

# METSÄ, YMPÄRISTÖ JA ENERGIA

Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä

Vuosijulkaisu 2021

Hanne Soininen & Noora Haatanen & Lasse Pulkkinen (toim.)



Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu

Hanne Soininen & Noora Haatanen & Lasse Pulkkinen (toim.)

# **METSÄ, YMPÄRISTÖ JA ENERGIA**

Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä

Vuosijulkaisu 2021

**XAMK KEHITTÄÄ 183**

**KAAKKOIS-SUOMEN AMMATTIKORKEAKOULU  
MIKKELI 2021**

© Tekijät ja Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

Kannen kuva: Aki Mykkänen

Taitto ja paino: Grano Oy

ISBN: 978-952-344-408-9 (nid.)

ISBN: 978-952-344-409-6 (PDF)

ISSN: 2489-2467 (nid.)

ISSN: 2489-3102 (verkko)

[julkaisut@xamk.fi](mailto:julkaisut@xamk.fi)

# LUKIJALLE

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu (Xamk) tuottaa uutta tutkimusta ja menetelmiä sekä kehittää tuotteita ja palveluja alueidensa tarpeisiin. Tutkimus- ja kehittämisorganisaationa Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu tähtää etenkin toiminta-alueensa Kouvolan, Kotkan, Mikkelin ja Savonlinnan seutujen elinvoiman vahvistamiseen. Suuntaviivoja tutkimus- ja kehitystyölle luovat muun muassa maakuntien, alueen yritysten ja Euroopan unionin strategiset tavoitteet. Tutkimusyhteistyötä tehdään yritysten, järjestöjen, julkisyhteisöjen, yliopistojen, ammattikorkeakoulujen ja tutkimuslaitosten kanssa kansallisella ja kansainvälisellä tasolla.

Vuoden 2021 *Metsä, ympäristö ja energia – soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä* -julkaisu on laaja kokoelma alueellisesti, kansallisesti ja kansainvälisesti merkittäviä bio-, kierto- ja vesitaloutta sekä uusien teknologioiden TKI-toimintaa käsitteleviä artikkeleita.

Tekijät kiittävät hankkeiden ja opinnäytetöiden rahoittajia sekä yhteistyökumppaneita yhteisen tutkimus- ja kehitystoiminnan mahdollistamisesta.

Mikkelissä 22.12.2021

*Tekijät*



# TEKIJÄT

**ELIAS ALTARRIBA**, TkL, projektipäällikkö

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Logistiikka ja merenkulku

**ANTERO CEDERSTRÖM**, suunnittelupäällikkö

Mikkelin kaupunki

**ANNA DUNDERFELT**, tradenomi (ylempi AMK), projektipäällikkö

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

**ANNE GANGO**, DI, lehtori

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

**JONNE GRÅSTEN**, FM, kehityspäällikkö

Metsäsairila

**ARI HAAPANEN**, Insinööri (YAMK), lehtori

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Kulttuurin koulutusyksikkö

**KIMMO HAAPEA**, KTM, kehityspäällikkö

Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy

**NOORA HAATANEN**, DI, projektipäällikkö

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

**HENNA-RIIKKA HAIKONEN**, insinööri (AMK), projektitutkija

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

**ESA HANNUS**, paikkatietoasiantuntija

Lappeenrannan kaupunki

**JUSSI HEINIMÖ**, TkT, ohjelmajohtaja

Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy

**AKI HEINONEN**, DI, projektipäällikkö

Metsäsairila

**YRJÖ HILTUNEN**, FT, tutkimuspäällikkö

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

**MIKKO HOKKANEN**, DI, projektipäällikkö

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

**SAMULI HOTTINEN**, insinööri (AMK), tutkimusinsinööri

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

**SATU HUURTOMAA**, FM (geologia), tutkimusinsinööri

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

**EETU HUTTUNEN**, sähkötekniikan kandidaatti, tutkimusapulainen

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

**ARI-PEKKA HYTTINEN**, insinööriopiskelija (AMK)

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

**SARI HYVÖNEN**, FM, kemisti

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

**LASSE HÄMÄLÄINEN**, insinööri (AMK), tutkimusinsinööri

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

**SARI HÄMÄLÄINEN**, insinööri (AMK), kehitysinsinööri

Mikkelin kaupunki

**MEERI HÄYRYNEN**, DI, projektitutkija

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

**TOMI HÖÖK**, DI, TKI-asiantuntija

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

**KATI JORDAN**, KM, TKI-asiantuntija

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

**PANU JOUHKIMO**, EcoSairilan alueen koordinaattori

Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy

**JANNE JUNNINEN**, FM-opiskelija, tutkimusapulainen

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

**JOHANNA JÄRVINEN**, insinööri (AMK), kiertotalousasiantuntija

Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy

**JOONAS KAHILUOTO**, DI, tutkija

SYKE Laboratoriokeskus

**MIKA KAINUSALMI**, KTM, DI, kehittämispäällikkö

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

**VILLE KAKKONEN**, DI, toimitusjohtaja

Metsäsairila Oy

**TIINA KAPRIO**, DI, TKI-asiantuntija

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

**EETU KARHUNEN**, erikoissuunnittelija

Metsähallitus

**OONA KARJALAINEN**, tekn.yo

Aalto-yliopisto

**TEEMU KARTTAAVI**, insinööri (AMK), tutkimusinsinööri

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

**HENRI KETTUNEN**, insinööri (AMK), tutkimusinsinööri

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

**PAULUS KIVIRANTA**, insinööri (AMK), tutkimusinsinööri

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

**ERNO KOKKONEN**, ins. opiskelija

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

**JUSSI KONTTILA**, insinööri (AMK), tutkimusinsinööri

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

**HANNA-KAISA KOPONEN**, FT, tutkimusjohtaja

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

**RIKU KOPRA**, TkT, TKI-asiantuntija

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

**TUIJA KORPELA**, DI, tutkimusinsinööri

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

**ALLI KOSKINEN**, FM, projektitutkija

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

**EVELIINA KUOKKANEN**, DI, projektipäällikkö

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

**HANNU KUOPANPORTTI**, TkT, vanhempi tutkija

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

**MAUNU KUOSA**, TkT, kehitysinsinööri

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

**TANJA KURONEN**, ins. opiskelija

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

**PAULIINA KUUKKA**, metsätalousinsinööri (AMK), projektiasiantuntija

Uutta elämää Group (Mikkelin Toimintakeskus ry)

**TOMMI KUVAJA**, kiinteistöpäällikkö

Mikalo Oy

**JARI KÄYHKÖ**, TkT, TKI-asiantuntija

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

**ANSSI LAAMANEN**, luomuviljelijä

**KARI LAINE**, DI, asiantuntija

Kouvola Innovation Oy

**TURO LAINE**, tekniikan kandidaatti, tutkimusinsinööri

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

**ANNE LAITINEN**, insinööri (AMK), jäteneuvoja

Metsäsairila Oy

**NIINA LAURILA**, insinööri (AMK), TKI-asiantuntija

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

**MARJATTA LEHESVAARA**, FM, lehtori

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsätalouden ja ympäristöteknologian koulutusyksikkö

**PETRI LEIRIVIRTA**, metsätalousteknikko, projektin vastuuhenkilö  
Ammattiopisto SAMIedu

**PÄIVIKKI LIUKKONEN**, FM, projektitutkija  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**RAIMO LILJA**, TkT, kiertotalousasiantuntija  
Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy

**NELLY LOUKIALA**, ins. opiskelija  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

**VUOKKO MALK**, FM, TKI-asiantuntija  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**MARINA MARKOVA**, insinööri (AMK), tutkimusinsinööri  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**MELINA MAUNULA**, DI, TKI-asiantuntija  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**ARI MIELO**, DI, projektiasiantuntija  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**MARJA MIKOLA**, FM, väitöskirjatutkija  
Oulun yliopisto, Kemiällisen prosessitekniikan yksikkö

**AKI MYKKÄNEN**, insinööri (AMK), projektitutkija  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**KAI MÖLLER**, insinööri (AMK), projektipäällikkö  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**EKATERINA NIKOLSKAYA**, FT, projektitutkija  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**MIKKO NYKÄNEN**, DI, TKI-asiantuntija  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**VESA NYRHINEN**, pastori, toiminnanjohtaja  
ViaDia Mikkeli ry



**JUHA-PEKKA ONTRONEN**, KTM, projektiasiantuntija

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

**OLLI PAAJANEN**, DI, projektipäällikkö

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

**EETU PAASONEN**, insinööri (AMK), diplomityöntekijä

Tampereen yliopisto, Materiaalitekniikka

**NIINA PAASOVAARA**, FM, projektitutkija

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

**ANTTI PAPPINEN**, insinööri (AMK), projektitutkija

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

**LEENA PEKURINEN**, insinööri (YAMK), projektitutkija

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

**KARI PELTONEN**, DI, T&K-johtaja MC-teknologiat

Andritz Oy

**TONI PESONEN**, insinööri (AMK), konsultti

Joros Oy

**MARKO PIISPA**, laboratorioteknikko

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

**LOTTA PIRINEN**, insinööri (AMK), projektitutkija

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

**JOONAS PIETIKÄINEN**, ins. opiskelija

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

**LASSE PULKKINEN**, FT, tutkimusjohtaja

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

**SALLA PULLIAINEN**, insinööri (AMK), projektipäällikkö

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

**MIA PURSIAINEN**, insinööri (AMK), projektitutkija

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

**TIMO PYHÄLAHTI**, DI, erikoissuunnittelija  
Suomen ympäristökeskus (SYKE)

**SIRPA RAHIALA**, TkT, TKI-asiantuntija  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**JUHO RAJALA**, FT, lehtori  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**TUIJA RANTA-KORHONEN**, FM, insinööri (AMK), TKI-asiantuntija  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**ANTI ROHUMAA**, TkT, projektipäällikkö  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**IDAMARIA ROMAKKANIEMI**, DI, väitöskirjatutkija  
Oulun yliopisto, Kemiallisen prosessiteknikan yksikkö

**TIINA SAARIO**, DI, projektitutkija  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**MILLA SAIRANEN**, insinööri (AMK), kehitysinsinööri  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**HANNU SARVELAINEN**, DI, lehtori  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Rakennus- ja energiateknikan koulutusyksikkö

**SARI SEPPÄLÄINEN**, ins. (AMK), laboratorioinsinööri  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsätalouden ja ympäristötekniikan koulutusyksikkö

**MARKUS SILLANPÄÄ**, dosentti, erikoistutkija  
Suomen ympäristökeskus (SYKE)

**HANNE SOININEN**, TkT, tutkimuspäällikkö  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**JUHA SOLIO**, laitosvastaava BioSampo  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**MIIA SOURANDER**, insinööri (AMK), tutkimusinsinööri  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**RAMJEE SUBRAMANIAN**, TkT, TKI-asiantuntija

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

**KIRSI TALLINEN**, DI, tutkimuspäällikkö

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

**MARLEENA TIRKKONEN**, insinööri (AMK), tutkimusinsinööri

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

**ERJA TULINIEMI**, insinööri (AMK), projektipäällikkö

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

**RIINA TUOMINEN**, insinööri (ylempi AMK), projektipäällikkö

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

**IRINA TURKU**, TkT, projektipäällikkö

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

**JUHANI TURUNEN**, TkL, TKI-asiantuntija

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

**ELLI TYKKÄ**, insinööri (AMK), laboratorioinsinööri

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

**JONNE TYNKKYENEN**, insinööri (AMK), toimitusjohtaja

Esmarin Composites Oy

**ILKKA VANTTAJA**, DI, TKI-asiantuntija

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

**TUOMAS VELLONEN**, Biotuotetekniikan insinööriopiskelija (AMK),

tutkimusapulainen

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

**KITI VENÄLÄINEN**, tradenomi (ylempi AMK), projektipäällikkö

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

**JUHA VIHAVAINEN**, insinööri (AMK), tutkimusinsinööri

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

# SISÄLTÖ

LUKIJALLE.....	3
TEKIJÄT.....	4
TIETOA, INNOVAATIOITA JA ALUEELLISTA VAIKUTTAVUUTTA.....	17
Lasse Pulkkinen & Hanne Soininen	
RAKENNUS- JA PURKUJÄTTEIDEN KIERTOTALOUTTA EDISTÄMÄSSÄ CITYLOOPS-HANKKEESSA .....	21
Hanne Soininen & Vuokko Malk & Miika Hämäläinen & Juha Vihavainen & Lasse Hämäläinen & Esa Hannus & Sari Seppäläinen & Tuija Ranta-Korhonen & Kimmo Haapea	
KIERTOTALOUDEN TOIMINTAMALLEJA RAKENNUS- JA PURKUJÄTTEELLE – RAPURC .....	30
Kimmo Haapea & Raimo Lilja & Kai Möller & Leena Pekurinen & Hanne Soininen	
ORGAANISEN JÄTTEEN KIERTOTALOUTTA EDISTÄMÄSSÄ MIKKELISSÄ – CITYLOOPS.....	35
Hanne Soininen & Vuokko Malk & Leena Pekurinen & Tiina Saario & Johanna Järvinen & Anne Laitinen & Jonne Gråsten & Tommi Kuvaja	
BIOCIR- JA BIOLUUPPI-KOKONAISUUDELLA KIERTOTALOUTTA KEHITTÄMÄSSÄ.....	43
Hanne Soininen & Tiina Saario & Aki Heinonen & Jonne Gråsten & Ville Kakkonen	
MEKSTIILI-SUUNNITTELUHANKE TEHOSTAA TEKSTIILIEN KIERTOTALOUTTA.....	47
Kati Jordan & Miia Sourander & Hanne Soininen & Jonne Gråsten & Johanna Järvinen & Pauliina Kuukka & Vesa Nyrhinen	
TYÖHYGIEENISET OLOT KIERRÄTYSOIMINNASSA.....	49
Salla Pulliainen & Pauliina Kuukka	
KIERTOVIRRAT-HANKKEESSA SELVITETTIIN JÄTEVESILIETTEEN KÄSITTELYMAHDOLLISUUKSIA.....	54
Salla Pulliainen & Jussi Konttila	
JATKUVATOIMINEN MITTAUS JÄTEVESIEN HAITTA-AINEIDEN HAVAINNOINNISSA.....	58
Riina Tuominen & Lasse Hämäläinen	

ETELÄ-SAVON VESISTÖJEN PUHTAUTTA EDISTÄMÄSSÄ.....	67
Niina Laurila & Hanne Soininen & Joonas Kahiluoto & Markus Sillanpää & Timo Pyhälähti	
HULEVESIEN LAADULLINEN HALLINTA JA HAITALLISTEN AINEIDEN MONITOROINTI .....	75
Tuija Ranta-Korhonen & Hanne Soininen & Aki Mykkänen & Marleena Tirkkonen	
KAATOPAIKKOJEN SUOTO- JA HULEVESIEN KÄSITTELYÄ KEHITTÄMÄSSÄ – DEVE & DEVO .....	80
Salla Pulliainen & Hanne Soininen & Aki Mykkänen & Panu Jouhkimo & Sari Hämäläinen & Antero Cederström	
SIEKKILÄNJOEN KARTOITUS KUNNOSTUSTOIMIA VARTEN.....	83
Erno Kokkonen & Tanja Kuronen & Nelly Loukiala & Joonas Pitkänen & Juho Rajala & Eetu Karhunen	
JATKUVATOIMINEN SAMEUSMITTAUS SEKÄ KIINTOAIN- JA FOSFORIPITOISUUDET MIKKELIN HANHIJOELLA .....	89
Tuija Ranta-Korhonen	
SADEMÄÄRÄT JA JATKUVATOIMISET MITTAUKSET MIKKELIN HANHIJOELLA .....	102
Tuija Ranta-Korhonen	
HULEVESIEN KÄSITTELYN T&K-YMPÄRISTÖ.....	113
Aki Mykkänen & Sari Hämäläinen & Jussi Heinimö	
BIOHIILISOVELLUKSET METSÄTEOLLISUUDEN SIVUAINEVIRROISTA.....	121
Vuokko Malk & Marjatta Lehesvaara & Sari Seppäläinen & Hanne Soininen & Aki Mykkänen & Lasse Hämäläinen & Noora Haatanen & Sari Hyvönen	
VOLTAMMETRILAITTEISTON KÄYTTÖÖNOTTO XAMKIN YMPÄRISTÖLABORATORIOSSA .....	128
Marjatta Lehesvaara	
MIKROAALTOHAJOTUS OSANA BIOHIILTEN JA TUHKIEN ANALYSOINTIA...135	
Alli Koskinen	
ALKUAINEANALYSAATTORIN TOIMINTA JA KÄYTTÖ XAMKIN YMPÄRISTÖLABORATORIOSSA .....	141
Janne Junninen	
BIOHIILEN HAITTA-AINEET JA NIIDEN VÄLTÄMINEN MAANPARANNUSKÄYTÖSSÄ SERTIFIOINNIN AVULLA.....	149
Henri Kettunen	



BIOHIILEN UUDET KÄYTTÖKOHTEET RAKENNUSMATERIAALINA.....	159
Riina Tuominen & Hanne Soininen & Jussi Heinimö	
BIOHIILEN KÄYTTÖ RAKENNUSMATERIAALEISSA .....	162
Riina Tuominen & Miia Sourander	
TUHKATIEKOE LABORATORIOSSA .....	167
Henna-Riikka Haikonen & Riina Tuominen	
TUHKATEIDEN JA TUHKALANNOITUSALUEIDEN YMPÄRISTÖSEURANNAN TULOKSIA .....	179
Riina Tuominen & Henna-Riikka Haikonen & Juha Vihavainen	
EFSOA-HANKKEEN ENSIMMÄISEN MONITOROINTIVUODEN TULOKSIA ....	192
Leena Pekurinen & Tuija Ranta-Korhonen & Anssi Laamanen	
KANSAINVÄLISELLÄ YHTEISTYÖLLÄ VIERASKASVEJA TORJUMAAN .....	202
Tuija Ranta-Korhonen & Päivikki Liukkonen	
VIERASKASVILAJITIEOUTTA PAIKALLISILLE TOIMIJOILLE JA KOULULAISILLE .....	206
Päivikki Liukkonen & Tuija Ranta-Korhonen	
YMPÄRISTÖKASVATUSTA DIGITAALISEN MATERIAALIN AVULLA IUGABALT2-HANKKEESSA .....	215
Marina Markova & Tuija Ranta-Korhonen	
KESTÄVYYS- JA LUONTOARVOJEN HUOMIOIMINEN PUUNKORJUUSSA....	219
Anna Dunderfelt & Petri Leirivirta	
SAFECON-HANKKEESSA TEHTYJEN YLIMMÄN JOHDON HAASTATTELUIJEN VERTAILUA: ASEENTEET JA KÄYTÄNTEET SUOMESSA JA VENÄJÄLLÄ.....	227
Milla Sairanen & Henna-Riikka Haikonen	
THE USE OF IT SYSTEMS IN MANAGING CONSTRUCTION SITE SAFETY IN FINNISH SMES .....	235
Henna-Riikka Haikonen & Milla Sairanen	
KOKOONPANON KEHITTÄMINEN SIMULOINNIN AVULLA.....	244
Mikko Hokkanen & Ari-Pekka Hyttinen	
KAPPAREDUKTION MALLINNUKSEN HAPPIDELIGNIFIOINNIN AVULLA .....	249
Jari Käyhkö & Antti Pappinen & Kari Peltonen	
HAPPIDELIGNIFIOINNIN LABORATORIOTUTKIMUKSIIN LIITTYVÄN ANALYYSI- JA KOEMETODIIKAN KEHITYS JA KÄYTTÖÖNOTTO KUITULABORATORIOILLA.....	260
Jari Käyhkö & Antti Pappinen	

MITTAUSJÄRJESTELYT KUIVA-AINETASEEN LASKEMISEEN SELLUTEHTAAN KUITULINJALLA.....	271
Riku Kopra	
SELLUTEHTAAN VALKAISUSUODOSTEN PUHDISTAMINEN KALVOTEKNIIKAN AVULLA.....	278
Meeri Häyrynen & Mia Pursiainen & Juhani Turunen	
ENERVE-PROJEKTI – MITTAUS- JA MALLINNUSMENETELMIÄ ENERGIATEHOKKAASEEN VEDENPOISTOON .....	285
Yrjö Hiltunen & Ekaterina Nikolskaya	
LIGNIININ MÄÄRITYS MUSTALIPEÄSTÄ KÄYTTÄEN MATALA KENTTÄ <sup>1</sup> H NMR -SPEKTROSKOPIAA .....	292
Yrjö Hiltunen & Ekaterina Nikolskaya	
KOIVUHAKKEEN KUUMAVESIUUTTO PAKKOKIERTOKEITTIMELLÄ .....	298
Lotta Pirinen & Tuomas Vellonen & Marja Mikola & Idamaria Romakkaniemi	
KSYLONIN SAOSTAMINEN ESIHYDROLYSAATISTA.....	305
Lotta Pirinen & Idamaria Romakkaniemi	
KORKEAN SAKEUDEN VAIKUTUS SELLULOOSAKARBAMAATIN VALMISTUKSEEN.....	314
Noora Haatanen	
BIO-BASED FIBRE NETWORKS: FIBRE FLOCCULATION AND FRACTIONATION .....	322
Ramjee Subramanian	
HUGGER – UUDENTYYPPIINEN MENETELMÄ MATERIAALIEN PROSESSOINTIIN .....	334
Niina Paasovaara & Irina Turku & Hannu Kuopanportti	
ANALYSIS OF MUNICIPAL SOLID WASTE COMBUSTION BOTTOM ASH .....	339
Irina Turku & Oona Karjalainen	
UUSI BIOJALOSTUSKONSEPTI UUSIUTUVIEN BIPOHJAISTEN KEMIKAALIEN JA MATERIAALIN VALMISTUKSEEN.....	346
Noora Haatanen & Juha-Pekka Ontronen	
LESSONS LEARNED – VERKKO-OPPIMATERIAALIN TUOTTAMISEN KEHITYSPROSESSI .....	353
Kati Jordan	
KOKEMUKSIA 3D-TULOSTUKSEN UUDESTA PILOT-YMPÄRISTÖSTÄ .....	361
Mikko Nykänen & Ilkka Vanttaja & Eetu Huttunen & Toni Pesonen & Jonne Tynkkynen	

TESTITALOT OTANIEMESTÄ SAVONLINNAAN TUTKIMUSYMPÄRISTÖKSI ....	371
Lasse Pulkkinen & Samuli Hottinen & Anti Rohumaa	
RÖNTGENMIKROSKOPIA TUTKIMUSMENETELMÄNÄ PUUPOHJAISTEN TUOTTEIDEN TUTKIMUKSESSA.....	377
Olli Paajanen & Anti Rohumaa & Eetu Paasonen	
DIGITAALISTEN TEKNOLOGIOIDEN HYÖDYNTÄMINEN ETELÄ-SAVON TEKNOLOGIATEOLLISUUDEN LIIKETOIMINNASSA.....	386
Juha-Pekka Ontronen & Kiti Venäläinen & Ari Mielo	
BIO- JA KIERTOTALOUDEN VERKOSTOJEN VOIMA.....	393
Kirsi Tallinen & Kari Laine & Mika Kainusalmi & Tomi Höök	
TEKSTIILIMATERIAALIEN KIERRÄTYS HIENONTAMALLA .....	404
Anne Gango & Eveliina Kuokkanen	
BETONIN HIILIDIOKSIDIKOVETUS .....	413
Elli Tykkä & Tiina Kaprio & Hanna-Kaisa Koponen	
ENERGIATEHOKKUUS JA HUKKALÄMPÖJEN HYÖDYNTÄMINEN KANNATTAA .....	421
Tuija Korpela & Paulus Kiviranta & Erja Tuliniemi & Teemu Karttaavi & Hannu Sarvelainen & Maunu Kuosa	
LÄMMÖN KULUTUSJOUSTON MAHDOLLISUUDET .....	434
Paulus Kiviranta & Tuija Korpela & Erja Tuliniemi	
ENERGIAYHTEISÖT VIRTUAALIVOIMALAITOKSIEN AVULLA KYMENLAAKSOON .....	439
Turo Laine & Erja Tuliniemi & Tomi Höök	
KYMENLAAKSOLAISEN SYMBIOOSIN JÄLJILLÄ .....	445
Kirsi Tallinen & Satu Huurtomaa	
SOVELTAVA TUTKIMUS KIERTOTALOUDEN KESKIÖSSÄ: KIERTOTALOUDEN OSAAMISKESKUSKONSEPTI HYÖTYVIRTA-ALUEELLE.....	451
Melina Maunula & Juha Solio & Ari Haapanen	
MEPTEK-HANKKEESSA TYÖSKENNELLÄÄN MONINAISILLA MENETELMILLÄ .....	462
Sirpa Rahiala & Elias Altarriba & Marko Piispa	

# TIETOA, INNOVAATIOITA JA ALUEELLISTA VAIKUTTAVUUTTA

Lasse Pulkkinen & Hanne Soininen

Alueellinen ja yhteiskunnallinen vaikuttaminen ovat tärkeitä arvoja Xamkin Metsä, ympäristö ja energia -vahuusalan TKI-toiminnassa. Innovaatioprojektimme ja yhteistyö asiakkaidemme sekä toimintaympäristömme muiden tärkeiden sidosryhmien kanssa tähtäävät kestävyydeltään parempiin tuotteisiin, resurssitehokkaampiin tuotantomenetelmiin sekä parempaan ympäristön laatuun. Lisäksi edistämme uusien korkeaan osaamiseen ja teknologiaan perustuvien liiketoimintojen ja kokonaisten liiketoimintaekosysteemien kehittymistä erityisesti Etelä-Savon ja Kymenlaakson maakuntiin, niiden kaupunkeihin ja maakunnissa toimiviin yrityksiin. TKI-toiminnassa viestintä on tärkeä osa tätä alueellista vaikuttamista.

Vuoden 2021 aikana vahuusalamme TKI-toiminta on ollut ennätyksellisen laajaa. Kymenlaaksossa operoivat Kymilabs-tutkimusyksikkö, BioSampo-tutkimuslaboratorio sekä vahuusala kokonaisuudessaan ovat entisestään vahvistaneet yritysyhteistyötä ja alueiden älykkääseen erikoistumiseen perustuvaa kehitystyötä ja soveltavaa tutkimusta. Tässä vuosijulkaisussa tuodaan esille tästä lähtökohdasta erityisesti Euroopan Vihreään siirtymään keskeisesti liittyvät uusiutuvien ja älykkäiden energiajärjestelmien sekä bio- ja kiertotalouden hanketoiminnan viimeaikaisia tuloksia. Konkreettiset energiatehokkuutta – ja energiasektorin kiertotaloutta – kehittävät projektit niin teollisuuden ja kiinteistöjen hukkalämmön hyötykäytön, virtuaalivoimalaitosten kuin kulutusjouoston mahdollisuuksien näkökulmista ovatkin loistavia esimerkkejä kehitystoiminnasta, jolla on sekä alueellista että kansallista ja kansainvälistä vaikuttavuutta.

## KIERTOTALOUTTA JA VÄHÄHIILISIÄ RATKAISUJA KEHITTÄMÄSSÄ KYMENLAAKSOSSA

Bio- ja kiertotalouden materiaali- ja käsittelymenetelmien tutkimus- ja kehitystoiminta on ollut Xamkin Kymenlaakson toiminnassa vahvan kehittämisen kohteena jo usean vuoden ajan. Kiertotalouden alalla esille tuodaan keinoja erikoistua tekstiilijätteen uusiokäytön ja kierrätyksen alalla. Samoin julkaisussa käsitellään omassa artikkelissaan alueellisesti erittäin tärkeän Hyötyvirta-kiertotalouden yritysekosysteemiin kiinnittyvän tutkimus- ja kehitystoiminnan mahdollisuuksia yritysten, ammattikorkeakoulun ja elinkeino-yhtiöiden yhteistyönä. Vaikka tämä innovaatioyhteistyö on vielä voimakkaasti paikallista ja alueellista, on helppo nähdä, kuinka tässäkin esimerkiksi paikallisesti tuotetut innovaatiot ja toimintamallit voivat tulevaisuudessa kasvaa osaksi laajaa suomalaista ja kansainvälistä yhteistyötä.

Yhteisten toimintamallien kehittäminen ekosysteemi- sekä yritys–tutkimuslaitosverkostojen avulla osana alueellista kehittämistä on esillä tärkeän BUT-hankkeen katsauksessa. Alueellisten ekosysteemien, klustereiden ja innovaatioryppäiden toimintamallien teknistaloudellinen, toimintakulttuureihin, luottamukseen ja edelläkävijyyteen pureutuvat analyysit sekä niistä oppiminen tulevatkin jatkossa olemaan entistä suuremman mielenkiinnon kohteina Xamkissa. Samalla tuotetaan tärkeää tietoa, jota voidaan hyödyntää laaja-alaisemminkin alueellisen innovaatio-, osaamis- ja elinkeinopolitiikan tehostamisessa.

Rakennusalaan liittyen Xamkin TKI-toiminnan viimeaikaiset panostukset Kymenlaaksossa on kohdistettu erityisesti betonin ja sen valmistusreseptien kehittämiseen entistä ilmastoystävällisemmiksi. Tästä kehitystyöstä on kuvaava ja ajankohtainen katsaus julkaisussa. Xamk on saanut alalle vuoden 2021 aikana merkittäviä kansallisiakin hankepäätöksiä. Alaan liittyen tullaan varmasti tulevina vuosina saamaan vielä paljon lisää rakennustuoteteollisuutta ja koko rakennusklusteria koskevia Xamkin tuottamia tutkimuskatsauksia.

Meriklusterin ja laivaliikenteen päästöjen hallinnan tehostaminen on jatkuvasti ajankohdainen ja tärkeä aihe Itämeren alueella. Onkin erittäin tärkeää, että Xamkin vahva ilmaan syntyvien haitallisten päästöjen monitorointi-, mittaus- ja mallinnusosaaminen on mukana laajemmassa Itämeren alueen ympäristövaikutuksia kahlitsevassa kehitystyössä. MEPTEK-hanketta koskeva kirjoitus on samalla loistava esimerkki merilogistiikan ja päästömittausalan yhteistyöstä Xamkin sisäisesti.

## **UUSIA MATERIAALITUTKIMUKSEN JA PROSESSITEKNIKOIDEN AVAUKSIA**

Etelä-Savossa toimivat vahvat tutkimusyksikkömme Mikpolis, Kuitulaboratorio sekä Elektromatiikan 3K-tehdas. Mikpolioksen näkökulmasta vahvasti kasvanut puumateriaalitutkimus on hienosti esillä tässä julkaisussa. Mikpolioksen tutkimusyksikköön hankittu uusimpaa analyysitekniikkaa edustava nanotomografialaite ja siihen kytkeytyvä vahva uusiutuvan metsäklusterin yhteistyö onkin malliesimerkki uudistumiskyvystämme. Samalla hanketta käsittelevä artikkeli esittelee mainiolla tavalla sitä, miten Mikkelin ja Savonlinnan TKI-osaamistamme on hyödynnetty puurakentamiseen liittyvien materiaaliratkaisujen innovatiivisissa kehittämisissä.

Elektroniikan 3K-tehtaan innovaatio- ja kehitystoiminta on viimeisten vuosien aikana vahvistanut yhteistyötään erityisesti kuitumateriaali- ja metsäalan toimijoiden kanssa. Synergiaa on kehitetty Kuitulaboratorion ja Mikpolioksen kanssa, mutta myös suhteessa Suomen vahvoihin sektoritutkimuslaitoksiin, erityisesti Luonnonvarakeskukseen. Leimallista on vahva yritys-yhteistyö, jota esitellään sekä teknologiateollisuudessa työskentelevien henkilöiden osaamistason nostamiseen tähtäävässä kehitystoiminnassa että uusien digitaalisten valmistus- ja suunnittelumenetelmien käyttöönoton edistämisessä. Muutaman vuoden ajan kehitetty lisäävän valmistuksen ja 3D-tulostuksen teknologioihin onkin panostettu laaja-alaisesti unohtamatta bio- ja



puupohjaisia materiaaliratkaisuja. Samalla esitellään EU-rakennerahaston tuomaa vaikutusta alueelliseen kehittämistoimintaan AMAP-hankkeessa kehitetyn monipuolisen pilot-ympäristön muodossa. Odotettavissa onkin, että kehitysympäristöön liittyen saadaan tulevaisuudessa lukea uusia mielenkiintoisia katsauksia alan materiaali- ja menetelmäkehityksestä. Kehitysalusta on poikimassa myös uusia avauksia Xamkin ja Aalto-yliopiston välillä, ja toivottavasti tämänkin yhteistyön tuloksista on mielenkiintoista ja innostavaa kerrottavaa tulevan vuoden aikana.

Kuitulaboratorion osalta julkaisussa olevat artikkelit liittyvät vahvoihin tutkimusyksikön tutkimusaloihin sellutehdas-metsäbiojalostamon yksikköprosessien tehostamisen sekä uuden teknologian prosessimittausten aloilla. Lisäksi esitellään Aalto-yliopiston ja Münchenin teknillisen yliopiston kehittämän testitalokonseptin uuden kehitysjakson käynnistämistä Savonlinnassa. Konsepti liittyy rakennustekniikan koulutuksen oppimisympäristöön että erilaisten materiaaliratkaisujen monitoroinnin tutkimus- ja seurantaympäristöön.

Kuitulaboratorion tutkimusalaan liittyen julkaisussa on koosteet lisäksi Xamkille erityään tärkeistä HORIZON 2020 -hankkeista, joista esitellään lähemmin Eurooppa-tason yhteistyötä biojalostamokehityksen ja siihen kytkeytyvän osaamisen ja oppimateriaalien tuottamisen näkökulmista.

Metsäteollisuuden tärkeään sivuvirtaan, hemiselluloosaan, jäteveden puhdistuksen ja valkaisu suodosten hallintaan sekä kartongin valmistuksen prosessien hallinnan hienouksiin pureutuvat artikkelit ovat loistavia esimerkkejä osaamisista ja alalla tarvittavista ratkaisuista, joita muun muassa Oulun yliopiston, VTT:n ja teollisuuden kanssa olemme tuottamassa. Vahvaa prosessi- ja laitetekniikan osaamista kiertotalouden ja kaivannaisteollisuuden tarpeista kehitetään Hugger-projektissa, josta esitellään jätteenpolton uudelleenkäytön mahdollisuuksia. Kehitystyö alalla on vasta pääsemässä vauhtiin pilotointiympäristön valmistuessa, ja tästäkin aiheesta tulee varmasti uutta tietoa lähivuosien julkaisuissa.

## **YMPÄRISTÖTURVALLISUUTTA JA KIERTOTALOUTTA EDISTÄMÄSSÄ MIKKELIN KAMPUKSELLA**

Xamkin Mikkelin ympäristöturvallisuuden tutkimusryhmä edistää muun muassa vesistöjen puhtautta ja ravinteiden suljettua kiertoa yhdessä alueellisten, kansallisten ja kansainvälisten yhteistyökumppaneidemme kanssa. Mikkelissä on ollut käynnissä yritysten, kuntien ja tutkimuslaitosten kanssa vuonna 2021 yli 25 ympäristöturvallisuuteen sekä bio-, vesi- ja kiertotalouteen liittyvää tutkimusprojektia, joista yhdeksän on ollut kansainvälisiä hankkeita. Kehitystyön tukena on Mikkelin kampuksen ympäristölaboratorio.

Vuosijulkaisussa 2021 on esillä laajasti artikkeleita Mikkelissä toteutettavasta ympäristöturvallisuuden ja kiertotalouden alueellisesta, kansallisesta ja kansainvälisestä yhteistyöstä. Uusimpia alueellisia avauksia ovat muun muassa vesistöjen monitorointiin, hulevesien

ja suotovesien käsittelyyn keskittyvät ”Vesistöjen puhtautta edistämässä uusin menetelmin – WaterPlus”- ja ”Deve – Demonstraatioympäristö kaatopaikan suoto- ja hulevesien ympäristökuormituksen vähentämiseksi”- sekä ”Devo – Kaatopaikan suoto- ja hulevesien uudet käsittelymenetelmät” -kokonaisuudet. WaterPlus-hankkeessa yhteistyössä Suomen ympäristökeskuksen kanssa kehitetään muun muassa vesistöihin kohdistuvien, hulevesistä peräisin olevien haitta-aineiden, erityisesti mikromuovien, analysointia ja monitorointia. Kokonaisuutta rahoittaa Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan aluekehitysrahastosta. Deve- ja Devo-kokonaisuudessa kehitetään kaatopaikkojen suoto- ja hulevesien puhdistusmenetelmiä sekä monistettava ja siirrettävä ratkaisu kaatopaikoilla muodostuvien vesien käsittelyyn yhteistyössä Mikkelin kaupungin ja Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy:n kanssa. Kokonaisuutta rahoittaa Etelä-Savon maakuntaliitto Euroopan aluekehitysrahastosta.

Käynnissä on myös useampi kansallinen hanke, joista muun muassa ympäristöministeriön vesiensuojelun tehostamisohjelmasta rahoitetusta ”Hulevesien laadullinen hallinta ja haitallisten aineiden monitorointi – Hula” -kokonaisuudessa tehdään erilaisten hulevesien käsittelyjärjestelmien monitorointia yhteistyössä Mikkelin kaupungin kanssa. Uusin kiertotalouden alueellinen avaus on Mekstiili-suunnitteluhanke, jossa yhteistyössä Metsäsairila Oy:n, Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy:n, Mikkelin Toimintakeskus ry:n ja ViaDia Mikkelin ry:n kanssa kehitetään resurssiviisasta poistotekstiilien hyödyntämistä. Kehitystyötä rahoittaa Etelä-Savon maakuntaliitto maakunnan omaehtoisen kehittämisen määrärahaa.

Kansainvälisessä yhteistyössä on keskiössä vesi-, bio- ja kiertotalous. Uusin kansainvälinen avaus on Kaakkois-Suomi–Venäjä CBC 2014–2020 -ohjelmasta rahoitettu ”Prevention and Utilization of Invasive Alien Species – PURE” -hanke, jossa lisätään tietoisuutta vieraskasvilajeista ja niiden torjunnasta Etelä-Savossa sekä Pietarissa ja Leningradin alueella yhteistyössä kansallisten ja kansainvälisten kumppaneiden kanssa.

## **YHTEISTYÖTÄ ALUEELLISESTI, KANSALLISESTI JA KANSAINVÄLISESTI**

Kokonaisuutena julkaisu toivottavasti kannustaa lukijoita vielä nykyistäkin vahvemmin Xamkin tuottaman tiedon hyödyntämiseen ja entistä kestävämpien teknologia- ja liiketoimintaratkaisujen tuottamiseen tärkeimmän toiminta-alueemme toimijoiden ja asukkaiden sekä laajemminkin yhteiskunnan hyödyksi.

Toivomme julkaisun myös lisäävän entisestään innostusta tulokselliseen innovaatioyhteistyöhön alueellisesti, kansallisesti ja kansainvälisesti. Julkaisussa olevien eri katsausten kirjoittajina on jälleen paljon Xamkin oman henkilöstön lisäksi yritysten ja muiden yhteistyötahojemme edustajia. Samoin osa julkaisuista on tehty yhdessä Xamkin tutkijoiden ja opiskelijoiden kanssa. Toivommekin, että myös tulevaisuudessa yhteisesti suunniteltujen, toteutettujen ja hyödynnettyjen projektien tuloksista kertominen jatkuu aktiivisena niin yritysten kuin alalle koulutettavien uusien ja tulevaisuuden osaajien myötä.

# RAKENNUS- JA PURKUJÄTTEIDEN KIERTOTALOUTTA EDISTÄMÄSSÄ CITYLOOPS-HANKKEESSA

Hanne Soininen & Vuokko Malk & Miika Hämäläinen & Juha Vihavainen & Lasse Hämäläinen & Esa Hannus & Sari Seppäläinen & Tuija Ranta-Korhonen & Kimmo Haapea

Mikkelissä edistetään rakennus- ja purkujätteiden kiertotaloutta kansainvälisessä CityLoops – Closing the loop for urban material flows -hankkeessa. Hankkeen aikana monitoroidaan kahden purettavan rakennuksen purkutyömaita sekä ympäristö- ja terveysvaikutuksia yhteistyössä Mikkelin kaupungin ja Metsäsairila Oy:n kanssa. Hankkeen aikana on kehitetty purkutyömaiden materiaalivirtojen hallintaan dronemonitorointia ja 3D-mallintamista sekä tietojen arkistointia. Demonstraatiokohteina ovat olleet Mikkelin kaupungin vuonna 2021 purkamat kiinteistöt Tuukkalan sairaala ja Pankalammen terveyskeskus. Hankkeen toteutuksesta vastaavat Mikkelissä Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu Xamk ja Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy. CityLoops-hanke alkoi 1.10.2019, ja se päättyy 30.9.2023. Hanketta koordinoi saksalainen ICLEI – Local Government for Sustainability, ja se saa rahoitusta kansainvälisesti tavoitellusta EU:n Horisontti 2020 -tutkimus- ja innovaatio-ohjelmasta (Grant Agreement No. 821033). Lisätietoja hankkeesta [www.xamk.fi/cityloops](http://www.xamk.fi/cityloops) ja [www.mikseimikkeli.fi/hankkeet/cityloops/](http://www.mikseimikkeli.fi/hankkeet/cityloops/).

## DEMONSTRAATIOKOHTEIDEN MONITOROINTIA

CityLoops-hankkeen demonstraatiokohteina ovat olleet vuonna 2021 puretut Mikkelin kaupungin omistamat kiinteistöt Tuukkalan sairaala ja Pankalammen terveyskeskus (kuva 1). Tuukkalan sairaala oli tiilirakenteinen, ja sen kaksi osaa oli rakennettu 1960–1970-luvuilla. Rakennukset olivat olleet tyhjillään jo kymmenen vuotta ennen rakennusten purkua. Pankalammen terveyskeskus oli otettu käyttöön vuonna 1976 sekä laajennusosa vuonna 1992. Erillinen hammashoitolarakennus oli otettu käyttöön vuonna 1979. Rakennukset olivat rakenteiltaan betonipilari- ja palkkirunkoisia. Seinät sekä välipohjat oli rakennettu betonielementeistä. Rakennukset ehtivät olla tyhjillään muutaman vuoden ennen purkamista.

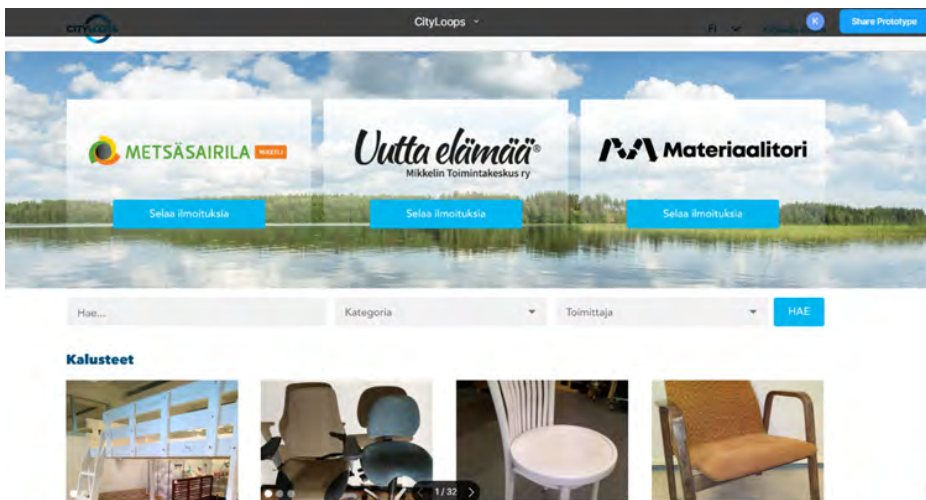


**KUVA 1.** Kuvassa vasemmalla Tuukkalan vanha sairaala ja keskellä ja oikealla Pankalammen terveyskeskuksen rakennukset (kuvat Esa Hannus).

Sisäpurun aikana kohteissa suoritettiin työhygieenisiä mittauksia henkilökohtaisilla sekä kiinteisiin pisteisiin sijoitetuilla keräimillä sekä optisen hiukkaslaskurin avulla. Mitattavia yhdisteitä olivat muun muassa VOC-yhdisteet sekä hengitettävä kokonaispöly. Hiukkaslaskurin avulla voidaan mitata hiukkasten kokonaismassaa simultaanisesti viidessä eri hiukkaskokoluokassa ja lisäksi saadaan selville kokonaishiukkaspitoisuus. Koneellisen purun aikana mitattiin purkutyömaiden aiheuttamaa ulkoilman pölylaskeumaa (kokonaistaskeuma, orgaaninen/epäorgaaninen laskeuma) työmaiden ympäristössä. Pankalammen kohteesta otettiin lisäksi näytteitä työmaan hulevesistä. Lisäksi on seurattu kohteiden purkumateriaalien määriä ja kierrätyksen ja uudelleen käytön toteutumista yhteistyössä Mikkelin kaupungin ja Metsäsairila Oy:n kanssa. Tulosten raportointi ja analysointi ovat edelleen käynnissä.

## UUSIEN MENETELMIEN KÄYTTÖNOTTOA

Hankkeen aikana on kehitetty dronemonitorointia ja 3D-mallintamista purkutyömaan materiaalivirtojen seurantaan. Lisäksi on kehitetty datapankkia ja digitaalista markkinapaikkaa purkumateriaalien tietojen tallentamiseen ja markkinointiin (kuva 2).



**KUVA 2.** CityLoops-hankkeen digitaalinen markkinapaikka (kuva Kimmo Haapea).

## DRONEMONITOROINTI – 3D-MALLINTAMINEN

CityLoops-hankkeessa demonstroidaan 3D-mallinnustyökalun käyttöä jätevirtojen seurannassa purkutyömailla. Kyseessä on toimintamalli, jossa käytetään droonikuvausta ja fotogrammetriaohjelmistoa purkutyömaakohteiden mallintamiseen ja seurantaan. Ajatuksena on, että purkutyömaasta rakennetulla 3D-mallilla voidaan määrittää lähtevän purkujätteen ominaisuuksia, kuten tilavuus- ja painotietoja. Konsepti on jo laajasti käytössä muun muassa kaivossektorilla materiaalikasojen mittauksessa ja seurannassa.

Monitorointia tehdään Phantom 4 Pro V2.0 -nelikopterilla, joka antaa riittävän tarkkoja tuloksia, kun kuvauskorkeus on 20–50 metriä. Kyseinen malli soveltuu hinta-laatusuhteeltaan fotogrammetriaan hyvin muun muassa kameran mekaanisen sulkimen ja 1” kennokoon ansiosta. Hankkeen demonstraatiokohteet olivat myös laajuudeltaan suhteellisen pieniä, joten tarvittava lentoaika kuvaukseen on lyhyt. Isomman droonin käytön (ja korkeammalle lentämisen) etuna olisi kattaa suurempi alue tai kuljettaa mukana esimerkiksi erikoiskameroita, jotka ovat liian painavia kevyemmälle droonille. Kaupunkialueilla tai lähellä sijaitsevien lentoasemien takia lentokorkeutta voidaan kuitenkin rajoittaa tai lentäminen kieltää kokonaan.

Prosessi alkaa lennon suunnittelusta. Suunnittelu tulee tehdä etukäteen paikkakohtaisesti ja ennen jokaista lentoa. Tapauksesta riippuen lento voi vaatia etukäteen tehtävän ilmoituksen tai viranomaisluvan ennen lentoa. Esimerkiksi Aviamaps Oy:n tuottama palvelu on hyödyllinen lennon suunnittelussa, koska se antaa lähes reaaliaikaista tietoa ilmatilasta, ilmailuilmoituksista, viesteistä ja paikkarajoituksista. Myös sääolosuhteet tulee ottaa huomioon lennon suunnittelussa; huono sää voi estää lentotoiminnan, häiritä kuvien laatua tai lennon turvallisuutta.

Kuva-aineisto kerätään drooniin kiinnitetyllä kameralla. Purkutyömaalla määritetään lento-ohjelmiston avulla reitti, jonka drooni lentää niin, että koko työmaa-alue saadaan kuvattua mahdollisimman kattavasti useista eri kuvakulmista. Lennon aikana otetaan kymmeniä tai jopa satoja valokuvia riippuen työmaan tai muun kuvattavan kohteen laajuudesta. Tärkeää kuvauksessa on, että kaikilla valokuvilla on riittävästi päällekkäisyyttä, jotta fotogrammetriaohjelmisto kykenee rakentamaan kuvat pistepilvimalliksi. Ohjelmistojen sopivan lentoreitin tekemiseen on useita, ja hankkeessa käytetään Pix4DCapture-ohjelmistoa. Kuvassa 3 on esitetty, miltä lentoreitti näyttää kyseisessä ohjelmassa.





**KUVA 3.** Lentoreitti Pix4DCapture-ohjelmassa (kuva Juha Vihavainen).

Dataa voidaan tuottaa monilla erilaisilla kartoitus- ja maanmittauksen ohjelmistoratkaisuilla. CityLoops-hankkeessa on käytetty Pix4DMapperia, joka muuntaa ilmakuvat mittatar-koiksi 2D-mosaiikeiksi tai 3D-pistepilviksi. Ohjelmassa voidaan tuottaa pistepilviä, karttoja, malleja, ortovalokuvia sekä mittauksia, jotka on tuotettu 2D- ja 3D-tiedoista. Kuvasta 4 nähdään Pix4DMapper-ohjelmistolla tuotettu 3D-pistepilvi Tuukkalan purkutyömaasta.

Ohjelmistolla on mahdollista laskea esimerkiksi purkujätetkasan tilavuuksia tai materiaali-määriä. Myös muita mittoja, kuten korkeuksia, etäisyyksiä ja pinta-alalaskelmia, voidaan määrittää pistepilvimallista. Tilavuuslaskenta perustuu käytännössä pikselien korkeuse-roihin. Kun materiaali tunnetaan, paino- ja irtotiheyslaskenta on myös mahdollista oh-jelmiston avulla. Kuvassa 5 on esitetty tilavuuslaskentaa, ja tiilikasan mitattu tilavuus on  $19,89 \pm 0,79 \text{ m}^3$ .



**KUVA 4.** 3D-pistepilvimalli Tuukkalan purkutyömaasta (kuva Juha Vihavainen).



**KUVA 5.** Tilavuuslaskentaa Pix4DMapper-ohjelmistolla (kuva Juha Vihavainen).

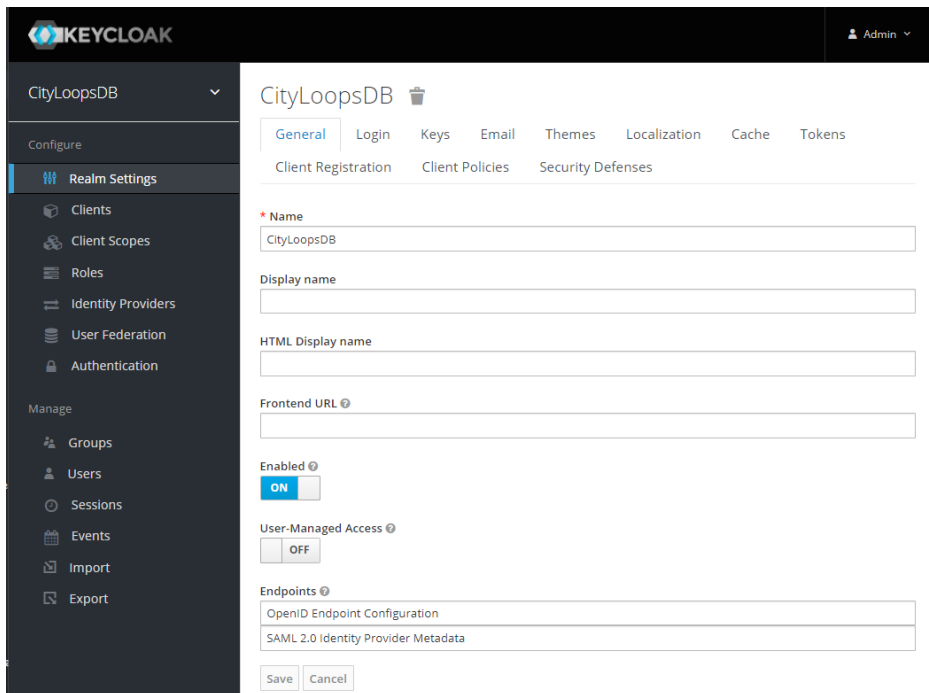
Myös spektrikuvausta on mahdollista käyttää purkujätevirtojen seurannassa. Spektrikuvaus on tekniikkaa, jossa valokuvat otetaan moni- tai hyperspektrisillä kameroilla osittain tai kokonaan normaalin näkyvän valon aallonpituuksien ulkopuolella. Spektrikuvaus perustuu eri materiaalien valon heijastuvuuteen ja absorptioon, mikä mahdollistaa erilaisten heijastusmallien luomisen materiaaleille. Materiaalien tunnistuksen lisäksi on mahdollista määrittää myös materiaalien laadullisia tekijöitä, kuten kosteuspitoisuutta. Tämä tekniikka ei ole kuitenkaan käytössä vielä laajassa mittakaavassa, ja spektrikuvaus käytössä materiaalityyppien tunnistamiseen ja laatu-tiedon selvittämiseen vaatii tarkempia tutkimuksia.

Jos purkutyömaan droonikuvaus yhdistetään päivittäisiin toimintoihin, saataisiin kaikki lähtevä materiaali jäljitettyä. Droonikuvaus käytössä voisi olla yksi vaihtoehto materiaallivirtojen seurannassa perinteisten siirtoasiakirjojen rinnalla.

## **TIEDON ARKISTOINTI DATAPANKKIIN – CITYLOOPSDB JA DIGITAALINEN MARKKINAPAikka**

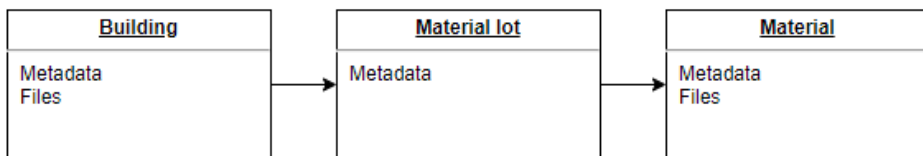
CityLoopsDB on sisäilman laatumittauksiin suunnitellun VOC-Online-datapankin jatkokokeitetty ja muokattu versio. Kehitystyö alkoi VOC-Onlinen asennukseen ja käyttöön-ottoon perehtymisellä. Sovelluksen asennuksen pystyi jakamaan viiteen osaan: käyttäjähallintaa hoitava Keycloak, Keycloakin tietokanta, sovelluksen tietokanta, sovelluksen palvelinosuus sekä käyttöliittymäosuus. Keycloak ja sen vaatima tietokanta asennetaan Docker-kontteina. Konteille on annettava oikeat ympäristömuuttujat asennusvaiheessa. Näihin muuttujiin kuuluvat muun muassa tietokantayhteyden muodostus sekä alustavat pääkäyttäjän tunnukset.

Kun kontit on asennettu oikeilla ympäristömuuttujilla, päästään säätämään Keycloakin asetuksia järjestelmänvalvojan konsolista (kuva 6). Konsolin kautta luodaan datapankille *realm* eli alue, jolla on yhteiset asetukset, käyttäjät, käyttäjäryhmät jne. 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 6.** Keycloakin järjestelmänvalvojan konsoli (kuva Miika Hämäläinen).

Alkuperäisen sovelluksen datamalli oli helposti uudelleenkäytettävissä purkumateriaalien arkistointiin (kuva 7). Ylimpänä entiteettinä oli rakennus, jolla on omat attribuutinsa ja tiedostot. Rakennusten alle liitetään mittauspaikkoja, joilla on omat attribuutinsa, ja mittauspaikkojen alle tulevat mittautulokset omilla attribuuteillaan. CityLoopsin datapankkia varten mittauspaikat oli muutettava materiaalieriksi ja mittautulokset materiaaleiksi. Attribuutteja oli muokattava jokaisella entiteettitasolla käyttötarkoitukseen sopivammiksi. Attribuuteista pyrittiin luomaan sellaisia, että ne vastaavat ympäristöministeriön purkukartoituslomaketta ja tiedonkeruu on yhtenäistä.



