cotreatment of fruit and vegetable waste in sludge digesters. An analysis of the relationship among bio-methane generation, process stability and digestate phytotoxicity. *Waste Manag.* 34, 1603–1608. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.05.017>.

Domene, X., Enders, A., Hanley, K., Lehmann, J. 2015. Ecotoxicological characterization of biochars: Role of feedstock and pyrolysis temperature. *Science of the Total Environment* 512–513: 552–561.

Franchino, M., Tigini, V., Varese, G.C., Sartor, R.M., Bona, F. 2016. Microalgae treatment removes nutrients and reduces ecotoxicity of diluted piggery digestate. *Science of The Total Environment* 569–570, 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.100>

Kapanen, A. 2012. Ecotoxicity assessment of biodegradable plastics and sewage sludge in compost and in soil. Academic dissertation in Microbiology. VTT Technical Research Centre of Finland. ISBN 978-951-38-7466-7 (URL: <https://publications.vtt.fi/pdf/science/2012/S9.pdf>)

Malhotra, M., Aboudi, K., Pisharody, L., Singh, A., Banu, JR., Bhatia, SK., Varjani, S., Kumar, S., González-Fernández, C., Kumar, S., Singh, R., Tyagi, VK. 2022. Biorefinery of anaerobic digestate in a circular bioeconomy: Opportunities, challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 166, 112642. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112642>

Moinard, V., Redondi, C., Etiévant, V., Savoie, A., Duchene, D., Pelosi, C., Houot, S., Capowiez, Y. 2021. Short- and long-term impacts of anaerobic digestate spreading on earthworms in cropped soils. *Applied Soil Ecology* 168, 104149. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104149>

Natalio, A., Back, M., Richards, A., Jeffery, S. 2021. The effects of saline toxicity and food-based AD digestate on the earthworm *Allolobophora chlorotica*. *Geoderma* 383. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115111>

Nkoa, R. 2014. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 473–492. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0196-z>

Parvez, S., Venkataraman, C. & Mukherji, S. 2006. A review on advantages of implementing luminescence inhibition test (*Vibrio fischeri*) for acute toxicity prediction of chemicals. *Environment International* 32: 265–268.

Pivato, A., Vanin, S., Raga, R., Lavagnolo, M., Barausse, A., Rieple, A., Alexis Laurent, A., Cossu, R. 2016. Use of digestate from a decentralized on-farm biogas plant as fertilizer in soils: An ecotoxicological study for future indicators in risk and life cycle assessment. *Waste Management* 49, 378–389. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.009>

Różyło, K., Oleszczuk, P., Joško, I., Kraska, P., Kwiecińska-Poppe, E., Andruszczak, S., 2015. An ecotoxicological evaluation of soil fertilized with biogas residues or mining waste. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 22, 7833–7842. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-014-3927-z>.

SFS-EN ISO 11348-3 Water quality. Determination of the inhibitory effect of water samples on the light emission of *Vibrio fischeri* (Luminescent bacteria test). Part 3: Method using freeze-dried bacteria (ISO 11348-3:2007). Suomen Standardoimisliitto SFS.

SFS-ISO 21338 Veden laatu. Kineettinen määrittäminen sedimentin, muiden kiinteiden aineiden ja värikköiden näytteen otosta *Vibrio fischeri* valon tuotantoon (kineettinen valobakteeritest). Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

Tigini, V., Franchino, M., Bona, F., Varese, G.C. 2016. Is digestate safe? A study on its ecotoxicity and environmental risk on a pig manure. *Science of the Total Environment* 551–552: 127–132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.004>

FOSFORIN TALTEENOTTO MÄDÄTTEEN NESTEJAKEESTA ELEKTROKEMIALLISELLA MENETELMÄLLÄ

Janne Junninen & Leena Pekurinen

Fosfori on kaikelle elämälle välttämätön mineraali. Sitä esiintyy luonnossa fosfaattikivessä ja vesistöjen sedimenteissä. Maailman fosforivarannot ovat rajalliset, ja kierrättämällä fosforia voidaan sen riittävyys taata. CityLoops-hankkeessa kiinnostuksen kohteena oli erityisesti fosforin saostaminen mädätteestä struviittina elektrokemiallisesti.

Suurin osa fosforista louhitaan fosfaattikivestä. Lannoitteiden raaka-aineeksi päätyy 90 prosenttia louhitusta kivennäisfosforista. Vuonna 2016 maailman fosforia louhittiin 261 miljoonaa tonnia. Fosforivarantojen riittävydestä tehdyt arviot vaihtelevat 60 vuodesta 1 500 vuoteen. Yleisimmät arviot ovat satoja vuosia. Vaihteluväli on suuri, koska fosforivarantojen suuruudesta ei ole varmuutta eikä tulevaisuuden fosforintarpeita ole pystytty ennustamaan tarkasti. Vesistöön joutuessaan fosfori aiheuttaa rehevöitymistä. Kierrättämällä louhittua fosforia voidaan neitseellisen fosforin tarvetta vähentää eivätkä vesiekosysteemit joudu niin suuren rasituksen kohteiksi. (Berninger ym. 2017, 2–4)

Suomessa fosforilannoitteita on käytetty 1900-luvun aikana niin, että peltojen fosforipitoisuus on suurempi kuin mitä se luonnollisesti olisi. Nykyään fosforin käyttöä on vähennetty, etenkin kun on huomattu, että liika fosforilannoitus ei lisää satoa. Kierrätysfosforin osuus lannoitteissa on reilu puolet (53 %). (Berninger ym. 2017, 6–8)

Luonnonvarakeskuksen arvion mukaan lannassa, jätevesilietteessä sekä yhdyskuntien ja teollisuuden biojätteissä on tarpeeksi fosforia kattamaan koko Suomen fosforilannoituksen tarpeen (Huhtakangas 2022). Viime aikoina on alettu tutkia, miten fosforia voitaisiin ottaa talteen struviittina. Näin fosforia kierrättämällä voidaan säästää maapallon fosfaattivarantoja ja samalla vähentää kuormitusta ympäristöön. Fosforin kierrättämistä on hidastanut esimerkiksi louhittavan fosfaattikiven edullinen hinta. Struviitilla ei myöskään ole vielä vakiintuneita markkinoita, ja sen tuotannossa käytettävien kemikaalien kustannukset nostavat struviitin hintaa. Hintaan vaikuttavat struviitin kovuus, puhtaus ja kidekoko. Myöskään mielikuva jäteperäisestä struviitista ei ole eduksi. (Sääluoto s.a., 2)

STRUVIITTI

Struviitti (magnesium ammonium phosphate, MAP) on kiteinen lannoite, jossa on fosfaattia, ammoniumtyyppiä ja magnesiumia. Struviitin muodostuminen edellyttää sopivia ympäristön olosuhteita. Kolme tärkeintä tekijää ovat pH ja lämpötila sekä fosforin, ammoniumtyypen ja magnesiumin moolisuhteet liuoksessa. Struviitin kiteytyminen tapahtuu emäksisissä olosuhteissa. Happamissa olosuhteissa ja pH:n ollessa yli kymmenen se liukenee. (Sääluoto s.a., 1–2)

Struviitin tärkeimmät mineraalit ovat typpi (N) ja fosfori (P). Kaupallisessa mielessä struviittia voidaan käyttää esimerkiksi lannoitteena, rakennusmateriaalina tai adsorbenttina. Talteen otetun struviitin käytöstä on tällä hetkellä vain vähän tutkimuksia, joista suurin osa keskittyy lannoitekäyttöön. Kirjallisuudessa on esitetty useita tutkimustuloksia, joiden mukaan struviitti on lannoitteena huomattavasti parempi kuin kaupalliset lannoitteet. Talteen otettu struviitti sisältää useimmiten vähemmän raskasmetalleja kuin kaupalliset lannoitteet. (Li ym. 2018, 1248–1249, 1251)

Struviitin puhtaus voi olla jopa 90–98 prosenttia. Korkeaan puhtausasteeseen voidaan päästä kontrolloimalla magnesiumin määrää ja pitämällä pH mahdollisimman alhaisena. Korkeampi typpi- ja magnesiumipitoisuus edistävät puhtaan struviitin muodostusta. Struviitin kidekokovaatimukset riippuvat siitä, mihin struviittia käytetään. Erilaisissa tutkimuksissa ja kirjallisuuslähteissä struviittikiteiden koko vaihtelee 0,25 µm:stä 7 mm:iin. Lannoitteena käytettäessä suositetaan suurempaa kokoa käsittelyn, kuljetuksen ja levittämisen helpottamiseksi. Toisaalta suurikokoisesta struviitista lannoitteet vapautuvat hitaammin. Pienikokoisia struviittikiteitä voidaan käyttää edistämään ammoniakkin poistamista jätevedestä. (Li ym. 2018, 1250)

FOSFORIN TALTEENOTTO

Fosforin talteenottomenetelmiä on useita, mutta yleensä niissä käytetään saostus-, kiteytys-, märkäkemiallisia tai lämpökemiallisia menetelmiä. Monet tekniikoista ovat vasta kehitteillä, mutta jotkut ovat edenneet pilottimittakaavan testausvaiheeseen ja jopa täysmittakaavan toimintaan. Hinta ja prosessin monimutkaisuus voivat vaikuttaa siihen, kuinka laajalle tekniikat etenevät. Biokaasuprosessissa syntyvästä mädätteestä poistetaan ylimääräinen vesi ennen seuraavaa käsittelyä. Tämä rejektivesi sisältää usein runsaasti fosforia. Menetelmiä fosforin talteen ottamiseksi ovat muun muassa Anphos, Phospaq, Phosnix ja Ostara Pearl. Menetelmät soveltuvat vain biologiseen lietteeseen. Osa niistä kiteyttää fosforin ja ammoniumin struviitiksi, kun veteen lisätään magnesiumia. (Pihl 2017, 12–13)

FOSFAATIN ELEKTROKEMIALLINEN SAOSTUS

CityLoops-hankkeen Mikkelin demonstraatioissa tutkittiin ja testattiin elektrokemiallista struviitin saostusta, jossa fosforin saostaminen struviitiksi tapahtuu ilman erikseen lisättäviä kemikaaleja. Menetelmä on tässä tarkoituksessa uusi, ja tietoa fosforin saostamisesta struviitiksi elektrokemiallisella menetelmällä on vielä melko vähän saatavilla.

Elektrokemiallisessa menetelmässä periaatteena on struviitin kerrostaminen katodille sähkökemiallisen reaktion kautta. Prosessissa struviitti kerrostuu katodille magnesium-, ammonium- ja fosfaatti-ioneja sisältävästä liuoksesta. Prosessin aikana katodilla tapahtuu sähkökemiallinen veden tai hapen pelkistys muodostaen hydroksidi-ioneja. Samalla vapautuu vetykaasua (H_2). Reaktio nostaa pH:n katodin läheisyydessä alkaliselle alueelle ja johtaa nopeaan struviitin saostumiseen. Vedyn samanaikainen tuotanto on etu, koska vedyn talteenotto muihin käyttötarkoituksiin voisi kompensoida prosessiin liittyvät käyttökustannukset. Haittapuolena on, että struviitin sähkökemiallinen saostus tarvitsee energiaa kehittääkseen vaaditun potentiaalin veden pelkistämiseen. Sähkökemiallisella menetelmällä saadun struviitin puhtausaste voi olla jopa 97 prosenttia ja fosforin talteenottotehokkuus jopa 96 prosenttia. (Kataki ym. 2016, 449–450) Elektrokemiallisen struviitin saostuksessa optimaaliset olosuhteet riippuvat monesta tekijästä, ja niitä tavoiteltaessa on huomioitava käytetyn raaka-aineen koostumus ja ominaisuudet sekä käytettävän elektrolyysikennon rakenne. Erilaisilla elektrodeilla ja materiaaleilla optimaalinen pH, virranvoimakkuus ja saostusaika vaihtelevat.

ELEKTROKEMIALLISEN MENETELMÄN KEHITYS MÄDÄTTEEN NESTEJAKEELLE

CityLoops-hankkeessa testattiin laboratoriomittakaavassa fosforin talteenottoa biokaasulaitoksen mädätteen erotellusta nestejakeesta elektrokemiallisella menetelmällä. Menetelmällä tutkittiin, kuinka mädätteen nestemäiseen fraktioon vapautunut fosfori voidaan poistaa tuottamalla struviittia.

Laboratoriokokeet koostuivat menetelmän kehityksestä ja testauksesta. Biojätteen mädätteen nestejakeelle jouduttiin testaamaan useita eri esikäsittelyvaiheita ennen kuin struviitin saostus onnistui. Nestejake oli biokaasulaitoksen biojätteen mädätteestä eroteltua nestejakeita. Elektrokemiallisen saostuksen lopputuotteena syntyneistä struviittikiteistä teetettiin SEM-kuvat (Scanning Electron Microscope) ja alkuaineanalyysyjä. Seuraavissa luvuissa on kuvattu menetelmän kehitykseen liittyvät vaiheet, lopullinen onnistunut elektrokemiallinen struviitin saostusprosessi sekä struviittikiteiden analyysitulokset.

LAITTEISTON TOIMIVUUS

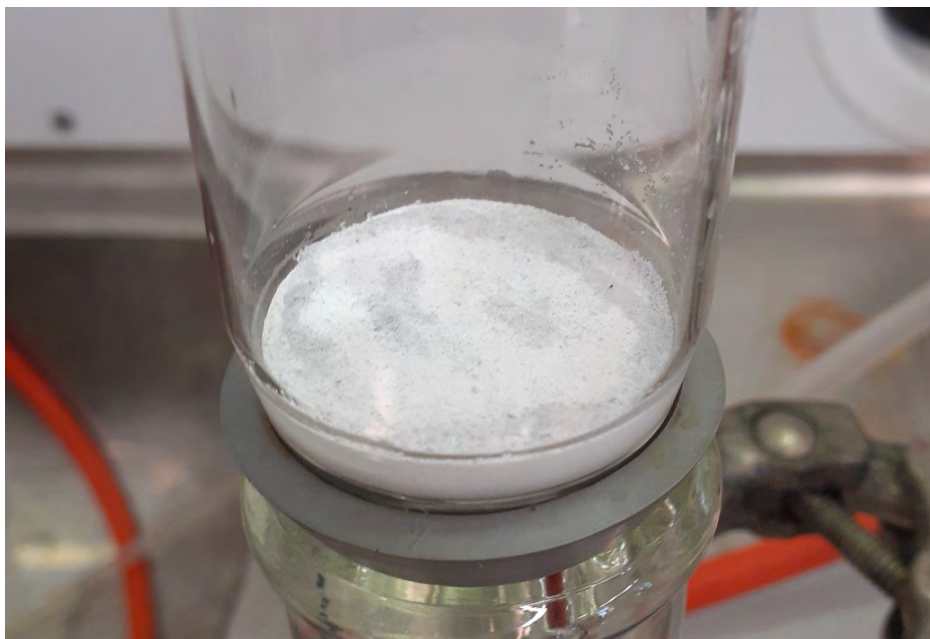
Työ aloitettiin varmistamalla elektrolyysilaitteiston toimivuus ja analyysimenetelmien soveltuvuus struviitin muodostumisen ja puhtauden seurantaan. Struviittia valmistettiin magnesiumia, fosfaattia ja ammoniumia sisältävistä reagensseista. Vaaleaa sakkaa saatiin muodostumaan dekantteriin. Sakka analysoitiin spektrofotometrisesti ja alkuaineanalysaattorilla. Analyysien tulokset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Reagenssimagnesiumista kiteytetyn struviitin analyysitulokset

	Mitattu	Teoreettinen	Oikeellisuus
N	5,19 m-%	5,71 m-%	90,9 %
PO ₄	3,15 mg/l	3,33 mg/l	94,6 %

Vertailtaessa analyysituloksia struviitin teoreettisiin arvoihin todettiin, että tulokset olivat lähellä oletettuja arvoja ja sakka sisälsi typpeä ja fosforia moolisuhteella 1:1. Analyysimenetelmillä voitiin osoittaa struviitin muodostuminen ja arvioida muodostuneen struviitin puhtautta.

Seuraavaksi kokeiltiin elektrolyysilaitteiston kykyä saostaa struviittia sähkövirran ja magnesiumielektrodin avulla. Dekantteriin valmistettiin liuos, joka sisälsi ammoniumia ja fosfaattia. Liuokseen asetettiin kaksi elektrodia: magnesiumielektrodi (+) ja hiilielektrodi (-). Elektrodit yhdistettiin virtalähteeseen ja virtalähteeseen säädettiin 0,2 A:n virta. Liuokseen alkoi muodostua valkeaa jauhetta. pH-mittarilla tarkastettu pH oli noin 8–8,5. Elektrolyysin annettiin jatkua noin 20 minuuttia rauhallisesti sekoittaen, minkä jälkeen dekantterin pohjalle oli muodostunut selkeä valkoinen sakka, joka sisälsi epäpuhtautena pieniä harmaita hiukkasia. Sakka suodatettiin imusuodatuksella (kuva 1), pestiin pienellä määrällä vettä ja kuivattiin eksikaattorissa.



Kuva 1. Imusuodatettu sakka (kuva Janne Junninen).

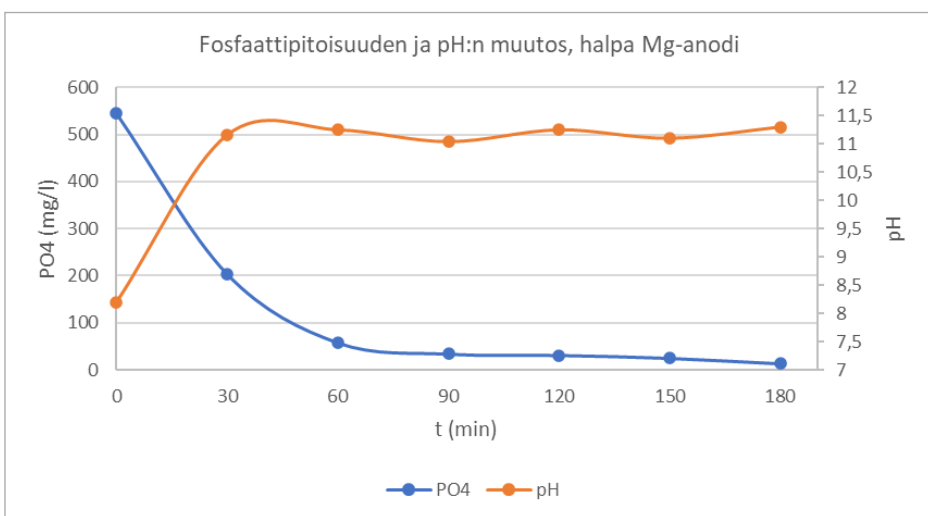
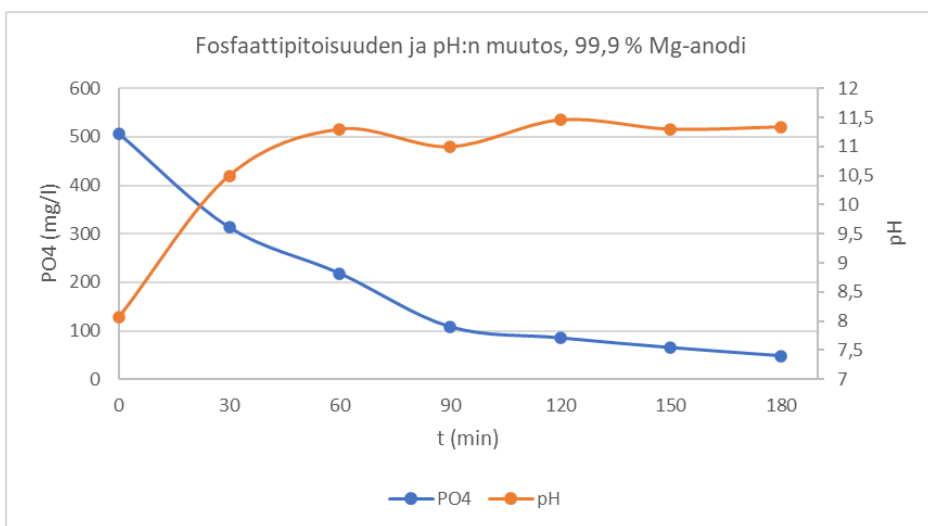
Eksikaattorissa kuivatusta sakasta analysoitiin tyyppi alkuaineanalyyssaattorilla ja fosfaatti spektrofotometrisesti. Tulokset on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Elektrolyytisesti valmistetun struviitin testierän analyysitulokset.

	Mitattu	Teoreettinen	Oikeellisuus
N	4,62 m-%	5,71 m-%	80,9 %
PO ₄	5,04 mg/l	4,57 mg/l	110,4 %

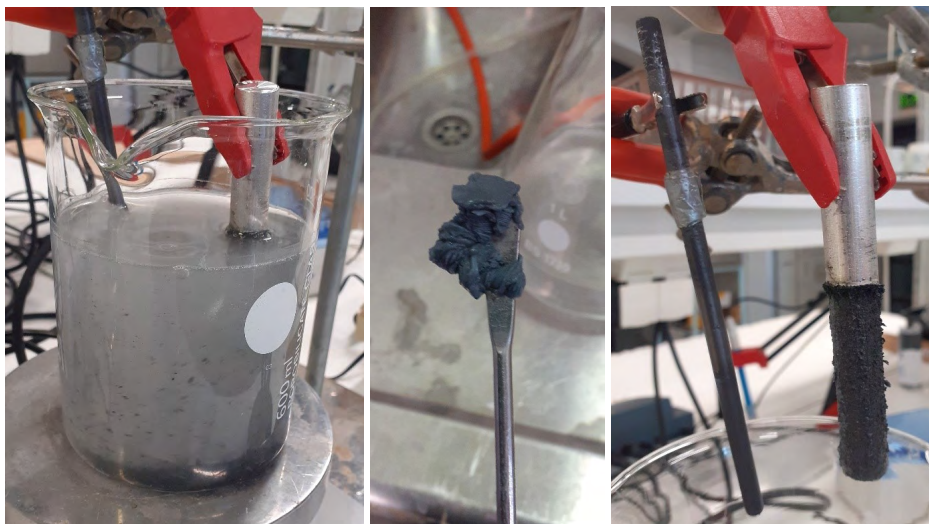
Laitteisto todettiin toimivaksi ja sillä pystyttiin saostamaan struviittia vesiliuoksesta. Kun laitteisto oli todettu toimivaksi, tutkittiin laitteiston fosfaatin poistokykyä tunnetun fosfaattipitoisuuden synteettisestä liuoksesta, koska bioreaktorin mädätteen nestefraktion analyysitulosten mukaan fosfori on struviitin muodostuksen rajoittava tekijä nestefraktiossa. Fosfaatin poistoa testattiin kahdella eri magnesiumanodilla: 99,9-prosenttisesta magnesiumista koostuvalla anodilla ja lämminvesivaraajan uhrianodiksi tarkoitettulla halvalla rautakaupan anodilla. Molempien anodien testaus suoritettiin samalla tavalla.

Valmistettiin tunnetun pitoisuuden liuos, jossa oli fosfaattia ja ammoniumia moolisuhteella 1:2. Liuokselle suoritettiin elektrolyysi kolmen tunnin ajan. Seurattiin pH:n ja fosfaattipitoisuuden muutosta. Tulokset on esitetty kuvissa 2a-b.



Kuva 2a-b. Fosfaattipitoisuuden ja pH:n muutokset kolmen tunnin aikana.

Kokeen alussa pH oli optimaalisella alueella struviitin muodostumiselle, ja valkoista sakkaa alkoi muodostua heti virransyötön alettua. pH nousi kuitenkin nopeasti yli yhteentoista. Fosfaatti katosi liuoksesta kolmen tunnin aikana tehokkaasti, ja puhtaalla Mg-anodilla saavutettiin 90,6 prosentin ja halvalla anodilla 97,6 prosentin poistoaste. Liuoksen fosfaattipitoisuuden vähetessä ja pH:n noustessa alkoi muodostua myös tummanharmaata sakkaa. Tämä voitiin havaita puhtaan Mg-anodin tapauksessa jo puolessa tunnissa selkeästi, rautakauppa-anodin tapauksessa hieman myöhemmin. Kolmen tunnin elektrolyyysin jälkeen suodatettu sakka oli savimaista, harmaata ja erittäin hienojakoista (kuva 3). Anodin pintaan kertynyt sakkauma muuttui kuivuuksaan valkoiseksi.



Kuva 3. Elektrolyysi 99,9-prosenttisella Mg-anodilla: tummanharmaata sakkaa muodostuu elektrolyysin kestäessä pidempään. Suodatettu sakka on harmaata ja savimaista. Anodille kertynyt sakkauma. (kuvat Janne Junninen)

Harmaa sakka suodatettiin ja pestiin pienellä määrällä vettä. Sakan annettiin kuivua eksikaattorissa, jolloin se muodosti kovia kokkareita, joissa erottui vaaleita pisteitä (kuva 4). Sakka homogenoitiin ja siitä otettiin näyte alkuaineanalyysiin sekä fosfaatin mittaukseen. Sakan analyysitulokset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Harmaan sakan analyysitulokset.

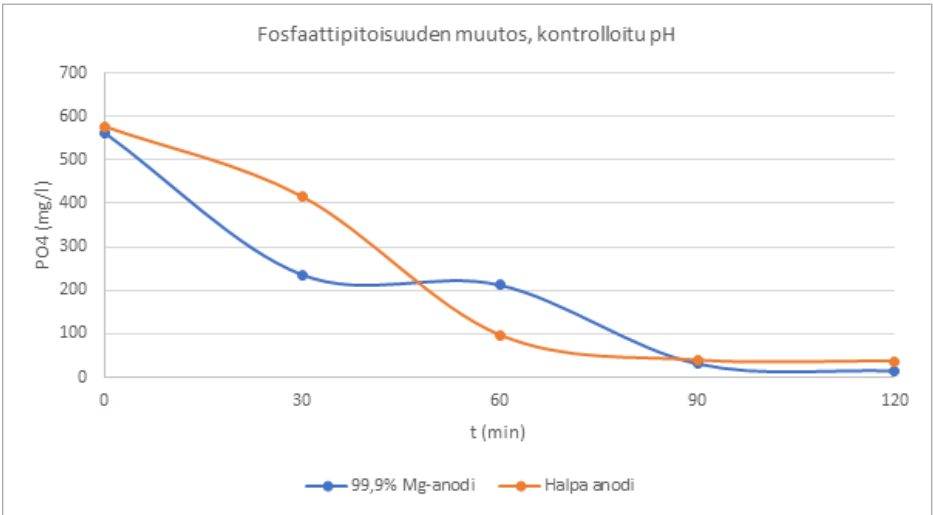
	Mitattu	Teoreettinen	Oikeellisuus
N	0,47 m-%	5,71 m-%	8,2 %
PO ₄	1,57 mg/l	4,76 mg/l	33,0 %



Kuva 4. Kuivattu harmaa sakka, jossa näkyvissä valkoisia kiteitä (kuva Janne Junninen).

Liuksesta poistui fosfaattia tehokkaasti, mutta muodostunut sakka ei ollut struviittia. Oletettavasti tumma sakka sisälsi muun muassa magnesiumhydroksidia ja magnesiumfosfaattia, joiden muodostuminen on mahdollista, kun liuoksen pH on riittävän korkea ja Mg^{2+} -konsentraatio kasvaa. Struviitin muodostamiseksi on kontrolloitava pH:ta hapolla liuoksessa, joka ei sisällä riittävää puskurointikapasiteettia.

Koe uusittiin. Uusintakokeessa kontrolloitiin pH:ta siten, että pH pysyi elektrolyysin ajan välillä 8–9. Lisäksi koeliuoksen sähkönjohtavuutta säädettiin vastaamaan paremmin nestejakeen todellisia olosuhteita. Fosfaattipitoisuuden muutosta seurattiin kaksi tuntia elektrolyysin aikana. Fosfaattipitoisuuden muutokset on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Fosfaattipitoisuuden muutos, laitteiston toimivuuden testaus nestejaetta kuvaavilla olosuhteilla kontrolloidussa pH:ssa.

Elektrolyysilaitteisto poisti tehokkaasti fosfaattia. Pienemmissä pitoisuuksissa nähtiin selkeästi, miten fosfaatin poistonopeus hidastui. Muodostunut valkoinen sakka imusuodattettiin ja kuivattiin ja siitä mitattiin fosfaatti spektrofotometrisesti ja typpi alkuaineanalysaattorilla. Tulokset on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Kontrolloidun pH:n elektrolyysin tulokset.

	Mitattu	Teoreettinen	Oikeellisuus
N	4,97 m-%	5,71 m-%	87,0 %
PO ₄	4,86 mg/l	4,57 mg/l	106,3 %

Todettiin, että laitteisto poisti fosfaattia liuoksesta struviittina. Havaittiin, että pH:n kontrollointi on oleellista saostuvan lopputuotteen puhtauden kannalta ja pH:n noustessa yli kymmenen tuotteen puhtaus kärsii.

KOKEET NESTEJAKEELLA

Kokeita varten haettiin biojalostamon biojätämädätteen nestejaetta. Mädätteen nestejakeen koostumus on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Mädätteen nestejakeen koostumus.

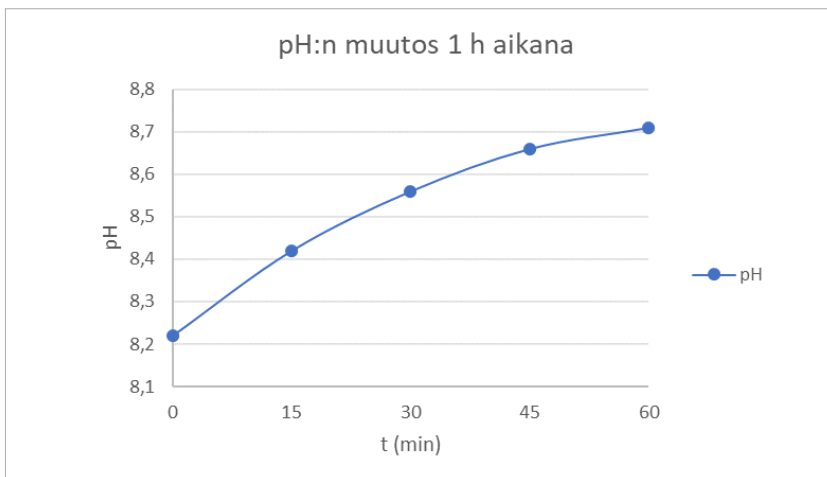
	Yksikkö	Nestejake
Ammonium	mg/kg k.a.	109 000
Ammoniumtyppi	mg/kg k.a.	84 300
Nitriitti	mg/kg k.a.	<0,050
Nitraattityppi	mg/kg k.a.	<0,020
Nitraatti	mg/kg k.a.	<20
Nitriittityppi	mg/kg k.a.	<4,0
kok. N	mg/kg k.a.	123 000
kok. N	mg/L	4 020
kok. P	mg/kg k.a.	6 460
Liukoinen fosfori	mg/L	71,1
C/N suhde		2,96
Palavat yhdisteet	% k.a.	73,1
Sähkönjohtavuus	mS/m	4 880
Kuiva-aine 105 °C	%	5,54
Orgaaninen kuivapaino	% k.a.	73,1
pH (H ₂ O)		8,3

Mädäte oli hyvin viskoottista ja tummaa. Ensimmäistä elektrolyysikoetta varten nestejaetta laimennettiin suhteella 1:4. Laimennetulle nestejakeelle suoritettiin elektrolyysi yhden tunnin ajan (kuva 6) käyttäen rautakauppaelektrodia ja seurattiin pH:n muutosta.



Kuva 6. Nestejakeen elektrolyysi (kuva Janne Junninen).

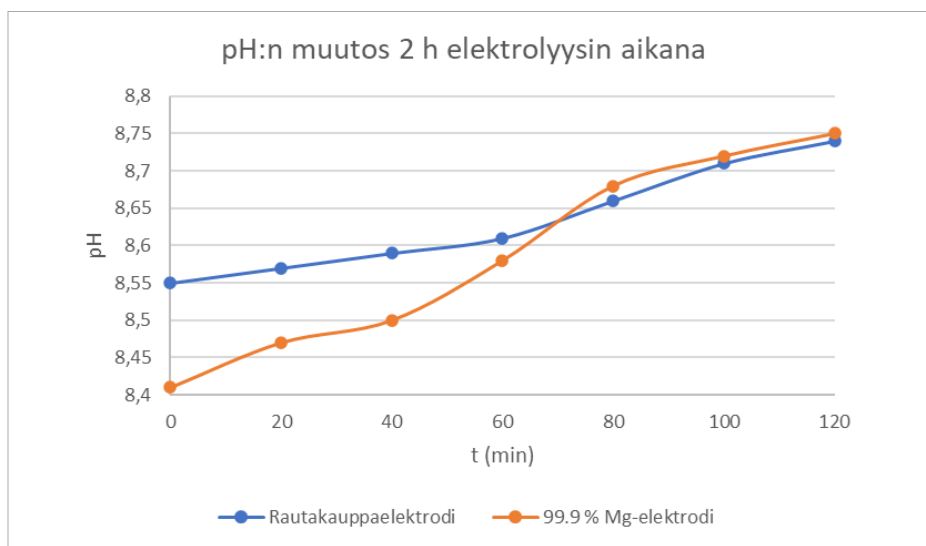
pH:n muutos oli huomattavasti maltillisempi kuin synteettisen liuoksen muutos. Tunnissa nestefraktion pH muuttui 0,49 yksikköä (kuva 7), kun vastaavasti synteettisen liuoksen pH muuttui tunnissa keskimäärin 3,15 yksikköä.



Kuva 7. Nestefraktion elektrolyysi, pH:n muutos yhden tunnin aikana.

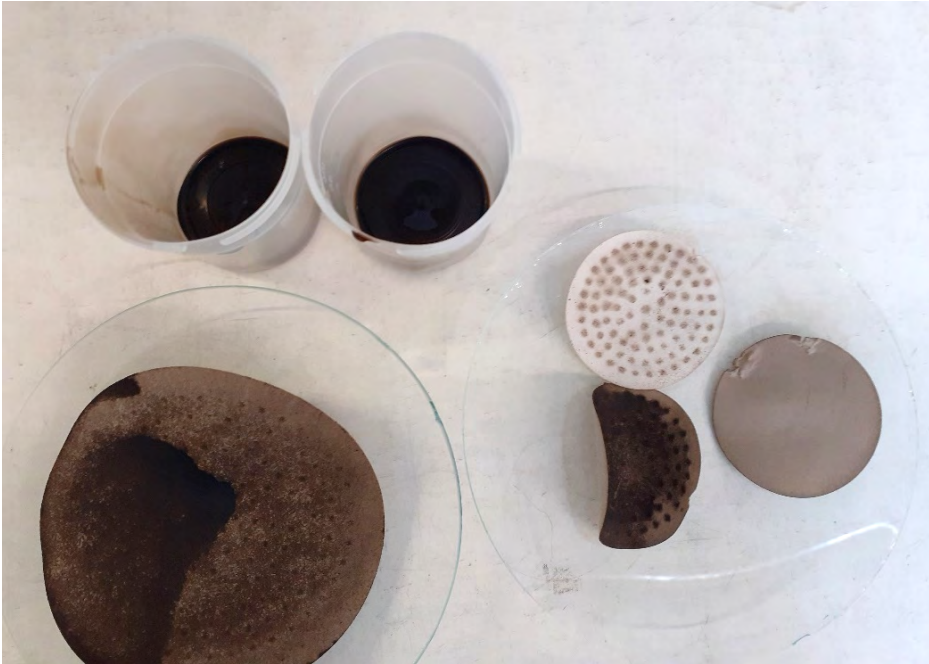
pH:n muutosnopeus nestefraktiossa oli kuusi kertaa hitaampaa tunnin aikana verrattuna synteettiseen liuokseen. Tunnin elektrolyysin jälkeen liuosta yritettiin suodattaa, mutta se osoittautui mahdottomaksi nestefraktion sisältämän erittäin hienojakoisen aineksen takia. Kokeiltiin esikäsitellä nestefraktio ennen elektrolyysiä sentrifugilla, 4 000 rpm viiden minuutin ajan, minkä jälkeen liuos dekantointiin ja suodatettiin Whatman 41 (20–25 µm) -suodatinpaperin läpi.

Fuugatulle ja suodatetulle nestejakeelle suoritettiin elektrolyysi kahden tunnin ajan käyttäen sekä rautakauppa- että puhdasta Mg-elektrodiä. Seurattiin liuoksen pH:n muutosta (kuva 8).



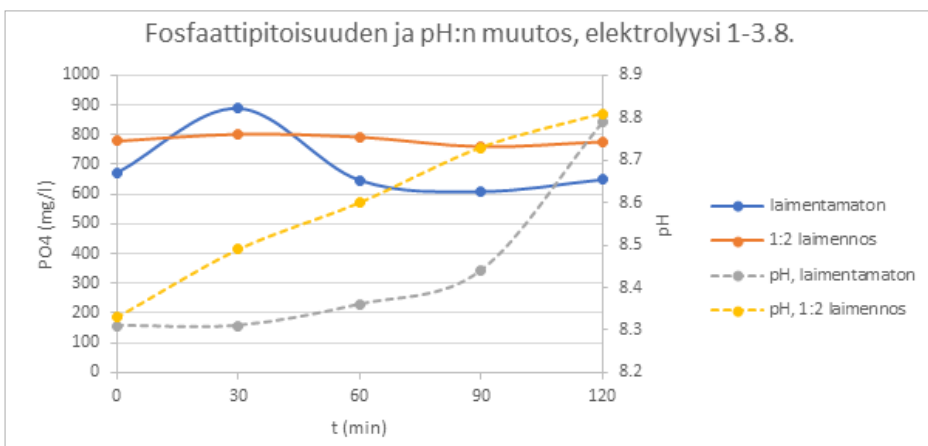
Kuva 8. Suodatetun nestefraktion elektrolyysi, pH:n muutos kahden tunnin aikana.