**KUVA 7.** CityloopsDB:n entiteettien yksinkertaistettu datamalli (kuva Miika Hämäläinen).



Sovellus otettiin käyttöön Microsoftin Azure-pilvipalvelussa. Sovelluksen moniosaisuuden vuoksi se otettiin käyttöön Ubuntu-virtuaalikoneella. Virtuaalikoneella pystyi pyörittämään sovelluksen lisäksi Docker-kontteja, ja tallennuskapasiteettiä 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.

The screenshot shows a web application interface for 'CityloopsDB'. At the top, there is a navigation bar with 'CityloopsDB' on the left, 'Kirjaudu ulos (käyttäjä1)' in the center, and 'Lisää uusi rakennus' on the right. Below the navigation bar is a search section titled 'Etsi kohteita' with a search input field containing 'Hae...'. Below the search field is a table with the following columns: Nimi, Rakennuksen käyttötarkoitus, Rakennusvuosi, Omistaja/hallinnoija, Osoite, Näytä, Tiedostot, Muokkaa, and Poista kohde. The table contains one row of data for 'Demorakennus' with the following values: Nimi: Demorakennus, Rakennuksen käyttötarkoitus: Koulu, Rakennusvuosi: 2000, Omistaja/hallinnoija: Demo omistaja, Osoite: Demo 1, Demo, Näytä: Avaa rakennuksen tiedot, Tiedostot: + Lisää tiedosto, Muokkaa: [edit icon], Poista kohde: [delete icon].

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	[edit icon]	[delete icon]

**KUVA 8.** Kohdelistaan syötetään rakennuksen perustiedot (kuva Miika Hämäläinen).

Arkistoinnin ensimmäinen vaihe on rakennuksen lisääminen. Rakennukselle syötetään perustietoja, kuten rakennusvuosi ja omistaja, sekä suuntaa antavia tietoja rakennuksen sisältämistä purkumateriaaleista, kuten runko- tai perustusmateriaaleista (kuva 8). Tiedostojen lisääminen rakennuksen alle on tehtävä kohdelistan Lisää tiedosto -painikkeesta. Tiedostoihin voidaan lisätä numerollinen kuvaus. Tämän tarkoituksena on auttaa näkemään yhdellä silmäyksellä esimerkiksi haitta-aineraportin oleellisin arvo.

Materiaalierien tiedot syötetään listan yläpuolella olevasta pluspainikkeesta (kuva 9). Erän tiedot sisältävät karkean kuvauksen erän sisältämistä materiaaleista ja niiden määristä. Tarkemmat tiedot kirjataan materiaaleihin. Materiaaleihin voi myös liittää tiedostoja, kuten kuvia tai raportteja, jotka kuvaavat materiaalin kuntoa tai laatua tarkemmin. Materiaalierän voi merkitä myyntivalmiiksi, mutta toistaiseksi materiaalierä on vietävä Kiertoont.fi-markkinapaikkaan syöttämällä tiedot sinne manuaalisesti.

CityLoops-hankkeessa on rakennettu digitaalinen markkinapaikka (CityLoopsDMP), joka hyödyntää REST API -rajapintateknologiaa. CityLoopsDMP löytyy osoitteesta <https://kiertoont.fi>. Markkinapaikkaan tuodaan tietoja Motiva Oy:n hallinnoiman Materiaalitorin rajapinnan kautta, ja siihen on mahdollista tuoda tietoja myös CityLoopsDB:stä tai muista järjestelmistä, kuten Rapurc-hankkeessa (EAKR) kehitettävästä Purkukartoitus-ohjelmasta. Jatkossa on tarkoitus testata CityLoopsDMP:n datan siirtoa Motivan kehittämään materiaalikierätyksen alustaeosysteemiin ja sitä kautta muihin järjestelmiin.

## 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: 618a1af5f598c44f2e7809dc

## Rakennuksen tiedostot:

Tiedoston kuvaus

Numerollinen kuvaus

Lataa

## Kohteen materiaalierät:

Lisää uusi materiaalierä: [+](#)

Erän nimi / numero	Kategoria	Kappalemäärä	Tilavuus (m³)	Paino (t)	Kerros	Lattiamateriaali	Kattomateriaali	Seinämateriali	Lisätiedot	Valmis myytäväksi	Materiaalit	Muokkaa erää	Poista erä
Esimerkkierä	Kasa	1	10 m³	8 t	1	Muovimatto	Akustolevy	Betoni		Ei valmis	Avaa (0)	<a href="#">G</a>	<a href="#">P</a>



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 9.** Rakennuksen tiedot -näkyvä (kuva Miika Hämäläinen).

# KIERTOTALOUDEN TOIMINTAMALLEJA RAKENNUS- JA PURKUJÄTTEELLE – RAPURC

Kimmo Haapea & Raimo Lilja & Kai Möller & Leena Pekurinen  
& Hanne Soininen

RAPURC – Rakennus- ja purkujätteiden uudelleenkäytön ja kierrätyksen parantaminen toimintamallien ja tiedonsiirron kehittämisen avulla -hankkeen tavoitteena on purettavien ja rakennettavien kohteiden kierrätyskelpoisten kalusteiden ja materiaalien tiedonkeruun digitalisointi ja automatisointi. Kiertotalouden toimintamallien kehittämisen avulla rakennus- ja purkujätteen kierrätystä voidaan tehostaa ja näin pienentää hiilidioksidipäästöjä. Hankkeen hallinnoijana toimii Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy, ja Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu on osatoteuttajana. Hankkeen päärahoittaja on Etelä-Savon maakuntaliitto Euroopan aluekehitysrahastosta (EAKR). Lisäksi hanke tekee yhteistyötä rakentamisen kiertotalouden asiantuntijoiden (Kierivä Oy, Ytekki Oy ja Ramboll Oy), paikallisten yritysten, Mikkelin kaupungin ja Etelä-Savon ammattiopiston kanssa. Hanke vaihtaa myös säännöllisesti tietoja muiden rakentamisen ja purkamisen kiertotaloutta kehittävien EU-hankkeiden kanssa. Hankkeen kesto on 1.10.2020–31.7.2023.

## HANKKEEN TAUSTAA

Kierrättäminen ja uudelleenkäyttö tarjoavat paljon mahdollisuuksia liiketoimintaan myös rakentamisen alalla. Tietojen keräämiseen ja materiaalien hyödyntämiseen liittyviä liiketoimintamahdollisuuksia voivat hyödyntää jo olemassa olevat toimijat tai uudet perustettavat yritykset. Kaikkia liiketoimintamahdollisuuksia ei ole vielä edes tunnistettu.

Mikkelissä rakennus- ja purkujätettä kaupungin ja muista julkisista kohteista syntyy noin 50 000 tonnia, josta suurin osa on korjausjätettä ja kokonaisten rakennusten purkamisessa syntynyttä jätettä. Suomessa rakennus- ja purkujätettä hyödynnetään alle 60 prosenttia, vaikka Suomi EU:n jäsenenä on sitoutunut 70 prosentin hyödyntämistaseseen. Hyödyntämistasaste on kuitenkin noussut vuodesta 2017, jolloin se oli noin 54 prosenttia. Korjaushankkeiden ja rakennusten purkamisen osuus rakennus- ja purkujätteen muodostumisessa on 85 prosenttia. Loput 15 prosenttia muodostuu uudisrakentamisesta. (Ympäristöministeriö 2021)

Maankäyttö- ja rakennuslaissa on asetettu velvoitteita rakennusten purkamiseen ryhtyvälle. Uudistuksen yhteydessä korostuvat purkamisen rooli ja materiaalien hyödyntäminen.

Materiaalien hyödyntämiseen liittyy rajoitteita, jotka aiheutuvat materiaaleissa mahdollisesti esiintyvistä haitta-aineista. Ennen rakennusten purkamista on tehtävä asbesti- ja haitta-ainekartoitus (AHA-kartoitus), jotta purkaminen voidaan toteuttaa turvallisesti ja purkumateriaalit ohjata oikeaan paikkaan – uudelleenkäyttöön ja kierrätykseen tai hävitettäväksi soveltuvalla tavalla.

Rakennus- ja purkujätteen kierrätyksessä hyödynnetään muutamia verkkopohjaisia kauppapaikkoja, mutta niitä käytetään vielä vähän. Suurimpana haasteena käytön yleistymiselle on tiedon saaminen kauppapaikkaan ja se, että kysyntä ja tarjonta eivät kohta. Kauppapaikkojen tunnettuus on myös heikkoa, mikä näkyy tehtyjen kauppojen määrässä. RAPURC-hankkeessa kehitetään tiedonkeruu- ja tietojärjestelmää tehostamaan kierrätystä ja edistämään uudelleenkäyttöä.

## TAVOITTEENA UUTTA LIIKETOIMINTAA

RAPURC-hankkeen keskeiset tavoitteet ovat rakentamisen kiertotalouden edistäminen ja sitä kautta hiilidioksidipäästöjen ja raaka-aineiden käytön vähentäminen. Lisäksi hankkeen tavoitteena on edistää rakennus- ja purkujätteen kierrättämistä luomalla uusia liiketoimintamahdollisuuksia Mikkelin seudulle.

Purettavien ja peruskorjattavien rakennusten uudelleenkäyttö ja kierrätys edellyttävät toimintatapojen sekä digitaalisten työkalujen ja menetelmien kehittämistä. Purettavien rakennusten irrotettavat osat, kalusteet ja materiaalit on tarkoitus saada uudelleenkäyttöön, jolloin rakentamisen hiilijalanjälkikin jää pienemmäksi. Digitaalisen työkalun avulla muun muassa ympäristöministeriön laatima purkukartoituslomake on tarkoitus saattaa digitaaliseen muotoon ja automatisoida purkukartoituksen, purkumateriaalien datapankin ja digitaalisten markkinapaikkojen välinen tiedonsiirto. Myös läheisesti purkukartoitukseen liittyvä lakisääteisen purkumateriaaliselvityksen digitalisointihanke edistyy ympäristöministeriön ja Motivan toimesta. Liiketoiminnan syntyminen rakentamisen kiertotalouden kehittäminen tarjoaa paljon mahdollisuuksia.

Rapurc-hankkeen varsinaisia kohderyhmiä ovat rakennusten ja kiinteistöjen omistajat ja rakennuttajat, ympäristöministeriö, rakennus- ja purkuyritykset ja Mikkelin kaupungin omistama Metsäsairila Oy. Lisäksi välillisiä kohderyhmiä ovat muut rakennussektorin toimijat, kuten asiantuntijayritykset, suunnittelutoimistot ja arkkitehdit. Erityisenä kohderyhmänä ovat julkisen sektorin rakennuttajat ja rakennus- ja purkukohteet. Yritysten osalta kohderyhmänä ovat ne yritykset, joilla on sopimussuhde rakennusten omistajien kanssa kohteiden rakentamisen tai purkamisen osalta (rakennusliikkeet ja purkuyritykset).





**KUVA 1.** RAPURC-hankkeessa edistetään rakentamisessa ja purkamisessa muodostuvan materiaalin hyötykäyttöä (kuva Manu Eloaho).

## TOTEUTUS

RAPURC-hankkeessa kehitetään kiertotalouden toimintamalleja eri sidosryhmien kanssa yhteistyössä. Tietoa jaetaan aktiivisesti eri toimijoiden kesken ja kiertotaloutta tukevia tietojärjestelmiä kehitetään. Lisäksi järjestetään työpajoja parantamaan erityisesti rakennus- ja purkujätteen sekä maa-ainesten kierrätystä sekä edistämään kehitettävien tietojärjestelmien käyttöönottoa. Työpajoja on tarkoitus järjestää kaksi kertaa vuodessa, ja vuonna 2021 on jo pidetty kaksi työpajaa. Tarvittaessa mahdollisten toimintaympäristön muutosten myötä voidaan järjestää lisätyöpajoja.

Työ sisältää myös tietokannan suunnittelun ja mallinnuksen sekä tietokannan ja markkinapaikan ylläpidon. Paikkatietopohjainen tietokanta toimii markkinapaikan perustana, ja sinne on tarkoitus tallentaa tietoja purkumateriaaleista. Tietokannan suunnittelussa ja rakentamisessa huomioidaan ympäristöministeriön ohjeet.

RAPURC-hankkeen yksi kokonaisuus on ympäristöministeriön suunnitteleman Excel-muotoisen purkukartoituslomakkeen muuntaminen digitaaliseen muotoon. Sovellus tallentaa purkukartoituksesta saatavaa dataa RAPURC-tietokantaan. Hanke sisältää kiertotalousalustojen rajapintaohjelmoinnin muihin alustoihin ja samalla kehitetään rajapintateknologiaa eri datalähteiden (Materiaalitori, Maanmittauslaitos) integroimiseksi. Rajapintaohjelmointi hankitaan ostopalveluna ohjelmistokehitysyrityksiltä.

Kehittämistyön aikana rakennetaan showroom, jossa esitellään digitaalisesti EcoSairilan kiertotalouden kokonaisuutta rakennus- ja purkujätteen osalta. Eri teemat (kiertovirrat) esitellään yhdenmukaisesti asiantuntijoille ja yrityksille, mutta myös kansalaisille ja oppilaitoksille. Tarkoituksena on, että esittely toimii erilaisilla päätelaitteilla ja se on paikasta riippumaton. RAPURC-hankkeen tuottamat rakennus- ja purkujäteaiheiset sisällöt toimivat osana digitaalista showroomia. Esittelyt voidaan toteuttaa videoina, still-kuvina, 3D-simulointina, ääninä ja tekstinä.

Yhdessä osakokonaisuudessa paneudutaan uusiin liiketoiminta-avauksiin. Sitran arvion mukaan vuoteen 2030 mennessä resurssien kierron tehostamisessa on 1,5–2,5 miljardin euron vuotuinen kasvupotentiaali Suomen talouteen. Kun purkujäte aletaan nähdä kalusteiden, materiaalien ja rakennuksen osien resurssivarastona, uusiokäyttö ja kierrätys tehostuvat. Se avaa paljon liiketoimintamahdollisuuksia alan toimijoille. Sillä on vaikutusta myös talouden elvytyskeinona ja työllisyyden edistäjänä. RAPURC-hankkeessa edistetään uusien yritysten syntymistä työpajojen, seminaarien, tietoiskujen ja henkilökohtaisten tapaamisten avulla.

Hankkeessa kootaan myös rakennus- ja purkujätteen materiaali- ja ympäristöturvallisuutta koskevia tietoja. Rakentamisessa ja purkamisessa syntyvät jätteet voivat sisältää haitallisia aineita, jotka vaikeuttavat materiaalien uudelleenkäyttöä ja kierrätystä. Kierrätysmateriaalien kemikaaleista on vielä melko rajallisesti tietoa saatavilla. Lain vaatimat haitta-ainekartoitukset tehdään, mutta ne sisältävät vain lainsäädännössä määritettyjä haitta-aineita. Materiaalit voivat sisältää niiden lisäksi myös muita ympäristölle ja terveydelle haitallisia aineita. Laajat kemikaalianalyysit ovat kalliita ja haastavia, eikä yhtenäisiä käytäntöjä ole olemassa.

Kiertotalouden toteutumisen edellytys on, että kierrätysmateriaalien turvallisuus on varmistettu. Toteutuksen aikana etsitään käytäntöjä, joilla voidaan parhaiten selvittää rakennus- ja purkumateriaalien ympäristötietoja ja tallentaa niitä. Lisäksi kerätään tietoa rakennus- ja purkujätteelle soveltuvista laatu järjestelmistä ja suositeltavista kemiallisista analyyseistä. Analyysejä testataan ottamalla näytteitä ja analysoimalla niitä valikoiduilla menetelmillä. Tiedot tallennetaan ja osaamista jaetaan kiertotalouden parissa toimiville mikkeliläisille yrityksille.

## TULOKSENA

RAPURC-hankkeessa on tarkoitus saavuttaa rakennus- ja purkujätteen 80 prosentin kierrätysaste kahden vuoden kuluttua hankkeen päättymisen jälkeen. Hankkeessa luodaan uusi digitaalinen tietojen keräys- ja hallintajärjestelmä, joka kattaa purkukartoitussovelluksen ja tietokannan. Tietojärjestelmäkokonaisuus voidaan skaalata valtakunnalliseksi. Lisäksi kehitetään uudelleen käytettävän ja kierrätettävän rakennusmateriaalin jäljitettävyyttä.

Uuden liiketoiminnan syntymistä Mikkeliin ja Etelä-Savoon edesautetaan hankkeessa kehitettävien toimintamallien avulla. Tavoitteena on synnyttää uusia rakennus- ja purkujätteen kiertotalousyrityksiä tai liiketoiminta-avauksia hankkeen aikana tai välittömästi hankkeen päätyttyä.

## LÄHTEET

Ympäristöministeriö 2021. Rakentamisen kiertotalous. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://ym.fi/rakentamisen-kiertotalous> [viitattu 19.10.2021].

# ORGAANISEN JÄTTEEN KIERTOTALOUTTA EDISTÄMÄSSÄ MIKKELISSÄ – CITYLOOPS

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

Mikkelissä edistetään orgaanisen jätteen kiertotaloutta kansainvälisessä CityLoops – Closing the loop for urban material flows -hankkeessa. Hankkeen aikana toteutetaan biojätteen kiertotaloutta edistäviä kokeiluja yhteistyössä Metsäsairila Oy:n kanssa ja kampanjoidaan biojätteen lajittelun tehostamiseksi. Mikalo Oy osallistuu CityLoops-hankkeeseen kokeilukohteena. Hankkeen toteutuksesta vastaavat Mikkelissä Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu Xamk ja Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy. CityLoops-hanke alkoi 1.10.2019, ja se päättyi 30.9.2023. Hanketta koordinoi saksalainen ICLEI – Local Government for Sustainability, ja se saa rahoitusta kansainvälisesti tavoitellusta EU:n Horisontti 2020 -tutkimus- ja innovaatio-ohjelmasta (Grant Agreement No. 821033). Lisätietoja hankkeesta [www.xamk.fi/cityloops](http://www.xamk.fi/cityloops) ja [www.mikseimikkeli.fi/hankkeet/cityloops/](http://www.mikseimikkeli.fi/hankkeet/cityloops/).

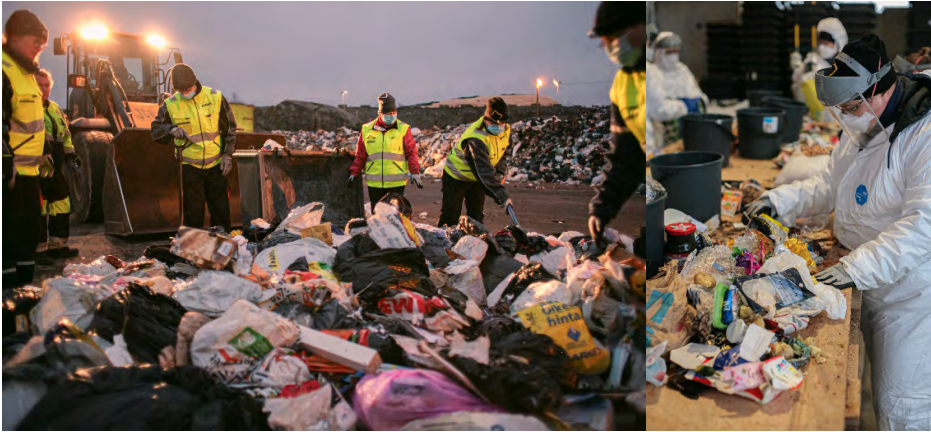
## BIOJÄTTEEN KIERTOTALOUTTA EDISTÄVIÄ KOKEILUJA

Mikkelissä yhä suurempi osa biojätteestä halutaan erilliskerätä ja tuotteistaa biokaasuksi ja mullaksi. Biojätteen lajittelun tehostamista on testattu Peitsarin alueella Mikalo Oy:n kerrostaloissa. Asukkaille on jaettu yhdessä Metsäsairila Oy:n ja Mikalo Oy:n kanssa paperisia biojätepusseja. Sekajätteen ja erilliskerätyn biojätteen määrää ja laatua on seurattu kokeilun aikana.



**KUVA 1.** CityLoops-hankkeen toimenpiteitä Mikalo Oy:n Peitsarin kerrostaloissa vuosina 2020–2022.

Peitsarin alueelle tehtiin vuonna 2020 jätekoostumustutkimus, jossa selvisi, että sekajätteen joukossa oli noin 35 prosenttia biojätettä. Koostumustutkimus tehtiin uudelleen vuonna 2021, ja tutkimuksen tulosten perusteella sekajätteen joukossa on edelleen noin 27 prosenttia biojätettä.



**KUVA 2.** Jätteen koostumustutkimusta toteutettiin Metsäsairila Oy:n tiloissa osana CityLoops-hanketta (kuvat Juha Vihavainen).

## ASUKASTAPAHTUMAT PEITSARISSA

Kesän ja syksyn 2021 aikana CityLoops-hankkeessa järjestettiin kaksi asukastapahtumaa Peitsarin Mikalo Oy:n asukkailla. Kohteena olevalla alueella on 278 Mikalo Oy:n asuntoa, joissa asuu noin 370 asukasta. Asukastapahtumien tarkoituksena oli motivoida alueen asukkaita tehostamaan erityisesti biojätteen lajittelua. Asukastapahtumissa alueen asukkailla jaettiin paperisia biojätepusseja ja opastettiin niiden käytössä. Asukkailla kerrottiin myös yleisesti biojätteen erilliskeräyksestä ja sen tärkeydestä.

Oikein lajiteltuna biojätteen joukossa ei ole muuta jätettä, ja siitä voidaan valmistaa esimerkiksi liikennebiokaasua, kierrätyslannoitteita ja multaa. Biojätteen lajittelu on tärkeää myös siksi, että sekajätteen joukossa oleva biojäte heikentää sekajätteen lämpöarvoa eli vähentää poltettavasta sekajätteestä saatavaa energiamäärää. Sekajäte poltetaan energiaksi sitä varten suunnitelluissa polttolaitoksissa.

Biojätteen keräykseen soveltuu parhaiten paperinen biojätepussi. Biohajoavat muovipussit aiheuttavat ongelmia biokaasulaitoksessa, koska ne hajoavat hitaammin ja kiertyvät laitoksen laitteistoihin häiriten tuotantoa. Ensimmäisessä asukastapahtumassa 16.6.2021 paperisia biojätepusseja ja lajittelutelineitä jaettiin lähes 50:lle alueen taloudelle. Toisessa tapahtumassa 14.9.2021 biojätepusseja jaettiin 20–30 taloudelle. Yhdessä nipussa oli 80 biojätepusssia. Tapahtumissa opastettiin myös taittelemaan itse paperinen biojätepussi sanomalehdestä.





**KUVA 3.** CityLoops-hankkeen asukastapahtumassa Mikalon asukkaita aktivoitiin lajittelemaan biojätteitä ja jaettiin biojätepusseja (kuva Hanne Soininen).

Kesäkuun asukastapahtumasta tiedotettiin asukkaille kiinteistöjen ilmoitustaululle jaetulla tiedotteella. Koronapandemian vuoksi tiedotetta ei voitu jakaa jokaiseen asuntoon. Ennen syyskuun asukasiltaa asuntoihin jaettiin biojätepusseja ja tiedote tulevasta asukastapahtumasta. Biojätepusseja jaettiin asuntoihin myös 11.10.2021, jolloin saatteena oli biojätteen lajitteluohje. Jakelujen tarkoituksena oli aktivoida asukkaita tehostamaan biojätteen lajittelua ja valitsemaan paperinen biojätepusseja (kuva 4).



**KUVA 4.** Metsäsairila Oy tarjosi tilaisuuksiin jaettavaksi paperisia biojätepusseja (kuva Hanne Soininen).

Hankkeen alustavia tuloksia esiteltiin 25.11.2021 Mikkelin kaupungin omistamien yhtiöiden yhteisessä asukasillassa (kuva 5). Tilaisuuteen osallistui noin 40 asukasta Mikalo Oy:n, Mikkelin opiskelija-asunnot Oy:n ja Mikkelin asumisoikeus Oy:n asunnoista. Esityksestä syntyi keskustelua asukkaiden kanssa, ja monet olivat erittäin kiinnostuneita biojätteen lajittelusta ja lajittelun tehostamisesta.



**KUVA 5.** CityLoops-hankkeen alustavien tulosten esittelyä Mikkelin kaupungin omistamien yhtiöiden yhteisessä asukasillassa (kuva Hannele Vehmanen Mikalo Oy).

## KIERRÄTYSTORILLA OPASTETTIIN NUORIA

CityLoops-hanke oli mukana Kierrätystori-tapahtumassa 30.8. ja 3.9.2021. Vuosittain järjestettävä tapahtuma tukee itsenäistyvien nuorten asumista keräämällä mikkeliläisiltä hyväkuntoisia kodintekstiilejä ja -tarvikkeita nuorten käyttöön. Kaikki kodintarvikkeet kerätään lahjoituksina ja myös jaetaan nuorille ilmaiseksi. Kierrätystorilla nuoret voivat itse valita heille mieluisia ja tarpeellisia tarvikkeita laajasta valikoimasta. Mikkeliläisillä on tapahtumassa hyvä mahdollisuus kierrättää tarpeettomia tavaroitaan, lisätä niiden käyttöikä ja näin vähentää myös jätteen määrää.

Osallistuminen on tehty helpoksi. Kuntalaisten ei tarvitse muuta kuin tuoda tavarat paikalle, minkä jälkeen niiden kunto tarkastetaan ja ne laitetaan esille. Tänä vuonna Kierrätystori-tapahtumaa oli järjestämässä Mikkelin kaupungin nuorisopalvelujen projekti. Muita tapahtuman järjestäjätahoja olivat Yhdessä-hanke, Ohjaamo Olkkari, Sosped-säätiön Kulttuuripaja Kajo, Mikkelin Nuorten työpajat ja CityLoops-hanke.

CityLoops-hanke kertoi tapahtumassa biojätteiden kierrätyksestä. Tavoitteena oli motivoida nuoria kierrättämään biojätteitään ja samalla ohjata heitä hyödyntämään paperilehtensä taittamalla niistä biojätepusseja (kuva 6). Taittelemalla biojätepusseja paperilehdestä tai mainoslehdestä säästyy rahaa, kun biojätepusseista ei tarvitse erikseen maksaa.



**KUVA 6.** Nuoret vaihto-opiskelijat seuraavat tarkasti biojätepusseja taittelua sanomalehdestä (kuva Leena Pekurinen).

Useimmat nuoret olivat jo hyvin valveutuneita ja motivoituneita kierrättämään biojätteitään, mutta monetkaan eivät tienneet, että Mikkelissä biojätteitä hyödynnetään liikennöinti-biokaasun raaka-aineena. Nuorille kerrottiin myös, että liikennöinti-biokaasua käyttävät kulkuneuvot ovat ympäristöystävällisempiä verrattuna esimerkiksi fossiilisia polttoaineita käyttäviin ajoneuvoihin.



Tapahtumassa jaettiin esitettä, jossa kerrottiin biojätteen lajittelun hyödyistä. Lisäksi tapahtumassa jaettiin CityLoops-hankkeesta kertova esite sekä Metsäsairila Oy:n biojätteen lajitteluohjeet.

## MUKANA ENERGIANSÄÄSTÖVIIKKOLA

CityLoops-hanke oli mukana Energiensäästöviikolla Mikkelin Mikkomarkkinoilla 12.–13.10.2021 yhdessä ProAgrian ja LUT-yliopiston kanssa (kuva 7). Energiensäästöviikko on Motivan vuosittain järjestämä kampanja, jolla pyritään edistämään energiansäästöä ja kestäväan kulutukseen liittyviä tekoja. Mikkelissä tapahtumaa koordinoi Etelä-Savon alueellinen energianeuvonta. Tänä vuonna oli Energiensäästöviikon 25. juhlavuosi.



**KUVA 7.** Energiensäästöviikon toritapahtumassa innostettiin mikkeliläisiä kierrättämään biojätteitä ja jaettiin paperisia biojätepusseja (kuva Leena Pekurinen).

Energiansäästöviikon tapahtumassa keskusteltiin ihmisten kanssa biojätteiden lajittelusta ja energian säästämistä. Tavoitteena oli motivoida ihmisiä lajittelemaan biojätteensä ja selvittää niitä asioita, jotka estävät lajittelun. Motivoinnissa korostettiin biojätteen lajittelun hyötyjä, kuten paikallisesti tuotettua liikennebiokaasua ja maanparannusaineita. Mikkelissä toimii oma biokaasulaitos, jossa tuotetaan paikallisesti biokaasua mikkeliläisten omista biojätteistä. Monet Mikkelin lähiliikenteen linja-autot ja jätteenkeräysautot kulkevat liikennebiokaasulla. Biojätteistä saadaan myös maanparannusaineita ja lannoitustuotteita. Lajitteleamalla biojätteet saadaan raaka-ainetta biokaasulaitokselle. Samalla säästetään fossiilisten raaka-aineiden käyttöä. Biojätteen tehokkaalla lajittelulla voi säästää myös jätemaksuissa, koska biojäteastian tyhjennys maksaa vähemmän kuin sekajäteastian tyhjennys. Tapahtumassa keskusteltiin myös sähkön kulutuksesta, asuntojen lämmitystavoista, puun poltosta ja sähköpyöräilystä.

Ohikulkijoille jaettiin paperisia biojätepusseja ja kyseltiin heiltä biojätteen lajittelusta. Suurin osa ihmisistä kertoi lajittelevansa biojätteensä erikseen. Monet kertoivat käyttävänsä biojäteastian biohajoavaa muovipussia. Ne, jotka eivät lajitelleet biojätteitään, kertoivat syyksi yksin tai kaksin asumisen, jolloin biojätettä tulee niin vähän, että sitä ei viitsitä lajitella. Jotkut syrjäseudulla asuvat omakoti- ja pientaloasukkaat kertoivat biojätettä muodostuvan vain vähän, eikä sitä viitsitty sen takia lajitella. Maaseudulla ainut vaihtoehto biojätteen lajitteluun onkin pääsääntöisesti kompostointi. Osa omakotiasujista kertoi kompostoivansa biojätteensä. Vähäisen biojätteen määrän ja talvella jäätyminen vuoksi kompostia ei kuitenkaan viitsitty pitää. Osa iäkkäistä henkilöistä myös koki kompostin hoitamisen vaivalloiseksi ja raskaaksi.

Yhteiskeräyspisteiden käyttöä pidettiin järkevänä, mutta ongelmaksi muodostui kysymys siitä, missä sen pitäisi sijaita, jotta biojätteitä viitsisi viedä sinne autolla. Ruokakaupan pihaa ja kierrätyspisteitä pidettiin hyvinä paikkoina, mutta samalla todettiin, että ruokakaupan pihalla sellainen voisi houkuttaa tuhoeläimiä paikalle. Ongelmaksi voi koitua myös se, että kotona tulisi säilyttää biojätteitä pitkän aikaa, ennen kuin ne tulisi vietyä yhteiskeräyspisteelle. Tällaisessa tilanteessa pohdittiin myös biojätteistä syntyvää hajuhaittaa ja mahdollista kannellista astiaa, jossa sitä kannattaisi säilyttää.

Ratkaisuksi näihin ongelmiin ehdotettiin Bokashia, jossa keittiön vähät biojätteet voi käsitellä helposti ja ekologisesti omassa keittiössä. Bokashi-astiaan lisätään biojätteet ja Bokashi-rouhetta ohjeiden mukaan. Kun astia täyttyy, massa jälkikäsitellään ja lopputuloksena syntyy ravinteikasta multaa. Tästä ratkaisusta oltiin kiinnostuneita, mutta ihmisillä oli aiheesta vielä hyvin vähän tietoa.

Torilla jaettiin noin 115 kappaletta paperisia biojätepusseja. Tapahtumassa tavoitettiin kuitenkin enemmän ihmisiä, koska kaikki eivät halunneet ottaa pussia muun muassa siksi, että he kompostoivat biojätteensä itse.



# BIOCIR- JA BIOLUUPPI-KOKONAISUUDELLA KIERTOTALOUTTA KEHITTÄMÄSSÄ

Hanne Soininen & Tiina Saario & Aki Heinonen & Jonne Gråsten & Ville Kakkonen

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu ja Metsäsairila Oy yhteistyössä yritysten kanssa toteuttavat kiertotalouteen liittyvää BioCir- ja BioLuuppi-kokonaisuutta, jonka tarkoituksena on kehittää biokaasututkimusta ja laitosten toimintaa Etelä-Savossa. BioCir – Kiertotalouden sivuainevirrat uusiksi tuotteiksi- ja BioLuuppi – Demonstraatioympäristö kiertotalouden sivuainevirroille -hankkeiden rahoittajina ovat Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan aluekehitysrahastosta, Etelä-Savon Energia Oy, BioHauki Oy, Juvan Bioson Oy ja Suur-Savon Energiasäätiö sr. Kokonaisuuden toteutusaika on 1.12.2020–31.5.2023. Lisätietoa hankkeista saat sivuilta [www.xamk.fi/bioluuppi](http://www.xamk.fi/bioluuppi).

## BIOKAASUALALLA KASVUPOTENTIAALIA

Biokaasulaitokset ovat yleistyneet Suomessa, mutta alalla on edelleen merkittävä kasvupotentiaali. Esimerkiksi maatalouden sivuvirtojen ja biojätteiden biokaasupotentiaali on vielä pitkälti hyödyntämättä. Vuonna 2021 Suomessa toimii noin 90 biokaasulaitosta, joista 16 isoa yhteiskäsittelylaitosta, 23 maatilamittakaavan, kuusi teollisuustuotannon yhteydessä olevaa biokaasulaitosta ja yli 30 kaatopaikkakaasua hyödyntävää laitosta (Suomen Biokierro ja Biokaasu 2021). Viimeisen neljän vuoden aikana biokaasun tuotanto on ollut näillä laitoksilla yhteensä noin 850–950 GWh (Tilastokeskus 2021). Suomen teknillistaloudellisen biokaasupotentiaalin on arvioitu olevan käytössä olevalla tekniikalla noin 10 TWh. Toisin sanoen biokaasun tuotanto voitaisiin kymmenkertaistaa. (Taavitsainen 2019)

Etelä-Savossa on tällä hetkellä toiminnassa kolme yhteiskäsittelyyn perustuvaa biokaasulaitosta: Juvan Bioson Oy (märkämenetelmään pohjautuva) ja BioHauki Oy ja BioSairila Oy (kuivamenetelmään pohjautuvia). BioHauki Oy:n ja Juvan Bioson Oy:n laitokset vastaanottavat pääsääntöisesti karjanlantaa ja alueen elintarviketeollisuuden sivuainevirtoja. Uusin kuivamenetelmään pohjautuva laitos BioSairila Oy käsittelee erilliskerättyä biojätettä, jätevedenpuhdistamon lietteitä, puutarhajätettä, maatalouden ja teollisuuden sivuainevirtoja sekä nurmirehua. Biokaasulaitosten lopputuotteena syntyvä kaasu jalostetaan liikennepolttoaineeksi (BioSairila ja BioHauki) tai hyödynnetään energian ja sähköntuotannossa (Bioson). Kaasun lisäksi lopputuotteena syntyvät mädätteet hyödynnetään sellaisenaan tai jalostettuna maanparannuksessa tai lannoitteena.

Vaikka biokaasua on tuotettu reaktoreissa jo yli sata vuotta, prosessien optimoiminen on jäänyt vähemmälle huomiolle. Laskennallisesti moni teollinenkaan biokaasun tuotantoprosessi ei toimi optimaalisella teholla, vaan jää huomattavasti teoreettisesta tuotantotastaan. Tulevaisuudessa biokaasun tuotantoprosessien tulee olla aiempaa energia- ja kustannustehokkaampia ja prosessiin vaikuttavat tekijät tulee olla paremmin tunnistettavissa ja hallittavissa. Myös prosessissa syntyvä mädäte tulee tuotteistaa entistä tehokkaammin kierrätyslannoitteiksi. Biokaasulaitoksen toiminnan energiatehokkuuteen ja prosessin optimointiin voidaan vaikuttaa muun muassa syötettävillä materiaaleilla ja niiden esikäsittelyllä, sekoitusprosessilla sekä prosessin monitoroinnilla ja automatisoinnilla.

Etelä-Savon biokaasulaitosten kannattavuuden tehostamiseksi ja kilpailukyvyyn varmistamiseksi alueelle on tulossa BioLuuppi-demonstraatioympäristö, jossa yritykset voivat suunnitella ja optimoida omaa toimintaansa. Demonstraatioympäristössä parhaita toimintatapoja voidaan testata hallitusti, jolloin niiden käyttöönotto täyden mittakaavan laitoksissa on riskittömämpää ja kustannustehokkaampaa.

## ECOSAIRILAN UUDENLAINEN TUTKIMUSYMPÄRISTÖ

BioCir- ja BioLuuppi-kokonaisuuden aikana perustetaan uudenlainen demonstraatiomittakaavan tutkimusympäristö Etelä-Savoon (kuva 1). Mikkelin EcoSairilaan sijoittuva tutkimusympäristö tuo esiin maakunnan kansallisena kiertotalouden kärkiosaajana ja mahdollistaa kansainvälisen yritys- ja tutkimusverkoston muodostumisen alueelle.



**KUVA 1.** BioLuuppi-kokonaisuus sijoittuu Mikkelin EcoSairilaan (kuva Manu Eloaho).

BioCir-kehittämision tavoitteena on lisätä uusien syötteen käyttöönnottoa, optimoida alueen orgaanisten materiaalivirtojen biokaasuntuottoa ja tehostaa prosessien energiatehokkuutta. Tavoitteena on selvittää ja vähentää raaka-aineiden sisältämien haitta-aineiden (esimerkiksi mikromuovit) ja kemikaalien aiheuttamia riskejä prosessille ja lopputuotteille. Lisäksi tavoitteena on kehittää uudenlaisia toimintakonsepteja ja tuoteaihioita nykyisille ja tuleville eteläsavolaisille biokaasulaitoksille.

BioLuuppi-tutkimusympäristössä kehitetään ja pilotoidaan käytäntöjä ja menetelmiä, joilla parannetaan biokaasulaitosten energiatehokkuutta ja kannattavuutta hallitsemalla tuotantoprosessia entistä paremmin.

## **HANKKEIDEN TOIMENPITEET OVAT SEURAAVAT:**

- TP 1. BioLuuppi – Demonstraatioympäristö kiertotalouden sivuainevirroille
- TP 2. Raaka-ainevirtojen alkuaine- ja haitta-ainepitoisuuksien vaikutus kaasuntuotantoon ja mädätteen laatuun
- TP 3. Biokaasulaitoksen prosessien tehostaminen energiatehokkaammaksi
- TP 4. Biojalosteiden ja kierrätyslannoitteiden uudet tuotekonseptit
- TP 5. Biokaasulaitoksen prosessien riskien ennakoinnin ja omavalvonnan kehittäminen
- TP 6. Viestintä ja tiedottaminen.

## **KANSALLISTA JA KANSAINVÄLISTÄ KASVUA HAKEMASSA**

Perustettava BioLuuppi-kokeiluympäristö tarjoaa uusia avauksia ja mahdollisuuksia alueen biokaasulaitosten toiminnan kehittämiseen. Laboratorio- ja demonstraatiomittakaavan kokeiden tuloksena syntyy runsaasti uutta tietoa muun muassa biokaasulaitosten optimoinnista, haitta-aineiden vaikutuksesta biokaasuprosessiin sekä lopputuotteiden jalostamisesta turvallisiksi, toimiviksi ja kannattaviksi kierrätyslannoitteiksi. Tämä edistää kiertotalouden toteutumista ja päästöjen vähentämistä. Tuloksista hyötyvät erityisesti biokaasualan toimijat, maatalousyrittäjät, jätehuolto- ja energia-alan yhtiöt ja tutkimuslaitokset.

BioCir- ja sen rinnalla toteutettava BioLuuppi-hanke mahdollistavat biokaasualan kansallisen ja kansainvälisen tason yritysten ja tutkimuslaitosten kehittämissympäristön ja -verkoston muodostumisen Etelä-Savoon.

## LÄHTEET

Suomen Biokierro & Biokaasu ry 2021. Biokaasun tuotanto. WWW-sivusto. saatavissa <https://biokierro.fi/biokaasu/tuotanto/> [Viitattu 11.10.2021]

Taavitsainen, T. 2019. Biokaasun käyttökohteet ja kulutus Suomessa 2020-luvulla. Uusiutuvan energian teemapäivä. 3.10.2019, Rantasalmi. PDF-tiedosto. Saatavissa <https://energiayrittajyys.fi/sites/energiatehokkaasti/files/biokaasun-kayttokohteet-ja-kulutus-suomessa-2020-luvulla-rantasalmi-3.10.2019.pdf> [Viitattu 11.10.2021]

Tilastokeskus 2021. Energian hankinta ja kulutus – 127t – Biokaasun tuotanto ja kulutus laitostyypeittäin, 2017-2020. WWW-sivusto. Saatavissa [https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_ene\\_\\_ehk/statfin\\_ehk\\_pxt\\_127t.px/?rxid=73a06a21-](https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ene__ehk/statfin_ehk_pxt_127t.px/?rxid=73a06a21-) [Viitattu 11.10.2021]



# MEKSTIILI-SUUNNITTELUHANKE TEHOSTAA TEKSTIILIEN KIERTOTALOUTTA

Kati Jordan & Miia Sourander & Hanne Soininen & Jonne Gråsten  
& Johanna Järvinen & Pauliina Kuukka & Vesa Nyrhinen

EU-direktiivi velvoittaa jäsenmaita järjestämään poistotekstiilien erilliskeräyksen vuodesta 2025 lähtien. Poistotekstiili on omistajalleen tarpeetonta tekstiiliä, joka sisältää sekä tekstiilijätteet että käytetyt ja ehjät tekstiilit eli tekstiilituotteet. Suomen valtioneuvosto on hyväksynyt jätelakiesityksen, jonka mukaan poistotekstiilin alueellinen vastaanotto alkaisi Suomessa jo vuoden 2023 alusta lähtien.

Mekstiili-suunnitteluhankkeen ([www.xamk.fi/mekstiili](http://www.xamk.fi/mekstiili)) tavoitteena on luoda Mikkelin ympärille alueellinen verkosto, joka mahdollistaa kunnille resurssiviisaan tavan vastata jätelakiesityksen velvoitteisiin. Hanke toteutetaan ajalla 1.6.2021–28.2.2022, ja sitä rahoittaa Etelä-Savon maakuntaliitto maakunnan omaehtoisen kehittämisen määrärahasta. Hanketta hallinnoi Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, ja yhteistyökumppaneita ovat Metsäsairila Oy, Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy, Mikkelin Toimintakeskus ry ja ViaDia Mikkeli ry.



**KUVA 1.** Mekstiili-suunnitteluhanke edistää resurssiviisasta poistotekstiilien hyödyntämistä (kuva Manu Eloaho).

## KESTÄVÄÄ LIIKETOIMINTAA ETELÄ-SAVOON

Mekstiili-suunnitteluhankkeessa innovoidaan uusia toimintatapoja poistotekstiilien keräykseen, lajitteluun ja monipuoliseen hyödyntämiseen. Suunnitteluhankkeen aikana kontaktoidaan lähialueen kuntia, jäteyhtiöitä sekä muita poistotekstiilin keräykseen ja kierrätykseen liittyviä sidosryhmiä, kuten yrityksiä, pienyrittäjiä, yhdistyksiä ja oppilaitoksia, sekä



potentiaalisia hankekumppaneita. Lisäksi selvitetään yhteistyökumppaneita laajemminkin valtakunnan tasolla. Tavoitteena on edistää tekstiilikiertotalouden kehitysmahdollisuuksia ja luoda uutta liiketoimintaa Etelä-Savon alueelle.

## SELVITYSTYÖTÄ JA IDEOINTIA

Suunnitteluhankkeessa kartoitetaan poistotekstiilin keräyksen, lajittelun ja kierrätyksen nykytilaa ja tulevaisuuden näkymiä. Selvitysten ja yhteistyöverkoston avulla pyritään luomaan alueelle parhaiten sopivia vaihtoehtoisia toimintamalleja, joita voidaan testata tulevaisuudessa kehitysprojekteissa. Mekstiilissä selvitetään myös eri vaihtoehtojen kustannus- ja työllisyysvaikutuksia.

Uusien ideoiden tuottaminen, kerääminen ja arviointi ovat tärkeässä roolissa. Työtapoina käytetään suoraa kontaktointia, verkkokyselyitä, webinaareja, työpajoja sekä sosiaalisen median kanavia. Tavoitteena on aktivoita monipuolisesti eri tahoja ja törmäyttää ideoita niiden jatkajalostamiseksi. Vertaisarvioitujen ideoiden pohjalta innovoidaan uusia toimintamalleja, joilla tekstiilejä kierrätetään tehokkaasti, resurssiviisaasti ja tekstiilien koko elinkaari huomioiden.

## VAIKUTTAVAA VIESTINTÄÄ

Viestinnällä on merkittävä rooli tekstiilikiertotalouden onnistuneessa toteutuksessa. Tekstiilimateriaali on herkästi pilaantuvaa, ja se luo erityisiä haasteita uudenlaisen jakeen keräämiseen ja lajitteluun. Neuvonnan ja viestinnän avulla parannetaan asukkaiden ja paikallisten toimijoiden tietoisuutta poistotekstiilien kierrätyksestä sekä sen merkityksestä ilmasto vaikutuksiin. Etelä-Savon alueen vaihteleva väestötiheys ja -rakenne luovat omat haasteensa viestinnälle. Tämän vuoksi Mekstiilissä hyödynnetään monipuolisesti erilaisia viestinnän toteutustapoja. Viestintäkanavat tarjoavat sekä tekstiilikiertotalouden toimijoille että yksittäisille henkilöille mahdollisuuden osallistua alueen yhteiseen kehittämiseen kohti toimivaa tekstiilikiertotaloutta.

## ALUEELLISTA VAIKUTTAUUTTA

Suunnitteluhankkeen aikana luodaan tekstiilikierrätyksen alueellinen kehittämissuunnitelma, joka ohjaa toimijoita kohti muutosta ja uusia käytäntöjä. Lisäksi selvitetään tarvetta uusille kehityshankkeille ja pilotoinneille kartoittamalla mahdollisuuksia laajempaan yhteistyöhön myös lähimaakuntien kanssa.

Tekstiilikiertotalouden ympärille kehittyä uutta liiketoimintaa, joka vaatii monenlaista osaamista. Matalan kynnyksen työpaikkojen lisäksi syntyy uudenlaisia asiantuntijatehtäviä. Tämä on tärkeää huomioida myös alueen koulutuksen kehittämissuunnitelmissa.

Mekstiilissä muodostuvien yhteistyöverkoston kautta luodaan uudenlaista alueellista vaikuttavuutta. Tavoitteena on saavuttaa parempi ymmärrys tekstiilinkierrätyksen kokonaisuudesta ja sen mahdollisuuksista, haasteista ja kehittämistarpeista.

# TYÖHYGIEENISET OLOT KIERRÄTYSTOIMINNASSA

Salla Pulliainen & Pauliina Kuukka

Uutta työtä ja osaamista kiertotaloudesta (UTK) -hankkeessa selvitettiin Uutta elämää Groupin tavarain vastaanotossa ja lajittelussa työskentelevien henkilöiden työhygieenisia oloja. Ensimmäinen osa selvityksestä toteutettiin toiminnan sijaitessa vielä Lentokentänkadun tiloissa ja selvitystä jatkettiin, kun toiminta oli siirtynyt uuteen Kierrätyksen ja lajittelun keskus Kieppiin Metsäsairilan alueelle. Työhygieenisessä selvityksessä kartoitettiin työntekijöiden altistumista sisäilman haihtuville orgaanisille yhdisteille (VOC-yhdisteille), hengittävälle pölylle ja endotoksiineille. Lisäksi mitattiin työntekijöiden altistumista melulle. Saatujen tulosten perusteella Uutta elämää Groupin työntekijöille annettiin ohjeita haitallisilta aineilta suojautumiseen. Hanketta rahoitti Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan sosiaalirahastosta, ja hankkeen toteutusaika oli 1.2.2019–30.9.2021.

## HAITALLISTEN AINEIDEN KARTOITUS

Uutta elämää Groupin tavarain vastaanotossa ja lajittelussa työskentelevät henkilöt vastaanottavat erilaisia kotitalouksien tavaroita ja materiaaleja, jotka kunnostaan riippuen lajitellaan uudelleen käytettäväksi tai raaka-aineena kierrätettäväksi. Vastaanotettava materiaali voi sisältää puhtaan ja käyttökelpoisen tavarain lisäksi likaantuneita tai muuten käyttökelvottomia materiaaleja, joiden käsittely voi aiheuttaa työntekijälle työhygieenistä riskiä. Lisäksi työskentely Metsäsairilan lajittelu- ja kierrätyskeskuksen alueella altistaa työntekijät olosuhteille, jotka aiheutuvat alueella tapahtuvasta raaka-aineiden käsittelystä.

Lentokentänkadun toimipisteellä tavarain vastaanotto ja pääasiallinen lajittelu tapahtuivat ulkoilmassa, ja uudelleen käyttöön menevien tavarain lajittelua jatkettiin sisällä hallitiloissa. Kohteessa työhygieniää heikentäviksi riskeiksi arvioitiin altistuminen VOC-yhdisteille, hengittävälle pölylle sekä endotoksiineille. Kiepissä, jossa työympäristö koostuu puoli-avonaisesta hallista, riskiä arvioitiin aiheutuvan hengittävstä pölystä ja endotoksiineista (kuva 1). Lisäksi Kiepissä riskitekijäksi koettiin sekä hallin sisältä että hallin ulkopuolelta lähtöisin oleva impulssimelu. Impulssimelu on hetkittäistä melua, joka syntyy Kiepissä pääasiassa tavarain ja materiaalien siirtelystä ja heittelystä keräysastioihin sekä hallin ulkopuolella kulkevista työkoneista ja materiaalien käsittelystä.



**KUVA 1.** Uutta elämää Groupin työtila Kierrätyksen ja lajittelun keskus Kiepisissä (kuva Tommi Aalto).

## MITATUT ALTISTEET JA MITTAUSMENETELMÄT

Sisäilman VOC-analysillä selvitettiin sisäilmassa esiintyvien haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (volatile organic compounds, VOC) kokonaispitoisuus eli TVOC (Total VOC) sekä havaitut yksittäiset yhdisteet ja niiden pitoisuudet. Sisäilmassa on normaalisti pieninä pitoisuuksina jopa satoja orgaanisia kaasumaisia yhdisteitä, jotka ovat lähtöisin muun muassa rakennus- ja sisustusmateriaaleista, kemikaaleista ja koneiden ja laitteiden päästöistä. VOC-pitoisuutta ja -yhdisteitä selvittäessä näytteenotto- ja analysointimenetelmä perustuvat standardiin ISO 16000-6:2011. Standardin mukaan ilmanäytteet kerätään vakiovirtauspumpun avulla ADT-keräimeen. Lentokentänkadun toimipisteellä näytteet kerättiin kolmesta kiinteästä näytesteestä huonetilojen keskeltä noin 1,5 metrin korkeudelta.

Teollisten työympäristöjen yleisilman TVOC-pitoisuudelle ei Suomen lainsäädännössä ole asetettu raja-arvoja. Työterveyslaitos on kuitenkin esittänyt teollisuusilman TVOC-pitoisuuden viitearvoksi  $3000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja tavoitetasoksi  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ehdotetut tasot perustuvat Työterveyslaitoksen teollisuusympäristöissä tekemiin mittauksiin ja niistä laskettuihin keskiarvoihin. Ehdotettuja tasoja ja viitearvoja ei kuitenkaan voida käyttää työntekijälle aiheutuvan terveyshaitan arviointiin. (Haihtuvien orgaanisten... 2012) Eri yhdisteiden pitoisuuksille sen sijaan on määritetty raja-arvoja haitallisiksi tunnettujen pitoisuuksien perusteella, joiden ylittyminen voi aiheuttaa muun muassa terveys- ja hajuhaittoja (Sisäilmayhdistys ry 2008).

Hengittyvä pöly on jaetta, jota hengitetään suun tai nenän kautta. Hengittyvästä pölystä voidaan erottaa alveolijakeisen pölyn osuus eli syvimmälle keuhkorakkuloihin asti kulkeu-

tuva jae. (Hengittävän ja alveolijakeisen... 2016, 14) Tavarán vastaanotossa ja lajittelussa esiintyvän pölyn voidaan olettaa olevan sekä epäorgaanista että orgaanista pölyä. Hengittävän pölyn näytteet kerätään aktiivisesti vakiovirtauspumpun avulla työntekijöiden hengitysalueelle asetettujen IOM-keräinten suodattimille. Näytteitä kerättiin molemmissa toimipisteissä neljän työntekijän hengitysvyöhykkeiltä.

Pölynäytteiden analyysituloksia verrataan työpaikan ilman epäpuhtauksille asetettuihin raja-arvoihin ja haitallisiksi tunnettuihin pitoisuuksiin. Altistumista verrataan kahdeksan tunnin raja-arvoon (HTP8h), kun altistuminen kestää työvuoron ajan. Joillakin aineilla on vaikutuksia jo lyhytaikaisen altistumisen seurauksena, jolloin tulosta verrataan viidentoista minuutin raja-arvoon (HTP15min). Jos altistuminen on tätäkin lyhyempää ja kyse on altisteesta, jolle lyhyet altistumishuiput ovat terveyshaitan kannalta olennaisia, verrataan pitoisuuksia hetkelliseen raja-arvoon eli kattoarvoon. (Sosiaali- ja terveysministeriö 2020)

Biologisiin altisteisiin luettavat endotoksiinit ovat bakteerien rakenneosia, jotka leviävät bakteerien mukana hengitysilmaan esimerkiksi pölyn mukana. Endotoksiinit aiheuttavat muun muassa kuumeoireilua ja keuhkojen toimintakyvyn heikentymistä. Ilmanäytteestä analysoidulle endotoksiinipitoisuudelle ei vielä toistaiseksi Suomessa ole asetettu HTP-raja-arvoa. On kuitenkin arvioitu, että kahdeksan tunnin altistumisen pitoisuuden ylittäessä arvon 90 EU/m<sup>3</sup> (EU = endotoxin unit eli endotoksiiniyksikkö) työntekijälle saattaa aiheutua hetkellisiä tai pitkäaikaisia terveyshaittoja. (Työterveyslaitos s.a.) Endotoksiininäytteet kerätään IOM-keräimillä työntekijän hengitysvyöhykkeeltä. Lentokentänkadun toimipisteellä näytteet kerättiin neljän työntekijän ja Kiepisissä kahden työntekijän hengitysvyöhykkeeltä.

Melu määritellään häiritseväksi tai kuulolle haitalliseksi ääneksi. Työnantajan on selvitettävä ja arvioitava työntekijöiden altistuminen melulle sekä tarvittaessa mitattava melualtistus Valtioneuvoston asetuksen työntekijöiden suojelemisesta melusta aiheutuville vaaroilta (85/2006) mukaisesti. Valtioneuvoston asetuksessa 85/2006 on asetettu työssä tapahtuvan melualtistuksen päivittäiset toiminta- ja raja-arvot, joihin mittausten tuloksia verrataan. Saatujen tulosten perusteella, mikäli raja-arvot ylittyvät, on työnantaja velvollinen tekemään vaadittavat korjaustoimenpiteet työntekijöiden melualtistuksen vähentämiseksi. Melualtistus mitataan henkilökohtaisilla meluannosmittareilla, joiden avulla pystytään selvittämään sekä kokonaisaltistus että yksittäiset piikit. Kiepisissä melualtistusta mitattiin neljän kokonaisen työpäivän ajan, ja jokaiseen työpäivään sisältyi kaksi työvuoroa.

## TUNNISTETTU TARVE HENKILÖKOHTAISTEN SUOJAINTEN KÄYTÖLLE

Lentokentänkadun toimipisteellä mitatut sisäilman VOC-pitoisuudet olivat matalia verrattuna Työterveyslaitoksen esittämiin teollisten työympäristöjen yleisilman viitearvoihin sekä sosiaali- ja terveysministeriön asettamiin yksittäisten yhdisteiden HTP<sub>8h</sub>-arvoihin.

Vaikka analysoidut pitoisuudet eivät ylittäneet  $HTP_{8h}$ -arvoja, on kuitenkin huomioitava, että kemiallisten aineiden yhteisvaikutuksia ja monialtistumisen seurauksia ei vielä tunneta, jolloin tarpeettoman kemikaalialtistuksen välttäminen on suotavaa. Lentokentänkadun toimipisteellä myös hengittyvän ja alveolijakeisin pölyn sekä endotoksiinien pitoisuudet työntekijöiden hengitysilmassa olivat alhaisia verrattuna niille asetettuihin  $HTP_{8h}$ -arvoihin eivätkä siten aiheuttaneet jatkoselvityksiä tai toimenpiteitä asiaan liittyen.

Lajittelun ja kierrätyksen keskus Kiepin Utta elämää Groupin työntekijöiden hengittyvän pölyn altistus oli pääasiassa vähäistä tai kohtalaista  $HTP_{8h}$ -arvoon verrattuna. Päiväkohtainen altistus voi kuitenkin esimerkiksi keliolosuhteista riippuen ylittää  $HTP_{8h}$ -arvon, jolloin hengitettävä pöly aiheuttaa riskin työntekijän terveydelle. Riskiä tulee pienentää esimerkiksi henkilökohtaisten suojainten ja työtilan siisteydestä huolehtimisen avulla. Suoritettujen melumittausten perusteella meluannos pysyi pääsääntöisesti raja-arvojen alapuolella. Annos ylitti alemman toiminta-arvon yhtenä mittauspäivänä neljästä sekä alemman toiminta-arvon äänen huippumelutasosta yhtenä mittauspäivänä neljästä. Mitatut ylitykset velvoittavat työnantajan antamaan työntekijöille kuulonsuojaimet, opastamaan melun vaaroista sekä mahdollistamaan kuulontarkastus. Työntekijöille toteutetun endotoksiiniselvityksen perusteella Kiepin Utta elämää Groupin työntekijöiden altistus endotoksiineille oli hyvin vähäinen eivätkä endotoksiinipitoisuudet näillä mitatuilla pitoisuuksilla aiheuta riskiä työntekijöille.

Toteutettuihin mittauksiin liittyen tulee ottaa huomioon, että suoritettavat mittaukset ja niistä saadut tulokset kuvaavat vain kyseisten päivien altistusta ja päiväkohtainen altistus voi vaihdella säätötilan sekä Kiepin sisällä ja ympäristössä tapahtuvan toiminnan mukaan. Pitoisuudet voivat muuttua olosuhdemuutosten myötä, ja siksi onkin tärkeää tunnistaa riskitekijät, jotka heikentävät työhygienian laatua. Kun riskit ovat tiedossa, on mahdollista kohdentaa esimerkiksi henkilökohtaisten suojavälineiden käyttöä niihin tilanteisiin ja olosuhteisiin, joissa työhygienian ja -turvallisuus voivat heikentyä. Utta elämää Groupin työntekijöille hankittiin suositusten mukaiset henkilökohtaiset suojavälineet: FFP3-luokan hengityssuojaimia ja kuulonsuojaimia. Koko Kiepissä työskentelevä henkilökunta opastettiin suojavälineiden oikeaoppiseen käyttöön ja lisäksi työterveyshuollon kanssa käytiin läpi keinoja pölyaltistuksen vähentämiseksi.

## LÄHTEET

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuuden (VOC) tavoitetasot teollisten työympäristöjen yleisilmassa. 2012. Työterveyslaitos. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2016/12/TVOC-tavoitetasot.pdf> [Viitattu 6.9.2021].

Hengittyvän ja alveolijakeisen pölyn tavoitetasoperustelumuiotio. 2016. Työterveyslaitos. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2019/01/hengittyva-ja-alveolijakeinen-poly-tavoitetaso.pdf> [Viitattu 6.9.2021].

Sisäilmayhdistys ry. Kemialliset tutkimukset. 2008. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Ongelmien-tutkiminen/Muut-sisailmatutkimukset/Kemialliset-tutkimukset> [Viitattu 6.9.2021].

Sosiaali- ja terveysministeriö. HTP-arvot 2020, Haitalliseksi tunnetut pitoisuudet. 2020. Pdf-dokumentti. Saatavissa: [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162457/STM\\_2020\\_24\\_J.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162457/STM_2020_24_J.pdf?sequence=1&isAllowed=y) [Viitattu 6.9.2021].

Työterveyslaitos. Endotoksiinien näytteenotto-ohje. Www-dokumentti. <https://www.ttl.fi/service-document/endotoksiinien-naytteenotto-ohje/> [Viitattu 6.9.2021].

# KIERTOVIRRAT-HANKKEESSA SELVITETTIIN JÄTEVESILIETTEEN KÄSITTELYMAHDOLLISUUKSIA

Salla Pulliainen & Jussi Konttila

Kiertovirrat – Jalostetut jätevedet ja lietteet bio- ja kiertotalouden raaka-ainevirroiksi -hankkeessa toteutettiin soveltavaa tutkimusta yhdyskuntien jätevesilietteiden hyötykäytön edistämiseksi. Jätevesilietteet on tunnistettu arvokkaiksi raaka-aineiksi niiden sisältämien ravinteiden vuoksi. Samalla lietteet kuitenkin sisältävät haitta-aineita, joiden pääsy takaisin kiertoon tulee estää. Kiertovirrat-hankkeessa selvitettiin ja testattiin erilaisia käsittelymenetelmiä, joiden avulla lietteen ravinteet olisi mahdollista saattaa hyötykäyttöön turvallisesti. Hankkeen toteutusaika oli 1.6.2019–31.12.2021. Hanketta rahoitti Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan aluekehitysrahastosta, Mikkelin vesilaitos sekä Aquazone Oy.

## LABORATORIO- JA PILOTMITTAKAAVAN TOTEUTUKSIA

Kiertovirrat-hankkeessa toteutettiin laboratoriomittakaavan kokeita yhdyskuntajätevesilietteen käsittelymenetelmiin liittyen. Testauksen kohteena oli muun muassa lietteen sisältämien mikromuovien poistuminen lietteestä hiiltämisen tai polton avulla. Lietteen poltto tai hiiltäminen hygienisoi lietteen, ja riittävän korkea lämpötila hajottaa myös mikromuovit. Hiilletyn lietteen maaperävaikutuksia testattiin tutkimalla eri lämpötiloissa hiilletyn lietteen ekotoksisuutta valobakteerimenetelmällä. Suoritetuissa kokeissa hiillettäessä lietteen ekotoksisuutta ei havaittavissa. Laboratoriomittakaavan kokeissa tavoitteena oli testata jätevesilietteen potentiaalia biokaasun tuotannon raaka-aineena sekä jätevedenpuhdistamalla prosessiin lisättävän rauta(II)sulfaatin eli ferrosulfaatin vaikutusta lietteen biokaasuntuottopotentiaaliin. Ferrosulfaatin vaikutusta ei voitu täysin todentaa lietteen ominaisuuksien ja niistä aiheutuvan virhemarginaalin vuoksi.

Lisäksi laboratoriossa toteutettiin kompostikokeita, joissa testattiin jätevesilietteen käyttöä kompostin raaka-aineena eri seosmateriaaleihin yhdistettynä. Kompostikokeiden tuloksena saatiin uutta tietoa jätevesilietteen kompostoitavuudesta käyttäen kuivikehampppua ja turvetta tukiaineena (kuva 1).





**KUVA 1.** Kiertovirrat-hankkeessa testattiin jätevesilietteen ja kuivikehampun kompostoimista laboratoriomittakaavan kokeissa (kuva Salla Pulliainen).

Hankkeessa pilotoitiin jätevesilietteen jäljitettävyyttä sähköisellä jäljitettävyyjärjestelmällä. Järjestelmän tavoitteena oli edistää lietteen käsittely- ja kuljetustietojen kirjaamista ja säilymistä sekä helpottaa viranomaisraportointia. Yksi hankkeen tutkimusaiheista oli lisäksi jätevesilietteen polttaminen, ja tarkoituksena oli selvittää poltossa syntyvän tuhkan laatua ja siten sen hyötykäyttömahdollisuuksia sekä monitoroida polton päästöjä (kuva 2). Ennen polttokokeita tutkittiin muun muassa sahanpurun ja hakkeen imeyttämistä jätevesilietteen ja sitä, miten lietteen kuivattavuutta voitaisiin parantaa polttoa varten. Ensimmäiset polttokokeet toteutettiin Xamkin energiatekniikan laboratoriossa ja kokeita jatkettiin tehokkaammalla kattilalla Ariterm Oy:n koepolttolaitoksella. Kokeiden perusteella voitiin todeta, että lietteen poltto vaatii puupelletin polttoa korkeamman polttolämpötilan sekä liikkuvan arinan polttoaineen sintraantumisen ehkäisemiseksi. Lisäksi lietteellä todettiin olevan merkittävä vaikutus polton päästöihin pelkän puupellettien polton päästöihin verrattuna.





**KUVA 2.** Kiertovirrat-hankkeessa monitoroitiin jätevesilietteen polton päästöjä (kuva Salla Pulliainen).

## HANKKEEN TULOKSENA LISÄTIETOA LIETTEENKÄSITTELYMENETELMISTÄ

Kiertovirrat-hankkeen toimenpiteet antoivat lisätietoa eri menetelmien soveltuvuudesta jätevesilietteen käsittelyyn. Hankkeessa tuotettiin laajoja selvityksiä yhdyskuntajätevesilietteen käsittelymenetelmistä sekä kansallisesti että kansainvälisesti. Yleisimmät lietteenkäsittelyvaihtoehdot Suomessa ovat kompostointi, mädätys ja näiden yhdistelmät (v. 2016 noin 93 %) (VVY 2017). Mallia uusiin käsittelymenetelmiin voidaan ottaa esimerkiksi muualta Euroopasta, mutta samalla on huomioitava, että Suomessa lietteen muodostuminen on mittakaavaltaan pienempää ja hajautetumpaa Keski- ja Etelä-Eurooppaan verrattuna. Näin ollen käsittelyn kannattavuuteen vaikuttaa esimerkiksi pitkät kuljetusmatkat ja käsittelylaitosten investointien hyötysuhde. Esimerkiksi puhdistamolietteen polttaminen on haaste sen sisältämän veden vuoksi; kuivaamalla lietettä kulutetaan suuri määrä energiaa, jolloin poltosta saatava energiahyöty jää pieneksi. Myös laitosten lupaprosessit ovat pitkiä, mikä osaltaan hidastaa polttovaihtoehdon käyttöönottoa Suomessa. Tällä hetkellä Suomessa operoi vain yksi kokonaan lietteenpolttoon keskittyvä laitos.

Yhdyskuntalietteen lannoitekäyttöön liittyy vielä paljon epävarmuuksia. Vaikka lietteen lannoitekäyttö on lainsäädännön puitteissa sallittua, ei lainsäädäntökään ota kantaa kaikkiin lietteen sisältämiin haitta-aineisiin, kuten mikromuoveihin tai lääkeaineisiin. Tämän vuoksi on tärkeää jatkaa tutkimusta lietteen sisältämistä haitta-aineista ja eri käsittelymenetelmien vaikutuksista niiden pitoisuuksiin. Lietteen käsittelyä olisikin järkevintä kehittää jo jätevedenpuhdistusprosesseista alkaen, jolloin ravinteet ja haitta-aineet saataisiin paremmin erilleen jo lietettä muodostuessa. Lisäksi lietteen jatkokäsittelyä ajatellen tulisi selvittää mahdollisuus hyödyntää esimerkiksi muita teollisuuden biopohjaisia sivuainevirtoja, joiden käyttö yhdessä lietteen kanssa voisi tehostaa muun muassa lietteen kuivattavuutta tai ravinteiden talteenottoa lisäämättä kuitenkaan lietteen sisältämää haitta-ainekuormaa.

## LÄHTEET

Suomen Vesilaitosyhdistys ry. VVY. 2017. Yhdyskuntalietteen käsittelyn ja hyödyntämisen nykytilannekatsaus. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 46. Helsinki. 2017. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.vvy.fi/site/assets/files/1621/yhdyskuntalietteen\\_ka\\_sittelyn\\_ja\\_hyo\\_dynta\\_misen\\_nykytilannekatsaus\\_26092017.pdf](https://www.vvy.fi/site/assets/files/1621/yhdyskuntalietteen_ka_sittelyn_ja_hyo_dynta_misen_nykytilannekatsaus_26092017.pdf) [viitattu 10.9.2021]

# JATKUVATOIMINEN MITTAUS JÄTEVESIEN HAITTA-AINEIDEN HAVAINNOINNISSA

Riina Tuominen & Lasse Hämäläinen

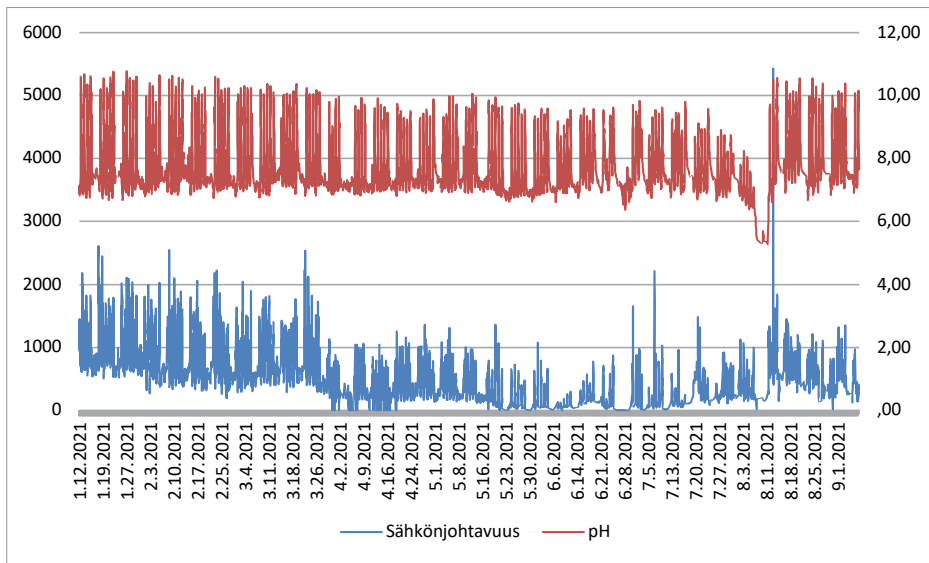
Viemäriverkoston jäteveden laatu vaihtelee paikasta ja ajankohdasta riippuen. Tulosten luotettavuuden takaamiseksi oikea-aikainen näytteenotto on tärkeää, mutta myös haastavaa. Taustatietoja oikean näytteenottohetken varmistamiseksi tarvitaan ja jatkuvatoimisesta mittauksesta onkin mahdollista saada lisätietoja haitta-aineiden kulkeutumisen selvittämiseksi.

Vemo – Kaupunkien jätevesien haitallisten aineiden vähentäminen monitorointia tehostamalla -hankkeen tavoitteena on ennaltaehkäistä haitallisten aineiden pääsyä jätevesiin. Hankkeessa kartoitetaan haitallisten aineiden päästölähteitä ja viemärivereden laatua case-kohdealueilla Mikkelin kaupungissa. Hanke alkoi vuoden 2020 alussa ja kestää vuoden 2022 kesäkuun loppuun. Hanketta toteuttavat Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu ja LUT-yliopisto, ja sitä rahoittaa ympäristöministeriö vesiensuojelun tehostamisohjelmasta ([www.ym.fi/vedenvuoro](http://www.ym.fi/vedenvuoro)).

## JATKUVATOIMISEN MITTAUKSEN HYÖDYT

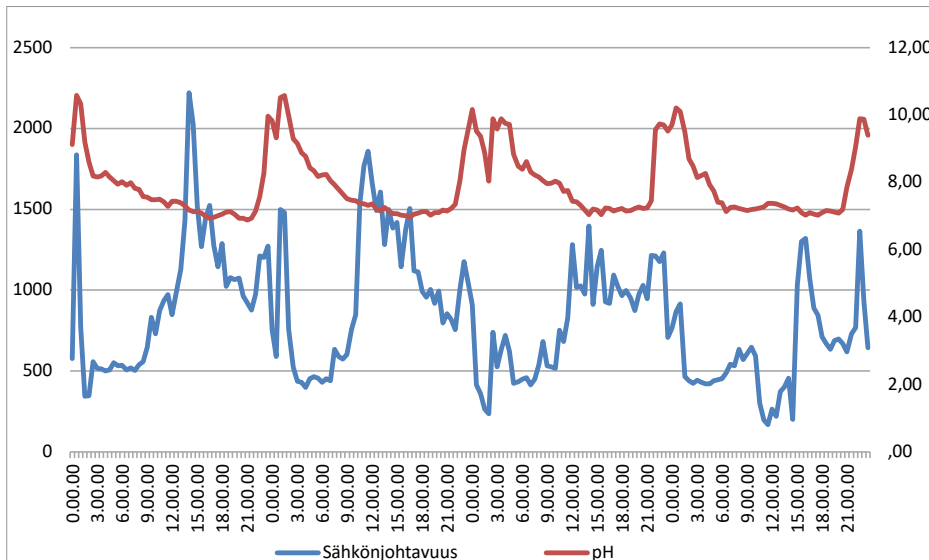
Perinteinen näytteenotto suunnitellaan yleensä taustatietojen pohjalta, ja sen kohdentaminen hetkelliseen laadunmuutokseen voi olla vaikea ajoittaa. Myös kenttämittaukset kohdentuvat vain tiettyyn mittaushetkeen eivätkä anna kuvaa laadunvaihtelusta reaaliaikaisen seurannan tapaan. Jatkuvatoimisilla laitteilla voidaan havaita hetkellisiä ilmiöitä vedenlaadussa, jolloin myös näytteenotto pystytään kohdentamaan tarkemmin muutoshetkeen. Automaattisella vedenlaadun seurannalla pystytään seuraamaan tiedonsiirtopalvelun avulla reaaliaikaisesti vedessä tapahtuvia muutoksia. Reaaliaikainen seuranta mahdollistaa myös nopean reagoinnin havaittaviin poikkeamiin sekä selviin mittausvirheisiin. (Tarvainen ym. 2015)

Yksittäiset manuaaliset mittaukset kertovat vain mittaushetken tilanteesta, ja kokonaiskuvan muodostamiseksi niitä tarvitaan paljon. Automaattisten mittausten etuna on laitteiston sijoittaminen mittauskohteeseen, joka mahdollistaa tiheän mittausvälin. Näin saadaan enemmän mittaustuloksia kerrytettyä ja tarkempaa tietoa vedessä tapahtuvista muutoksista. Jatkuvatoimisella mittauksella pystytään seuraamaan sekä pitkäaikaistrendejä että lyhyen aikavälin muutoksia samanaikaisesti. Pitkän aikavälin mittaustuloksista voidaan seurata esimerkiksi vuodenaikojen vaikutusta sekä jäteveden laadun muutoksia useiden kuukausien tai vuosien aikana. Kuvassa 1 on nähtävissä elokuun alussa tapahtunut antureiden tukkeutuminen, jolloin pH:n arvo putosi usean päivän ajaksi alemmas kuin kertaakaan aiemmin mittausjaksolla.



**KUVA 1.** Ponsel-anturien mittaustulokset 12.1.–7.9.2021.

Kuvassa 2 on aiemmassa kuvaajassa käytetyistä mittaustuloksista valittu muutaman vuorokauden mittainen jakso, jonka tulokset on tuotu tarkemmin esiin. Kuvasta 2 näkyy mittauskohteen vuorokausivaihtelu sekä pH:n ja sähkönjohtokyvyn käänteinen korrelaatio. Sähkönjohtokyky saavuttaa korkeimmat arvonsa päivisin ja pH puolenyön aikaan johtuen todennäköisesti teollisuustoimijoiden toimitilojen pesussa käytettävistä pesuaineista.



**KUVA 2.** Ponsel-anturien mittaustulokset 23.2.–26.2.2021.

## JATKUVATOIMISEN MITTAUKSEN MITTAUSPERIAATTEET

Vedenlaadun jatkuvatoiminen mittaus perustuu yleensä sähkökemialliseen, optiseen tai märkäkemialliseen menetelmään. Käytetyt laitteet ovat jatkuvatoimisia antureita, jotka mittaavat ohjelmoidun mittaustiheyden mukaan. Laitteen tekemien mittausten väli on säädettävissä ja voi olla hyvinkin lyhyt (1 sekunti - 1 tunti), joten pienetkin vedenlaadun muutokset ovat havaittavissa. Mittauksen tulos saadaan yleensä usean hetkellisen mittauksen keskiarvosta. (Tattari ym. 2019)

Jatkuvatoimisen mittauksen mittausperiaate on yleensä erilainen kuin laboratorioanalyseissä. Optisissa antureissa esimerkiksi sameuden mittaus perustuu valon vaimenemisen tai sähkömagneettisen säteilyn takaisinsironnan mittaukseen. Tällaisissa antureissa on säteilyn lähteenä yleensä infrapuna- tai laserdiodi. Spektrometriaan perustuvilla laitteilla pystytään mittaamaan myös orgaanisen aineksen ja nitraattitypen määrää. Vedenlaadun muuttujilla on omat niille ominaiset tunnistet ja tarkat kompensoinnit valolähteiden muutoksille, joiden perusteella spektrinen signaali mahdollistaa niiden pitoisuuksien mittaamisen. Märkäkemiaan perustuvilla laitteilla mitattavat muuttujat ja niiden lukumäärä määräytyvät valonlähteiden ominaisuuksista sekä käytettävistä reagensseista. (Tattari ym. 2019)

## JATKUVATOIMINEN MITTAUS VEMO-HANKKEESSA

Vemo-hankkeessa on testattu jäteveden pumppaamossa EHP Environment Oy:n asentamia Ponselin antureita, jotka mittaavat jäteveden sähkönjohtavuutta, pH-arvoa ja lämpötilaa (kuva 3). Samojen parametrien mittausta testattiin yhtäaikaaisesti myös Xamkin YSI 6820 V2 -sondilla.



**KUVA 3.** EHP Environment Oy asensi Ponselin anturit pumppaamoon tammikuussa 2021 (kuva Riina Tuominen).



Jätevesien liian alhainen tai korkea pH voi aiheuttaa viemäriputkistoissa syöpmistä, mikä lyhentää niiden teknistä käyttöikää. Osa vesilaitoksista on asettanut normaalista talousjätevedestä poikkeavalle, viemäriin johdettavalle vedelle pH-luvun raja-arvot. Yleensä vesi ei saa olla pH-luvultaan alle 6, ja ylärajan arvo vaihtelee 9–11 (HSY s.a., Joensuun Vesi 2020, Kymen Vesi s.a., Oulun Vesi 2020, Tampereen Vesi 2016).

Sähkönjohtokyky kertoo veteen liunneen suolojen määrän. Jätevesien sähkönjohtavuus on yleensä noin 50–100 mS/m. (Oravainen 1999)

Lämpötilatiedot auttavat osaltaan tulosten tulkinnessa tarkasteltaessa vedenlaadun parametrien mittaustuloksia. Normaalista talousjätevedestä poikkeavalle, viemäriin johdettavalle vedelle raja-arvoksi on yleensä asetettu +30–40 °C. (HSY s.a., Joensuun Vesi 2020, Kymen Vesi s.a., Oulun Vesi 2020, Tampereen Vesi 2016) Jäteveden korkea lämpötila voi vahingoittaa muovia esimerkiksi tiivisteissä ja putkien liitoskohdissa. Se myös vähentää liunneen hapen määrää sekä nopeuttaa biokemiallisia reaktioita. (Makkonen 2014)

Pumppaamoon sijoitettujen anturien toimintakelpoisina pito hankkeen tutkimuskohteessa on osoittautunut haastavaksi. Jäteveden mukana kulkeutuu suuria määriä alueen teollisuudesta peräisin olevaa rasvaa sekä harsomaisia kankaanpaloja (kuva 4). EHP Environment Oy:n asentamiin antureihin kerääntyy runsaasti jäteveden pinnalla kulkeutuvaa rasvaa mittarin kelluessa jäteveden pinnalla. Rasvapitoinen lika pääsee tukkimaan pintaa lähellä olevat anturipäät, jolloin mittaustulokset heikkenevät.



**KUVA 4.** EHP Environment Oy:n asentamiin antureihin heinäkuussa 2021 kerääntynyt likaa (kuva Riina Tuominen).

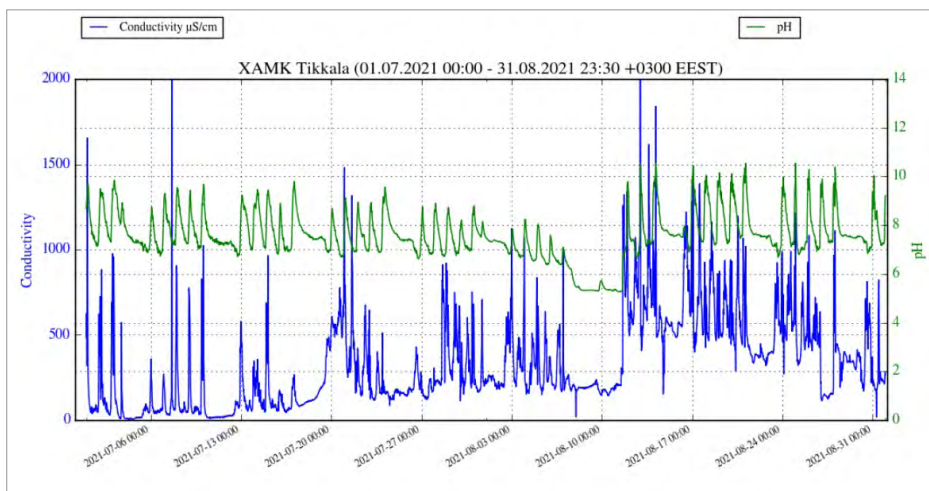
YSI 6820 V2 -sondin anturit asennettiin syvemmälle veden pinnan alapuolelle, mikä ehkäisee rasvan kertymistä mittalaitteeseen. Suurempi haitta YSI-sondin toiminnalle kohteessa on jäteveden mukana kulkeutuva harsomainen kangas (kuva 5). Kangas tarttuu sondin kannatteluketjuun sekä johtoihin ja laitteen anturipäitä suojaavaan koteloon. Kangas estää veden vapaan virtaamisen mittapäiden ohi, jolloin mittaustulokset vääristyvät.



**KUVA 5.** Jäteveden mukana kulkeutuvaa kiintoainesta kiinnittyy mittalaitteisiin vaikuttaen mittaustuloksiin (kuva Lasse Hämäläinen).

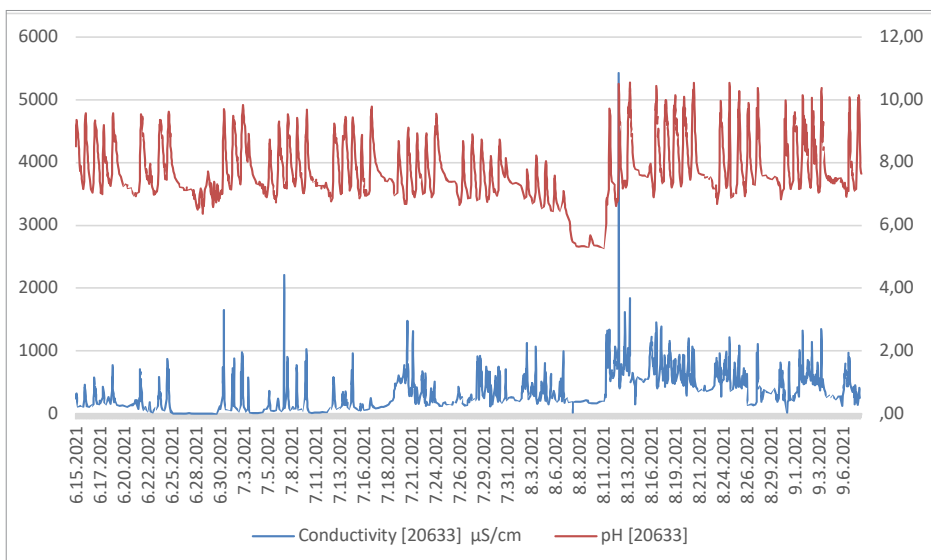
Anturien likaantuminen näkyy EHP Environment Oy:n mittaustuloksissa erityisesti heinä-elokuun mittauksissa (kuva 6). Heinäkuun loppua kohti sähkönjohtavuuden mittaustulokset eivät yöaikana palaudu totutusti lähelle nollaa. Vastaavasti pH:n arvot lähtevät heinäkuun loppua kohti laskemaan totutuista mittaustuloksista. Viikon 31 viikonloppuna anturit menivät täysin tukkoon, minkä seurauksena viikon 32 alkuviikon mittaukset näyttivät alhaisia ja tasaisia pitoisuuksia. Anturit puhdistettiin 11.8., jonka jälkeen mittaustulokset nousivat takaisin aiempiin arvoihin.



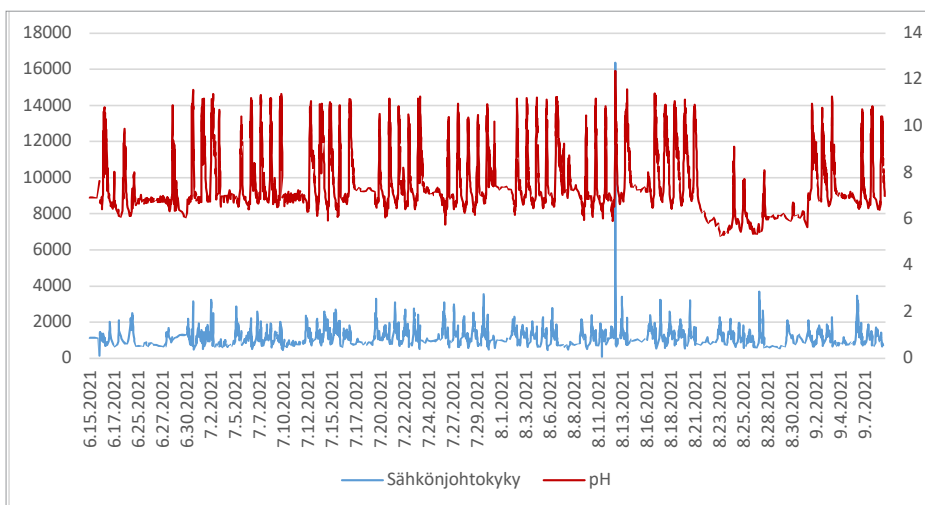


**KUVA 6.** Heinä–elokuun mittaustulokset EHP Environment Oy:n anturien osalta.

Anturien likaantuminen ja toiminnan heikentyminen voidaan todeta myös vertaamalla EHP Environment Oy:n tuloksia (kuva 7) YSI-sondin tuloksiin (kuva 8). Anturien sijainti kaivossa eri korkeudella johtaa mittapäiden eriaikaiseen tukkeutumiseen. Ponselin anturipäiden elokuinen tukkeutuminen näkyy selkeänä pudotuksena pH-arvoissa. Samaan aikaan YSI-sondin tulokset pysyivät tavanomaisina, joten todennäköisesti lähemmäs pintaa asennettuihin Ponsel-antureihin kerääntynyt rasvaliika vaikutti tuloksiin.



**KUVA 7.** EHP Environment Oy:n asentamien Ponsel-anturien mittaustulokset 15.6.–8.9.2021.



**KUVA 8.** YSI 6820 V2 -sondin mittaustulokset 15.6.–8.9.2021.

Rinnakkaisista mittaustuloksista voidaan myös huomata sähkönjohtavuudessa 12.8. näkyvä korkea piikki, joka yhden mittaustuloksen perusteella voitaisiin hylätä mittavirheenä. Ilman jatkuvatoimista mittausta vastaavanlaiset pulssimaiset vaihtelut jäisivät huomaamatta. Piikki tapahtui klo 23.30 ja kesti alle 15 minuuttia, joten näytettä jätevedestä ei olisi voinut saada ilman automaattista järjestelmää. Mikäli haluttaisiin ottaa näyte poikkeavan mittaustuloksen aikaan, tulisi anturien lisäksi kaivoon asentaa automaattinen näytteenotin, joka reagoi epätavallisen korkeisiin mittaustuloksiin välittömästi.

Anturien mittaustulokset eivät ole täysin samansuuruisia, mutta trendit ovat samoja. Erot mittausten välillä johtuvat ainakin osittain muun muassa anturien sijainnista kaivossa. EHP Environment Oy:n asentamat Ponsel-anturit kelluvat jätevesipumppaamossa vain noin viisi senttimetriä veden pinnan alapuolella ja YSI-sondin anturit riippuen kaivon pinnan korkeudesta noin 1–1,5 metriä pinnan alapuolella. Tuloksiin vaikuttaa myös anturien kalibroinnin onnistuminen sekä niiden jätevesikaivossa pidetty aika. YSI-sondi asetettiin vasta kesäkuussa 2021, kun Ponsel-anturit olivat olleet kaivossa jo noin viisi kuukautta.

## JOHTOPÄÄTÖKSET

Jäteveden jatkuvatoiminen seuranta hankkeen kohteessa oli haasteellista. Veden mukana kulkeutuva kiintoaines sekä rasva tukkivat antureita, jolloin mittaustulosten luotettavuus kärsi. Anturien puhtaanapito vaati vähintään viikoittaista puhdistus- ja huoltokäyntiä kohteessa. Alueella sijaitseva teollisuus on suurin syy havaitulle jäteveden rasva- ja kiintoainepitoisuuksille, ja mittarien siirto johonkin toiseen pumppaamokaivoon todennäköisesti helpottaa jatkuvatoimisen mittauksen suorittamista. Anturit sijoitetaan uuteen kohteeseen.

seen lokakuussa 2021, jolloin saadaan tietoa jäteveden laadusta useammasta monitorointipisteestä sekä samalla myös huoltotoimenpiteiden mahdollisista muutoksista.

Jatkuvatoiminen mittaus antaa runsaasti tietoa jäteveden yleisestä tilasta ja helpottaa näytteenottojen suunnittelua. Mittaustulosten seuranta kohteessa esimerkiksi viikkoa ennen näytteenottoa kertoisi näytteenottajalle, mihin vuorokauden aikaan jätevesi on likaisimmillaan ja puhtaimmillaan. Tällöin näytteenotto voitaisiin ajoittaa suurimpaan päästökuormitukseen.

Automaattinen näytteenotto parantaa jatkuvatoimisen mittauksen luotettavuutta. Näytteenottimelle voidaan antaa raja-arvot, joiden ylittyessä jätevedestä saadaan näyte riippumatta ajankohdasta. Kesän mittausjaksolla tapahtuneesta piikistä ei olisi saatu näytettä perinteisellä menetelmällä, vaikka mittaustulos olisi huomattu heti klo 23.30, sillä näytteenottaja ei olisi ehtinyt kohteeseen alle 15 minuutissa, jonka poikkeava tilanne kesti.

Taloudellisesti jatkuvatoimisten mittarien ja automaattisten näytteenottimien hankkiminen jokaiseen pumppukaivoon on kannattamatonta. Jatkuvatoimista seuranta voitaisiin hyödyntää juuri haasteellisten teollisuuskohteiden jätevesien tutkimisessa, mutta sen seurauksena mittalaitteiden huoltokäynnit olisivat yleisiä. Vaihtoehtoisesti jäteveden poikkeus-tilanteita huomattaessa voitaisiin ottaa yhteyttä alueen teollisiin toimijoihin ja tiedustella, onko normaalia poikkeavia toimenpiteitä tehty kyseisenä ajankohtana.

Antureiden huoltoväliin voidaan vaikuttaa esimerkiksi anturipäiden paremmalla sijoittamisella pumppaamokaivon ominaisuuksiin nähden. Tässä mittauksessa EHP Environment Oy:n anturit kelluivat jäteveden pinnalla, jolloin veden mukana kulkeutunut rasva pääsi tukkimaan anturipäät helposti. Nykyisellä kellukeratkaisulla antureita on kuitenkin myös mahdollista laskea syvemmälle tai vaihtoehtoisesti voidaan käyttää alaslaskuputkia, jotka voisivat vähentää myös kangaskappaleiden aiheuttamaa haittaa. YSI-sondin sijoittaminen syvemmälle kaivoon vähensi antureiden likaantumista rasvasta, mutta sondiin kiinnittyi runsaasti veden mukana kulkeutunutta harsomaista kangasta.

Jätevesien jatkuvatoimista seuranta tulee kehittää yhteistyössä vesilaitosten ja teollisuuden toimijoiden kanssa. Jäteveden laadun parantaminen vähentää jätevesiverkoston kulumista sekä jätevedenpumppaamon kuormitusta. Jatkuvatoimista mittausta on hyvä testata erilaisissa jätevesikohteissa sopivien sijoituspaikkojen löytämiseksi.

## LÄHTEET

HSY s.a. Viikinmäen ja Suomenojan jätevedenpuhdistamoille johdettavien jätevesien raja-arvot. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.hsy.fi/vesi-ja-viemarit/jateveden-raja-arvot/> [viitattu 2.9.2021].

Joensuun Vesi. 2020. Jätevesien sisältämien haitallisten aineiden raja-arvot. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.joensuunvesi.fi/documents/1691974/6778539/Teollisuus-%C3%A4tevesisopimuksen+raja-arvot.pdf/7fefc1f1-ee4b-09c6-b484-ab2c051caf45>.

Kymen Vesi s.a. Teollisuusjätevedet ja raja-arvot. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://kymenvesi.fi/toiminta/teollisuusjatevedet-ja-raja-arvot/> [viitattu 2.9.2021].

Makkonen, E. 2014. Teollisuusjätevesien seuranta ja hallinta – tapauskohteena Jyväskylän seutu. Tampereen teknillinen yliopisto. Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma. Diplomityö.

Oravainen, R. 1999. Vesistötulosten tulkinta – opasvihkonen. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://kvvy.fi/wp-content/uploads/2015/10/opasvihkonen.pdf> [viitattu 2.9.2021].

Oulun Vesi. 2020. Viemäriin johdettavien jätevesien laatu. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.oulunvesi.fi/documents/399509/17677332/Viem%C3%A4riin+johdettavien+%C3%A4tevesien+raja-arvot/a9cd306e-f126-4f42-b972-d4e27d1bb4da> [viitattu 2.9.2021].

Tampereen Vesi. 2016. Tampereen veden vastaanottaman jäteveden raja-arvot. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.tampere.fi/material/attachments/vesi/vesi/sYWNsaYWZ/Tampereen\\_Vesi\\_jateveden\\_raja-arvot\\_2016.pdf](https://www.tampere.fi/material/attachments/vesi/vesi/sYWNsaYWZ/Tampereen_Vesi_jateveden_raja-arvot_2016.pdf) [viitattu 2.9.2021].

Tarvainen, M., Kotilainen, H. & Suomela, J. 2015. Uudet menetelmät vesistöjen seurannassa – mahdollisuudet ja haasteet. PDF-dokumentti. Saatavissa: [http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/120174/RA%2086\\_2015\\_Uudet%20menetelm%20vesist%20seurannassa.pdf?sequence=2](http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/120174/RA%2086_2015_Uudet%20menetelm%20vesist%20seurannassa.pdf?sequence=2) [viitattu 2.9.2021].

Tattari, S., Tarvainen, M., Kallio, K., Lepistö, A., Näykki, T., Raateoja, M. & Seppälä, J. 2019. Laatukäsikirja jatkuvatoimisille vedenlaadun mittauksille. Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) julkaisu. PDF-dokumentti. Julkaistu 4/2019. Saatavissa: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/299105/SYKEra\\_4\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/299105/SYKEra_4_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y) [viitattu 2.9.2021].

# ETELÄ-SAVON VESISTÖJEN PUHTAUTTA EDISTÄMÄSSÄ

Niina Laurila & Hanne Soininen & Joonas Kahiluoto & Markus Sillanpää  
& Timo Pyhälähti

Vesistöjen puhtautta edistämässä uusin menetelmin – WaterPlus -hankkeen tavoitteena on kehittää vesistöihin kohdistuvien, hulevesistä peräisin olevien haitta-aineiden, erityisesti mikromuovien, analysointia ja monitorointia. Lisäksi tavoitteena on mikro- ja makromuovien havainnointiin liittyvien näytteenottomenetelmien sekä hulevesien mukana kulkeutuvan mikromuovin suodatusmenetelmien kehittämistyö. Hankkeen toteutusajka on 1.4.2021–31.5.2023. WaterPlus – Vesistöjen puhtautta edistämässä uusin menetelmin – hankkeen toteuttavat yhteistyössä Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu ja Suomen ympäristökeskus. Hanketta rahoittaa Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan aluekehitysrahastosta.

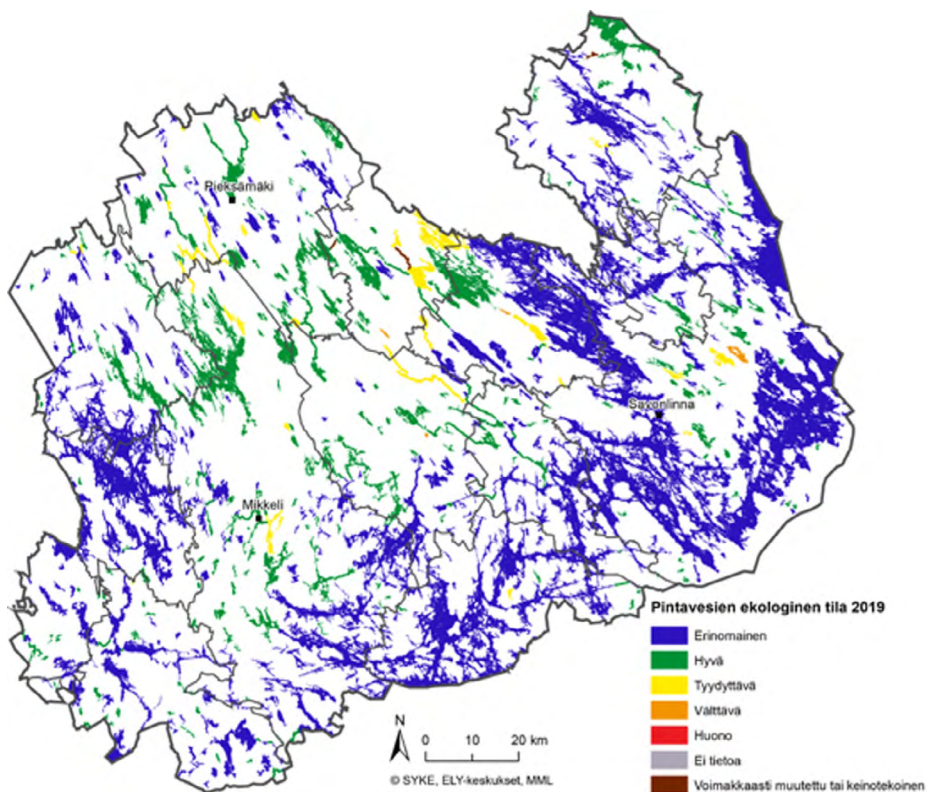


**KUVA 1.** WaterPlus-hankkeessa tutkitaan Etelä-Savon vesistöjen haitta-aineiden, kuten muovien, määrää (kuva Manu Eloaho).

## ETELÄ-SAVON VESISTÖT

Etelä-Savon maakunnan vahvuutena ovat monipuoliset ja laajat vesistöt. Maakunnan vesistöalueet ovat erinomaisessa tai hyvässä tilassa, mutta tilan säilyminen vaatii jatkuvaa seuranta- ja tehokkaampia menetelmiä ihmisen toiminnasta aiheutuvan kuormituksen vähentämiseksi. Saimaa ja maakunnan muut lukuisat vesistöt ovat alueen elinkeinoelämän ja vetovoimaisuuden kannalta merkittävässä asemassa. Vesistöjä tuleekin hyödyntää alueen elinvoimaisuuden ylläpitämisessä ekologisesti kestäväällä tavalla (Etelä-Savo ELY-keskus 2013).

Vesistöjen tila Etelä-Savossa on erinomainen/hyvä, sillä Etelä-Savon vesistöjen kokonaispinta-alasta suurin osa eli 97 prosenttia kuuluu ekologiselta luokitukseltaan erinomaiseen tai hyvään tilaan (kuva 2). Vesistön alueelta 26 järveä kuului tyydyttävään luokkaan (3 % pinta-alasta) ja välttävään luokkaan 0,2 prosenttia (5 järveä). Jokien osalta suurin osa eli 82 prosenttia (kokonaispituudesta) kuuluu hyvään tai erinomaiseen tilaluokkaan. Tyydyttävään luokkaan kuuluu neljä jokea, mikä on 18 prosenttia arvioidusta jokipituudesta. Huonoja tai välttäviä jokia ei Etelä-Savosta löydy. Ekologisen tilan alustava arviointi tehtiin vuonna 2019, ja siinä mukana oli 515 järveä sekä 55 jokea tai joen osaa. (Etelä-Savon ELY-keskus, 2019)

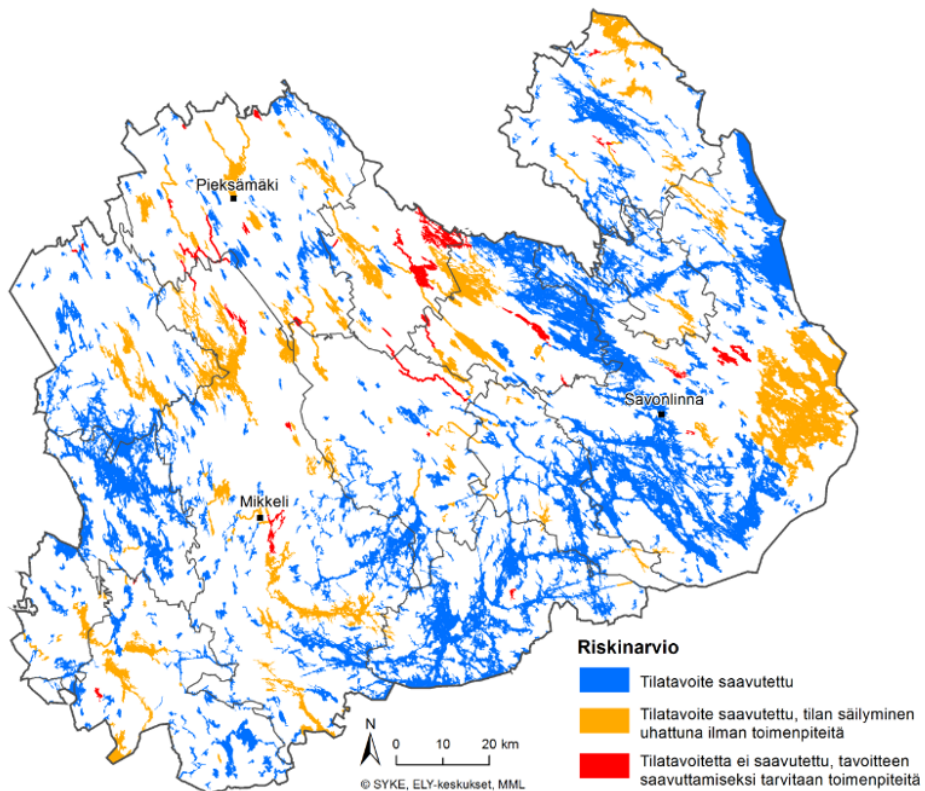


**KUVA 2.** Ekologiselta tilaltaan Etelä-Savon pintavedet luokiteltiin vuonna 2019 kuuluvaksi erinomaiseen tai hyvään luokkaan (kuva Etelä-Savon ELY 2019).



Ekologisen tilan luokittelu on osa EU:n Vesipolitiikan puitedirektiiviä (2000/60/ETY), jonka Suomi on toimeenpannut lailla vesien- ja merenhoidon järjestämisestä (1299/2004). Lain pohjalta tehtävän vesienhoidon tavoitteena on suojella, parantaa ja ennallistaa jokien, järvien, rannikko- ja pohjavesien tilaa niin, ettei niiden tila heikkene, sekä pyrkiä kaikkien vesien osalta vähintään hyvään tilaan.

Ekologisen luokituksen lisäksi vesistölle on tehty myös riskiarvio (kuva 3). Etelä-Savon alueella on vesistöjä, joiden tilatavoite eli laissa määritetty veden hyvä/eriomainen taso on saavutettu, sekä vesistöjä, joiden tilatavoite on saavutettu mutta joiden tilan säilyminen on uhattuna ilman toimenpiteitä. Lisäksi alueelta löytyy vesistöjä, joissa haluttua tilatavoitetta ei ole saavutettu, ja nämä vesistöalueet tarvitsevat toimenpiteitä, jotta tila tullaan saavuttamaan. (Kotanen ym. 2021)



**KUVA 3.** Etelä-Savon vesistön hyvästä tilasta huolimatta alueella on myös toimenpiteitä vaativia kohteita (kuva Kotanen ym. 2021).



## HULEVEDET KUORMITTAVAT VESISTÖÄ

Vesistön tilaan vaikuttavat heikentävästi monet tekijät. Etelä-Savossa vesistöä kuormittavat maa- ja metsätalous (hajakuormitus), erilaiset pistekuormituslähteet, kuten jätevedet asutuksesta ja teollisuudesta, sekä turvetuotanto (Kotanen 2020). Pistekuormitukset voivat olla paikallisesti merkittäviä vesistöä kuormittavia lähteitä.

Ilmastonmuutoksen on arvioitu lisäävän sadantaa, joka lisää vesistöjen kuormitusta. Sade- ja sulamisvesien mukana vesistöihin huuhtoutuu ravinteita, haitta-aineita ja mikromuoveja. Hulevesien laatu vaihtelee ajallisesti ja paikallisesti vuodenajan, sademäärän, sateen intensiteetin ja valuma-alueen fyysisten ominaisuuksien mukaan. Asuin- ja teollisuusalueilta sekä maataloudesta hulevesien mukana vesistöön päätyvät epäpuhtaudet aiheuttavat muun muassa veden samentumista, rehevöitymistä ja happipitoisuuden laskua. (Hulevesiopas 2012)

## MUOVIT VESISTÖISSÄ

Muovia päätyy vesistöön muun muassa roskaantumisen ja puutteellisesta jätehuollosta. Liikenteestä vesistöihin päätyy sekä tiemerkintöjen sisältämää muovia että rengaskumia (SYKE 2017). Muoveihin lisätään niiden valmistuksen aikana erilaisia käyttöominaisuuksiin vaikuttavia aineita, kuten palonestoaineita ja pehmittimiä. Vesistöön päätyessään muovit ja niiden sisältämät haitta-aineet aiheuttavat fyysikaalisia ja kemiallisia haittavaikutuksia ekosysteemeihin. (Fjäder 2016)

Muovikappaleet voidaan jaotella mikro- ja makromuoveihin kokonsa mukaan. Mikro-muovit ovat alle viiden millimetrin kokoisia muovikappaleita, ja ne voidaan edelleen jakaa primäärisiin ja sekundäärisiin mikromuoveihin alkuperänsä mukaisesti. Primääriset mikromuovit ovat tarkoituksella kokonsa valmistettuja muovihuukkasia, joita käytetään esimerkiksi kosmetiikassa ja teollisuudessa. Sekundääriset mikromuovit ovat irronneet isommista muovikappaleista, makromuovista. Sekundäärinen mikromuovi on esimerkiksi eroosion tai auringon uv-säteilyn vaikutuksesta hajonnutta muovia. Muovien kerääntyminen ympäristöön on maailmanlaajuisesti kasvava ongelma. (Fjäder 2016)

Mikromuovien tutkiminen vesistöistä on vielä suhteellisen uusi tutkimuskohde, eikä mikromuovien monitorointiin vesistöissä siten ole vielä olemassa standardoituja menetelmiä. Näytteenotto, näytteiden käsittely ja analysointi sekä selkeä tulosten tulkinta ovat haasteellisia luotettavien tutkimusmenetelmien puutteen ja kontaminaatoriskin vuoksi, ja siten vain harvat tutkimusten tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään. Tulosten tulkintaa ja johtopäätösten tekoa vaikeuttavat lisäksi puutteelliset tiedot mikromuovien ympäristövaiikutuksista ja haitallisista pitoisuuksista ympäristössä.

Mikromuovitutkimuksessa nykyisin käytettäviä yleisiä menetelmiä ovat esimerkiksi haavin, seulan ja pumpun käyttäminen näytteenotossa (Prata et al. 2019). Näytteenoton haas-

teellisuuteen ja siten mikromuovien tutkimiseen vaikuttavat kuitenkin mikromuovien paikoittaiset matalat pitoisuudet vesistöissä. Tutkimuksen kannalta oleellista on riittävä näytemäärä ja siten edustava tutkimusaineisto. Täten voi olla, että riittävän vesitilavuuden saamiseksi vesinäytteitä joudutaan pumppaamaan ja sen jälkeen suodattamaan näyte sopivalle suodattimelle. (Lenz ym. 2018)

Mikromuovien määrästä Suomen ympäristössä on tehty selvityksiä muun muassa Itämeren ulappa-alueilta, rannikkovesistä, Kallavedestä, juomavedestä ja joistakin eliöryhmistä sekä kaloista (Setälä ym. 2016, Railo ym. 2018, Zidbeck 2018, Hartikainen 2018). Muoveja löytyy kaikkialta. Mikromuovit Suomen vesistöissä – mahdollisten uhkien selvitys (MIF) -hankkeessa tehdyissä kenttätutkimuksissa havaittiin, että mitä pienemmästä mikromuovista oli kyse, sitä enemmän muovia löytyi. Ympäristössä oleva muovi pilkkoutuu pienemmäksi koko ajan. (Lehtiniemi 2020)

## **EU:N MUOVISTRATEGIA JA SUOMEN MUOVIKARTTA**

Euroopan komission vuonna 2018 hyväksymän EU:n muovistrategian tavoitteena on muovin kierrätyksen lisääminen sekä mikro- ja kertakäyttömuovien käytön vähentäminen. Strategiassa on luotu asteittaisia rajoituksia muovien käytölle sekä asetettu tavoitteeksi kaikkien EU:ssa käytettävien muovipakkausten kierrätettävyyttä tai uudelleenkäytettävyyttä vuoteen 2030 mennessä. (EU:n strategia muoveista kierrätetyssä 2018)

EU:n muovistrategian pohjalta Suomelle luotiin ympäristöministeriön toimesta vuonna 2018 muovitiekartta. Muovitiekartan tavoitteena on esitellä lupaavimpia keinoja vastata muovin käytön, kierrätyksen ja korvaamisen haasteisiin. Muovit ovat ominaisuuksiensa takia hyödyllisiä ja siten tarpeellisia, mutta niiden käytön tulee olla kestävä. Muovitiekartassa onkin tunnistettu toimenpiteitä, joilla voidaan vaikuttaa muovin aiheuttamiin haasteisiin yhteiskunnan eri sektoreilla. Ehdotettuihin toimenpiteisiin kuuluvat muun muassa kansalaisten tiedon lisääminen roskaamisen vähentämiseksi ja yritysten tukeminen muovihaasteiden ratkaisujen kehittämiseen. Myös tutkimustietoa muovien haitallisista terveys- ja ympäristövaikutuksista tullaan lisäämään. Muovitiekartta sisältää myös kehitystyötä, joka tähtää hule- ja jätevesien mikromuovien talteenottoon sekä mikromuovia sisältävien lietteiden hyödyntämiseen. (Ympäristöministeriö 2021)

## **WATERPLUS-HANKKEESSA SELVITETÄÄN HULEVESIEN AIHEUTTAMA KUORMITUSTA ETELÄ-SAVON ALUEELLA**

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun ja Suomen ympäristökeskuksen yhteisessä WaterPlus-hankkeessa tavoitteena on selvittää hulevesien kautta vesistöihin huuhtoutuvien haitta-aineiden ja ravinteiden kuormitus Etelä-Savon alueella. Haitta-aineiden selvittämiseksi hankkeessa kehitetään ja testataan uusia monitorointitekniikoita, kuten dronea, sekä otetaan kansalaiset mukaan vesistöjen tilan tarkkailuun ja kunnossa pitämiseen. Tehtävän

haitta-aineselvityksen lisäksi hanke kehittää ja testaa mikromuovien havainnointiin ja poistamiseen liittyviä menetelmiä.