Laimentamattoman, suodatetun nestefraktion sähkönjohtavuus on suuri, 37,9 mS/cm (rautakauppaelektrodiliuos) ja 41,1 (puhdas Mg-elektrodi). 200 mA:n virta saavutettiin 0,9–1,1 V:n jännitteellä (rautakauppaelektrodi) ja 1,3–2,1 V:n jännitteellä (puhdas Mg-elektrodi). pH nousi hitaammin kuin laimennetussa näytteessä ja pysyi koko kahden tunnin ajan struviitin muodostumiselle sopivalla alueella. Esikäsitelystä huolimatta liuosten suodatus ei onnistunut, eikä selkeästi havaittavaa kidemäistä sakkaa näkynyt kummassakaan liuoksessa (kuva 9).



Kuva 9. Sentrifugoinnin jäännös kuppien pohjalla, suodatinpapereita (kuva Janne Junninen).

Seurattiin suodattamattoman nestejakeen fosfaattipitoisuuden ja pH:n muutosta kahden tunnin elektrolyysin ajan käyttäen puhdasta Mg-elektrodia. Toinen elektrolyysikoe tehtiin 1:2 laimennetulle nestejakeelle. Laimentamattoman nestejakeen elektrolyysin alussa jännite oli 0,3 V ja virta 0,2 A. 1:2 laimennetun nestejakeen elektrolyysin alussa jännite oli 2,1 V ja virta 0,2 A. Mittaustulokset on esitetty kuvassa 10.



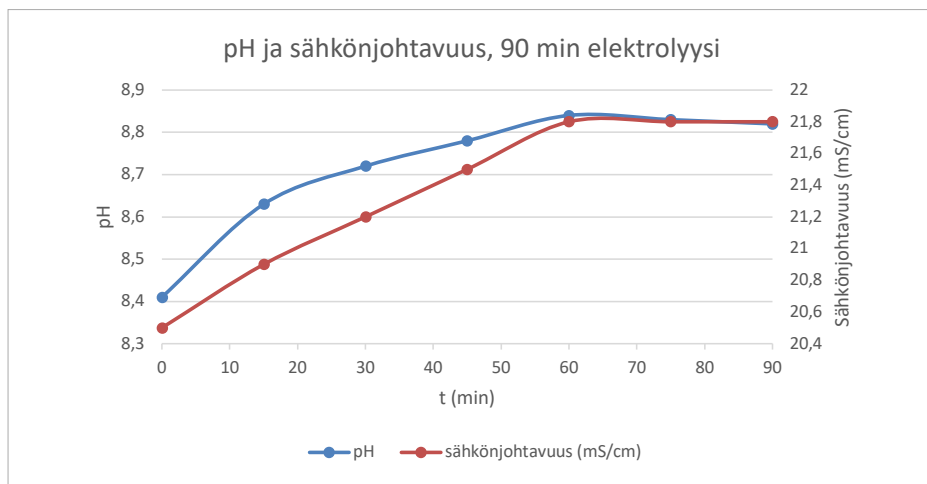
Kuva 10. Fosfaattipitoisuuden ja pH:n muutos, laimentamaton ja 1:2 laimennettu nestejake.

Laimentamattoman nestejakeen 30 minuutin näytteenotossa tapahtui virhe, josta johtuen kyseisen pisteen mitattu pitoisuus oli suurempi kuin oletettu. Mittauksissa ei havaittu selkeää fosfaattipitoisuuden pienenemistä. pH pysytteli koko elektrolyysin ajan struviitin muodostumiselle otollisella alueella. Suodattaminen ei edelleenkään onnistunut kunnolla.

Tehostettiin nestefraktion esikäsitelyä, kokeiltiin esikäsitelymetodina fuugaus- ja suodatussarjaa:

- sentrifugi, 5 min 4 000 rpm
- suodatus, huokoskoko 20–25 μm
- sentrifugi, 5 min 4 000 rpm
- suodatus, huokoskoko 20–25 μm
- suodatus, huokoskoko 8 μm
- sentrifugi, 5 min 4 000 rpm
- suodatus, huokoskoko 2,5 μm .

Fuugaus- ja suodatussarjan jälkeen tehtiin 90 minuutin elektrolyysi näytteelle, joka sisälsi 200 ml nestejakea + 200 ml vettä. Käytettiin 99,9-prosenttista Mg-anodia. Virraksi asetettiin 0,2 A, lähtöjännite oli 2,2 V. Lopussa jännite oli 6,6 V. Mittaustulokset on esitetty kuvassa 11.

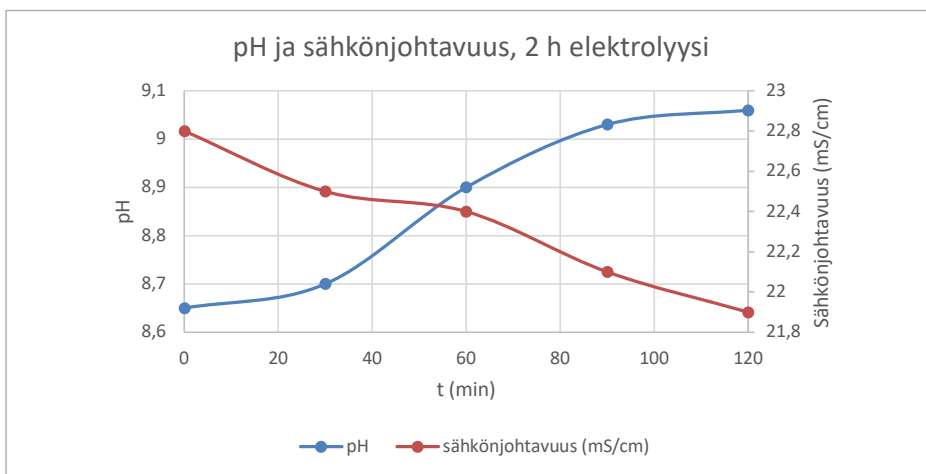


Kuva 11. Fuugaus- ja suodatussarjan mittaustulokset 90 minuutin elektrolyysin jälkeen.

Suodattaminen oli edelleen hankalaa. Suodatettaessa arveltiin, että papereilla olisi näkyvissä mahdollisesti vähän valkeaa sakkaa, jota oli vaikeaa saada erilleen. Koetettiin uudelleenkiteytystä eli kerättiin suodatinpaperit (8 kpl) dekkään, lisättiin vettä, säädettiin pH HCl:llä noin viiteen, sekoitettiin, suodatettiin, säädettiin suodoksen pH NaOH:lla noin 8,5:een (uudelleenkiteytys), minkä jälkeen tehtiin uusi suodatus. Sakkaa ei havaittu. Nestejakeen

käsittely elektrolyysin jälkeen on hyvin vaikeaa, mikäli suodatus ei onnistu. Uudelleenki-
teytys useista suodatinpapereista on työläs ja tehoton eikä toimi halutulla tavalla. Metodi
vaatii nestejakeen esikäsittelyä siten, että elektrolyysin jälkeen on mahdollista suodattaa
nestejake kunnolla. Tällöin hukataan mahdollisimman vähän struviittia jatkokäsittelyssä.
Mahdollista on esimerkiksi fuugaus- ja vetyperoksidikäsittely, jolla mahdollisesti päästäisiin
eroon hyvin pienistä orgaanisista partikkeleista vaikuttamatta ammonium- tai fosfaattipi-
toisuuksiin. Peroksidikäsittely saattaa tosin pelkistää ammoniumia nitraatiksi.

Kokeiltiin nestejakeen esikäsittelyä ultraäänihaudetta käyttäen. Fuugattiin nestejakea (4
000 rpm, 5 min), minkä jälkeen se dekantoiitiin ja suodatettiin 20–25 µm suodattimen
läpi. Suodatettu nestejake laitettiin ultraäänihauteseen (FinnSonic m03) 30 minuutin
ajaksi. Ultraäänikäsittelyn jälkeen nestejakeelle suoritettiin uusi fuugaus, minkä jälkeen
se suodatettiin 2,0 µm paperin läpi. Suodatus oli erittäin hidas. Suodoksesta tehtiin 1:2
laimennos. Laimennokselle tehtiin elektrolyysi 120 minuutin ajan 0,2 ampeerin virralla
ja 2,1 voltin lähtöjännitteellä käyttäen puhdasta Mg-anodia. Lopetuksessa jännite oli 4,4
V. Elektrolyysin aikana seurattiin pH:n ja sähkönjohtavuuden muutosta. Mittaustulokset
on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. pH:n ja sähkönjohtavuuden muutos kahden tunnin elektrolyysin aikana.

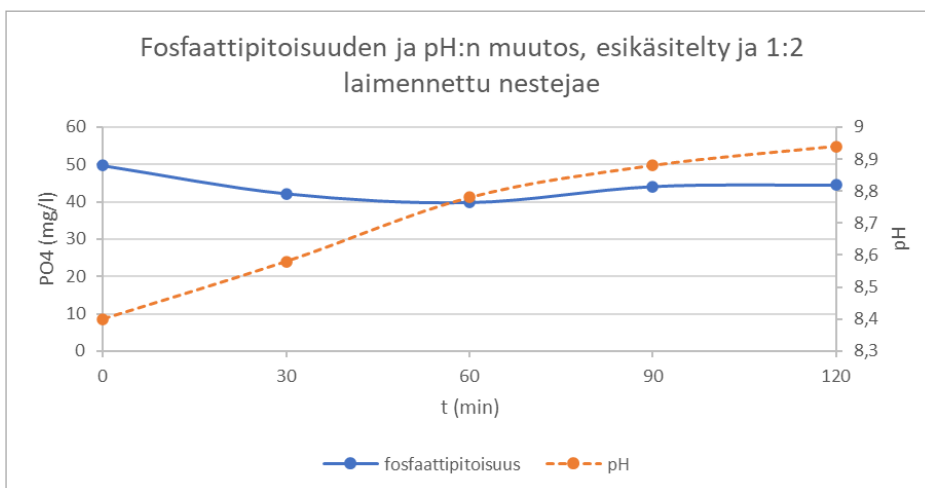
Suodattaminen ei edelleenkään onnistunut kunnolla. Kokeiltiin peroksidikäsittelyä sekä
elektrolyysissä käyneelle että elektrolysoimattomalle (mutta suodatetulle ja UÄ-käsitellylle)
liuokselle. Peroksidikäsittelyn jälkeen se nestejake, jota ei ollut elektrolysoitu, fuugattiin.
Liuoksen väri muuttui mustasta ruskeaksi. Peroksidi vaahdotti nestettä rajusti (kuva 13).



Kuva 13. Nestejakeeseen on lisätty vetyperoksidia (kuva Janne Junninen).

Suodattaminen sujui hieman paremmin elektrolysoidulle liuokselle peroksidikäsitteilyn jälkeen, mutta mitään sakkaa ei näkynyt. Elektrolysoimattoman, peroksidikäsitellyn ja fuugatun liuoksen suodatus sujui hyvin. Kun lisättiin koemielessä spaattelin kärjellinen magnesiumkloridia, näkyvää sakkaa ei muodostunut. Liuos kupli hieman edelleen useita tunteja peroksidin lisäämisen jälkeen. Pienempi määrä peroksidia olisi varmasti riittänyt.

Tehtiin koe, jossa yhdistettiin esikäsitelyssä ultraäänihaude ja peroksidikäsitely. Nestejaetta fuugattiin (4 000 rpm, 5 min), minkä jälkeen sitä käsiteltiin ultraäänihauhteessa yhden tunnin ajan. Nestejae laimennettiin suhteella 1:2 siten, että lopullinen tilavuus oli 400 ml. Lisättiin 10 ml vetyperoksidia (30 %) ja sekoitettiin rauhallisesti noin kolmen tunnin ajan. Nestejae vaahtosoi voimakkaasti. Kolmen tunnin jälkeen käsitelty nestejae fuugattiin uudelleen (4 000 rpm, 5 min) ja suodatettiin 25 µm suodattimen läpi. Käsitellylle, suodatetulle nestejakeelle tehtiin elektrolyysi 120 minuutin ajan ja seurattiin fosfaattipitoisuuden ja pH:n muutosta 30 minuutin välein. Tulokset on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Esikäsitellyn nestejakeen fosfaattipitoisuuden ja pH:n muutos kahden tunnin elektrolyysin aikana.

Analyysitulosten mukaan saatavilla olevaa liukoista fosfaattia oli käsitellyssä jakeessa noin 50 mg/l. Fosfaatin määrä putosi ensimmäisen tunnin aikana noin 10 mg/l, mutta nousi sen jälkeen noin 4 mg/l seuraavan tunnin aikana ja vakiintui siihen. Tämä implikoisi, että struviittia saattaisi muodostua hieman, mutta määrä on hyvin pieni. Varsinkin kun ottaa huomioon, että suodattaminen on nestejakeen kiintoaineksen takia vaikeaa, ei järkevää määrää kiinteää struviittia todennäköisesti saada saostettua. Struviitin lisäksi myös muuta fosfaattia sitovaa ainetta on mahdollista saostua. Peroksidi- ja ultraäänikäsitteilyllä ei ollut sanottavaa vaikutusta.

Struviitin muodostumista nestejakeesta testattiin koeputkissa fosfaatti-, ammonium- ja magnesiumreagenssilisäyksillä. Koeputkiin laitettiin noin 5 ml fuugattua, käsittelemätöntä nestejakea sekä 1:50 ja 1:100 laimennettua, fuugattua ja peroksidikäsiteltyä nestejakea. Pelkällä Mg-lisäyksellä ei nähty missään koeputkessa selkeää sakan muodostusta. Lisättäessä ammoniumia ja magnesiumia ei nähty selkeää sakan muodostumista. Lisättäessä fosfaattia ja ammoniumia nähtiin haalean valkoista, haituvaista kiinteää ainesta, joka ei heti laskeutunut selkeästi putken pohjalle. Kyseessä oli todennäköisesti magnesiumfosfaatti. Lisättäessä magnesiumia, ammoniumia ja fosfaattia tässä järjestyksessä muodostui selkeä, vaalea, kidemäinen sakka, joka laskeutui koeputken pohjalle. Kyseessä oli todennäköisesti struviitti. Koeputkitestit implikoivat, että nestejakeessa ei välttämättä ole riittävästi käyttökelpoista fosfaattia ja ammoniumia eikä pelkkä magnesiumilisäys välttämättä riitä saostamaan struviittia. On todennäköistä, että nestejakeen sisältävät metallit ja kiintoaines estävät struviitin muodostumista.

Kokeiltiin nestejakeen käsittelyä rikkihapolla. Tehtiin seos, joka sisälsi suhteella 1:1:3 nestejakea, 4 M rikkihappoa ja vettä. Seosta sekoitettiin, fuugattiin ja suodatettiin 0,6 µm suodatinpaperin läpi. Suodoksesta analysoitiin fosfaatti. Analyysin mukaan fosfaattipitoisuus laimennetussa suodoksessa oli 86 mg/l. Näytettä pidettiin yön yli kylmiössä, minkä jälkeen pH nostettiin kuuteen. Liuoksen väri muuttui läpikuultavan ruskeasta mustaksi. Liuokselle tehtiin elektrolyysi 0,4 A:n virralla, joka nosti pH:n yhdeksään. Näkyvää sakkaa ei havaittu, ja elektrolyysin jälkeen suoritettun fosfaattianalyysin mukaan fosfaattia oli hävinnyt liuoksesta 5,7 prosenttia.

Näyte oli paremmin suodatuskelpoista ja hieman helpommin käsiteltävää. Nestejakeen uuttoja vahvemalla rikkihappouutolla voitaisiin kokeilla fosfaattipitoisuuden nostamiseksi, mutta se aiheuttaisi haasteita elektrolyysin kanssa. Mg-elektrodi syöpyy nopeasti väkeväm-
pään rikkihappoliuokseen, ja pH:n säätäminen reagensseilla ja elektrolyysillä tulisi olemaan työläämpää. Lisäksi suora nestejakeen rikkihappouutto lisää häiritsevien metalli-ionien pitoisuutta liuoksessa. Optimaalisin tilanne olisi, kun liuoksen pH saataisiin pysymään lähellä yhdeksää koko elektrolyysin ajan, vähintään tunnin verran. Lisäksi pitäisi pyrkiä vähentämään liuoksessa olevan kiintoaineen ja metallien pitoisuutta. Laitteistotestit ovat osoittaneet, että struviitin muodostus on mahdollista elektrolyysillä, kunhan olosuhteet ovat sopivat. Kationit (kalsium, metallit) estävät struviitin muodostumista, joten ioninvaihto on pakollista, jos struviittia halutaan muodostaa. Kokeiden sekä aikaisempien kokemusten perusteella tultiin lopputulokseen, että esikäsitteilymenetelmään tulee sisällyttää rikkihapokäsittely, tehokas suodatus ja kationinpoisto.

NESTEJAKEEN JATKOKOKEET

Hankittiin universaalia kationinvaihtohartsia (Amberlite IR 120H), jolla pyrittiin pääsemään eroon struviitin muodostumista häiritsevistä kationeista. Testattiin hartsin soveltuvuutta ja toimivuutta nestejakeelle. Ensimmäinen testattiin dekantterimenetelmää. Mitattiin 100 ml näytettä ja 100 ml 1 M rikkihappoa dekantteriin ja sekoitettiin 30 minuuttia. Fuugattiin näyte (4 000 rpm, 5 min) ja suodatettiin 0,6 µm paperin läpi. Punnittiin suodokseen hartsia käyttöohjeen suosituksen mukaisesti 10 g/l ja sekoitettiin rauhallisesti 20 minuutin ajan. Otettiin fosfaatti-, ammonium- ja rautanäytteet ennen ja jälkeen hartsin lisäämisen. Kaikki näytteet laimennettiin 1:200 (1:400 alkuperäisestä nestejakeesta). Ammonium, fosfaatti ja rauta analysoitiin spektrofotometrisesti (kuva 15). Analyysitulokset (laimennoskerrointa 1:200 ei huomioitu) on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Hartsin toimivuus, dekantterikoe.

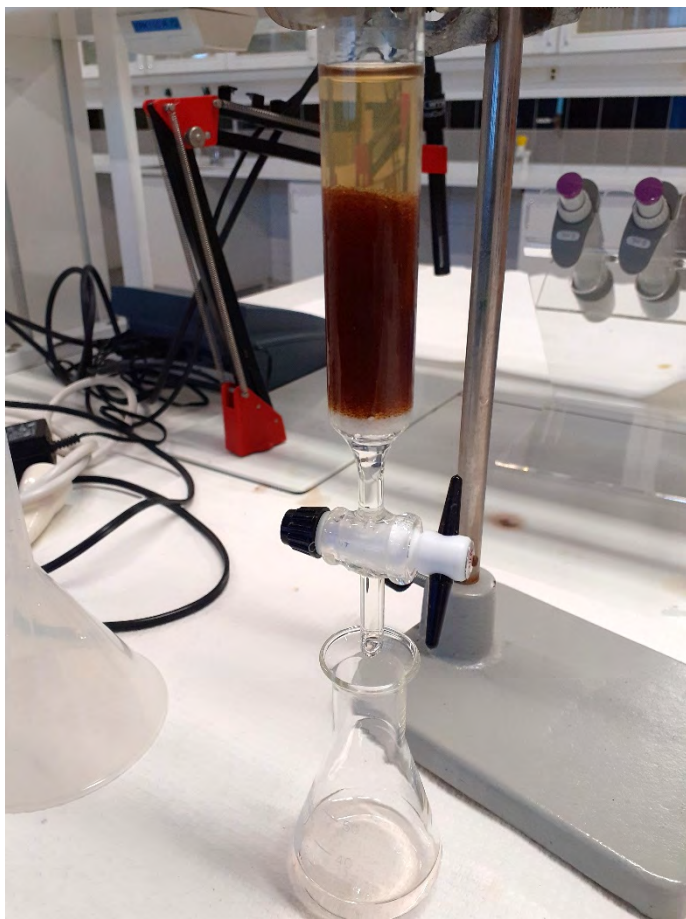
	Ennen (mg/l)	Jälkeen (mg/l)
fosfaatti	2,84	2,73
ammonium	4,18	4,19
rauta	0,413	0,379

Analyysitulosten mukaan dekantterimenetelmä ei toimi joko liian vähäisen hartsin, kontaktiajan, liian vahvan happotaustan tai hartsin saturaaation takia.



Kuva 15. Pitoisuuksia määritettiin spektrofotometrisesti (kuva Janne Junninen).

Kokeiltiin pylväsmenetelmää kationien poistoa varten (kuva 16). Laimennettiin dekantterikokeessa ollutta näytettä 1:5 siten, että saatiin näytettä, jossa oli 0,1 M rikkihappotausta. Mitattiin hartsia erotuspylvään pohjalle 15 ml. Huuhdeltiin hartsipylvästä reilulla vedellä, kunnes pylvään läpi tuleva vesi oli väritöntä, ja pipetoitiin 15 ml näytettä pylvään läpi. Näytteen keräys aloitettiin, kun läpi tulevan nesteen väri alkoi muuttua tummemmaksi. Kerättiin näytettä noin 8 ml.



Kuva 16. Ioninvaihtopylväs (kuva Janne Junninen).

Näyte laimennettiin siten, että laimennossuhde oli 1:400 alkuperäiseen nestejakeeseen nähden ja mitattiin rauta spektrofotometrillä. Mitatun raudan tulos jäi alle määritysrajan. Todettiin, että pylväsmenetelmä poistaa kationeja näytteestä. Laimennettiin lisää uutetta suhteella 1:5 ja ajettiin sitä 60 ml 15 ml hartsia sisältävän pylvään läpi. Mitattiin raudan, ammoniumin ja fosfaatin pitoisuudet spektrofotometrisesti. Mittaustulokset on esitetty taulukossa 7. Tuloksissa on huomioitu 1:5 laimennos ennen pylvään läpi ajoa, mutta ei 1:200 laimennoskerrointa.

Taulukko 7. Ioninvaihtopylvään toimivuuden testaus.

	Ennen (mg/l)	Jälkeen (mg/l)
fosfaatti	2,84	2,74
ammonium	4,18	0,345
rauta	0,413	<LOD

Pylväs poisti näytteestä kaiken raudan ja suurimman osan ammoniumista. Ammoniumin poisto ei ole toivottavaa, sillä sitä tarvitaan struviitin muodostukseen. Tulos kuitenkin implikoi, että hartsi poistaa kaikenlaisia kationeja päästäten fosfaatin läpi. Ammoniumia joudutaan lisäämään kationivaihdettuun näytteeseen, mutta se on pakollinen lisävaihe, jotta struviitin muodostuminen on mahdollista tämänlaisesta matriisista.

Testattiin struviitin saostumista ionivaihdetusta näytteestä lisäämällä siihen ammoniumia ja magnesiumia siten, että fosfaatin, ammoniumin ja magnesiumin molaariset suhteet olivat 1:7:4 ja nostamalla pH struviitin muodostumiselle otolliselle alueelle 8,5:een. Liuoksessa ei havaittu saostumaa edes vuorokauden odotuksen jälkeen. Siemenkiteiden lisäämisellä ei myöskään saavutettu kiteytymistä. Spektrofotometriset mittaukset vahvistivat, että fosfaattia ei ollut hävinnyt liuoksesta.

Kokeiltiin tehdä konsentroituneempi uuttoliuos: mitattiin 100 ml nestejaetta ja 100 ml 0,2 M rikkihappoa dekanttertiin ja sekoitettiin 30 minuutin ajan. Sentrifugoitiin näyte (4 000 rpm, 5 min) ja suodatettiin imusuodatuksella 0,6 µm suodatinpaperin läpi. Suodatus ei onnistunut kunnolla, sillä rikkihappoliuos oli liian laimeaa muuttaakseen nestejakeen suodatettavaan muotoon. Näytettä tulee konsentroida riittävästi siten, että fosfaattipitoisuus on mahdollisimman korkea käsiteltävässä liuoksessa ja happotausta on riittävän korkea, jotta uutto ja suodatus ovat riittävän tehokkaita, mutta ei liian väkevä, jotta ioninvaihtohartsi toimii halutulla tavalla. Nestejaetta laitettiin kuivumaan lämpökaappiin yön yli 105 °C:seen. Kuivattu nestejake (kuva 17) jauhettiin huhmareella homogeeniseksi.



Kuva 17. Kuivattua nestejaetta (kuva Janne Junninen).

Kuivattua, homogenisoitua nestejaetta uutettiin 0,5 M rikkihapossa suhteella 1 g kuivattua nestejaetta / 20 ml 0,5 M rikkihappoa. Uuton jälkeen seos fuugattiin (5 min, 4 000 rpm) ja dekantoitiin. Dekantoitu neste suodatettiin imusuodatuksella 0,6 µm suodatinpaperin läpi. Nostettiin liuoksen pH noin yhteen 2 M NaOH:lla ja ajettiin liuos kationin-ionin-vaihtohartsin läpi nopeudella 3 ml/min. Ionivaihdetun liuoksen pH nostettiin 8:aan 2 M NaOH:lla. Liuoksesta mitattiin fosfaatti, ammonium ja rauta.

- $\text{PO}_4 = 655 \text{ mg/l}$
- $\text{Fe} = < 0,01 \text{ mg/l}$
- $\text{NH}_4 = 13,5 \text{ mg/l}$

Ioninvaihto oli onnistunut. Ionivaihdettuun liuokseen punnittiin ammoniumia ja magnesiumia moolisuhteella hieman yli 1:1:1 fosfaattiin nähden. Teoreettinen saanto 140 ml:n näytemäärästä oli 238 mg struviittia. Näytteeseen lisättiin muutama siemenkide struviittia ja liuos jätettiin kiteytymään yön yli.

Seuraavana päivänä ruiskusuodatettiin (0,45 µm) noin 20 ml näytettä, joka muuttui suodatuksen myötä läpinäkyvämmäksi. Ruiskusuodatetusta näytteestä mitattiin fosfaatti ja ammonium.

- $\text{PO}_4 = 660 \text{ mg/l} = 6,9 \text{ mmol/l}$
- $\text{NH}_4 = 137,5 \text{ mg/l} = 7,6 \text{ mmol/l}$

Fosfaatin ja ammoniumin moolisuhteet olivat ennallaan, eikä kiteitä näkynyt.

Nostettiin ruiskusuodatetun näytteen pH 8,75:een 2 M NaOH:lla ja laitettiin lämpökaappiin 50 asteeseen yhden tunnin ajaksi. Sakkaa ei havaittu. Lisättiin ylimäärä (spaattelin kärjellinen) ammoniumia ja magnesiumia, mutta sakkaa ei havaittu. Lisättiin spaattelin kärjellinen fosfaattia ja saatiin muodostumaan näkyvä sakka. Tämä osoittaa, että näytteessä on struviitin muodostumista estäviä komponentteja. Mitattiin alumiinipitoisuus käsittelystä liuoksesta. Mittauksen mukaan alumiinia ei ollut. Mahdollinen estävä tekijä voi olla kiintoainepitoisuus. Tehokkaampaa membraanisuodatusta on kokeiltava, joskin myöskään 0,45 µm ruiskusuodattimen läpi suodatettu näyte ei saostu spontaanisti.

Uusittiin koesarja nestejakeella. Vertailunäytteeksi otettiin Mikkelin jätevedenpuhdistamon jätevesilietteen mädätettä. Suodatuksessa käytettiin selluloosaesterimembraaneja. Ensimmäinen imusuodatus tehtiin 0,45 µm huokoskoon membraanin läpi, minkä jälkeen suodos imusuodatettiin uudestaan 0,2 µm huokoskoon membraanin läpi. Ennen ioninvaihtoa pH nostettiin noin yhteen. Ioninvaihdon jälkeen kiteytyksessä lisättiin ammoniumia ja magnesiumia siten, että mooliosuudet olivat noin 1:1:1,5 ($\text{PO}_4 : \text{NH}_4 : \text{Mg}$). pH:t nostettiin 9,5:een. Jätevesilietteestä valmistetun vertailunäytteen dekanttertiin muodostui vaaleaa, harmaanruskeaa sakkaa, joka sisälsi fosforia ja ammoniumia (kuva 18). Kyseessä oli suurella todennäköisyydellä struviitti.



Kuva 18. Vertailunäytteen sakka (kuva Janne Junninen).

Nestejäenäytteen dekanttertiin ei muodostunut sakkaa. Nestejakeen näytteestä mitattiin rautapitoisuus, joka oli 241 mg/l. Jätevesilietteen mädärteen näytteessä rauta jäi alle määrittäysrajan. Nestejäenäytteen ioninvaihto ei ollut onnistunut, mikä suurella todennäköisyydellä aiheutti sen, ettei struviitti kiteytynyt. Onnistuneesti toteutetulla esikäsittelymetodilla saatiin kuitenkin saostettua fosfaattia samantyylisestä matriisista ja päätettiin jatkaa elektrolyyssikokeita käyttäen tätä esikäsittelymenetelmää.

Kokeiltiin vetyperoksidin vaikutusta struviitin kiteytymiseen esikäsittelyvaiheessa. Kuivattu, homogenoitu nestejake uutettiin suhteella 10 g jauhetta / 200 ml 0,5 M rikkihappoa kahden tunnin ajan. Uutettu liuos sentrifugoitiin. Sentrifugoitu liuos dekanttoitiin ja suodattettiin 0,45 µm:n ja 0,2 µm selluloosaesterimembraanien läpi. pH nostettiin noin 0,75:een ja liuos ajettiin ioninvaihtopylvään (100 ml hartsia) läpi.

Lisättiin 10 ml vetyperoksidia ionivaihdettuun liuokseen ja lämmitettiin liuos 60 asteeseen yhden tunnin ajaksi. Liuos muuttui hyvin keltaiseksi. Nostettiin pH 9,5:een, jolloin liuos kupli (kuva 19).



Kuva 19. Lämmitetty liuos ja pH-säädön vaikutus (kuva Janne Junninen).

Lisättiin noin 1,5-kertainen mooliylimäärä magnesiumiumia, jolloin muodostui kellertävän valkoinen sakka. Sakka imusuodatettiin membraanisuodattimella (0,45 µm), pestiin pienellä määrällä vettä ja kuivattiin kellolasin päällä eksikaattorissa (kuva 20).



Kuva 20. Suodatettu sakka ja kuivattu sakka (kuva Janne Junninen).

Sakka otettiin talteen jatkoanalyysijä varten. Kokeet muilla näytteillä ovat osoittaneet, että struviitin muodostus on mahdollista myös ilman vetyperoksidia. Esikäsittelyn yksinkertaistamiseksi vetyperoksidikäsittely jätettiin pois elektrokemiallisessa struviitin saostuksessa.

STRUVIITIN ELEKTROKEMIALLINEN SAOSTUS MÄDÄTTEEN NESTEJAKEESTA

Kuivattu, homogenoitu nestejake uutettiin 15 grammaa jauhetta: 300 ml 0,5 M rikkihappoa kahden tunnin ajan sekoituksella 300 rpm. Uutettu liuos sentrifugoitiin viisi minuuttia 4 000 rpm, minkä jälkeen liuos dekantointiin ja imusuodatettiin 0,45 µm:n ja 0,2 µm selluloosaesterimembraanien läpi. Liuoksen pH nostettiin 0,75:een 2 M NaOH:lla ja liuos ajettiin kationinvaihtopylvään (100 ml hartsia) läpi. Liuoksen pH nostettiin 6 M NaOH:lla noin 7:ään. Mitattiin liuoksesta rauta ja fosfaatti:

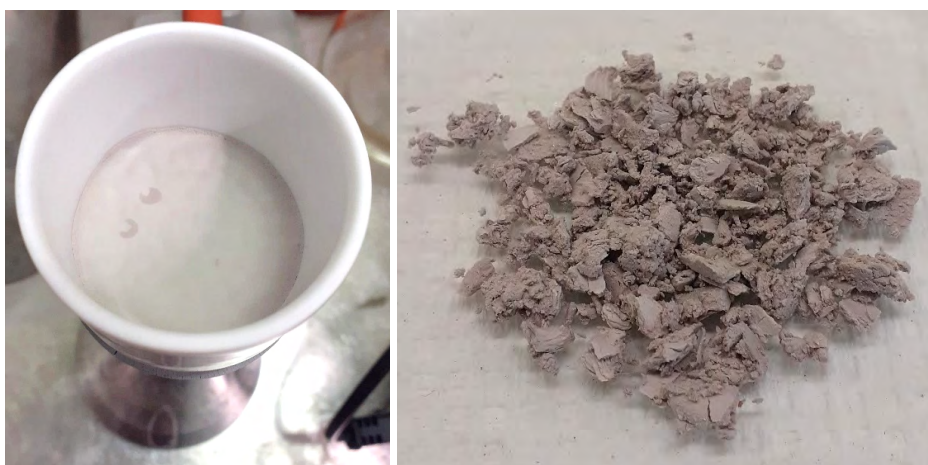
- Fe = 30,5 mg/l
- PO₄ = 1 260 mg/l

Lisättiin 1,2-kertainen ylimäärä ammoniumia ja aloitettiin elektrolyysi käyttäen 99,9-prosenttista Mg-elektrodia ja hiielelektrodia (kuva 21).



Kuva 21. Elektrolyysi, virtalähde, hiielelektrodi elektrolyysin jälkeen (kuva Janne Junninen).

Jännite oli alussa 2,1 V ja virta 0,4 A. pH alkoi nousta melko pian aloituksen jälkeen. Jatkettiin elektrolyysiä yhden tunnin ajan ja säädettiin pH:ta elektrolyysin aikana suolahapolla siten, että pH ei missään vaiheessa saavuttanut arvoa 10. Tunnin jälkeen elektrolyysi lopetettiin. Jännite oli noussut 2,7 volttiin ja virta laskenut 0,28 ampeeriin. pH oli lopetushetkellä 9,65. Muodostunut vaalea, ruskeanharmaa sakka imusuodatettiin 0,45 µm membraanin läpi ja kuivattiin eksikaattorissa (kuva 22).

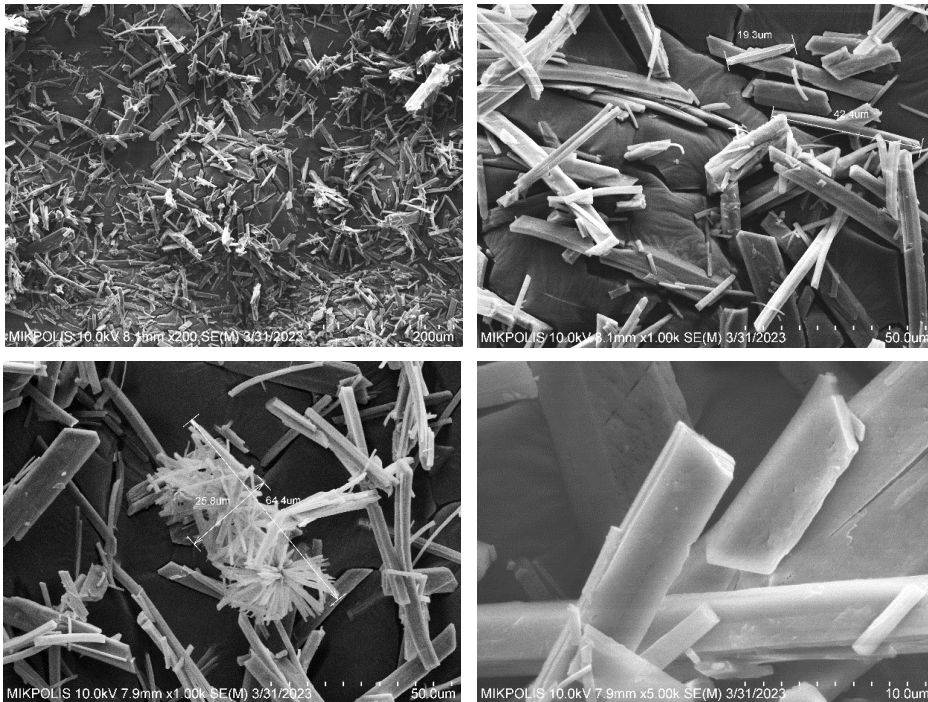


Kuva 22. Suodatettu sakka, kuivattu sakka (kuva Janne Junninen).

Suodoksesta mitattiin fosfaattipitoisuus, joka oli 206,4 mg/l. Fosfaatin poistoprosentiksi määritettiin 83,6. Kuivattua, suodatettua sakkaa punnittiin 7,6 mg, joka liuotettiin rikkihappoon ja laimennettiin 250 ml:aan vettä. Teoreettinen fosfaattipitoisuus tälle liuokselle oli 1,176 mg/l. Mitattu fosfaattipitoisuus oli 1,159 mg/l, ja fosfaatin perusteella puhtausasteeksi arvioitiin 98,6 prosenttia.