Hankkeessa luodaan myös yhteinen tietoaalusta, johon kerätään yleensä hajallaan oleva huleveden laatuun liittyvä tutkimusaineisto. Perustettava portaali palvelee kaupunkisuunnittelua ja vesistönsuojelun tarpeita. Tietoaalustaan on mahdollista TKI-hankkeissa tuotetun ympäristömittausdatan lisäksi tuoda dataa viranomaisten tutkimuksista sekä opinnäytetöistä. Tietoaalustan luonnilla saadaan lisättyä tutkimuksissa tuotetulle datalle arvoa sekä lisättyä yhteistyötä eri toimijoiden välille.

WaterPlus-hankkeen toimenpiteet ovat seuraavat:

- Etelä-Savon vesistöjen nykytilaselvitys mikro- ja makromuovien ja haitta-asioiden osalta
- Kansalaishavaintojen kytkeminen osaksi vesistöjen tilan seurantaa
- Monitorointimenetelmien pilotointi demonstraatiokohteissa
- Menetelmien kehittäminen muovien torjuntaan
- Ympäristötiedon jakamiseen soveltuvan alustan kehittäminen vesistötutkimuksen tarpeisiin – Case Mikkeli
- Viestintä, tiedottaminen ja tulosten jalkauttaminen

## **WATERPLUS TUKEE ETELÄ-SAVON VESISTÖJEN SÄILYMISTÄ PUHTAANA**

WaterPlus-hankkeessa kehitettävillä ja testattavilla hulevesien epäpuhtauksien näytteenotto- ja analysointimenetelmillä saadaan entistä nopeammin ja enemmän tietoa hulevesien tilasta ja siinä tapahtuvista muutoksista. Lisäksi tuotetaan tietoa erilaisista menetelmistä, jotka soveltuvat mikromuovien torjuntaan vesistöistä. Kansalaishavainnot ja yhteinen tietoaalusta luovat edellytykset entistä laajemman aineiston keräämiselle sekä edesauttavat vesistöjen puhtaana pitämistä. Tuotettu tieto tukee Etelä-Savon vesistöjen puhtaana säilymistä ja ennaltaehkäisee mikromuoveista aiheutuvaa ympäristöriskiä. Lisäksi saadaan koostettua tietoa Etelä-Savon vesistöjen nykytilasta valittujen haitta-aineiden ja mikromuovien osalta.

WaterPlus-hankkeen kohdekunnat saavat konkreettista tietoa hulevesien laadusta sekä toimenpiteistä ja menetelmistä, joilla he voivat tulevaisuudessa ehkäistä muun muassa päällystettyjen taajama-alueiden aiheuttamaa hulevesikuormitusta. Tehtävien testauksien tulokset eri haitta-aineiden esiintyvyydestä monitoroinnista ja mahdollisista poistomenetelmistä ovat vapaasti kaikkien käytössä.

Testattavat uudet monitorointimenetelmät mahdollistavat entistä tarkemman ja reaaliaikaisemman vesien laadun seurannan. Yhteinen alusta tietojen jakamiseen sekä kansalaishavaintojen liittäminen osaksi vesistöjen tilan havainnointia antaa toimijoille lisättyökaluja vesistöjen puhtaana pitämiseksi. Kansalaishavaintoja voidaan käyttää apuna vesistöjen tilan havainnoissa ja siten kohdentaa tutkimusta ja toimenpiteitä tietyille alueille.

## LÄHTEET

Etelä-Savon ELY-keskus. Luonnos 2013. Etelä-Savon maaseudun kehittämissuunnitelma 2014–2020. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ely-keskus.fi/documents/10191/56198/Etel%C3%A4-Savon+maaseudun+kehitt%C3%A4missuunnitelma+2014-20/bcde09ff-7ff0-42cf-9895-6370f2b7b883>

Etelä-Savon ELY-keskus. 2019. Etelä-Savon pintavesien tila maan parhaimmista (Etelä-Savo). WWW-dokumentti. Julkaisupäivä: 12.9.2019 Saatavissa: <https://www.ely-keskus.fi/-/etela-savon-pintavesien-tila-maan-parhaimmista-etela-savo->

EU:n strategia muoveista kiertotaloudessa. Euroopan komissio 2018. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:52018DC0028&from=EN>

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2000/60/EY. 2000. Yhteisön vesipolitiikan puitteista. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=celex%3A32000L0060>

Fjäder, P. 2016. Merten roskaantuminen, muovit, mikromuovit ja haitalliset aineet. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 37. ISBN 978-952-11-4646-3 (pdf), ISSN 1796-1726 (verkkojulkaisu) Saatavilla: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/167421/SYKEra\\_37\\_2016.pdf?sequence=1](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/167421/SYKEra_37_2016.pdf?sequence=1)

Hartikainen, S. 2018. Mikromuovitutkimus Suomen vesistöissä – tutkimuksen toteutus ja sen haasteet (luentotiivistelmä) 7.2.2018.

KOKOEKO-seminaari, Savonia AMK. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://portal.savonia.fi/amk/sites/default/files/pdf/4\\_mikromuovit\\_tiivistelmä\\_samuel\\_hartikainen\\_uf\\_07022018.pdf](https://portal.savonia.fi/amk/sites/default/files/pdf/4_mikromuovit_tiivistelmä_samuel_hartikainen_uf_07022018.pdf)

Kotanan, J., Manninen, P., Muuri, L., Ranta, P., Sojakka, P. & Lindholm, P. (toim.). 2021. Vesien tila hyväksi yhdessä. Ehdotus Etelä-Savon vesienhoidon toimenpideohjelmaksi vuodelle 2022–2027. Etelä-Savon elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. WWW-dokumentti. Julkaistu 1.10.2013, päivitetty 21.1.2021. Saatavissa: [https://www.ymparisto.fi/fi-fi/vesi/vesiensuojelu/vesienhoidon\\_suunnittelu\\_ja\\_yhteistyö/vesienhoito\\_elykeskuksissa/EtelaSavo/Toimenpideohjelmat\\_ja\\_toimenpiteiden\\_toteutus](https://www.ymparisto.fi/fi-fi/vesi/vesiensuojelu/vesienhoidon_suunnittelu_ja_yhteistyö/vesienhoito_elykeskuksissa/EtelaSavo/Toimenpideohjelmat_ja_toimenpiteiden_toteutus)

Kotanan J. Etelä-Savon vesivarat ja veden laatu 1.10.2020. Visioita vesiviisauteen. Ruokakerjun tulevaisuustärskyt -webinaari 16.11. WWW-dokumentti. Julkaistu 2020. Saatavilla: [https://www.xamk.fi/wp-content/uploads/2018/12/juho\\_kotanan\\_visioita\\_vesiviisauteen\\_webinaari\\_16112020.pdf](https://www.xamk.fi/wp-content/uploads/2018/12/juho_kotanan_visioita_vesiviisauteen_webinaari_16112020.pdf)

Kuntaliitto. 2012. Hulevesiopas 2012. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.kuntaliitto.fi/julkaisut/2012/1481-hulevesiopas>.

Laki vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä 1299/2004. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2004/20041299>.

Lehtiniemi, M. 2020. Mikromuoveja löytyy kaikkialta vesistöissä, määrät vesieliöissä ja kaloissa vaihtelevat. Suomen ympäristökeskus ja Itä-Suomen yliopisto tiedottavat, tiedote 24.8.2020 klo 9.00. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus\\_ ja\\_tuotanto/Mikromuoveja\\_loytyy\\_kaikkialta\\_vesistois\(58322\)](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus_ ja_tuotanto/Mikromuoveja_loytyy_kaikkialta_vesistois(58322))

Lenz, R. & Labrenz, M. 2018. Small microplastic sampling in water: Development of an encapsulated filtration device. *Water* 10(8): 1055. www-dokumentti. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/8/1055>

Muovikartta Suomelle. Ympäristöministeriö 2021. Saatavilla: <https://muovitikartta.fi/>

Näkökulma ympäristöpolitiikkaan. Mikromuovit riski ympäristölle. 2017. Suomen ympäristökeskus. Saatavilla: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/177566/SYKE\\_PolicyBrief\\_mikromuovi\\_FI\\_web.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/177566/SYKE_PolicyBrief_mikromuovi_FI_web.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Prata, J.C., Da Costa, J. P., Duarte, A. C. & Rocha-Santos, T. 2019. Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 110. pages 150–159. www-dokumentti. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165993618305247>

Setälä, O., Norkko, J. & Lehtiniemi, M. 2016. Feeding type affects microplastic ingestion in a coastal invertebrate community. *Marine Research Centre, Finnish Environment Institute. Marine Pollution Bulletin*, vol. 102, issue 1/2016, pages 95-101. www-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X15302009?via%3Dihub>

Railio, S., Talvitie, J., Setälä, O., Koistinen A. & Lehtiniemi, M. 2018. Application of an enzyme digestion method reveals microlitter in *Mytilus trossulus* at a wastewater discharge area. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 130, pages 206-214. www-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X1830167X?via%3Dihub>

Zidbeck, E. 2018, Mikromuovit Suomen rannikkokaloissa. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, Bio- ja ympäristötieteellinen tiedekunta. www-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:hulib-201904301795>.

# HULEVESIEN LAADULLINEN HALLINTA JA HAITALLISTEN AINEIDEN MONITOROINTI

Tuija Ranta-Korhonen & Hanne Soininen & Aki Mykkänen  
& Marleena Tirkkonen

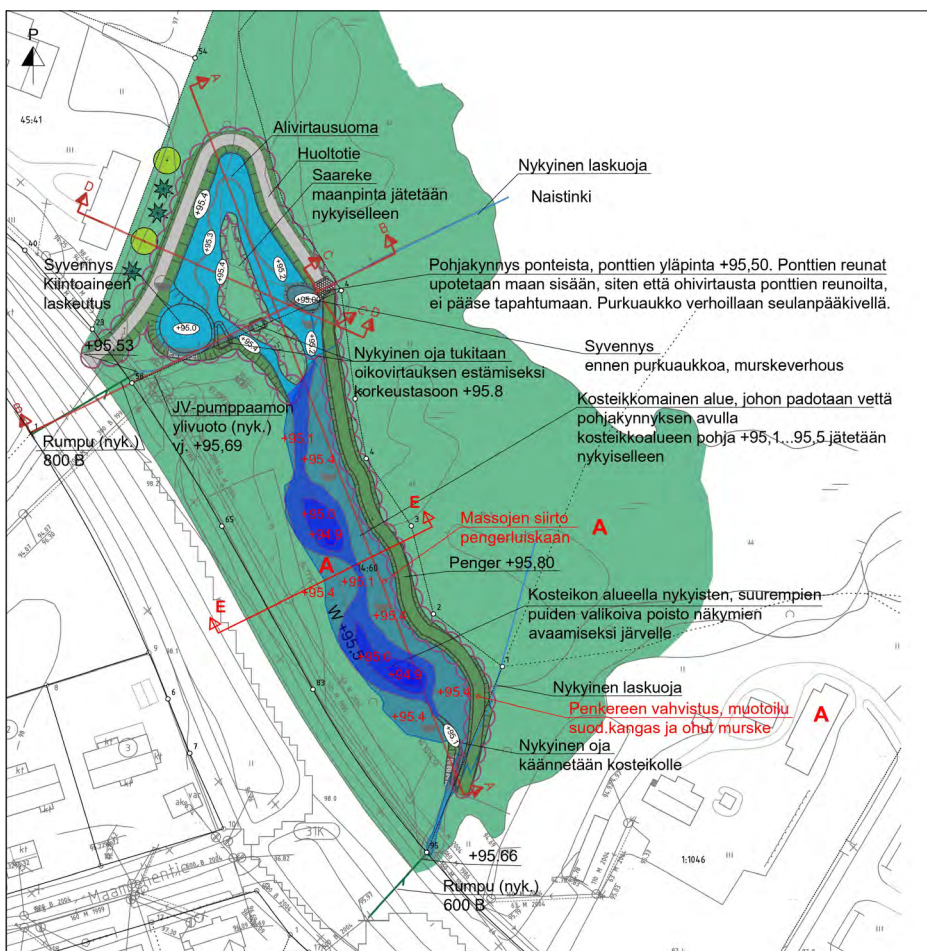
Rakennetussa kaupunkiympäristössä muodostuvat hulevedet aiheuttavat kuormitusta vastaanottavissa vesistöissä. Hulevesien aikaansaama kuormitus määryytyy hulevesien muodostumisalueen maankäytöstä ja esimerkiksi vettä läpäisemättömien alueiden pinta-alasta ja suhteesta kokonaispinta-alaan. Hulevedet voivat kuljettaa mukanaan erilaisia haitallisia aineita ja epäpuhtauksia, ja esimerkiksi tiealueilta hulevesien mukana vesistöihin voi kulkea öljy-yhdisteitä. Ilmastonmuutoksen myötä vesisateiden määrän on ennustettu lisääntyvän Suomessa, jolloin samalla myös hulevesien määrä kasvaa. Tämän myötä hulevesien hallintaan ja tarkkailuun on kiinnitettävä lisääntyvässä määrin huomiota. Hulevesien laadullinen hallinta ja haitallisten aineiden monitorointi – Hula -hanketta rahoittaa ympäristöministeriö 166 245 eurolla vesiensuojelun tehostamisohjelmasta. Hankkeen alustava aikataulu on 1.3.2021–31.10.2022.

## HANKKEEN PILOT-KOhteet

Hula-hankkeessa tarkastellaan Mikkelin kaupunkialueella olevaa kolmea hulevesien hallintaratkaisua, jotka ovat Kunta-Helmi-hankkeen toteuttama Naistinginlammen läheisyyteen perustettu hulevesikosteikko, Pitkäjärven valuma-alueella oleva hulevesien tutkimusympäristö sekä Valtatie 13 varteen rakennettu hulevesien käsittelyallas. Kaikissa näissä kohteissa vesien käsittely perustuu veden virtaamanopeuden hidastamiseen, suotautumiseen sekä erilaisiin kemiallisiin ja fysikaalisiin reaktioihin. Kaikkia kohteita monitoroidaan hankkeen aikana näytteenotoin ja kenttämittauksin sekä niiden virtaamamääriä myös tarkastellaan. Apuna käytetään myös jatkuvatoimisia online-mittareita, joilla saadaan kohteista reaaliaikaista vedenlaatutietoa. Monitoroinnilla seurattavia parametreja ovat muun muassa kiintoaine, ravinteet, TOC/DOC sekä vedessä olevat haitalliset aineet. Saatujen tulosten ja havaintojen perusteella kohteille voidaan myös tehdä parannusehdotuksia. Hankkeen aikana myös toteutetaan selvitys kaupunki taajaman hulevesien käsittelyyn soveltuvista teknologisista ratkaisuista. Esimerkkejä aiemmin toteutetuista ratkaisuista haetaan myös ulkomailta, etenkin muista Pohjoismaista.

## NAISTINGIN LAMMEN HULEVESIKOSTEIKKO

Naistinki on Mikkelin länsipuolella lentoaseman läheisyydessä sijaitseva kosteikkomainen matala lampi, jonka vedet tulevat pääosin omakotitaloalueelta. Lammesta vedet laskevat Mikkelin kaupunkialueen läpi kulkevaan 7-nimiseen jokeen, joten lammella on myös vaikutusta kaupungin talousveden valmistuksessa käytettävään raakaveden laatuun. Alueelle rakennettiin keväällä 2021 Kunta-Helmi-hankkeessa kosteikkomainen hulevesiallas, jolla vedenlaatua parannetaan (kuva 1). Ennen itse lampea sijaitsevassa hulevesialtaassa vedet suotautuvat kosteikon läpi veden pinnankorkeutta säätelevän pohjakynnyksen avulla. Altaalla halutaan erityisesti hillitä lampeen tulevaa ravinnekuormaa, jolla voidaan estää sen rehevöitymistä.



**KUVA 1.** Naistinkilammen hulevesialtaan suunnitelmapaketti (Mikkelin kaupunki, 2021).



## PITKÄJÄRVEN HULEVESIEN KÄSITTELYJÄRJESTELMÄ

Pitkäjärven hulevesien käsittelyjärjestelmä on maanalainen kaivopohjainen suodatinjärjestelmä, joka koostuu settipadoista, kasettipohjaisesta vesisäiliöstä, viidestä suodatinkaivoista sekä biosuodatusalueesta (kuva 2). Ennen itse järjestelmää vesi tulee avo-ojaa pitkin, johon on rakennettu kolme suotopatoa veden virtausnopeuden hidastamiseksi sekä kiintoaineen laskeuttamiseksi. Alueelle laskevat vedet tulevat Karilan valuma-alueelta, jolle sijoittuu pienteollisuutta, kaupallista toimintaa, Valtatie 5 sekä omakotitaloasutusta. Näistä erityisesti kaupallisen ja yritystoiminnan yhteydessä on merkittävän kokoisia päällystettyjä alueita sekä suuria kattopinta-aloja. Käsittelyjärjestelmää kehitettiin ja monitoroitiin aikaisemmin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Hulevesien käsittelyn T&K-ympäristö – Huky-hankkeessa.



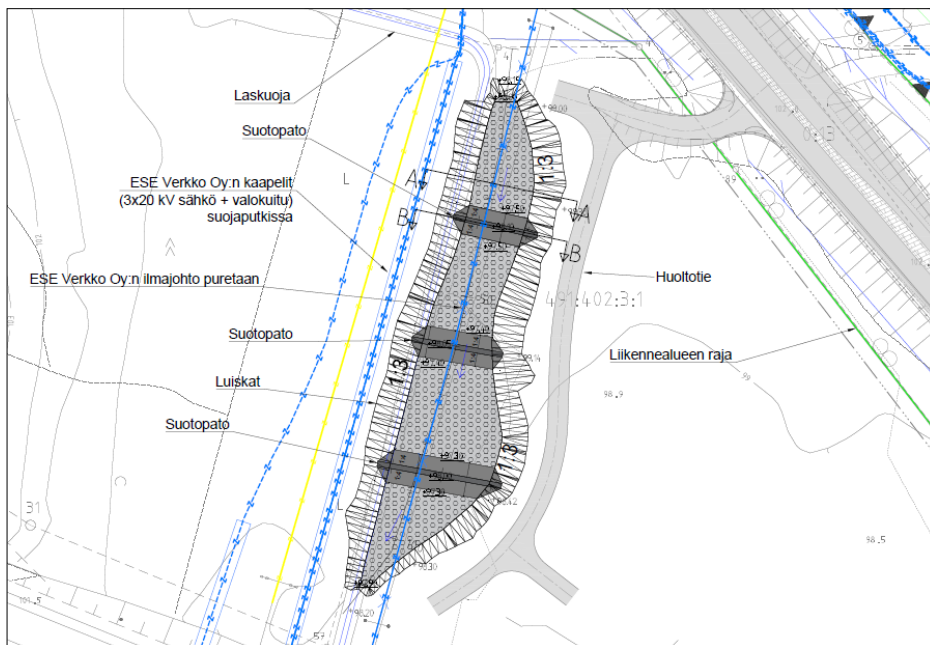
**KUVA 2.** Pitkäljärven hulevesien käsittelyjärjestelmä. Kuvassa näkyvät viisi rinnakaista kaivoa sisältävät itse suodatinmateriaalit (kuva Juha Vihavainen).

Vesi johdetaan järjestelmään settipatokaivon avulla, joka päästää suurien virtaamatapahtumien aikaan vettä myös yli suoraan sivuojaan järjestelmän ylikuormittumisen estämiseksi. Settipadolta vesi ohjataan tulokaivon avulla tasaisesti kasettirakenteiseen säiliöön, josta se jakaantuu viidelle suodatinkaivolle. Suodatinkaivojen virtaamamäärät ovat täysin säädettävissä ja suljettavissa esimerkiksi huoltotöitä varten. Suodatinkaivoissa vesi suodautuu itse suodatinmateriaalipatjojen läpi ja siitä kokoojakaivon läpi biosuodatusalueelle ja lopulta takaisin Pitkäljärvelle johtavalle ojalle. Suodatinkaivoihin voidaan sijoittaa erilaisia hulevesien käsittelyyn soveltuvia materiaaleja, kuten biohiiltä. Kaivoihin mahtuu noin 1,5 m<sup>3</sup> suoda-

tinmateriaalia. Kokoojakaivo mahdollistaa myös kaikkien viiden suodatinkaivon vesien tutkimisen samanaikaisesti. Järjestelmässä myös hyödynnetään jatkuvatoimista vedenlaadun online-monitorointia, jonka avulla kohteesta saadaan lisätietoa myös ajanhetkiltä, jolloin kenttätyöskentely on haastavaa.

## VALTATIE 13:N LÄHEISYYDESSÄ OLEVA HULEVESIALLAS

Valtatie 13:n viereen perustetulla hulevesialtaalla vähennetään teialueelta sekä rakennustyömailta tulevan hulevesikuorman vaikutusta. Erityisesti rakennustyömailta ja maastonmuotoilusta syntyy merkittäviä määriä hulevesikuormaa erityisesti kiintoaineen muodossa. Allas on jaettu kolmeen osaan murskepatojen avulla, joiden tarkoituksena on pysäyttää kiintoainesta sekä hidastaa hulevesien virtausnopeutta (kuva 3). Altaan toimintaa ja sen vaikutusta erityisesti huleveden kiintoainepitoisuuteen monitoroidaan Hula-hankkeen aikana.



**KUVA 3.** Valtatie 13:n läheisyyteen rakennettu hulevesien käsittelyallas.

## YHTEENVETO

Hankkeen varsinaisena kohderyhmänä ovat kunnat ja kunnissa hulevesiratkaisuista ja kaavoituksesta sekä kaupunkiympäristön tilasta vastaavat tahot. Lisäksi hankkeen kohderyhmänä ovat hulevesiratkaisuja suunnittelevat ja toteuttavat yritykset.

Hankkeessa tehtävän selvityksen avulla saadaan kattava käsitys erityyppisistä hulevesien käsittelyratkaisuista ja niiden soveltuvuudesta erilaisten taajamatoimintojen seurauksena syntyvien hulevesien käsittelyyn. Lisäksi saadaan yhteenveto erityyppisistä vedenlaadun ja virtaaman monitorointikeinoista.

Taajama-alueella erityyppisillä muodostumisalueilla syntyvien hulevesien laatua monitoroimalla saadaan kattavaa tietoa hulevesien laadun vaihteluista maankäyttömuodon mukaan. Eri muodostumisalueiden monitoroinnin avulla pystytään myös arvioimaan haitta-aineiden merkittävimpiä päästölähteitä. Selvitykset kaupunkitaajamien hulevesien laadusta sekä hulevesien aiheuttamista mahdollisista riskeistä vesistöjen ja pohjavesien laadulle tuovat tietoa hulevesien sisältämistä haitta-aineista, niiden ominaisuuksista ja kulkeutumisesta ympäristössä.

Hankkeessa tuotetaan uutta tietoa kustannustehokkaista hulevesien käsittelyn malliratkaisuista ja laadunseurantamenetelmistä, jotka ovat monistettavissa ja sovellettavissa laajamittaisesti. Demonstraatioympäristöjen monitoroinnin tulosten pohjalta laaditaan ohjeistus eri hulevesien käsittelyjärjestelmien käytettävyydestä ja soveltuvuudesta eri päästölähteille. Hankkeen tulokset kehittävät hulevesien laadullista hallintaa ja ovat alan toimijoiden ja kuntien käytettävissä valtakunnallisesti. Tuloksia voidaan hyödyntää tulevaisuuden hulevesiratkaisujen suunnittelu- ja rakennustyössä.

# KAATOPAIKKOJEN SUOTO- JA HULEVESIEN KÄSITTELYÄ KEHITTÄMÄSSÄ – DEVE & DEVO

Salla Pulliainen & Hanne Soininen & Aki Mykkänen & Panu Jouhkimo & Sari Hämäläinen & Antero Cederström

Deve – Demonstraatioympäristö kaatopaikan suoto- ja hulevesien ympäristökuormituksen vähentämiseksi- sekä Devo – Kaatopaikan suoto- ja hulevesien uudet käsittelymenetelmät -kokonaisuudessa kehitetään kaatopaikkojen suoto- ja hulevesien puhdistusmenetelmiä. Hankkeiden tavoitteena on kehittää monistettava ja siirrettävä ratkaisu kaatopaikoilla muodostuvien vesien käsittelyyn, kiinnittää uusia yrityksiä mukaan EcoSairilan kehittämisalustan toimintaan sekä vahvistaa alueen vesien käsittelyyn liittyvää innovaatiotoiminnan ekosysteemiä ja liiketoimintaa. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu toteuttaa Deve-hankkeen yhteishankkeena Mikkelin kaupungin kanssa ja Devo-hankkeen yhdessä Mikkelin kehitysyhtiö Miksei Oy:n kanssa. Hankkeiden toteutusaika on 1.7.2021–31.7.2023, ja hankkeita rahoittavat Etelä-Savon maakuntaliitto Euroopan aluekehitysrahastosta ja Metsäsairila Oy.

## KAATOPAIKKOJEN SUOTO- JA HULEVEDET VESISTÖJEN PISTEKUORMITUKSEN AIHEUTTAJINA

Yhdyskunta- ja teollisuusjätteiden loppusijoittaminen kaatopaikoille on ollut tyyppillinen jäteidenkäsittelymuoto Suomessa aina 2000-luvulle saakka, ja käytöstä poistettuja kaatopaikkoja on runsaasti myös eri puolilla Etelä-Savo. Ennen 2000-lukua kaatopaikkatoimintaa ohjeistava lainsäädäntö oli vielä hajanaista, minkä myötä kaatopaikkojen ympäristövaikutuksia ei tarkasteltu tai seurattu samassa laajuudessa kuin nykyään. Pieniä kaatopaikkoja on 2000-luvulla suljettu pintaeristyksin, joiden tarkoitus on ollut vähentää sadeveden pääsyä jätekerrokseen ja siten muun muassa haitta-aineiden ja ravinteiden kulkeutumista suotoveden mukana vesistöihin. Tästä huolimatta kaatopaikoilla edelleen muodostuu ympäristöä kuormittavia suotovesiä, jotka heikentävät osaltaan vesistöjen tilaa.

## UUDENLAINEN DEMONSTRAATIOYMPÄRISTÖ

Deve-hankkeen tavoitteena on perustaa uudenlainen demonstraatioympäristö jäteaseman suoto- ja hulevesien käsittelyyn. Uusi siirrettävä demonstraatioympäristö täydentää jo olemassa olevaa EcoSairilan kehittämisalustan vesienkäsittelyn TKI-ympäristöjen ko-

konaisuutta ja kasvattaa alueen tutkimus- ja yritysysteistyön mahdollisuuksia. Lisäksi Deve-hankkeessa päivitetään Ristiinan vanhan kaatopaikan biosuodatuslaitteistoa uudella raudan esipuhdistimella, jonka avulla biosuodatuslaitteiston typenpoistoprosessia saadaan tehostettua. Ristiinan suotovesijärjestelmä toimii suotovesien puhdistuksen pilottina sekä alueellisesti että kansallisesti.

Devo-hankkeen tavoitteena on kehittää luonnonmukaisia menetelmiä jäteasemien ja suljettujen kaatopaikkojen suoto- ja hulevesien käsittelyyn ja testata eri suodatinmateriaalien soveltuvuutta käsittelyä vaativille vesille. Hankkeessa kehitetään muun muassa raudan ja ammoniumtyypen poistamista suotovesistä. Suljetun kaatopaikan suotovesien metallipitoisuudet etenkin raudan osalta vaativat esikäsittelyn kehittämistä ja tutkimusta. Pyrkimyksenä on löytää kustannustehokas ja mahdollisimman huoltovapaa suotovesien käsittelyratkaisu sekä selvittää tarkemmin ratkaisun markkinapotentiaali ja skaalattavuus muiden suljettujen kaatopaikkojen suotovesien käsittelyyn.

#### **Kokonaisuus koostuu neljästä työpaketista:**

- 1) Deve – Demonstraatioympäristö kaatopaikan suoto- ja hulevesien ympäristökuorituksen vähentämiseksi (Xamk ja Mikkelin kaupunki)
- 2) Demonstraatiokokeet kaatopaikkojen suoto- ja hulevesien käsittelyssä (Xamk)
- 3) Siirrettävien suodatinratkaisujen & TKI-ympäristöjen kaupallistamismahdollisuudet (Miksei)
- 4) Viestintä ja raportointi (Xamk ja Miksei)

## **TULOSENA SKAALAUTUVIA RATKAISUJA**

Hankkeiden tuloksena saadaan energiatehokkaita, mahdollisimman huoltovapaita ja skaalautuvia ratkaisuja kaatopaikan suoto- ja hulevesien käsittelyyn (kuva 1). EcoSairilan alueelle sijoittuvaa demonstraatioympäristöä hyödynnetään yhteistyössä yritysten ja TKI-toimijoiden kanssa uusien kaupallistettavien tuotteiden kehittämiseksi. Hankkeen tuloksena kunnat ja alan toimijat saavat tietoa suoto- ja hulevesien käsittelyprosesseista ja niiden optimoinnista sekä biosuodatinmateriaaleista ja niiden käytöstä. Hankkeessa tuotetun tiedon ja pilot-ympäristöjen avulla voidaan vähentää pistemäisistä lähteistä peräisin olevaa vesistökuormitusta ja näin ollen saadaan parannettua muun muassa Saimaaseen laskevan veden laatua. Hankkeessa toteutettava demonstraatioympäristö vahvistaa Etelä-Savon alueen asemaa vesiosajana sekä uusien vedenkäsittelyratkaisujen edelläkävijänä.



**KUVA 1.** Deve- ja Devo-hankkeissa kehitetään kaatopaikkojen suoto- ja hulevesien käsittelymenetelmiä (kuva Manu Eloaho).



# SIEKKILÄNJOEN KARTOITUS KUNNOSTUSTOIMIA VARTEN

Erno Kokkonen & Tanja Kuronen & Nelly Loukiala & Joonas Pitkänen  
& Juho Rajala & Eetu Karhunen

Rokkalanjoen valuma-alueella sijaitseva 7-niminen joki laskee Saimaaseen Mikkelin satamassa. Siekkilänjoeksi kutsutaan sen osaa, joka alkaa Naistingilta ja laskee Pankalampeen. Vaelluskalojen vapaa kulku Saimaasta on toistaiseksi estynyt patorakenteista johtuen, mutta vireillä on vesitalouslupa noususteiden poistamiseksi. Noususteiden poistamisen jälkeen jokiympäristö toimii uhanalaisen järvitaimenen mahdollisena lisääntymisalueena ja poikasvaiheen elinympäristönä. Tätä varten joen virtavesipaikat tulisi kunnostaa taimeenlelle soveltuviksi. Tässä työssä kartoitetaan 7-nimisen joen Siekkilänjoen alueen nykytila mahdollisia kunnostustoimenpiteitä varten. Tarkoituksena on antaa varsinaiseen kunnostukseen tarvittavia pohjatietoja kunnostuksen suorittajilla ja osoittaa potentiaalisimmat kunnostuskohteet.

## JOKIUOMAN KARTOITUS

Siekkilänjoen maastokartoitus suoritettiin 20.4.2021, jolloin vesiolosuhteet olivat sulamisvesistä johtuen korkeat. Maastokartoituksella arvioitiin uoman kuntoa ja ympäristöä sekä tehtiin arvioita kohteiden soveltuvuudesta kunnostustöille. Lisäksi havainnoitiin kaikki merkittävät uomat, jotka laskivat Siekkilänjokeen. Siekkilänjoki jaettiin kuuteen eri osuuteen, joiden havaittiin olevan ympäristöltään ja kunnostusmahdollisuuksiltaan sekä muilta ominaisuuksiltaan toisistaan eroavia. Tunnistetut osuudet joen virtaussuunnan mukaisesti ovat: Karikko, lento- ja golfkenttä, Lehmuskylä, frisbeegolfkenttä, Siekkilä ja Siekkilän kosteikko. Jokaista jokiosuutta käsitellään omana kokonaisuutenaan.

## KARIKKO

Karikon jokiosuus alkaa Naistingista ja päättyy lentokentän itäpäähän. Joen alkupäässä on pohjapato. Kartalla uoman ympäristö on merkitty pelloksi, mutta joen eteläpuolinen alue havaittiin maastokartoituksen yhteydessä niityksi/kesannoksi, joka ei vaikuta olevan aktiivisessa viljelykäytössä. Joen pohjoispuolisesta peltoalueesta oli karkeasti arvioiden puolet viljelyskäytössä (itäpuoli), ja tämä osa oli kynnetty kartoituksen aikaan. Joen uoma on tällä alueella melko suora. Uoman ympärillä kasvaa pääosin lehtipuustoa, osin melko kookastakin, pääalajaina koivu ja leppä sekä jonkin verran pajua. Uomassa on myös jonkin



verran puuainesta. Pellolta ja Karikon teollisuusalueelta laskee muutamia pienehköjä ojia jokeen. Osassa ojista oli havaittavissa öljyläikkiä. Lisäksi lentokentän eteläpuolelta jokeen liittyy suurempi hulevesioja.

Osuuden loppupäässä junaradan alituksen yhteydessä sijaitsee ensimmäinen kunnostustarveselvityksessä tunnistettu koskialue (kuva 1). Uoman eteläpuolisille niityille pääsee tietä pitkin, ja tältä osin uoman saavutettavuus on melko hyvä. Koskialueen viereen pääsee tietä (Kaapelikatua) pitkin, jonka päässä on kääntöpaikka.



**KUVA 1.** Ensimmäinen koskialue junaradan alituksen jälkeen (Erno Kokkonen)

## LENTO- JA GOLFKENTÄ

Lento- ja golfkentän alue rajoittuu ensimmäiseen koskialueeseen ja Jyväskylätiehen. Alue vaikuttaa osin haastavalta. Noin 150 metriä koskialueen jälkeen joki alittaa lentokenttäalueen päädyn pitkän rumpuputken kautta ja virtaa taas maan pinnalla golfkentän alueella. Golfkentällä joki virtaa melko suorassa hiekkapohjaisessa uomassa, eikä uoman ympärillä ole merkittävää puustoa. Uoma on myös melko kapea tällä alueella. Golfkentän jälkeen joki virtaa lyhyen matkaa pienessä sekametsikössä ennen Jyväskylätien alitusta. Tällä kohtaa jokeen laskee toinen laskuoja lentokentältä ja Tuskun teollisuusalueelta. Joen saavutettavuus on hyvä golfkentän alueella, mutta siellä suurten kunnostustöiden tekeminen on tuskin mahdollista.

## LEHMUSKYLÄ

Lehmuskylän jokiosuus rajoittuu Jyväskylätien ja Savilahdenkadun väliin. Joki virtaa tällä osuudella Lehmuskylän asuinalueen länsireunalla kuusimetsikössä. Joen ja Jyväskylätien välissä on sähkölinjan alle raivattu alue, jolla kasvaa pajukkoa ja heinää. Joen uoma on tällä osuudella melko suora ja vaikuttaa kaivetulta, sillä joen reunoilla on pengerryksiä ja uoma on melko syvässä (kuva 2). Uoman levenee tällä alueella noin 3–4 metriin. Pohja on pääosin hienoa hiekkaa, ja uomassa on jonkin verran pientä puuainesta. Uoman saavutettavuus ei ole kovin hyvä pengerrysten ja paikoin melko tiheän kuusikon vuoksi. Toisaalta kuusikko lisää uoman peitteisyyttä. Merkittävä sivu-uoma Sannastinoja liittyy pääuomaan tämän alueen loppuosassa. Sannastinojan hulevesivaikutus Siekkilänjoen vedenlaatuun saattaa olla merkittävä.



**KUVA 2.** Yleiskuva uomasta Lehmuskylän alueella (Erno Kokkonen)

## FRISBEEGOLFKENTTÄ

Frisbeegolfkentän osuus virtaa nimensä mukaisesti suurimmaksi osin Mikkelin frisbeegolfpuiston alueella. Jokiosuus alkaa heti Savilahdenkadun alituksesta, josta alkaa toinen kunnostustarveselvityksessä tunnistetuista koskialueista. Tällä koskialueella on kaksi tien alitusta peräkkäin: Savilahden kadun sillan alitus sekä kevyenliikenteenväylän siltarumpu. Siltarummun alempi suu on melko korkealla uomaa nähden ja voi mahdollisesti muodostaa liikkumisesteenä toimivan kynnyksen matalamman virtaaman aikaan (kuva 3).





**KUVA 3.** Virtapaikka kevyenliikenteenväylän rummun suulla (Erno Kokkonen)

Koskialueen jälkeen uoma mutkittelee voimakkaasti, ja virtauksessa näyttäisi olevan silmämääräisesti tämän mukaan paljon vaihtelua korkean veden aikaan. Uoman pohjalla näyttäisi olevan tällä osuudella enemmän kiviä ja soraa kuin aiemmin. Uoman ympärillä on jonkin verran järeeäkin puustoa, mutta aluetta on myös raivattu frisbeegolfkentän tarpeisiin. Frisbeegolfkentästä johtuen alueella liikkuu myös melko paljon ihmisiä. Tien läheisyyden ja ulkoilualan vuoksi tämän osuuden saavutettavuus on hyvä.

## SIEKKILÄ

Siekkilän osuus rajoittuu frisbeegolfkentän mutkittelevan ja virtaamaltaan voimakkaamman osuuden ja Siekkilän itäpuolella olevan kosteikon väliin. Joki virtaa tällä osuudella melko suorana. Osuuden alkupäässä havaintohetkellä virtaus vaikuttaisi olevan melko voimakas ja uoma jokseenkin syvä. Siekkilän asuinalueen pohjoisosaa kiertävällä osalla virtaus näyttäisi hidastuvan. Uoman pohja vaikuttaisi olevan hiekkaa ja mutaa. Uoman ympärillä kasvaa kuusivaltaista sekametsää. Osuuden alkupuolella uoman länsipuolella on jälleen sähkölinjan raivattu alue, jossa kasvaa heinää ja pajukkoa. Paikoin aivan uoman vieressä kulkee myös pururadan pohja, joten uoman saavutettavuus on melko hyvä etenkin sen alkupuoliskolla. Jälkimmäisellä osalla uoma rajoittuu eteläpuolella tontteihin ja pohjoispuolella tiheään kuusikkoon, jossa on osin soistunut pohja. Jokeen liittyy Laihalammesta kaksi pienempää

sivu-uomaa, joiden virtaama havainnointiaikaan oli hyvin pieni. Alueen loppuosuuteen laskee myös metsäojia Kalevankankaan alueelta. Näissä uomissa havaittiin merkittävää virtaamaa, ja niillä saattaa olla vaikutusta vedenlaatuun.

## SIEKKILÄN KOSTEIKKO

Siekkilän kosteikko on joen viimeinen erottuva osuus, joka käsittää Siekkilän itäpuolisen uoman Pankalammelle saakka. Tällä osuudella joki jatkaa virtausta melko suorassa uomassa, mutta havaintohetkellä tulvii ympäristöön 50–200 metrin levyiselle kaistalle (kuva 4) Savilahdenkadun alitukseen saakka. Kosteikkoalueella kasvaa pääasiassa koivua, leppää ja pajua, ja sinne on muodostunut myös merkittävä määrä lahoppua. Uoman pohja näyttäisi olevan tällä osuudella pääasiassa hiekkaa ja mutaa, ja uoman matalimmilla reunoilla on myös paikoin runsaasti vesikasvillisuutta. Kosteikosta johtuen tämä alue tuskin soveltuu kunnostettavaksi kosteikon haastavien olosuhteiden vuoksi. Toisaalta myös kosteikon muita luontoarvoja voisi tarkastella. Esimerkiksi seisovan veden alueet ja lahoppu voivat muodostaa omia arvokkaita biotooppejaan. Savilahdentien alituksen jälkeen joki laskee Pankalampeen kahden haaran kautta, joista itäinen on lyhempi, suurempi ja leveämpi kapeamman ja pidemmän itäisen haaran tehdessä hieman pidemmän kierroksen. Molemmissa haaroissa kasvaa pajukkoa.



**KUVA 4.** Yleiskuva uomasta Siekkilän kosteikon osuudella (Erno Kokkonen)

## YHTEENVETO KUNNOSTUSMAHDOLLISUUKSISTA

Lentokentän ja frisbeegolfkentän yläpuoliset koskialueet osoittautuivat lupaaviksi kunnostuskohteiksi. Valmiina virtavesikohteina nämä olisivat todennäköisesti helpoimmin kunnostettavia lähinnä soraistuksin ja kiveämisisillä. Lisäksi frisbeegolfkentän mutkittleva ja näin virtaukseltaan monimuotoisempi alue heti koskialueen alla olisi todennäköisesti kunnostettavissa vastaavilla toimilla.

Yleisesti joen uoma oli suurelta osin melko suora ja perattu. Uoman virtaaman monipuolisuutta voisi lisätä muuttamalla uoman rakennetta mutkittlevammaksi. Tämä voisi tilan suhteen olla mahdollista Karikon ja Lehmuskylän alueilla sekä osin Siekkilässä. Näin suurimuotoiset kunnostustoimenpiteet vaativat kuitenkin selvitykset maanomistussuhteista sekä lupien hakemisen maanomistajilta ja ympäristöviranomaiselta. Kevyempinä kunnostustoimina voidaan käyttää puuaineksen lisäystä uomaan sekä sorakoiden tekoa ja kiveämisiä. Jokeen voidaan tehdä kuoppia, lisätä erikokoisia kiviä ja kutusorakoita. Kivet antavat suojaa kaloille ja muille eliöille, ja kivet parantavat puuaineksen pidätyskykyä. Kivillä voi lisätä virtausnopeuden vaihtelua, mikä taas tuo jokeen monipuolisuutta koskien ja suvantojen muodossa. Puuaines lahoaa ja on samalla hyvä kasvualusta pohjasammalille. Lisäksi se vaikuttaa pohjaeläinmääriin.

Siekkilänjoen veden laatua voisi turvata jokirannan suojavyöhykkeillä, jotka osaltaan estävät myös rantaeroosiota. Vyöhykkeitä voisi rakentaa kaltevien, sortumaherkkien, herkästi tulvivien ja peltojen läpi virtaaville alueille. Niillä voidaan myös ehkäistä uoman liettymistä ja kunnossapitotarvetta. (Suojakaistat ja -vyöhykkeet 2014) Joen eroosiolta suojaamista voidaan tehdä myös pajumatoilla sekä kivettämällä tai soraamalla reunat. Myös eri kasveja voidaan istuttaa reunoille, jolloin ne estävät eroosiota juurtuessaan, ja samalla kasvit sitovat itseensä ravinteita juuriensa avulla.

## LÄHTEET

Suojakaistat ja -vyöhykkeet. 2014. Ympäristöhallinto. WWW-dokumentti. Päivitetty 7.1.2020. Saatavissa: [https://www.ymparisto.fi/fi-fi/vesi/vesien\\_kaytto/maankuivatus\\_ja\\_ojitus/luonnonmukainen\\_peruskuivatus/Suojakaistat\\_ja\\_vyohykkeet](https://www.ymparisto.fi/fi-fi/vesi/vesien_kaytto/maankuivatus_ja_ojitus/luonnonmukainen_peruskuivatus/Suojakaistat_ja_vyohykkeet)

# JATKUVATOIMINEN SAMEUS- MITTAUS SEKÄ KIINTOAIN- JA FOSFORIPITOISUUDET MIKKELIN HANHIJOELLA

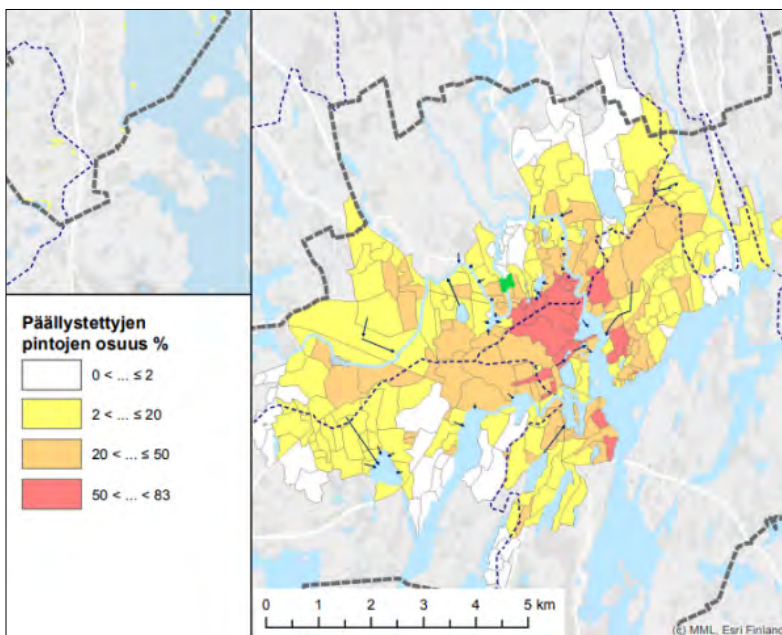
Tuija Ranta-Korhonen

Artikkeli pohjautuu Safe Environment and Cleaner Waterways to Blue Baltic Sea -LUGABALT2 -hankkeessa Mikkelin Hanhijoella toteutetun veden laadun monitoroinnin tuloksiin. LUGABALT2-hanketta rahoittaa Kaakkois-Suomi–Venäjä CBC 2014–2020 -ohjelma, ja sen kesto on 1.2.2019–31.12.2021. Hankkeen monitorointiin osallistuivat projektipäällikkö Tuija Ranta-Korhonen ja tutkimusinsinööri Marina Markova. Monitorointia tehtiin sekä jatkuvatoimisen vesistösondin että näytteenoton avulla. Monitorointijaksoja oli kaksi. Jaksoista ensimmäinen ajoittui syksyyn 2020 (26.8.–9.11.2020), ja toinen toteutettiin keväällä 2021 (16.4.–1.7.2021). Artikkelissa tarkastellaan sateen ja valumien vaikutusta online-sondin mittaaman sameuden arvoon sekä sateen ja sameusarvojen nousun välistä viivettä. Lisäksi tarkastellaan jatkuvatoimisella vesistösondilla mitattujen sameusarvojen sekä vesinäytteistä analysoidujen kiintoaine- ja fosforipitoisuuksien keskinäistä riippuvuussuhdetta. Tarkastelussa hyödynnetään Suomen ympäristökeskuksen kehittämän vesistömalli VEMALAn simuloituja arvoja virtaamien osalta. Lisäksi hyödynnettiin Ilmatieteen laitoksen avointa dataa ilman lämpötilan, sademäärien ja sateen intensiteetin osalta.

## MIKKELIN HANHIJOKI

Hanhijoki on osa Vuoksen vesistöalueeseen kuuluvaa Seitsen-nimistä jokea. Seitsen-niminen joki saa alkunsa Mikkelin Otavassa sijaitsevasta Iso-Kirveslammesta ja laskee Saimaan Savilahteen Mikkelin keskusta-alueen läheisyydessä. Hanhijoen valuma-alue on pinta-alaltaan noin 63 km<sup>2</sup> (VALUE). Corine 2012 -laskenta-aineiston mukaan alueen pinta-alasta asuinalueet kattavat noin viisi prosenttia, teollisuuden, palvelun ja liikenteen alueita on 6,1 prosenttia, virkistysalueita 2,5 prosenttia, viljelysmaita 4,5 prosenttia ja erilaisia metsämaita hieman yli 79 prosenttia alueesta. (VALUE). Koska joki virtaa kaupunkialueen läpi, on osa sen valuma-alueesta rakennettua aluetta. Kuvassa 1 on nähtävillä päällystettyjen pintojen osuus Mikkelin kaupunkialueella.





**KUVA 1.** Päälystettyjen pintojen osuus Mikkelin kaupunkialueella (Sito 2016)

Hanhijoki ja tässä artikkelissa käytetty mittauspiste on merkitty karttaan vihreänä pisteenä. Kartta on vuodelta 2016, jonka jälkeen päälystettyjen pintojen osuus Hanhijoen valuma-alueella on kasvanut erilaisten rakennusprojektien myötä.

Valuma-alueen maankäyttö ja kasvillisuus vaikuttavat veden kiertokulkuun. Mikäli valuma-alue on luonnontilassa, päätyy sateesta noin kymmenen prosenttia vesistöön pintavaluntana, noin 40 prosenttia imeytyy maahan ja noin puolet haihtuu (Haakana 2018). Nämä prosentuaaliset osuudet luonnollisesti vaihtelevat vuodenajan ja säätilan mukaan. Kaupunkialueella veden luonnollinen kiertokulku häiriintyy, ja päälystetyillä pinnoilla syntyvä hulevesi lisää vesistöihin päätyvää valuntaa, etenkin jos hulevesien käsittely on järjestetty puutteellisesti. Hulevesien sisältämät haitta-aineet, kuten ravinteet, roskat ja muut epäpuhtaudet, heikentävät purkuvesistöjen ja pohjavesien tilaa (Ympäristö 2020). Hanhijokeen johdetaan hulevesiä ainakin Tuskun ja Lehmuskylän kaupunginosista (Kosonen ym. 2021). Myös Rantakylästä tulevia hulevesiä päätyy jokeen.

## JATKUVATOIMISET MITTAUKSET JA NÄYTTEENOTTO

Jatkuvatoimisissa mittauksissa käytettiin YSI 6920V2 -vesistösondia, joka oli varustettu lämpötila-, johtokyky-, happi-, pH- sekä sameusantureilla. Mittalaite ilmoittaa sameuden yksiköllä FNU (Formazine Nephelometric Unit). Sameuden avulla määritetään veden kirkkautta. Käytössä oleva sameusanturi on optinen, eli veden sameuden mittausta perustuu

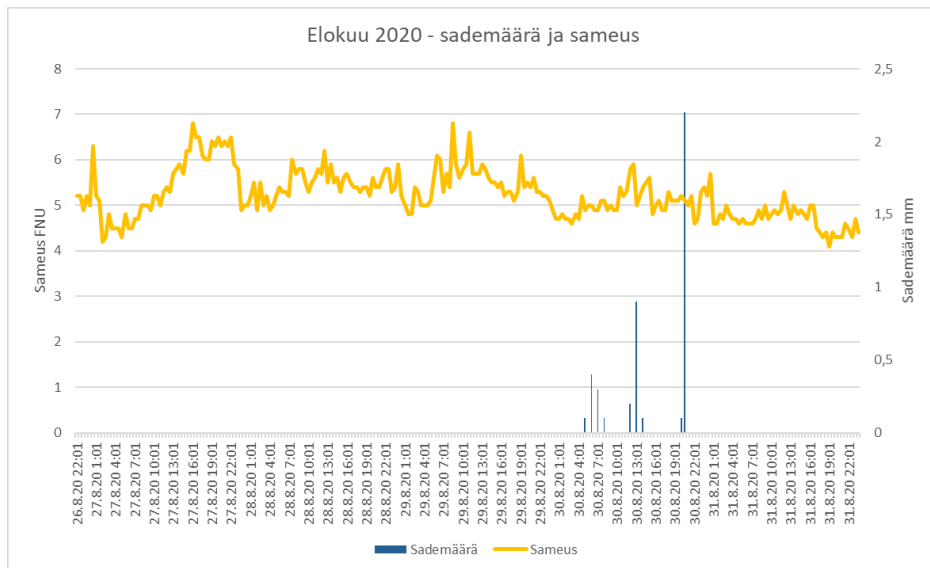


valon kulkemaan matkaan ja valon siroamiseen mitattavassa nesteessä. Mitä enemmän vedessä on esimerkiksi maa-aineshiukkasia tai kiinteää materiaa, kuten levää, siitepölyä tai planktonia, sitä lyhyemmän matkan valo pystyy vedessä kulkemaan. (YSI 2019) Sameutta voi siis aiheuttaa vedessä oleva kiintoaine. Kiintoaine puolestaan voi sisältää ravinteita, kuten fosforia. Jatkuvatoimisia sameusmittauksia onkin tutkittu yhtenä keinona ennustaa vesistöjen fosforikuormitusta kustannustehokkaasti (Lannergård et al. 2019, Irvine et. al 2019).

Jatkuvatoimisten mittausten lisäksi mittauspisteestä otettiin vesinäytteitä kahden eri monitorointijakson aikana yhteensä 12 kertaa. Näytteitä otettiin noin kahden viikon välein. Samassa yhteydessä sondi puhdistettiin ja sen toiminta tarkastettiin. Näytteenottoa ei ajoitettu säätilan tai sateen mukaan. Näytteistä analysoitiin muun muassa kokonaisfosfori standardin SFS 3026 mukaisesti sekä kiintoaine standardin SFS-EN 872 mukaisesti. Näitä tuloksia verrattiin YSI-sondin sameusmittaustuloksiin ja etsittiin korrelaatiota sameuden kohoamisen ja kiintoainepitoisuuden tai toisaalta fosforipitoisuuden välillä.

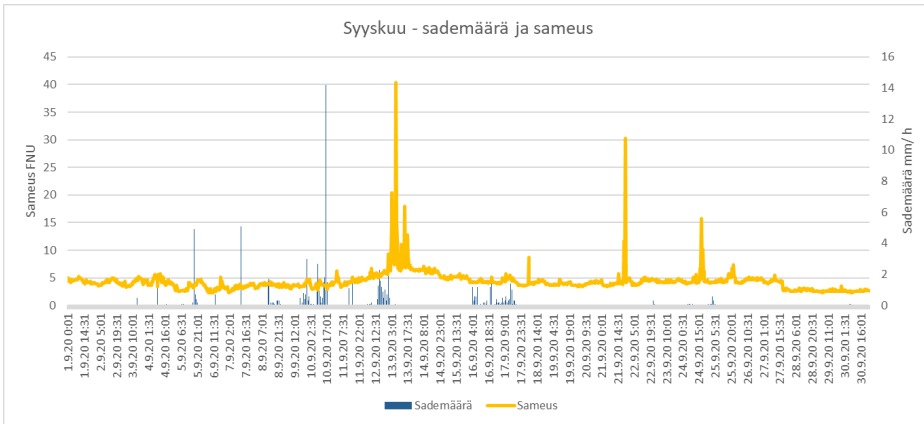
## SATEEN VAIKUTUS JOKIVEDEN SAMEUTEEN SYKSYLLÄ 2020

Sadannan ja Hanhijoen veden sameuden välistä yhteyttä tarkasteltiin monitorointijaksoilla kuukausitasolla. Ensimmäisen monitorointijakson alku syksyllä 2020 (26.8.–9.11.2020) oli hyvin vähäsateinen. Elokuun sademäärä Mikkelin lentokentän mittausasemalla oli 24,3 mm ja havaintojaksolla 26.–31.8. ainoastaan 2,5 mm. Elokuussa 2020 veden sameus vaihteli 4,01–6,8 FNU, ja sameuden keskimääräinen arvo oli 5,23 FNU. Vähäisillä sateilla ei ollut vaikutusta sameusarvoon, kuten voidaan havaita kuvasta 2. VEMALAn simuloitu virtaama elokuun lopussa oli alle 0,02 m<sup>3</sup>/s.