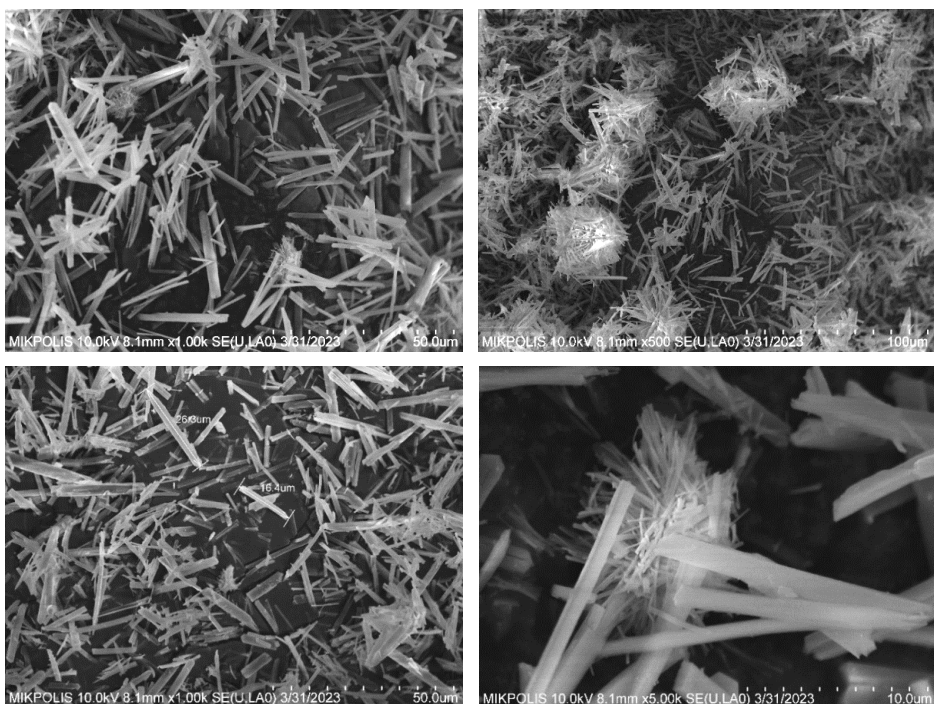
ANALYYSITULOKSET

Peroksidikäsitelyn jälkeen reagenssimagnesiumilla saostetusta sakasta ja elektrolyysillä saostetusta sakasta suoritettiin tarkemmat analyysit. Sakoista otettiin SEM-kuvat (Hitachi S-4800) Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Mikpolisin materiaalitekniikan laboratoriossa. Elektrolyyttisesti valmistetun sakan kuvat on esitetty kuvassa 23 a-d.



Kuva 23 a-d. SEM-kuvat elektrolyysillä valmistetusta sakasta (kuvat Aapo Nylén Mikpolis).

Kuvissa nähtiin selkeä kidemäinen rakenne. Peroksidikäsitelyn jälkeen reagenssimagnesiumilla valmistetun sakan kiteet näyttivät hyvin samankaltaisilta kuin elektrolyyttisesti valmistetun sakan kuvat. Molemmista sakoista nähtiin kapeita, lähes suorakulmion muotoisia kiteitä. Peroksidikäsitelyn jälkeen reagenssimagnesiumilla valmistetun sakan kuvat on esitetty kuvassa 24 a-d.



Kuva 24 a-d. SEM-kuvat peroksidikäsittelyn jälkeen reagenssimagnesiumilla valmistetusta sakasta (kuvat Aapo Nylen Mikpolis).

Sakoille tehtiin alkuaineanalyysi yksittäisestä kiteestä SEM-EDS-mittauksella Hitachi S-4800 SEM -laitteella Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Mikpolisin materiaaliteknikan laboratoriossa. Yksittäisen kiteen alkuaineanalyysin tulokset on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Yksittäisen kiteen alkuaineanalyysi (Mikpolis 2023).

Alkuaine	Elektrolyysisakka (m-%)	Peroksidisakka (m-%)	Struviitti, teoreettinen (m-%)
C	26,33	15,26	-
N	3,73	2,61	5,71
O	44,91	48,17	65,20
Na	0,54	4,50	-
Mg	10,27	11,91	9,90
Al	0,11	0,10	-
P	9,70	13,00	12,62
S	0,06	0,18	-
K	0,77	0,24	-
Cr	3,40	3,75	-
Fe	0,17	0,29	-

Yksittäisen kiteen alkuaineanalyysin tuloksista nähdään, että kiteen koostumus on molemmissa tapauksissa kohtuullisen samankaltainen struviitin teoreettisen koostumuksen kanssa. Elektrolyytisesti valmistetun kiteen puhtausprosentti magnesiumin perusteella oli 96,4 prosenttia ja fosforin perusteella 76,9 prosenttia. Peroksidisakan puhtaus oli magnesiumin perusteella 83,1 prosenttia ja fosforin perusteella 97,0 prosenttia.

Sakat lähetettiin XRD-analyysiin ulkopuoliseen laboratorioon (Measurlabs, XRD Smartlab (Rigaku, Japani, 2011) 9 kW:n röntgenlähdeputki, pyörivä kuparianodiröntgenlähde) ja alkuainemääritykseen (SEM-EDS, Measurlabs, EDS-spektrometri INCA (oxford instruments) SEM:ssä EVO-50EP (Carl Zeiss SM)). XRD-analyysi vahvisti, että elektrolyysillä tuotetun sakan kiteinen faasi koostui yksinomaan struviitista. Peroksidikäsitelty sakka sisälsi myös struviittia, mutta lisäksi kidefaasissa oli mukana muitakin yhdisteitä. XRD-analyysin tulokset on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. XRD-analyysin tulokset.

XRD-faasit	Elektrolyysisakka Tulos (%)	Peroksidisakka Tulos (%)
Struviitti $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	100 %	Kyllä
Apeksiitti $\text{NaMg}(\text{PO}_4) \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	-	Kyllä
Poly(dinatriumdiaquiritri- μ 2-oksalaattidimagnesium(II) $\text{Na}_2\text{Mg}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3(\text{H}_2\text{O})_2$	-	Kyllä

Ulkopuolisen laboratorion SEM-EDS alkuaineanalyysi suoritettiin homogenoidulle näytteelle. Alkuaineanalyysin tulokset on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Homogenoidun näytteen alkuaineanalyysi (Measurlabs 2023).

Alkuaine	Elektrolyysisakka (m-%)	Peroksidisakka (m-%)	Struviitti, teoreettinen (m-%)
O	53,00	51,70	65,20
Na	-	6,48	-
Mg	17,36	17,45	9,90
Al	-	-	-
P	26,07	23,20	12,62
S	-	-	-
Cl	0,67	0,39	-
K	2,46	0,46	-
Fe	0,44	0,32	-

Homogenoidun näytteen analyysin tulosten mukaan elektrolyyttisesti valmistetun sakan puhtaus oli 57,0 prosenttia magnesiumin perusteella ja 48,4 prosenttia fosforin perusteella. Peroksidikäsittelyn reagenssimagnesiumilla valmistetun sakan puhtaus oli 56,7 prosenttia magnesiumin perusteella ja 54,4 prosenttia fosforin perusteella. Erot yksittäisen kiteen ja homogenoidun näytteen alkuaineanalyysien tuloksissa sekä sakan ruskeanharmaa väri viittaavat amorfisten epäpuhtauksien läsnäoloon. Vetyperoksidikäsittelyllä ei ollut merkittävää vaikutusta tuotteen puhtauteen. Orgaanista ainesta on yksittäisen kiteen alkuaineanalyysin mukaan kidefaasissa vähemmän peroksidikäsittelyn jälkeen, mutta XRD-analyysin mukaan kiteiseen faasiin saostuu epäpuhtauksia. Lisäpuhdistusvaiheet (esimerkiksi uudelleenkiteytys) olisivat tarpeen sakan epäpuhtauksien vähentämiseksi.

JOHTOPÄÄTÖKSET

Biokaasulaitoksen nestejakeesta onnistuttiin saostamaan fosfaattia elektrokemiallisesti. Saostuva kidefaasi oli kokonaisuudessaan struviittia, mutta saostunut struviitti sisälsi runsaasti amorfisia epäpuhtauksia.

Kokeet osoittivat, että biokaasureaktorin mädätteen nestejake oli haastava matriisi struviitin muodostumiselle. Nestejake sisältää monia struviitin muodostumista häiritseviä tekijöitä, joten ennen kuin struviitin saostuminen on mahdollista, tarvitaan moniportainen esikäsittelymenetelmä (näytteen kuivaus ja homogenisointi, rikkihappouutto, sentrifugointi, dekantointi ja suodatus, kationinvaihto ja ammoniumlisäys). Tämä aiheuttaa ilmeisiä haasteita kustannustehokkaalle suuren mittakaavan prosessille. Laboratoriokokoluokan kokeista saatiin runsaasti hyödyllistä tietoa, mutta metodi vaatii runsaasti lisätyötä, kehitystä ja optimointia laboratorio-, pilotti- ja demonstraatioympäristöissä, jotta sitä voitaisiin soveltaa täyden mittakaavan kaupallisissa sovelluksissa.

LÄHTEET

Berninger, K., Phil, T., Kasanen, P., Mikola, A., Tynkkynen, O., Vahala, R. 2017. Jätevesien fosfori hyötykäyttöön – teknologioita ja ohjauskeinoja. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 62/2017.

Huhtakangas, P. 2022. Ravinteiden talteenotto on välttämätöntä. Kehittyvä elintarvike. Elintarviketieteiden Seuran ammatti- ja tiedelehti. Uutisia 8.9.2022. Saatavilla: <https://kehittyvaelintarvike.fi/artikkelit/uutisia/ravinteiden-talteenotto-on-valttamatonta/> (viitattu 9.8.2023)

Kataki, S., West, H., Clarke, M., & Baruah, D. C. 2016. Phosphorus recovery as struvite from farm, municipal and industrial waste: Feedstock suitability, methods and pretreatments. *Waste Management*, 49, 437–454.

Lin, X., Han, Z., Yu, H., Ye, Z., Zhu, S., Zhu, J. 2017. Struvite precipitation from biogas digestion slurry using a two-chamber electrolysis cell with a magnesium anode. *Journal of Cleaner Production* 174 (2018), 1598–1607.

Pihl, T. 2017. Recovery and reuse of phosphorus from municipal wastewater – applications and attitudes in Finland. Aalto University. Civil and environmental engineering. Master's thesis.

Sääluoto K. s.a. Struviitin valmistus. Euroopan aluekehitysrahasto, Vipuvoimaa EU:lta 2015.

PURKUTYÖMAIDEN PÖLYPÄÄSTÖJEN YMPÄRISTÖ- JA TERVEYSVAIKUTUKSIEN MONITOROINTI

Juha Vihavainen & Lasse Hämäläinen & Sari Seppäläinen &
Vuokko Malk & Hanne Soininen & Saija Himanen & Jonne Gråsten

Rakennusten purkamisessa syntyy huomattava määrä pölyä, jolle purkutyötä tekevät työntekijät altistuvat. Rakennuspöly voi sisältää myös haitallisia aineita, kuten PAH- ja VOC-yhdisteitä, tai raskasmetalleja, ja pölyä voi levitä purkutyömaan lähiympäristöön. Mikkelin demonstraatiokohteissa Pankalammen terveyskeskuksen ja Tuukkalan sairaalan purkutyömailla suoritettiin sisäpurkuvaiheen aikana työhygienisiä mittauksia, joiden tarkoituksena oli selvittää työntekijöiden altistumista hengitysilman epäpuhtauksille. Mittauksissa määritettiin hengittyvän kokonaispölyn määrä, VOC-pitoisuudet sekä Pankalammen kohteessa myös hiukkasiin sitoutuneiden PAH-yhdisteiden pitoisuus. Hengittyvän kokonaispölyn mittauksia oli tukemassa optinen hiukkaskaskuri (DustTrak), jonka avulla mitattiin hiukkasten kokonaismassaa viidessä eri hiukkaskokoluokassa.

Purkutyömaan aiheuttamaa pölylaskeumaa työmaiden lähiympäristössä monitoroitiin keräämällä laskeumasta näytteitä Pankalammen ja Tuukkalan purkutyömaiden piha-alueilla. Lisäksi ulkoilman pienhiukkaspitoisuuksia seurattiin DustTrak-mittarilla.

PÖLYN TERVEYSVAIKUTUKSIA

Pölylle altistuminen aiheuttaa oireita lievistä epäviihtyvyydestä aina palautumattomiin ja jopa hengenvaarallisiin hengitystiesairauksiin. Terveyshaitan vakavuuteen vaikuttavat pölyn fysikaaliset, kemialliset sekä mineralogiset ominaisuudet. Pölyn hiukkaskoolla on ratkaiseva vaikutus siihen, mihin osaan hengityselimiä hiukkaset pääsevät ja kertyvät. Hengittyvä pöly ($D_{50} = 100 \mu\text{m}$) koostuu jakeesta, jota hengitetään suun ja nenän kautta. Keuhkojake ($D_{50} = 10 \mu\text{m}$) koostuu hiukkasista, jotka kulkeutuvat keuhkoputkistoon. Alveolijake ($D_{50} = 4 \mu\text{m}$) kulkeutuu syvimmälle keuhkoihin, keuhkorakkuloihin asti. Altistumisen määrään vaikuttavat pölyn pitoisuus hengitysilmassa sekä altistumisaika. Pölystä aiheutuvat oireet voivat alkaa välittömästi altistumisen aikana tai tulla esiin vasta vuosia altistumisen jälkeen. (TTL 2004)

Kohonneet PAH-pitoisuudet (polysykliset aromaattiset hiilivedyt) ovat yleensä peräisin rakennusmateriaaleista, kuten kreosoottipitoisista vesieristeistä. Tätä niin sanottua kivihii-litervaa on käytetty 1970-luvulla kosteuden eristäjänä ja kiinteänä massana sekä sivelyinä esimerkiksi puurakenteissa ja tervapapereissa. PAH-yhdisteet pääsevät elimistöön hengitys-teiden mukana sekä rasvaliukoisena tuotteena myös ihokontaktin kautta. PAH-yhdisteet ovat karsinogeenisiä ja voivat aiheuttaa syöpäriskin lisäksi jopa mutaatioita ja geenimuu-toksia. PAH-yhdisteet esiintyvät rakennusten sisäilmassa kaasumaisessa muodossa sekä hiukkasina. (Heikkinen 2020)

VOC-yhdisteet (volatile organic compounds = haihtuvat orgaaniset yhdisteet) ovat olomuo-doltaan kaasumaisia, ja niitä on olemassa satoja erilaisia. VOC-yhdisteiden lähteitä ovat ennen kaikkea rakennus- ja sisustusmateriaalit. Ulkoilman saasteet ja liikenteen pakokaasut lisäävät näitä yhdisteitä sisäilmassa, samoin kuin ihmisen oma toiminta ja esimerkiksi kemikaalien käyttö. Tyypillisiä kiinteistöjen VOC-lähteitä ovat muun muassa lattiamatot, maalit, saumausaineet ja liimat. VOC-yhdisteet voivat aiheuttaa silmien, hengitysteiden ja ihon ärsytystä. Ne ovat usein myös viihtyvyyshaitta, sillä niiden haju voi olla tiettyjen yhdisteiden osalta hyvin pistävä ja epämiellyttävä. (Sisäilmayhdistys 2008)

DEMONSTRAATIOKOHTEET

Pankalammen terveyskeskuksen (kuva 1) purku alkoi maaliskuussa 2021 ja päättyi elo-kuussa 2021. Purkutyömaan urakoitsijana toimi Ahosen Palvelut Oy. CityLoops-hankkeen aikana monitorointiin tarkemmin Pankalammen terveyskeskuksen entisen hammashoitolan (Pankalammen alatalo) sisäpurkuvaihetta. Rakennus oli valmistunut vuonna 1979, ja siinä oli kellarikerros sekä kaksi maanpäällistä kerrosta. Rakennus oli rakenteeltaan betonipilari- ja palkkirunkoinen, ja sen seinät sekä välipohjat olivat betonielementeistä. Rakennuksen kerrosala oli 1 496 m² ja tilavuus 5 490 m³. (Ramboll Oy 2020a)



Kuva 1. Pankalammen terveyskeskus (kuva Esa Hannus, Xamk).

Tuukkalan sairaalan purkutyömaa alkoi toukokuussa 2021 ja päättyi elokuussa 2021. Tuukkalan sairaalan purkutyömaan urakoitsijana toimi Terra Infra Oy. CityLoops-hankkeen aikana monitorointiin tarkemmin Tuukkalan sairaalan sisä- ja ulkopurkuvaihetta (kuva 2). Sairaalan A-osa oli rakennettu vuonna 1960 ja uudempi B-osa 1970-luvulla. Rakennus rakennettiin alun perin mielisairaalaksi, ja se toimi myöhemmin aina vuoteen 2005 saakka terveyskeskus- ja vuodeosastokäytössä. Vuonna 2005 sairaalan toiminta lakkautettiin. Lakkauttamisen jälkeen sairaala oli osittain vuokrattuna aina 2010-luvun alkupuolelle. Tämän jälkeen rakennus oli tyhjiään. Rakennuksen A-osassa oli viisi kerrosta ja B-osassa puolestaan neljä kerrosta. Molemmat osat olivat teräsbetonirakenteisia, ja niiden ulkoseinissä oli tiiliverhoilu. Perustukset olivat maanvaraiset anturat. (Ramboll Oy 2020b)



Kuva 2. Ilmakuva Tuukkalan sairaalan purkutyömaasta (kuva Juha Vihavainen 2021).

TYÖHYGIENISET MITTAUKSET

Molemmissa demonstraatiokohteissa suoritettiin sisäpurkuvaiheen aikana työhygienisiä mittauksia henkilökohtaisilla sekä kiinteisiin pisteisiin sijoitetuilla keräimillä sekä optisen hiukkaslaskurin avulla. Mittaukset suoritettiin yhden työpäivän aikana 25.3.2021 (Pankalampi) ja 26.5.2021 (Tuukkala).

HENKILÖKOHTAISET KERÄIMET

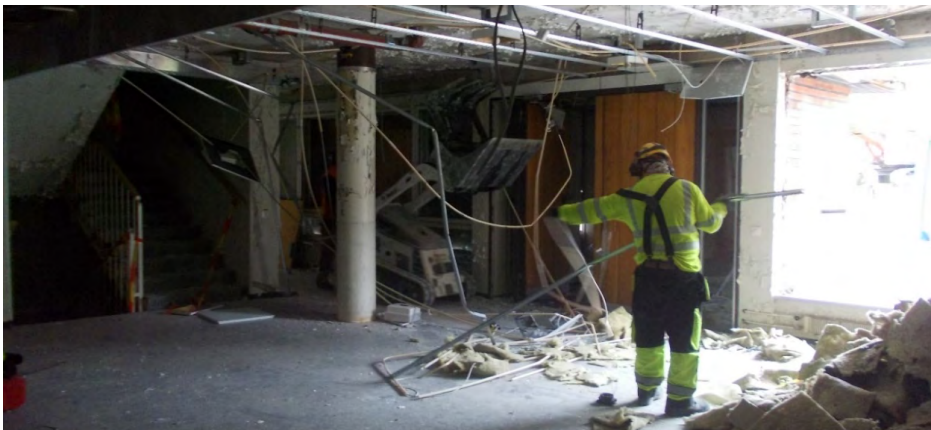
Hengittävä pöly kerättiin henkilökohtaisilla mittareilla kalvosuodattimelle IOM-keräimellä. Keräimet kiinnitettiin molemmilla työmailla kahteen sisäpurkua tekevään työntekijään.

Mittaukset suoritettiin klo 7.30–15.30 välisenä aikana. Kahvitaukojen aikana mittaukset pysäytettiin. Mittauksen aikana tuli pienempiä katkoksia työskentelyyn, joiden ajaksi mittauksia ei pysäytetty. Pankalammen työmaalla työntekijöille vaihdettiin lounastauon jälkeen uudet keräimet. Tuukkalan työmaalla keräimiä ei vaihdettu. Mittareita kantavien työntekijöiden tehtäviin kuului rakennusten sisäpurku. Sisäpurussa työntekijät kantoivat ulos Bobcatin purkamia sisärakenteita samalla lajitellen ne (kuvat 3 ja 4). Rakennusten ikkunat oli poistettu ennen sisäpurun aloittamista, mikä tehosti ilman vaihtumista sisätiloissa.

Näytepumput, keräimet ja valjaat oli tilattu Työterveyslaitokselta ja näytteet määritettiin Työterveyslaitoksen laboratoriossa Helsingissä, joka on FINAS-akkreditointipalvelun akkreditoima testauslaboratorio T013, SFS-EN ISO/IEC 17025. Hengittävää poly analysoitiin gravimetrisesti. Hengittävän pölyn pitoisuuden mittaamisessa sovelletaan standardeja EN 481:1993 ja ISO 7708:1995.



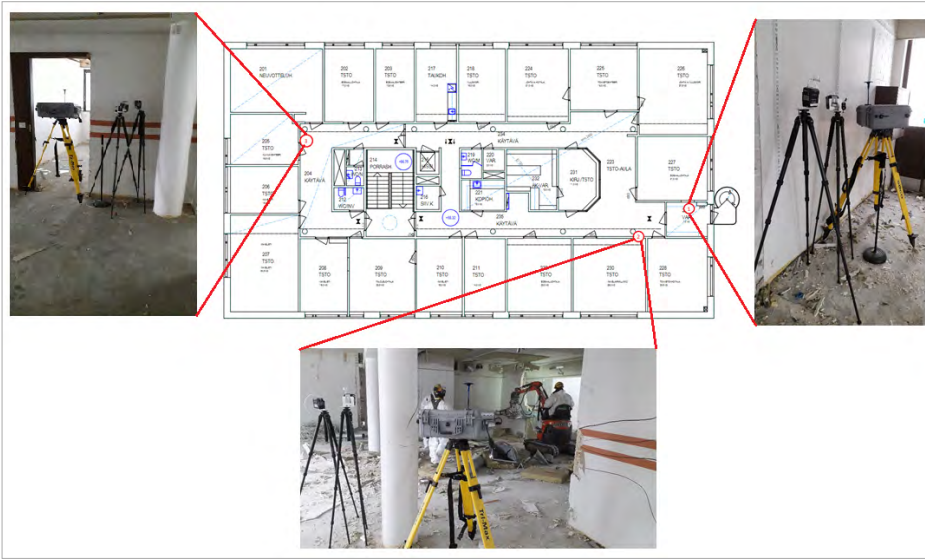
Kuva 3. Sisäpurkua ja lajittelua Bobcatin avulla Pankalammen työmaalla (kuva Juha Vihavainen).



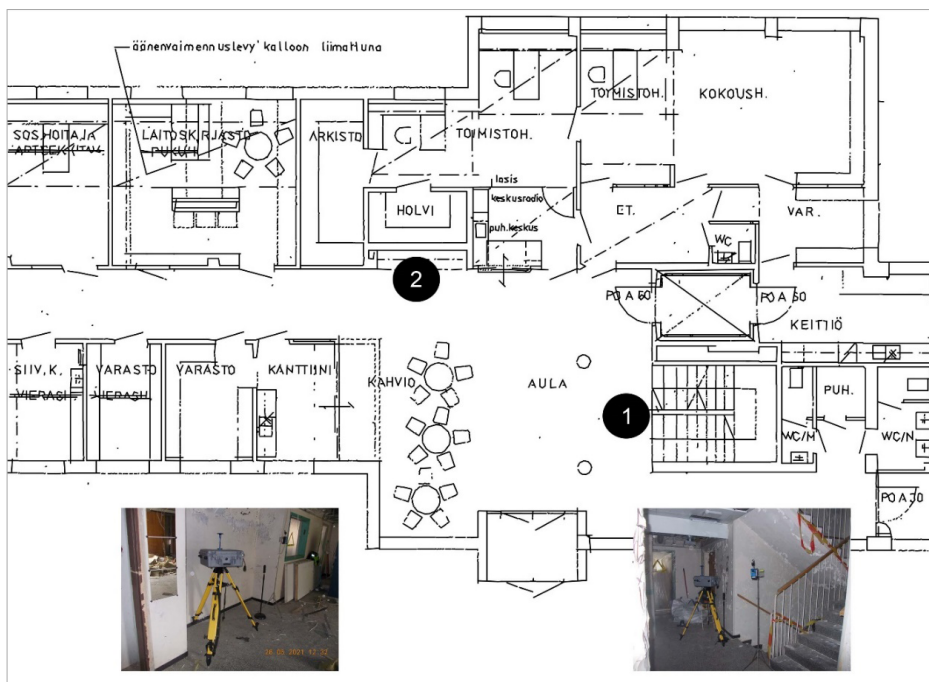
Kuva 4. Koneellista etupurkua Tuukkalan sairaalan B-osan ensimmäisessä kerroksessa (kuva Juha Vihavainen 2021).

KIIINTEÄT NÄYTEPISTEET

Pankalammen työmaalla näytteenotto kiinteistä pisteistä suoritettiin hammashoitolan toisen kerroksen sisäpurun aikana ja Tuukkalan työmaalla ensimmäisen kerroksen sisäpurun aikana. Kiinteistä pisteistä mitattiin hengittyvän pölyn määrä, VOC-yhdisteet sekä Pankalammen työmaalta myös PAH-yhdisteet. Näytteenottimia siirrettiin purku-urakan edetessä. Näytteenottopisteiden sijainnit Pankalammen työmaalla on esitetty kuvassa 5 ja Tuukkalan työmaalla kuvassa 6.



Kuva 5. Näytteenottopisteiden sijainnit Pankalammen hammashoitolan sisäpurun aikana. Oikealta vasemmalle päin näytepiste 1, 2 ja 3 (kuva Lasse Hämäläinen).



Kuva 6. Näytteenottopisteiden 1 ja 2 sijainnit Tuukkalan sairaalan 1. kerroksen sisäpurun aikana (kuva Juha Vihavainen, pohjapiirros Mikkelin kaupunki).

Hengittyvä pöly kerättiin kalvosuodattimelle IOM-keräimellä ja analysoitiin gravimetrisesti. Hengittyvän pölyn pitoisuuden mittaamisessa sovelletaan standardeja EN 481:1993 ja ISO 7708:1995. Hengittyvän pölyn mittaustuloksista laskettiin kahdeksan tunnin keskipitoisuus seuraavasti:

$$C_{8h} = \frac{(C_n T_n + C_n T_n + C_n T_n)}{8h}$$

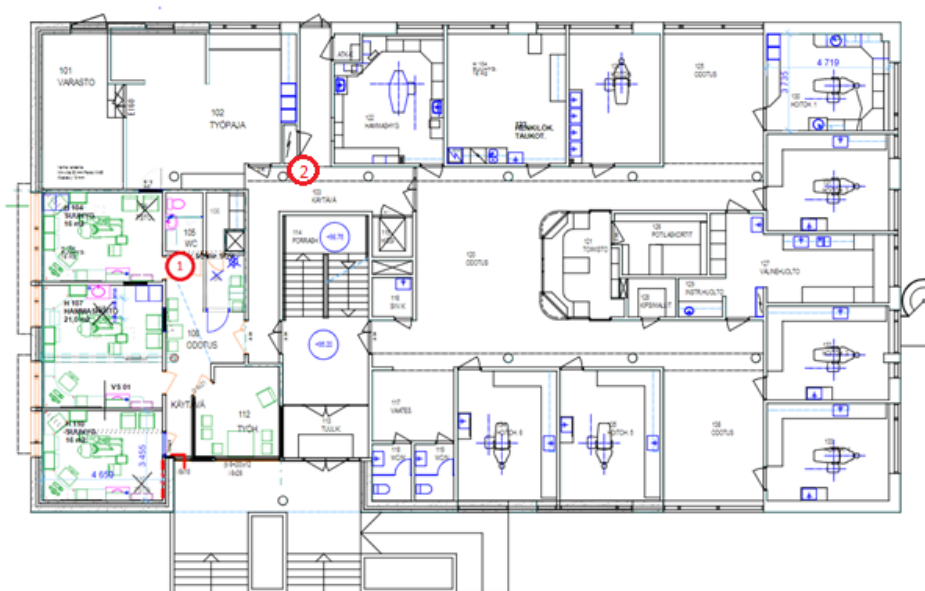
jossa C_n on keskipitoisuus aikavälillä n ja T_n aikavälin pituus.

Ilman haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC) kerättiin Tenax TA adsorptioputkeen ja analysoitiin kaasukromatografisesti käyttäen termodesorptiota ja massaselektiivistä ilmaisinta (TD-GC-MS).

Pankalammen työmaalla kahdesta kiinteästä näytepisteestä kerättiin päivän aikana hiukkaasiin sitoutuneet PAH-yhdisteet. Näytteet kerättiin virtausnopeudella 2 l/min teflonsuodattimelle ($\varnothing$ 37 mm). Mittausmenetelmässä ilmanäytteestä analysoitiin EPA:n (Yhdysvaltojen ympäristönsuojeluvirasto) priorisoimat 16 PAH-yhdistettä sekä 2- ja 1-metyyliinaftaleenit. Analyysiä varten yhdisteet uutettiin keräimestä liuottimella ja määritettiin käyttäen GC/MS-laitteistoa. Kaikki näytteet analysoitiin Työterveyslaitoksen laboratorioissa Helsingissä.

DUSTTRAK-MITTAUKSET

Sisäpurun aikana tehtiin hiukkasmittauksia DustTrak DRX model 8533 mittarilla. DustTrak-laitteisto mittaa hiukkasia 0,1–15 µm:n välillä valon sirontaan perustuen. Laite mittaa hiukkasia viidessä eri kokoluokassa: PM₁, PM_{2,5}, alveolijae, PM₁₀ ja kokonaishiukkaset. Hiukkaslaskuria siirrettiin purkutöiden edetessä rakennuksessa. Kuvassa 7 on esitetty mitauspisteet Pankalammen työmaalla. Tuukkalan työmaalla DustTrakin mitauspisteiden sijainnit olivat samat kuin kiinteiden näytteenottopisteiden sijainnit (kuva 6).



Kuva 7. DustTrakin sijainnit mittauksen aikana (piste 1 ja 2) Pankalammen työmaalla (mukaillen Mikkelin kaupunki).

Pankalammen työmaalla mittaukset suoritettiin klo 7.10–12.45 ja Tuukkalan työmaalla klo 8.15–13.25. Mittaus oli päällä koko ajan. Mittauksen aikana ympäröivissä huoneissa työntekijät tekivät koneellista sisäpurkua ja rakennusjätteiden siirtoa roskalavoille. Osa rakennuksen ikkunoista oli poistettu ennen sisäpurun aloittamista, mikä tehosti ilman vaihtumista sisätiloissa.

TYÖHYGIENISTEN MITTAUSTEN TULOKSET

Hengittävän pölyn tuloksia verrattiin sosiaali- ja terveysministeriön asettamiin HTP-arvoihin (haitalliseksi tunnetut pitoisuudet) (STM 2020). Kahdeksalle tunnille lasketut hengittävän pölyn altistumispitoisuudet verrattuna HTP-arvoihin on esitetty taulukossa 1.

Pankalammen työmaalla hengittyvän pölyn henkilökohtaisten näytteiden HTP-arvot ylittivät kummallakin työntekijällä. Tulokset osoittivat, että työntekijät altistuivat pölylle eri määriä. Tämä viittaa siihen, että pölypitoisuus, jolle työntekijä altistuu, on suuresti riippuvainen työntekijän työtehtävästä ja sijainnista alueella, jossa purkutyötä suoritetaan. Kiinteässä mittauspisteessä pölypitoisuus oli 71 prosenttia epäorgaanisen pölyn HTP_{8h}-arvosta ja 142 prosenttia orgaanisen pölyn HTP_{8h}-arvosta.

Tuukkalan työmaalla henkilökohtaisista näytteistä mitatut pölypitoisuudet ylittivät hieman orgaanisen pölyn HTP-arvon, mutta jäivät alle epäorgaanisen pölyn HTP-arvon. Kiinteässä mittauspisteessä HTP-arvot eivät ylittyneet.

Taulukko 1. Hengittyvän pölyn mittaustulokset Pankalammen ja Tuukkalan työmailla verrattuna epäorgaanisen ja orgaanisen pölyn HTP-arvoihin (STM 2020).

Näyte	Korjattu 8h (mg/m ³) Pankalampi	Korjattu 8h (mg/m ³) Tuukkala	HTP8h (mg/m ³) Epäorgaaninen pöly	HTP8h (mg/m ³) Orgaaninen pöly
Henkilökohtainen mittaus: Työntekijä 1	10,4	5,5	10	5
Henkilökohtainen mittaus: Työntekijä 2	17,5	5,3		
Kiinteä mittauspiste	7,1	1,5		

Todennäköisesti suurin osa hengittyvästä pölystä purkutyömailla on epäorgaanista pölyä. Tuloksissa ei ole otettu huomioon työntekijän käyttämän hengityssuojaimen ja muiden suojavarusteiden suojaustehoa. Esimerkiksi Tuukkalan kohteessa purkutyöntekijöillä oli henkilökohtaisena suojavarustuksena turvakypärä ja -kengät, suojahanskat, suojalasit sekä FFP3-filteerillä varustettu puolinaamari (kuva 8).



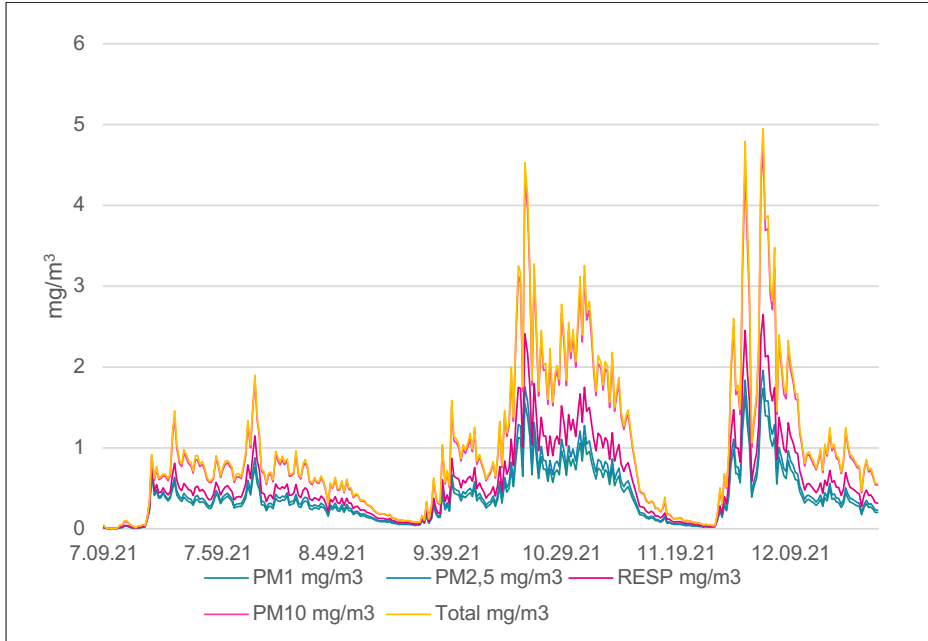
Kuva 8. Suojavarusteisiin pukeutunut purkutyöntekijä henkilökohtaisen hengittävän pölyn mittarilla varustettuna (kuva Sari Seppäläinen 2021).

VOC-yhdisteiden HTP-arvot (STM 2020) eivät ylittyneet Pankalammen työmaalla millään yhdisteellä, mutta asumisterveysasetuksen (STM 545/2015) toimenpideraja 2-etyyli-1-heksanolille ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ylittyi aamupäivän VOC-näytteessä (mitattu pitoisuus $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Iltapäivän näytteessä pitoisuus oli kuitenkin $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ eli alle toimenpiderajan. 2-etyyli-1-heksanolia vapautuu sisäilmaan esimerkiksi kosteuden vaurioittamista PVC-muovimatoista. Se on myös mikrobivauriota indikoiva yhdiste. (Ositum) Tuukkalan työmaalla VOC-näytteissä HTP-arvot sekä asumisterveysasetuksen toimenpiderajat eivät ylittyneet millään yhdisteellä.

Hiukkasiin sitoutuneiden PAH-yhdisteiden pitoisuuksia mitattiin vain Pankalammen työmaalta. Pitoisuudet olivat alhaisia ja pääosin alle määritysrajojen. Naftaleenin ja bentso(a)pyreenin HTP-arvot (naftaleeni $\text{HTP}_{8\text{h}}$ $5 \text{ mg}/\text{m}^3$ ja $\text{HTP}_{15\text{min}}$ $10 \text{ mg}/\text{m}^3$, bentso(a)pyreeni $\text{HTP}_{8\text{h}}$ $0,01 \text{ mg}/\text{m}^3$, STM 2020) eivät ylittyneet. Muille PAH-yhdisteille ei ole asetettu HTP-arvoja. Myöskään asumisterveysasetuksen (STM 545/2015) mukaiset toimenpiderajat (naftaleeni $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) eivät ylittyneet. Tulosten perusteella PAH-yhdisteiden pitoisuudet eivät siis olleet haitallisella tasolla.

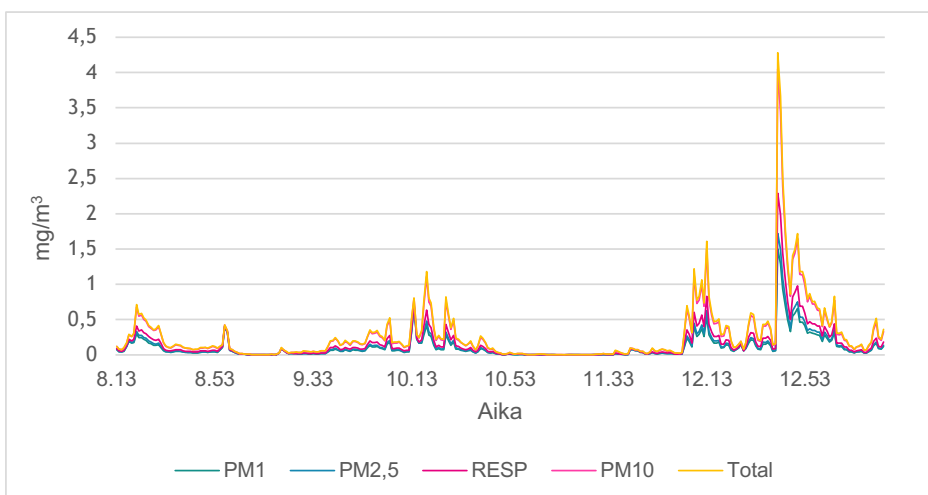
DustTrak-mittarilla mitatut hiukkaspitoisuudet nousivat Pankalammen työmaalla sisäpurun edetessä korkeiksi (kuva 9). Suurimmat hiukkaspitoisuudet mitattiin sisäkaton koneellisen purun aikana noin klo 12, jolloin katossa olevat paneelit pudotettiin maahan. PM10-jakeen

pitoisuus oli tuona aikana noin $4,2 \text{ mg/m}^3$. Kahvi- sekä lounastauko näkyvät hiukkasmittauksissa selkeästi hiukkaspitoisuuden laskemisena kello 9.15–9.30 sekä 11.00–11.30. Koneellinen sisäpurku lopetettiin kello 12.05, minkä jälkeen sisätiloista siivottiin viimeiset rakennusjätteet.



Kuva 9. DustTrak-mittaukset Pankalammen hammashoitolan 1. kerroksen sisäpurun aikana 31.3.2021. DustTrak-laitteisto mittaa hiukkasia $0,1\text{--}15 \mu\text{m}$:n välillä valon sirontaan perustuen viidessä eri kokoluokassa: PM1, PM2,5, alveolijae (respirable fraction, RESP), PM10 ja kokonaishiukkaset.

Myös Tuukkalan työmaalla suurimmat hiukkaspitoisuudet mitattiin sisäkaton koneellisen purun aikana (kuva 10). Tuona aikana kattorakenteita tippui lattialle, mikä nostatti ympäristön pölyn ilmaan. PM10-jakeen suurin mitattu pitoisuus (4 mg/m^3) oli noin klo 12.40, jolloin sisäkattoa purettiin. Pienempiä, PM1-luokan hiukkasia oli samana aikana korkeimmillaan $1,5 \text{ mg/m}^3$.



Kuva 10. DustTrak-mittaukset Tuukkalan sairaalan 1. kerroksen sisäpurun aikana 26.5.2021. DustTrak-laitteisto mittaa hiukkasia 0,1–15 µm:n välillä valon sirontaan perustuen viidessä eri kokoluokassa: PM1, PM2,5, alveolijae (respirable fraction, RESP), PM10 ja kokonaishiukkaset.

ULKOILMAN PÖLYLASKEUMA

LASKEUMAKERÄIMET

Purkutyömaan aiheuttamaa pölylaskeumaa monitoroitiin asentamalla Pankalammen ja Tuukkalan purkutyömaiden piha-alueille laskeumakeräimet (kuva 11). Näytepisteitä oli molemmilla työmailla kolme kappaletta, ja keräimien sijoitus sovittiin purku-urakoitsijan kanssa.



Kuva 11. Laskeumakeräimen asennusta Pankalammen purkutyömaalla (kuva Juha Vihavainen).

Laskeumakeräimet sijoitettiin eri puolille purkukohdetta, jotta saatiin selville pölyn kulkeutumisen vaikutus koko työmaan ympäristöön. Näytepisteiden sijainnit on esitetty kuvissa 11 (Pankalammen työmaa) ja 12 (Tuukkalan työmaa). Pankalammen työmaalla laskeumakeräin C kaatui purkutöiden yhteydessä 21.4.2021, ja se jouduttiin vaihtamaan. Laskeuman keräysaika keräimillä A ja B oli 29 vuorokautta (31.3.–29.4.2021) ja keräimellä C 32 vuorokautta (22.4.–24.5.2021). Tuukkalan työmaalla laskeuman keräysaika kohteella oli 28 vuorokautta. Laskeumamäärityksiä tehtiin kohteessa kahdessa erässä 18.5.–15.6.2021 ja 16.6.–14.7.2021.



Kuva 11. Laskeumakeräinten sijoituspaikat A, B ja C Pankalammen työmaalla (kuva Paikkatietoikkuna).



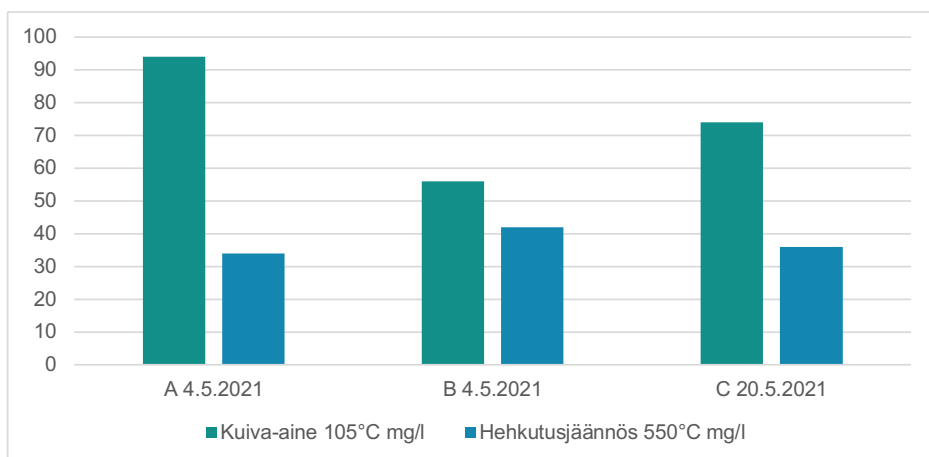
Kuva 12. Laskeumakeräinten sijoituspaikat A, B ja C Tuukkalan purkutyömaalla (kuva Juha Vihavainen 2021).

Laskeumakeräimiä seurattiin mittausten aikana ja tarvittaessa lisättiin nestettä näytteen kuivumisen estämiseksi. Laskeuman määrittäminen suoritettiin suomalaisen standardin SFS 3865 mukaan (standardi on kumottu, mutta sitä sovelletaan edelleen).

Näytteet lähetettiin analysoitavaksi ulkopuoliseen laboratorioon (Eurofins Oy), jossa näytteistä määritettiin kuiva-aine ja hehkutusjäännös sekä alkuaineet (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb ja Zn). Näytteet tutkittiin luonnonvesinäytteenä. Päiväkohtainen arseeni-, kadmium-, nikkeli- ja lyijylaskeuma ($\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{pv}$) määritettiin standardin SFS-EN 15841 mukaisesti.

TULOKSET

Pankalammen työmaan laskeumanäytteiden kuiva-aine- ja hehkutusjäännöspitoisuuksista näkyy Pankalammen purkutyömaalla syntyneen pölyn leviäminen ympäristöön. Kaikissa näytteissä oli yli 30 mg/l hehkutusjäännöstä, joka oletettavasti koostui työmaalta levinneestä purkuaineksesta, muun muassa betonipölystä (kuva 13). Analyysitulosten perusteella näytteenottopisteiden A ja C laskeumanäytteissä oli mukana enemmän orgaanista ainesta. Orgaanista ainesta on voinut päästä näytteisiin näytteenottopisteiden lähellä olleista puista.



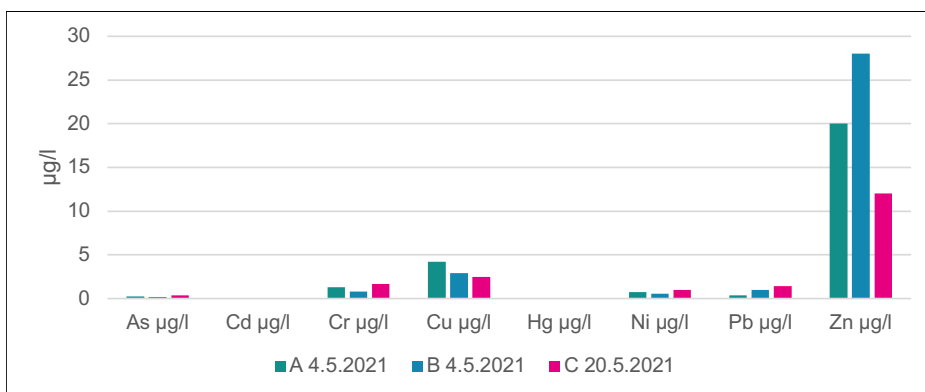
Kuva 13. Kuiva-aine (105 °C) ja hehkutusjäännös (550 °C) Pankalammen laskeumanäytteissä (yksikkö mg/l). Kuiva-aine sisältää orgaanista ja epäorgaanista ainetta. Hehkutusjäännös sisältää epäorgaanista ainetta, joka ei ole palanut 550 °C:n lämpötilassa.

Pankalammen työmaalla suurimmat päiväkohtaiset raskasmetallilaskeumat havaittiin näytepisteessä C (taulukko 2). Näytepiste C oli sijoitettu hammashoitolarakennuksen sekä terveyskeskuksen väliin, jossa oli eniten purkutoimintaa mittausaikana. Myös kyseisen näytepisteen myöhäisempi mittausajanjakso voi vaikuttaa pitoisuuksien nousuun, kun purkutyö oli edennyt terveyskeskusrakennukseen toukokuussa. Keräimet A ja B olivat työmaalla huhtikuussa, keräin C toukokuussa 2021.

Taulukko 2. Pankalammen työmaan laskeumakeräinnäytteiden raskasmetallipitoisuudet ($\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{pv}$) laskettuna standardin SFS-EN 15841 mukaisesti 04/2021–05/2021.

Laskeuma ($\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{pv}$)	Näytepiste A	Näytepiste B	Näytepiste C
Arseeni	0,22	0,2	1,08
Kadmium	0,02	0,02	0,07
Nikkeli	0,72	0,54	2,84
Lyijy	0,37	0,97	3,98

Kuvassa 14 on esitetty laskeumanäytteiden metallipitoisuudet yksikössä $\mu\text{g}/\text{l}$. Näytteistä löytyi eniten sinkkiä, joka voi olla peräisin rakennusmateriaaleista. Sinkkiä on korkeina pitoisuuksina esimerkiksi sinkityissä kattopelleissä sekä maaleissa. Näytteet tutkittiin luonnonvesinäytteenä, joten tuloksia ei voida verrata VNa 113/2017:n mukaisiin ilman raskasmetallien raja-arvoihin (ng/m^3).



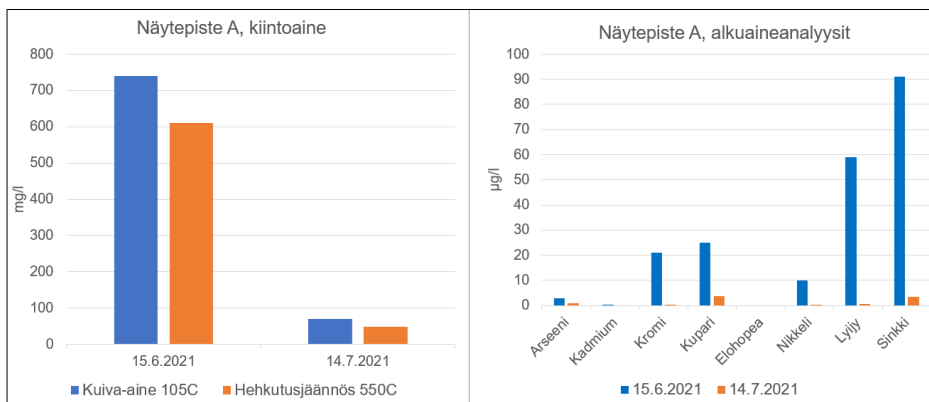
Kuva 14. Raskasmetallipitoisuudet Pankalammen laskeumanäytteissä mittauspisteissä A, B ja C.

Myös Tuukkalan työmaalla laskeumanäytteissä on nähtävissä purkutyömaan vaikutus ympäristöön (taulukko 3). Näytepiste A:n tuloksissa on nähtävissä suurimmat raskasmetallipitoisuudet etenkin touko–kesäkuussa. Näytepiste A oli sijoitettu ABC-huoltamon puoleiseen aitaan, joka oli lähimpänä purkutoimintaa mittausaikana. Myös kesä–heinäkuussa näytepisteessä A oli osittain korkeammat raskasmetallipitoisuudet, vaikka ulkopurku oli jo siirtynyt sairaalan A-osaan, joka oli lähempänä näytepistettä B. Yleisesti pitoisuudet olivat pienempiä kesä–heinäkuun aikana kuin purkutyön alettua toukokuussa.

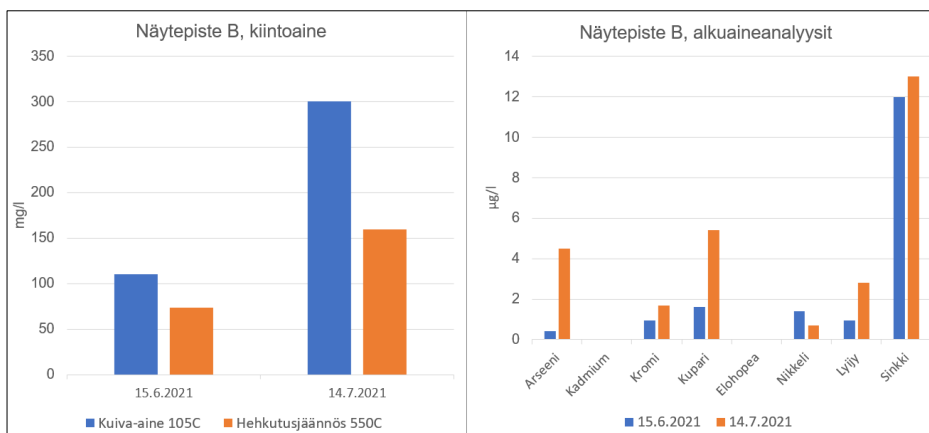
Taulukko 3. Tuukkalan työmaan laskeumakeräinnäytteiden raskasmetallipitoisuudet näytepisteissä A, B ja C kahdella mittausajanjaksolla. Laskeumanäytteistä määritettiin päiväkohtainen arseeni-, kadmium-, nikkeli- ja lyijylaskeuma ($\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{pv}$) standardin SFS-EN 15841 mukaisesti.

Laskeuma ($\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{pv}$)	18.5.–15.6.2021			16.6.–14.7.2021		
	A	B	C	A	B	C
Arseeni	11,35	1,66	0,93	7,94	1,47	1,02
Kadmium	0,85	0,11	0,10	0,02	0,02	0,02
Nikkeli	40,53	5,67	1,5	1,22	0,32	0,28
Lyijy	239,14	3,89	2,19	4,94	0,88	1,20

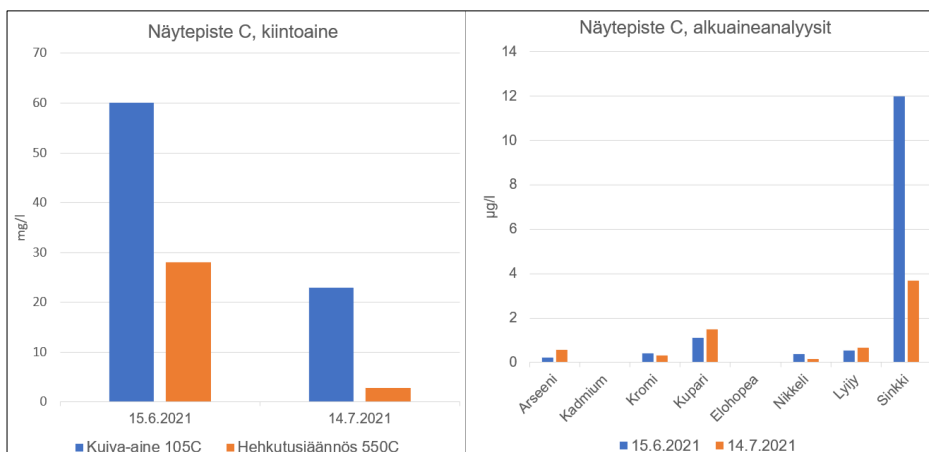
Myös kiintoainepitoisuuksissa näkyy selvästi purkutyön siirtyminen sairaalan B-osasta A-osaan, mikä vaikuttaa pitoisuuksiin eri näytepisteillä (kuvat 15–17). Kesä–heinäkuussa keräin B sijaitsi lähempänä purettavaa rakennusta (A-osa), jolloin siihen kerääntyi enemmän purkupölyä. Metalleista näytteistä löytyi eniten sinkkiä, kuparia ja lyijyä. Näytteistä löytyvä sinkki voi olla peräisin rakennusmateriaaleista.



Kuva 15. Tuukkalan työmaan näytepisteen A laskeumanäytteiden tulokset 18.5.–15.6.2021 sekä 16.6.–14.7.2021.



Kuva 16. Tuukkalan työmaan näytepisteen B laskeumanäytteiden tulokset 18.5.–15.6.2021 ja 16.6.–14.7.2021.



Kuva 17. Tuukkalan työmaan näytepiste C:n laskeumanäytteiden tulokset 18.5.–15.6.2021 ja 16.6.–14.7.2021.

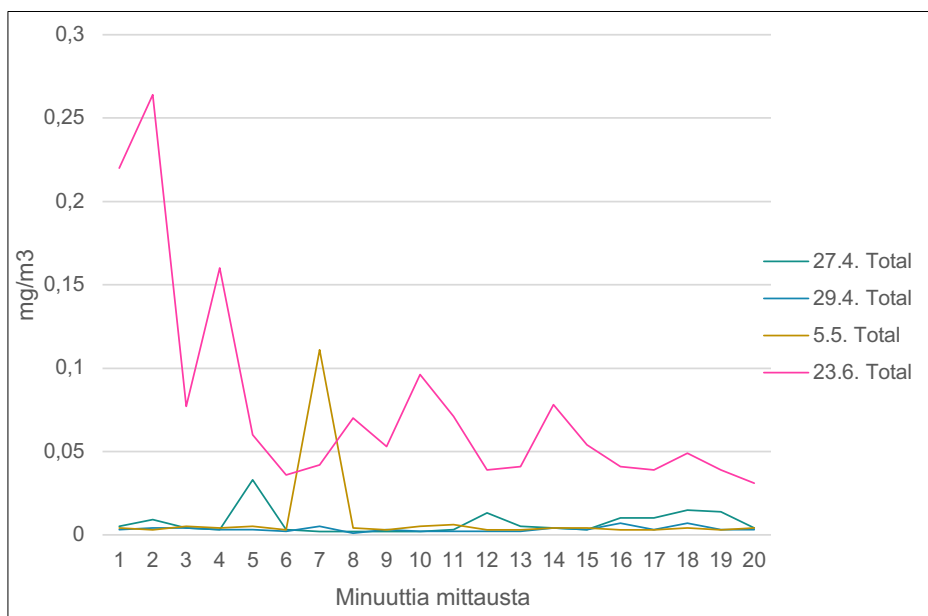
DUSTTRAK-MITTAUKSET ULKOILMASTA

Työmaan pienhiukkaspitoisuuksia seurattiin kenttämittausten yhteydessä Pankalammen ja Tuukkalan purkutyömailla DustTrak DRX model 8533 mittarilla 20 minuutin mittausjaksoina (kuva 18). Pankalammen työmaalla mittaukset tehtiin laskeumakeräimen A vierestä ja Tuukkalan työmaalla laskeumakeräimen B vierestä.



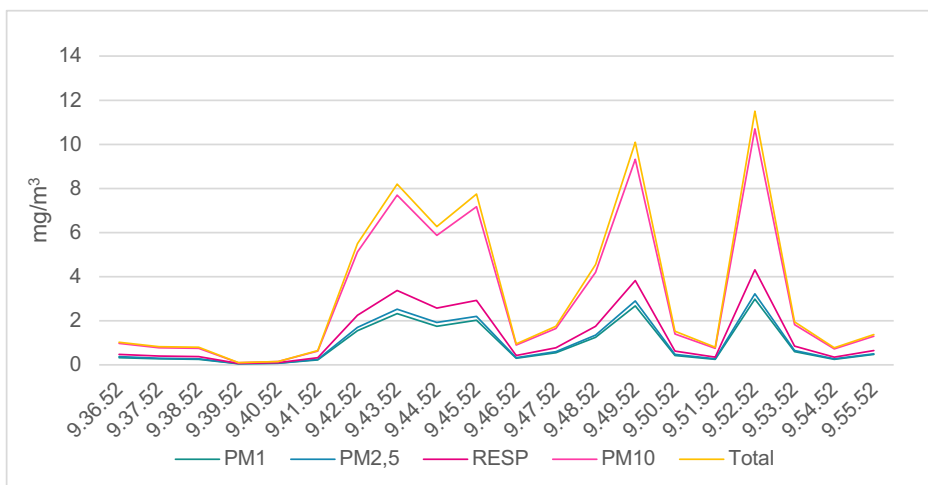
Kuva 18. DustTrak-laitteisto Pankalammen purkutyömaalla (kuva Juha Vihavainen).

Sekä Pankalammen että Tuukkalan työmailla käytettiin pölynsidontamenetelmänä vesisumua, mikä vaikutti DustTrak-mittausten toteuttamiseen, sillä pienet vesipisarot vääristävät optista mittausmenetelmää. Pankalammen työmaalla mittauksia tehtiin vain päivinä, jolloin pölynsidonta vesisumutuksella ei ollut käytössä. Näinä päivinä työmaalla ei kuitenkaan tehty pölyäviä työtehtäviä, joten mittau tulokset jäivät mataliksi (kuva 19). 23.6.2021 tehdyissä mittauksissa ilmanlaadun PM_{10} -raja-arvo hiukkasille ($50 \mu g/m^3$, Ilmatieteen laitos) ylittyi hetkellisesti ($211 \mu g/m^3$).



Kuva 19. DustTrak-ulkomittaukset Pankalammella.

Myös Tuukkalan työmaalla hiukkasmittausten tulokset olivat pääosin pieniä. 23.6.2021 oli ainoa päivä, jolloin pölynsidontalaite oli sijoitettu riittävän kauas mittauspisteestä DustTrak-laitteiston käyttöä varten ja jolloin purkutoiminta oli käynnissä mittauksen aikana (kuva 20). Kuten Pankalammen työmaalla, myös Tuukkalan työmaalla 23.6.2021 tehdyissä mittauksissa ilmanlaadun PM10-raja-arvo hiukkasille ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ylittyi hetkellisesti ($10,7 \text{ mg}/\text{m}^3$). Muissa pölymittauksissa tulokset ovat keskimäärin $0,01\text{--}0,03 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($10\text{--}30 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Tuukkalan työmaalla tehtiin niin sanottu nollamittaus vielä purkutyön päättymisen jälkeen 31.8.2021. Korkein mitattu pölypitoisuus nollamittauksen aikana oli $0,012 \text{ mg}/\text{m}^3$.



Kuva 20. Tuukkalan työmaan pölymittaus 23.6.2021.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että ilmanlaadun hiukkaspitoisuuden raja-arvot ylittivät hetkellisesti purkutyömaan aikana, mutta tilanne tasaantui purkutyömaan loputtua. Raja-arvo on päiväkohtainen, ja hetkellisillä, pistemäisillä kuormituksilla ei todennäköisesti ole suurta vaikutusta lähiympäristön ilman laatuun. Raja-arvon saa ylittää hetkellisesti enintään 35 kertaa vuodessa. (Ilmatieteenlaitos) Verrattaessa tuloksia raja-arvoihin tulee ottaa huomioon, että raja-arvot perustuvat ympäristön tavanomaiseen tilaan.

JOHTOPÄÄTÖKSET

Purkutyömailla syntyvän pölyn vaikutukset työturvallisuuteen ja -terveyteen sekä lähiympäristön ilmanlaatuun on tärkeää huomioida purkutöissä. Työhygieniset mittaukset Pankalammen terveyskeskuksen ja Tuukkalan sairaalan purkutyömailla osoittivat, että pölyhiukkaspitoisuudet olivat odotetusti korkeat sisäpurkuvaiheen aikana. Hengittyvän pölyn kokonaispitoisuus ylitti selvästi viitearvot, mutta PAH- ja VOC-yhdisteiden pitoisuudet eivät olleet haitallisella tasolla.

Purkutyömailla tulee käyttää suojavarusteina silmä- ja kuulosuojaimia, kypärää ja turvajalkineita. Pölyisissä työtehtävissä tulee käyttää myös suojavaatetusta ja riittävän tehokasta hengityssuojainta. (Työsuojeluhallinto 2014) Sekä Pankalammen että Tuukkalan purkutyömailla käytettiin minikaivinkonetta sisäpurkutyössä, joten myös dieselmoottorin aiheuttamat päästöt tulee huomioida työntekijöiden suojavarusteissa. Ennen purkutyön aloittamista on tehtävä riskiarviointi, jonka perusteella tehdään päätökset tarvittavista suojaustoimenpiteistä ja -varusteista (Työsuojeluhallinto 2014). Molemmissa demonstraatiokohteissa työntekijöillä oli asianmukaiset suojavarusteet, jotka täyttivät työturvallisuuslainsäädännön vaatimukset.

Purkutyömaalla muodostuva pöly näkyi selvästi ulkoilman laskeumanäytteiden kuiva-aine- ja tuhkapitoisuudessa. Metallipitoisuudet olivat kuitenkin alhaiset lukuun ottamatta sinkkiä, joka saattoi olla peräisin purkumateriaaleista. Molemmilla purkutyömailla käytettiin pölynsidontamenetelmänä vesisuihkua, joka toimi hyvin pölyn hallinnassa ja esti pölyn leviämistä kauemmas purkutyömaalta.

LÄHTEET

EN 481:1993: Workplace atmospheres - Size fraction definitions for measurement of airborne particles.

Heikkinen, Ville. 2020. Milloin PAH-yhdisteitä kannattaa alkaa tutkimaan? Kainuun Homekoirapalvelu Oy. Internet-artikkeli. Saatavissa: <https://www.homekoirapalvelu.fi/referenssit/80-milloin-pah-yhdisteita-kannattaa-alkaa-tutkimaan>

Ilmatieteen laitos. Ilmanlaadun säädökset ja ohjeet. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/saadokset-ja-ohjeet>

ISO 7708:1995: Air quality – Particle size fraction definitions for health-related sampling.

Ositum Oy. 2-etyyliheksanoli. Saatavissa: <https://www.ositum.fi/2etyyliheksanoli>

Ramboll Oy 2020a. Pankalammen terveyskeskus, B-rakennus (Alatalo), Purkumateriaalikartoitus. Kartoitusraportti YMP1510058949.

Ramboll Oy 2020b. Tuukkalan sairaala, Asbesti- ja haitta-ainekartoitus. Tutkimusraportti 1510055559.

Sisäilmayhdistys ry. 2008. Kemialliset epäpuhtaudet. Saatavissa: <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Sisailmasto/Kemialliset-epapuhtaudet>

Sosiaali- ja terveysministeriö, 2020. Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162457/STM_2020_24_J.pdf

TTL, 2004, Tietoverkko pölyntorjunnan avuksi. Saatavissa: <http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/polyverkko/index.htm>

Työsuojeluhallinto, 2014, Henkilönsuojainten valinta ja käyttö työpaikoilla. Saatavissa: https://www.tyosuojelu.fi/documents/14660/2426906/Henkil%C3%B6nsuoj_val_ ja_k%C3%A4ytt%C3%B6_TSO_11_2014.pdf

PURKUTYÖMAAN HULEVESIEN MONITOROINTIA

Juha Vihavainen & Lasse Hämäläinen &
Vuokko Malk & Hanne Soininen

CityLoops-hankkeessa tutkittiin purkutyömaan työmaavesien vaikutuksia hulevesiin Pankalammen terveyskeskuksen työmaalla. Tuukkalan sairaalan purkutyö osui kuivaan aikaan, eikä hulevesikaivoissa ollut purkutyön aikana riittävästi vettä vesinäytteiden saamiseksi.

Pankalammen työmaalla vesinäytteitä otettiin kolmesta työmaan ympäristössä sijaitsevasta hulevesikaivosta (kuva 1). Näytteet lähetettiin ALS Finland Oy:n akkreditoituun laboratorioon, jossa niistä analysoitiin metalli- ja alkuainepitoisuudet, sulfaatti, kokonaistyyppi, kokonaisfosfori, DOC (liennut orgaaninen hiili), TOC (orgaanisen hiilen kokonaismäärä) sekä fluoridi- ja kloridipitoisuudet. Ennen purkutöiden aloittamista maaliskuussa 2021 näytepisteestä 1 otettiin nollanäyte. Ensimmäiset purkutyön aikaiset näytteet otettiin toukokuussa 2021 ja toiset heinäkuussa 2021. Lisäksi näytteitä otettiin vielä purkutöiden päätyttyä marraskuussa 2021 sekä seurantanäytteet kesäkuussa 2022.



Kuva 1. Ilmakuva vesinäytteenottopisteistä 1, 2 ja 3. Näytteenottopiste 1 on työmaakaivo, piste 2 on kävelytie ja piste 3 poistoputki (kuva: Paikkatietoikkuna).

Kenttäkäyntien yhteydessä vesinäytepisteistä mitattiin YSI ProDSS -vedenlaatusondilla

veden lämpötilaa, sähkönjohtokykyä, pH, ORP (Oxidation Reduction Potential), liuen-
nutta happea sekä sameutta (kuva 2). Kenttämittaria antureineen huollettiin ja kalibroitiin
vähintään kerran kuukaudessa mittaustulosten luotettavuuden varmistamiseksi. Mittausten
yhteydessä laitteen anturit puhdistettiin tislatulla vedellä ja tarkastettiin mittauspisteeltä
toiselle siirtyessä, ettei anturipäihin ollut esimerkiksi kertynyt likaa.

Työmaavesistä tutkittiin myös kiintoainepitoisuutta. Kiintoainemääritystä varten otetut ve-
sinäytteet analysoitiin Xamkin ympäristölaboratoriolla standardin SFS-EN 872 mukaisesti.



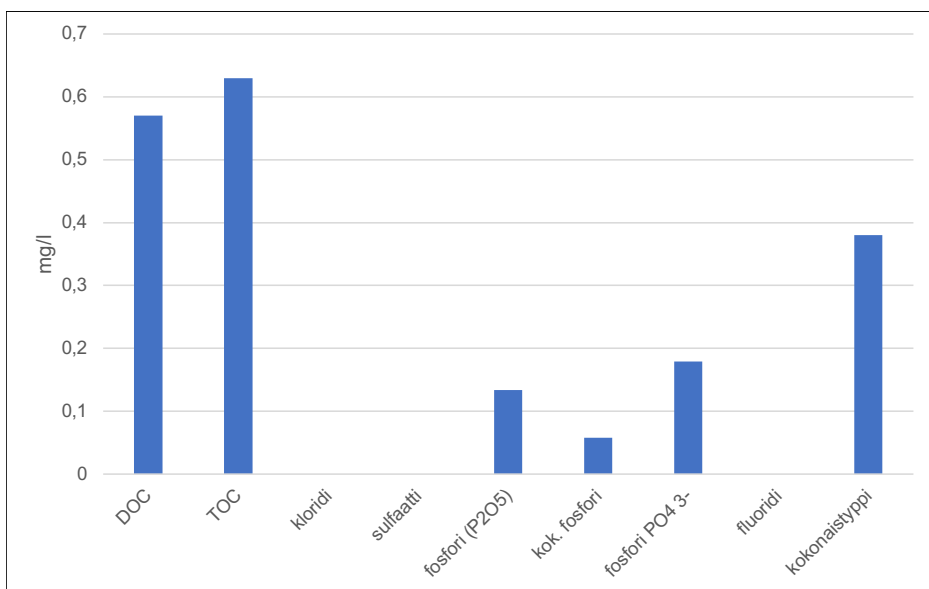
Kuva 2. Vesinäytteenottoa Pankalammen purkutyömaalla. Vasemmalla
vesinäytteenotto ja oikealla Ysi ProDSS -monitorointia (kuvat: Juha Vihavainen).

NÄYTTEENOTON JA MONITOROINNIN TULOKSIA

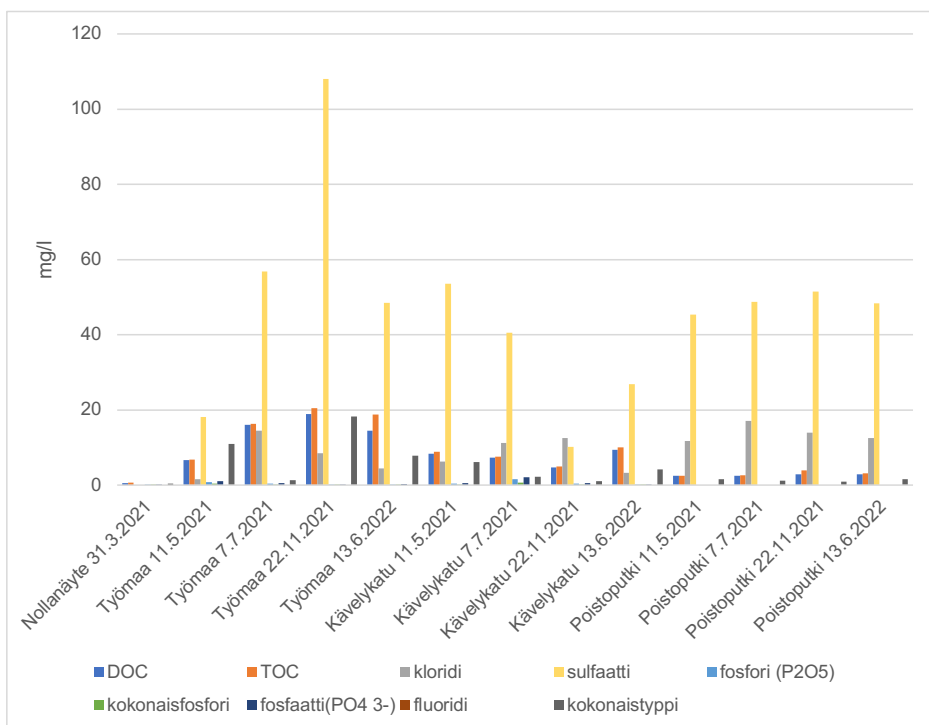
Pankalammen työmaan vesinäytteissä näkyy purkutöiden vaikutus sekä analysoitujen ra-
vinteiden, alkuaineiden ja kiintoaineen että kenttämittausten osalta. Purkutöiden aikana
otettujen näytteiden tuloksia verrattiin ennen purkamista otettuun työmaakaivon kontrol-
linäytteeseen sekä purkutöiden päättymisen jälkeen otettuihin näytteisiin.

RAVINTEET, ANIONIT JA ORGAANINEN HIILI

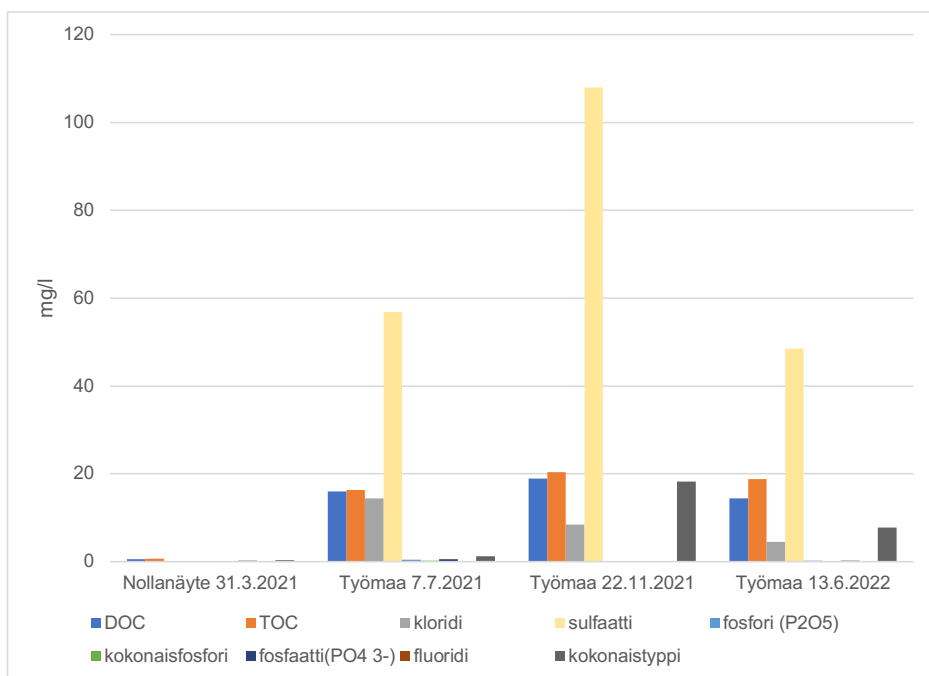
Työmaan aikana nähtiin nousua kokonaistyyppi-, sulfaatti-, kloridi-, TOC- ja DOC-pi-
toisuuksissa. Kuvassa 3 on esitetty kontrollinäytteestä ja kuvassa 4 eri näytepisteistä eri
mittausajankohtina mitatut pitoisuudet. Purkutyömaatoiminnan päätyttyä pitoisuudet
olivat pysyneet työmaan näytepisteessä koholla vielä vuosi purkutyön jälkeen (kuva 5).
Tuloksissa voi näkyä myös luontaisen vuodenaikaisvaihtelun vaikutus.



KUVA 3. Pankalammen työmaavesien nollanäytteen 31.3.2021 ravinnepitoisuudet. Nollanäyte on otettu työmaakaivosta ennen koneellisen purkutyön aloitusta.



KUVA 4. Pankalammen työmaan vesinäytteiden ravinnepitoisuuksia. Nollanäyte 31.3.2021 on otettu työmaakaivosta ennen koneellisen purkutyön aloitusta.