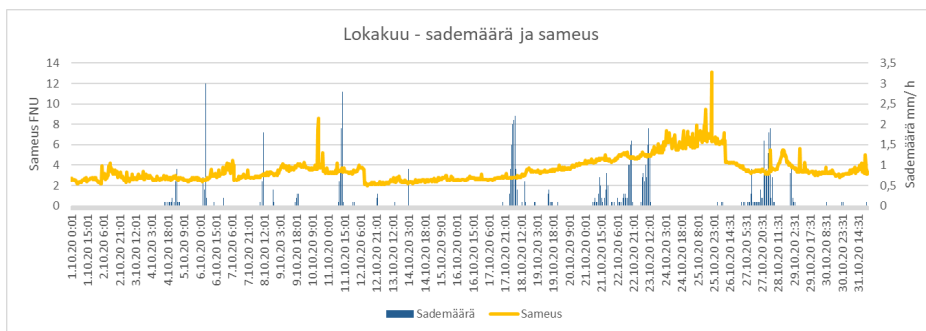
**KUVA 2.** Elokuun 2020 monitorointijakson tiedot

Syyskuun 2020 sademäärä oli Ilmatieteen laitoksen tilastojen mukaan 85,1 mm. Erityisen paljon vettä satoi 10.9.2020, jolloin tunnin sademäärä oli 14,2 mm ja sateen intensiteetti kahden peräkkäisen tunnin aikana 9,8 ja 7,9 mm/h. Kyseinen sadetapahtuma näkyy selvästi myös mitatun sameusarvon nousuna kuvassa 3. Ajallinen viive sateen ja sameusarvon nousun välillä on noin kymmenen tuntia. Syyskuussa sameuden keskimääräinen arvo oli 4,29 FNU ja maksimiarvo 40,40 FNU ja minimiarvo 2,30 FNU. Sameusarvo alkaa laskea syyskuun loppupuolella.



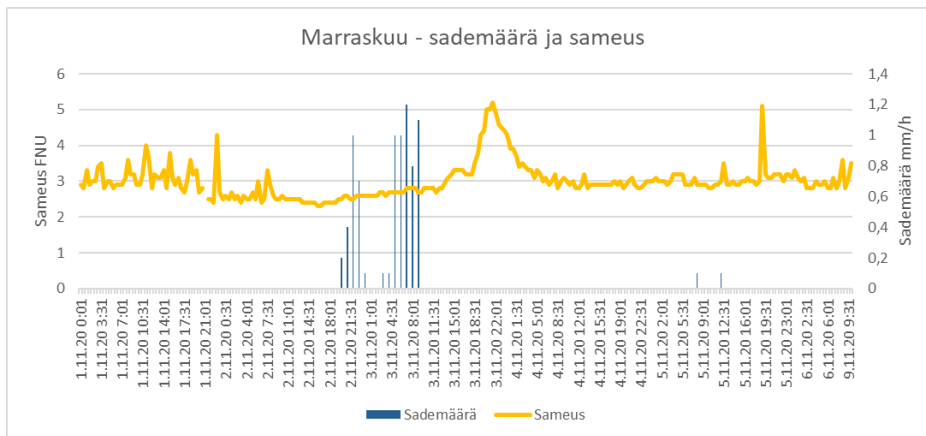
**KUVA 3.** Syyskuun 2020 monitorointitulokset

Lokakuun 2020 sademääriä ja sameusarvoja tarkastellessa voidaan huomata, ettei sateen ja sameuden välinen suhde ole yksiselitteinen (kuva 4). Lokakuun alkupuolella ei sateen ja sameuden välillä näytä olevan juurikaan riippuvuussuhdetta. Sameusarvo vaihtelee 2–4 FNU, ja ainoastaan 10.10.2020 kuvaajassa näkyy yksittäinen piikki, ja sameusarvo nousee hetkellisesti yli 8 FNU:n. Jos tarkastellaan syyskuun kuvaajaa (kuva 3) ja lokakuun kuvaajan alkua, voidaan havaita, että sademäärät ovat vähäisiä. Tämä tarkoittaa sitä, että maaperä on todennäköisesti ollut kuivaa ja suuri osa sateesta on imeytynyt maahan. Lokakuun lopussa sademäärät olivat suurempia ja sateet pitkäkestoisempia. Kuvaajasta voidaan havaita, että 17.10.2020 sademäärä näyttäisi vaikuttavan sameuden keskimääräisen arvon nousuun. Lokakuun loppupuoliskon kuvaajaa tarkasteltaessa sateella vaikuttaa olevan vaikutusta sameusarvoon. Lokakuun lopussa kasvillisuus on jo lakastunut, eli pintavalumana vesistöön päätyvän sadeveden osuus kasvaa. Myös haihtuvuus on loppusyksystä pienempää kuin kesäaikaan.



**KUVA 4.** Lokakuun sademäärä ja sameusarvon muutos

Monitorointijakso päättyi 9.11.2020. Marraskuun alkupuolen monitorointitulokset sademäärän ja sameusarvon muuttumisen suhteen on esitetty kuvassa 5. Marraskuussa vähäiselläkin sademäärällä näyttäisi olevan vaikutusta sameusarvon kasvuun. Marraskuun alkupuoli 2020 oli suhteellisen lämmin, havaintojakson aikana korkein lämpötila oli Ilmatieteen laitoksen säätilastojen mukaan +11,2 °C ja ilman suhteellinen kosteus 3.11.2020 sameusarvon noustessa oli 96–98 prosenttia. Sadeveden haihtumista ei siis juurikaan tapahdu, eikä myöhään syksyllä ole myöskään kasvillisuutta käyttämässä ja pidättämässä sadevettä.

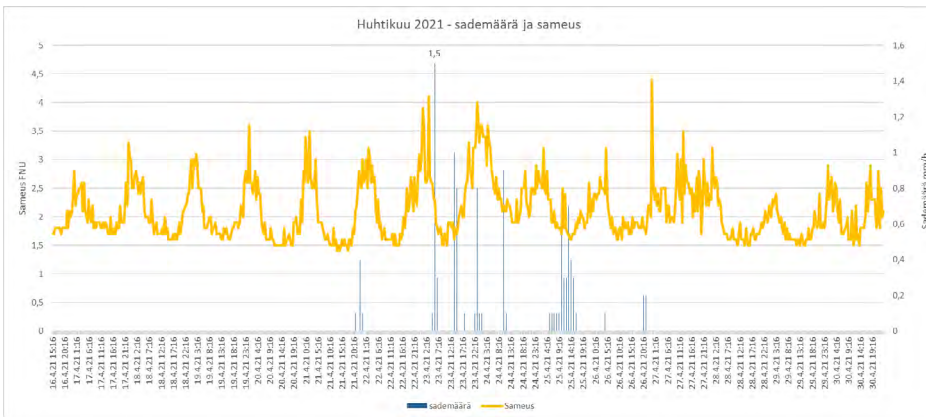


**KUVA 5.** Sateen ja sameusarvon välinen suhde marraskuussa 2020

## SATEEN VAIKUTUS JOKIVEDEN SAMEUTEEN KEVÄLLÄ JA ALKUKESÄSTÄ 2021

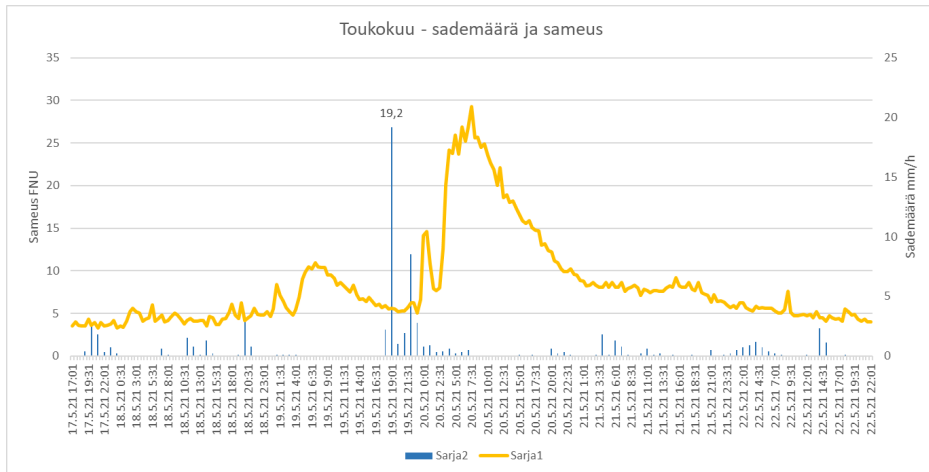
Hanhijoen veden laadun monitorointia jatkuvatoimisen YSI 6920-V2 -sondin avulla jatkettiin keväällä 2021. Sondi vietiin joelle 16.4.2021 ja asennettiin samaan pisteeseen kuin aiemmin. Monitorointia jatkettiin heinäkuun alkuun. Kuten myös aiemman monitorointijakson aikana, jokivedestä otettiin vesinäytteitä, joista määritettiin muun muassa kokonaisfosfori- ja kiintoainepitoisuudet noin kahden viikon välein. Samalla sondi puhdistettiin ja sen käyttökunto tarkastettiin.

Huhtikuussa 2021 sademäärät olivat hyvin pieniä, eikä sateella näyttäisi olevan vaikutusta sameusarvoihin. Päivälämpötilat olivat nollan yläpuolella, mutta öisin lämpötila laski vielä pakkaselle. Maastossa oli runsaslumisen talven jäljiltä runsaasti sulamisvesiä. Lämpötilan aiheuttama valunnan vaihtelu näkyy selvästi sameuden vuorokautisen arvon vaihteluna kuvassa 6. Kuvaajan avulla voidaan päätellä, että valunta ja samalla sameuden arvon muutos seuraa lämpötilan muutosta viiveellä, sillä sameusarvot ovat monesti korkeimmillaan illalla tai aamuyöstä. VEMALA-aineiston mukaan Hanhijoen virtaama oli huhtikuussa 2021 keskimäärin 2,11 m<sup>3</sup>/s.



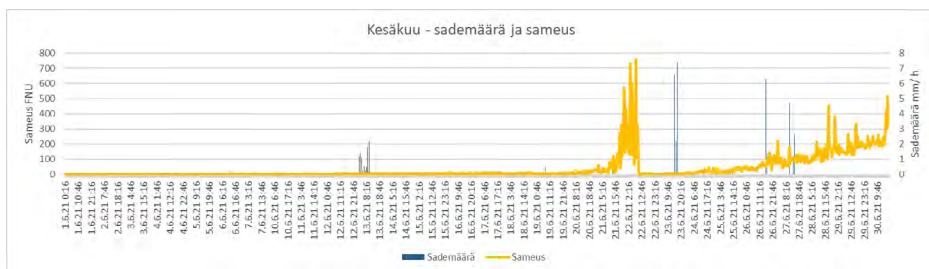
**KUVA 6.** Sademäärät ja sameus huhtikuussa 2021

Huhtikuun loppu sekä toukokuun alku olivat hyvin vähäsateisia, kuten kuvaajista voidaan havaita. Tarkasteltaessa kuvaajan avulla (kuva 7) sademääriä 7.5., 15.5. ja 19.5. ja sademäärien vaikutusta veden sameusarvoon, voidaan havaita, että sateen ja sameusarvon kohoamisen välillä on selvä riippuvuusuhde. Tämä näkyy erittäin selvästi etenkin 19.5. sateen jälkeen. Kyseisenä päivänä sade oli rankkaa, sillä Ilmatieteen laitoksen tilastojen mukaan tunnin sademäärä oli 19,2 mm ja sateen intensiteetti 20,1 mm/h. YSI-sondin mittaustulosten perusteella sameusarvon nousu alkoi noin kuusi tuntia sateen alkamisen jälkeen ja korkein sameuspiikki saavutettiin noin 12 tunnin kuluttua rankimman sateen päättymisestä.



**KUVA 7.** Toukokuun 2021 sademäärät ja sameusarvon muutokset

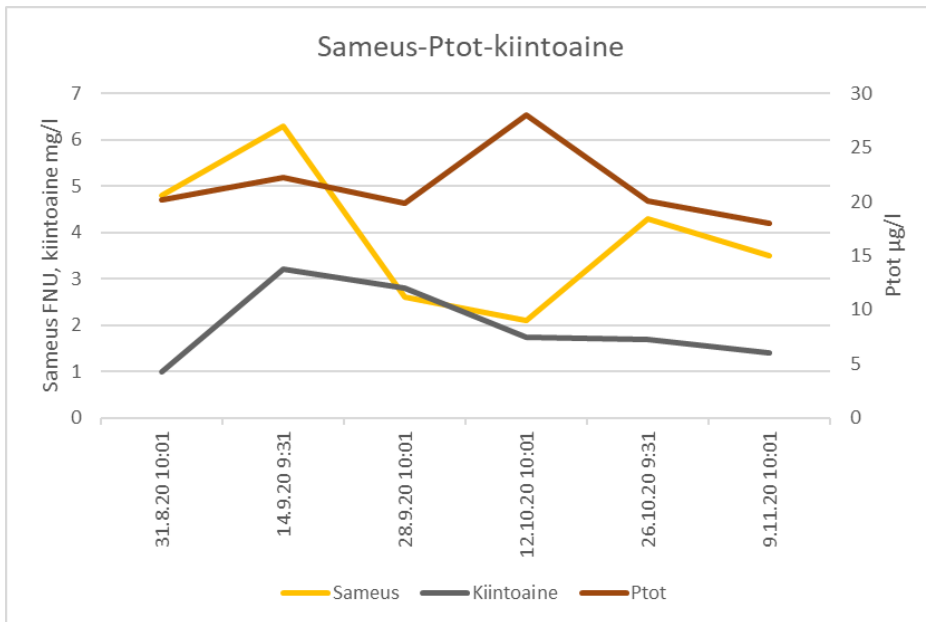
Tarkasteltaessa kesäkuun 2021 kuvaajaa (kuva 8) voidaan havaita, että YSI-sondi on mitannut selvästi tavallisuudesta poikkeavia sameusarvoja 21.–22.6.2021. Korkein sameusarvo kyseisellä aikavälillä on ollut 571 FTU. Tätä ei voida pitää luotettavana tuloksena, vaan kyseessä on todennäköisesti joessa ajelehtinut roska, vesikasvi tms., joka on jäänyt kiinni sondiin ja aiheuttanut virheelliset mittausarvot. Sondin puhdistamisen jälkeen 22.6. sameusarvo on jälleen palannut normaaliksi. Kesäkuun mittausjakson loppupuolella voidaan havaita sameusarvossa ilmeisesti anturin likaantumisen aiheuttanutta ryömintää, eivätkä mittausjakson loppuosan arvot ole käyttökelpoisia tarkastelun kannalta.



**KUVA 8.** Kesäkuun 2021 sademäärä ja sameusarvo

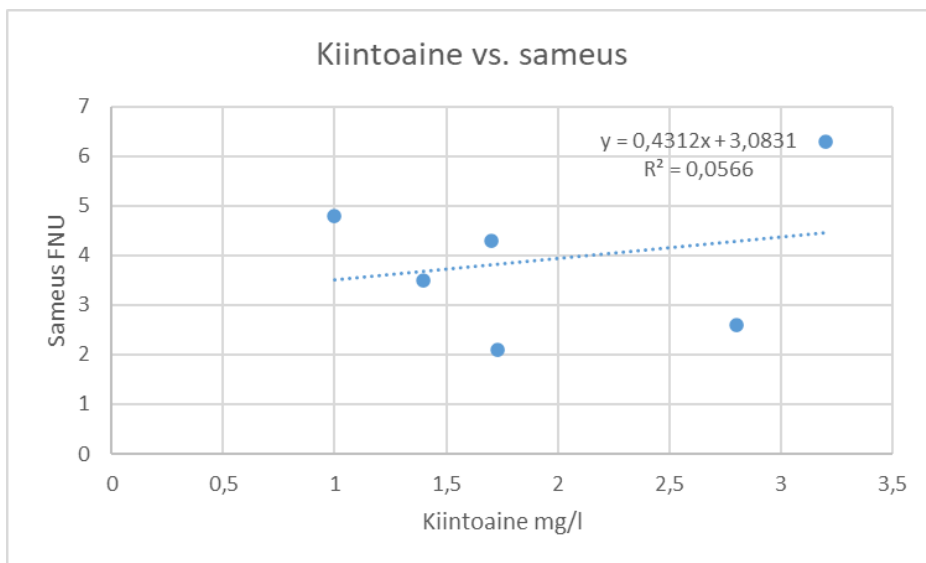
## SAMEUS, KOKONAISFOSFORI- JA KIINTOAINEPITOISUUS

Kuten aiemmin on todettu, tehtiin Hanhijoella jatkuvatomisen monitoroinnin ohella myös näytteenottoon perustuvaa monitorointia. Vesinäytteitä otettiin mittauspisteestä noin kahden viikon välein ja niistä määritettiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun ympäristölaboratoriossa muun muassa kiintoaine- ja kokonaisfosforipitoisuudet. Näytteenottoa ei ajoitettu sateiden mukaan. YSI-sondin mittaamaa sameusarvoa näytteenottohetkellä verrattiin laboratoriomääritysten tuloksiin ja niiden välistä korrelaatiota tarkasteltiin Excel-kuvaajien avulla. Syksyn 2020 monitorointijakson kuvaaja on esitetty kuvassa 9.



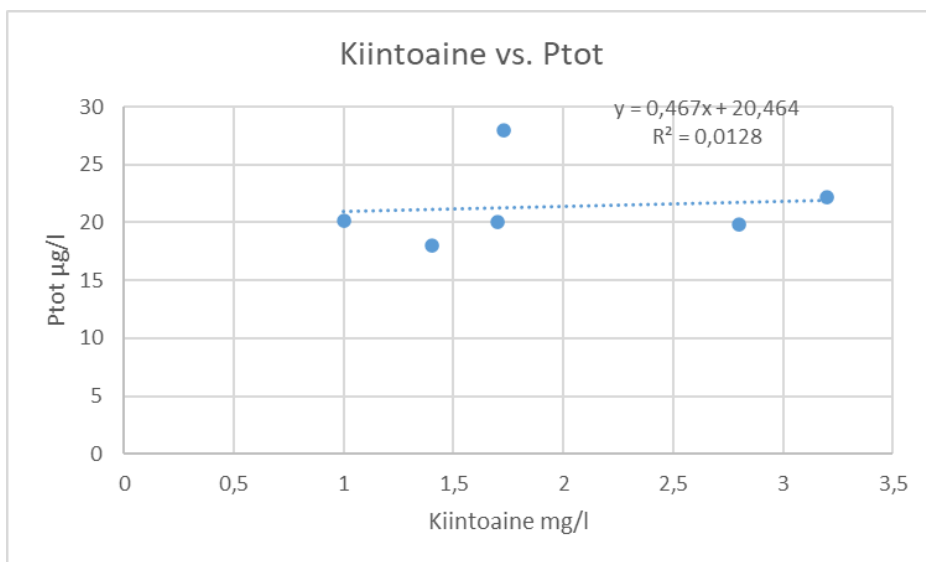
**KUVA 9.** Kiintoaine-, kokonaisfosfori- ja sameusarvot syksyllä 2020

Kuvaajasta voidaan havaita, että ainoastaan 14.9. näytteenoton kiintoaine- ja kokonaisfosforitulosten ja YSI-sondin sameusarvon välillä näyttäisi olevan jonkinlaista keskinäistä suhdetta. Kuitenkin jos tarkastellaan kiintoainepitoisuuden suhdetta sameuteen (kuva 10) tai toisaalta kokonaisfosforipitoisuuteen (kuva 11), voidaan havaita, ettei korrelaatiota käytännössä ole tai ainakin se on hyvin pieni. Kiintoaineen ja sameuden välinen korrelaatiokerroin on 0,24 ja kiintoainepitoisuuden ja kokonaisfosforin puolestaan 0,11.



**KUVA 10.** Kiintoainepitoisuuden ja sameuden välinen korrelaatio syksyllä 2020

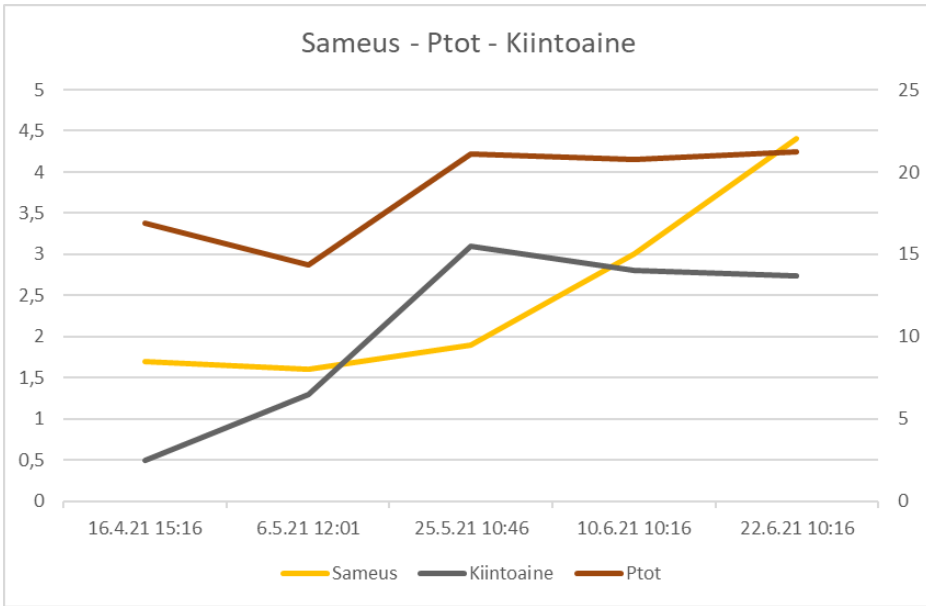
Kiintoainepitoisuuden ja sameuden välinen korrelaatiokerroin R on 0,24, eli käytännössä kiintoainepitoisuus selittää 24 prosenttia sameuden varianssista (KvantiMOTV). Tarkasteltaessa kiintoaine- ja kokonaisfosforipitoisuuden välistä korrelaatiota voidaan havaita sen olevan heikompi, käytännössä lähellä nollaa.



**KUVA 11.** Kiintoaineen ja kokonaisfosforipitoisuuden välinen korrelaatio syksyllä 2020

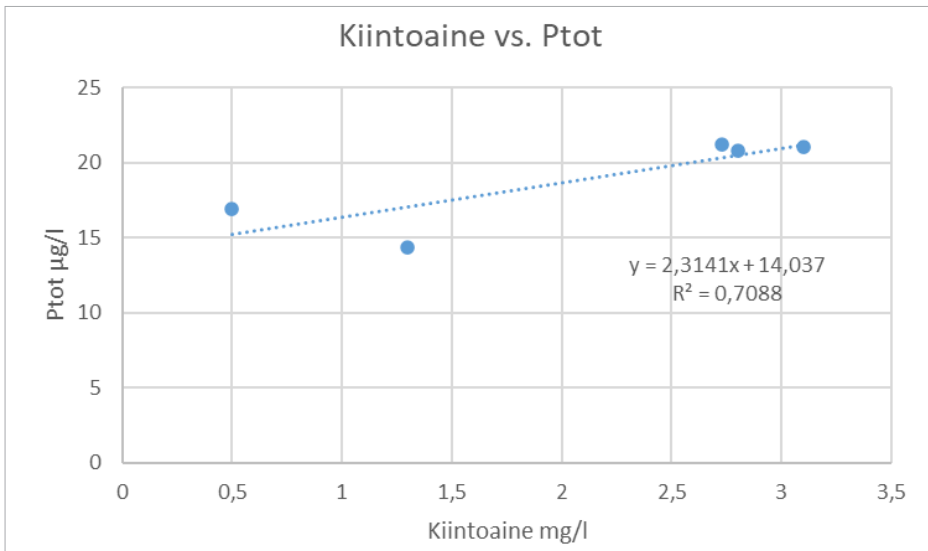


Kevään 2021 monitorointijakson sameus-, kokonaisfosfori- ja kiintoainepitoisuuksia samassa kuvaajassa tarkasteltaessa vaikuttaisi etenkin kiintoaine- ja kokonaisfosforipitoisuuden välillä olevan melko selkeä riippuvuussuhde (kuva 12).



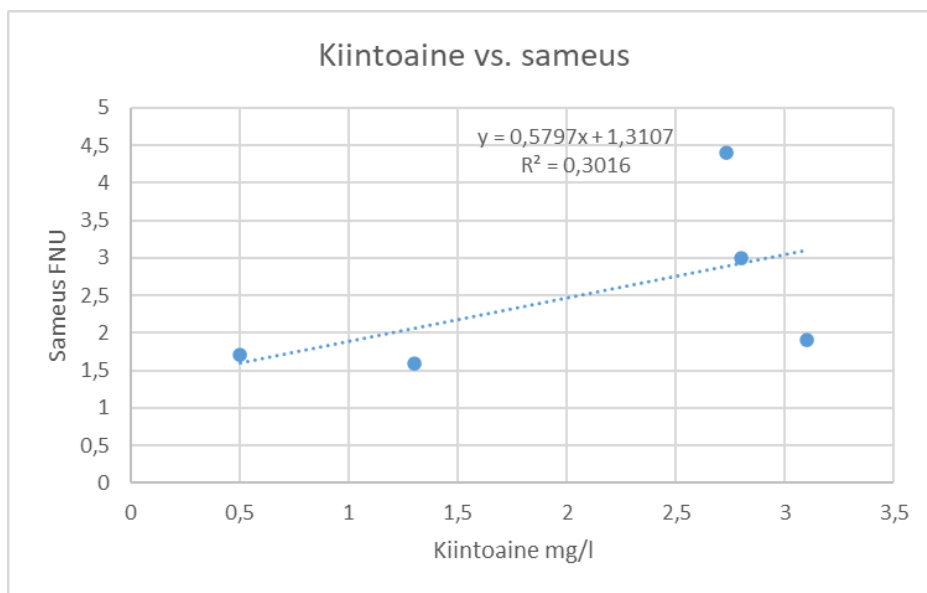
**KUVA 12.** Kiintoaine-, kokonaisfosfori- ja sameusarvot keväällä 2021

Tämä voidaan tarkemmin todeta kuvasta 13. Kyseisten muuttujien välinen korrelaatio-kerroin R on 0,84, eli kiintoainepitoisuuden voidaan sanoa selittävän noin 84 prosentin kokonaisfosforipitoisuuden.



**KUVA 13.** Kiintoaine- ja kokonaisfosforipitoisuuden välinen korrelaatio keväällä 2021

Kiintoaineen ja sameuden välillä korrelaatiokerroin R on puolestaan 0,55. Tämä tarkoittaa sitä, että näiden analyysien ja mittaustulosten perusteella kiintoainepitoisuus selittää sameusarvon noin 55 prosentin tarkkuudella.



**KUVA 14.** Kiintoainepitoisuuksien ja sameuden välinen korrelaatio keväällä 2021

## YHTEENVETO

Tarkastelun perusteella voidaan todeta, että sateen ja sameusarvon kohoamisen välillä on selkeä syy–seuraussuhde ainakin useimmiten. Sateen vaikutus sameusarvoon riippuu sekä sateen määrästä että intensiteetistä. Vaikutus näyttäisi lisäksi olevan erilainen eri vuodenaikoina. Tämä johtuu luonnollisesti sekä kasvillisuuden määrän vaihtelusta, vallitsevasta ilmankosteudesta sekä sadetta edeltävästä säätilasta. Kuivaan maahan satava rankkasade aiheuttaa selkeimmän sameusarvon kohoamispiikin. Myöhään syksyllä tuleva rankkasade aiheuttaa myös sameuden jyrkän kohoamisen, ja tämä johtuu siitä, että maastossa ei enää ole vettä pidättävää kasvillisuutta ja suhteellinen ilmankosteus on tyypillisesti korkea.

YSI-sondin mittaaman sameuden ja toisaalta laboratoriossa analysoitujen kiintoaine- ja fosforipitoisuuksien välillä ei näyttäisi olevan selkeää korrelaatiota syksyn 2020 tuloksia tarkasteltaessa. Kevään 2021 tulosten osalta tilanne on toinen, sillä etenkin kiintoaine- ja fosforipitoisuuksien välillä on selkeä korrelaatio, eli niiden välinen korrelaatiokerroin oli kevään 2021 monitorointijaksolla 0,84 ja kiintoaineen ja sameuden välinen korrelaatiokerroin 0,55. On kuitenkin huomioitava se, että monitorointijaksot olivat melko lyhyet ja näytteenotokertoja oli vähän. Jotta riippuvuussuhdetta voitaisiin tarkastella pitävästi, tulisi

näytteenottoja olla huomattavasti enemmän ja monitorointijaksojen olisi oltava pidempiä. Tällöin saataisiin selville joen vedenlaadussa tapahtuvat muutokset ja osattaisiin myös jättää tarkastelusta pois tulokset, jotka vaikuttavat virheellisiltä.

On lisäksi huomioitava, että mittauksissa, näytteenotossa ja analyseissä on aina virheen mahdollisuus. Tästä syystä monitoroinnissa käytettävien mittalaitteiden kalibroinnissa ja käytössä sekä toisaalta näytteenotossa ja analyseissä on noudatettava hyviä käytäntöjä sekä pyrittävä suorittamaan näytteenotto ja näytteiden analysointi vakiintuneella tavalla ja standardien mukaisesti.

## LÄHTEET

Haakana, H. 2018. Vesistöopas. Freshabit LIFE IP -hankkeen julkaisu. Saatavilla: [https://www.sll.fi/app/uploads/2018/08/vesisto\\_opas\\_netti\\_2018.pdf](https://www.sll.fi/app/uploads/2018/08/vesisto_opas_netti_2018.pdf)

Irvine, C.A., Backus, S. Cooke, S., Dove, A. & Gewurtz, S. 2019. Application of continuous turbidity sensors to supplement estimates of total phosphorus concentrations in the Grand River, Ontario, Canada. *Journal of Great Lakes Research* 45 (2019), s. 840–849.

Kosonen, M., Puhakainen, L., Ustinov, A., Huttunen, A. & Turtiainen, P. 2021. Hanhilammen hoito- ja käyttösuunnitelma 2021-2036. Saatavilla: <https://hallinta-mikkeli.kunta-api.fi/wp-content/uploads/2021/08/Hanhilammen-hoito-ja-kayttosuunnitelma.pdf>

KvantiMOTV. Korrelaatio ja riippuvuusluvut. Saatavilla: <https://www.fsd.tuni.fi/metelmiaopetus/korrelaatio/korrelaatio.html#pearson>

Lannergård, E.E., Ledesma, J.L.J., Fölster, J. & Futter, M.N. 2019. An evaluation of high frequency turbidity as a proxy for riverine total phosphorus concentrations. *Science of the Total Environment* 651/2019, s. 103–113.

Sito 2016. Mikkelin kantakaupungin ekosysteemipalvelut ja viherrakenne 2016. Saatavilla: [http://hallinta-mikkeli.kunta-api.fi/wp-content/uploads/2017/05/20160805\\_Mikkelin\\_ESP\\_Raportti.pdf](http://hallinta-mikkeli.kunta-api.fi/wp-content/uploads/2017/05/20160805_Mikkelin_ESP_Raportti.pdf)

VALUE s.a. Valuma-alueen rajaustyökalu KM10. Saatavilla: <http://paikkatieto.ymparisto.fi/value/>

Ympäristö 2020. Hulevesien hallinnan kehittäminen. Saatavilla: <https://www.ymparisto.fi/hulevedet>

YSI 2019. How turbidity sensors work. Webinar 9.7.2019. Saatavilla: <https://www.ysi.com/parameters/turbidity>

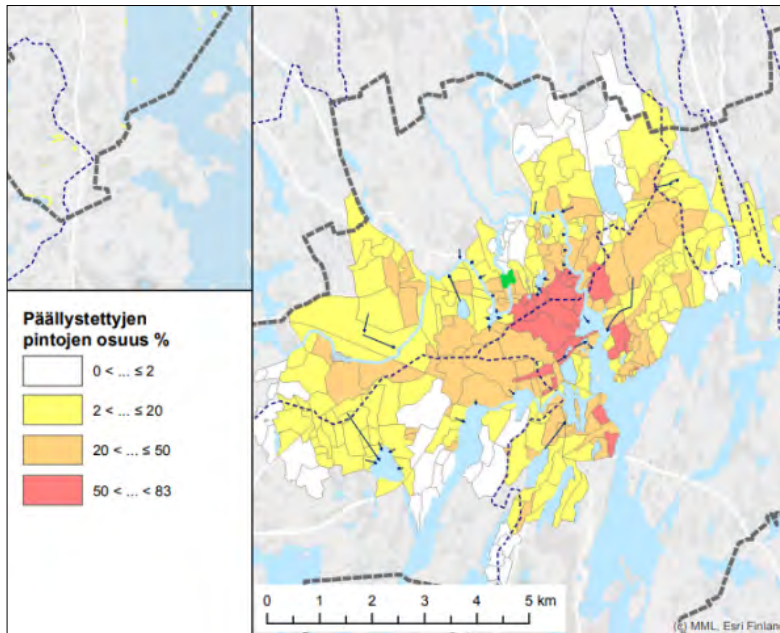
# SADEMÄÄRÄT JA JATKUVA-TOIMISET MITTAUKSET MIKKELIN HANHIJOELLA

Tuija Ranta-Korhonen

Artikkeli pohjautuu Safe Environment and Cleaner Waterways to Blue Baltic Sea -LUGA-BALT2 -hankkeessa Mikkelin Hanhijoella toteutetun veden laadun monitoroinnin tuloksiin. LUGABALT2-hanketta rahoittaa Kaakkois-Suomi–Venäjä CBC 2014–2020 -ohjelma, ja sen kesto on 1.2.2019–31.12.2021. Hankkeen monitorointia tehtiin sekä jatkuvatoimisen vesistösondin että näytteenoton avulla. Monitoroinnin suorittivat projektipäällikkö Tuija Ranta-Korhonen ja tutkimusinsinööri Marina Markova. Monitorointijaksoja oli kaksi. Jaksoista ensimmäinen ajoittui syksyyn 2020 (26.8.–9.11.2020), ja toinen toteutettiin keväällä 2021 (16.4.–1.7.2021). Artikkelissa tarkastellaan sateen ja valumien vaikutusta online-sondin mittaamiin sähkönjohtokyvyn, pH:n, lämpötilan ja happipitoisuuden arvoihin sekä sateen ja kyseisten arvojen muutoksen välistä viivettä. Tarkastelussa hyödynnetään myös VEMALAN simuloituja arvoja virtaamien osalta. Lisäksi hyödynnettiin Ilmatieteen laitoksen avointa dataa ilman lämpötilan, sademäärien ja sateen intensiteetin osalta.

## MIKKELIN HANHIJOKI

Hanhijoki on osa Vuoksen vesistöalueeseen kuuluvaa Seitsen-nimistä jokea. Seitsen-niminen joki saa alkunsa Mikkelin Otavassa sijaitsevasta Iso-Kirveslammesta ja laskee Saimaan Savilahteen Mikkelin keskusta-alueen läheisyydessä. Hanhijoen valuma-alue on pinta-alaltaan noin 63 km<sup>2</sup> (VALUE). Corine 2012 -laskenta-aineiston mukaan alueen pinta-alasta asuinalueet kattavat noin viisi prosenttia, teollisuuden, palvelun ja liikenteen alueita on 6,1 prosenttia, virkistysalueita 2,5 prosenttia, viljelysmaita 4,5 prosenttia ja erilaisia metsämaita hieman yli 79 prosenttia alueesta. (VALUE). Koska joki virtaa kaupunkialueen läpi, on osa sen valuma-alueesta rakennettua aluetta. Kuvassa 1 on nähtävillä päällystettyjen pintojen osuus Mikkelin kaupunkialueella.



**KUVA 1.** Päällystettyjen pintojen osuus Mikkelin kaupunkialueella (kuva Sito 2016)

Hanhijoki ja tässä artikkelissa käytetty mittauspiste on merkitty karttaan vihreänä pisteenä. Kartta on vuodelta 2016, jonka jälkeen päällystettyjen pintojen osuus Hanhijoen valuma-alueella on kasvanut erilaisten rakennusprojektien myötä.

Valuma-alueen maankäyttö ja kasvillisuus vaikuttavat veden kiertokulkuun. Mikäli valuma-alue on luonnontilassa, päätyy sateesta noin kymmenen prosenttia vesistöön pintavaluntana, noin 40 prosenttia imeytyy maahan ja noin puolet haihtuu (Haakana 2018). Nämä prosentuaaliset osuudet luonnollisesti vaihtelevat vuodenajan ja säätilan mukaan. Kaupunkialueella veden luonnollinen kiertokulku häiriintyy, ja päällystetyillä pinnoilla syntyvä hulevesi lisää vesistöihin päätyvää valuntaa, etenkin jos hulevesien käsittely on järjestetty puutteellisesti. Hulevesien sisältämät haitta-aineet, kuten ravinteet, roskat ja muut epäpuhtaudet, heikentävät purkuvesistöjen ja pohjavesien tilaa (Ympäristö 2020). Hanhijokeen johdetaan hulevesiä ainakin Tuskun ja Lehmuskylän kaupunginosista (Kosonen ym. 2021). Myös Rantakylän alueella syntyviä hulevesiä päätyy jokeen.

## JATKUVATOIMISET MITTAUKSET JA MITATTAVAT PARAMETRIT

Jatkuvatoimisissa mittauksissa käytettiin YSI 6920-V2 -vesistösondia, joka oli varustettu lämpötila-, sähkönjohtokyky-, happi-, pH- sekä sameusantureilla. Koska sameuden mit-

tausta on käsitelty artikkelissa Jatkuvatoiminen sameusmittaus sekä kiintoaine- ja fosforipitoisuudet Mikkelin Hanhijoella, keskitytään tässä artikkelissa muihin muuttujiin.

Vedestä mitattava sähkönjohtavuus kuvastaa vedessä ionimuodossa liuenneina olevien suolojen määrää. Sähkönjohtavuuden arvo ei luontaisesti juurikaan vaihtele, vaan se on vesistölle tyypillinen suure. Jokivesille tyypillinen sähkönjohtavuus on 10–20 mS/m eli 100–200 µS/cm (Oravainen 1997). Sisävesissä sähkönjohtavuutta voi lisätä esimerkiksi talvella teiden suolauksessa käytettävä natriumkloridi, joka päätyy hule- ja sulamisvesien mukana vesistöihin. Kloridilla on epäilty olevan moninaisia vaikutuksia vesistöympäristöön, ja sen on muun muassa todettu vähentävän monimuotoisuutta ja suosivan kasviplanktonin, erityisesti sinilevän määrän kasvua. Lisäksi sen on todettu häiritsevän vesistöjen omia puhdistumisprosesseja vähentämällä ravinteiden kertymistä kasvillisuuteen, heikentämällä denitrifikaatioprosessia sekä hidastamalla organisen aineen hajoamista. (Szklaerek ym. 2022)

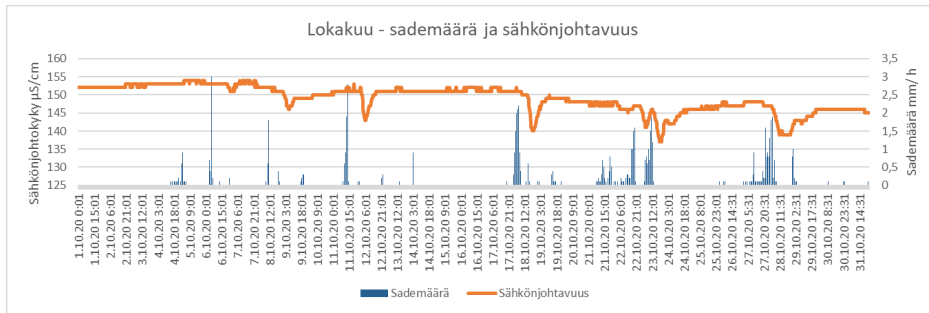
Vesien happamuudella eli pH:lla on suuri merkitys vesieliöstön esiintyvyyteen ja lisääntymiseen. Suotuisa pH-alue eliölle on 6–8. Suomen vesistöissä humus aiheuttaa vesien lievää happamuutta, eli pH on tyypillisesti 6,5–6,8. Veden pH-arvossa on tyypillisesti jonkin verran vuodenaikaisvaihtelua siten, että pH:n arvo on talviaikaan alempi. Korkea pH-arvo saattaa indikoida esimerkiksi leväkukintaa. (Oravainen 1999) Hanhijoen veden pH-arvossa on tapahtunut muutosta happamasta neutraalimpaan suuntaan 1990-luvulta lähtien (pH-arvon muutos 6,2 à 6,8). Tämä saattaa olla merkinä joen rehevöitymisestä. (Kosonen ym. 2020) Sadevesi on monesti hapanta, sillä se sisältää veden kanssa happoja muodostavia rikki- ja typpiyhdisteitä. Hulevesi puolestaan on tavallisesti emäksisempää kuin sadevesi. Tämä johtuu siitä, että hulevettä muodostuu erilaisilla päällystetyillä pinnoilla, kuten betonilla, ja vesi huuhtoo pinnoista mukaansa kalkkia. (Duncan 1999, Messenger 1986, Dempsey ym. 1993, Airola ym. 2014 mukaan)

Liukoisien hapen määrän mittaustuloksen jokivedessä YSI-sondi ilmoittaa kahden eri suureen avulla eli prosentuaalisena kyllästysasteena sekä pitoisuutena mg/l. Veden happipitoisuus on riippuvainen veden lämpötilasta, sillä kylmään veteen liukenee enemmän happea. Toisin sanoen sama suurella mg/l ilmoitettu happipitoisuus tarkoittaa eri veden lämpötiloissa erilaista hapen kyllästysastetta. (Oravainen 1999) Ilmakehästä liukenevan hapen lisäksi veden happipitoisuutta lisäävä tekijä on levien ja makrofytytien yhteyttämisen tuloksena syntyvä happi. Vesistöihin päätyy myös happea sade- ja sulamisvesien mukana. (Kettunen ym. 2008)

## SATEEN VAIKUTUS ERI MUUTTUJIIN SYKSYLLÄ 2020

Tarkasteltaessa sadetapahtumia, sademääriä ja Hanhijoen veden sähkönjohtavuuden muutoksia vaikuttaisi siltä, että sateella on selvä vaikutus sähkönjohtavuuden arvoon. Tämä näkyy selvästi kuvassa 2, jossa on esitetty kuvaajan muodossa sähkönjohtavuuden arvon vaihtelu lokakuussa 2020 sekä kyseisen kuukauden sateet ja sademäärät.

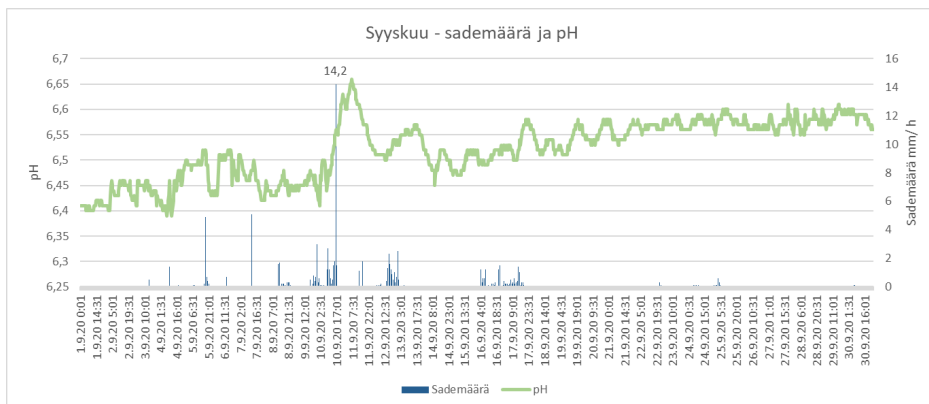




**KUVA 2.** Lokakuun 2020 sateet ja sähkönjohtavuuden muutos

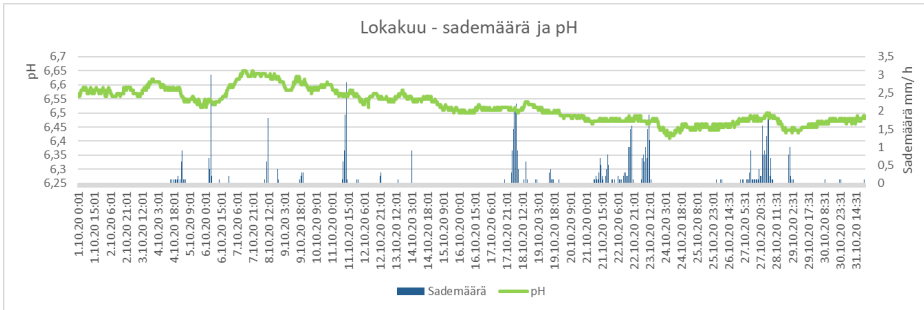
Kuvaa tarkasteltaessa huomaa selvästi, että sateella on veden sähkönjohtokykyä laskeva vaikutus. Sade aiheutti lokakuussa 2020 noin 4–10 mittayksikön suuruisen muutoksen sähkönjohtokyvyn arvoon. Lisäksi muutos näyttäisi olevan riippuvainen sateen kestoista, eli pitempikestoinen sade aiheuttaa suuremman sähkönjohtokyvyn laskun. Myös syys- ja marraskuussa 2020 sateen ja sähkönjohtokyvyn arvon muutos oli samankaltainen. Vaikuttaisi siis siltä, että syyskaudella 2020 sade laimensi Hanhijoen vettä. Sateen ja sähkönjohtokyvyn muutoksen ajallinen viive oli hieman vajaa yksi vuorokausi.

Sateen ja pH-arvon muutoksen välillä ei vaikuttaisi olevan yhtä selkeää vaikutussuhdetta. Syyskuussa sade näyttäisi nostavan pH-arvoa, kuten kuvassa 3 olevasta kuvaajasta voidaan havaita. On mahdollista, että rankan sateen aikana joen valuma-alueella on muodostunut hulevesiä, jotka ovat emäksisiä ja siten nostavat veden pH:ta. On lisäksi huomioitava, että elokuu 2020 oli vähäsateinen ja syyskuunkin sademäärä ennen 10.9. sateita oli pieni. Päälystetyillä pinnoilla on siis ollut huomattava määrä erilaisia epäpuhtauksia, jotka ovat huuhtoutuneet huleveden mukana jokeen. Toisaalta sadevesi saattaa myös olla emäksisempää kuin jokivesi, ja tämän vuoksi rankkasade nostaa pH-arvoa.



**KUVA 3.** Sade ja pH-arvon muutos syyskuussa 2020

Jos tarkastellaan lokakuun 2020 mittauksien ja sademäärän pohjalta piirrettyä kuvaajaa kuvassa 4, voidaan havaita, että kyseisellä aikavälillä sateella vaikuttaisi olevan sekä pH-arvoa nostava että laskeva vaikutus. Tässä kohtaa on luultavasti merkitystä sateen intensiteetillä ja kestolla sekä sillä, kuinka kauan maahan päätyvä sade ehtii reagoimaan päällystettyjen pintojen sekä maaperän kanssa.



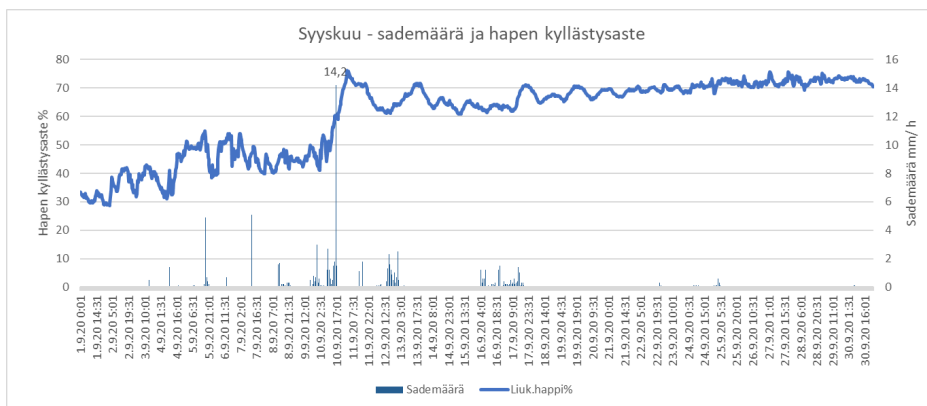
**KUVA 4.** Sade ja pH-arvon muutos syyskuussa 2021

Elokuun 2020 sademäärä oli Ilmatieteen laitoksen tilastojen mukaan 29,4 mm. VEMALA-vesistömallijärjestelmän mukaan joen simuloitu virtaama vaihteli elokuun lopussa 26.–31.8.2020 välillä 0,014–0,019 m<sup>3</sup>/s. Sademäärät olivat siis pieniä ja virtaama pieni. Vesi joessa oli vähähappista, sillä hapen kyllästysaste oli enimmillään hieman yli 40 prosenttia (kuva 5). Mitatun hapen määrässä on nähtävissä lievää vuorokausivaihtelua. Tämä on todennäköisesti seurausta levien ja makrofytytien yhteyttämistoiminnasta. Pienillä sademäärillä ei näyttäisi olevan ainakaan välitöntä hapen kyllästysastetta nostavaa vaikutusta.



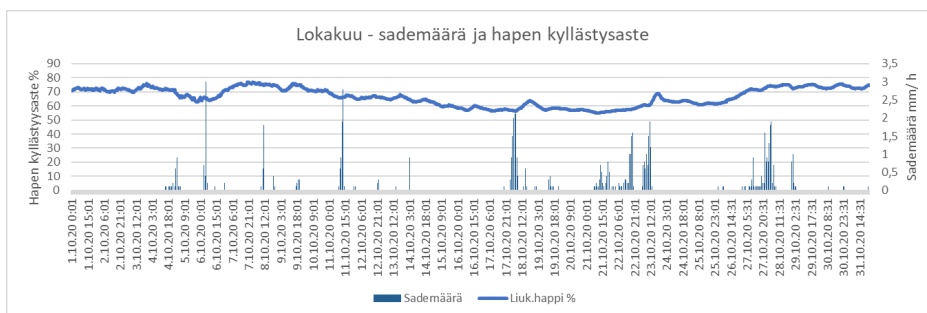
**KUVA 5.** Sademäärä ja hapen kyllästysaste elokuussa 2020

Syyskuun 2020 alussa veden happipitoisuus on edelleen matala, ja vasta sateet 9.9.–10.9. ja etenkin rankempi sadetapahtuma 10.9. (tunnin sademäärä 14,2 mm) näyttäisivät nostavan jokiveden happipitoisuutta. Hapen kyllästysasteen muutos on esitetty kuvassa 6. Ennen sateen alkua veden happipitoisuus oli 5,13 mg/l ja kyllästysaste 48,3 prosenttia. Sateen jälkeen vastaavat arvot olivat 6,31 mg/l ja kyllästysaste 59,2 prosenttia. On huomioitava, että sade myös laski jonkin verran jokiveden lämpötilaa 12,60 °C:sta 12,45 °C:seen.



**KUVA 6.** Sademäärä ja hapen kyllästysaste syyskuussa 2020

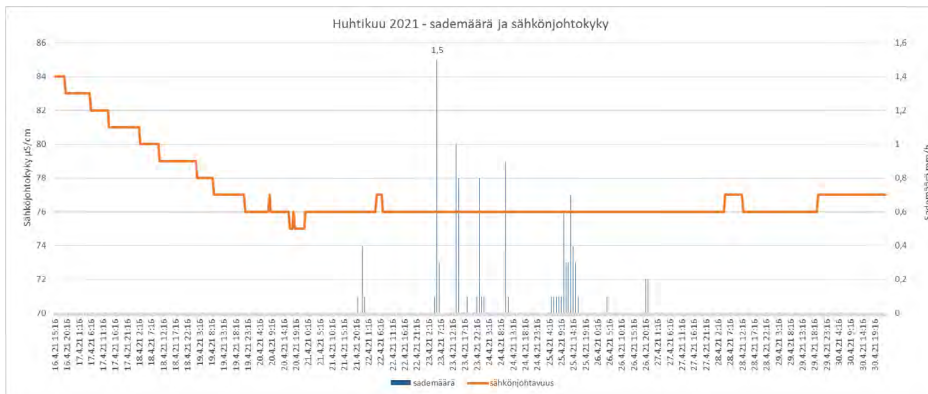
Lokakuun 2020 mittauksia tarkasteltaessa (kuva 7) voidaan havaita sateen nostavan hapen kyllästysastetta jokivedessä. Nousu on kuitenkin melko hienovaraista, ja yleisesti voidaan todeta veden happipitoisuuden olevan tyydyttävällä tasolla.



**KUVA 7.** Sademäärä ja hapen kyllästysaste syyskuussa 2020

## SATEEN VAIKUTUS ERI MUUTTUJIIN KEVÄLLÄ JA ALKUKESÄSTÄ 2021

Ilmatieteen laitoksen tilastojen mukaan termien kevät alkoi vuonna 2021 Mikkelin seudulla 24.3. Tyypillisesti lumi sulaa aukeilta alueilta 2–3 viikon kuluttua termisen kevään alkamisesta ja metsämailta parisen viikkoa myöhemmin. (Ilmatieteen laitos) Sondi vietiin Hanhijoen mittauspisteeseen 16.4., jolloin maastossa oli vielä runsaasti sulamisvesiä ja VEMALA-vesistömallijärjestelmän mukaan joen virtaama oli noin  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Mittausjakson alussa veden sähkönjohtokyky on ollut  $84 \text{ mS/cm}$  ja vakiintunut huhtikuun 21. päivän tienoilla arvoon  $77 \text{ mS/cm}$ . Sulamisvesien voidaan siis sanoa laskeneen veden sähkönjohtokykyä, mutta toisaalta huhtikuun sateilla ei kuvassa 8 olevan kuvaajan perusteella näytä olevan vaikutusta sähkönjohtokyvyn arvoon.



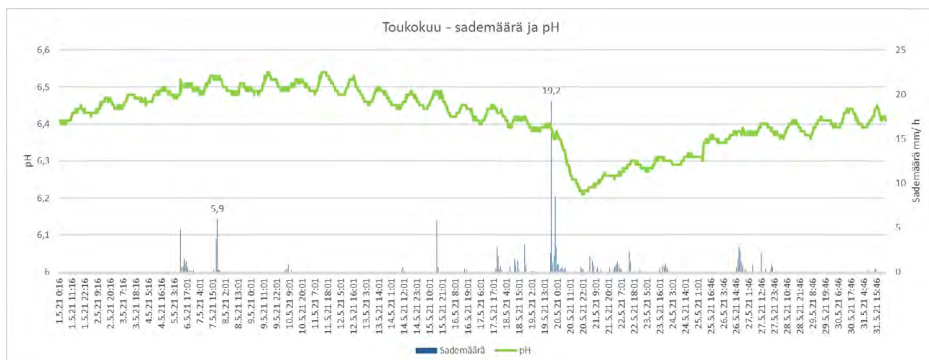
**KUVA 8.** Sademäärät ja sähkönjohtokyky huhtikuussa 2021

Toukokuussa 2021 veden sähkönjohtokyky pysyy hyvin tasaisena, kuten voidaan havaita kuvassa 9 olevasta kuvaajasta. Sähkönjohtavuuden arvo vaihtelee  $76\text{--}82 \text{ }\mu\text{S/cm}$ . Runsaalla sateella 19.5. näyttäisi kuvaajan perusteella olevan sähkönjohtokykyä laskeva vaikutus. Sähkönjohtokyvyn arvon lasku näyttäisi alkavan noin vuorokauden kuluttua rankimman sateen vaiheesta. Muutos on tosin erittäin pieni, eikä yksittäisen tapahtuman perusteella voida osoittaa selvää riippuvuussuhdetta.



**KUVA 9.** Sademäärät ja sähköjohtokyky toukokuussa 2021

Veden pH-arvon osalta voidaan sanoa, että toukokuun 19. päivän rankat sateet vaikuttavat laskevan veden pH-arvoa, kuten voidaan havaita kuvassa 10 olevasta kuvaajasta. pH näyttäisi alkavan laskea hyvin pian rankemman sateen vaiheen loppumisen jälkeen, ja se on alimmillaan noin 6,2. Tulos on selvässä ristiriidassa aiemman monitorointijakson aikana saatujen tulosten kanssa. Kyse on kuitenkin ainoastaan yhdestä mittaustuloksesta.



**KUVA 10.** Sademäärät ja veden pH toukokuussa 2021

Kesäkuun kuvaajan (kuva 11) perusteella sateella näyttäisi olevan jonkin verran pH:n arvoa laskevaa vaikutusta. Tämä näkyy selvimmin runsaamman sateen jälkeen 23.6. Kyseisenä päivänä kolmen tunnin sademäärä oli Ilmatieteen laitoksen mukaan 16,2 mm. Sateen vaikutus ei kuitenkaan ole yksiselitteinen, ja kaiken kaikkiaan voidaan todeta jokiveden pH:n olevan melko matalalla tasolla, sillä arvo vaihteli 6,23–6,43.



**KUVA 11.** Sademäärät ja veden pH kesäkuussa 2021

Tarkasteltaessa jokiveden hapen kyllästysastetta huhtikuun 2021 osalta voidaan kuvassa 12 olevasta kuvaajasta havaita selvästi lämpötilan vaihtelun ja yöpakkasten aiheuttama kyllästysasteen vaihtelu. Hapen kyllästysaste nousee kuukauden loppua kohti ja on tuolloin enimmillään noin 91 prosenttia.



**KUVA 12.** Sademäärä ja hapen kyllästysaste huhtikuussa 2021

Toukokuun kuvaajaa (kuva 13) tarkasteltaessa huomio kiinnittyy hapen kyllästysasteen laskuun runsaiden sateiden jälkeen 20.5. Tämä saattaa johtua siitä, että sadevesi on kuljetanut jokeen mukanaan runsaasti organista alkuperää olevaa kiintoainetta (kiintoaineen määrän kasvuun viittaa samanaikainen sameusarvon nousu), jonka hajoaminen jokivedessä kuluttaa runsaasti happea. Toisaalta veden lämpötila on sateiden vaikutuksesta myös laskenut noin 3,5 °C (16,5 à 13 °C), ja happipitoisuus on samalla aikavälillä muuttunut arvosta 8,25 mg/l arvoon 6,92 mg/l.





**KUVA 13.** Sademäärä ja hapen kyllästysaste toukokuussa 2021

## YHTEENVETO

Monitoroinnin ja sen tulosten tarkastelun perusteella voidaan todeta, että yleensä sateella näyttäisi olevan vaikutusta eri veden laadun parametreihin ja niiden muutokseen. Muutokset eivät kuitenkaan ole aina yksiselitteisiä. On runsaasti eri tekijöitä, jotka vaikuttavat muutoksen suuruuteen ja suuntaan. Tällaisia ovat esimerkiksi ilman lämpötila, sadetta edeltävän sateettoman kauden kesto ja sateen intensiteetti. Jokiveden kemialliset, fysikaaliset ja biologiset muuttujat ovat jatkuvassa keskinäisessä vuorovaikutuksessa.

On mielenkiintoista vertailla toteutetun kahden monitorointijaksun tuloksia keskenään. Esimerkiksi veden sähkönjohtokyky vaikuttaisi olevan huomattavasti matalampi keväällä ja alkukesästä 2021, jolloin sen arvo oli selvästi alle 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Syksyllä 2020 sähkönjohtavuus oli jatkuvasti huomattavasti yli 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ja paikoitellen melkein kaksinkertainen vuoden 2021 arvoihin verrattuna. Sameusarvossakin oli havaittavissa selkeää vuodenaikaisvaihtelua, sillä keväällä ja loppusyksystä sameusarvo oli noin 2 FNU, kun taas kesällä ja alkusyksystä arvo oli korkeimmillaan kymmenkertainen. Tämä on todennäköisesti veden sisältämän kasviplanktonin ja esimerkiksi siitepölyn vaikutusta.

Monitorointijaksot olivat melko lyhyitä, eikä niiden tuloksista voida vetää kovin pitkälle meneviä johtopäätöksiä. Pitkät ja toistuvat jatkuvatoimisten mittalaitteiden avulla suoritettavat mittausjaksot mahdollistavat mittauskohteen ”tuntemisen” ja auttavat hahmottamaan eri muuttujien väliset vaikutus- ja riippuvuus-suhteet.

## LÄHTEET

Airola, J., Nurmi, P. & Pellikka, K. 2014. Huleveden laatu Helsingissä. Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen julkaisu 12/2014. Saatavilla: <https://www.hel.fi/static/ymk/julkaisut/julkaisu-12-14.pdf>

Ilmatieteen laitos s.a. Kevätsään tilastot. Saatavilla: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/kevattilastot>

Kettunen, I., Mäkelä, A. & Heinonen, P. 2008. Vesistötietoa näyttöentottajille. Ympäristö-opas 2008. Saatavilla: [file:///C:/Users/htura01/Downloads/YO vesist%C3%B6tietoa\\_sivut\\_1\\_34\\_lopullinen.pdf](file:///C:/Users/htura01/Downloads/YO%20vesist%C3%B6tietoa_sivut_1_34_lopullinen.pdf)

Kosonen, M., Puhakainen, L., Ustinov, A., Huttunen, A. & Turtiainen, P. 2021. Hanhilammen hoito- ja käyttösuunnitelma 2021-2036. Saatavilla: <https://hallinta-mikkeli.kunta-api.fi/wp-content/uploads/2021/08/Hanhilammen-hoito-ja-kayttosuunnitelma.pdf>

Oravainen, R. 1999. Vesistötulosten tulkinta – Opasvihkonen. Kokemäen vesistön vesien-suojeluyhdistys ry. Saatavilla: <https://kvvy.fi/wp-content/uploads/2015/10/opasvihkonen.pdf>

Szklarek, S., Górecka, A. & Wojtal-Frankiewicz, A. 2022. The effects of road salt on freshwater ecosystems and solutions for mitigating chloride pollution – A review. *Science of the Total Environment* 805 (2022).

# HULEVESIEN KÄSITTELYN T&K-YMPÄRISTÖ

Aki Mykkänen & Sari Hämäläinen & Jussi Heinimö

Huky – Hulevesien käsittelyn T&K-ympäristö (A74988) -hankkeessa toteutettiin vesien monitorointia Mikkelin Pitkäjärvelle rakennetussa hulevesien käsittelyjärjestelmässä sekä Ristiinan vanhalla kaatopaikalle rakennetussa suotovesien biosuodatuslaitteistossa. Hankkeen tavoitteena oli tarkastella kohteissa käytettävien biohiilien puhdistustehokkuutta ja kehittää järjestelmien toimivuutta tutkimusympäristöinä. Ympäristöt ovat osa EcoSairi-la-kehittämiskokonaisuutta ja mahdollistavat tutkimus- ja kehitystyön Mikkelin alueen vesistöihin laskevilla hule- ja suotovesillä.

Huky oli rinnakkaishanke Mikkelin kaupungin investointihankkeelle (A74989), jossa tarkastellut ympäristöt suunniteltiin ja rakennettiin. Huky toteutettiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun ja Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy:n yhteishankkeena, jonka rahoittajana toimivat Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan aluekehitysrahastosta sekä Mikkelin kaupunki. Hankkeen toteutusaika oli 1.1.2019–30.6.2021.

## TIETOA JÄRJESTELMIEN TOIMIVUUDESTA JA SUODATINMATERIAALEISTA

Mikkelin kaupungin rakentamat Pitkäjärven hulevesien käsittelyjärjestelmä sekä Ristiinan vanhan kaatopaikan biosuodatusjärjestelmä (kuva 1) mahdollistavat suodatinmateriaalitutkimuksen aidoilla vesistöjä kuormittavilla vesillä sekä suuremman mittakaavan kokeet kuin esimerkiksi laboratoriossa. Samalla myös toiminnan aikana järjestelmien alapuolisten vesien laatu parantuu. Biohiili suodatinmateriaalina on noussut viime vuosina esille vedenpuhdistuksessa, mutta sen toimivuudesta aidoilla vesistöä kuormittavilla vesillä on vielä vähän tietoa. Biohiilen toimivuuteen vaikuttavista tekijöistä tärkeimpiä ovat sen ominaispinta-ala, valmistuslämpötila sekä -materiaali, jotka kaikki määrittävät sen, miten hyvin biohiili kykenee sitomaan itseensä haitallisia aineita. Koska biohiiltä voidaan valmistaa biomateriaaleista, kuten puusta tai pähkinänkuorista, on se helposti uusiutuva materiaali.



**KUVA 1.** Huky-hankkeessa monitoroitiin ja kehitettiin Pitkäjärven hulevesien käsittelyjärjestelmää (ylempi) sekä Ristiinan vanhan kaatopaikan suotovesien biosuodatuslaitteistoa (alempi) (kuvat Juha Vihavainen & Aki Mykkänen).

Hulevesillä tarkoitetaan kaupunkialueilla vesisateiden myötä rakennetulta alueelta muodostuvia valumavesiä, jotka laskiessaan vesistöihin aiheuttavat ravinne- ja haitta-ainekuormaa. Hulevesien sisältämät aineet ja niiden pitoisuudet määräytyvät sen mukaan, minkälaista toimintaa valuma-alueella on. Esimerkiksi valtateiltä muodostuvien hulevesien mukana voi päästä esimerkiksi öljyjä, kun taas viljelyalueilta tulevassa valumassa voi olla runsaasti ravinteita. Vesistöhaitan vähentämiseksi ongelmiin on helpompi reagoida ennen kuin vedet pääsevät itse vesistöihin. Suotovesillä sen sijaan tarkoitetaan esimerkiksi kaatopaikkojen maatyttöjen läpi suotautuvaa vettä, johon liukenee haitta-aineita maatyttöstä. Suotovedet ovat yleisesti ainepitoisuuksiltaan hulevesiä huomattavasti väkevämpiä. Suotovesien koostumus muodostuu täysin sen mukaan, minkälaista jätettä kaatopaikalle on vuosien varrella

sijoitettu. Kaatopaikat ovat yleisesti myös syrjäisissä paikoissa, eikä niiden täyttöjen tarkoista koostumuksista välttämättä ole kattavaa tietoa. Kaatopaikkojen suotovedet voivatkin olla merkittäviä ja haastavia pistekuormittajia vesistöille niiden suurien haitta-ainepitoisuuksien takia.

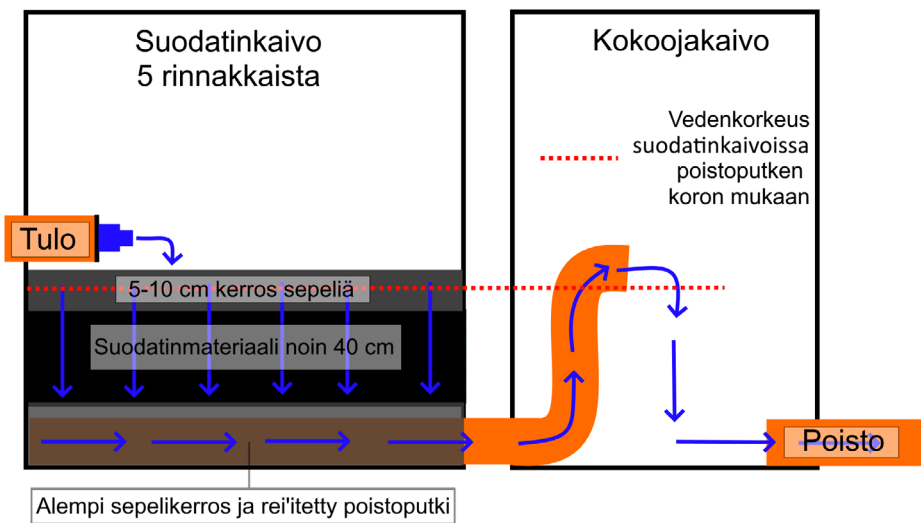
## PITKÄJÄRVEN HULEVESIEN KÄSITTELYJÄRJESTELMÄ

Huky-hankkeessa Pitkäjärven hulevesien käsittelyjärjestelmää tarkasteltiin ja kehitettiin koko hankkeen ajan. Järjestelmä on suunniteltu niin, että se toimii tutkimus- ja kehittämisympäristönä toimijoille, joilla on tarve testata esimerkiksi suodatinmateriaaleja todellisessa hulevesiympäristössä. Kohteessa on viisi rinnakkaista suodatinkaivoa, joihin tarkasteltavat suodatinmateriaalit voidaan sijoittaa. Käsittelyjärjestelmä käyttöönotettiin toukokuussa 2019, jolloin myös Huky-hankkeen toiminta alueella alkoi. Järjestelmälle tehtiin muutostöitä vuoden 2020 keväällä, jolloin sen toimintaa parannettiin aikaisempaan vuotena kerättyjen havaintojen ja kokemusten perusteella. Itse käsittelyalue koostuu settipadosta, kasettirakenteisesta vastaanottosäiliöstä, suodatinkaivoista sekä imeytys- ja viivytysalueesta (kuva 2). Järjestelmään tuleva vesi on peräisin Karilan valuma-alueelta, jolla sijaitsee kaupallista toimintaa, pienteollisuutta, maantie sekä omakotitaloalueita.



**KUVA 2.** Pitkäjärven hulevesijärjestelmän asemapiirros (Mikkelin kaupunki, 2019 muokailen).

Viidessä erillisessä suodatinkaivossa koeasetelma on täysin käyttäjän valittavissa. Eroja voidaan toteuttaa esimerkiksi säätämällä kaivoille erilaisia tulovirtaamamääriä, suodatinmateriaalien patjapaksuuksia sekä tietenkin itse suodatinmateriaaleja. Huky-hankkeen aikana järjestelmässä käytettiin neljää biohiili-sepeliseosta sekä yhdessä kaivossa kontrollina pelkkää sepeliä. Huky-hankkeen koeasetelma on esitetty kuvassa 3. Suodatinkaivoihin mahtuu noin 1,5 m<sup>3</sup> suodatinmateriaalia. Kaivoihin voidaan rakentaa käyttäjän tavoitteiden ja tarpeiden mukaisia suodatinmateriaalikerroksia. Kohteen virtaamamääriä tarkasteltiin koko hankkeen ajan ja veden laatua tarkasteltiin kenttämittauksin, näytteenotoin sekä jatkuvatoimisten vedenlaadun monitorointiasemien avulla. Hulevesijärjestelmän avulla saadaan myös mitoitustietoa suurempia hulevesiratkaisuja varten. Kohteen suunnittelusta vastasi Ramboll Finland Oy sekä toteutuksesta Maanrakennus Talpa Oy.



**KUVA 3.** Havainnekuva Huky-hankkeen aikana käytetyn koeasetelman rakenteesta. Suodatinmateriaalikerroksen päälle on lisätty kerros sepeliä estämään biohiilen kelluminen. Veden pinnankorkeus määräytyy poistoputken koron mukaan niin, että päällinen sepelikerros ei ole veden alla. Veden virtaussuunta esitettynä sinisillä viivoilla (kuva Aki Mykkänen).

Hankkeen aikana tehdyistä mittauksista ja näytteenotoista saatiin viitteitä biohiilen toimivuudesta hulevesien käsittelyyn, mutta tulosten varmistamiseksi tarvittaisiin laajempia koesarjoja. Erityisesti kuitenkin sepelikontrolli erottui selvästi useiden parametrien osalta heikoimmilla puhdistustuloksilla. Esimerkiksi metalleissa, sameudessa ja fosforissa sepelikaivosta havaittiin korkeimmat tulokset. Myös veden happipitoisuus väheni biohiilikaivoissa hieman enemmän, mikä viittaisi mahdollisesti biohiilessä tapahtuvan happea kuluttavia prosesseja, kuten mikrobitoimintaa. Hankkeen tärkeimpänä tavoitteena oli kuitenkin koeajaa sekä kehittää tutkimusympäristöä jatkokäyttöä varten, ja tässä onnistuttiin hyvin.



Vuonna 2020 tehdyt muutostyöt paransivat järjestelmän toimintaa merkittävästi. Järjestelmää voidaan jatkossa lähteä käyttämään esimerkiksi suodatinmateriaalituottajien testiympäristönä, jossa kokeita voi tehdä aidolla hulevedellä hallitussa ympäristössä.

Hankekokonaisuuden aikana Pitkäjärven järjestelmän käytölle tunnistettiin potentiaalisia uusia yhteistyökumppaneita sekä tehtiin myös markkinointimateriaaleja Mikkelin kehitysyhtiö Miksei Oy:n toimesta. Järjestelmä tarjoaa yrityksille mahdollisuuksia toteuttaa uusien hulevesien käsittelyratkaisujen tutkimus- ja kehitystoimintaa. Toiminta tukee Mikkelin vesiosaamista sekä EcoSairilan kehittämisalustan mukaisia tavoitteita. Järjestelmälle tehtiin myös muun muassa esittelyvideo sekä englanninkielinen Teaser-materiaali. Hankkeen aikana löydettiin järjestelmän käytöstä ja suodatinmateriaalien testauksesta kiinnostuneita toimijoita, joiden kanssa jatketaan järjestelmän käyttöön liittyvää yhteistyötä.

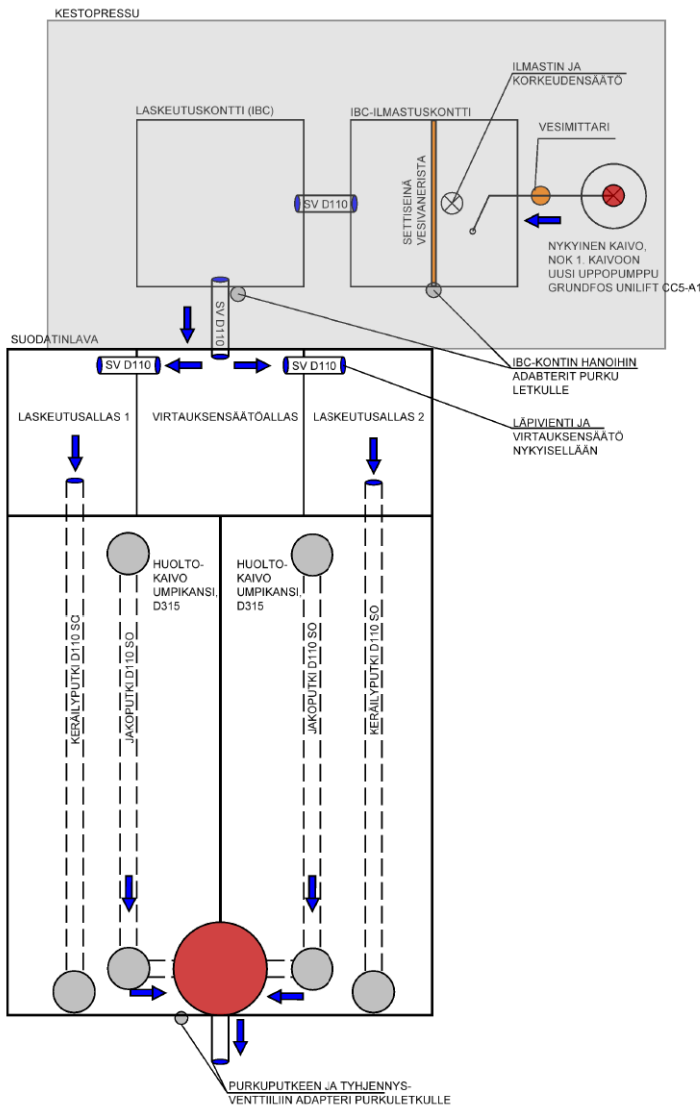
## **RISTIINAN VANHAN KAATOPAIKAN SUOTOVESIEN BIOSUODATUSJÄRJESTELMÄ**

Vuonna 2007 suljettu Ristiinan kaatopaikka on tyypillinen vanha suomalainen kaatopaikka, joka vastaanotti vuosina 1974–2004 Ristiinan kunnan alueella syntyviä yhdyskuntajätteitä. Sen elinkaaren aikana sijoitettu jätemäärä on arvioitu olevan noin 50 000–65 000 m<sup>3</sup> jätettä, jonka tarkkaa koostumusta ei tiedetä. Kaatopaikka on sijoitettu suoraan maakerrostumien päälle ilman pohjarakenteita. Vuonna 1996 muodostuvien suotovesien käsittelyyn kaatopaikan läheisyyteen rakennettiin juurakkopuhdistamo, joka ei kuitenkaan toiminut suunnitellulla tavalla puhdistamon ja purkuojan korkeusasemasta johtuen. Alueelta muodostuvat suotovedet kerätään ensiksi tasausaltaaseen, josta ne johdetaan juurakkopuhdistamoon, siitä ojaston kautta Sorsalampeen ja lopulta Saimaan Juurisalmeen. Itse noin kahden hehtaarin jätetäytön päälle rakennettiin vuonna 2007 tiiviit pintarakenteet, joilla jätteiden läpi kulkevan veden määrää saatiin vähennettyä. Suotovettä muodostuu alueelta Huky-hankkeen aikana tehtyjen havaintojen perusteella noin 3 m<sup>3</sup>/vrk.

Kaatopaikalle Mikkelin kaupungin rakennuttama biosuodatuslaitteisto on siirtolavalle toteutettu, erityisesti typen ja metallien poistoon optimoitu puhdistusjärjestelmä. Suotovedessä havaitut ammoniumtyppipitoisuudet ovat olleet erittäin korkeat, 120–140 mg/l. Biosuodatuslaitteiston puhdistus perustuu luonnonmukaiseen nitrifikaatio-denitrifikaatioon, jossa suotoveden korkeita ammoniumtyppipitoisuuksia muunnetaan typpikaasuksi kaksivaiheisen biologisen prosessin avulla. Suotovedessä olevaa rautaa pitää poistaa ennen biosuodatuskerrosta, koska raudan saostaminen sekä nitrifikaatio ovat molemmat veden happea kuluttavia prosesseja. Suotovesi hapetetaan ensiksi vedessä olevan raudan saostamiseksi sekä hapen lisäämiseksi nitrifikaatioprosessia varten, minkä jälkeen vesi ohjataan biohiili-puuhakeesta sisältäville puhdistuslinjoille, joissa muodostunut nitraatti denitrifikoituu typpikaasuksi ja poistuu ilmakehään. Linjoilta poistuvat vedet ohjataan tasausaltaaseen, josta ne jatkavat matkaansa Sorsalammen kautta Saimaaseen. Koska järjestelmä on raken-

nettu lavan päälle, on sitä helppo siirrellä esimerkiksi puhdistusta tai muutostöitä varten. Laitteiston suunnittelijana toimi Juha-Pekka Saarelainen (Sipti Infra Oy), ja toteutuksesta vastasi Maanrakennus Talpa Oy. Laitteisto rakennettiin kesällä 2019 sekä käyttöön otettiin elokuussa 2019. Vuoden 2019 kokeiden perusteella järjestelmän hapetuslaitat todettiin liian pieniksi raudan saostumisen osalta, minkä myötä järjestelmälle tehtiin vuoden 2020 keväällä muutostöitä. Allaskokoa kasvatettiin ja lavalle tehtiin myös muita käyttöä ja toimintaa helpottavia muutoksia. Vuoden 2020 suunnitelmapiirros on esillä kuvassa 4.

## LEIKKAUS PÄÄLTÄ



**KUVA 4.** Suodatusjärjestelmään vuonna 2020 suunnitellut muutostyöt. Lisättävät esisuodatuslaitat kuvassa vasemmalla harmaalla pohjalla (kuva Juha-Pekka Saarelainen).

Kohdetta monitorointiin molempina vuosina kenttämittauksin sekä näytteenotoin. Muodostuvan suotoveden määrää tarkasteltiin myös astiamittauksin sekä laitteistossa olevan virtaamamittarin avulla. Suurimpia haasteita laitteistolle aiheutti suotoveden korkea rautapitoisuus, joka oli noin 120 mg/l. Veden hapettuessa rauta saostuu pois vedestä, mutta muodostunut sakka samalla myös tukkii järjestelmässä olevia laitteita ja suodatinmateriaaleja sekä pinttyy itse altaisiin (kuva 5). Saostuminen myös kuluttaa veteen lisättyä happea, jolloin happea ei riitä nitrifikaatioprosessin käynnistämiseksi. Suuren rautamäärän takia vuoden 2019 järjestelmän allastilavuus ei riittänyt rautasakan pidättämiseen, ja sakkaa pääsi myös pidemmälle järjestelmään. Vuonna 2020 asennetut esipuhdistusaltaat mahdollistivat suuremman laskeutumisaajan raudalle sekä kertyneen rautasakan helpomman poistamisen.

Rautapitoisuudessa saatu puhdistusteho oli vuonna 2020 noin 80 prosentin luokkaa, mutta poistuvissa vesissä oli silti vielä rautaa noin 20 mg/l. Tämän myötä esipuhdistuksen tehokkuutta tulisi lisätä vielä enemmän. Näytteenottotuloksien mukaan veden ammoniumtyyppipitoisuudessa tai muissa typen olomuodoissa ei havaittu tapahtuvan merkittäviä muutoksia. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että nitrifikaatioprosessi ei pääse käynnistymään. Nitrifikaatio vaatii happea, joka järjestelmässä kului raudan saostamiseen. Suodatinkerroksille menevässä vedessä on vielä happea, mutta poistuvissa vesissä ei enää ole. On siis selvää, että jokin prosessi kuluttaa hapen suodatinkerroksissa. Rautapitoisuuden vähentyessä ja tyyppipitoisuuksien pysyessä samana voidaan todeta hapen kuluvan todennäköisimmin raudan saostumiseen. Rautapitoisuuden vähentyessä myös veden sameus ja sähkönjohtavuus laskevat.



**KUVA 5.** Ilmastusaltaassa havaitut sakkamäärät sekä niiden pinttyminen altaan reunoille ja hapettimen kiinnittimiin (kuva Aki Mykkänen).

Ristiinan vanhan kaatopaikan biosuodatusjärjestelmällä ei toistaiseksi vielä saavutettu tavoiteltua ammoniumtyypen poistotehokkuutta, mutta järjestelmän käytöstä ja toimivuudesta kerättiin hankkeen aikana paljon tietoa jatkokehittämistä varten. Vaikkakin raudan poistaminen ei ollut järjestelmän päätavoite, sen vähentämisessä saavutettiin hyviä luke-mia, mutta sitäkin tulisi vielä parantaa. Tulevaisuudessa järjestelmän esipuhdistinta tulisi muokata niin, että rautapitoisuutta saataisiin laskettua riittävästi ennen biosuodatusta. Tämä voitaisiin toteuttaa kasvattamalla esipuhdistusaltaiden tilavuutta sekä tehostamalla hapetuksen määrää. Tällöin saataisiin poistettua vedestä riittävästi rautaa ja veteen lisättyä happea riittäisi myös nitrifikaatioprosessille. Jatkokehityksen aikana esipuhdistuksen toimivuudesta suotoveden rautapitoisuuden alentamiseen on myös hyvä varmistua ennen kuin järjestelmään lisätään biohiili-puuhakeseosta. Tällä varmistuttaisiin siitä, etteivät suodatinmateriaalit pääse tukkeutumaan rautasakalla.

Ristiinan vanhan kaatopaikan suotovesien biosuodatuslaitteisto osoitti hyvin, kuinka haastavaa suotovesien käsittely voi olla. Suotovesien on-site-puhdistaminen on kuitenkin kannattavaa, koska vesien off-site-puhdistaminen voi olla vieläkin haastavampaa ja jopa moninkertaisesti kalliimpaa. Vaikkakin biosuodatuslaitteistolla ei saavutettu typenpoiston tavoitteita, kerättiin silti Huky- hankkeen aikana kohteesta ja järjestelmän toimivuudesta paljon tietoa ja kokemusta. Kerättyä tietoa voidaan hyödyntää laitteiston jatkokehittämisessä sekä yleisesti Ristiinan vanhan kaatopaikan tarkastelussa.

## YHTEENVETO

Järjestelmien avulla voidaan testata suodatinmateriaaleja laboratorioskokeita suuremmissa ympäristöissä, jotka mahdollistavat todelliset puhdistusolosuhteet. Todellisissa ympäristöissä voi tulla esille asioita, jotka saattaisivat jäädä laboratoriomittakaavan kokeissa huomaamatta. Suuremman mittakaavan ansiosta myös kokeiden avulla saadaan mitoitustietoa vastaavan-laisten suodatinpohjaisten puhdistusympäristöjen suunnittelutyötä varten. Huky-hankkeen aikana tehdyllä kehitystyöllä parannettiin kohteiden käyttöä ja toimivuutta sekä kerätyn kokemuksen avulla luotiin hyvää pohjatietoa niiden jatkokäyttöön otolle ja kehitystyön jatkamiselle. Biohiilien toimivuudesta hulevesien puhdistuksessa saatiin myös kirjallisuuden tukemia havaintoja ja Pitkäjärven kohteelle saatiin potentiaalisia jatkokäyttäjiä.

Hankkeen aikana kerättyä tietoa jaettiin eteenpäin muun muassa yhteistyötilaisuuksissa, seminaareissa sekä radiolähetyksissä. Lisätietoja Huky-hankkeen toimenpiteistä, tuloksista ja tiedotustilaisuuksista on saatavilla hankkeen verkkosivuilta [www.xamk.fi/huky](http://www.xamk.fi/huky) sekä hankkeen loppujulkaisusta ”Hulevesien käsittelyn T&K-ympäristö”.

# BIOHIILISOVELLUKSET METSÄ- TEOLLISUUDEN SIVUAINEVIRROISTA

Vuokko Malk & Marjatta Lehesvaara & Sari Seppäläinen  
& Hanne Soininen & Aki Mykkänen & Lasse Hämäläinen  
& Noora Haatanen & Sari Hyvönen

Bioproduct and Clean Bioeconomy – RDI FlagShip in Xamk -hanke toteutettiin yhdessä Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun (Xamk) ja Luonnonvarakeskuksen (Luke) kanssa. Hankkeessa lisättiin biotalouteen ja biotuotteisiin liittyvää TKI-toimintaa, päivitettiin tutkimuslaitteistoja ja kehitettiin uusia tuotteita ja prosesseja. Hankkeen yhtenä osa-alueena oli biohiilitutkimus, joka toteutettiin yhteistyössä Luken kanssa. Hanketta (1.10.2018–31.12.2021) rahoitti opetus- ja kulttuuriministeriö.

Biohiilisovellukset metsäteollisuuden sivuvirroista -työpaketissa hankittiin uusia mittalaitteita Xamkin Mikkelin kampuksen ympäristölaboratorioon, ja ne mahdollistavat laajemman biohiilien analytiikan ja testauksen. Hankkeessa jatkettiin aiemmin tehtyjen biohiilisovellusten testausta ja menetelmien käyttöönottoa muun muassa hulevesien suodatuksessa. Lisäksi tutkittiin biohiilien ekotoksisuutta niiden turvallisen käytön varmistamiseksi (kuva 1).



**KUVA 1.** Xamkin Mikkelin kampuksella tutkittiin puuperäisten biohiiltien ominaisuuksia (kuva Manu Eloaho).

## UUSIA LAITTEISTOJA BIOHIILITUTKIMUKSEEN

Xamkin ympäristölaboratorioon Mikkeliin hankittiin uusia mittalaitteita biohiilien ominaisuuksien mittaamiseen. Hankinnat täydentävät Mikkelin laitekantaa ja mahdollisuuksia

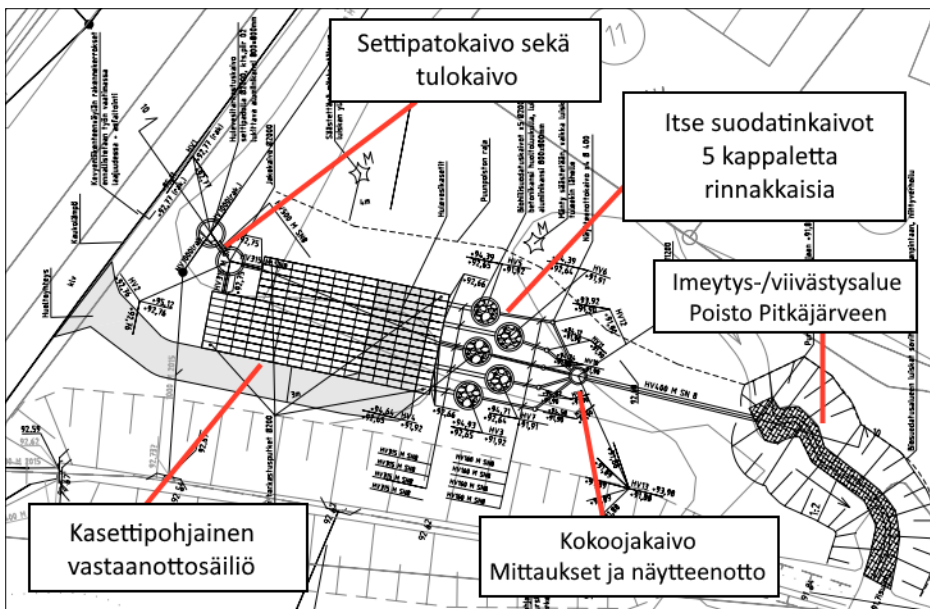
karacterisoida biohiilen ominaisuuksia sekä biohiilisovellusten toimivuutta. Laitteistot ovat seuraavat:

1. Voltammetri metallianalyysiin (Methrom 884 Professional VA)
2. Mikroaaltolahjoituslaite (ETHOS UP High Performance Microwave Digestion System) näytteiden esikäsittelyyn metallianalyysistä varten, 15-paikkainen korkeapaineroottori, Starter Kit 15 segments, (High Pressure Rotor Complet) POIS
3. Luminometri (standardin ISO 21338 mukaisiin *Vibrio fischeri* -toksisuustesteihin soveltuva luminometri)

Tämän lisäksi tehtiin hankintoja Savonlinnan Kuitulaboratoriossa huokoisuusmittalaitteen päivittämiseen. BET-mittalaitteeseen hankittiin uusi esikäsittely-yksikkö (Micromeritics VacPrep 061 Degasser), jolloin laite soveltuu paremmin biohiilien analysointiin. Laitteessa on sekä vakuumi- että virtauskäsittelyvaihtoehto. Käsittely poistaa tutkittavasta näytteestä epäpuhtauksia, kuten vesihöyryä ja adsorboituneita kaasuja, jotka voivat aiheuttaa mittauspävarmuutta ominaispinta-ala- ja huokoisuusanalyysiin (BET). Lisäksi tehtiin Mikkelin ympäristölaboratorion CHNSO-alkuaineanalyysointin käyttöönottoa ja huoltoja.

## BIOHILELLÄ KÄSITELTYJEN HULEVESINÄYTTEIDEN ANALYSOINTIA

Hankkeen aikana tehtiin yhteistyötä Huky – Hulevesien käsittelyn T&K-ympäristö (A74988) -hankkeen kanssa, jota rahoitti Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan aluekehitysrahastosta. Mikkelin kaupungin Pitkäjärvelle perustamasta hulevesien käsittely-ympäristössä hulevesiä käsitellään biohiilipohjaisilla suodattimilla (kuva 2).



**KUVA 2.** Pitkäjärven hulevesijärjestelmä (kuva Aki Mykkänen mukaillen Mikkelin kaupunki 2019).



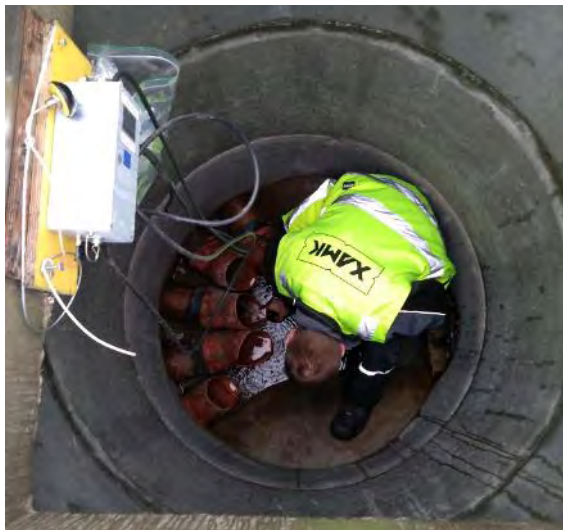
Kokeiden aikana käytettiin hulevesikaivoissa erilaisia biohiili-sepeliseoksia. Seokset olivat kaivoissa seuraavat: HV3-kaivo (kuusipohjainen biohiili 60 %), HV7-kaivo (sepeli 100 %), HV4-kaivo (kuusi-/koivupohjainen biohiili 60 %), HV6-kaivo (kuusipohjainen biohiili 70 %), HV5-kaivo (sekalehtipohjainen biohiili 60 %). Hiilinäytteiden hiili-, vety- ja typpi-pitoisuudet määritettiin CHNS-analysaattorilla ja hiilien ominaispinta-alat BET-laitteella. Taulukossa 1 on esitetty järjestelmässä käytettyjen biohiilinäytteiden alkuainepitoisuudet.

**TAULUKKO 1.** Hiilinäytteiden analyysitulokset.

Hiilinäyte	C %	H %	N %	n	Sd %
Kuusi	88,8	ei havaittu	ei havaittu	7	3,33
Kuusi/koivu	90,0	ei havaittu	0,16	8	4,85
Sekalehti	78,3	ei havaittu	1,2	11	7,14

Biohiilien osalta havaittiin isoja eroja ominaispinta-alassa, mutta ei merkittävää vaikutusta vakuuemiesikästittelystä mittaustulokseen. Sekalehtipohjaisella biohiilellä ominaispinta-ala vaihteli 5–9 m<sup>2</sup>/g. Kuusi-/koivupohjaisen biohiilen ominaispinta-ala oli sekalehtinäytettä suurempi, 260 m<sup>2</sup>/g. (Malk ym. 2020)

Hulevesinäytteistä analysoitiin kokonaisfosforipitoisuudet Hach-Langen DR 6000 -spektrofotometrillä ja kokonaistyppipitoisuudet Kjeldahl-menetelmällä. Raskasmetallipitoisuudet määritettiin Methrom 884 Professional VA -voltammetrillä ja pH ja sähkönjohtokyky mitattiin WTW:n 3310-sarjan kenttämittareilla. Kuvassa 3 on esitetty näytteenottoa hulevesijärjestelmästä.



**KUVA 3.** Näytteenottoa Pitkäjärven hulevesijärjestelmästä (kuva Aki Mykkänen).

Hulevesien voltammetrillä määritetyt raskasmetallipitoisuudet on esitetty tarkemmin tämän julkaisun artikkelissa “Voltammetrilaitteiston käyttöönotto Xamkin ympäristölaboratoriossa”. Hulevesinäytteiden ravinnepitoisuudet on esitetty taulukossa 2.

**TAULUKKO 2.** Hulevesinäytteiden analyysituloksia Pitkäjärven hulevesikohteesta.

ANALYYSITULOKSET 8.3.2021 PITKÄJÄRVI							
Analyysi	HV3 Tulo. Kuusi 60 %	HV3 Poisto. Kuusi 60 %	HV7 Poisto. Sepeli 100 %	HV4 Poisto. Kuusi-Koivu 60 %	HV6 Poisto. Kuusi 70 %	HV5 Poisto. Sekalehti 60 %	Yksikkö
Kokonaistyyppi, N, Kjeldahl	2,10	1,54	1,54	1,82	1,40	1,54	mg/l
Kokonaisfosfori, P	0,045	0,136	0,116	0,088	0,099	0,039	µg/l
pH	7,59	7,51	7,25	7,35	7,38	7,38	
Sähkönjohtavuus 25 °C	34,2	34,2	33,8	34,4	34	34,5	mS/m

ANALYYSITULOKSET 15.4.2021 PITKÄJÄRVI							
Analyysi	HV3 Tulo. Kuusi 60 %	HV3 Poisto. Kuusi 60 %	HV7 Poisto. Sepeli 100 %	HV4 Poisto. Kuusi-Koivu 60 %	HV6 Poisto. Kuusi 70 %	HV5 Poisto. Sekalehti 60 %	Yksikkö
Kokonaistyyppi, N, Kjeldahl	1,96	1,68	1,68	1,68	1,96	1,82	mg/l
Kokonaisfosfori, P	12,0	8,5	13	8,3	8,7	8,4	µg/l
pH	6,69	6,52	6,53	6,52	6,64	6,50	
Sähkönjohtavuus 25 °C	19,9	19,5	19,5	19,6	19,5	19,5	mS/m

ANALYYSITULOKSET 21.5.2021 PITKÄJÄRVI							
Analyysi	HV3 Tulo. Kuusi 60 %	HV3 Poisto. Kuusi 60 %	HV7 Poisto. Sepeli 100 %	HV4 Poisto. Kuusi-Koivu 60 %	HV6 Poisto. Kuusi 70 %	HV5 Poisto. Sekalehti 60 %	Yksikkö
Kokonaistyyppi, N, Kjeldahl	1,40	1,12	0,84	1,54	1,12	0,84	mg/l
Kokonaisfosfori, P	19,0	7,4	10,1	5,2	5,0	6,0	µg/l
pH	6,52	6,52	6,58	6,63	6,61	6,61	
Sähkönjohtavuus 25 °C	20	20,4	19,7	20,4	20,3	20,8	mS/m

Analyysituloksista nähdään muutoksia ravinteissa. Kokonaistypessä ja -fosforissa korkeimpia tuloksia havaitaan kaivoille tulevassa vedessä (HV3-tulo) pitoisuuksien laskiessa kaivojen poistovesiin mennessä. Happamuudessa sekä sähkönjohtokyvyssä tuloksissa ei havaita selkeitä muutoksia kaivojen välillä.

## BIOHIILITUOTTEIDEN EKOTOKSISUUTTA TUTKITTIIIN VALOBAKTEERITESTILLÄ

Biohiilien ominaisuudet vaihtelevat huomattavasti raaka-aineesta ja valmistusprosessista riippuen. Joissakin tapauksissa raaka-aineen sisältämät mahdolliset haitta-aineet (esim. raskasmetallit) voivat rikastua biohiileen, tai itse pyrolyysiprosessissa voi syntyä haitallisia yhdisteitä (esim. PAH-yhdisteet, dioksiinit). Nämä voivat aiheuttaa haittavaikutuksia eliöille. Biohiilituotteiden ominaisuudet ja vaikutukset onkin syytä tutkia tarkasti ennen laajamittaista hyödyntämistä esimerkiksi maanparannuskäytössä tai suodatusratkaisuisia. Fysikaalis-kemiallisten analyysien rinnalla ekotoksisuustestit antavat tietoa muun muassa eri haitta-aineiden yhteisvaikutuksesta ja biosaatavuudesta ja tukevat näin tuotteiden laadunvalvontaa.

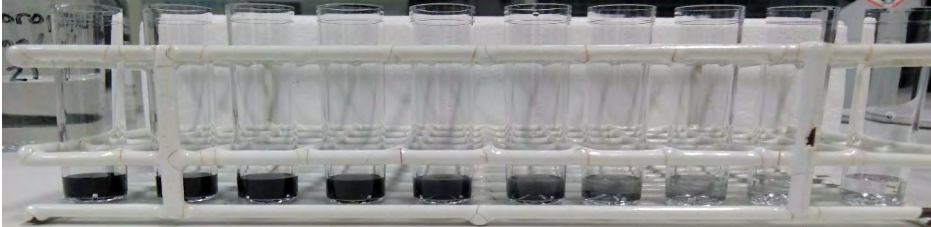
Hankkeessa puuperäisten biohiilien ekotoksisuutta tutkittiin *Aliivibrio fischeri* -valobakteeritestillä. *Aliivibrio fischeri* on meriympäristön bioluminisoiva bakteeri, jota on laajasti käytetty ekotoksisuustesteissä. Valobakteerit tuottavat valoa, jonka määrä voidaan mitata luminometrillä. Myrkylliset haitta-aineet vaikuttavat valobakteerin aineenvaihduntaan, jonka seurauksena valontuotanto heikkenee. Testin on todettu osoittavan hyvin erityyppisten haitta-aineiden toksisuuden. Lisäksi sen on havaittu korreloivan korkeammilla eliölajeilla, kuten kaloilla, tehtyjen toksisuustestien kanssa. Testi on myös nopea ja kustannustehokas toteuttaa.

*A. fischeri* -testi on kehitetty alun perin vesinäytteille ja tällä testimenetelmällä tutkittiin hankkeessa jo aiemmin Pitkäjärven biohiilisuodattimilla suodatettujen vesinäytteiden sekä puu-, lanta- ja lieteperäisten biohiilien vesiuutteiden ekotoksisuutta (Malk & Do 2019). *A. fischeri* -testistä on kehitetty myös ns. kineettinen versio, joka soveltuu kiinteille näytteille, kuten komposti-, sedimentti- ja maaperänäytteille, sekä likaisille vesinäytteille, kuten jätevesille. Hankkeen rahoituksella Mikkelin ympäristölaboratorioon hankittiin kineettisen testin suorittamiseen soveltuva luminometri ja menetelmällä testattiin kolmen puuperäisen biohiilen (taulukko 3) ekotoksisuutta.

**TAULUKKO 3.** Testattujen biohiilien ominaisuuksia.

Biohiilen raaka-aine	Palakoko	Hiiltämislämpötila	Sertifiointi
Kuusi/koivu	Seulottu 5–10 mm	600 °C	PEFC-sertifioitu
Sekalehtipuu	Seulottu 5–10 mm	420 °C	Ei sertifiointia
Kuusi	Seulottu 5–10 mm	600 °C	PEFC-sertifioitu

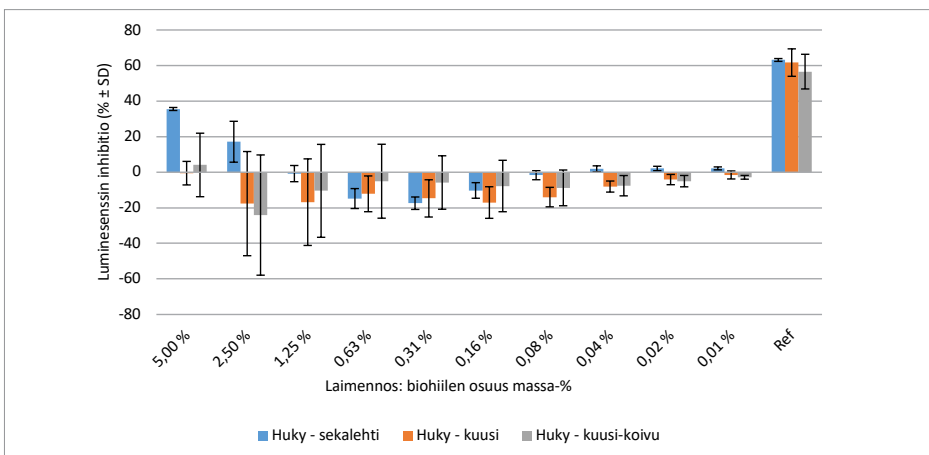
Testiä varten kuivatut biohiilet jauhettiin leikkaavalla IKA MF 10.1 -myllyllä (seulan silmäkoko 1 mm) ja jauhetuista biohiilistä valmistettiin suspensiot ultrapuhtaaseen veteen 10 prosentin massasuhteessa. Suspensioista tehtiin laimennossarjat (kuva 4), jotka laimenevat puolella bakteerisuspension kanssa mittausvaiheessa. Testit toteutettiin standardin SFS-ISO 21338 mukaisesti käyttämällä Biotox-kittiä (Aboatox Oy, Turku).



**KUVA 4.** Biohiilen vesisuspensiosta valmistettu laimennossarja (kuva Vuokko Malk).

Sekalehtipohjaisella hiilellä valontuoton inhibitio oli 36 prosenttia vahvimmassa laimennoksessa (kuva 5), mikä viittaisi näytteen toksisuuteen. Näytteen voimakas väri kuitenkin heikentää tuloksen luotettavuutta, ja tulos tulisi varmistaa muilla toksisuustesteillä. Laimennoksissa toksisuusvaikutus häviää. Aiemmin vesiuutteilla tehdyissä testeissä toksisuutta ei tällä sekalehtipohjaisella biohiilellä havaittu (Malk & Do 2019). Muilla testatuilla biohiilillä sekä sekalehtipohjaisen biohiilen laimennoksissa bakteerien valontuotto jopa lisääntyi. Tämä valontuottoa aktivoiva vaikutus voi johtua muun muassa näytteiden sisältämistä ravinteista (Kapanen 2012).

Tyypillisesti ekotoksisuuden selvittämiseksi suositellaan testejä eri trofiatasoja edustavilla eliölajeilla. Esimerkiksi maaperän toksisuuden arvioimiseksi suositellaan testejä vähintään yhdellä mikrobiprosessilla, kasvikuntaa ja eläinkuntaa edustavalla lajilla.



**KUVA 5.** Puupohjaisen biohiilen valontuoton inhibitio (%) vesisuspension laimennoksissa. Vahvin testattu näyte oli 10 prosentin vesisuspensio, joka laimenee bakteerisuspension kanssa puolella mittausvaiheessa. Tuloksissa on esitetty kolmen rinnakkaisnäytteen inhibitioprosenttien keskiarvot sekä keskihajonnat. Referenssiaineena käytettiin 3,5-dikloorifenolia (3,4 mg/l).

## LÄHTEET

Kapanen 2012. Ecotoxicity assessment of biodegradable plastics and sewage sludge in compost and in soil. Academic dissertation in Microbiology. VTT Science 9. VTT Technical Research Centre of Finland. ISBN 978-951-38-7466-7 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Malk, V. & Do, V. 2019. Ekotoksisuustesteillä varmistetaan biohiilen turvallinen käyttö. Julkaisussa: Soininen, H., Haatanen, N., Pulkkinen, L. (toim.) 2019. Metsä, ympäristö ja energia. Vuosijulkaisu 2019. Xamk kehittää 101. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. ISBN: 978-952-344-225-2 (nid.)

Malk, V., Hyvönen, S., Haatanen, N., Rasa, K., Mykkänen, A. & Soininen, H. 2020. Biohiilen ominaisuuksien karakterisointi ja ominaispinta-alan mittaaminen. Julkaisussa: Soininen, H., Haatanen, N., Pulkkinen, L. (toim.) 2020. Metsä, ympäristö ja energia. Vuosijulkaisu 2020. Xamk kehittää 131. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. ISBN: 978-952-344-294-8 (nid.)

Mikkelin kaupunki 2019. Pitkäjärven hulevesijärjestelmän suunnitelma.

# VOLTAMMETRILAITTEISTON KÄYTTÖNOTTO XAMKIN YMPÄRISTÖLABORATORIOSSA

Marjatta Lehesvaara

Voltammetria on sähkökemiallinen menetelmä raskasmetallien ja muiden sähkökemiallisesti aktiivisten aineiden pienten pitoisuuksien määrittämiseksi. Opetus- ja kulttuuriministeriön rahoittamassa Bioproduct and clean technology – RDI FlagShip in Xamk -hankkeessa otettiin käyttöön Xamkin ympäristölaboratorioon hankittu Methrom 884 Professional VA -voltammetrilaitteisto. Testinäytteinä käytettiin muun muassa Huky – Hulevesien käsittelyn T&K-ympäristö -hankkeessa kerättyjä vesinäytteitä.

## JOHDANTO

Voltammetria on jo 1920-luvulla käyttöön otettu mittausmenetelmä. Voltammetrilaitteisto koostuu jännitelähteestä ja polarografisesta kennosta, jossa varsinainen mittaus tapahtuu. Mittauskenno sisältää kolme elektrodia: työelektrodi eli elohopeaelektrodi (Multi Mode electrode = MME), platinaelektrodi ja vertailuelektrodi (Ag/AgCl). Muuttuva jännite kohdistetaan työelektrodiin ajan funktiona ja järjestelmän tuottama sähkövirta mitataan. Methrom 884 Professional VA -voltammetrilaitteistoon kuuluu myös automaattinen näytteen syöttäjä, pumppuyksikkö sekä standardiliuoksen että elektrolyyttiliuoksen annostelijat (kuva 1). Laitteistoa ohjataan omalla ohjelmistolla.



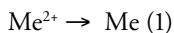
**KUVA 1.** Xamkin voltammetrilaitteisto (kuva Marjatta Lehesvaara)



Kun MME-elektrodin sisältämä nestemäinen elohopea kulkee lasikapillaarin läpi, kapillaarin kärkeen muodostuu roikkuva elohopeapisara, joka toimii elektrodina (HDME = hanging mercury drop electrode). Mittaukseen liittyvät hapetus-pelkistysreaktiot tapahtuvat elohopeapisaran pinnalla. Elohopeapisaran pinta-ala pysyy vakiona koko mittauksen ajan. Näytteessä olevat eri analyytit erotetaan jännitteen perusteella.

## MITTAUSMENETELMIÄ

Voltammetrisillä mittausten menetelmillä voidaan analysoida esimerkiksi jäämätason metallipitoisuuksia merivedestä, suoloista ja puhdaskemikaaleista. Orgaanisia lisäaineita voidaan analysoida esimerkiksi kirkasteista, tasoitteista ja galvanointiliuoksista. Suodattimille kerätyistä aerosolinäytteistä on esikäsittelyjen jälkeen analysoitu kadmiumia, lyijyä ja kuparia (Illuminati ym. 2015, 182). Mittaustekniikoita on useita. Xamkin laitteistolla on käytetty metallien määrittämisessä niin sanottua anodista stripping-voltammetriaa (ASV). Menetelmässä on kaksi vaihetta. Ensimmäisessä vaiheessa analyytti (Me) konsentroidaan pelkistämällä reaktioyhtälön 1 mukaisesti työelektrodin eli elohopeaelektrodin pinnalle, jossa se muodostaa elohopean kanssa amalgaamin.



Määrittäsvaiheessa (stripping) metalli hapetetaan, jolloin se irtoaa elohopean pinnasta ja liukenee veteen (reaktioyhtälö 2).



Metallin kerääntyminen elohopean pinnalle tapahtuu vakio potentiaalilla ja tietyn menetelmässä määritetyn ajanjakson aikana.

## HERKKYYS – PIENET PITOISUUDET

Laitteen kyky havaita hyvin pieniäkin pitoisuuksia (taulukko 1) asettaa erityisiä puhtausvaatimuksia käytettäville kemikaaleille ja astioille. Kaikkien reagenssien on oltava mahdollisimman puhtaita (analyttinen tai suprapur-laatu). Liuosten valmistamiseen ja näytteiden käsittelyyn käytetään ultrapuhdasta vettä. Voltammetrillä käytetään vain tälle laitteelle tarkoitettuja astioita. Astiat pestään normaalipesun jälkeen vielä typpihapolla (2 mol/l). Mittapulloissa ja mittaustastioissa on suositeltavaa säilyttää 0,014 mol/l typpihappoliuosta, kun ne eivät ole käytössä.

**TAULUKKO 1.** Methrom 884 Professional VA -laitteistolla saavutettavia metallien detektointirajoja (<https://www.metrohm.com>)

Metalli	Detektointiraja (ng/l)	Metalli	Detektointiraja (ng/l)
Antimoni (Sb <sup>+3</sup> /Sb <sup>+5</sup> )	200	Kupari (Cu)	50
Arseeni (As <sup>+3</sup> /As <sup>+5</sup> )	100	Sinkki (Zn)	50
Lyijy (Pb)	50	Nikkeli (Ni)	50
Kadmium (Cd)	50	Elohopea (Hg)	100
Kromi (Cr <sup>+3</sup> /Cr <sup>+6</sup> )	25	Rauta (Fe <sup>+2</sup> /Fe <sup>+3</sup> )	50

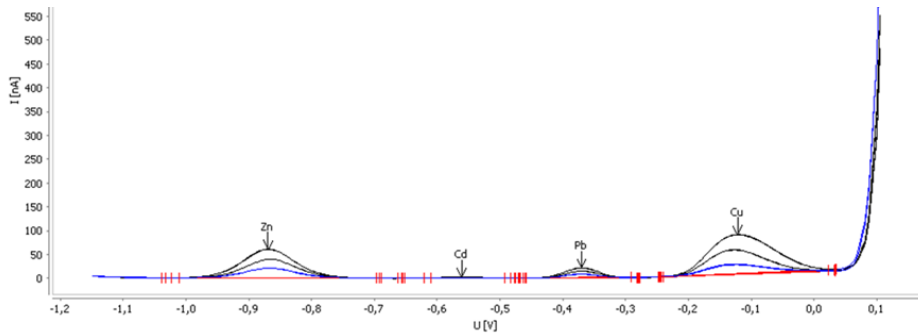
Detektointirajat ja määritysrajat vaihtelevat metalleittain. Metallien eri hapetusasteita on myös mahdollista erottaa toisistaan.