KUVA 5. Pankalammen työmaan näytepisteiden ravinnepitoisuuksia mittausjakson aikana. Nollanäyte 31.3.2021 on otettu työmaakaivosta ennen koneellisen purkutyön aloitusta.

Hulevesien haitta-aineille ei ole Suomessa annettu erityisiä pitoisuusrajoja. Analysoituja pitoisuuksia voidaan verrata suuntaa antavasti Tukholman läänin hulevesien raja-arvoihin (Riktvärdesgruppen 2009, taulukot 1 ja 2). Alempi raja-arvo tarkoittaa suoraan pieneen vesistöön tulevan huleveden raja-arvoa, ylempi raja-arvo puolestaan tarkoittaa hulevesiojan kautta suureen järveen tai mereen tulevan huleveden raja-arvoa. (Airola ym. 2014)

Purkutyömaan aikana fosfori- ja typpipitoisuudet ylittivät Tukholman läänin raja-arvot työmaakaivon ja kävelykadun näytepisteissä. Purun valmistuttua fosforipitoisuus oli tasaantunut, eivätkä pitoisuudet enää 22.11.2021 ylittäneet Tukholman läänin raja-arvoja yhdeksäkään näytepisteessä. Typpipitoisuudet ylittivät raja-arvot vielä purkutoiminnan loputtua. Pankalampeen johtavassa poistoputkessa raja-arvot eivät ylittyneet missään vaiheessa.

Taulukko 1. Työmaavesien analyysituloksia 31.3.–11.5.2021 (ALS Finland Oy). Taulukossa esitettyä myös Tukholman läänin alempi raja-arvo kokonaisfosforille ja -tyypelle.

Parametri (mg/l)	Nolla 31.3.2021	Työmaa 11.5.2021	Työmaa 7.7.2021	Kävelykatu 11.5.2021	Kävelykatu 7.7.2021	Poistoputki 7.7.2021	Poistoputki 11.5.2021	Tukholman läänin raja-arvo
DOC	0,57	6,66	16	8,32	7,35	2,48	2,48	
TOC	0,63	6,81	16,3	8,91	7,61	2,54	2,52	
Kloridi	<1,00	1,62	14,4	6,19	11,2	17,1	11,7	
Sulfaatti	<5,00	18,1	56,8	53,6	40,5	48,7	45,3	
Fosfori (P ₂ O ₅)	0,134	0,756	0,425	0,387	1,56	<0,120	<0,120	
Kokonaisfosfori	0,058	0,33	0,186	0,169	0,683	<0,050	<0,050	0,16
Fosfaatti (PO ₄ ³⁻)	0,179	1,01	0,569	0,517	2,1	<0,150	<0,150	
Fluoridi	<0,200	<0,200	<0,200	<0,200	<0,200	<0,200	<0,200	
Kokonaistyyppi	0,38	11	1,28	6,18	2,21	1,2	1,58	2

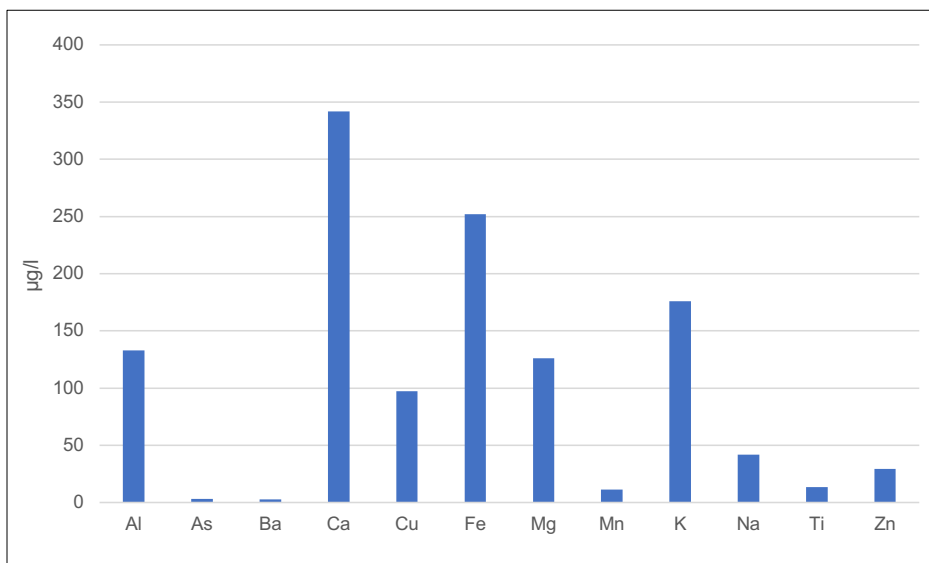
Taulukko 2. Työmaavesien analyysituloksia purkutoiminnan jälkeen 22.11.2021 ja 13.6.2022 (ALS Finland Oy). Taulukossa esitettyä myös Tukholman läänin alempi raja-arvo kokonaisfosforille ja -tyypelle.

Parametri (mg/l)	Työmaa 22.11.2021	Työmaa 13.6.2022	Kävelykatu 22.11.2021	Kävelykatu 13.6.2022	Poistoputki 22.11.2021	Poistoputki 13.6.2022	Tukholman läänin raja-arvo
DOC	18,9	14,4	4,7	9,41	2,84	2,87	
TOC	20,4	18,8	4,98	9,97	3,86	3,14	
Kloridi	8,48	4,46	12,5	3,29	14	12,5	
Sulfaatti	108	48,5	10,2	26,8	51,5	48,4	
Fosfori (P ₂ O ₅)	0,121	0,178	0,377	0,133	<0,120	<0,120	
Kokonaisfosfori	0,053	0,077	0,164	0,058	<0,050	<0,050	0,16
Fosfori (PO ₄ ³⁻)	0,162	0,238	0,504	0,178	<0,150	<0,150	
Fluoridi	<0,200	<0,200	<0,200	<0,200	<0,200	<0,200	
Kokonaistyyppi	18,2	7,78	1,05	4,14	0,96	1,58	2

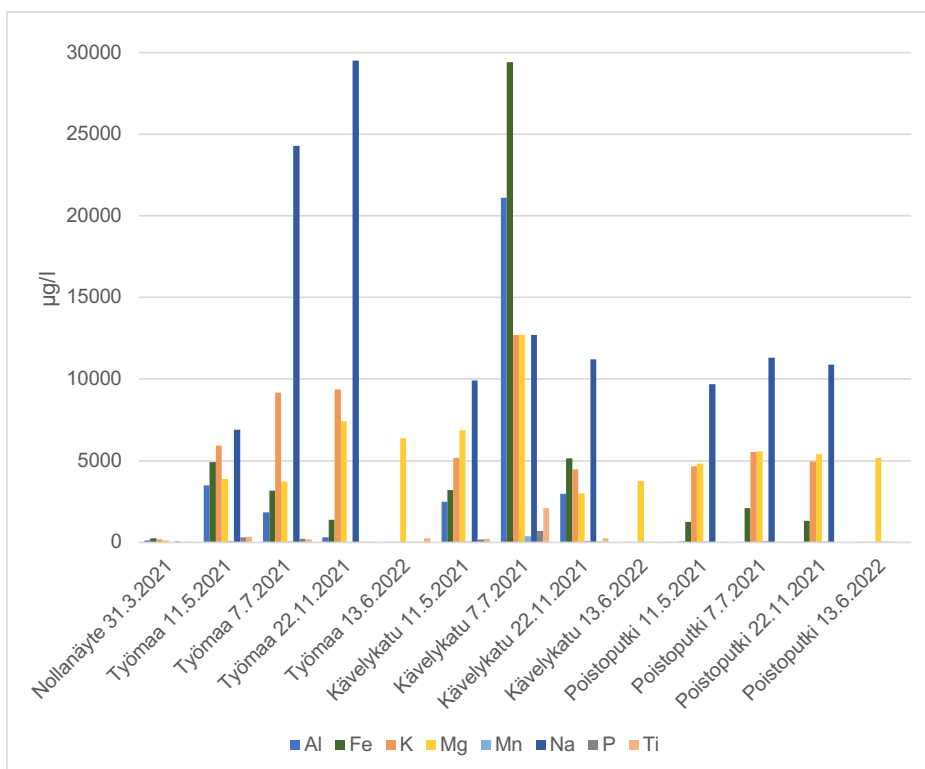
Vesinäytteistä havaitut ravinteet, anionit ja orgaaninen hiili eivät välttämättä ole peräisin purkumateriaaleista, vaan mahdollisesti maaperästä. Purkutöiden aikana työkoneet liikkuvat työmaalla rikkoen nurmikoiden pintoja, jolloin multa pääsi kulkeutumaan hulevesien mukana. Purkutyö alkoi maaliskuussa 2021 (koneellinen ulkopurku huhtikuun lopussa) ja päättyi elokuussa 2021.

ALKUAINEEET JA METALLIT

Alkuaineanalyysissä suurimmat pitoisuudet olivat mahdollisesti maaperästä peräisin olevia alkuaineita. Kuvassa 6 on esitetty alkuainepitoisuudet kontrollinäytteessä ja kuvassa 7 eri näytepisteissä eri mittausajankohtina. Tulokset on esitetty myös taulukoissa 3 ja 4. Suurimmat kasvut purkutoiminnan aikana näkyivät natriumin, raudan sekä alumiinin pitoisuuksissa.

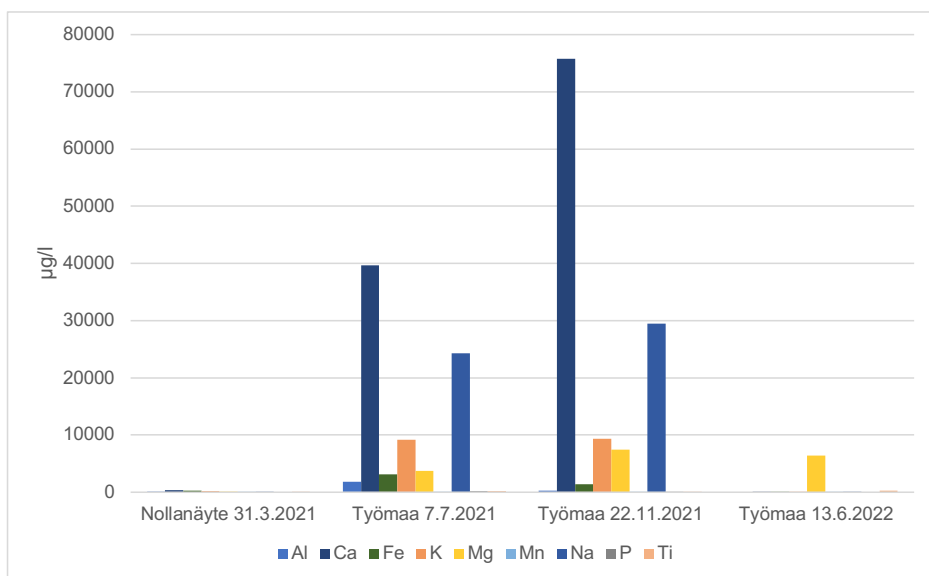


Kuva 6. Pankalammen työmaavesien nollanäytteen 31.3.2021 alkuainepitoisuudet. Nollanäyte on otettu työmaakaivosta ennen koneellisen purkutyön aloitusta.



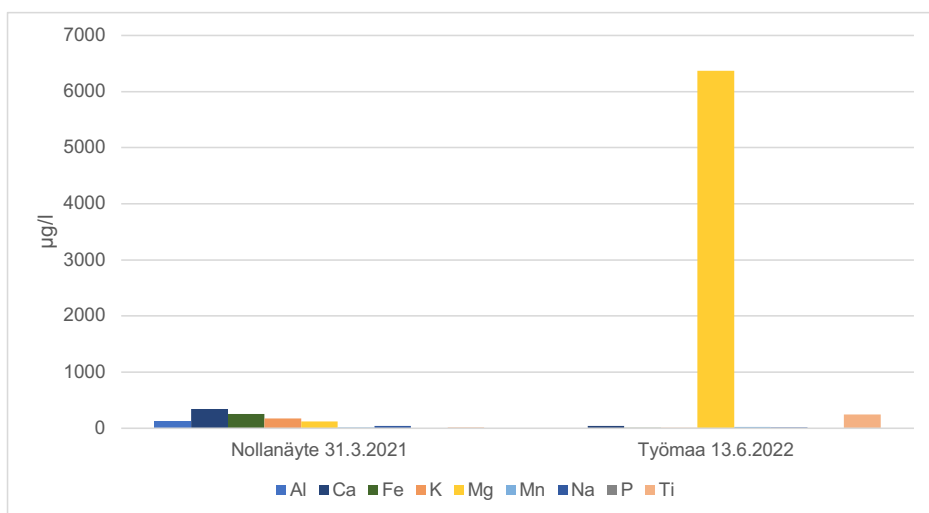
Kuva 7. Pankkalammen työmaan vesinäytteiden alkuainepitoisuuksia. Nollanäyte 31.3.2021 on otettu työmaakaivosta ennen koneellisen purkutyön aloitusta.

Myös kalsiumin pitoisuus nousi purkutoiminnan aikana. Kalsium voi olla peräisin purkutyömaan betonista kuten myös alumiini ja rauta, sillä kalkkikivestä saatavan kalsiumkarbonaatin (CaCO_3) lisäksi sementin valmistuksessa käytetään piioksidia (SiO_2), rautaoksidia (Fe_2O_3) ja alumiinioksidia (Al_2O_3) (Finnsementti s.a.). Magnesiumin pitoisuuksia lukuun ottamatta kaikki alkuainepitoisuudet ovat pienentyneet työmaan näytepisteessä purkutöiden päättymisen jälkeen. Kuvassa 8 on esitetty purkutyömaan vaikutus työmaakaivon vesinäytteiden alkuainepitoisuuksiin.



Kuva 8. Pankalammen työmaakaivon vesinäytteiden alkuainepitoisuuksia mittausjakson aikana.

Kuvassa 9 on esitetty vielä tarkemmin työmaakaivosta otetun nollanäytteen sekä 13.6.2022 otetun näytteen alkuainepitoisuudet. Pitoisuudet olivat noin vuosi purkutoiminnan päättymisen jälkeen pienentyneet, mutta esimerkiksi magnesiumin pitoisuus oli edelleen koholla.



Kuva 9. Pankalammen työmaan nollanäytteen ja noin vuosi purkutoiminnan jälkeen 13.6.2022 otetun vesinäytteen alkuainepitoisuuksia.

Taulukko 3. Työmaaavesien alkuaineiden analyysituloksia 31.3.–11.5.2021 (ALS Finland Oy). Nollanäyte 31.3.2021 on otettu työmaa-näytestä ennen koneellisen purkutyon aloitusta. Taulukossa esitettynä myös Tukholman läänin alemmat raja-arvot.

Alkuaine (µg/l)	Nolla 31.3.2021	Työmaa 11.5.2021	Työmaa 7.7.2021	Kävelykatu 11.5.2021	Kävelykatu 7.7.2021	Poistoputki 11.5.2021	Poistoputki 7.7.2021	Tukholman läänin raja- arvo
Al	133	3 510	1 840	2 480	21 100	55	30,4	
Ag	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	
As	3,28	1,6	<1,0	<1,0	8,9	<1,00	<1,00	
B	<10	53	81	19	27	13	14	
Ba	2,9	68,8	51,4	44	162	40,3	47,6	
Be	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	0,79	<0,20	<0,20	
Ca	342	31 100	39 700	33 200	35 800	28 400	27 700	
Cd	<0,020	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	0,059	0,028	0,4
Co	<0,50	1,78	1,83	1,49	13,6	1,35	1,1	
Cr	1,04	10,1	5,9	7,2	64,9	<0,20	0,21	10
Cu	97,3	69,1	28,4	11,5	54,9	2,3	1,3	18
Fe	252	4 930	3 160	3 190	29 400	1 250	2 090	
Hg	0,0088	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020	<0,0050	<0,0050	0,03
K	176	5 940	9 170	5 170	12 700	4 680	5 540	
Li	<1,0	2,4	1,5	2,4	23,3	<1,0	1,1	
Mg	126	3 900	3 720	6 860	12 700	4 820	5 580	
Mn	11,4	80,6	60,4	61,2	393	52,5	85,2	
Mo	<1,0	1,5	6,3	1,6	3,4	<1,0	<1,0	
Na	42	6 910	24 300	9 920	12 700	9 680	11 300	
Ni	<2,00	4,8	3,6	9,3	36,8	7,93	4,13	15
P	<50,0	317	223	189	710	<50,0	<50,0	160
Pb	0,761	8,5	3,5	3,8	19,1	<0,500	<0,500	8
Sb	0,053	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	0,055	<0,050	
Se	<1,00	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<1,00	<1,00	
Sn	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	1,6	<1,0	<1,0	
Ti	13,4	346	202	222	2 100	1	2,4	
Tl	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	
U	<0,10	0,39	0,46	0,32	4,14	0,15	<0,10	
V	<1,0	10,6	6,1	7,7	58,7	<1,0	<1,0	
Zn	29,4	68	26,9	40,9	122	33,2	12,8	75

Taulukko 4. Työmaavesien alkuaineiden analyysituloksia työmaan jälkeen 22.11.2021 sekä 13.6.2022 (ALS Finland Oy). Taulukossa esitettyinä myös Tukholman läänin alemmat raja-arvot.

Alkuaine (µg/l)	Työmaa 22.11.2021	Työmaa 13.6.2022	Kävelykatu 22.11.2021	Kävelykatu 13.6.2022	Poistoputki 22.11.2021	Poistoputki 13.6.2022	Tukholman läänin ra- ja-arvot
Ag	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	
Al	309	2 350	2 980	111	20,2	21,8	
As	1,2	1,2	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	
B	72	0,06	<10	0,032	11	0,018	
Ba	82,8	63,6	48,2	37,2	53,5	47,1	
Be	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	
Ca	75 800	46,2	19 000	29,5	24 600	28,8	
Cd	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	0,4
Co	0,69	0,72	3,87	0,75	1,07	1,12	
Cr	<5,0	<5,0	8,4	<5,0	<5,0	<5,0	10
Cu	90,7	73,7	6,5	9,8	1,1	2,2	18
Fe	1 390	2,23	5 160	0,729	1 320	1,02	
Hg	<0,020	0,068	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020	0,03
K	9 380	6,41	4 460	5,12	4 970	5,39	
Li	<1,0	4	5,3	<1,0	1	<1,0	
Mg	7 420	6 370	3 020	3 740	5 420	5 180	
Mn	31,9	25,4	74,8	37,6	69,7	51,5	
Mo	3,1	3,9	1,1	1,3	<1,0	1,1	
Na	29 500	18,1	11 200	10,3	10 900	10,1	
Ni	<3,0	<3,0	4,7	<3,0	3,8	6,1	15
P	21	<0,020	56	<0,020	<20	<0,020	160
Pb	1,7	8,6	1,7	<1,0	<1,0	<1,0	8
Sb	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	
Se	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	
Sn	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	
Ti	21,8	242	264	6	<5,0	<5,0	
Tl	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	
U	0,78	0,56	0,48	0,2	0,1	0,12	
V	<5,0	<5,0	9,8	<5,0	<5,0	<5,0	
Zn	14,4	35,6	45,7	23	33	26,3	75

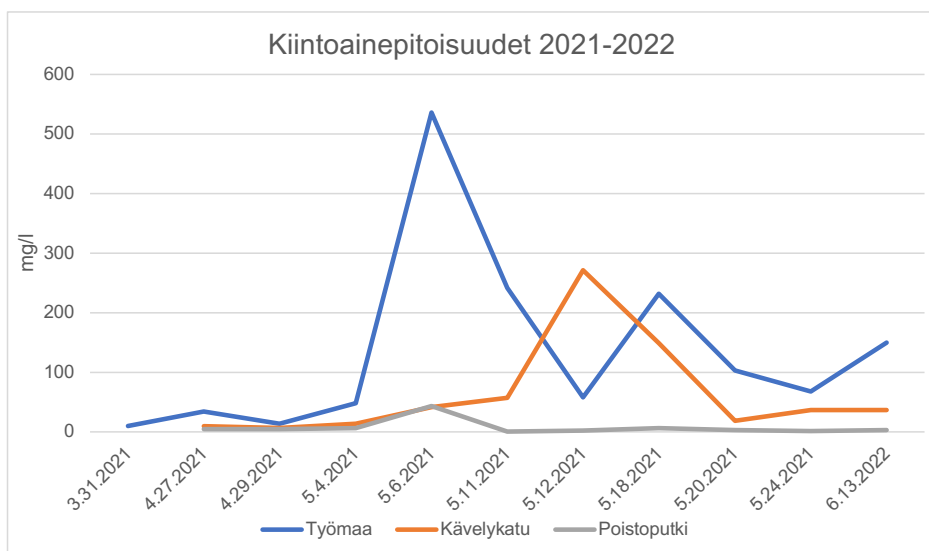
Vesinäytteiden kromi-, kupari-, lyijy-, nikkeli- ja sinkkipitoisuudet ylittivät Tukholman läänin raja-arvot työmaan aikana. Näiden metallien osalta pitoisuuksissa oli huomattavissa nousua purkutyömaan aikana verrattaessa nollanäytteeseen, erityisesti purkutyömaan viereisessä kävelykadun näytepisteessä 7.7.2021. Alkuainepitoisuudet olivat laskeneet 13.6.2022 mennessä Tukholman läänin raja-arvojen alapuolelle, pois lukien kupari, joka ylitti työmaakaivon näytepisteessä Tukholman läänin raja-arvot 13.6.2022. Huomioon tulee kuitenkin ottaa, että kuparin raja-arvot ylittyivät myös ennen purkutoiminnan aloittamista 31.3.2021. Myös magnesiumipitoisuus oli koholla vielä 13.6.2022 verrattuna nollanäytteeseen 31.3.2021.

KIIINTOAINE

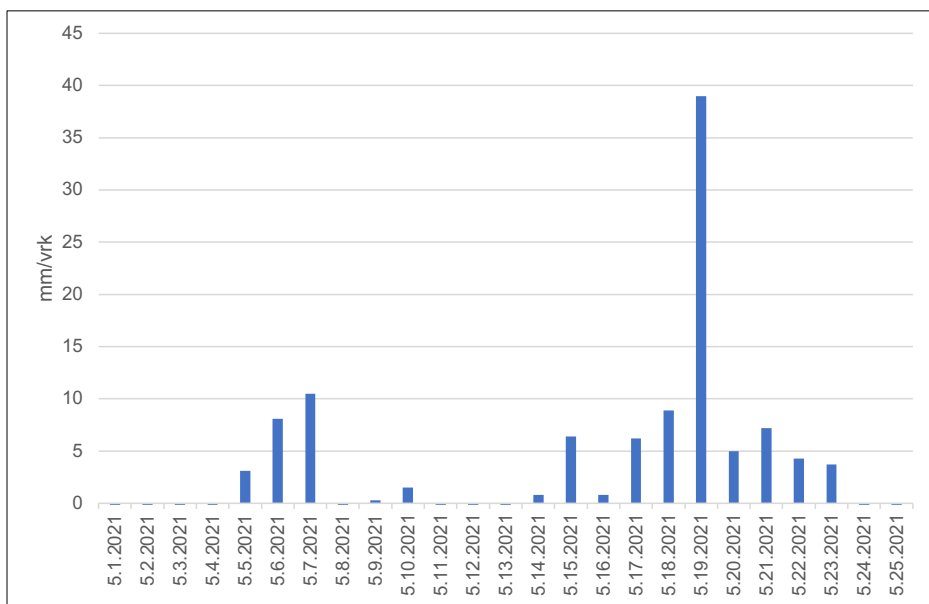
Kiintoainenäytteissä näkyy sään vaikutus työmailta kulkeutuviin hulevesiin (kuvat 10 ja 11). Työmaänäytteissä huomautetut piikit kiintoaineen määrässä 6.5.2021 sekä 18.5.2021 tapahtuivat runsassateisina päivinä. Työmaa-alueen pintamaa oli rikkoutunut työkoneiden liikkuamisen sekä kaivutöiden seurauksena, jolloin hulevesien mukana kulkeutui suuria määriä kiintoainesta.

Kiintoainepitoisuudet ylittivät Tukholman läänin raja-arvot (40–75 mg/l) ajoittain. Myös ”Työmaavesien laadunhallinta haltuun” -oppaassa (Vilminko ym. 2022) perustason kohteelle annettu kiintoaineen ohjeellinen raja-arvo 300 mg/l ylittyi työmaakaivossa 6.5.2021. Kävelykadun näytepisteen kiintoainesmäärään vaikutti todennäköisesti kadulla tuulen mukana kulkeutunut pöly sekä roskat, joista syntyi piikki 12.5.2021 otettuun näytteeseen. Poistoputken kiintoainepitoisuus oli alhainen koko mittausjakson ajan.

Kiintoainemittausten perusteella työmaalla syntyneen kiintoaineen vaikutus hulevesiin oli väliaikaista, ja hulevesien kuljettama pöly sekä maa-aines eivät kulkeutuneet suurina pitoisuuksina pitkiä matkoja. Vaikka 31.3.2021 otettuun kontrollinäytteeseen verrattuna kiintoaineen määrä työmaakaivossa oli koholla koko purkutoiminnan ajan, ei työmaalla syntyvä kiintoaines aiheuttanut merkittävää kuormitusta poistoputken kiintoainepitoisuuteen. Kiintoaineessa 6.5.2021 tapahtunut piikki johtui sateen aiheuttamasta mullan putoamisesta näytekaivoon.



Kuva 10. Kiintoaineanalyytit Pankalammen mittauspisteistä. Analyysit on tehty Xamkin ympäristölaboratoriossa.



Kuva 11. Vuorokauden sademäärä toukokuussa 2021 (Ilmatieteenlaitos).

KENTTÄMITTAUKSET

Taulukossa 5 on esitetty työmaan hulevesikaivosta otettujen YSI ProDSS mittauksen tulokset. YSI ProDSS -mittaustuloksissa on huomattavissa sähkönjohtavuuden asteittaista nousua työmaakaivon (näytepiste 1) vedessä. Korkeimmillaan sähkönjohtavuus oli viimeisenä mittauspäivänä 31.8.2021, lukema 424 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sähkönjohtavuuden nousu työmaakaivon vedessä saattaa johtua purkutöiden lisäksi myös vuodenajan vaihtelusta. pH pysyi koko mitausjakson ajan työmaavesien ohjeellisten raja-arvojen (pH 6–9, Vilminko ym. 2022) sisällä.

Taulukko 5. Työmaakaivon kenttämittaukset. Analyysit tehty YSI ProDSS mittalaitetta käyttäen.

TYÖMAAN HULEVESIKAIVO						
Päivämäärä	Lämpötila	Happi (%)	Happi (mg/l)	Sähkönjohtokyky $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH	Sameus FNU
9.4.2021	3,3	94,4	12,3	7	8,51	75
13.4.2021	5,7	102	12,8	14	7,81	12,8
20.4.2021	5,8	76,2	9,5	56	7,32	9,4
27.4.2021	4,9	997	12,2	219	7,44	29,9
29.4.2021	5,6	91	11,3	169	7,66	12,2
4.5.2021	5,7	96	11,8	231	7,59	37,4
5.5.2021	6,1	85,1	10,4	254	7,59	38
6.5.2021	5	99	12,3	344	7,93	351
31.8.2021	13,9	87,5	9	424	6,67	17,3
13.6.2022	8,7	82,1	9,38	377,2	6,66	43,0

Kävelykadun mittapistestä (taulukko 6) tuloksissa havaitut muutokset purkutyömaan aikana olivat pienemmät kuin työmaakaivon mittauksissa. Auto- ja kävelytieltä kulkeutuvat epäpuhtaudet olivat todennäköisesti suurin syy kävelykadun mittapisteen tuloksiin. Suurimmat muutokset tapahtuivat sameuden tuloksissa, ja syynä oli teiltä kulkeutunut pöly.

Taulukko 6. Kävelykadun kenttämittaukset. Analyysit tehty YSI ProDSS mittalaitetta käyttäen.

KÄVELYKADUN KAIVO						
Päivä-määrä	Lämpö-tila	Happi (%)	Happi (mg/l)	Sähkön-johto-kyky $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH	Sameus FNU
13.4.2021	6,9	95,4	11,5	271	7,22	1,7
20.4.2021	4	62,7	8,2	201	6,91	125
27.4.2021	4,3	92,5	11,9	229	7,3	9,6
29.4.2021	4,5	92,1	11,8	324	7,5	5,5
4.5.2021	4,7	87,2	11	363	7,36	2,1
5.5.2021	4,7	93,1	11,8	375	7,4	2,5
6.5.2021	3,8	95,2	12,2	163	8,27	116
31.8.2021	14,8	30,6	3,1	133	6,83	5,3
13.6.2022	10,4	34,3	3,8	351	6,72	3,1

Pankalammen poistoputken mittapiste oli kenttämittauksissa tutkimuksen tasalaatuisin johtuen putken läpi kulkevasta suuresta vesimäärästä (taulukko 7). Putkeen päätyi vettä suurelta valuma-alueelta, jolloin työmaatoiminnasta aiheutuneet muutokset eivät erotu tuloksista. Ainoa poikkeama mittaustuloksissa on 6.5.2021 tapahtunut sameuden piikki, joka johtui todennäköisesti sateen mukana kulkeutuneesta katupölystä.

Taulukko 7. Poistoputken kenttämittaukset. Analyysit tehty YSI ProDSS mittalaitetta käyttäen.

POISTOPUTKI PANKALAMPEEN						
Päivä-määrä	Lämpö-tila	Happi (%)	Happi (mg/l)	Sähkön-johto-kyky $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH	Sameus FNU
13.4.2021	4,8	93,1	11,9	185	7,33	5,7
20.4.2021	6,1	97,6	12,1	268	6,8	4
27.4.2021	6,1	100	12,4	273	7,24	9
29.4.2021	6,7	99,9	12,1	288	7,48	3,7
4.5.2021	6,7	99,2	11,9	275	7,38	8,9
5.5.2021	6,7	98,3	11,8	288	7,4	3,5
6.5.2021	5,8	97,6	11,9	158	8,24	55,3
31.8.2021	13,8	94,4	9,7	250	6,77	6,7
13.6.2022	11,2	97,9	10,6	270	7,12	4,8

TULOSTEN ARVIOINTIA JA KEHITYSEHDOTUKSIA

Purkutyön vaikutus näkyi selvästi Pankalammen purkupaikalta otetuissa hulevesinäytteissä verrattuna tilanteeseen ennen purkutyön alkamista. Kiintoaineen, ravinteiden ja alkuaineiden (kuten betonin sisältämän kalsiumin) pitoisuudet ja sähkönjohtavuus kohosivat purkupaikan hulevesikaivosta otetuissa näytteissä purkutyön aikana. Kiintoainepitoisuudet laskivat pian purkutyön jälkeen, mutta joidenkin aineiden, kuten magnesiumin, sulfaatin ja kloridin, pitoisuudet nousivat vielä vuosi purkamisen jälkeen. Pitoisuudet nousivat myös läheiseen lampeen johtavassa poistoputkessa. Normaali kausivaihtelu voi vaikuttaa tuloksiin. Orgaanisia haitta-aineita ei analysoitu näytteistä. Purkupaikalla ei ollut käytössä hulevesien paikalliskäsittelyä, vaan vedet johdettiin suoraan kaupungin hulevesiverkostoon.

Mikkelin tulevissa rakennus- ja purkuhankkeissa tulisi kiinnittää huomiota hulevesien laatuun erityisesti herkkien vesistöjen läheisyydessä. Yhden rakennus- tai purkupaikan vaikutukset voivat olla tilapäisiä, mutta usean kohteen yhteisvaikutus voi olla merkittävä vastaanottavissa vesistöissä. Vaikutuksia voitaisiin vähentää estämällä eroosiota ja esimerkiksi suodattimilla, joita voidaan asentaa hulevesikaivoihin vedenkäsittelyä varten. Viime aikoina on julkaistu oppaita työmaavesien käsittelystä. Ne antavat ratkaisuja rakennustyömaiden suunnitteluun vesistökuormituksen estämiseksi.

LÄHTEET

Airola, J., Nurmi, P., Pellikka, K., 2014. Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen julkaisuja 12/2014. Helsingin kaupunki. PDF-tiedosto. Saatavissa: <https://www.hel.fi/static/ymk/julkaisut/julkaisu-12-14.pdf>

Finnsementti s.a. Sementin valmistus. Saatavissa: <https://finnsementti.fi/palvelut/tietoa-sementista/valmistus/>

Riktvärdesgruppen 2009. Förslag till riktvärden för dagvattenutsläpp. Regionala dagvatten-nätverket i Stockholms län. Regionplane- och trafikkontoret. Stockholms läns landsting. 20 s

Vilminko H, Leskinen P, Honkala N, Simi-Virahsawmy J, Yliruusi H, Nenonen A, Rantakari M, Korhonen A, Rautakorpi S, Auranen J 2022. Työmaavesien laadunhallinta haltuun – Opas kaupungeille ja kunnille. Turun ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-216-824-5>

RAKENNUSMATERIAALIEN HAITTA-AINEET

Leena Pekurinen & Juha Vihavainen & Vuokko Malk

Purettavissa rakennuksissa on usein haitallisia aineita, jotka tulee paikantaa ja poistaa ennen purkamista. Asbesti- ja haitta-ainekartoitus eli AHA-kartoitus onkin pakollinen toimenpide ennen vuotta 1994 valmistuneille rakennuksille, jotta purkuluvan voi saada. CityLoops-hankkeen monitorointikohteissa kiinteistön omistaja oli teettänyt Tuukkalan purkukohteeseen asbesti- ja haitta-ainekartoituksen ja Pellosniemen kohteeseen asbestikartoituksen ennen purkutoimenpiteitä.

CityLoops-hankkeessa otettiin Tuukkalan ja Pellosniemen purkutyömailta materiaalinäytteitä, joista analysoitiin haitallisten aineiden pitoisuuksia ulkopuolisessa laboratoriossa. Tällä haluttiin tutkia tarkemmin haitta-aineiden pitoisuuksia materiaalinäytteissä. Lisäksi valituista näytteistä analysoitiin alkuainepitoisuuksia Niton XRF -kenttämittarilla Xamkin ympäristölaboratoriossa. Tarkoituksena oli testata analysaattorin toimivuutta rakennusmateriaaleille.

TUUKKALAN TIILI- JA LAASTINÄYTTEET

Tuukkalan sairaalalla toteutettiin ennen purkamista 3.7.2020 AHA-kartoitus, jonka tiilajana oli Mikkelin kaupunki ja toteuttajana Ramboll Oy. AHA-kartoituksen tarkoituksena oli paikallistaa rakennuksissa esiintyvä asbesti sekä muita haitallisia aineita sisältävät materiaalit. Sairaalan A- ja B-osasta kerättyjen kokoomanäytteiden perusteella tiilien vanadiinin liukoisuus ylitti valtioneuvoston asetuksessa eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa (843/2017, MARA-asetus) määritetyt raja-arvot, eikä tiilijätettä voitu lähtökohtaisesti hyödyntää maarakentamisessa. Sairaalan A-osan tiilien vanadiinin liukoisuus oli 4,8 mg/kg ja B-osan 6,7 mg/kg.

CityLoops-hankkeessa Tuukkalan sairaalan A-osan sisäänkäynnistä sekä B-osasta kerättiin tarkempia materiaalinäytteitä purkutyömaan aikana 27.5.2021. Näytteet otettiin erikseen muurauslaastista, pysty- ja vaakasaumojen saumalaastista sekä tiilistä. Tavoitteena oli selvittää, olivatko AHA-kartoituksessa aiemmin havaitut kohonneet vanadiinipitoisuudet peräisin erityisesti laastista vai tiilistä. Näytteistä analysoitiin myös metallipitoisuudet ALS Finland Oy:n laboratoriossa.

PELLOSNIEMEN MATERIAALINÄYTTEET

Pellosniemen kohteessa oli tehty Mikalon Oy:n tilaamana asbestikartoitus ennen purkutyötä, mutta ei haitta-ainekartoitusta. CityLoops-hankkeessa Pellosniemen purkutyömaalta kerättiin tiili- ja betoninäytteitä purkutyön edetessä. Näytteistä analysoitiin raskasmetallipitoisuudet, PAH- ja PCB-yhdisteet sekä tiettyjä POP- ja VOC-yhdisteitä. Esimerkiksi POP- ja VOC-yhdisteitä ei vielä kovin usein ole sisällytetty purkukohteiden haitta-ainekartoituksiin. POP-yhdisteitä on kuitenkin käytetty useissa rakennusmateriaaleissa, kuten elementtien ja ikkunoiden saumauksissa, pinnoitteissa ja liimoissa, eristeissä sekä rakennusten sähkö- ja elektroniikkalaitteiden muoviosissa (Ympäristöministeriö 2023, 28). Vuonna 2022 uudistetuissa Rakennustieto Oy:n RT-ohjekorteissa on suosituksena myös POP-yhdisteiden laajempi analysoiminen.

Tiili- ja betoninäytteet kerättiin kokoomanäytteinä eri paikoista 16.3.2022, 23.3.2022 ja 6.4.2022. Viimeisellä näytteenottokerralla purkumateriaalit olivat lumen peitossa. Näytteet otettiin kohdista, joissa sulamisvedet eivät olleet kastelleet materiaalia. Kuvassa 1 on esitetty näytteiden ottopaikat.



Kuva 1. Näytteenottopaikat Pellosniemen purkutyömaalla. Valkoisella pohjalla on numeroitu näytteenottopaikat 16.3.2022 ja 23.3.2022, punaisella pohjalla näytteenottopaikat 6.4.2022 (kuva Juha Vihavainen).

Purkutiilet ja valubetonit oli murskattu ja tasoitettu tontille. Niiden seassa oli muun muassa rauditusrautaa, kupariputkea, sähköjohtoja ja muuta purkumateriaalia. Betoni- ja tiilinäytteitä otettiin mahdollisimman kattavasti koko puretulta alueelta. Tiilinäytteet sisälsivät rakennuksen ulkoseinärakenteiden kalkkihiekkatiiliä sekä sisäseinärakenteen punaisia reikätiiliä. Näytteet otettiin niin, että tiilinäytteiden mukaan saatiin myös saumalaastia. Betoninäytteiden mukaan tuli myös pieniä määriä bitumisivelyä.

Pellosniemen purkutyömaalta otetut materiaalinäytteet toimitettiin ALS Finland Oy:n laboratorioon tiiviisti suljetuissa pakastuspusseissa (kuva 2). Näytteistä analysoitiin raskasmetallipitoisuudet, PAH- ja PCB-yhdisteet sekä tiettyjä POP- ja VOC-yhdisteitä.



Kuva 2. Peltosniemen asuinkeuhkotalojen purkutyömaalta otettuja tiili- ja betoninäytteitä pakattuina laboratorioon lähetettäväksi (kuva Leena Pekurinen).

LABORATORIOANALYYSIEN TULOKSIA

TUUKKALAN SAIRAALA

Tuukkalan tiili- ja laastinäytteiden osalta oltiin kiinnostuneita erityisesti, miten vanadiinipitoisuudet vaihtelevat rakennuksen eri osista otetuissa tiili- ja muurauslaastinäytteissä, sillä ennen purkua toteutetussa AHA-kartoituksessa kokoomanäytteiden vanadiinin liukoisuus ylitti MARA-asetuksessa (843/2017) määritetyt raja-arvot.

Tuukkalan tiilinäytteistä analysoitujen alkuaineiden ja metallien pitoisuudet on esitetty taulukoissa 1 ja 2. Taulukossa 1 on esitetty sairaalan A-osan näytteiden pitoisuudet ja taulukossa 2 B-osan näytteiden pitoisuudet. Tarkemmissa tiili- ja laastinäytteissä vanadiinin pitoisuus vaihteli 15,2–31,8 mg/kg. Matalin pitoisuus oli A-osan tiileissä ja korkein pitoisuus B-osan vaakasaumassa. Kaiken kaikkiaan B-osan näytteissä sekä myös A-osan vaakasaumassa oli korkeammat vanadiinipitoisuudet kuin A-osan tiili-, muurauslaasti- ja pystysaumanaäytteissä. Myös rauta- ja nikkelipitoisuudet olivat B-osan vaakasaumassa korkeampia kuin muissa materiaaleissa. Bariumpitoisuudet olivat korkeampia A-osan vaakasaumassa kuin muissa materiaaleissa.

Taulukko 1. Tuukkalan sairaalan A-osan materiaalinäytteiden metallipitoisuudet. (ALS Finland Oy).

Metalli (mg/kg)	Tiili A	Muuraus- laasti A	Vaakasauma A	Pystysauma A
Ag	<0,50	<0,5	<0,50	<0,5
As	1,02	0,67	1,36	1,07
Ba	9,9	51,1	94,8	64,9
Be	0,104	0,265	0,271	0,345
Cd	<0,40	<0,40	<0,40	<0,40
Co	2,28	4,58	6,53	7,15
Cr	15,2	18,8	32,2	21,2
Cu	18	21,9	21,3	22,7
Fe	14 800	10 300	14 500	24 500
Hg	<0,010	<0,010	0,084	0,017
Li	7,4	28,5	41,8	50
Mn	126	87,8	144	138
Mo	0,81	0,75	0,69	<0,40
Ni	3,8	9,3	16,5	11,6
P	210	331	558	358
Pb	3,3	2,4	4,6	4,4
Sb	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
Sn	<1,0	<1,0	<1,0	1,4
Sr	17,2	100	129	121
Tl	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
V	15,2	20,7	29,3	20,6
Zn	142	46,3	60,3	85,2

Taulukko 2. Tuukkalan sairaalan B-osan materiaalinäytteiden metallipitoisuudet. (ALS Finland Oy).

Metalli (mg/kg)	Tiili B	Muuraus- laasti B	Vaakasauma B	Pystysauma B
Ag	<0,50	<0,5	<0,50	<0,5
As	0,6	0,56	12,8	3,36
Ba	31,8	63,7	53,9	58,8
Be	0,12	0,202	0,244	0,328
Cd	<0,40	<0,40	<0,40	<0,40
Co	3,03	6,26	9,54	7,92
Cr	22,7	20,4	56,5	27,6
Cu	8,7	23,7	77	29,7
Fe	18 600	12 300	53 500	32 800
Hg	<0,010	<0,010	0,011	<0,010
Li	9,3	39,4	34,1	50,1
Mn	177	98,1	118	136
Mo	1,02	1,14	5,12	1,68
Ni	5,9	9,7	33,5	16,4
P	298	365	436	449
Pb	2,4	3	7,3	4,6
Sb	<0,50	<0,50	1,9	<0,50
Sn	1,1	<1,0	6,4	2
Sr	18,2	143	106	117
Tl	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
V	26,6	28,8	31,8	28,7
Zn	34,7	56,6	55,4	51,1

PELLOSNIEMEN MATERIAALINÄYTTEET

Pellosniemen purkutyömaalta otetuista materiaalinäytteistä analysoitiin raskasmetalli- ja öljyhiilivetyypitoisuuksia, bromattuja palonestoaineita sekä kloorattuja hiilivetyjä. Laboratorioanalyysien tulokset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Haitallisten aineiden pitoisuudet Pellosniemen monitorointikohteen betoni- ja tiilinäytteissä (ALS Finland Oy).

Haitta-aine (mg/kg)	Betoni	Punatiili	Vaalea tiili
Arseeni (As)	1,92	0,52	1,4
Barium (Ba)	60,4	15,4	71,5
Kadmium (Cd)	<0,40	<0,40	<0,40
Kromi (Cr)	15,1	12,7	11,5
Kupari (Cu)	10,9	4,5	8,3
Elohopea (Hg)	<0,010	<0,010	<0,010
Molybdeeni (Mo)	<0,40	<0,40	<0,40
Nikkeli (Ni)	6,2	4,6	5,2
Lyijy (Pb)	3,8	1,4	2,3
Antimoni (Sb)	<0,50	<0,50	<0,50
Vanadiini (V)	17,9	12,1	12,8
Sinkki (Zn)	30,2	4,9	15,7
Öljyhiilivedyt, C10–C21 fraktio	<10	<10	<10
Öljyhiilivedyt, C21–C40 fraktio	<10	<10	<10
Öljyhiilivedyt, C10–C40 fraktio	<20	<20	<20
Öljyhiilivedyt, C5–C10 summa *)	<8,80	<8,80	<8,80
Öljyhiilivedyt, C5–C10 summa **)	<10	<10	<10
HBCD	<50	<50	<50
Penta-BDE	<10	<10	<10
TBBP-A	<20	<20	<20
Klooratut alkaanit C10–C13, SCCP	<100	<100	<100
Klooratut alkaanit C14–C17, MCCP	<100	<100	<100

*) ilman BTEX-yhdisteitä ja oksygenaatteja

**) sis. BTEX-yhdisteitä ja oksygenaatteja

Raskasmetallipitoisuudet eri näytteiden välillä olivat pääosin samankaltaisia. Suurimmat erot olivat bariumin, kuparin ja sinkin pitoisuuksissa; punatiilinäytteissä ne olivat selvästi pienemmät kuin betonin ja vaalean tiilen näytteissä. MARA-asetuksen mukaiset hyödynnettävän jätteen suurimmat sallitut haitallisten aineiden pitoisuudet raskasmetalleille on esitetty liukoisuutena mg/kg L/S-suhteessa 10 l/kg, joten saatuja tuloksia ei raskasmetallien osalta voi suoraan verrata MARA-asetuksen raja-arvoihin.

BTEX-yhdisteiden (bentseeni, tolueni, etyylibentseeni ja ksyleeni) pitoisuudet alittivat laboratorion määrittämissä rajat (0,01–0,10 mg/kg). BTEX-summapitoisuus jäi niin ikään alle määrittämissä rajan, joka on alle 0,160 mg/kg. MARA-asetuksessa annettu raja-arvo bentseenille 0,2 mg/kg (peitetty valli 0,6 mg/kg) alittui näytteissä. Korkeat BTEX-yhdisteiden pitoisuudet ovat yleisimpiä esimerkiksi vanhoissa teollisuusrakennuksissa tai rakennusten teknisissä tiloissa, joissa on tapahtunut öljypitoisten aineiden valumista rakenteisiin sekä maaperään (Hengitysliitto 2020).

Näytteistä analysoitiin myös kahdentoista eri ftalaatin pitoisuudet. Ftalaattipitoisuudet olivat kaikissa näytteissä alle määrittämissä rajan 0,10 % p/p.

PCB-yhdisteitä sisältäviä saumamassoja on käytetty eniten 1950–1970-luvuilla rakennetuissa betonielementtitaloissa. Näissä taloissa voi löytää PCB:tä sauma-aineista, lattiamassoista, maaleista, lakoista, liimoista tai betonista, jolloin ne ovat siinä lisäaineena. PAH-yhdisteitä voi olla esimerkiksi betonin pinnassa olevassa mustassa siveelyssä (KT Kuntotutkimus Oy 2017). Tutkituissa näytteissä yksittäisten PCB-yhdisteiden pitoisuudet olivat alle laboratorion määrittämissä rajan 0,10 mg/kg ja seitsemän PCB-yhdisteen summapitoisuus oli alle 0,70 mg/kg näytteissä. PAH-yhdisteiden pitoisuus oli kaikissa materiaalinäytteissä alle 0,050 mg/kg, myös PAH-yhdisteiden summapitoisuus oli alle 0,8 mg/kg. PAH- ja PCB-pitoisuudet alittivat MARA-asetuksen raja-arvot.

Rakennusmateriaaleista erittyvät haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC-yhdisteet) ovat peräisin muun muassa liuotin- ja raaka-ainejäämistä sekä valmistusprosessien reaktio- ja hajoamistuotteista (Polygon Finland Oy). VOC-yhdisteistä analysoitiin MTBE, TAE, TAME, ETBE, DIPE ja TBA. TBA:n pitoisuus oli alle 0,80 mg/kg, ja DIPE:n pitoisuus oli alle 0,020 mg/kg. Muiden VOC-yhdisteiden pitoisuus oli alle 0,050 mg/kg.

XRF-MITTAUSTEN TULOKSET

Tuukkalan ja Pellosniemen purkutyömailta otetuista tiilinäytteistä tehtiin XRF-alkuaineanalyysit kannettavalla Niton XL3 950 GOLDD -analyysointilaitteella Xamkin ympäristölaboratoriossa ja tuloksia verrattiin ALS Finland Oy:n laboratoriossa ICP-AES-tekniikalla analysoituihin pitoisuuksiin. Tiilinäytteiden XRF-analyysissä pitoisuudet olivat usealla metallilla huomattavasti suuremmat kuin ALS Finland Oy:n tuloksissa. Erot menetelmien välillä olivat samansuuntaiset Tuukkalan ja Pellosniemen näytteissä.

Tuukkalan tiilinäytteissä XRF-analyysointilaitteella mitatut metallien pitoisuudet olivat useimmissa tapauksissa noin 3–10-kertaisia verrattuna laboratoriossa analysoituihin pitoisuuksiin. Myös Pellosniemen tiilinäytteiden metallipitoisuudet olivat XRF-analyysointilaitteella huomattavasti laboratorioanalyysien tuloksia suuremmat. Vaalean tiilen näytteessä XRF-mittausten tulokset vastasivat kuitenkin laboratorioanalyysin tuloksia useimmilla metalleilla, kun

tarkastelussa huomioidaan XRF-analysaattorin rinnakkaisten mittausten vaihteluväli ja laitteen ilmoittama mittausrvirhe. Punatiilinäytteessä eroja oli enemmän, ja erot menetelmien välillä olivat useimmiten noin 5–12-kertaisia, muutamilla alkuaineilla jopa huomattavasti suurempia. Vaalean tiilen näytteessä erot olivat pienempiä (1–7-kertaisia).

Tiilinäytteiden laboratorioanalyysien ja XRF-mittausten väliset suuret erot voivat selittyä sillä, että tiilinäytteet murskattiin lekalla karkeaksi murskaksi. Murskauksessa käytetystä lekasta on voinut aiheutua metallikontaminaatiota näytteisiin. Toisaalta mittauksia tehtiin XRF-mittarilla myös murskaamattomista tiilistä. Tulokset olivat samansuuntaisia kuin murskatussa näytteessä. Yleensä erot laboratorioanalyysien ja XRF-mittaustulosten välillä olivat hieman pienemmät murskatusta näytteestä kuin käsittelemättömästä näytteestä tehdyissä mittauksissa.

JOHTOPÄÄTÖKSIÄ

Materiaalien haitta-ainekartoituksella on tärkeä merkitys purkumateriaalien turvallisen uudelleen käytön suunnittelussa. Purkukohteissa teetettyjen asbesti- ja haitta-ainekartoitusten laatu ja kattavuus vaihtelevat vielä paljon. Suomessa haitta-ainekartoitusten RT-ohjekortteja on uudistettu hiljattain ja suosituksiin sisällytetty mukaan laajemmin haitta-aineita, muun muassa POP-yhdisteitä. Pellosniemen kohteesta otetuissa materiaalinäytteissä orgaanisten haitta-aineiden, kuten POP-yhdisteiden, pitoisuudet olivat pääosin alle määrittysrajan.

XRF-analysaattori mittaa alkuaineen kokonaispitoisuutta röntgenfluoresenssimenetelmällä, ja mitattu pitoisuus riippuu siitä, mihin kohtaan näytteessä säde osuu. Eri alkuaineiden esiintyminen näytteissä saattaa johtaa röntgensäteilyn absorptioon ja tätä kautta tulosten muuttumiseen. Erilainen alkuainekoostumus voi vaikuttaa siihen, miten röntgensäteily absorboituu mittauksen aikana ja häiritseekö joku alkuaine toisen alkuaineen mittaustuloksia. Esimerkiksi rauta absorboi kuparin röntgensäteitä ja häiritsee alhaisia kromipitoisuuksia, kun taas korkeat lyijypitoisuudet häiritsevät arseenin analyysituloksia (US EPA, Mykkänen 2018 mukaan). Samasta näytteestä tehdään aina rinnakkaisia mittauksia keskimääräisen pitoisuuden selvittämiseksi.

Kannettavalla XRF-analysaattorilla saatiin suuntaa antavia tuloksia tiilinäytteiden sisältämistä alkuaineista ja raskasmetalleista, mutta pitoisuudet olivat pääsääntöisesti korkeampia verrattuna akkreditoidussa laboratorioissa määritettyihin tuloksiin. Yleisesti ottaen XRF-tekniikalla analysoidut pitoisuudet ovat pääosin vertailukelpoisia ICP-AES-menetelmän kanssa (Hannaker 1984, Maliki 2017). Kirjallisuudenkaan perusteella menetelmä ei ole yhtä tarkka kaikille metalleille, ja kosteus ja orgaaninen aines voivat häiritä mittaustuloksia. Analysaattoria voidaan käyttää kenttämittarina tai pika-analysaattorina purettavien rakennusten haitta-ainekartoituksissa, mutta laitteen toiminta ja soveltuvuus eri materiaaleille sekä virhetekijät on tunnettava hyvin ja tulokset on aina varmistettava laboratorioanalyysillä.

LÄHTEET

Hannaker, P., Haukka, M., Sen, S.K. 1984. Comparative study of ICP-AES and XRF analysis of major and minor constituents on geological materials. Chemical Geology, Volume 42. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0009254184900251>.

Hengityслиitto. 2020. Rakennusten haitta-aineet. Päivitetty 9.6.2023. Saatavissa: <https://www.hengityслиitto.fi/kodin-sisailma-ja-kunnossapito/sisailman-laatu/rakennusten-haitta-aineet/>.

KT Kuntotutkimus Oy. 2017. Asbesti.info. PCB? Onko se vaarallista? Missä sitä on? Saatavissa: <https://www.asbesti.info/post/2017/09/29/pcb-onko-se-vaarallista-missä-c3-a4-sit-c3-a4-on>.

Maliki, A., Al-lami, A., Hussain, H., Al-Ansari, N. 2017. Comparison between inductively coupled plasma and X-ray fluorescence performance for Pb analysis in environmental soil samples. Environmental Earth Sciences volume 76, Article number: 433. Saatavissa: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-017-6753-z>.

Mykkänen, A. 2018. Virtutjoen ampumaradan perustilaselvitys: Maaperän pilaantumisen osalta. Opinnäytetyö, ympäristöteknologia. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202101201385>.

Polygon Finland Oy. Sisäilman VOC-haittojen ja PAH-yhdisteiden ABC. Saatavissa: <https://www.polygongroup.com/fi-FI/tietopankki/tietoa-sisailmasta/sis%C3%A4ilman-voc-haittojen-ja-pah-yhdisteiden-abc/>.

United States Environmental Protection Agency (EPA), X-Ray Fluorescence. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://clu-in.org/characterization/technologies/xrf.cfm> [Viitattu 22.11.2017].

Valtioneuvoston asetus eräiden jätteen hyödyntämisestä maarakentamisessa 943/2017.

Ympäristöministeriö. 2023. POP-jätteen tunnistusopas. Ympäristöministeriön julkaisu 2023:1. PDF-tiedosto. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-215-0>.

DEMONSTRAATIOKOKOITA RAKENNUSTEN PURKUTYÖ- MAIDEN MATERIAALIVIRTOJEN MONITOROINNISTA DROONEILLA

Juha Vihavainen & Henri Kettunen & Vuokko Malk

Rakennusten purkutyömailla purkumateriaalien tehokas seuranta ja dokumentointi on tärkeää, kun suunnitellaan eri materiaaleille uusiokäyttömahdollisuuksia. Hankkeessa demonstroitiin purkutyömaiden purku- ja jättemateriaalien määrien monitorointiin kehitetyn fotogrammetriaan perustuvan 3D-mallinnustyökalun käyttöä erilaisissa demonstraatiokohdeissa. Menetelmää on aiemmin hyödynnetty kaivoksilla erilaisten louhittujen materiaalikasojen määrän seurannassa, mutta samaa periaatetta on mahdollista käyttää myös pienemässä mittakaavassa rakennusten purkutyömailla purkumateriaalikasojen mittaamiseen. Purkutyömaiden yllä suoritettiin droonilla lennätyksiä vuosina 2021–2022 ja muodostettiin kuvamateriaaleista 3D-mallit. Malleista nähtävien materiaalikasojen ja purkumateriaaleja sisältäneiden vaihtolavojen tilavuudet määritettiin fotogrammetriaohjelmistolla. Kun tiedetään, mikä materiaali on kyseessä ja mikä on sen tiheys, voidaan tilavuustiedolla laskea arvio materiaalin massalle.

Mikkelissä seurattiin Pankalammen terveyskeskuksen ja hammashoitolan sekä Tuukkalan sairaalan purkua vuonna 2021. Pellosniemellä seurattiin asuinkerrostalojen purkua vuonna 2022. Häyrylässä toteutettiin demonstraatiokoe, jossa määritettiin ilmakehän aineistosta maa-aineskasan tilavuus ja tulosta verrattiin perinteisesti takymetrillä toteutetun pistemittauksen tulokseen. Lisäksi Metsäsairilan kierrätyskeskuksella testattiin multispektrikameran hyödyntämistä erilaisten materiaalien tunnistamiseen.

RAKENNUSTEN PURKUA SEURATTIIN SÄÄNNÖLLISIN VÄLIAJOIN

Tuukkalan, Pankalammen ja Pellosniemen purkutyömailla oli tarkoitus suorittaa monitorointilennätykset droonilla kerran–kahdesti viikossa. Pääosin tämä aikataulu toteutui, mutta koronaviruksesta johtuvista syistä Pankalammen terveyskeskuksen monitoroinnissa oli tauko kesäkuussa 2021. Hankkeessa toteutuneet monitorointikäyntien määrät eri purkutyömailla on esitetty taulukossa 1. Lennätykset toteutettiin Pankalammella ja Pellosniemessä 45 metrin korkeudella ja Tuukkalassa 50 metrin korkeudella. Pankalammella

fokus oli purun aikana hammashoitolan rakennuksessa, mutta purkutöiden loputtua koko alue valokuvattiin. Yhden monitorointikerran kuva-aineisto koostui vaihtelevasti 80–140 valokuvasta kohteesta riippuen.

Taulukko 1. Droonimonitorointimäärät kuukausittain hankkeen monitorointikohteissa.

Vuosi/kuukausi	Tuukkala	Pankalampi	Pellosniemi
2021/maaliskuu	-	3	-
2021/huhtikuu	-	7	-
2021/toukokuu	2	8	-
2021/kesäkuu	6	4	-
2021/heinäkuu	1	1	-
2021/elokuu	1	1	-
2022/helmikuu	-	-	1
2022/maaliskuu	-	-	4
2022/huhtikuu	-	-	4

LAITTEISTO JA KUVAUSMENETTELY

Droonikuvaukset toteutettiin DJI Phantom 4 Pro V2.0 -nelikopterilla (kuva 1). Lennätysten aikaan kopteri oli lainsäädännön näkökulmasta tehtävään soveltuva, sillä massansa (1,4 kg) puolesta sitä pystyi käyttämään avoimessa kategoriassa A2 eli lentämään ihmisten läheisyydessä. Käytetyn kopterin etuihin lukeutuivat 20 megapikselin kamera ja mekaaninen suljin, joka vähentää suurilla nopeuksilla edetessä kuvien vääristymiä. Vääristymiä voi ilmentyä elektronisilla sulkimilla. Vääristymät voivat tuoda epätarkkuutta kuvista muodostettavaan 3D-malliin tai jopa estää kokonaan sen muodostamisen. Lennätystoiminta kohteilla kesti noin tunnin per käynti. Tähän sisältyy paikalle saapuminen ja lennettävän alueen tarkistustoimenpiteet, lennätysten suorittaminen sekä laskeutuminen.



Kuva 1. DJI Phantom 4 Pro V2.0 -nelikopter (kuva Henri Kettunen).

Kohteista muodostettiin 3D-mallit fotogrammetrisesti. Fotogrammetria perustuu samalla lentoradalla perättäin otettuihin valokuviin, jotka ovat limittäin keskenään, eli kuvilla tulee olla riittävä peittoalue. Tällöin droonin lennättämisessä on käytännössä välttämätöntä käyttää lennonsuunnitteluovellusta, jolla konfiguroidaan drooni lennätystä varten. Kun lennätys tehdään edestakaisin ja ristikkäin x- ja y-suunnissa, saadaan ylilennetty alue kuvattua joka suunnasta, mikä mahdollistaa yhdessä kuvien metatietoihin tallennetun paikkatiedon kanssa mittatarkan 3D-mallin luomisen aineistosta.

Lennonsuunnitteluun käytettiin PIX4Dcapture-sovellusta (kuva 2). Sovellukseen syötetään olemassa olevia kartta-aineistoja apuna käyttäen haluttu ylilennettävä alue ja valitaan lennätyskorkeus, etenemisnopeus, kuvien limittäisyysarvo (overlap) niin etenemis- kuin sivuttaissuunnassa sekä kameran kulma. Sovellus määrittää näihin parametreihin sekä droonin ja kameran tietoihin perustuen sopivan lentoradan ja kuvanottovälit. Parametrointi riippuu aina kohteesta. Etenkin lennätyskorkeuden säätö on tärkeää, ja siinä on otettava huomioon alueen rakennusten, puiden ja muiden esteiden korkeus, ja alue on määritettävä siten, ettei lennätys tapahdu ulkopuolisten ihmisten yläpuolella. Lisäksi on tärkeää huomioida, että valokuvat tallennetaan sellaisessa tiedostomuodossa, että niihin sisältyy paikkatieto. Tällainen on esimerkiksi JPEG. Kun kauko-ohjaaja on parametrivalintoihin tyytyväinen, suoritetaan lennätys käytännössä nappia painamalla. Tällöin drooni hoitaa itsenäisesti lento-ohjelmiston, lentää suunnitellun reitin ottaen reitin varrella tarvittavin väliajoin valokuvat ja lopulta palaa takaisin lähtöpaikkaan.

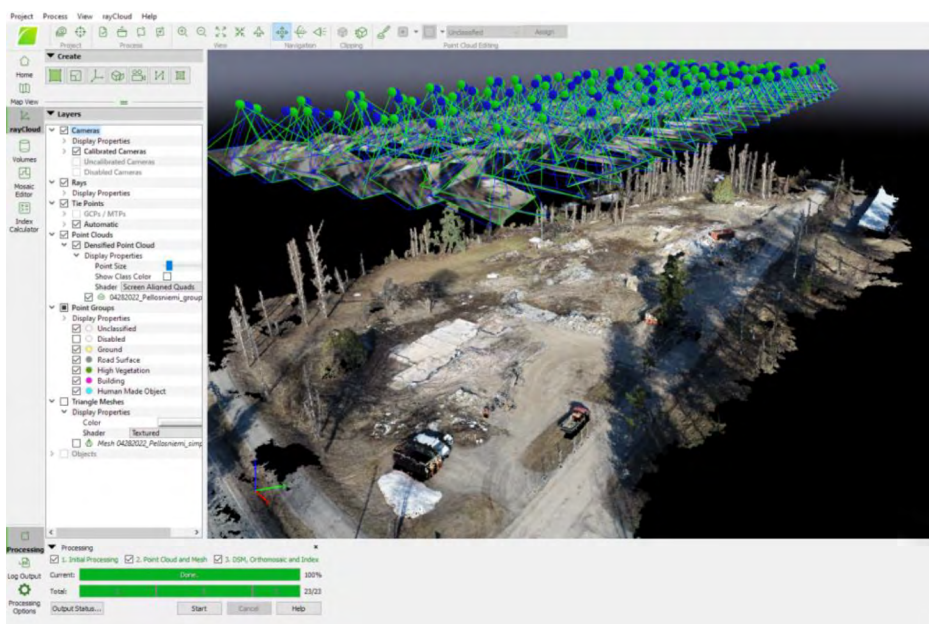


Kuva 2. Näkymä PIX4Dcapture-sovelluksesta kauko-ohjaimen näytöllä (kuva Juha Vihavainen).

KUVAAMATERIAALIN PROSESSOINNIN JA MATERIAALIKASOJEN TILAVUUKSIEN TULKINNASSA HYÖDYNNETTIIN FOTOGRAMMETRIA

Kuva-aineisto täytyy prosessoida lennätyksen jälkeen fotogrammetriaohjelmistolla halutuiksi lopputuotteiksi. Tähän käytettiin maksullista PIX4Dmapper-ohjelmistoa (kuva 3). Vastaavia ohjelmistoja on saatavilla eri valmistajilta. Ohjelma käyttää laskennassa hyväksi kuvien metatietoihin tallennettua EXIF-dataa, kuten kamerasen ja sen linssin spesifikaatioita, ja kuvien paikkatietoja. Lopputuotteena saadaan kuvamateriaalista ja prosessoinnin parametroinnista riippuen 3D-pistepilvimalleja, 3D-tekstuuriverkkoja, digitaalisia maasto- ja pintamalleja, reflektanssikarttoja sekä ortomosaiikkeja. Tämän hankkeen tapauksessa kiinnostuksen kohteina olivat rakennukset ja tilavuusmittaukset alueen purkumateriaaleista, jolloin pistepilvi- ja pintamalli ovat tärkeitä lopputuotteita. Lopputuotteet voi määrittää tuotettavaksi tiettyyn koordinaattijärjestelmään, jos niitä halutaan yhdistellä muun paikkatietoaineiston kanssa.

Materiaalin prosessointinopeus riippuu kuvamateriaalin määrästä, kuvien laadusta sekä käytettävän tietokoneen laskentatehosta. Esimerkiksi hankkeessa noin 140 valokuvaa sisältäneen ja noin 2,5 hehtaarin kokoisen alueen kuvamateriaalin prosessointi pistepilveksi, pintamalliksi ja ortomosaiikiksi kesti noin kaksi tuntia tietokoneella, jossa oli 2,9 GHz:n peruskellotaajuudella toimiva neliydinprosessori hypersäikeistyksellä, 4 GB videomuistia sisältänyt näytönohjain, 32 Gt RAM-muistia ja SSD-kovalevy. On myös huomioitavaa, että kuvien prosessointia suorittavaa tietokonetta ei ole suositeltavaa käyttää muuhun työkentelyyn samaan aikaan. PIX4D:n (s.a.²) mukaan minimivaatimuksena 14 megapikselin kameralla otetun ja 100–500 kuvaa sisältävän projektin prosessointiin tarvitaan 8 Gt RAM-muistia ja 10 Gt kovalevytilaa.



Kuva 3. Näkymä PIX4Dmapper-ohjelmasta ja yksittäisten valokuvien asemointi pistepilvimallissa (kuva Juha Vihavainen).

Tilavuusmittaukset suoritetaan valmiista pistepilvimallista. PIX4Dmapperissa käytetään Volumes-toimintoa tilavuusmittausten tekoon. Toiminnossa valitaan pistepilvimallista haluttu alue, josta luodaan pohjataso tilavuudelle. Tason asettelu voi vielä konfiguroida tarkemmin alueen valinnan jälkeen alkamaan halutulta korkeudelta. Ohjelma laskee valitun pohjatason pinta-alan sekä pohjatason ja 3D-mallin väliin jäävän kokonaistilavuuden ja ilmoittaa myös muita tietoja, kuten tehtyjen täyttöjen tai leikkausten tiedot virhearvioineen. PIX4D:n (s.a.¹) mukaan virhearvio perustuu GSD:hen (ground sampling distance) eli kuvista poimittujen maapikselien kokoon, jolloin virhe on riippuvainen kameran tarkkuudesta suhteessa lennätyskorkeuteen. Virhearvio ei ota huomioon liian alhaisesta 3D-pisteiden määrästä johtuvia syitä, eli suosituksen mukainen limittäisyysprosentti kuva-aineiston keuruussa on edellytys riittävän tarkalle pistepilvimallille. Tilavuusmittauksen tiedot voidaan viedä shapefile-tiedostoiksi jatkokäsittelyä varten.

VERTAILUMITTAUS OSOITTI DROONIKUVAAMISEN OLEVAN RIITTÄVÄN TARKKAA TILAVUUSMITTAUKSIIN

Aineiston tarkkuudesta puhuttaessa on olennaista ymmärtää suhteellisen ja absoluuttisen tarkkuuden ero. Maa-aineksista ja purkumateriaaleista koostuvien kasojen tilavuusmittauksissa suhteellinen tarkkuus eli se, missä suhteessa aineiston kappaleet ovat toisiinsa, on käytännössä ainoa tarpeellinen tieto, joten dronit soveltuvat tehtävään hyvin. Kuitenkin,

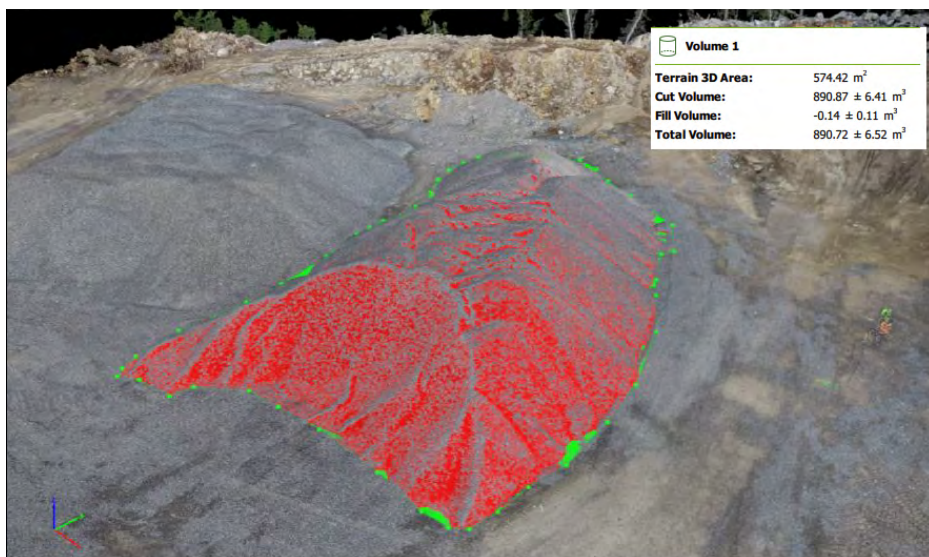
jos tarve koskee absoluuttisesti kappaleen sijaintia maanpinnalla ja kyseessä on alle 2 cm absoluuttista tarkkuutta vaativa tehtävä, on esimerkiksi takymetrin käyttö osana kartoitusta suositeltavaa. Dronit kykenevät laitteistosta ja lennon parametroinnista riippuen yleisesti 5 cm:n tarkkuuteen. Vaihtoehtona tarkkuuden tehostamiseksi on esimerkiksi maastoon asetettujen GCP-pisteiden (ground control point) hyödyntäminen tai RTK-toiminnolla (real time kinematics) varustetun droonin yhdistäminen RTK-tukiasemaan lennätysten ajaksi, jolloin voidaan saavuttaa jopa 1 cm:n tarkkuus. (Murison 2021.)

Häyrylän maa-ainesten varastointialueella suoritettiin vertailu droonikuvaamisella suoritetusta tilavuusmittauksesta ja perinteisesti maanmittauksessa käytetyn takymetrin välillä. Maanrakennus Talpa Oy suoritti takymetrimittauksen maa-ainekasasta, minkä jälkeen droonilla suoritettiin automaattilennätys saman maa-ainekasan yli 3D-mallin luomiseksi. Kuvamateriaali prosessoitiin PIX4Dmapper-ohjelmistolla kasan tilavuuden laskemiseksi. Tilavuusmittausten tulokset eri keinoin on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Eri menetelmillä saadut tulokset maa-ainekasan tilavuudelle.

Takymetrillä määritetty tilavuus [m ³]	Droonikuvista määritetty tilavuus [m ³]
888,6	890,7

Tuloksen perusteella droonilla kuvatusta aineistosta saadaan lähes yhtä tarkka tieto kuin perinteisesti takymetrillä mittaamalla (ero 0,24 %). Menetelmien käyttöön ja tietojen prosessointiin kuluvaa aikaa ei mitattu, mutta kenttätöiminnassa drooni oli huomattavasti nopeampi keino datan keräämiseksi kuin takymetri, jolla mittaukset täytyi suorittaa kuudesta eri kiintopisteestä laitteen sijaintia vaihtelemalla. Lisäksi ilmakuvista ja niistä tuotetusta aineistosta saadaan värillinen näkymä kohteesta muita sovellutuksia varten. Mitattu maa-ainekasa on esitetty kuvassa 4.

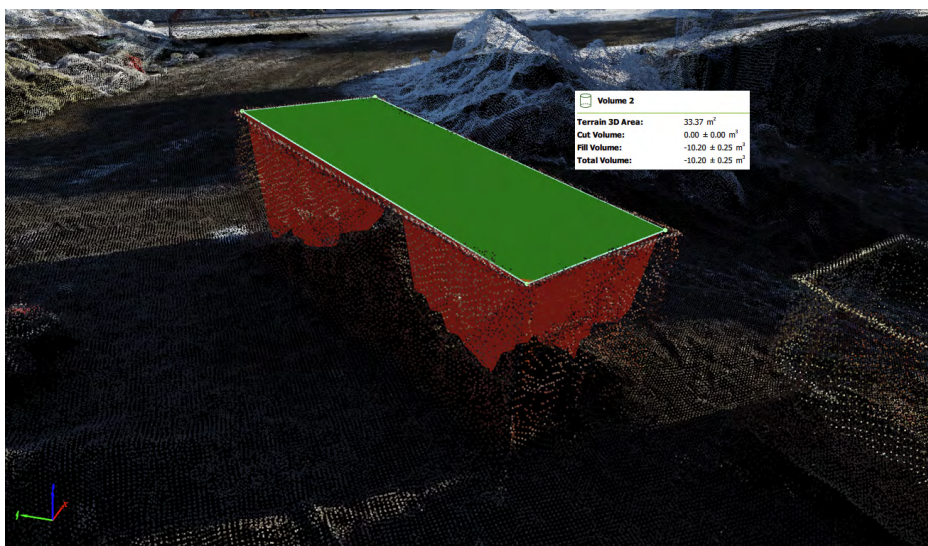


Kuva 4. Vertailumittattu maa-aineskasa PIX4Dmapper-ohjelmassa (kuva Juha Vihavainen, muokkaukset Henri Kettunen).

HUOMIOITA PURKUTYÖMAILLA TOTEUTETTAVISTA TILAVUUSMITTAUKSISTA

Purkutyömailta tuotetuista pistepilvimalleista voidaan tehdä monenlaisia dimensioiden määrittäksiä eli pituuksien, pinta-alojen ja tilavuuksien laskentaa. Materiaalin tilavuus voidaan laskea kasoista tai vaihtolavoilta, joita on täytetty purkumateriaaleilla. Pankalamella ja Tuukkalassa purkumateriaalit siirrettiin pääosin heti vaihtolavoille. Pellosniemellä materiaaleista koottiin ensin kasoja, joista ne siirrettiin vaihtolavoille kuljetuksia varten.