## NÄYTTEEN ESIKÄSITTELY

Näytteiden pH säädetään heti näytteenoton jälkeen väkevällä typpihapolla tai vetykloridihapolla. pH:n tulee olla 1,7–2,0. Tämä estää saostumien muodostumisen ja metallien tarttumisen näyteastian seinämille. Ennen analyysiä puhtaat vesinäytteet (talousvesi, kivennäisvesi, vähähumuksinen luonnonvesi) suodatetaan kalvosuodattimen läpi (0,45 µm). Enemmän orgaanista ainetta sisältäville näytteille, esimerkiksi jätevedelle, esikäsitteily vetyperoksidilla on tarpeen. Runsaasti orgaanista ainetta sisältävät näytteet (elintarvikkeet, lääkkeet jne.) on hajotettava mineraalihakolla ja esimerkiksi mikroaaltohajotuksella. (Methrom 2017) Perinteisiä märkäpolttomenetelmiä voi myös käyttää (ISO 15587-2 2002). Hajotuskemikaaleja käytettäessä on huomattava määrätä analyysin nollataso. Matriisin vaikutusta tulokseen voi testata tekemällä näytteestä useampia laimennoksia ja ajamalla ne rinnakkaisnäytteinä.

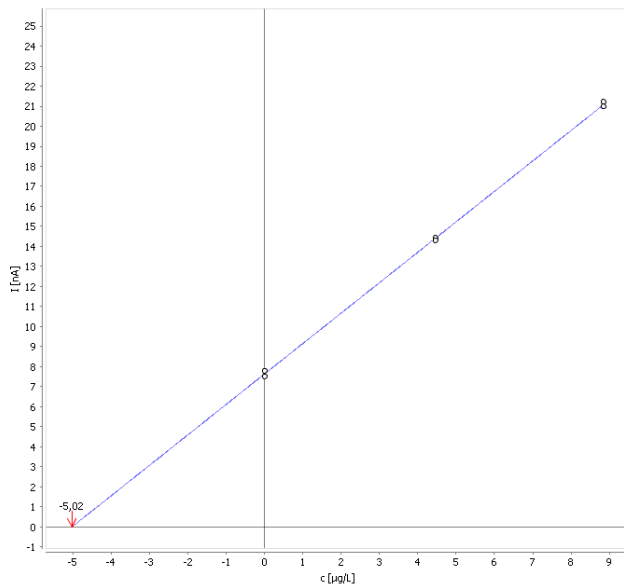
## SINKIN, KADMIUMIN, LYIJYN JA KUPARIN MITTAUSMENETELMÄ

Laitteiston käyttöönotto suoritettiin testaamalla sinkin, kuparin, kadmiumin ja kuparin (Zn, Cd, Pb, Cu) määritysmenetelmää menetelmäohjeen Methrom Application Bulletin No. 231/2 e mukaan. Mittaus perustuu MME-elektrodin elohopeapisaran pinnalla tapahtuviin hapetus-pelkistysreaktioihin. Mittauksessa 10,0 ml näytettä tai sen laimennosta mitataan autosamplerin näyteputkeen, josta pumppu siirtää sen mittausastiaan. Näytteeseen annostellaan 1 ml elektrolyyttiliuosta (kaliumkloridi/natriumasetaatti). Mitattavan liuoksen pH:n tulee elektrolyyttiliuoksen jälkeen olla 4,6 ±0,2. Sekoituksen ja typpikuplituksen jälkeen näytteeseen kohdistetaan muuttuva jännite ja mitataan virta, joka syntyy elohopeapisaran pinnalla tapahtuvan reaktion seurauksena. Analyyttien kvantitatiivien määrittäminen perustuu standardin lisäysmenetelmään, jossa aluksi mitataan alkuperäisen näytteen antama sähkövirta. Sininen käyrä kuvassa 2 esittää sähkövirran (I/nA) suuruutta puhtaalla näytteellä.



**KUVA 2.** Voltammogrammi (kuva Marjatta Lehesvaara)

Näytteeseen lisätään tunnettu määrä analyyttiä sisältävää standardiliuosta ja muodostuva virta mitataan uudestaan. Tunnettu standardin lisäys ja virran mittaus uusitaan. Mustat käyrät kuvassa 2 esittävät sähkövirran suuruutta standardilisäyksen jälkeen. Lisättävän standardin määrän tulee olla sellainen, että aina lisäyksen jälkeen analyytin pitoisuus näyteliuoksessa kasvaa noin kaksikertaiseksi (kuva 3).



**KUVA 3.** Kalibrointisuora lyijyn mittaukselle vesinäytteestä (kuva Marjatta Lehesvaara)

Standardinlisäystä voidaan optimoida muuttamalla lisättävää tilavuutta ja lisättävän standardiliuoksen konsentraatiota. Tämä voi vaatia useita analyysikertoja.

## TESTITULOKSIA

Laitteiston testaamiseksi toimitettiin yhteistyössä Huky – Hulevesien käsittelyn T&K-ympäristö -hankkeessa toimijoiden kanssa. Voltammerilaitteella analysoitiin näytteitä, jotka oli otettu Mikkelin Pitkäjärven hulevesien käsittely-yksiköstä. Huky-hankkeessa tutkittiin muun muassa biohiilen soveltuvuutta hulevesien käsittelyyn ja voltmetrianalyysillä selvitettiin metallien pidättymistä biohiilimateriaaleihin. Näytteitä otettiin kevään 2021 aikana kolme kertaa maaliskuu–toukokuun aikana.

**TAULUKKO 2.** Metallituloksia Pitkäjärven hulevesikaivonäytteistä

ANALYYSITULOKSET 8.3.2021							
Analyysi	HV3 Tulo	HV3 Poisto	HV7 Poisto	HV4 Poisto	HV6 Poisto	HV5 poisto	Yksikkö
Sinkki, Zn	19	24	30	31	21	7	µg/l
Lyijy, Pb	ei havaittu	ei havaittu	ei havaittu	ei havaittu	ei havaittu	ei havaittu	µg/l
Kadmium, Cd	ei havaittu	ei havaittu	ei havaittu	ei havaittu	ei havaittu	ei havaittu	µg/l
Kupari, Cu	ei havaittu	ei havaittu	ei havaittu	ei havaittu	ei havaittu	ei havaittu	µg/l
ANALYYSITULOKSET 15.4.2021							
Analyysi	HV3 Tulo	HV3 Poisto	HV7 Poisto	HV4 Poisto	HV6 Poisto	HV5 Poisto	Yksikkö
Sinkki, Zn	24	21	16	19	13	11	µg/l
Lyijy, Pb	ei havaittu	ei havaittu	ei havaittu	3	3	ei havaittu	µg/l
Kadmium, Cd	ei havaittu	ei havaittu	ei havaittu	0,129	0,351	ei havaittu	µg/l
Kupari, Cu	ei havaittu	ei havaittu	ei havaittu	9	21	ei havaittu	µg/l
ANALYYSITULOKSET 21.5.2021							
Analyysi	HV3 Tulo	HV3 Poisto	HV7 Poisto	HV4 Poisto	HV6 Poisto	HV5 Poisto	Yksikkö
Sinkki, Zn	9	5	6	5	14	22	µg/l
Lyijy, Pb	8	ei havaittu	3	6	12	14	µg/l
Kadmium, Cd	ei havaittu	ei havaittu	ei havaittu	ei havaittu	ei havaittu	ei havaittu	µg/l
Kupari, Cu	ei havaittu	ei havaittu	ei havaittu	ei havaittu	ei havaittu	ei havaittu	µg/l

Käytössä olleita biohiili-sepeliseoksia: HV3 Tulo. Kuusi 60 %, HV3 Poisto. Kuusi 60 %, HV7 Poisto. Sepeli 100 %, HV4 Poisto. Kuusi-Koivu 60 %, HV6 Poisto. Kuusi 70 %, HV5 Poisto. Sekalehti 60 %

Maaliskuussa otetuissa näytteissä ei havaittu sinkin lisäksi muita raskasmetalleja missään hulevesikaivossa. Huhtikuun näytteistä löytyi pieniä määriä kaikkia neljää metallia hulevesien poistokaivoista 4 ja 6. Toukokuussa otetuista näytteistä löytyi sinkkiä kaikista kaivoista ja lyijyä kaikista muista kaivoista paitsi kaivosta 3.

## JOHTOPÄÄTÖKSET

Voltammetrian suuri herkkyys on sekä etu että haaste. Laitteella pystytään analysoimaan haitallisten aineiden hyvinkin pieniä pitoisuuksia, mutta luotettavien tulosten saamiseksi ja nollatason pitämiseksi tarpeeksi alhaisena vaaditaan huolellista ja puhdasta työskentelyä. Standardiliuokset on valmistettava tarkasti, koska tuloksen oikeellisuus on niistä riippuvainen. Näytteen pH elektrolyyttilisäyksen jälkeen on syytä tarkistaa, koska näytteen pH:n poikkeama optimista aiheuttaa muutoksia jännitteeseen, jonka perusteella metallit tunnistetaan. Laitteen letkujen huolellinen pesu ennen ja jälkeen analyysisarjojen on tärkeää, jotta kontaminaatiota ei pääse syntymään. Myös happopesuja on syytä tehdä aika ajoin.

Detektointirajat ja kvantitointirajat ovat riippuvaisia laitteesta ja sen toimintakunnosta sekä näytematriisista. Ne riippuvat myös erittäin paljon käytettävien kemikaalien ja veden laadusta sekä lasiastioiden ja muiden välineiden puhtaudesta. Detektointirajojen ja kvantitointirajojen määrittämiseksi laitteelle tulee tehdä matriisikohtaiset validoinnit. Eri matriisien esikäsittelymenetelmien soveltuvuuden testaaminen laajentaa laitteen käytettävyyttä.

## LÄHTEET

<https://www.metrohm.com/fi-fi/products-overview/voltammetry/professional-va-cvs-instruments/> [viitattu 20.10.2021]

ISO 15587-2 2002. Veden laatu. Hajotus tiettyjen alkuaineiden määrittämistä varten vedestä. Osa 2: Typpihappohajotus.

Illuminati, S., Annibaldi, A., Truzzi, C., Libani, G., Mantini, C. & Scarponi, G. 2015. *Determination of water-soluble, acid-extractable and inert fractions of Cd, Pb and Cu in Antarctic aerosol by square wave anodic stripping voltammetry after sequential extraction and microwave digestion.* Journal of Electroanalytical Chemistry. 755. 182.

Methrom Application Bulletin No. 113/3 e. 2017

Methrom Application Bulletin No. 231/2 e. 2019



# MIKROAALTOHAJOTUS OSANA BIOHIILTEN JA TUHKIEN ANALYSOINTIA

Alli Koskinen

Mikroaltohajotuksella voidaan liuottaa kiinteitä näytteitä alkuaineanalytiikkaa varten. Liuotus on usein tarpeen, sillä suurimpaan osaan alkuaineiden määrittämislaitteista näyte syötetään liuoksena. Opetus- ja kulttuuriministeriön rahoittamassa Bioproduct and clean technology – RDI FlagShip in Xamk -hankkeessa selvitetään biohiilen ja tuhkan koostumusta ja mahdollisia käyttötarkoituksia. Osana alkuainekoostumuksen selvittämistä on niiden liuottaminen mikroaltohajotuksella. Tässä tekstissä käydään läpi mikroaltohajotuksen teoriaa, kirjallisuustietoa koskien biohiilen ja tuhkan hajottamista mikroaltoysteemissä sekä suunnitelmia biohiilen ja tuhkan hajottamiseen.

## TAUSTAA

OKM Flagship -hankkeessa on tarkoitus liuottaa tuhka- ja biohiilinäytteitä sekä analysoida niiden sisältämät raskasmetallipitoisuudet voltammetrilaitteella. Raskasmetalleilla on useita mahdollisia haittavaikutuksia ihmisille ja eliöille (McIntyre 2003). Pieninä pitoisuuksina tietyt raskasmetallit ovat kuitenkin tärkeitä hivenaineita. Biohiilten ja tuhkien ominaisuudet ja alkuainekoostumus vaihtelevat huomattavasti riippuen niiden alkuperästä. Raskasmetallipitoisuuksien määrittäminen onkin oleellista arvioitaessa eri lähteistä peräisin olevien biohiilten ja tuhkien mahdollisia käyttökohteita. Näytteen metallipitoisuuksien analysoimiseksi voltammetrillä näyte on saatettava nestemäiseen muotoon, jossa analysoitavat metallit ovat liuenneet.

Yleisin keino liuottaa näytteitä on märkähajotus (wet digestion), joka voidaan toteuttaa joko avoimessa tai suljetussa systeemissä. Molemmissa tapauksissa näytettä voidaan lämmittää joko mikroaltojen avulla tai konduktiivisesti esimerkiksi lämpölevyllä (McIntyre 2003). Konduktiivisessa lämmityksessä lämpö johtuu lämpölevystä reaktioastiaan pohjaan ja siitä vähitellen näytteeseen. Mikroaltoilla näytteen lämmittäminen on paljon konduktiivista lämmitystä nopeampaa (McIntyre 2003), ja mikroaltojen avulla koko näyte lämpenee kerralla kuumennettaessa reaktioastiaa (Paré ym.1994).

## SULJETUN MIKROAALTOHAJOTUKSEN EDUT VERRATTUNA MUIHIN MÄRKÄHAJOTUSMENETELMIIN

Suljetun mikroaaltosysteemin käyttäminen näytteen hajottamiseen on energiatehokasta, koska lämmitys paikallistuu suoraan kohteeseen. Tämä mahdollistaa voimakkaamman lämmittämisen ja nopeamman reaktioajan. Suljetussa mikroaaltohajotuksessa syntyy myös äärimmäisen vähän lämpöhäviötä. Hyviä puolia ovat lisäksi mahdollisuus lämmön ja paineen seuraamiseen ja säätelyyn hajotuksen aikana sekä laitteen nopea käynnistyminen ja sammuminen (Flores 2014). Useiden kemian laboratorioissa käytettävien laitteiden valmisteleminen ja lämmittäminen analyysia varten kestää nimittäin vähintään puoli tuntia.

Mikroaaltohajotuksessa kuluu vähemmän kemikaaleja ja syntyy siten vähemmän kemikaalijätettä kuin muissa hajotustavoissa (Paré ym.1994). Pienemmän hapon kulutuksen sekä suljetun systeemin ansiosta mikroaaltohajotus on perinteisiä märkähajotusmenetelmiä turvallisempi (Das ym. 2001). Avoimessa systeemissä osa alkuaineista karkaa haihtuvina komponentteina kesken hajotuksen, minkä vuoksi niitä ei saada analysoitua (Flores 2014). Haihtuvat yhdisteet ovat haaste myös työturvallisuudelle.

## MITÄ ON MIKROAALTOENERGIA JA MIKSI SE LÄMMITTÄÄ?

Mikroaaltoenergia on ionisoimatonta säteilyä 300–300 000 MHz:n taajuudella (Camel 2000). Aineen lämpeneminen mikroaaltojen vaikutuksesta perustuu pääasiassa kahteen ilmiöön: ionikonduktioon ja dipolirotaatioon. Molemmassa liuottimen tai hajotettavan näytteen komponentit reagoivat mikroaaltojen aiheuttamaan korkeataajuisesti oskilloivaan eli nopeasti ja säännöllisesti vaihtelevaan sähkökenttään.

Dipolisissa molekyyliissä sähkövaraus on jakautunut epätasaisesti siten, että ikään kuin osa molekyylistä on varautunut positiivisesti ja osa negatiivisesti. Dipoliset molekyylit kääntyvät sähkökentän mukaisesti. Sähkökentän oskilloiminen aiheuttaa molekyylien jatkuvan kiertymisliikkeen niiden asettuessa magneettikentän mukaisesti aina kentän muuttuessa. Tällöin kyse on dipolirotaatiosta, jonka seurauksena vapautuu energiaa ja seos lämpenee. Lämmön syntyminen dipolirotaatiolla edellyttää, että näyte sisältää riittävästi molekyyliä, joilla on dipolimomentti. (Cresswell ym. 2001, Flores 2014)

Ionikonduktiossa oskilloiva sähkökenttä saa ionit liikkumaan liuoksessa varaustensa vuoksi. Ionien liikkeestä syntyvä kitka aiheuttaa liuoksen lämpenemisen. Lämpötilan noustessa ionien liike lisääntyy entisestään. Ionin liikkeeseen vaikuttavat lämpötilan lisäksi sen koko, varaus, sähköjohtavuus ja vuorovaikutus muiden komponenttien kanssa. Ionikonduktio tapahtumiseksi liuoksessa on oltava ainakin kahdenlaisia ioneja. (Cresswell ym. 2001, Flores 2014)

## MIKROALTOHAJOTUSLAITTEEN OSAT JA TOIMINTA

Mikroaltohajotuksessa jokainen näyte punnitaan omaan hajotusputkeensa. Näytteen lisäksi putkeen lisätään hajotuksessa tarvittavat kemikaalit joko yhtä aikaa tai vaiheittain. Hajotusputket asetetaan pystyyn telineeseen, joka sopii hajotuslaitteen sisälle. Hajotusputket on usein valmistettu polytetrafluorieteenistä (PTFE, Teflon) tai vastaavasta materiaalista. Tärkein ominaisuus näyteastian materiaalille on, että se läpäisee mikroaallot (Cresswell ym. 2001). Tärkeää on myös, ettei hajotusputkesta liukene näytteeseen mitään. Turvallisuussyistä korkillisissa hajotusputkissa on joko paineventtiili tai kalvo, joka repeää paineen noustessa liian korkeaksi (Cresswell ym. 2001). Mikroaltohajotuslaitteistossa mikroaallot tuottaa magnetroni (Kuss 1992).

Xamkillä on käytössä Milestone Ethos Up -hajotuslaitteisto (kuva 1). Laitteelle luodaan valmiiksi ohjelma, johon on määritetty, mitä tehoa käytetään, kuinka nopeasti lämpötila nostetaan ja lasketaan, kuinka kauan hajotus kestää ja niin edelleen. Laitteessa on infrapunasensori, jonka avulla lämpötilaa voidaan seurata hajotuksen aikana, sekä kamera, jolla voidaan havaita hajotuksen edistyminen.



**KUVA 1.** Xamkillä käytössä oleva mikroaltohajotuslaitteisto (kuva Alli Koskinen)

## TUHKAN JA BIOHIILEN HAJOTTAMINEN MIKROALTOHAJOTUKSELLA

Tavoitteena on luoda hajotusohjelma biohiili- ja tuhkanäytteiden täydelliseen liuottamiseen ilman kontaminaatiota tai analysoitavan aineen häviämistä näytteen käsittelyn aikana. Hajotusohjelma on ikään kuin resepti ruuanlaitossa tai algoritmi tietotekniikassa. Siinä kerrotaan vaihe vaiheelta, mitä seuraavaksi lisätään, kuinka paljon ja miten näytettä käsitellään.

Aikaisempien tutkimusten perusteella erityisesti tuhka on havaittu hankalaksi materiaaliksi liuottaa. Erilaisia mikroaltohajotusmenetelmiä tuhkalle ovat testanneet Xamk, Eurofins Labtium Oy (Saario 2011) ja Lachas ym. (1999), mutta eivät ole onnistuneet liuottamisessa täydellisesti. Sen sijaan Das ym. (2001) onnistuivat lentotuhkanäytteiden hajotuksessa monivaiheisella analyysillä, joka on kuvattu taulukossa 1.

**Taulukko 1.** Hajotusohjelma, jolla Das ym. (2001) hajottivat lentotuhkanäytteitä onnistuneesti.

Vaihe	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
	0,2 g näytettä 4 ml ku- ningas- vettä	Hajotus 2 min, 550 W, jäähdy- tys	Lisäys 1,5 ml HF	Hajotus 4 min 450 W	Lisäys 3 ml 30 % H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Hajotus 4 min 330 W	Lisäys 4 ml H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Kuuma- vesi- haude 10 min

Seuraavaksi tarkoituksena onkin testata, onnistuuko myös tässä hankkeessa analysoitavien näytteiden hajottaminen Dasin ym. (2001) kehittämällä hajotusohjelmalla. Hajoamistuloksen perusteella ohjelmaa muokataan paremmin Xamkin laboratorioon sopivaksi. Ainakin näytemäärän nostaminen olisi eduksi. Mikäli näytteet eivät hajoa, kokeillaan erilaisia liuottimia sekä hajotustehon ja -ajan nostamista. Esimerkiksi Jokinen (2019) on saanut tehostettua haastavien kiinteiden näytteiden hajoamista fluoriboorihapon (HBF<sub>4</sub>) avulla.

Kun löydetään ohjelma, jolla näyte näyttää silmämääräisesti liunneen täydellisesti, seiso-tetaan näytettä vielä yön yli liukenemisen varmistamiseksi. Hajotuksen jälkeen kirkkaalta näyttävän liuoksen pohjalle saattaa yön aikana painua saostumia, joista voidaan päätellä, ettei näyte ole kunnolla hajonnut (Jokinen 2019). Liuotusmenetelmän toimivuuden varmistamiseksi näytteet voidaan analysoida kiinteinä XRF-analysaattorilla ja verrata tuloksia keskenään (Heikkilä 2018).

## YHTEENVETO

Biohiilten ja tuhkien käyttömahdollisuuksien arvioimiseksi halutaan mitata niiden sisältämiä metallipitoisuuksia. Metallipitoisuuksien mittaamiseksi voltammetrillä näytteet on ensin saatava liuotettua. Mikroaltohajotus suljetussa systeemissä on ylivoimaisesti turvallis ja tehokkain keino kiinteiden näytteiden liuottamiseen.

Aiemmin erityisesti tuhkanäytteiden täydellinen liuottaminen on havaittu haastavaksi. Jotta kakkien metallien pitoisuudet saadaan määritettyä, täytyy näytteen olla liennut kokonaan. Usein biohiili- ja tuhkanäytteiden kohdalla arvioidaan kuitenkin soveltuvuutta maanrakennukseen tai lannoitteeksi. Tällöin voitaisiin miettiä, riittääkö tieto siitä, että jos jokin ei liennut mikroaltokäsittelyssä vahvoilla kemikaaleilla, se tuskin liukenee maaperäänkään. Jos sen sijaan halutaan tietää, mitä hyödyllisiä metalleja voidaan saada talteen, pitäisi näyte saada hajotettua täysin.

## LÄHTEET

Camel, V. Microwave-assisted solvent extraction of environmental samples, *Trends Anal. Chem.*, 2000, 19(4), 229–248.

Cresswell, S. L ja Haswell, S. J. Microwave Ovens—Out of the Kitchen, *J. Chem. Educ.*, 2001, 78(7), 900–904.

Das, A., Chakraborty, R., de la Guardia, M., Cervera, M. & Goswami, D. ICP-MS multielement determination in fly ash after microwave-assisted digestion of samples. *Talanta*, 2001, 54. 975–981.

Flores, É. M. M. *Microwave-Assisted Sample Preparation for Trace Element Determination*, 1. painos, Elsevier, Oxford, UK, 2014.

Heikkilä, E. Mikroaaltoavusteisen hajotuksen hyödyntäminen metalliteollisuuden ympäristöanalytiikassa, 2018, [pro gradu -tutkielma, Jyväskylän yliopisto]. JYX-julkaisuarkisto. <https://jyx.jyu.fi/handle/123456789/59317>

Jokinen, V. Menetelmänkehitys ja validointi UltraWAVE-esikäsitellyllä ICP-MS/MS -analysointorille, 2019, [pro gradu -tutkielma, Jyväskylän yliopisto]. JYX-julkaisuarkisto. <https://jyx.jyu.fi/handle/123456789/64644>

Kuss, H.-M. Applications of microwave digestion technique for elemental analyses, *J. Anal. Chem.*, 1992, 343, 788–793.

Lachas, H., Richaud, R., Jarvis, K. E., Herod, A. A., Dugwell, D. R. & Kandiyoti, R. Determination of 17 trace elements in coal and ash reference materials by ICP-MS applied to milligram sample sizes, *Analyst*, 1999, 124, 177–184. doi:10.1039/a807849a

McIntyre, T. Phytoremediation of Heavy Metals from Soils, *Adv. Biochem. Engin./Biotechnol.* 2003, 97–123.

Paré, J.R. J., Bélanger, J. M.R. & Stafford, S. S. Microwave-assisted process (MAP™): a new tool for the analytical laboratory, *Trends Anal. Chem.* 1994, 13(4), 176–184.

Saario, T. (toim). *Harvinaisten maametallien talteenotto vaihtoehtoisista raaka-aineista*, verkkojulkaisu, 2021. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-344-336-5>

# ALKUINEANALYSAATTORIN TOIMINTA JA KÄYTTÖ XAMKIN YMPÄRISTÖLABORATORIOSSA

Janne Junninen

Alkuaineanalyysointilaitteisto mittaa näytteen sisältämän hiilen, vedyn, typen, rikin ja hapen määrän massaprosenttina alkuperäisen näytteen massasta. Xamkin ympäristölaboratoriossa Mikkelissä otettiin käyttöön PerkinElmer 2400 Series II CHNS/O Analyzer -alkuaineanalyysointilaitteisto osana Bioproduct and clean technology – RDI FlagShip in Xamk -hanketta. Hankkeen on rahoittanut opetus- ja kulttuuriministeriö.

## JOHDANTO

PerkinElmer 2400 Series II CHNS/O Analyzer on alkuaineanalyysointilaitteisto, jolla voidaan mitata kiinteästä näytteestä hiilen, vedyn, typen, rikin ja hapen osuus painoprosentteina. Analyysointilaitteistolla on kolme mittaustilaa: CHN, CHNS sekä happi.

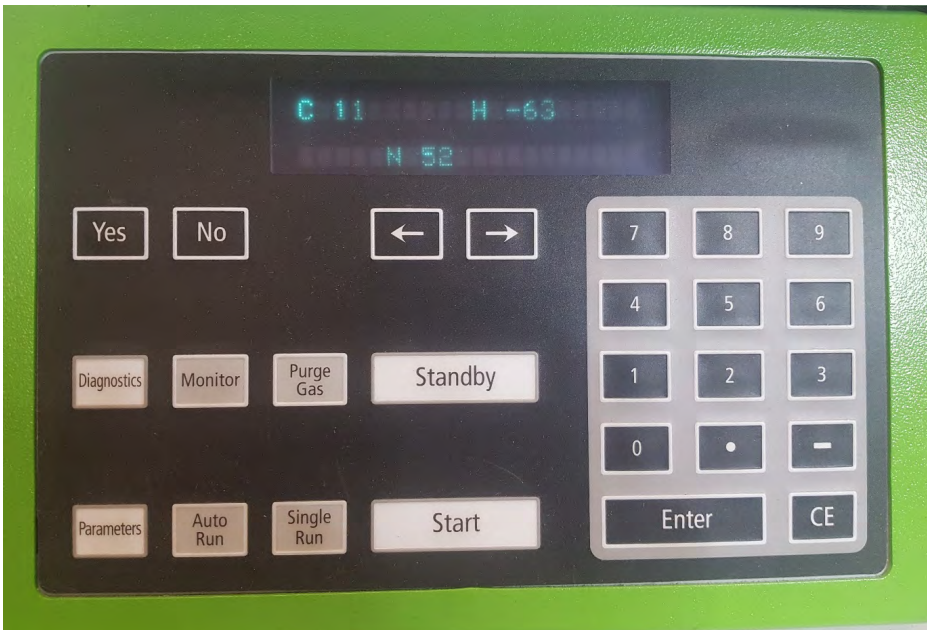


**KUVA 1.** CHNS/O-laitteisto (kuva Marjatta Lehesvaara)

Laitteisto koostuu neljästä peruskomponentista: autoinjektorista, pneumaattisesta systeemistä, poltto- ja reduktiouuneista sekä detektoriuunista. Lisäksi laitteistoon kuuluu vaaka ja tulostin. Laitteisto määrittää alkuaineet painoprosentteina, joten tarkkuusvaaka ja näytteen tarkka ja



toistettava punnitseminen on ratkaisevassa asemassa luotettavien tulosten saavuttamiseksi. Laitetta operoidaan ohjauspaneelin ja tietokoneohjelmiston avulla.



**KUVA 2.** Analysaattorin ohjauspaneeli (kuva Janne Junninen)

Analysointilaitteet polttavat orgaanisen näytteen korkeassa ( $\sim 925\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) lämpötilassa. Hiilen, vedyn, typen ja rikin määrityksessä käytetään polttoa happirikkaassa ympäristössä. Hapen määritys tapahtuu pyrolyysillä hapettomassa ympäristössä. Korkea lämpötila ja pelkistinreagenssit muuttavat näytteen sisältämät yhdisteet yksinkertaisiksi kaasuiksi:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{SO}_2$  ja  $\text{CO}$  ovat mitattavia kaasuja. Kaasuseos homogenisoidaan ja johdetaan kantokaasun avulla kolonniin, joka erottaa molekyylit toisistaan. Lopuksi kaasut saapuvat detektorille. Detektorina toimii TCD (thermal conductivity detector, lämmönjohtodetektor), joka vertaa kantokaasun lämmönjohtokykyä näytekäasuun mittaamalla resistanssin muutosta käämissä. Tuloksena saadaan kromatogrammi (kuva 4), jossa näkyy selkeinä portaina kolonnissa erottuneet kaasut. Eri pylväiden suhteista voidaan laskea painoprosenttiosuus kullekin alkuaineelle alkuperäisessä näytteessä.

## ALKUAINESANALYSAATTORIN TOIMINTA

Alkuaineanalysointilaitteita voidaan käyttää kolmella eri moodilla. CHN-moodia käytetään mittaamaan hiili-, vety- ja typpipitoisuudet näytteessä  $\text{CO}_2$ -,  $\text{H}_2\text{O}$ - ja  $\text{N}_2$ - kaasuina. CHNS-moodia käytetään mittaamaan hiilen, vedyn, typen ja rikin pitoisuudet näytteessä. Hiili, vety ja typpi mitataan samoina kaasuina kuin CHN- moodissa ja lisäksi rikki

mitataan SO<sub>2</sub>:na. Happimoodia käytetään mittaamaan hapen pitoisuutta näytteessä. Happi mitataan CO-kaasuna. Laite tarvitsee kolme eri käyttömoodia, sillä poltto-/pyrolyysiputken sekä reduktioputken hapetin- ja pelkistinreagenssit vaihtelevat sen mukaan, mitä aineita halutaan mitata. Jokaiselle moodille on oma poltto-/pyrolyysiputki sekä reduktioputki.

## KALIBROINTI

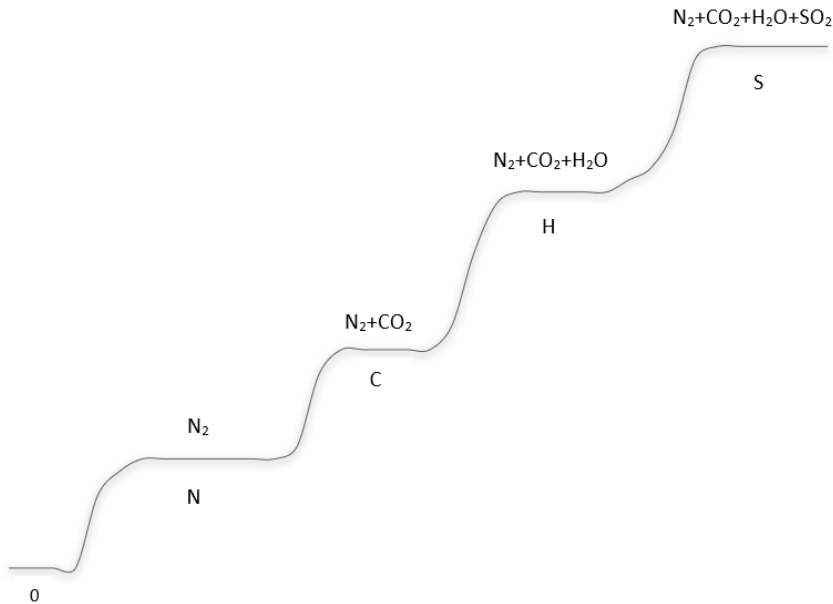
Analysaattori tulee kalibroida ennen varsinaisten näytemittausten aloittamista. Kalibrointi tulee tehdä jokaiselle mittaamismoodille erikseen. Kalibrointinäytteiden ja varsinaisten näytteiden mittaamisprosessi on samanlainen. Ennen kalibrointimittausten aloittamista analysaattorin muistiin syötetään käytettävien kalibrointireagenssien sisältämien alkuaineiden massojen suhteiden teoria-arvot. Lisäksi laitteisto huuhdellaan käytettävillä kaasuilla ja sille tehdään vuototesti. Alkuaineanalysaattorin kalibrointi tapahtuu ajosarjalla, joka on rakenteeltaan sama kaikille moodeille:

- kolme nollanäytettä
- olostajanäyte
- nollanäyte
- olostajanäyte
- nollanäyte
- kolme K-näytettä

Nollanäyte sisältää pelkän tinakapselin ja määrittää laitteelle pohjasignaalin. Olostajanäyte on määritettävää alkuainetta tiedetyn määrän sisältävä näyte, jonka tarkoituksena on esikäsittellä analysaattorin laitteisto ja totuttaa reagenssit sekä laitteisto mitattaviin kaasuihin. K-näyte on kalibraationäyte, joka on määritettävää alkuainetta tiedetyn määrän sisältävä näyte. Analysaattori piirtää kustakin ajosta kromatogrammin ja laskee K-näytteiden tuloksista kullekin alkuaineelle oman kalibraatioarvon  $KF$  käyttäen syötettyjä teoria-arvoja kaavan 1 avulla:

$$KF = \frac{(NR - ZR - NB) \times 100}{SW \times NTW},$$

jossa  $NR$  on typen mitattu lukema,  $ZR$  on kantokaasun lukema,  $NB$  on typen nollanäytteen lukema,  $SW$  on näytteen paino mikrogrammoina ja  $NTW$  on typen teoria-arvo. Kaava 1 on esimerkkikaava typelle, ja muille aineille  $ZR$  korvataan edellisen aineen arvolla (ks. kuva 3. kromatogrammi). Kalibraatioarvoa käytetään kyseisen alkuaineen näytemittausten massaprosentin määrittämissä.



**KUVA 3.** CHNS-kromatogrammi (kuva Janne Junninen, mukailleen PerkinElmer 2400 Series II CHNS/O Analyzer user's manual -käyttöoppaan pohjalta)

Suosittelut kalibroitireagenssi riippuu siitä, mitä moodia halutaan käyttää ja mitä alkuainetta mitata. CHN-moodin kalibroinnissa suositellaan käytettäväksi asetaniidia. CHNS-moodille suositellaan kystiiniä ja happimoodille bentsoehappoa. CHNS-moodille voidaan lisäksi asettaa vain rikin määrittystä varten oma nollanäyte, joka pelkäästään tyhjän tina-astian sijaan on hiiltä, vetyä ja typpeä mutta ei rikkiä sisältävä reagenssi. Esimerkiksi CHN-moodissa käytetty asetaniidi soveltuu tähän. Näin saadaan tarkempia tuloksia varsinkin näytteistä, joissa on oletettavasti matala (< 10 %) rikkipitoisuus. Lisäksi CHNS-moodin laitteiston esikäsitelyssä käytetään sulfamiinihappoa, ja olostajanäytteitä on hyvä ajaa viisi tai kuusi CO<sub>2</sub>-kaasun aktiivisuuden takia.

## NÄYTTEEN KÄSITTELY

Homogenisoitu näyte asetetaan tinakapseliin, joka taitellaan paketiksi siten, että näytettä ei pääse karkuun. Tinakapseli reagoi eksotermisesti hapettimen kanssa polttoputkessa nostaan näytteen lämpötilan ~ 1800 °C:seen. Happimäärityksessä voidaan käyttää myös hopeakapselia. Näyte punnitaan tarkasti ja siirretään autosampleriin tai suoraan poltto-/pyrolyysiputkeen.



**KUVA 4.** Tinakapseli ja tarkkuusvaaka (kuva Janne Junninen)

Happimoodia käytettäessä on näytteen laatuun kiinnitettävä erityistä huomiota. Laitetta ei ole suunniteltu mittaamaan happipitoisuutta fluoria, fosforia tai piitä sisältävistä näytteistä. Lisäksi jotkin metallit aiheuttavat ongelmia. Näytteeseen voidaan tarpeen vaatiessa lisätä reagensseja, jotka poistavat metallien aiheuttamia häiriöitä. Hiilinäytteitä mitattaessa on hiili ensin demineralisoitava, jotta happi saadaan mitattavaan muotoon eikä näyte pääse myrkyttämään happiputken katalyyttireagenssia.

## **POLTTO/PYROLYYSI**

Näytteen poltto/pyrolyysi tapahtuu uunissa, jonka sisällä on poltto-/pyrolyysiputki. Jokaiselle moodille on oma putkensa, joiden sisältö vaihtelee moodista riippuen. Yleisesti putki koostuu näyteastiasta sekä hapetin- ja pelkistinreagensseista. Hiilivedyt palavat happirikkaassa ympäristössä riittävässä kuumuudessa täydellisesti muodostaen hiilidioksidia ja vettä. Typpi- ja rikkiyhdisteet pelkistetään yksinkertaisiksi molekyyleiksi. Pelkistinreagenssit voivat olla samassa putkessa hapettimien kanssa tai omassa reduktioputkessaan. Laitteistossa on jokaiselle moodille omat poltto/pyrolyysi- ja reduktioputket, mutta vain CHN-moodissa reduktioputkessa on pelkistinreagensseja. CHNS- ja happimoodissa lait-

teiston erillinen reduktioputki on tyhjä lukuun ottamatta suojaavaa kvartsilapalasta. Happimoodissa linjastoon asennetaan erillinen kaasun pesuputki, joka poistaa happoja. Eri reagenssit erotetaan toisistaan putken sisällä kvartsilapalalla. CHN- ja CHNS-moodeissa polttokaasuna käytetään happea. Happimoodissa käytetään viisiprocenttista vety-heliumseosta. Happimoodia käytettäessä on erityisesti huolehdittava siitä, että happikaasun linja ei ole kytkettyä laitteeseen.

CHN-moodissa polttoputkessa hapettimena toimii korkean lämpötilan EA 1000 -hapetin. Hopeavanadaattia ja hopeavolframaatti-/magnesiumoksidireagenssia käytetään matalan lämpötilan hapettimina. Ne poistavat myös halogeeneja ja rikin oksideja sekä korrosoivia kaasuja. Polttoputken pohjalla oleva hopeaverkko, joka pitää reagenssit paikallaan, on inertti mitattavien kaasujen suhteen ja poistaa osaltaan halogeeneja. Reduktioputken suulla on jälleen hopeaverkko. Pelkistinreagensseina toimivat kupari ja kuparioksidi, jotka pelkistävät typen oksidit alkuainetypeksi sekä poistavat poltosta jääneen ylimääräisen hapen. Lisäksi reduktioputken kuuluu lämpöä johtava diffuusiutulppa, joka varmistaa, että vesi pysyy kaasumaisessa muodossa reduktioputken jälkeen. Polttoputken tyypillinen käyttölämpötila on 925 °C, ja reduktioputken tyypillinen käyttölämpötila on 640 °C.

CHNS-moodissa polttoputki toimii sekä poltto- että reduktioputkena. Hapettimena käytetään EA 6000 -reagenssia, joka on vahva korkean lämpötilan hapetin. Se ei myöskään reagoi rikin oksidien kanssa. Pelkistimenä toimii kupari, joka pelkistää typen oksidit alkuainetypeksi ja rikin oksidit rikkidioksidiksi sekä poistaa ylimääräisen hapen. Reduktioputki on tyhjä lukuun ottamatta kvartsilapalaa. Polttoputken tyypillinen käyttölämpötila on 975 °C.

Happimoodissa pyrolyysikammion putki toimii sekä pyrolyysi- että reduktioputkena. Platinaverkko pitää materiaalit oikealla paikallaan sekä katalysoi happea sisältävien tuotteiden muuttumisen hiilimonoksidiksi. Platinaverkon alla on platinoitu hiilikatalyytti, jonka avulla muutetaan happea sisältävät tuotteet hiilimonoksidiksi. Kupari pelkistää muodostuvat rikkiyhdisteet kuparisulfidiksi. Putken päässä on hopeaverkko, joka pitää reagenssit paikallaan ja auttaa poistamaan halogeeneja. Reduktioputki on happimoodissa tyhjä lukuun ottamatta kvartsilapalasta. Happimoodissa käytetään kaasunpesuputkea, joka sisältää magnesiumperkloraaattia sekä colorcarb-reagenssia (sis. mm. NaOH ja CaO). Kaasunpesuputki pesee kaasun muodostuneista hapoista. Pyrolyysikammion tyypillinen käyttölämpötila on 1000 °C.

## EROTUS

Polton/pyrolyysin ja pelkistämisen jälkeen kaasut ohjataan homogenisaattoriin. Homogenoitu kaasuseos ajetaan kantokaasun (helium) avulla erotuskolonneihin. Laite käyttää vyöhykekromatografista menetelmää, jossa näytekasua ajetaan jatkuvalla syötöllä kolonneihin.

Kolonnin stationäärifaasi alkaa saturoitua, ja pienimmän retentioajan omaava kaasumolekyylit korvautuu ensimmäisenä stationäärifaasin kanssa vahvemmin vuorovaikuttavalla molekyylillä erottuen puhtaana detektorille. Hitaampi molekyylit korvaa nopeamman stationäärifaasissa, ja näin eri kaasumolekyylit saadaan erottumaan selkeinä portaina, kunnes kolonni on täysin saturoitunut ja hitainkin molekyylit saapunut lopulta detektorille.

Detektorina toimii TCD (thermal conductivity detector, lämmönjohtodetektor), joka vertaa kantokaasun lämmönjohtokykyä näytekaasuun mittaamalla resistanssin muutosta käämissä. Kantokaasun lämmönjohtavuutta mittaava anturi pysyy vakiona, kun taas mitattavan kaasun osuessa näytettä mittaavaan anturiin sen lämmönjohtavuus pienenee nostaen resistanssia. Resistanssin muutos voidaan mitata.

## DETEKTOINTI JA TULOKSET

Tuloksena saadaan kromatogrammi (kuva 3), jossa nähdään selkeinä portaina eri mitattavien kaasujen osuudet. Nopeimman kaasun ( $N_2$ ) porras näkyy puhtaana. Seuraavien aineiden portaajat sisältävät pohjana edellisen kaasun signaalin, ja mitattava kaasun saadaan laskettua vähentämällä edellinen porras mitattavasta portaasta (nopeimman kaasun tapauksessa vähentämällä kantokaasun signaalista). Hapen tapauksessa kromatogrammi on yksiportainen, ja happi lasketaan vähentämällä CO-porras kantokaasusta. Aineen määrä painoprosentteina alkuperäisessä näytteessä lasketaan kaavalla 2:

$$\frac{(NR - ZR - NB) \times 100}{SW \times NKF}$$

Kaava 2 on esimerkkikaava, jolla lasketaan typen määrä painoprosenttina alkuperäisestä näytteestä. Kaavassa  $NR$  on typen mitattu lukema,  $ZR$  on kantokaasun lukema,  $NB$  on typen nollanäytteen lukema,  $SW$  on näytteen paino mikrogrammoina ja  $NKF$  on typen kalibraatioarvo. Hitaammille kaasuille  $ZR$  korvataan edellisen aineen arvolla.

## LOPUKSI

Alkuaineanalyysointori on nopea tapa mitata orgaanisen aineen kemiallinen koostumus. Mittausmenetelmän etuna on se, ettei näytteen tarvitse olla liuosmuodossa. Tämä yksinkertaistaa näytteen esikäsittelyä. Menetelmän haasteita ovat erilaisten näytteiden homogenisointi sekä kalibroinnin onnistuminen. Lisäksi tinakapseleiden preparointi ja punnitus vaativat harjaantunutta kättä hyvän toistettavuuden saavuttamiseksi. Laitteiston herkkyyden muuttuu käytön mukaan, ja tarkkojen tulosten saamiseksi on mittausten välissä ajettava kalibrointi- ja nollanäytteitä.

## LÄHTEET

McNair, Harold M., Miller, James M. & Settle, Frank A. Basic Gas Chromatography. Hoboken: John Wiley & Sons, Incorporated, 2009, p. 119–122

Award-winning results - 2400 Series II CHNS/O Elemental Analysis info booklet, saatavissa: [https://resources.perkinelmer.com/lab-solutions/resources/docs/BRO\\_2400\\_SeriesII\\_CHNSO\\_Elemental\\_Analysis.pdf](https://resources.perkinelmer.com/lab-solutions/resources/docs/BRO_2400_SeriesII_CHNSO_Elemental_Analysis.pdf)

PerkinElmer 2400 Series II CHNS/O Analyzer user's manual

Poole, Colin, ed. Gas Chromatography. Saint Louis: Elsevier, 2012, p. 478.



# BIOHIILEN HAITTA-AINEET JA NIIDEN VÄLTÄMINEN MAANPARANNUSKÄYTÖSSÄ SERTIFIOINNIN AVULLA

Henri Kettunen

Biohiilellä puhdasta kaasua ja kasvuvoimaa -hankkeen tavoitteena on kehittää biohiilipohjaisia tuoteaihoita parantamaan maaperän hiilensidontaa ja vedenpidätyskykyä sekä tehostamaan metsänkasvatusta uusin menetelmin. Hankkeen toimenpiteillä tehostetaan myös kaatopaikka- ja biokaasujen käsittelyä. Hankkeen toteutusaika on 1.1.2020–31.12.2022. Hanketta rahoittavat Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan aluekehitysrahastosta, Suur-Savon energiasäätiö sr sekä Metsäsairila Oy.

BioGo-hankkeessa tutkitaan biohiilen ominaisuuksia toimia kasvun edistäjänä valmistamalla biohiiltä sisältäviä kasvupalloja, joihin lisätään muun muassa männynsiemeniä. Tällaisilla kasvupalloilla on potentiaalia toimia puiden ravinteikkaampana kasvualustana sellaisilla maa-alueilla, joilla kasvuolosuhteet ovat ilman ylimääräisiä apukeinoja haastavat tai jopa mahdottomat (kuva 1). Lisäksi hankkeessa tutkitaan erilaatuisten biohiilien ekotoksisuutta luminometrinenetelmällä.

Käytettäessä biohiiltä maanparannukseen täytyy sen valinnassa kiinnittää huomiota siihen, ettei se sisällä kasvua estäviä tai maaperää pilaavia haitta-aineita, joiden muodostuminen riippuu vahvasti biohiilen raaka-aineista ja valmistusprosessista. Joidenkin haitta-aineiden, kuten pelkkää hiiltä ja vetyä sisältävien PAH-yhdisteiden, muodostumista hiilipohjaisesta biomateriaalista pyrolyysiprosessissa ei kuitenkaan voida täysin välttää, mutta yhdisteiden pitoisuuksiin voidaan vaikuttaa valmistusprosessin parametreja säätämällä.



**KUVA 1.** Hankkeen aikana kerätään tietoa biohiilipohjaisten kasvupallojen soveltuvuudesta ravinneköyhille kasvualustoille (kuva Henri Kettunen).

## BIOHIILITUOTTEET OVAT TARKOIN SÄÄDELTYJÄ JO ENNEN SERTIFIOINTIA

Suomessa maanparannusaineiden haitta-aineiden raja-arvoja tulee noudattaa lannoitevalmistelain (539/2006) mukaisesti. Lannoitevalmistelain mukaisessa tyyppinimiluettelossa biohiili luetaan kasviperäiseksi kasvualustahiileksi. Suomessa valvovana viranomaisena biohiilituotteisiin liittyen toimii Ruokavirasto, joka vaatii haitta-aineiden osalta biohiilituotteiden raskasmetallipitoisuuksien ilmoittamisen (Ruokavirasto 2019). Lisäksi biohiilituotteet kuuluvat Euroopan kemikaalivirasto ECHA:n alaisuudessa REACH-kemikaaliasetuksen piiriin, ja biohiilen valmistajan tulee rekisteröityä asetuksen mukaisesti, mikäli biohiiltä tuotetaan yli tuhat kiloa vuodessa. REACH:n ohella biohiilituotteita koskevat CLP-asetuksen mukaiset pakkaus- ja varoitusmerkinnät (Tukes 2021).

Pakollisten lainvaatimusten noudattamisen lisäksi biohiilituottajat voivat hakea tuotteilleen vapaaehtoista sertifiointia, jolla osoitetaan biohiilituotteen tasainen laatu ja kestävän kehityksen mukainen valmistus. Euroopassa biohiilisertifiointia voi hakea European Biochar Certificate (EBC) -järjestöltä, kun taas kansainvälisemmin vastaavaa toimintaa suorittaa International Biochar Initiative (IBI). Näistä kahdesta EBC (2012) antaa haitta-aineille eri raja-arvot riippuen biohiilen käyttötarkoituksesta, kun taas IBI:n raja-arvot ovat yleisem-

pää muotoa ja maakohtaisia. EBC listaa myös raaka-aineet, joista sertifioitavan biohiilen valmistus on sallittua laatuluokittain. Tässä artikkelissa tutustutaan EBC:n ohjeistuksissa lueteltujen biohiilien haitta-aineiden lähteisiin ja kerrotaan niiden tutkimustoiminnasta.

## MONI HAITTA-AINE ON PERÄISIN JO RAAKA-AINEESTA

Maaperälle raskasmetallit muodostuvat kontaminanteiksi niiden biokertyvän potentiaalintakia, sillä ne eivät ole biohajoavia ja ne voivat myös päätyä ravintoketjuun. Maaperän korkeat raskasmetallipitoisuudet ovat siis riski kasveille sekä eläinten ja ihmisten terveydelle. Biohiili on saanut maailmalla huomiota sen kyvystä tehdä raskasmetallit liikkumattomiksi ja sen myötä raskasmetallien biokertyvyyden vähentämisestä kasveihin. Biohiilien on kuitenkin todettu toimivan myös raskasmetallien lähteenä tai lisäävän niiden määrää maaperässä. Biohiilissä raskasmetallit ovat peräisin niiden raaka-aineista. Ne kertyvät ja konsentroituvat biohiilen tuhkafraktioon pyrolyysiprosessissa muutamaa poikkeusta, kuten elohopeaa, lukuun ottamatta. Konsentroitumisen takia jo lähtökohtaisesti suuria raskasmetallipitoisuuksia sisältäviä raaka-aineita ei ole kannattavaa tuottaa biohiiliksi. Monissa tutkimuksissa raskasmetallipitoisuudet biohiilessä ovat jääneet alle kompostille asetettujen suositusrajojen, jotka toimivat myös sertifiointikriteerien lähtökohtana, mutta osassa tutkituista biohiilistä raskasmetallipitoisuudet ovat ylittäneet pintamaan raskasmetallien kokonaiskonsentraation Euroopan mediaanin. Tämä voi tietynlaisia biohiiliä käytettäessä johtaa raskasmetallitakaan muodostumiseen tietyille maaperille. Toisaalta raskasmetallien huuhtouma biohiilistä maaperään ei vaikuta todennäköiseltä, sillä raskasmetallien pitoisuudet tutkittujen biohiilien vesiliuoksissa ovat olleet hyvin alhaisia. Kuitenkaan toistaiseksi ei ole todisteita siitä, että biohiilen raskasmetalleilla olisi suoria toksisia vaikutuksia ainakaan kastemadoille, joihin suurin osa toksisuustutkimuksista on kohdistunut johtuen niiden avainasemasta ekosysteemeissä. (Lehmann & Joseph 2015, 572–586, Ndirangu ym. 2019, EBC 2012)

EBC:n asettamat raja-arvot raskasmetalleille biohiililuokittain on esitetty taulukossa 1. EBC-Agro-luokitellut biohiilet läpäisevät Suomen lainsäädännön mukaiset pitoisuusvaatimukset lannoitekäytössä muuten paitsi lyijyn osalta, joka on Ruokaviraston (2020) mukaan 100 mg/kg.