Vaihtolavalle kerätyn materiaalin tilavuuden laskeminen edellyttää, että lavan koko on tiedossa. Tosin tätä on mahdollista arvioida myös pistepilvimallista lavan sivujen pituudet ja korkeudet mittaamalla. Tilavuuslaskuri-toiminnolla valitaan lavan yläpinnasta pisteet, jotta lavan sisään jäävä alue tulee valituksi niin sanotuksi pohjapinnaksi. Kun tämän alueen kohdalta määritetään tilavuus, saadaan tuloksena negatiivinen arvo eli lavalla olevan materiaalin ja luodun pohjapinnan välinen täyttötilavuus. Lavalla olevan materiaalin tilavuus saadaan laskettua tyhjän lavan tilavuuden ja määritetyn täyttötilavuuden erotuksena. Esimerkiksi kuvassa 5 esitetyn lavan tilavuus on 23 m³. Tilavuuslaskurilla on määritetty osittain täytetyn lavan yläpinnasta alkaen tyhjän osuuden tilavuudeksi 10,2 m³. Lavalla olevan materiaalin tilavuus on tällöin $23 \text{ m}^3 - 10,2 \text{ m}^3 = 12,8 \text{ m}^3$.



Kuva 5. Tilavuuden määrittäminen vaihtolavan sisällöstä (kuva Juha Vihavainen, muokkaukset Henri Kettunen).

Koska monitorointia tehtiin vain kerran tai kahdesti viikossa, kaikkea työmailta siirrettävää materiaalia oli mahdotonta saada seurattua. Hankkeen demonstraatiokohteilta siirrettiin päivittäin materiaalia Metsäsairilan lajittelu- ja kierrätyskeskukselle, joten droonioperaattorin olisi pitänyt olla päivittäin paikalla suorittamassa kuvauksia. Jatkossa olisi tärkeää organisoida monitoroinnit yhdessä työmaasta vastaavan tahon kanssa siten, että kaikki materiaali saataisiin taltioitua tehokkaasti. Yksi organisointikeino voisi olla, että purkumateriaalit siirrettäisiin purkutyömaalla tiettyyn paikkaan erillisiksi kasoiksi, joista ne jatkaisivat matkaa vasta täytyttyään riittävästi ja kun ne olisi kuvattu kokonaisuudessaan. Tulevaisuuden visiossa ratkaisu voi olla lähes täysin automatisoitu. Nykyisin on jo olemassa droonien kenttälatausasemia, joita voisi hyödyntää myös työmaaooperaatioissa. Tällöin purkutyömaan edustaja voisi määrittettynä ajankohtana antaa droonille käskyn suorittaa kuvauslento kohteella, jolloin se suorittaisi alueen yli lennon etukäteen ohjelmoiduilla parametreilla kuvamateriaalin taltioimiseksi. Lopuksi se palaisi takaisin asemalle latautumaan ja odottamaan seuraavaa tehtävää sekä lähettäisi kuvat pilvipalveluun, jossa suoritettaisiin kuvamateriaalin prosessointi. Näin erillisen kauko-ohjaajan ei tarvitse olla paikalla kyseisinä ajankohtina. Tällainen ratkaisu kuitenkin vaatii vielä monia huomioita muun muassa lainsäädännön, lentoturvallisuuden sekä tietoturva-asioiden kannalta.

PURKUMATERIAALIEN EROTTelu TOISISTAAN MULTISPEKTRIKAMERALLA ON HAASTEELLISTA

Spektrikuvantaminen perustuu eri materiaalien erilaisiin ominaisuuksiin absorboida ja toisaalta heijastaa niihin kohdistuvaa valoa eri aallonpituuksilla. Tällöin tietyillä aallonpituuskaistoilla eri tavoin valoa refleктоivat materiaalit on mahdollista erottaa toisistaan. Drooneihin ripustettavat spektrikuvantamislaitteet voidaan jakaa multi- ja hyperspektrikameroihin. Multispektrikamerat pystyvät erottelemaan 3–10 eri aallonpituuskaistaa, jotka on nimetty kaistan aallonpituutta vastaavan näkyvän valon mukaisesti. Hyperspektrikameroissa kaistoja voi kuitenkin olla satoja tai tuhansia, ja ne ovat paljon tarkemmin rajattuja kuin multispektrikameroissa. Suurempi kaistojen määrä tosin tarkoittaa samalla suurempaa datamäärää, joka tekee hyperspektriaineiston käsittelemisestä monimutkaista. Kaupallisten multispektrikameroiden kaistat on yleensä valittu siten, että niillä pystyy seuraamaan kasvillisuuden tilaa eli ne on optimoitu maatalouden tarpeisiin. (JAI A/S s.a., GISGeography 2023.)

Drooniavusteista multispektrikuvantamista purkumateriaalien tunnistukseen demonstroiitiin hankkeessa kahdesti vuonna 2022 Metsäsairilan kierrätyskeskuksella. Kuvauskohteena oli alue, johon purkumateriaaleja kasattiin. Multispektrikamerallista droonia lennätettiin 35 metrin korkeudella materiaalikasojen yllä kuva-aineiston keräämiseksi. Demonstraatio-kokeissa käytettiin MicaSense RedEdge-MX multispektrikameraa. Kamerassa on viisi eri linssiä, joista kukin kuvaa tiettyä aallonpituuskaistaa samanaikaisesti. Kaistat on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. MicaSense RedEdge-MX -kameran kuvaamat aallonpituuskaistat (mukaillen MicaSense 2023).

Kaistan nimi	Kaistan keskiaallonpituus [nm]	Kaistanleveys [nm]
Blue (sininen)	475	32
Green (vihreä)	560	27
Red (punainen)	668	14
Red Edge (punareuna)	717	12
NIR (lähi-infrapuna)	842	57

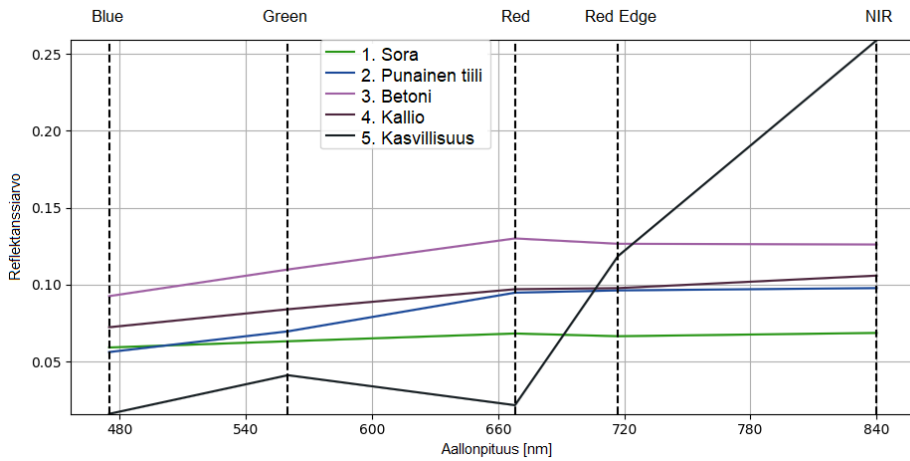
Kamera ripustettiin sen mukana tulleella integrointikitillä DJI Matrice 300 RTK -nelikopteriin (kuva 6), josta kamera sai samalla virran. Kopterin kauko-ohjaimessa on valmiiksi DJI:n lennonsuunnittelu-sovellus, johon voidaan syöttää käytetyn kameran spesifikaatiot, vaikka kamera ei olisi kopterin valmistajan omaa tuotantoa. Tämä mahdollistaa kuvien limittäisyyden toteutumisen reittisuunnittelun osalta, mikä on tärkeää kuvien prosessoin-

tivaiheessa. Kamera täytyy erikseen konfiguroida esimerkiksi tabletilla kameran selainpohjaisen API:n kautta ottamaan kuvia tietyn tavoitekorkeuden saavutettuaan ja halutulla limittäisyys-%:lla. Kameraan kuuluu droonin päälle kiinnitettävä DLS- eli valosensori, josta kamera saa myös GPS-signaalin. Valosensori havainnoi valaistusolosuhteita ja aurin gon suuntaa lennon aikana ja tallentaa näistä tiedon kuvien metatietoihin paikkatiedon kanssa (MicaSense 2022). Valaistusolosuhteiden muutokset esimerkiksi pilvisellä säällä voidaan näin kompensoida kuvien prosessointivaiheessa. Jotta eri aikoina otetut kuvat olisivat vertailukelpoisia keskenään, täytyy kameralla ottaa ennen ja jälkeen lennätyksen kuvat kalibroitipaneelista (kuva 6). Paneelikuvilla suoritetaan kuvamateriaalin kalibrointi eli niiden raa'at pikseliarvot muutetaan reflektanssiarvoiksi fotogrammetriaohjelmistolla. Reflektanssi on esineestä heijastuvan ja siihen osuvan valon määrän suhdetta kuvaava luku, joka on materiaalille ominainen (Terrill 1994). Kuvatusta alueesta muodostettiin PIX4D-mapper-ohjelmistolla reflektanssikartat kaistoittain eli ortomosaiikit, joiden pikseliarvot on korvattu reflektanssiarvoilla.



Kuva 6. Multispektrikamera ripustettuna DJI Matrice 300 RTK -nelikopteriin ja kalibroitipaneeli (kuva Henri Kettunen).

Reflektanssikarttojen jatkokäsittely suoritettiin QGIS-nimisellä paikkatieto-ohjelmistolla. Ohjelmassa hyödynnettiin *Semi-Auto Classification* -lisäosaa, jolla suoritettiin materiaalien erottelu reflektanssikarttojen pohjalta. Kohteen kustakin reflektanssikartasta muodostettiin ohjelmalla kaikki viisi eri kaistaa sisältänyt virtuaalirasteri. Tämä mahdollisti reflektanssikarttojen helpomman visualisoinnin tosivärikuvaksi, mutta se sisälsi silti datan jokaiselta kaistalta. Kohteella näkyvät eri materiaalit, kuten betoni, tiiliskivet, sora ja kasvit, merkattiin kukin ROI-polygoneilla reflektanssikarttaan. Näitä merkintöjä käytettiin testausaineistona ja näin saatiin poimittua kunkin materiaalin reflektanssivasteet eri aallonpituuksilla (kuva 7).



Kuva 7. Demonstraatiokohteelta poimitut materiaalien reflektanssivasteet (kuva Juha Vihavainen, muokkaukset Henri Kettunen).

Kuvasta 7 ilmenee erivärisinä käyrinä esitettyjen purkumateriaalien reflektanssivasteiden keskiarvojen tasaisuus ja samansuuntaisuus; ainoastaan terve kasvillisuus eroaa materiaaleista selvästi eri tavoin käyttäytyvänä spektrikäyränä, sillä se heijastaa valoa vähemmän etenkin Red-kaistalla ja enemmän NIR-kaistalla purkumateriaaleihin verrattuna. Näin pieni vaste-ero purkumateriaalien kesken tekee käytetyllä multispektrikameralla niiden erottelusta epävarmaa. Lisäksi taulukossa 4 on esitetty statistisia tietoja materiaalien reflektanssivasteista. Materiaaleilla on, kaistoista riippuen, suhteellisen suuri keskihajonta verrattuna reflektanssin keskiarvoon, mikä on myös merkki tunnistuksen epävarmuudesta. Ideaalitapauksessa tunnistettavan materiaalin taustalla tulisi olla jotain muuta, selvästi spektriltään eroavaa materiaalia. Tällöin kaistojen suhteita voisi vertailla luotettavammin. Toisaalta käytetyt aallonpituuskaistat olivat tässä demonstraatiokokeessa varsin rajalliset, joten tulokset koskevat vain kyseistä kameraa ja koeasetelmaa. Esimerkiksi Chhabra ym. (2015) ovat omissa tutkimuksissaan Ladar-laitteistoa käyttäen todenneet erilaisten purkujätteiden spektrien erottuvan paremmin 500–1500 nm:n aallonpituuksilla. Tämä puoltaa ajatusta, että kaistoiltaan maa- ja metsätalouden tarpeisiin suunnitellut kaupalliset multispektrikamerat eivät sovellu luotettavasti purkumateriaalien tunnistukseen.

Taulukko 4. Multispektridatasta poimitut purkumateriaalien reflektanssivasteiden keskiarvot ja keskihajonnat aallonpituuskaistoittain

Aallonpituus		475 nm	560 nm	668 nm	717 nm	842 nm
Sora	Reflektanssi, ka	0,05912	0,06318	0,06822	0,06645	0,0686
	Keskihajonta	0,01401	0,01582	0,01779	0,0171	0,01728
Punainen tiili	Reflektanssi, ka	0,05616	0,06961	0,09474	0,09622	0,09774
	Keskihajonta	0,02417	0,02823	0,0347	0,03356	0,03172
Betoni	Reflektanssi, ka	0,09251	0,10982	0,13	0,12653	0,12607
	Keskihajonta	0,03934	0,04739	0,05535	0,05316	0,05008
Kallio	Reflektanssi, ka	0,07229	0,08398	0,09699	0,0977	0,10584
	Keskihajonta	0,01869	0,02095	0,02393	0,02327	0,0228
Kasvillisuus	Reflektanssi, ka	0,01596	0,04111	0,02162	0,11853	0,25878
	Keskihajonta	0,0069	0,01551	0,008	0,03535	0,06347

KUSTANNUKSET JA LAINSÄÄDÄNTÖ OHJAAVAT DROONITOIMINTAA

Droonien hyödyntäminen materiaalivirtojen seurannassa ja tilavuuksien määrittäminen kuva-aineistosta muodostetusta 3D-mallista voi olla kustannustehokas vaihtoehto materiaalmäärien arvioinnille. Kun materiaali ja sen tilavuus tunnetaan, on mahdollista arvioida myös materiaalin massaa. Tosin joissain tapauksissa jo tilavuus voi olla kiinnostava tieto. Näin materiaalmäärät on mahdollista saada perinteistä rekalla punnitusta nopeammin tietoon. Samalla rekkakuljetusten tarve vähenee, joten droonitoiminta on myös ympäristöystävällistä edistäen materiaalien uusiokäytön suunnittelua. Ihanteellista olisi, jos materiaalit saataisiin käytettyä samassa kohteessa tai kuljetettua suoraan uusiokäyttökohteeseen ilman välivarastointia ja sen aiheuttamia lisäkustannuksia. Droonikuvaamalla kerättyä ja tuotettua aineistoa voidaan hyödyntää dimensiomittausten lisäksi muuhunkin purkutyön dokumentointiin.

Toiminta kuitenkin vaatii vielä hyväksi todettuja ohjenuoria oikea-aikaisen kuvausajataulun organisoimiseksi purku-urakoitsijan ja droonin operaattorin kesken. Toimintaan ja tulosten saamiseksi kuluva aika riippuu kuvattavan alueen koosta ja etenkin kuvamateriaalin prosessointiin käytettävissä olevasta laitteistosta. Hankkeen kohteiden (pinta-alat 0,5–2,5 ha) kuvaustoimintaan kului keskimäärin tunti per käynti. Prosessointiaikaa 3D-mallin muodostamiseksi kului keskimäärin kaksi tuntia. Tilavuusmittausten tekemiseen kuluva aika valmiista 3D-mallista riippuu mittausten määrästä, ja harjaantuneelta käyttäjältä yhden kappaleen tilavuuden määrittäminen kestää vain pari minuuttia riippuen kappaleen koosta ja muodosta.

Hankkeessa purkutyömaiden kuvaamiseen käytetty nelikopteri maksaa uutena noin 1 600 euroa kauko-ohjaimen ja akun kanssa. Suurempia tai useampia alueita päivän aikana

kuvattaessa myös akkuja tarvitaan useita, ja ne maksavat kyseiseen kopteriin noin 160 euroa/kpl. Laite tarvitsee valokuvien tallentamiseen muistikortin, joita kannattaa olla myös varalla. Lisäksi kauko-ohjaimen on kytkettävä älypuhelin tai tabletti, jossa on Wi-Fi- ja GPS-toiminnot. Toiminnan suurin kustannus on PIX4Dmapper- tai vastaava fotogrammetriaohjelmisto, jonka työpöytäversio maksaa 4 000 euroa. Ohjelmasta on saatavilla sekä tilausjaksollinen työpöytäversio (250 e/kk) että pilvipalveluversio (140 e/kk), jossa on kuitenkin rajoitettu prosessoitavien kuvien määrää (2 500 kuvaa/kk) ja projektien määrää (20 projektia/kk). Pienten projektien prosessointi työpöytäversiolla onnistuu millä tahansa nykyaikaisella tietokoneella, mutta se vaatii paljon laskentatehoa eli käytännössä sitoo tietokoneen muulta käytöltä prosessoinnin ajaksi.

Toimintaan olisi teoriassa mahdollista käyttää myös halvempia kameradrooneja, sillä fotogrammetrian vaatimuksena on vain tarpeeksi limittäin otetut kuvat ja niihin tallennettu paikkatieto (PIX4D s.a.³⁾). Ongelma voi kuitenkin ilmetä lennätyksen ohjelmoinnin osalta, sillä laadukkaan kuva-aineiston kerääminen vaatii käytännössä lennonsuunnitteluovelluksen käyttämistä. Sovelluksia on saatavilla useilta kehittäjiltä, joista osa on ilmaisia ja osa maksullisia, mutta jos käytettävän droonin valmistaja ei ole julkaissut kyseiselle droonimallille SDK:ta eli sovelluskehityspakettia, ei minkään kolmannen osapuolen sovelluksen käyttäminen ole mahdollista. Tämä rajaa huomattavasti käyttökelpoisten laitteiden määrää.

Droonitoiminnassa tulee lisäksi noudattaa vallitsevaa lainsäädäntöä ja kauko-ohjaajalla tulee olla voimassa oleva kelpoisuustodistus. Kauko-ohjaaja on aina lennätyksestä vastuussa, ja hänen tehtävänä on valvoa, että lennätys sujuu turvallisesti, ja tarvittaessa keskeyttää tehtävä estääkseen mahdolliset vaaratilanteet esimerkiksi lintujen kanssa. Lisäksi ennen lennätystä tulee aina selvittää mahdolliset ilmatilarajoitukset alueella ja toimia ohjeiden mukaisesti. On myös alueita, joilla lennättäminen on estetty kokonaan virtuaalisella geoaidalla. Suomessa on käytössä kaikille saatavilla oleva selainpohjainen Flyk-ilmailukarttapalvelu (aiemmin Aviamaps), johon tulee ilmoittaa lennätyksen sijainti, ajankohta, korkeus ja säde. Lähellä lentokenttää suunnitellusta lennätyksestä tulee ilmoittaa ja pyytää lupa toimintaan kyseisen lentokentän päälliköltä.

Droneinfon (2023a) mukaan 1.1.2024 alkaen avoimessa kategoriassa toimittaessa ja droonin massan ollessa yli 250 grammaa droonin tulee olla C-hyväksytty. A1-kategoriassa droonin sallittu maksimimassa on 900 grammaa ja sillä tulee olla C1-hyväksyntä. Vain alle 250-grammaisilla ja C0-hyväksytyillä laitteilla on sallittua lentää alueella, jossa todennäköisesti liikkuu toiminnan ulkopuolisia ihmisiä. C1-merkityllä laitteella ei ole sallittua tarkoituksellisesti lentää ihmisten yläpuolella, mutta jos niin tapahtuu, tulee tämä aika minimoida (EASA 2023). A2-kategoriassa laitteen sallittu maksimimassa on 4 kg ja sillä tulee olla C2-merkintä, jolloin lennätys enintään 30 metrin etäisyydellä ihmisistä on mahdollista. Erityislupa tarvitaan tällöin operaatioihin, joissa on todennäköistä, että lennätys tapahtuu alle 30 metrin etäisyydellä toiminnan ulkopuolisista ihmisistä.

Jos purkututyömaa on esimerkiksi keskusta-alueella, olisi jatkossa helpointa käyttää C1- tai peräti C0-hyväksyttyä droonia, jolloin vältetään erityisluvan hakemiselta ja siihen liittyviltä lisätoimenpiteiltä. Toisaalta C0-merkityn laitteen hyvin kevyt massa tarkoittaa usein kameran osalta heikompaan kuvanlaatuun, joka voi dimensiomittauksia ajatellen aiheuttaa epävarmuutta kuva-aineiston perusteella muodostettaviin 3D-malleihin ja tämän myötä mittaustuloksiin. Tämän artikkelin kirjoitushetkellä vaihtoehdot ovat hyvin rajallisia myös tyyppihyväksyttyjen kuluttajatasoisen C1-droonien osalta, etenkin kun laite tarvitsee tueksi lennonsuunnitteluohjelmiston. Vaihtoehtojen määrä tulee kuitenkin todennäköisesti lisääntymään. Droonien käytön lisääntyessä monella alalla lähitulevaisuudessa on ammattimaista toimintaa varten erityisluvan hakeminen Traficomilta suositeltavaa, joskin työläämpää, sillä se vaatii operaattorin rekisteröitymisen lisäksi muun muassa toimintakäsikirjan laatimisen, suunnitelman hätätilanteisiin varautumisesta sekä toiminnasta riippuen erilaisten riskinarviointien suorittamista dokumentoidusti. Ihmisten yläpuolella lennätys voi vaatia esimerkiksi ASTM-hyväksytyin laskuvarjon asentamista drooniin törmäysenergian vähentämiseksi ja/ tai alueen hallitsemisen siten, ettei sinne pääse ulkopuolisia henkilöitä (Droneinfo 2023b).

Nuorena teknologian haarana droonien käyttö on tiukasti säädeltyä etenkin asutuskeskuksissa, mikä on hyvin ymmärrettävää. Niiden hyödyntämispotentiaali eri tarkoituksissa on kuitenkin valtava. Tämän takia on tärkeää kohentaa ja ylläpitää yhä suurenevissa määrin yläpuolellamme havaittavien droonien mainetta käyttämällä niitä turvallisesti ja vastuullisesti, oli kyseessä sitten harrastus- tai kaupallinen toiminta eri toimialoilla.

LÄHTEET

Chhabra, S., Wallacea, M., Hopgood, J. 2015. Anomaly detection in clutter using spectrally enhanced Ladar. Conference: Laser Radar Technology and Applications. Volume XX. Baltimore, Yhdysvallat. WWW-dokumentti. Saatavilla: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.3653.0721>. [viitattu 10.11.2022]

Droneinfo. 2023a. Mitä sääntöjä on ilmassa? WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://droneinfo.fi/fi/koulutusmateriaali/mita-saantoja-ilmassa-ilmailun-saadokset>. Päivitetty 25.4.2023. [viitattu 4.9.2023]

Droneinfo. 2023b. Tietoa ennakkoriskiarvioista (PDRA). WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://droneinfo.fi/fi/tietoa-ennakkoriskiarviosta-pdra?toggle=PDRA-S01>. Päivitetty 8.5.2023. [viitattu 12.9.2023]

EASA – European Union Aviation Safety Agency. 2023. Open Category – Civil Drones – C1 (under 900 gramm). WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/civil-drones/drones-regulatory-framework-background/open-category-civil-drones>. [viitattu 12.9.2023]

GISGeography. 2023. Multispectral vs Hyperspectral Imagery Explained. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://gisgeography.com/multispectral-vs-hyperspectral-imagery-explained/>. Päivitetty 6.9.2023 [viitattu 7.9.2023]

JAI A/S. s.a. Multispectral imaging for medical and industrial machine vision systems. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://www.jai.com/multispectral-imaging>. Ei päivitystietoja. [viitattu 10.11.2022]

MicaSense. 2022. RedEdge-MX Integration Guide. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/360011389334-RedEdge-MX-Integration-Guide>. Päivitetty 17.11.2022. [viitattu 1.9.2023]

MicaSense. 2023. What is the center wavelength and bandwidth of each filter for MicaSense sensors? WWW-artikkeli. Saatavilla: <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/214878778-What-is-the-center-wavelength-and-bandwidth-of-each-filter-for-MicaSense-sensors->. Päivitetty 17.4.2023. [viitattu 1.9.2023]

Murison, M. 2021. Surveying Drones vs Total Stations: Which Type of Surveying Projects are Drones Ideal For? DJI. Saatavilla: <https://enterprise-insights.dji.com/blog/when-to-use-surveying-drones> [viitattu 10.11.2022]

PIX4D. s.a.1. Error estimation in volume calculation. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559219-Error-estimation-in-volume-calculation> [viitattu 10.11.2022]

PIX4D. s.a.2. Computer requirements - PIX4Dmapper. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/115002439383-Computer-requirements-PIX4D-mapper> [viitattu 10.11.2022]

PIX4D. s.a.3. Image acquisition. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/115002471546-Image-acquisition>. [viitattu 12.9.2023]

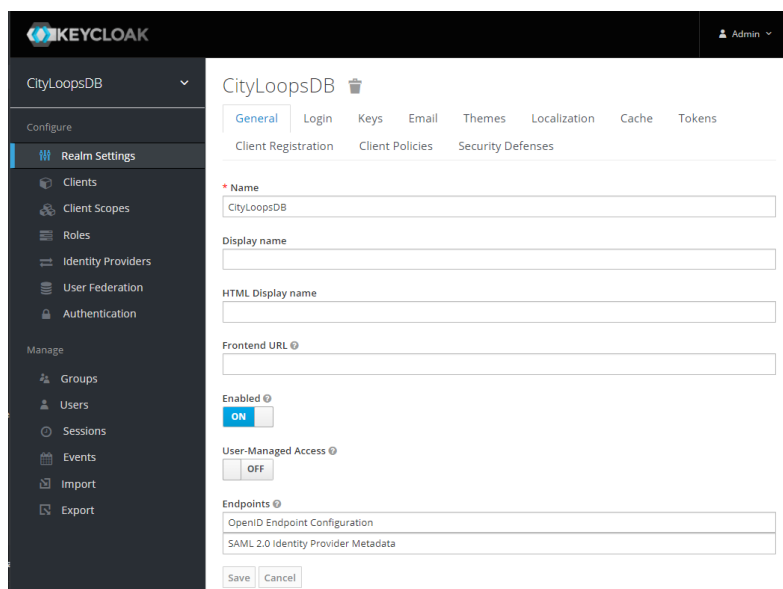
Terrill, R. 1994. Radiance vs. Reflectance. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://www.nv5geospatialsoftware.com/Support/Maintenance-Detail/ArtMID/13350/ArticleID/19247/3377>. Päivitetty 31.12.2013. [viitattu 10.11.2022]

SOVELLUSKEHITYKSEN VALMISTELU

Miika Hämäläinen

CityLoopsDB on sisäilman laatumittauksiin suunnitellun Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun VOC-Online-datapankin jatkoehitetty ja muokattu versio. Kehitystyö alkoi VOC-Onlinen asennukseen ja käyttöönottoon perehtymisellä. Sovelluksen asennuksen pystyi jakamaan viiteen osaan: käyttäjähallintaa hoitava Keycloak, Keycloakin tietokanta, sovelluksen tietokanta, sovelluksen palvelinosuus sekä käyttöliittymäosuus. Keycloak ja sen vaatima tietokanta asennetaan Docker-konteina. Konteille on annettava oikeat ympäristömuuttujat asennusvaiheessa. Näihin muuttujiin kuuluu muun muassa tietokantayhteyden muodostus sekä alustavat pääkäyttäjän tunnukset.

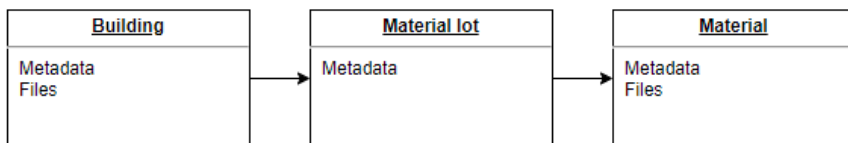
Kun kontit on asennettu oikeilla ympäristömuuttujilla, päästään säätämään Keycloakin asetuksia järjestelmänvalvojan konsolista (kuva 1). Konsolin kautta luodaan datapankille realm eli alue, jolla on muun muassa yhteiset asetukset, käyttäjät ja käyttäjäryhmät. Yhtä aluetta voi käyttää useampi sovellus, mutta jokainen aluetta käyttävä sovellus on lisättävä konsolista hyväksytyksi asiakasohjelmaksi. Jokaiselle asiakasohjelmalle asetetaan omat turvallisuusasetuksensa, jotka rajoittavat muun muassa sitä, mistä osoitteesta voidaan uudelleenohjata kirjautumissivulle.



Kuva 1. Keycloakin järjestelmänvalvojan konsoli (kuva Miika Hämäläinen).

KEHITYSTYÖ

Alkuperäisen VOC-Online-sovelluksen datamalli oli helposti uudelleenkäytettävissä purkumateriaalien arkistointiin (kuva 2). Ylimpänä entiteettinä oli rakennus, jolla on omat attribuuttinsa ja tiedostoja. Rakennusten alle liitetään mittauspaikkoja, joilla on omat attribuuttinsa, ja mittauspaikkojen alle tulee mittautulokset omilla attribuuteillaan. City-Loopsin datapankkia varten mittauspaikat oli muutettava materiaaalieriksi ja mittautulokset materiaaleiksi. Attribuutteja oli muokattava jokaisella entiteettitasolla käyttötarkoitukseen sopivammiksi. Attribuutit pyrittiin saada vastaamaan ympäristöministeriön purkukartoitustulomaketta.



Kuva 2. CityloopsDB:n entiteettien yksinkertaistettu datamalli (kuva Miika Hämäläinen).

KÄYTTÖÖNOTTO

Sovellus otettiin käyttöön Microsoftin Azure-pilvipalvelussa. Moniosaisuuden vuoksi sovellus otettiin käyttöön Ubuntu-virtuaalikoneella. Virtuaalikoneella pystyi pyörittämään sovelluksen lisäksi Docker-kontteja, ja tallennuskapasiteettia voidaan lisätä tarvittaessa. Virtuaalikoneeseen kohdistuvaa liikennettä hallitsee Apache2, joka on konfiguroitu ohjaamaan liikennettä Keycloakille ja datapankkiin aliverkkotunnuksen mukaan. Keycloakin rajapintayhteys ja järjestelmänvalvojan konsoli löytyvät osoitteesta keycloak.cityloopsdb.net, ja datapankki on osoitteessa db.cityloopsdb.net.

TIEDON ARKISTOINTI

Arkistoinnin ensimmäinen vaihe on rakennuksen lisääminen. Rakennukselle syötetään perustietoja, kuten rakennusvuosi ja omistaja, sekä suuntaa antavia tietoja rakennuksen sisältämistä purkumateriaaleista, kuten runko- tai perustusmateriaali.

CityloopsDB

Kirjaudu ulos (käyttäjä1)

Lisää uusi rakennus

Etsi kohteita

Hae..

Nimi	Rakennuksen käyttötarkoitus	Rakennusvuosi	Omistaja/hallinnoija	Osoite	Näytä	Tiedostot	Muokkaa	Poista kohde
Demorakennus	Koulu	2000	Demo omistaja	Demo 1, Demo	Avaa rakennuksen tiedot	+ Lisää tiedosto		

Kuva 3. Kohdelista (kuva Miika Hämäläinen).

Tiedostojen lisääminen rakennuksen alle on tehtävä kohdelistan Lisää tiedosto painikkeella (kuva 3). Tiedostoihin voidaan lisätä numerollinen kuvaus. Tämän tarkoituksena on auttaa näkemään yhdellä silmäyksellä esimerkiksi haitta-aineraportin oleellisin arvo.

CityloopsDB
käyttäjät 1
Lisää uusi rakennus

Rakennuksen tiedot

Demorakennus

Osoite: Demo 1, Demo

Omistaja/hallinnoija: Demo omistaja

Rakennusvuosi: 2000

Rakennustunnus: 1234

Käyttötarkoitus: Koulu

Perustustapa: Betoni

Kantava runko: Betoni

Pääasiallinen ulkoseinärakenne: Betoni

Katto: Tasakatto

Kerrosluku: 1

Lisätiedot: Demorakennus

Rakennuksen ID: 618a1af5f598c442e7809dc

Rakennuksen tiedostot:

Tiedoston kuvaus

Numerollinen kuvaus

Lataa

Kohteen materiaali-erät:

Lisää uusi materiaali-erä:

Erän nimi / numero	Kategoria	Kappalemäärä	Tilavuus (m³)	Paino (t)	Kerros	Lattiamateriaali	Kattomateriaali	Seinämateriaali	Lisätiedot	Valmis myytäväksi	Materiaalit	Muokkaa erä	Poista erä
Esimerkkierä	Kasa	1	10 m³	8 t	1	Muovimatto	Akustolevy	Betoni		Ei valmis	Avaa (0)		



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No. 821033.

Disclaimer: The sole responsibility for any error or omissions lies with the editor. The center does not necessarily reflect the opinion of the European Commission. The European Commission is also not responsible for any use that may be made of the information contained herein.

Kuva 4. Rakennuksen tiedot -näköymä (kuva Miika Hämäläinen).

Kuvassa 4 on esitetty Rakennuksen tiedot -näköymä, jossa on lisäksi esillä kohteen materiaali-erät. Materiaali-erien tiedot syötetään listan yläpuolella olevalla pluspainikkeella (kuva 5). Erän tiedot sisältävät karkean kuvauksen erän sisältämistä materiaaleista ja niiden määristä. Tarkemmat tiedot erän sisältämistä materiaaleista kirjataan materiaalinäkymään. Materiaalinäkymän materiaaleihin voi myös liittää tiedostoja, kuten kuvia tai raportteja, jotka kuvaavat materiaalin kuntoa tai laatua tarkemmin. Erän voi merkitä myyntivalmiiksi, mutta erä on vietävä Kiertoon.fi-markkinapaikkaan syöttämällä tiedot sinne manuaalisesti. Materiaalien vieminen automaattisesti olisi vaatinut suuria muutoksia käyttöliittymään, ja se olisi tehnyt tietojen syöttämisestä huomattavasti hitaampaa. Monista myyntiin menevistä materiaaliluokista on ilmoitettava yksityiskohtaisia ominaisuuksia, joita ei voi saada droonikuvista. Koettiin, että materiaalien lisäysnäköymän muokkaaminen materiaalitoria muikailevaksi olisi vaikeuttanut kohtuuttomasti tiedon syöttöä. Materiaalit voidaan kuitenkin siirtää tapauskohtaisesti manuaalisesti materiaalitoriin, jos tarvittavat tiedot materiaalista löytyvät jossain muodossa vapaista tekstikentistä tai liitetiedostoista.

Takaisin rakennuksen tietoihin

Materiaalierän **testimittaus** materiaalit:

[+ Lisää uusi materiaali](#)

Ajankohta	Jäteluokitus	Hyödyntämistapa	Raportin tulokset	Lisätiedot	Tiedostot	Muokkaa	Poista kohde
20.10.2021	Puu	Hyödyntäminen energiana	Kaikki OK	Käsittelemätön	+ Lisää tiedosto esimerkkiRaportti.pdf		

Kuva 5. Materiaalinäkymä (kuva Miika Hämäläinen).

DATAPANKKIIN KERÄTTY DATA

Datapankkiin on kerätty dataa Pankalammen terveystieteiden keskukselta ja Tuuskalan sairaalasta. Molempien kohteiden perustiedot löytyvät sovelluksesta. Kumpaankin kohteeseen on liitetty tiedostoja, joihin kuuluu muun muassa asemapiirroksia, pohjapiirroksia, tutkimusraportteja ja kartoituksia. Kohteiden purkumateriaalit on listattu materiaalieriksi laivoittain tai kasoittain. Kasojen ja laivojen tilavuudet on laskettu PIX4Dmapper-fotogrammetriaohjelmalla. Lisäksi eriin on kirjattu paino, materiaalikategoria ja lyhyt kuvaus sisällöstä. Jokaiseen materiaalierään on liitetty yksi materiaali, johon on liitetty kuva kyseisestä kasasta tai laivasta.

DATAPANKISTA KOHTI PURKUKARTOITUSOVELLUSTA

CityLoops-datapankkia on testattu Mikkeliin, mutta sitä ei ole käytetty laajemmalla mittakaavalla. Hankkeen toteutuksen aikana havaittiin tarve kehittyneemmälle sovellukselle. CityLoopsin spin-off-projektissa (Rapurc) Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy ja Xamk ovat kehittäneet purkukartoitussovelluksen, jota käytetään rakennusten purkukartoituksen raportointiin ja arkistointiin. CityLoops-datapankin kehittämisestä saatuja kokemuksia hyödynnettiin kansallisen purkukartoitussovelluksen luomisessa Rapurc-hankkeessa. Purkukartoitussovellusta on pilotoitu Suomen lisäksi myös Norjassa.

PURKUMATERIAALIEN KIERRÄTYKSEN JA UUELLEENKÄYTÖN VAIKUTUKSET CO₂-PÄÄSTÖIHIN

Vuokko Malk

Kiertotaloudessa materiaalit halutaan pitää kierrossa mahdollisimman pitkään ja jätteen määrä minimoida. Rakennuksia voidaan pitää materiaalipankkeina ja kierrättämällä ja uudelleenkäyttämällä materiaaleja voidaan vähentää neitseellisten materiaalien tarvetta. Materiaaleissa ylläpidetään myös hiilivarastoja. Kiertotaloudessa materiaalikiertojen silmukat halutaan pitää mahdollisimman tiukkoina ja minimoida näin energiankulutuksen tarve uusien materiaalien valmistuksessa. (Roskilde municipality s.a.)

CityLoops-hankkeessa Roskilden kunta kehitti CO₂-laskureita purku- ja saneeraustyömaille, jotka laskevat eri purkumateriaalien elinkaaren CO₂-vaikutuksia. Laskureita voidaan hyödyntää purku- ja saneeraushankkeiden suunnitteluprosesseissa päätöksenteon ja hankintojen tukena. Työkalu tukee rakennus- ja purkujätteen sekä maa-ainesjätteisiin liittyvien hiilipäästöjen vähentämistä mahdollistamalla kierrätys- ja uudelleenkäyttövaihtoehtojen vertailun. (Roskilde municipality s.a.)

Laskureita testattiin Mikkelin demonstraatiokohteissa, joissa purettiin kaksi julkista rakennusta: Pankalammen terveyskeskus ja Tuukkalan sairaala. Laskurit eivät olleet vielä valmiina ja käytettävissä purkuhankkeiden suunnitteluvaiheessa, mutta laskureita testattiin jälkikäteen ja niiden avulla arvioitiin eri kierrätys- ja uudelleenkäyttövaihtoehtojen päästövaikutuksia.

PURKUMATERIAALIEN KIERRÄTYS- JA UUELLEEN- KÄYTTÖVAIHTOEHTOJEN CO₂-VAIKUTUKSET

CO₂-laskuri purku- ja saneerauskohteisiin laskee rakennus- ja purkujätteen päästövaikutuksia kolmessa skenaariossa: 1) materiaalin kierrätyksestä saatava mahdollinen CO₂-päästöjen säästöpotentiaali, 2) materiaalin suorasta uudelleenkäytöstä saatava mahdollinen CO₂-päästöjen säästöpotentiaali ja 3) vastaavan uuden tavanomaisen, neitseellisistä materiaaleista valmistetun materiaalin tuotannosta muodostuvat CO₂-päästöt, joihin kierrätyksen tai uudelleenkäytön päästöjä verrataan. Laskuri sisältää 11 materiaaliluokkaa: betoni, hiekka

ja sora, maa-aines, tiilet, lasi, kipsi, rakennusteräs, bitumi/asfaltti, alumiini, eristeet ja puu. Laskuri on yksinkertainen Excel-työkalu, ja sen tarkoituksena on toimia päätöksenteon välineenä, kun halutaan nopeasti vertailla eri kierrätys- ja uudelleenkäyttövaihtoehtojen hiilivaikutuksia. (Roskilde municipality s.a.) Laskuri on avoimesti saatavilla (Roskilde municipality s.a.b).

Lähtöarvoina tarvitaan ainoastaan materiaalien määrät, jotka saadaan esimerkiksi purkukartoituksesta. Laskurissa on annettu tiedot käytetyistä päästökertoimista ja niiden lähteistä. Esimerkiksi kuljetusten päästökertoimet ovat enimmäkseen suomalaisesta VTT:n LIPASTO-tietokannasta. Suurin osa rakennusmateriaalien päästökertoimista on puolestaan tanskalaisen rakennusalan tutkimusinstituutin julkaisusta (SBI 2019).

LÄHTÖARVOT

Mikkelin demonstraatioissa kaikki demonstraatiokohteiden purkujäte kuljetettiin Metsäsairilan lajittelu- ja kierrätyskeskukseen, jossa se hyödynnettiin alueen tie- ja kenttärakenteissa, loppusijoitettiin kaatopaikalle tai toimitettiin kierrätykseen tai energiahyötykäyttöön. Useimpien jätelajien kohdalla nykyinen käytäntö Mikkelissä on sama kuin laskurin ”no circular action” -vertailuarvo, vaikka suurin osa materiaaleista hyödynnetäänkin alueen maanrakentamisessa. Laskurin avulla voitiin arvioida päästöjen säästöpotentiaalia mahdollisissa korkeamman kierrätyksen ”upcycling”-skenaarioissa.

Lähtöarvoina käytettiin pääasiassa Metsäsairila Oy:n raportoimia toteutuneita purkujätelmääriä Pankalammen terveyskeskuksen ja Tuukkalan sairaalan purkutyömailta (taulukko 2). Laskurissa monien materiaalien lähtöarvot on ilmoitettava tilavuuksina tai pinta-aloina, joten monissa tapauksissa tarvittiin yksikkömuunnoksia.

HIEKKA/SORA

Laskurin avulla voidaan arvioida, kuinka paljon päästöjä voidaan säästää, jos maa-ainekset (hiekkasora) hyödynnetään purkupaikalla sen sijaan, että ne kuljetettaisiin loppusijoitukseen. Laskelmassa huomioidaan kuljetuksen CO₂-päästöt sekä pyöräkuormaajan ja kippiauton käyttöön liittyvät päästöt. Mikkelin demonstraatioissa maa-ainesten määriä ei ollut arvioitu, joten päästöjä ei laskettu. Maa-aineksia hyödynnettiin työmaa-alueiden maisemoinnissa.

BETONI

Laskurin avulla voidaan arvioida, kuinka paljon päästöjä voidaan säästää kierrättämällä betonijäte uuden betonin valmistukseen tai uudelleenkäyttämällä betonielementit sellaiseenaan. Vertailuarvona käytetään perinteisen uuden betonin valmistuksessa syntyviä päästöjä.

Mikkelin demonstraatioissa betonijäte kuljetettiin Metsäsairilaan, jossa se hyödynnettiin alueen maanrakennuksessa tie- ja kenttärakenteissa. Betonijätettä kertyi yhteensä 18 960 tonnia. Betoni- ja tiilijäte sekoitetaan keskenään, joten määrä sisältää myös tiilijätteen. Pilaantunutta tai lievästi pilaantunutta betonia ei ole huomioitu laskennassa, koska se ei sovellu kierrätykseen tai uudelleenkäyttöön. Laskurissa betonin määrä tulee ilmoittaa kuutiometreinä. Betonin määrä muutettiin kuutiometreiksi betonin tiheydellä 2 400 kg/m³ (LKAB Minerals Oy 2015). Lähtöarvoksi saatiin tällöin:

$$18\,960\text{ t} / 2,4\text{ t/m}^3 = 7\,900\text{ m}^3$$

TIILET

Laskurin avulla voidaan arvioida tiilien kierrätyksen tai uudelleenkäytön päästövähennyspotentiaalia verrattuna uusien tiilien valmistuksen aiheuttamiin päästöihin. Kierrätyksellä tarkoitetaan tilannetta, jossa tiilet puhdistetaan ja käytetään uudelleen joko purkupaikalla uudessa rakennuksessa tai muussa rakennuksessa. Uudelleenkäytöllä puolestaan tarkoitetaan tilannetta, jossa tiiliseinän osia leikataan pienemmiksi paloiksi ja käytetään uudelleen, kuten esimerkiksi tanskalainen yritys Gamle Mursten on tehnyt (Gamle Mursten 2018). Laskurin perusteella tässä uudelleenkäyttöskenaariossa tarvitaan kuitenkin paljon kuljetuksia, mikä vähentää päästöjen säästöpotentiaalia.

Mikkelin demonstraatioissa tiiliseinät purettiin koneellisen ulkopurun aikana kaivinkoneella. Tiilijäte sekoitettiin betonijätteeseen ja kuljetettiin Metsäsairilaan, jossa se hyödynnettiin alueen maanrakennuksessa tie- ja kenttärakenteissa. Tiilien puhdistusta kierrätystä varten demonstroitiin Tuukkalan sairaalan purkutyömaalla pienimuotoisesti. Suomessa vanhoja tiiliä on kierrätetty jonkin verran uudisrakennuksissa. Tiiliseinäkappaleiden hyödyntäminen on Suomessa ollut vähäistä, mutta tätäkin on kokeiltu muun muassa Xamkin ReUse-hankkeessa.

Mikkelin demonstraatiokohteiden tiilijätteen määrää ei tiedetä, koska tiilijäte sekoitui betonijätteeseen. Pankalammen terveystieteiden tiiliseinän määräksi arvioitiin kuitenkin 838 m² (Luotolampi 2022). Tuukkalan sairaalan tiiliseinän määrää ei tiedetä. Näin ollen päästölaskelma tehtiin vain Pankalammen terveystieteiden tiiliseinälle.

LASI/IKKUNAT

Laskurin avulla voidaan arvioida, kuinka paljon päästöjä säästetään, jos ikkunoita käytetään uudelleen toisessa rakennuksessa. Vertailuarvona on uusien ikkunoiden valmistuksessa syntyvät päästöt. Laskurissa ei ole ikkunoiden kierrätysskenaariota. Erilliskerättyä lasijätettä on kuitenkin mahdollista käyttää raaka-aineena uuden lasin tai vaahtolasin valmistuksessa (YM 2019).

Mikkelin demonstraatioissa lasia ei kerätty erikseen, vaan se sekoitettiin betoni- ja tiilijätteeseen, joka hyödynnettiin maanrakennuksessa Metsäsairilan alueella tie- ja kenttärakenteissa. Pankalammen terveyskeskuksen purkutyömaalta muutama ikkuna kuitenkin irrotettiin uudelleen käyttöä varten. Ennen purkutöitä lasijätteen määräksi arvioitiin urakoitsijoiden jäteraporteissa yhteensä 20 tonnia (Pankalampi 10 t, Tuukkala 10 t). Laskimessa lähtöarvo on ilmoitettava neliömetreinä. Ikkunan paino on 10 kg/m² (Luotolampi 2022). Lähtöarvoksi saatiin siten:

$$20 \text{ t} / 0,010 \text{ t} / \text{m}^2 = 2\,000 \text{ m}^2$$

KIPSI

Laskurin avulla voidaan arvioida päästövähennyspotentiaalia, jos kipsijäte kierrätetään uuden kipsin valmistuksessa. Vertailuarvona on tavanomaisen kipsin valmistus. Kipsille ei ole laskurissa uudelleenkäyttöskenaariota. Laskuri antaa kipsille melko pienen päästösäästöpotentiaalin. Tämä johtuu siitä, että laskurissa käytetyssä Okobaudat-tietokannan vertailumateriaalissa on jo hyödynnetty kierrätysmateriaaleja.

Mikkelissä kipsi lajiteltiin erikseen Pankalammen terveyskeskuksen purkutyömaalla (määrä 91 t). Tuukkalassa kipsijätettä ei lajiteltu erikseen, mutta urakoitsijan jätemääräarviossa määräksi oli arvioitu kymmenen tonnia. Mikkelissä kipsiä ei ole toimitettu kierrätykseen pitkien kuljetusmatkojen ja kustannusten vuoksi, vaan kipsijäte päättyy loppusijoitukseen. Laskurissa kipsin määrän syöttöarvo tulee antaa neliömetreinä. Kipsilevyn paino on 9,9 kg/m² (Luotolampi 2022). Kipsin lähtöarvoksi saadaan siten:

$$101 \text{ t} / 0,0099 \text{ t/m}^2 = 10\,202 \text{ m}^2$$

TERÄS JA ALUMIINI

Laskurin avulla voidaan arvioida teräksen ja alumiinin kierrätyksen tai uudelleenkäytön päästövähennyspotentiaalia perinteisen teräsprofiilin tai alumiinilevyn valmistuksen sijaan. Kantavien teräsprofiilien uudelleenkäytöllä voidaan säästää huomattava määrä päästöjä, jos uudelleenkäyttö on huomioitu jo suunnitteluvaiheessa niin, että profiili voidaan purkaa. Myös alumiinilevyjen kierrätyksellä on suuri päästöjensäätöpotentiaali. Levyt on helppo purkaa, koska ne asennetaan yleensä ruuveilla. Purkamisen yhteydessä levyt lajitellaan ja puhdistetaan, minkä jälkeen ne voidaan kuljettaa kuormalavoilla uuteen rakennuskohteeseen, jossa ne voidaan jälleen asentaa ruuveilla. (Roskilde municipality s.a.b)

Teräksen ja alumiinin kierrätys uusien tuotteiden valmistukseen on myös järkevää. Laskurin vertailuarvona käytetään tavanomaisen teräsprofiilin tai alumiinilevyn tuotantoa.

Mikkelin demonstraatiokohteissa metallijäte lajiteltiin erikseen ja toimitettiin kierrätykseen. Laskuri arvioi teräksen ja alumiinin päästövähennyspotentiaalin erikseen. Alumiini- ja teräsjättemääriä ei Mikkelissä raportoitu erikseen. Metallien kokonaismäärä oli 555 tonnia.

Metallit koostuivat pääasiassa betonielementtien teräksestä sekä ilmastointikanavien pellistä. Päästölaskentaa varten määrä jaettiin karkeasti seuraavasti: teräs 90 prosenttia ja alumiini 10 prosenttia. Laskimessa teräksen lähtöarvo tulee antaa kilogrammoina ja alumiinin lähtöarvo neliömetreinä. Alumiinin osalta yksikönmuunnoksessa käytettiin paksuudeltaan 1 mm alumiinilevyn painoa $2,7 \text{ kg/m}^2$ (Glocon Oy s.a.). Teräksen ja alumiinin lähtöarvoiksi saatiin siten:

$$\text{Teräs: } 0,9 \times 555 \text{ t} \times 1\,000 = 499\,500 \text{ kg}$$

$$\text{Alumiini: } 0,1 \times 555 \text{ t} \times 1\,000 / 2,7 \text{ kg/m}^2 = 20\,556 \text{ m}^2$$

BITUMI/KATTOHUOVAT

Laskurilla voidaan arvioida, kuinka paljon päästöjä voidaan säästää, jos bitumi-/kattohuopajäte kierrätetään asfaltin tuotannossa tai uuden kattuhuovan valmistuksessa. Vertailuarvona on tavanomaisen kattuhuovan tuotanto. Kattuhuopa-/bitumijätteelle ei ole laskurissa uudelleenkäyttöskenaariota.

Mikkelin demonstraatiokohteissa kattuhuopajätettä syntyi Pankalammen terveyskeskuksen purkamisesta 149 tonnia. Tuukkalan sairaalan kohteessa ei syntynyt kattuhuopajätettä. Mikkelissä kattuhuopajäte hyödynnettiin vielä demonstraatiokohteiden purkamisen aikaan kaatopaikan rakenteissa. Nykyisin kattuhuopajäte kierrätetään uuden asfaltin valmistukseen.

Laskurissa bitumin/katteen lähtöarvo ilmoitetaan neliömetreinä. Pankalammen terveyskeskuksen kolmikerroksisen bitumikattuhuovan kokonaispinta-alaksi arvioitiin $15\,085 \text{ m}^2$ vesikaton $5\,029 \text{ m}^2$ pinta-alan perusteella (Luotolampi 2022). Tätä arvoa käytettiin laskurissa lähtöarvona.

ERISTEMATERIAALIT

Laskurin avulla voidaan arvioida päästöjen säästöpotentiaalia, jos purettu eristemateriaali kierrätetään uusien eristemateriaalien tuotantoon. Uudelleenkäyttöä ei ole pidetty laskurissa relevanttina skenaariona eristemateriaaleille. Vertailuarvona on tavanomaisen mineraalivillan tuotanto.

Mikkelin demonstraatioissa Pankalammen terveyskeskuksen purkamisessa muodostui 32 tonnia eristejätettä. Tuukkalassa eristemateriaaleja ei lajiteltu erikseen, mutta urakoitsija arvioi niiden määräksi 40 tonnia ennen purkamista. Mikkelissä eristejätteet loppusijoitetaan kaatopaikalle. Orgaaniset eristemateriaalit (esim. Finnfoam, polyuretaani) voidaan lajitella energijätteeseen ja hyödyntää energiana. Laskimessa eristemateriaalien määrä on ilmoitettava kuutiometreinä. Mineraalivillan tiheys on 60 kg/m^3 (Luotolampi 2022). Eristemateriaalien lähtöarvoksi saatiin siten:

$$72 \text{ t} / 0,060 \text{ t/m}^3 = 1\,200 \text{ m}^3$$

PUUTAVARA

Laskurilla voidaan arvioida, kuinka paljon päästöjä säästetään, jos puujäte kierrätetään uusioraaka-aineena uuden lastulevyn valmistukseen tai käytetään uudelleen sellaisenaan uuden puumateriaalin sijaan. Laskurin päästökertoimien perusteella puun kierrätysprosessi lastulevyjen tuotannossa on melko energiasäästöinen, minkä vuoksi kierrätys ei juuri vähennä päästöjä. Toisaalta puutavaran uudelleenkäyttö on erittäin energiatehokasta ja mahdollisuuksien mukaan erittäin kannattavaa kiertotalouden kannalta. Vertailuarvona laskurissa käytetään tavanomaisen puutavaran valmistusta.

Mikkelin demonstraatioissa puujätettä kertyi yhteensä 296 tonnia. Mikkelissä puujäte toimitetaan energiahyötykäyttöön. Laskurissa lähtöarvo on ilmoitettava kuutiometreinä. Mänty ja kuusi ovat yleisimpiä rakennuspuulajeja. Suomen männyn tiheys on 370–550 kg/m³ ja kuusen 300–470 kg/m³ (Puuinfo Oy 2020). Tässä laskelmassa käytettiin keskiarvoa 420 kg/m³. Lähtöarvoksi saatiin siten:

$$296 \text{ t} / 0,420 \text{ t/m}^3 = 705 \text{ m}^3$$

TULOKSET

Laskurin tulokset osoittivat, että betonielementtien uudelleenkäytöllä on ylivoimaisesti suurin päästövähennyspotentiaali (kuvat 1 ja 2). Mikkelin demonstraatiokohteissa betoni oli suurin jätejake (kuva 3), kuten suurimmassa osassa purkutyömaita yleensäkin. Betonin kierrätyksellä uuden kierrätysbetonin valmistukseen olisi kuitenkin laskurin mukaan ollut ainoastaan minimaalinen päästövähennyspotentiaali. Tämä johtuu siitä, että betonin valmistuksen päästöt johtuvat pääosin sementistä. Kierrätysbetonin valmistuksessa betonijätettä käytetään ainoastaan kiviaineksen korvaamisessa. Suomessa luonnon kiviainesta on ollut helposti saatavilla ja kuljetusmatkat ovat lyhyet, joten betonijätteen kierrätyksellä ei saavuteta samanlaisia päästöhyötyjä kuin esimerkiksi Tanskassa. Betonijätteellä voidaan kuitenkin korvata neitseellisen kiviaineksen käyttöä.

Merkittäviä päästöhyötyjä voitaisiin saavuttaa myös teräsprofiilien ja alumiinilevyjen uudelleenkäytöllä, vaikka metallijätteen osuus rakennus- ja purkujätteen kokonaismäärästä on kohtuullisen pieni. Mikkelissä metallit toimitetaan kierrätykseen ja kierrätyksellä saavutetaan myös hyvä päästöhyöty verrattuna perinteisten teräs- tai alumiinituotteiden valmistukseen.

Mikkelin demonstraatioissa muiden jätejakeiden (tiilet, kipsi, bitumi, lasi, eristeet ja puutavara) laskennallinen päästösäästöpotentiaali oli laskelman perusteella pieni erityisesti verrattuna betonin ja metallien päästöjen säästöpotentiaaliin. Puun kierrätyksen päästövähennyspotentiaali uuden lastulevyn valmistuksessa on jopa negatiivinen, koska kierrätysprosessi uuden lastulevyn valmistuksessa on energiasäästöinen. Hyvälaatuiselle käytetylle

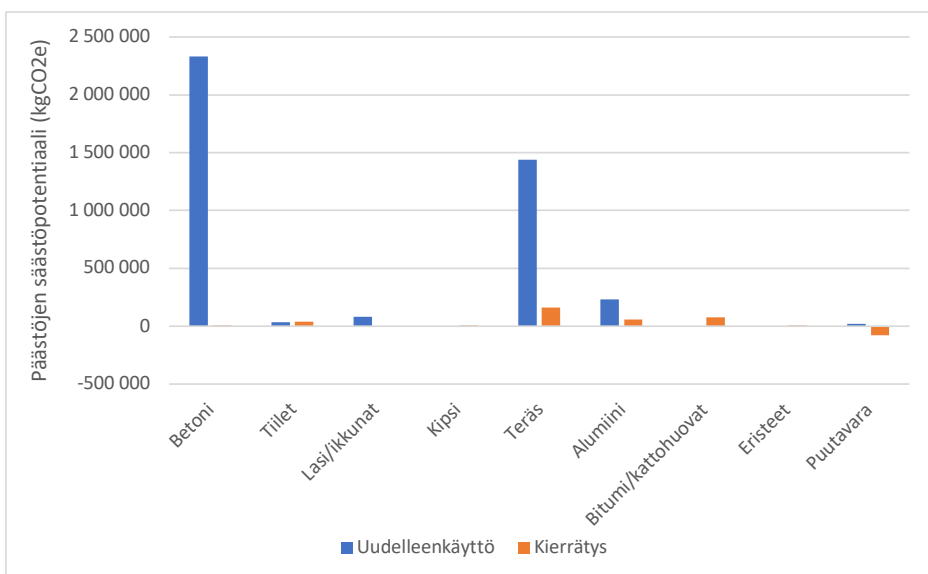
puutavaralle olisi silti hyvä löytää uudelleenkäyttö- ja kierrätyskohteita energiahyötykäytön rinnalle. Pitkällä aikavälillä ja valtakunnallisesti pienempien jättejakeidenkin päästöhyödyt moninkertaistuvat.

On huomattava, että jättejakeiden määrät muunnettiin tonneista laskurin vaatimiin yksiköihin eri lähteistä kerätyillä muuntokertoimilla. Tämä vaikuttaa syötearvojen ja tulosten tarkkuuteen.

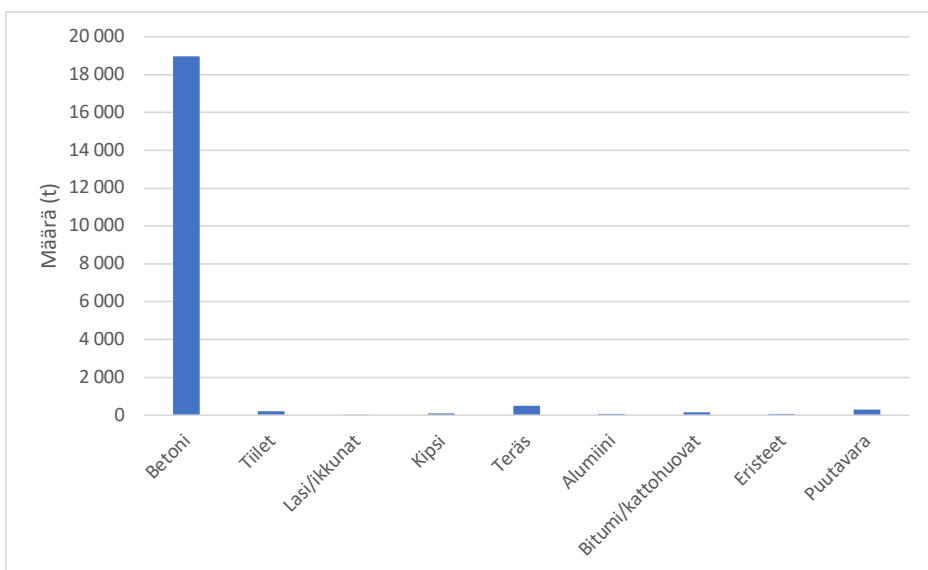


	Fraction	Unit	Amount	Circular action	Saving Potential Reuse	Saving Potential Recycling
1	Sand/Gravel	tons		No circular action	0	Not relevant
2	Soil	tons		No circular action	0	Not relevant
3	Concrete	m³	7 900	No circular action	2329315	7189
4	Bricks	m²	838	No circular action	32623	41322
5	Glass/windows	m²	2 000	No circular action	83640	Not relevant
6	Gypsum	m²	10 202	No circular action	Not relevant	1020
7	Steel	kg	499 500	No circular action	1438560	159840
8	Aluminum	m²	20 556	No circular action	231666	59201
9	Bitumen/Roofing	m²	15 085	No circular action	Not relevant	76632
10	Insulation	m³	1 200	No circular action	Not relevant	1704
11	Timber	m³	705	No circular action	19902	-77811

Kuva 1. Roskilden kunnan CityLoops-hankkeessa kehittämä CO₂-laskuri. Lähtöarvot sekä uudelleenkäytön ja kierrätyksen päästösäästöpotentiaali (kgCO₂e) eri jättejakeille Mikkelin demonstraatiokohteissa (Pankalammen terveyskeskuksen ja Tuukkalan sairaalan purku).



Kuva 2. Purkumateriaalijakeiden uudelleenkäytön tai kierrätyksen päästöjen säästöpotentiaali Mikkelin demonstraatiokohteissa laskettuna CityLoopsin CO₂-laskurilla.



Kuva 3. Eri purkumateriaalijakeiden määrät tonneina Mikkelin demonstraatiokohteissa.

MAA-AINESTEN KULJETUKSISSA SÄÄSTETTÄVÄT CO₂-PÄÄSTÖT

Roskilden kunnan kehittämällä maaperän CO₂-laskurilla voidaan arvioida maa-ainesten kuljetuksessa syntyviä CO₂-päästöjä, jos maa-ainekset kuljetetaan purkutyömaalta loppusijoituspaikalle. Toisaalta laskurin avulla voidaan arvioida CO₂-säätöpotentiaalia, jos purkuprojektissa tuotettu maa-aines hyödynnettäisiin paikan päällä kaatopaikan sijaan. Laskurin avulla voidaan yhtä lailla laskea betonijätteen kuljetuksesta syntyviä päästöjä ja päästövähennyspotentiaalia, jos betonimurske hyödynnetään maanrakentamisessa purkutyömaalla tai lähialueella. Laskuri on avoimesti saatavilla (Roskilde municipality s.a.c).

Mikkelin demonstraatiokohteissa maamassoja hyödynnettiin paikan päällä purkutyömaiden maisemointiin. Maamassojen määrästä ei kuitenkaan ole arviota. Näin ollen laskuria ei voitu käyttää arvioimaan maamassojen hyödyntämisessä säästettyjä päästöjä.

Hypoteettisessa tilanteessa Pankalammen terveyskeskuksen ja Tuukkalan sairaalan purkamisesta syntyvää betonijätettä olisi voitu käyttää demonstraatioalueilla uuden rakennuksen perustustöissä. Molemmat tontit ovat tyhjiillään, eikä alueille ole valmiita rakennussuunnitelmia. Huomioitavaa on myös, että Mikkelin keskusta sijaitsee tärkeällä pohjavesialueella, mikä rajoittaa murskeen käyttöä maanrakentamisessa.

Mikkelin demonstraatioissa laskettiin maa-ainesten CO₂-laskurilla (versio 1.51) betonijätteen kuljettamisen päästöt Metsäsairilan lajittelu- ja kierrätyskeskuksen alueelle sekä päästöjen säästöpotentiaali, jos betonia olisi hyödynnetty maanrakentamisessa demonstraatiokohteissa.

LÄHTÖARVOT

Pilaantumaton betonijätettä, jota voitaisiin hyödyntää maanrakentamisessa, muodostui Mikkelin demonstraatiokohteissa yhteensä 18 960 tonnia. Betonijäte kuljetettiin Metsäsairilan lajittelu- ja kierrätyskeskuksen alueelle ja hyödynnettiin maanrakennuksessa. Esimerkiksi Pankalammen työmaalta pilaantumaton betonijätettä kertyi 312 kuormaa. Molemmilta purkutyömailta matkaa Metsäsairilaan oli yhdeksän kilometriä. Laskurin lähtöarvot on esitetty kuvassa 4.

Laskuri huomioi maa-ainesten tai betonin kuljetuksesta aiheutuvat päästöt, mutta myös pyöräkuormaajan ja kippiauton käytöstä työmaalla aiheutuvat päästöt (kuvat 5–6). Mikkelin tapauksessa tehtiin kuitenkin oletus, että betonimurskeen hyödyntäminen työmaalla ei lisää pyöräkuormaajan ja kippiauton käyttöä verrattuna betonin hyödyntämiseen Metsäsairilan alueella maanrakennuksessa tai neitseellisen maa-aineksen käyttöön työmaalla. Siksi pyöräkuormaajan ja kippiauton käyttötunneiksi asetettiin nolla. Tarkempia laskelmia varten pyöräkuormaajan ja kippiauton tarvitsemat tunnit voidaan kuitenkin arvioida tapauskohtaisesti yhteistyössä urakoitsijan kanssa.

CO₂ calculator for soil transport

Comments	LCI	
Cells marked in blue, should be filled. All distances are calculated from site where soil is excavated. Cells marked in yellow cover on site handling of soil.	Distance to end deposite, km	9
	Distance to local reuse, km	0
	Amount of soil, tons	18960
	Reuse percentage	100
	Use of wheel loader, hours	0
	Use of dumper, hours	0
CO2-emissions soil transport per tonne kilometre	Soil transport, kg CO2/tonkm	0,081
CO2-emissions crushing per tonne material, diesel crusher	Wheel loader, kg CO2/hour	25,68
CO2-emissions local transport	Dumper, kg CO2/hour	37,54
CO2-emissions full trailer combination, two way transport	Transport of loader and dumper kg CO2	135,13
	Kg CO2e per liter diesel	2,65

Kuva 4. Roskilden kunnan kehittämä CO₂-laskuri maaperäkuljetuksille. Lähtöarvot Mikkelin demonstraatioissa, joissa laskettiin betonijätteen kuljetuksesta aiheutuvat päästöt sekä päästöjen säästöpotentiaali, jos betonijäte olisi hyödynnetty purkutyoimaalla maanrakentamisessa.

Processes	Emissionsfactors	Source/comments
Transport, kg CO2/tonkm		LIPASTO, Earth moving lorry, Gross vehicle mass 32t, pay load capacity 19t, 75 % Highway driving and 25% urban driving, 2016 average
	0,081	LIPASTO 0% returnload
Transport crusher and screener kg CO2		LIPASTO, Full trailer combination Gross vehicle mass 76t, pay load capacity 51t, 9 axles. 75% Highway driving and 25% urban driving.
	135,13	Distance 4*25km.
Parameters for machinery		
CO2 per liter diesel	2,64	Energistyräsen
kg CO2 per kWh	0,85	Kleemann
Efficiency [tonne per hour]	100	Informed by MIS
Weight [tons/m3 beton]	2,4	Epd
Engine capacity screener [kW]	95	McCloskey
CO2 emmision dumper [kg/hour]	37,54	LIPASTO
CO2 emmision wheel loader [kg/hour]	25,68	LIPASTO
Parameters for transport		
Earth moving lorry, highway driving [kg CO2/tkm]	0,04	LIPASTO
Earth moving lorry, urban driving [kg CO2/tkm]	0,073	LIPASTO
Earth moving lorry returload, highway driving [kg CO2/km]	0,558	LIPASTO
Earth moving lorry, returload urban driving [kg CO2/km]	0,838	LIPASTO
Earth moving lorry, payload [ton]	19	LIPASTO
Full trailer combination (76t), highway [kg CO2/km]	1,43	LIPASTO
Full trailer combination (76t), urban driving [kg CO2/km]	2,55	LIPASTO
Full trailer combination (76t), highway [kg CO2/km] Retu	0,87	LIPASTO
Full trailer combination (76t), urban driving [kg CO2/km]	1,36	LIPASTO
Percentage of highway driving (75%)	0,75	Average
Percentage of urban driving (25%)	0,25	Average
Total transport distance for machinery used on site [km]	100	Average

Kuva 5. Roskilden kunnan kehittämässä maa-aineskuljetusten CO₂-laskurissa (v 1.51) käytetyt päästökertoimet.

TULOKSET

Betonijätteen kuljettaminen Mikkelin demonstraatioalueilta Metsäsairilaan aiheutti 13 738 kg CO₂-päästöjä (kuva 6). Nämä päästöt voitaisiin välttää, jos betonijäte hyödynnettäisiin työmaalla. Jos demonstraatiokohteisiin rakennetaan tulevaisuudessa uusia rakennuksia, sinne todennäköisesti kuljetetaan neitseellistä maa-ainesta, jolloin kuljetusten päästöt helposti kaksinkertaistuvat. Kuljetuksissa ja maanrakennustöissä saavutetut päästövähennykset ovat kuitenkin minimaaliset verrattuna betonielementtien uudelleenkäytön päästösäästöpotentiaaliin (yli 2 miljoonaa kg CO₂).

CO ₂ saving potential		
Soil transport	Project CO2 saving	reference
Transport to end deposite, kg CO2		13 873
Transport to site for reuse, kg CO2	0	
Use of wheel loader	0	
Use of dumper	0	
Transport wheel loader and dumper	135	
Kg CO₂	13 738	Reference

Kuva 6. Betonijätteen kuljetusten CO₂-päästöjen säästöpotentiaali Mikkelin demonstraatioissa, jos betonijäte olisi hyödynnetty purkutyömaiden maanrakennustöissä esimerkiksi uuden rakennuksen perustuksissa.

Koska tämä CO₂-laskin on suunniteltu ensisijaisesti maa-aineksille, se ei ota huomioon betonin murskaamisesta aiheutuvia päästöjä. Toisaalta voidaan olettaa, että betonijäte murskattaisiin joka tapauksessa, jolloin murskauksesta ei aiheudu lisäpäästöjä. Näin on oletettu myös esimerkiksi Ramboll Finland Oy:n (2019) tekemässä päästölaskelmassa. Tällä hetkellä Mikkeliissä käytäntönä on, että betonijätettä murskataan Metsäsairilassa.

Myös neitseellisen maa- ja kiviaineksen kaivaminen tai murskaaminen aiheuttaa päästöjä, jos neitseellistä maa-ainesta käytettäisiin demonstraatioalueen tulevissa maanrakennustöissä. Rakentamisen päästötietokannassa (<https://CO2data.fi/>) ilmoitettu kalliomurskeen päästökerroin on 0,007 kg CO₂e/kg. Jos karkeasti oletetaan, että purkutyömaalle tuotaisiin myöhemmässä rakennusvaiheessa sama määrä neitseellistä kiviainesta kuin purkuvaiheessa kuljetettiin pois betonijätettä (18 960 t), tämän kalliomurskeen päästöt olisivat:

$$18\,960\,000 \text{ kg} \times 0,007 \text{ kg CO}_2\text{e} / \text{kg} = 132\,720 \text{ kg CO}_2\text{e} / \text{kg}$$

Nämä päästöt voitaisiin säästää korvaamalla neitseellinen kiviaines betonimurskeella.

JOHTOPÄÄTÖKSET

Molemmat laskurit havainnollistivat hyvin erilaisten kierrätys- ja uudelleenkäyttöskenaarioiden päästövähennyspotentiaalia, ja laskurit olivat hyvin yksinkertaisia ja helppokäyttöisiä. Betoni oli Mikkelin demonstraatio-purkukohteissa suurin jätejäte, ja CDW-laskuri osoitti hyvin, että betonielementtien uudelleenkäytöllä on ylivoimaisesti suurin päästösäästöpotentiaali. Käyttämällä betonimursketta maanrakentamisessa työmaalla voidaan säästää kuljetusten päästöjä ja myös neitseellistä kiviainesta, mutta säästöt ovat pieniä verrattuna betonin uudelleenkäyttöön elementteinä.

Laskureita voidaan hyödyntää rakennus- ja purkuhankkeiden sekä jätteenkäsittelyn suunnittelussa. Laskurit voivat myös toimia yhtenä käytännön työkaluna, kun etsitään keinoja ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi rakennusalaalla. On kuitenkin huomattava, että paikalliset olosuhteet vaikuttavat materiaalien kierrätykseen ja uudelleenkäyttöön eivätkä kaikki laskureiden kierrätys- ja uudelleenkäyttöskenaariot ole tällä hetkellä saatavilla Suomessa tai Mikkelissä. Suomessa myös pitkät kuljetusmatkat voivat joissakin tapauksissa vaikuttaa päästövähennyspotentiaaliin. Vastaavalla tarkastelutavalla olisi kuitenkin mahdollista tehdä tarkempia päästölaskelmia materiaalien potentiaalisille uudelleenkäyttö- tai kierrätysvaihtoehdoille Mikkelissä.

LÄHTEET

Gamle Mursten 2018. Gamle Mursten Facade System with brick shells cut from recycled Bricks. Environmental product declaration. Saatavilla: https://gmsystemer.dk/media/1677/epd_gmsystemer_uk.pdf

Glocon Oy s.a. Metallien painolaskuri. Saatavilla: <https://glocon.fi/metallien-painolaskuri/>

LKAB Minerals Oy 2015. Raskasta asiaa betonista – Raskasbetoni. Betoni 2/2015. Saatavilla: https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/08/BET1502_74-77.pdf

Luotolampi, J. 2022. MÄÄRÄLASKENTA Pankalammen terveystakeskus, Kiiskinmäenkatu 5-7, 50130 Mikkeli. Mikkelin kehitysyhtiö Miksei Oy.

Puuinfo Oy 2020. Puutieto, puun ominaisuudet. Lujuusteknisiä ominaisuuksia. 25.6.2020. Saatavilla: <https://puuinfo.fi/puutieto/puun-ominaisuuksia/lujuusteknisia-ominaisuuksia/>

Ramboll Finland 2019. Ahosen Palvelut Oy – Betonimurskeen päästöselvitys. Muistio. 1510052184.

Roskilde municipality s.a. Lifecycle CO₂e Calculator for Demolition and Renovation Sites. CityLoops Tool Factsheet. Saatavilla: [CityLoops Tool factsheet Lifecycle CO₂ calculator.pdf](#)

Roskilde municipality s.a.b. CO₂ Calculator for Demolition and Renovation Sites. CityLoops Excel-työkalu. Saatavilla: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.roskilde.dk%2Fmedia%2Fwtjycahh%2FCO₂-calculator_cdw_1-3.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK

Roskilde municipality s.a.c. CO₂ calculator or soil transport. Excel-työkalu. Saatavilla: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.roskilde.dk%2Fmedia%2F50lpawdj%2FCO₂-calculator_soil_v1-51.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK

SBI 2019. Livscyklusvurdering for cirkulære løsninger med fokus på klimapåvirkning. Forundersøgelse. Forskning i det byggede miljø, SBI 2019:08 Polyteknisk Boghandel og Forlag ApS. Saatavilla: <https://build.dk/Assets/Livscyklusvurdering-for-cirkulaere-loesninger-med-fokus-paa-klimapaavirkning/SBI-2019-08.pdf>