**TAULUKKO 1.** Raskasmetallien raja-arvot biohiililuokitusten mukaan (mukaillen EBC 2012)

Aine	EBC-Feed [mg/kg]	EBC-AgroBio [mg/kg]	EBC-Agro [mg/kg]	EBC-Material [mg/kg]
Pb	10	45	150	250
Cd	0,8	0,7	1,5	5,0
Cu	70	70	100	250
Ni	25	25	50	250
Hg	0,1	0,4	1,0	1,0
Zn	200	200	400	750
Cr	70	70	90	250
As	2,0	13	13	15
Ag	pitoisuus ilmoitettava			-

Eri tutkimuksissa on todettu, että raskasmetalleilla saastuneista raaka-aineista valmistetun biohiilen valmistuksessa tulisi noudattaa varovaisuutta. Raskasmetalleja runsaammin sisältävät biohiilet tulisi maanparannuskäytössä hyödyntää mahdollisuuksien mukaan esimerkiksi teollisuusalueilla. Vastaavasti puhtaampien biohiilien käytön tulisi keskittyä puhtaammille alueille, kuten maanviljelyskäyttöön ja puistoalueille. (Lehmann & Joseph 2015, 572–586)

## KLOORIYHDISTEIDEN MUODOSTUMISESTA BIOHIILIIN TARVITAAN LISÄÄ TUTKIMUSTIETOA

Huomattavasti vähemmän itse biohiilessä tutkittu, mutta EBC:n kriteerien mukaan tiukoin raja-arvoin valvottu haitta-aineryhmä PCB-yhdisteet eli polyklooratut bifenyylit ja muut klooriorganiset yhdisteet kuuluvat ihmislähtöisiin kemikaaleihin, joissa on hiili-, vety- ja klooriatomeja. PCB-yhdisteillä ei ole tiettyä hajua tai makua, ja niiden koostumus vaihtelee yhdisteen mukaan öljymäisestä vahamaiseen. Ympäristöön päästessään PCB-yhdisteet voivat levitä hajoamatta pitkiäkin matkoja, ja lopulta ne voivat kertyä kasvien maanpäällisiin osiin sekä pieneliöihin ja kaloihin. PCB-yhdisteiden on osoitettu aiheuttavan eläimissä syöpää, ja ne voivat myös vaikuttaa muun muassa immuuni- ja lisääntymisjärjestelmiin sekä hermostoon. (EPA 2020)

Polyklooratut dibentsodioksiinit ja dibentsofuraanit eli PCDD- ja PCDF-yhdisteet syntyvät epätoivottuina sivutuotteina poltettaessa orgaanisia materiaaleja sekä erilaisia jätteitä, jotka sisältävät klooria jäännöspitoisuuksina. Yhdisteitä voi muodostua myös paperituotannossa, kasvi- ja hyönteismyrkkujen valmistuksessa sekä metallurgisissa prosesseissa. Luonnossa niitä voi muodostua tulivuorenpurkauksissa ja metsäpaloissa. Lipofiilisten ominaisuuksiensa takia ne ovat herkästi biokertyviä ja vahvasti pysyviä. Tunnetuin näistä yhdisteistä lienee TCDD, jota sisältyi Vietnamin sodassa levitettyyn Agent Orange -kasvimyrkkyyn. (Pereira 2004)

Taulukossa 2 on esitetty EBC-Feed-laatuisten biohiilen raja-arvot polyklooratuille yhdisteryhmille. Maanparannuskäyttöön sovellettavissa luokituksissa EBC vaatii ainoastaan pyrolyysilaitoskohtaiset analyysit vuosittain. Vuosittain tarkistettavat raja-arvot ovat: PCB-yhdisteet 0,2 mg/kg ja PCDD/F-yhdisteet 20 ng/kg. Toistaiseksi nämä samat raja-arvot koskevat myös EBC-Material-luokitusta luotettavampien riskiarviointien puuttuessa. (EBC 2012)

**TAULUKKO 2.** Polykloorattujen yhdisteiden raja-arvot EBC-Feed-luokituksessa (mu-  
kaillen EBC 2012)

Yhdisteryhmä	Hälytysraja [ng/kg]	Raja-arvo [ng/kg]
PCDD/PCDF	0,50	0,75
DL-PCB	0,35	-
PCDD/PCDF + DL-PCB	-	1,25
Σ 6 DIN-PCB	-	10 µg/kg

PCB-yhdisteiden muodostuminen biohiileen kasviperäisistä jätteistä on hyvin epätodennäköistä verrattuna esimerkiksi keittiöjätteistä valmistetuista biohiilistä havaittuihin pitoisuuksiin. Keittiöjätteissä kloori on peräisin etenkin ruokasuolasta (natriumkloridista). Kuitenkin niin PCB- kuin PCDD/F-yhdisteiden muodostumista pyrolyysissä on tutkittu vielä vähäisesti. Eräässä tutkimuksessa klooriorganisia yhdisteitä ei löytynyt lännenhirssin pyrolyysissä 300–500 °C:n lämpötiloissa, mutta polykloorattuja bentseenejä, jotka voivat olla mahdollisia PCDD/F-yhdisteiden edeltäjiä, löydettiin sinimailasen poltossa. Tutkijat ovat päättelleet hapen olevan avainasemassa polykloorattujen yhdisteiden muodostumisessa. Tästä vielä hyvin rajoittuneesta tiedosta voidaan päätellä, ettei pyrolyysiprosessissa muodostu polykloorattuja aromaattisia yhdisteitä, ellei prosessin raaka-aineissa ole näiden yhdisteiden muodostumiselle soveltuvia edeltäjiä. Aiheesta on kuitenkin vielä niin vähän dataa, että toistaiseksi ei voida antaa mitään yleistyksiä kyseisten yhdisteiden muodostumisesta tai muodostuvasta pitoisuudesta biohiiliä valmistettaessa. (Riikonen 2019, Lehmann & Joseph 2015, 595–617)

## PAH-YHDISTEIDEN HALLINTA ONNISTUU PROSESSIN OPTIMOINNILLA

PAH-yhdisteet eli polyaromaattiset hiilivedyt ovat biohiilen haitta-aineista selvästi eniten tutkittu haitta-aineryhmä. Tutkimukset perustuvat pääasiassa 16 US EPA PAH-yhdisteisiin, ja ne myös kuuluvat EBC-järjestön asettamiin biohiilien sertifikaattivaatimuksiin. Korkeat PAH-pitoisuudet biohiilissä johtuvat etenkin sopimattomista prosessiolosuhteista, mutta myös raaka-aineella voi olla merkitystä muodostuviin pitoisuuksiin. Esimerkiksi puupohjaisilla biohiilillä on todettu alempia PAH-pitoisuuksia verrattuna oljista tuotettuihin biohiiliin. (EBC 2012, Riikonen 2017.)

Taulukossa 3 on esitetty 16 US EPA PAH -yhdisteiden raja-arvot EBC:n eri biohiililuokitusten mukaisesti. Lisäksi bentso[a]pyreeni huomioidaan tarkennettuna kriteerinä vain EBC-Feed-luokittelussa biohiilessä. EBC-Material-luokittelun kriteerin perusteena on se konsentraatio, joka on nähty työntekijöiden altistumisen kannalta vielä haitattomaksi käsiteltäessä rakennusmateriaaleja ilman erikoisuojaustoimenpiteitä. Tulevaisuudessa saatetaan myös sallia korkeampia PAH-pitoisuuksia sisältävien biohiilien käyttö esimerkiksi asfaltoinnissa, vaikka nykyisenkään maksimipitoisuuden alittamista ei nähdä suurena ongelmana oikein toimivissa pyrolyysilaitoksissa. (EBC 2012)

**TAULUKKO 3.** PAH-yhdisteiden raja-arvot biohiiluokitusten mukaan (mukaillen EBC 2012)

PAH	EBC-Feed [mg/kg]	EBC-AgroBio [mg/kg]	EBC-Agro [mg/kg]	EBC-Material [mg/kg]
Σ 16 US EPA PAH	4,0 ± 2,0	4,0 ± 2,0	6,0 + 2,2	30
Bentso[a]-pyreeni	25	-	-	-

Tietämys PAH-yhdisteiden muodostumisesta palamisprosessissa on hyvin tunnettu laboratorio-olosuhteissa, mutta erilaisten biohiilien pyrolyysiprosessin vaikutus yhdisteiden muodostumiseen on vielä rajallista. Yleinen käsitys on, että kevyet PAH-yhdisteet muodostuvat matalissa lämpötiloissa ja lämpötilan kasvaessa ne fuusioituvat raskaammiksi yhdisteiksi. Kevyet yhdisteet voivat prosessissa haihtua herkemmin, kun taas raskaammat tarttuvat biohiilen pinnoille. Maksimilämpötila on todettu kriittisimmäksi prosessimuuttujaksi yhdisteiden muodostumisen kannalta. Suurimpia PAH-pitoisuuksia on todettu noin 500 °C:n lämpötiloissa prosesseissa, jossa lämpötilaa nostetaan hitaasti. Raaka-aineilla ei ole todettu olevan suurta merkitystä muodostuviin PAH-kokonaispitoisuuksiin, mutta eri tutkimuksissa on tehty ristiriitaisia päätelmiä esimerkiksi prosessin kokonaisajan sekä lämmönoston nopeuden vaikutuksista. Samoin eri tutkimuksissa käytettyjen analyysi- ja näytteenotomenetelmien sekä pyrolyysilaitteistojen erilaisuus hankaloittavat tulosten tulkintaa ja parhaiden käytäntöjen yleistämistä. (Lehmann & Joseph 2015, 595–617, Dutta ym. 2017)

Turvallisten raaka-aineiden valinta ja pyrolyysiolosuhteiden optimointi ovat kriittisiä tekijöitä, joilla voidaan kontrolloida biohiilen haitta-aineprofilia. Oikein valmistetun biohiilen sisältämät PAH-pitoisuudet ovat kuitenkin suhteellisen alhaisia ja hyväksyttäviä ympäristölainsäädännön näkökulmasta. (Dutta ym. 2017)

## TUTKIMUSTIETOA KÄYTÄNNÖSTÄ TARVITAAN LISÄÄ – SAMOIN PITKÄN AIKAVÄLIN SEURANTAA

Edellä mainittujen haitta-aineiden lisäksi eri raaka-aineista vapautuu lämmitysproesseissa aina useita haihtuvia orgaanisia yhdisteitä. EBC ei määrittele biohiilen eri VOC-yhdisteille tiettyjä raja-arvoja jo siitä syystä, että niiden moninaisuuden takia niiden tarkempi analysointi kävisi erittäin kalliiksi. Niiden seurantaakin kuitenkin suoritetaan arvioimalla pikeminkin itse pyrolyysiprosessia, joten sertifikaatin kriteereissä vaaditaan pyrolyysilaitoksen ensimmäisestä sertifioitavasta biohiilierästä TGA-kuvaaja. Tämän analyysin perusteella pystytään todentamaan valmistetun biohiilen VOC-kokonaismäärä ja siitä voidaan myös päätellä prosessin maksimilämpötila. (EBC 2012)

Oleellista PAH-yhdisteiden kuten muidenkin haitta-aineiden osalta on yhdisteiden biosaataavuus, kun biohiiltä käytetään ympäristössä. Hilber ym. (2015) totesivat laboratoriomittakaavan tutkimuksessaan suurimman osan biohiilinäytteistä osoittavan marginaalista biosaataavuutta PAH-yhdisteiden osalta ja biohiilen nähtiin toimivan ennemminkin PAH-yhdisteiden nieluna kuin lähteenä. Tutkimuksessa kuitenkin todettiin, että biohiilen lähtökohtaisesti sisältämää korkeaa yhteenlaskettua PAH-kokonaiskonsentraatiota tulisi välttää, koska se voi olla merkki myös korkeammasta biosaataavilla olevasta osuudesta.

Biohiilen sisältämien PAH-yhdisteiden ympäristökohtalo on vielä kaiken kaikkiaan heikosti ymmärretty. Kuitenkin sorptiokyky nähdään avaintekijäksi määrittämään biohiilen orgaanisten aineiden kohtalon. Myös maaperätyypillä voi olla suuri merkitys eri yhdisteiden käyttäytymiseen. Lisäksi biohiilellä on kyky stimuloida maaperän mikrobeja, jolloin sen lisääminen maaperään voi vaikuttaa vahvasti maaperän PAH-yhdisteiden heikkenemiseen. (Dutta ym. 2017)

Godlewska ym. (2021) huomauttavat selvityksessään, että tutkimukset, joissa biohiili todetaan toksiseksi, on usein suoritettu huomioimatta biohiilen pitoisuutta osana maaperää, vaan on tutkittu pelkkää hiiltä, joka ei siis vastaa todellista käytäntöä. Selvityksen mukaan tähän mennessä on tehty vain yksi tutkimus biohiilen PAH-yhdisteiden vaikutuksesta ympäristöön maanparannustarkoituksessa. Siinä arvioitiin PAH-yhdisteiden vapaata pitoisuutta maaperästä, jota oli parannettu kahdella eri biohiilen käyttömäärällä. Vuoden aikana maaperän vapaiden PAH-yhdisteiden pitoisuudet pienenevät 26–36 prosenttia, ja tutkimuksen lopussa yli kahden vuoden jälkeen pitoisuudet olivat pienentyneet 40–42 prosenttia verrattuna maanäytteeseen, jossa ei ollut biohiiltä. Vaikka vapaat pitoisuudet pienenevät, havaittiin myös, että PAH-yhdisteiden hajoaminen maaperässä oli vähentynyt biohiilen läsnä ollessa, mistä pääteltiin biohiilen voivan toisaalta lisätä PAH-yhdisteiden pysyvyyttä maaperässä.

An ja Huang (2015) ovat teorioineet biohiilen ympäristökohtaloa, kun sitä käytetään haitta-aineilla saastuneen maaperän puhdistamiseen alueilla, joilla on vaihtelevat ilmasto-olosuhteet. Biohiili ei heidän näkemyksensä mukaan niinkään vähennä haitta-aineiden määrää ympäristössä, vaan sen teho perustuu kykyyn tehdä yhdisteistä liikkumattomia. Olosuhteitten mukaan jotkut haitta-aineista voivat myös hajota, mutta osa vain kertyy biohiileen, joka toimii haitta-aineiden nieluna. Vaihtelevista ilmasto-olosuhteista voi kuitenkin seurata, että biohiilen sorptiotasapaino järkkyy, mikä voi johtaa tilanteeseen, jossa biohiili alkaakin luovuttaa joitain aineita ympäristöön. Biohiilen sorptiokapasiteetin ollessa täynnä se siis menettäisi tehonsa. Tämän takia tutkijat painottavat harkintaa biohiilen maaperäkäytössä sen peruuttamattomuuden vuoksi, sillä biohiiltä on erittäin vaikea erotella maaperästä levityksen jälkeen. Tällöin voidaan joutua tilanteeseen, jossa maaperään täytyy lisätä uutta biohiiltä, että päästäisiin samaan puhdistustehokkuuteen kuin alun perin. Tutkijat myös huomauttavat, että mikrobitoimintaan vaikuttava biohiili voi häiritä luonnon omia maanpuhdistusmekanismeja.



Duttan ym. (2017) selvityksen mukaan eräs tutkimusryhmä oli todennut biohiilen lisäävän PAH-yhdisteiden huuhtoutumista maaperän läpi sateiden myötä. Tämä liitettiin siihen havaintoon, että biohiilestä vapautui merkittäviä määriä liuennutta orgaanista hiiltä, joka yhdessä biohiilen pölypartikkeleiden kanssa sitoi PAH-yhdisteitä ja mahdollisti niiden huuhtouman. Tästä huolimatta PAH-yhdisteiden pitoisuudet maaperänäytteissä olivat alle raja-arvojen. Tulosten perusteella kuitenkin jäi epäselväksi, olivatko PAH-yhdisteet peräisin maasta vai tarttuneet biohiileen. Selvityksen tekijät ehdottavat tulevien tutkimusten keskittyvän eri muuttujiin, jotka kontrolloivat PAH-yhdisteiden sorptiota biohiileen ja sen saturoitumiseen, sekä mikrobien rooliin PAH-yhdisteiden lisääntyneessä biosaatavuudessa ja sen myötä yhdisteiden pysyvyyteen maaperässä.

## YHTEENVETO

Biohiilessä mahdollisesti piileskelevät haitta-aineet riippuvat vahvasti sen valmistukseen käytetystä raaka-aineesta. Laadukkaasta raaka-aineesta ei kuitenkaan saada tuotettua hyvälaatuista biohiiltä, jos pyrolyysiprosessia ei ole säädetty oikein. Nykyisen tietämyksen perusteella etenkin kasvipohjaisten sekä oikeissa prosessiolosuhteissa valmistettujen ja tämän myötä eri haitta-aineiden hyväksytyt raja-arvot alittavien biohiilien kohtuullista käyttöä maanparanteena ei tulisi silti pelätä. Oikein käytettynä biohiili voi edistää maaperän kasvuominaisuuksia ja olla mitä parhain ekoteko myös hiilensidonnan osalta, sillä kaikki hiili, joka on sidottuna pitkäaikaisesti biohiileen, on pois ilmakehän hiilidioksidista ja tämän myötä hillitsee ilmastonmuutosta.

EBC:n sertifiointin mukaisia haitta-aineiden raja-arvoja noudattamalla voidaan muistakin kuin täysin kasviperäisistä raaka-aineista valmistettuja biohiiliä hyödyntää muissa käyttötarkoituksissa. Esimerkiksi käyttö rakennusmateriaalien osakomponenttina sekä biokaasujen suodatus ja jätevesien käsittely ovat potentiaalisia hyödyntämisalueita sellaisille biohiilille, jotka eivät sovellu maanparannukseen. Suodatusmateriaalina käytettyjä biohiiliä voidaan myös ainakin jossain määrin regeneroida uudelleenkäytettäväksi. Kuitenkin suhteellisen uutena tutkimuskohteena erilaisista biohiilistä ja niiden käytöstä eri tarkoituksiin tarvitaan runsaasti lisää tietoa ennen tarkempien suositusten antamista. Samoin biohiilen maanparannuskäyttöön yhdistettävät näytteenotto- ja analyysimenetelmät tulisi standardoida siten, että eri materiaaleista ja eri prosesseissa valmistettujen biohiilien tarkempi ja relevantimpi vertailu olisi mahdollista.

## LÄHTEET

An, C. & Huang, G. 2015. Environmental concern on biochar: capture, then what? (report). *Environmental Earth Sciences* 74 (12), 7861-7863. Verkkolehti. Saatavissa: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-015-4741-8> [viitattu 14.9.2020].

Dutta, T., Eilhann K., Satya Sundar, B., Byong Hun, J., Akash, D., Minori, U. & Ki-Hyun, K. 2017. Polycyclic aromatic hydrocarbons and volatile organic compounds in biochar and biochar-amended soil: a review. *GCB Bioenergy* 9, 990–1004. Verkkolehti. Saatavissa: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcbb.12363> [viitattu 26.8.2021].

EBC 2012. European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Switzerland. Version 9.5E of 1st August 2021. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.european-biochar.org/media/doc/2/version\\_en\\_9\\_5.pdf](https://www.european-biochar.org/media/doc/2/version_en_9_5.pdf) [viitattu 26.8.2021].

EPA 2020. Polychlorinated Biphenyls (PCBs): Learn about Polychlorinated Biphenyls (PCBs). WWW-dokumentti. Päivitetty 6.2.2020. Saatavissa: <https://www.epa.gov/pcbs/learn-about-polychlorinated-biphenyls-pcbs> [viitattu 25.9.2020].

Godlewska, P., Ok Yong, S. & Oleszczuk, P. 2021. The dark side of the black gold: Ecotoxicological aspects of biochar and biochar-amended soils. *Journal of Hazardous Materials*, Volume 403. Verkkolehti. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389420318227> [viitattu 26.8.2021].

Hilber, I., Mayer, P., Gouliarmou, V., Hale, S., Cornelissen, G., Schmidt, H. & Bucheli, T. 2017. Bioavailability and bioaccessibility of polycyclic aromatic hydrocarbons from (post-pyrolytically treated) biochars. *Chemosphere (Oxford)* 174, 700–707. Verkkolehti. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653517301923?via%3Dihub> [viitattu 26.8.2021].

Lehmann, J. & Joseph, S. 2015. Biochar for environmental management. 2. painos. Lontoo: Routledge.

Ndirangu, S., Liu, Y., Xu, K. & Song, S. 2019. Risk evaluation of pyrolyzed biochar from multiple wastes. *Journal of Chemistry* Volume 2019. Verkkolehti. Saatavissa: <https://www.hindawi.com/journals/jchem/2019/4506314/> [viitattu 14.9.2020].

Pereira, M. 2004. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDD), dibenzofurans (PCDF) and polychlorinated biphenyls (PCB): main sources, environmental behaviour and risk to man and biota. *Química Nova* 27 (6). Verkkolehti. Saatavissa: <https://www.scielo.br/j/qn/a/HZ4dc4mB9qtz4PS36mGtcgw/?lang=en> [viitattu 25.9.2020].

Riikonen, A. 2019. Biohiili ja sen käyttömahdollisuudet viherrakentamisessa. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.hel.fi/static/liitteet/kaupunkiymparisto/julkaisut/julkaisut/julkaisu-19-19.pdf> [viitattu 24.8.2021].

Ruokavirasto 2019. Kansallinen lannoitevalmisteiden tyyppinimiluettelo. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.ruokavirasto.fi/globalassets/yritykset/lannoiteala/tiedostot/tyyppinimiluettelo\\_konsolidoitu\\_22\\_11\\_2019.pdf](https://www.ruokavirasto.fi/globalassets/yritykset/lannoiteala/tiedostot/tyyppinimiluettelo_konsolidoitu_22_11_2019.pdf) [viitattu 9.9.2021].

Ruokavirasto 2020. Haitalliset aineet ja hygienia. WWW-dokumentti. Päivitetty 16.6.2020. Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/yritykset/rehu-ja-lannoiteala/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/haitalliset-aineet-ja-hygienia/> [viitattu 9.9.2021].

Tukes 2021. Tiettyjä aineryhmiä koskevat poikkeukset REACH-asetuksen mukaisista velvoitteista. WWW-dokumentti. Ei päivitystietoja. Saatavilla: <https://tukes.fi/kemikaalit/reach/soveltamisala/poikkeukset-ryhmittain> [viitattu 3.9.2021].

# BIOHIILEN UUDET KÄYTTÖKOHTEET RAKENNUSMATERIAALINA

Riina Tuominen & Hanne Soininen & Jussi Heinimö

Betonin raaka-aineena käytettävän sementin hiilijalanjälki on suuri valmistusprosessin energiantensiivisyydestä johtuen. Teollisuuden alalla onkin halua ja kiinnostusta löytää valmistukseen uusia vähähiilisiä ja kiertotaloutta tukevia tekniikoita ja materiaaleja. Myös ilmastonmuutoksen hillintä kannustaa etsimään uusia tapoja hiilensitomiseen sekä vaihtoehtoisia teollisia prosesseja ja tuotteita, joiden avulla toiminnan hiilijalanjälkeä voidaan pienentää.

BiBe – Biohiilen uudet käyttökohteet rakennusmateriaalina -hankkeessa selvitetään biohiilen soveltuvuutta ja käyttömahdollisuuksia betoni- ja rakennusteollisuuden uutena materiaali-vaihtoehtona. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun ja Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy:n yhteishankkeessa kehitetään ja testataan uusia biohiilipohjaisia ratkaisuja ja aktivoidaan myös sidosryhmiä mukaan kehitystyöhön ja tuomaan niitä markkinoille. Hanketta rahoittaa Etelä-Savon maakuntaliitto Euroopan aluekehitysrahastosta.

## BIOHIILIEN MAHDOLLISUUDET RAKENNUSTEOLLISUUDEN RAAKA-AINEENA

BiBe-hankkeessa kartoitetaan ja tunnistetaan ne biohiilen ominaisuudet, jotka vaikuttavat sen soveltuvuuteen rakennusmateriaaleissa eri käyttökohteissa. Lisäksi selvitetään, millaisia vaatimuksia erilaiset rakennuskohteet asettavat biohiilibetonille ja muille biohiilimateriaaleille. Huomioon otetaan muun muassa rakennusmääräykset ja lainsäädäntö sekä myös vähähiilisen rakentamisen tiekartta. Osana käytettävyydestä arvioidaan myös biohiilibetonin ja muiden biohiilimateriaalien käytön vaikutusta rakennuksen hiilijalanjälkeen sekä hiilikädenjälkeen.

Selvitysten pohjalta voidaan määrittää biohiilen kaupallistamisen ja käyttöönoton kannalta kiinnostavimmat kohteet. Potentiaalisia biohiilituotteita voidaan tutkia tarkemmin laboratorio- ja pilot-mittakaavan kokeiden avulla sekä mahdollisena erillisenä demonstraatiohankkeena.

## BIOHIILEN UUSIEN KÄYTTÖMAHDOLLISUUKSIEN TESTAAMISTA

Laboratorio- ja pilot-mittakaavan kokeiden aikana testataan biohiilen käyttöä erilaisissa koekappaleissa. Testausten avulla pyritään saamaan selville, miten biohiili vaikuttaa rakennusmateriaalien, erityisesti betonin ominaisuuksiin. Laboratoriomittakaavan kokeilla selvitetään, millaista biohiiltä biohiilibetonin valmistuksessa voidaan käyttää ja kuinka paljon biohiiltä voidaan lisätä seokseen. Käytettävän biohiilen valintaan vaikuttavat muun muassa sen raaka-aine, valmistusprosessi ja raekoko. Biohiilestä tutkitaan myös sen käyttöön vaikuttavat haitta-aineet, kuten raskasmetallit ja PAH-yhdisteet.

Pienimuotoisia biohiili-betonirakenteita voidaan valmistaa muun muassa ei-kantaviin seinärakenteisiin ja hulevesirakenteisiin. Rakenteiden materiaalivaihtoehtojen kestävyyttä ja toimivuutta tarkkaillaan. Laboratorio-olosuhteissa monitoroidaan, ettei materiaaleista haihdu ilmaan haitallisia aineita, kuten VOC- ja PAH-yhdisteitä, tai liukene haitallisia aineita, jotka voisivat kulkeutua ympäristöön hulevesien mukana. Myös materiaalien pakkasenkestävyyttä ja jäätyminen vaikutusta materiaaleihin ja rakenteisiin tarkkaillaan. Seinärakenteissa käytettäville materiaaleille tehdään myös testauksia ilmankosteuden, lämpötilan siirtymisen ja äänen eristävyys osalta.

## TULOKSENA UUTTA TIETOA BIOHIILEN KÄYTETTÄVYYDESTÄ

Hankkeessa toteutettujen kokeiden tuloksena saadaan uutta tietoa biohiilen käytettävyydestä rakennusmateriaalien raaka-aineena sekä tietoa biohiilen vaikutuksesta betonin ominaisuuksiin sekä rakenteiden hiilijalanjälkeen. Pilot-kokeilla saadaan käytännön kokemusta tuotteiden toimivuudesta, mikä mahdollistaa kehitettyjen materiaalivaihtoehtojen laajemman käyttöönoton.

Hankkeen tavoitteena on löytää biohiilelle uusia nopeasti käyttöönotettavia ja kaupallistettavia käyttömahdollisuuksia ja -kohteita rakennusmateriaaleissa ja rakenteissa (kuva 1). Hankkeessa luodaan edellytyksiä erillisen demonstraation toteuttamiselle ja aktivoidaan sen toteuttamiseen tarvittavan eri toimijoista koostuvan verkoston muodostumista. Hankkeen toteutuksen aikana Miksei Mikkeli seuraa myös toimintaympäristössä tapahtuvia muutoksia verkostoitumalla yritysten kanssa. Hankkeen päättymisen jälkeen Miksei Mikkeli edistää hankkeen pohjalta syntyvien yritysten T&K-hankkeiden muodostumista osana perustoimintojaan.



**KUVA 1.** Biohiilellä voidaan korvata sementtiä betoniseoksissa (kuva Manu Eloaho).

# BIOHIILEN KÄYTTÖ RAKENNUSMATERIAALEISSA

Riina Tuominen & Miia Sourander

Ilmastonmuutoksen hillintä kannustaa etsimään uusia tapoja hiilen sitomiseen sekä innovatiivisia, vaihtoehtoisia teollisia prosesseja ja tuotteita, joiden avulla toiminnan hiilijalanjälkeä voidaan pienentää. Betonin raaka-aineena käytettävän sementin hiilijalanjälki on suuri valmistusprosessin energiaintensiivisyydestä johtuen. Teollisuuden alalla onkin halua ja kiinnostusta löytää valmistukseen uusia vähähiilisiä ja kiertotaloutta tukevia tekniikoita sekä materiaaleja.

Biohiilen käyttö rakennusmateriaaleissa mahdollistaa kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen ja hiilensidonnan lisäämisen. Biohiilen käytöllä rakennusmateriaaleissa voidaan saavuttaa myös monenlaisia hyödyllisiä ominaisuuksia. Biohiili voi parantaa huoneilman laatua, kuten sisätilojen kosteudensäätelyä. Biohiili voi vähentää myös lämmönjohtamista betonielementeissä.

## VÄHÄHIILISEN RAKENTAMISEN TIEKARTTA

Vähähiilisen rakentamisen tiekartta julkaistiin vuonna 2017. Suomi pyrkii kohti hiilineutraaliutta, ja hallitusohjelman 2019 tavoitteena on, että Suomi on hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä ja ensimmäinen fossiilivapaa hyvinvointiyhteiskunta. Rakennusteollisuus RT laati yhdessä sidosryhmien ja ympäristöministeriön kanssa vähähiilinen rakennusteollisuus 2035 -tiekartan. Suomen kasvihuonepäästöistä rakennetun ympäristön osuus on noin kolmannes. Yksittäisen rakennuksen hiilijalanjäljestä neljännes muodostuu rakentamisvaiheen ja rakennusmateriaalien päästöistä. Tavoitteena on vähentää näitä päästöjä 66 prosentilla vuoteen 2035 mennessä. Rakennusten elinkaari on pitkä sisältäen alueen maankäytön ja kaavoituksen sekä rakennuksen käytön, ylläpidon ja purkamisen. Koko rakennetun ympäristön päästöistä 76 prosenttia syntyy rakennusten käytön aikaisesta energiankulutuksesta. (Rakennusteollisuuden tiekartta vähähiilisyyteen 2020)

## BIOHIILI RAKENNUSTEOLLISUUDEN RAAKA-AINEENA

Biohiilen ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa raaka-ainevalinnalla, tuotanto-olosuhteilla ja biohiilen jälkikäsitteilyllä. Biohiilen ominaisuudet vaihtelevat ja valinta tulisi tehdä käyttötarkoituksen mukaan, sillä yhdessä biohiilessä ei ole kaikkia parhaita ominaisuuksia samaan aikaan. (Biohiilen asialla s.a) Yhtä biohiililaatua ei siis välttämättä voida käyttää moneen tarkoitukseen. Ominaisuuksiin vaikuttavat keskeisimmin valmistusmenetelmä, käytetty raaka-aine sekä hiilen jälkikäsitteily (Biohiili s.a).



Biohiilen valmistusprosessit eivät ole vakiintuneet täysin, ja tämä seikka vaikeuttaa biohiililaatujen keskinäistä vertailua. Biohiilen käyttöä rakennuskohteissa on tutkittu, mutta tutkimukset ovat painottuneet sisätiloihin. On tärkeää huomioida tämä asia, kun tulkitaan aikaisempia tutkimustuloksia ja selvitetään biohiilen soveltuvuutta kyseiseen käyttökohteeseen. Tähän mennessä tehdyt tutkimukset ovat antaneet suuntaa siihen, että biohiili parantaisi joidenkin materiaalien kestävyyttä, ja tällaisia materiaaleja voisivat olla esimerkiksi betoni ja asfaltti. Biohiilen lisääminen rakennusmateriaaliin voisi laskea mahdollisesti rakennusten lämmityksestä sekä jäähdytyksestä syntyviä kuluja, koska biohiilipohjainen materiaali näyttäisi toimivan hyvin eristeenä. Suomen sääolosuhteet huomioiden tämä biohiilen ominaisuus voisi rakennusmateriaalissa toimiessaan olla hyvinkin hyödyllinen. (Lassilantuomi 2020)

Biohiilen erittäin alhainen lämmönjohtavuus ja kyky imeä vettä jopa viisinkertaisesti painoonsa verrattuna tekevät siitä hyvän eristeen ja huoneilman kosteuden säätäjän. Biohiili on stabiili materiaali, jonka kyky sitoa ilmakehän hiilidioksidia on merkittävä. Lisäksi biohiilellä voi tutkimusten perusteella olla sisäilman laatua parantavia ominaisuuksia, sillä se sitoo itseensä haitallisia aineita sekä ylläpitää ilman kosteustasapainoa.

Päästöjen vähentämiseksi olisi tärkeää kehittää jätteiden ja sivuvirtojen hyödyntämistä sekä käsittelyprosesseja lisääntyvässä määrin. Biohiilen raaka-aineeksi on mahdollista soveltaa esimerkiksi puutarha- sekä puujätettä, jotka pyrolyysiprosessin avulla valmistetaan biohiileksi. (Landström ym. 2021) Rakentamisen kautta syntyvästä puujätteestä voisi olla mahdollista valmistaa biohiiltä, mutta sen tuottamisessa on aina selvitettävä esimerkiksi puujätteen sisältämät haitta-aineet. Haastetta tuo se, että rakennusjättepuu on usein sekalaa-tuista ja niihin tarvitaan monenlaisia käsittelyitä, jotka voivat nostaa luonnollisesti biohiilen valmistamisesta syntyviä kuluja sekä tuoda lisähaasteita tuotantoprosessiin. Toisaalta onnistunut puujätteen hyödyntäminen voisi edesauttaa kiertotaloustavoitteisiin pääsemisessä ja tuoda samalla uudenlaista liiketoimintaa sekä toimia vahvuutena myös kansainvälisessä markkinatilanteessa. (Lassilantuomi 2020)

## BIOHIILI SEMENTIN KORVAAJANA

Sementin valmistukseen käytetään pääraaka-aineena kalkkikiveä, joka louhitaan, murskaataan ja lajitellaan ennen raakajauhatusta. Kalkkikiveä ja muita mineraalisia raaka-aineita poltetaan korkeassa lämpötilassa, minkä jälkeen muodostunut sementtiklinkkeri jauhetaan hienoksi sementtijuauheeksi. Sementin valmistukseen kuluu runsaasti energiaa, ja lisäksi kalkkikivestä irtoaa sitä kuumennettaessa huomattava määrä hiilidioksidia. Suomen sementtiteollisuuden vuotuiset hiilidioksidipäästöt ovat noin 1,25 prosenttia Suomen vuosipäästöistä. (Sementti ja kasvihuonekaasupäästöt s.a., Sementin valmistus s.a.)

Sementin osittainen korvaaminen biohiilellä pienentää valmiiden betonituotteiden hiilijalanjälkeä. Esimerkiksi Finnsementin Plussementissä käytetään seosaineina masuunikuonaa ja kalkkikivijauhetta, jotka vähentävät sen hiilidioksidipäästöjä (Sementti ja kasvihuo-

nekaasupäästöt s.a.). Kalkki- ja sementtiseoksissa käytetty hiekka voidaan mahdollisesti korvata jopa kokonaan biohiilellä (Lampila 2019). Biohiilen käyttö betonin raaka-aineena voi keventää betonirakenteita sekä parantaa niiden lämmön- ja ääneneristävyttä. Biohiilibetonin käyttökohteita voisivat olla muun muassa erilaiset puisto- ja hulevesirakenteet, meluvallit, kevyet betonielementit sekä pintamateriaalit.

## BIOHIILI LAASTISSA

Pintamateriaaleissa, kuten erilaisissa laasteissa seoksen valmistuksessa on suositeltavaa käyttää mahdollisimman hienojakoista biohiiltä. Biohiilen määrällä voidaan vaikuttaa myös laastin väriin. Esimerkiksi Ithaka-instituutin tutkimuksissa biohiililaastiseos sisälsi 50 prosenttia biohiiltä, 30 prosenttia hiekkaa ja 20 prosenttia savea. (Schmidt 2013)

Biohiililaastit imevät hajuja ja toksiineja. Asuntokäytön ohella biohiililaastit voisivat soveltaa useisiin käyttökohteisiin, kuten varastoihin, tehtaisiin ja maatalousrakennuksiin sekä kouluihin, kirjastoihin ja sairaaloihin. (Schmidt 2013) Biohiilen vaikutusta huoneilmaan ja sen haitallisiin aineisiin, kuten PAH- ja VOC-yhdisteisiin, tulee kuitenkin tutkia lisää ennen sen käyttöönottoa.

## BIOHIILI ASFALTISSA

Itävallassa tutkitaan biohiilen käyttömahdollisuutta asfaltin raaka-aineena. Biohiilen lisäys asfalttiin voisi olla edesauttamassa tienrakennusalaan hiilen varastoinnissa. Tämän mallin käyttöönotto tienrakentamisessa Euroopan tasolla voisi lisätä hiilensidontaa ja vähentää ilmastopäästöjä. (Bier 2020)

Biohiilen hyödyntämistä voisi olla hyvä selvittää Suomessa esimerkiksi tieverkoston päällysteiden kunnossapidossa. Ennen soveltamista on kuitenkin tarvetta lisätä tutkimusta esimerkiksi siitä, kuinka asfaltti, johon on lisätty biohiiltä, käyttäytyy Suomen vaihtelevissa ja kylmissäkin sääolosuhteissa. (Lassilantuomi 2020)

## BIBE-HANKKEESSA SELVITETÄÄN BIOHIILEN KÄYTTÖKOhteITA

BiBe – Biohiilen uudet käyttökohteet rakennusmateriaalina -hankkeessa selvitetään biohiilen soveltuvuutta ja käyttömahdollisuuksia betoni- ja rakennusteollisuuden uutena materiaali-vaihtoehtona. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun ja Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy:n yhteishankkeessa kehitetään ja testataan uusia biohiilipohjaisia ratkaisuja ja aktivoidaan myös sidosryhmiä mukaan kehitystyöhön ja tuomaan niitä markkinoille. Hanketta rahoittaa Etelä-Savon maakuntaliitto Euroopan aluekehitysrahastosta.

Hankkeen kokeilla selvitetään biohiilten sisältämiä haitta-aineita sekä sementtiseoksissa ja muissa materiaaleissa käytettävän biohiilen biohiilikokoluokkaa ja biohiilisementtiseosuhteita. Lisäksi saadaan tietoa testattujen seosten ominaisuuksista, materiaalien skaalattavuudesta sekä toimivuudesta eri käyttökohteissa.

Hankkeessa testataan muun muassa sementin korvaamista biohiilellä pihalaatoissa. Kokeessa käytetään sementin korvaamiseen eri raaka-aineista valmistettua biohiiltä, myös biohiilen määrän vaikutusta testataan. Kuvassa 1 on nähtävissä pihalaattoja, kukkaruukkuja ja testikuutioita, joissa on käytetty biohiiltä korvaamaan sementtiä. Laatoissa sementtiä on korvattu biohiilellä 2–10 painoprosenttia, ja ne sijoitetaan Mikkeliin, jossa niiden kestävyttä seurataan.



**KUVA 1.** Hankkeen testeissä korvataan sementtiä biohiilellä betonituotteissa (kuva Riina Tuominen).

Yksi betonin laatua kuvaavista tekijöistä on betonin lujuus. Betonilla on suuri puristuslujuus, yleensä 30–80 MPa. Lujuuutta voidaan säätää betonin koostumuksella, ja erityisesti seoksen veden ja sementin määrällä on merkittävä vaikutus betonin lujuteen. Betonin käyttökohte vaikuttaa siihen, mitä lujuuksia tavoitellaan. (Betonin lujuus s.a.) Puristuslujuuden testaus antaa hyvän yleiskuvan myös betonin laadusta. Bibe-hankkeessa biohiilibetoniseosten puristuslujuutta testataan yhdessä KymiLabsin kanssa.

Hankkeen kirjallisuusselvityksillä ja kokeilla saadaan tietoa biohiilen käytettävyydestä rakennusmateriaalien raaka-aineena. Tarkastelemalla biohiilen lisäyksen vaikutusta materiaalin työstöön ja lopputuotteen ominaisuuksiin saadaan selvitettyä biohiilen mahdollisia käyttökohteita sekä toimivia seossuhteita. Biohiilen käyttö rakennusmateriaaleissa edistää kiertotaloutta ja voi tarjota myös mahdollisuuden pienentää rakentamisen hiilijalanjälkeä.

## LÄHTEET

Betonin lujuus s.a. Betoniteollisuus ry. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/ominaisuudet-ja-edut/betonin-lujuus/> [viitattu 31.8.2021].

Bier, H. 2020. First Green Asphalt implemented in Europe. European Biochar Industry. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.biochar-industry.com/2020/first-green-asphalt-implemented-in-europe/> [viitattu 3.9.2021].

Biohiili s.a. Carbons Finland Oy. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://carbons.fi/biohiili/> [viitattu 31.8-2021].

Biohiilen asialla s.a. Suomen Biohiilyhdistys. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.suomenbiohiili.fi/> [viitattu 31.8.2021].

Lampila, J. 2019. Biohiili – uudelleen löydetty aarre. Kestävä Energiatalous 19.9.2019. Saatavissa: <https://www.energiatalous.fi/?p=2483> [viitattu 31.8.2021].

Landström, M., Kohl, A., Puroila, S., Sihvonen, R. & Tamminen, S. 2021. Korjausliike - Suomi kohti 1,5 asteen tavoitteen mukaisia ilmastotoimia. Sitran selvityksiä 193. Elokuu 2021. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://media.sitra.fi/2021/07/18185827/korjausliike-suomi-kohti-15-asteen-tavoitteen-mukaisia-ilmastotoimia.pdf> [viitattu 3.9.2021].

Lassilantuomi, S.-S. 2020. Rakennusjätepuu biohiilen raaka-aineena ja biohiilen käyttösovellukset rakennusalalla. Hämeen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Bio- ja elintarviketekniikka. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2020110222081> [viitattu 3.9.2021].

Rakennusteollisuuden tiekartta vähähiilisyteen. 2020. Rakennusteollisuus. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiilisyys\\_uudet/rt-vahahiilinen-rakennusteollisuus-tiivistelma-2020-08-20.pdf](https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiilisyys_uudet/rt-vahahiilinen-rakennusteollisuus-tiivistelma-2020-08-20.pdf) [viitattu 31.8.2021].

Sementin valmistus s.a. Finnsementti Oy. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://finnsementti.fi/palvelut/tietoa-sementista/valmistus/> [viitattu 31.8.2021].

Sementti ja kasvihuonekaasupäästöt s.a. Betoniteollisuus ry. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/sementti-seosaineiden-kaytto/> [viitattu 31.8.2021].

Schmidt, H.-P. 2013. The use of biochar as building material – cities as carbon sinks. Ithika-Journal. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.ithaka-journal.net/pflanzenkohle-zum-hauser-bauen-stadte-als-kohlenstoffsenken?lang=en> [viitattu 31.8.2021].

# TUHKATIEKOE LABORATORIOSSA

Henna-Riikka Haikonen & Riina Tuominen

Vastuullista liiketoimintaa tuhkasta -hankkeessa tuotetaan tietoa tuhkan hyötykäyttömahdollisuuksista sekä luodaan edellytyksiä uudelle vastuulliselle yritystoiminnalle tuhkan hyötykäytössä. Hankkeen päätoteuttajana on Tapio Oy. Muita toteuttajia ovat Kaakois-Suomen ammattikorkeakoulu Oy ja Suomen metsäkeskus. Hanketta rahoittaa Hämeen ELY-keskus Manner-Suomen maaseudun kehittämissuunnitelmasta.

Osana ”Vastuullista liiketoimintaa tuhkasta” -hanketta toteutettiin tuhkatiekolonnikoe, jossa kolonnit tehtiin jäljittelemään rakennettuja tuhkateitä. Ympäristöseurantakohteisamme ei ollut mahdollisuutta tutkia tuhkan vaikutusta ympäristöön lysimetrien tai pohjavesinäytteiden avulla. Tavoitteena laboratoriokokeessa oli tutkia suotovesien laatua ja tuhkarakenteen käyttäytymistä.

## TUHKATEISTÄ MALLIA TUHKATIEKOLONNEIHIN

Voimalaitoksilta polttoprosesseissa syntyvää ylijäämätuhkaa voidaan uusiokäyttää raja-arvojen sallimissa rajoissa joko metsänlannoitukseen tai maanrakennukseen. Tuhkaa voidaan käyttää korvaamaan luonnonkiviainesta maarakennuksessa. Se soveltuu käytettäväksi sellaisenaan, mutta sitä voidaan käyttää myös tiivistettynä, seostettuna ja sidosaineena. Tuhkan laadusta riippuen sitä voidaan hyödyntää metsä- ja yksityisteiden rakentamisessa sekä kenttä-, tie-, tai katurakenteiden eri kerroksissa. Tuhka sitoo kiviaineita ja parantaa tiepohjan kestävyyttä ja kantavuutta. (Kauppila ym. 2021) Lentotuhkan käyttäytymiseen tierakenteessa vaikuttaa polttoprosessi, polttoaine, varastointi ja varastointiaika. Kosteus vaikuttaa lentotuhkan ominaisuuksiin, mikä on otettava huomioon suunnittelussa. (Martinlauri ym. 2016)

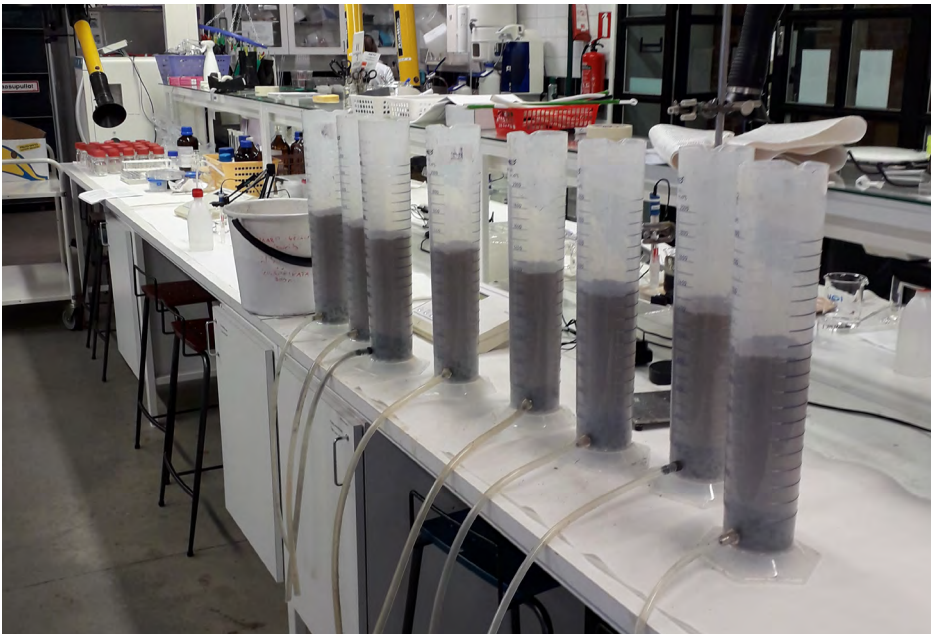
Tuhkan käytöstä erityisesti metsäteiden rakennusmateriaalina on viime aikoina saatu myönteisiä kokemuksia. Tapion toteuttamissa pitkäaikaisissa testeissä on metsätien kantavuuden todettu parantuneen tuhkakäsittelyn ansiosta ajan myötä. Testien yhteydessä tehdyissä seurannoissa ei ole havaittu tuhkatien aiheuttaneen merkittäviä pinta- tai pohjaveden laadun muutoksia eikä raskasmetallien kulkeutumista veteen. Tuhkaa voidaan käyttää ympäristön kannalta turvallisella tavalla tienrakennuksessa ja tierakenteiden on havaittu kestävän hyvin rasituksia. Tuhkan on kuitenkin täytettävä ympäristökriteerit ja tuhkaa sisältävä työmaa on suunniteltava, mitoitettava ja rakennettava ammattitaidolla. (Harju ym. 2019, Arnkil ym. 2020)

## TUHKATIEKOLONNIKOEEN PERUSTAMINEN

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulussa on hankkeen aikana tehty ympäristönseurantaa rakennetuilla tuhkatieillä ja tuhkalannoituskohteilla. Rakennettujen tuhkatieiden seurannan lisäksi suunniteltiin tuhkatiekolonnikoe. Kolonnit olivat kahden litran mittalasin sisälle rakennettuja pienoismalleja tierakenteista. Koetta varten tehtiin viisi erilaista tierakennetta, joissa tuhkan määrä ja koostumus vaihtelivat. Jokaisesta kolonnista rakennettiin kaksi rinnakkaisversiota, joilla pyrittiin lisäämään testin luotettavuutta. Kolonneissa oli poistoletku, josta tierakenteen läpi kulkenut suotovesi voitiin kerätä talteen ja analysoida.

Kokeessa käytettiin vanhennettua lentotuhkaa, jonka pitoisuudet ylittivät MARA-asetuksen raja-arvot osittain tutkittujen parametrien osalta. Maapohjaan käytettiin hiekkaa ja lannoittamatonta luonnonturvetta. Murskeena käytettiin hiekoitusmursketta, jonka raekoko oli 3–6 mm. Kolonnien pohjalle tehtiin pestystä murskeesta kerros ja murskekerroksen päälle laitettiin myös suodatinkangas, jolla pyrittiin estämään poistoletkujen tukkeutuminen maa-aineksella.

Testit aloitettiin tammikuussa 2021 kolonneiden rakentamisella. Ensin kolonneihin rakennettiin pelkät maapohjat, jotka olivat jokaisessa kolonnissa samanlaiset (kuva 1). Tämän jälkeen maapohjat kostutettiin ja kolonneista läpi tulleesta suotovedestä analysointiin pH, sähkönjohtavuus, lämpötila sekä sulfaatti- ja kloridipitoisuudet, jotta saatiin selvitettyä lähtötasoarvot. Suotovedestä analysoitiin myös raskasmetalleista kadmium, kupari, sinkki ja lyijy.



**KUVA 1.** Tuhkatiekolonnit, joihin on tehty maapohja (kuva Henna-Riikka Haikonen).

Alkutilanteen suotoveden keräyksen jälkeen kolonniehin lisättiin tuhkat ja murskeet. Murskeiden ja tuhkien määrät suhteutettiin vastaamaan todellisia tuhkatierakenteita. Ensimmäisiin testikolonnieihin ei lisätty maapohjan rakentamisen jälkeen mitään ja toisiin lisättiin maapohjan lisäksi 3 cm:n murskekerros, joten ne toimivat ikään kuin ”nollamalleina”.

Kolmannet testikolonnit rakennettiin tuhkamurskeseos-periaatteella, jossa tuhkan ja murskeen seossuhde oli 25 painoprosenttia ja seoksen kerrospaksuus putkessa 3 cm. Kaksi viimeistä tiemallia rakennettiin puolestaan tuhkatpatjateiksi. Tuhkaa tiivistettiin tiukaksi patjakerrokseksi toisiin rinnakkaiskolonnieihin 3 cm ja toisiin 5 cm ja näiden päälle lisättiin 1 cm:n murskekerros. Kolonnien rakenteet on esitetty tarkemmin taulukossa 1.

**Taulukko 1.** Kolonnikokeessa tehtyjen tuhkatiemallien rakenne.

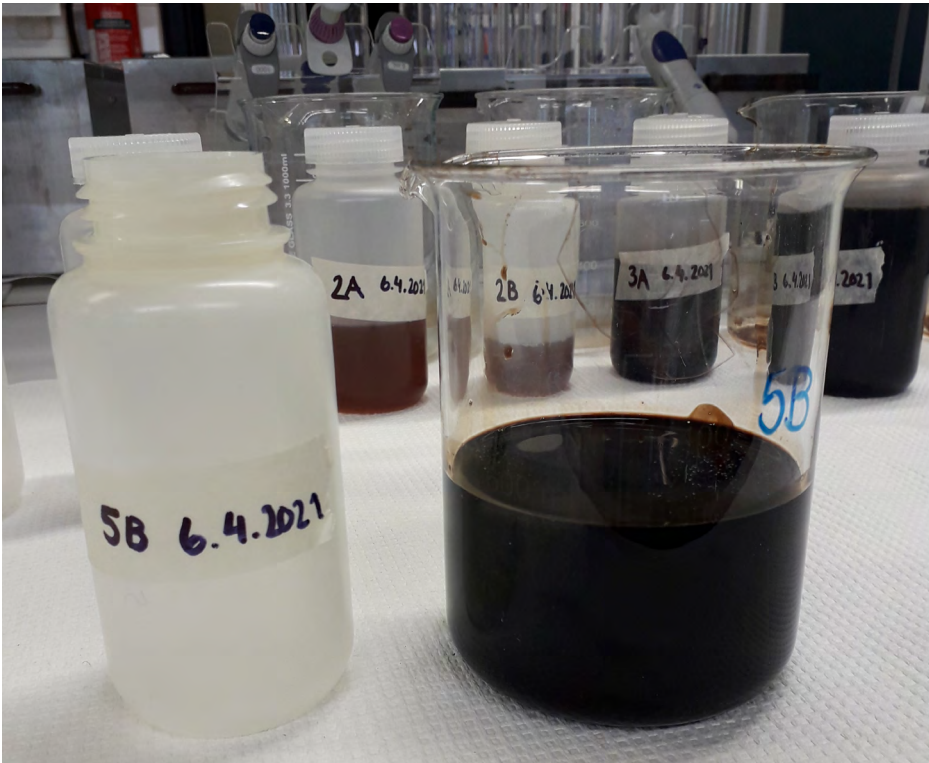
Kolonnitunnus	Rakenne
1A	Maapohja
1B	Maapohja
2A	Maapohja ja pesty murske 3 cm
2B	Maapohja ja pesty murske 3 cm
3A	Maapohja ja tuhkamurskekerros (25 p-%) 3 cm
3B	Maapohja ja tuhkamurskekerros (25 p-%) 3 cm
4A	Maapohja, tuhkatpatja 3 cm ja murske 1 cm
4B	Maapohja, tuhkatpatja 3 cm ja murske 1 cm
5A	Maapohja, tuhkatpatja 5 cm ja murske 1 cm
5B	Maapohja, tuhkatpatja 5 cm ja murske 1 cm

Kolonnien rakentamisen jälkeen niihin lisättiin vettä kerrallaan 50–300 ml. Pienemmällä vesimäärillä tehtiin useita lisäyksiä eri päivinä, kunnes suotovettä saatiin kerättyä analyysiin tarvittava määrä. Suuremmat lisäykset tehtiin kerralla. Vedenlisäysten yhteydessä tarkasteltiin kolonnien veden suotautumismääriä. Vaihtelevalla vesimäärällä pyrittiin simuloimaan luonnonsateita ja sulamisvesiä. Suotovettä pyrittiin keräämään vähintään 250 ml, jotta näyte riittäisi kaikkiin määrittelyihin. Vetenä käytettiin ionivaihdetta vettä, jonka pH mitattiin ennen lisäystä. Kokeen loppupuolella kolonnieihin käytettiin veden tilalla lunta 15–20 cm, jotta saatiin simuloitua myös sulamistapahtuma. Kolonnikoe purettiin toukokuussa 2021.

Suotovesistä mitattiin heti näyteveden keräyksen jälkeen lämpötila, pH ja sähkönjohtavuus. Kloridi-, sulfaatti- ja raskasmetallimäärityksiä varten näytteet pakastettiin, jotta määrittelyksiä voitiin tehdä kerralla useammasta näytteestä. Vesistä määritettiin fotometrillä sulfaatti- ja kloridipitoisuus sekä voltammetrillä kadmium-, kupari-, lyijy- ja sinkkipitoisuudet.



Raskasmetallianalyysiä varten suotovesinäytteitä jouduttiin happohajoittamaan ja laimentamaan, sillä erityisesti tuhkaa sisältäneiden kolonneiden suotovedet olivat sameita ja sisälsivät kiintoainetta (kuva 2). Myös kloridi- ja sulfaattipitoisuuden määrittystä varten suotovesinäytteitä oli laimennettava.



**KUVA 2.** Kolonneista kerätyt suotovedet olivat väriltään tummia ja sisälsivät kiintoainetta (kuva Henna-Riikka Haikonen).

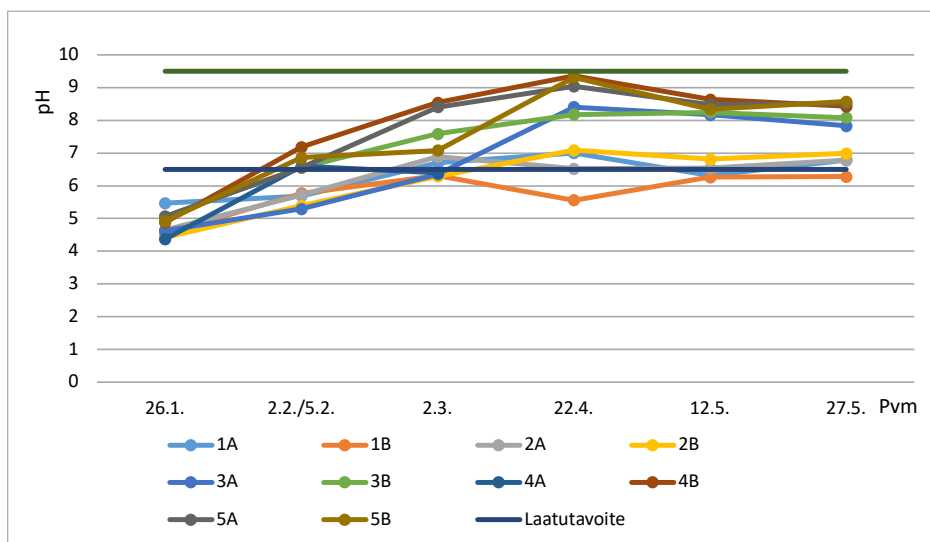
## TUHKATIEKOLONNIEN TULOKSIA

Tässä kokeessa saatuja määrittystuloksia on pääsääntöisesti verrattu talousvedelle asetettuihin laatuvaatimuksiin, sillä luonnossa suotovesi voi vaikuttaa pohjavesiin, mikäli tien vaikutuspiirissä on pohjavesialue. Huomioitavaa on, että mikäli tuhkatien suotovettä pääsee pohjaveteen, määrittystulokset eivät enää vastaa pelkän suotoveden tuloksia.

Kaikissa tuhkaa sisältävien kolonnien suotovesissä havaittiin sulfaatti- ja kloridipitoisuuden sekä sähkönjohtavuuden ja pH:n nousu ja tasoittuminen. Tuhkatiestöjä tutkittaessa on havaittu vastaavia tuloksia hetkittäisestä pitoisuuksien noususta, jota ajan myötä seuraa lasku normaalimmalle tasolle. (Ryhti 2016, Joensuu 2017)

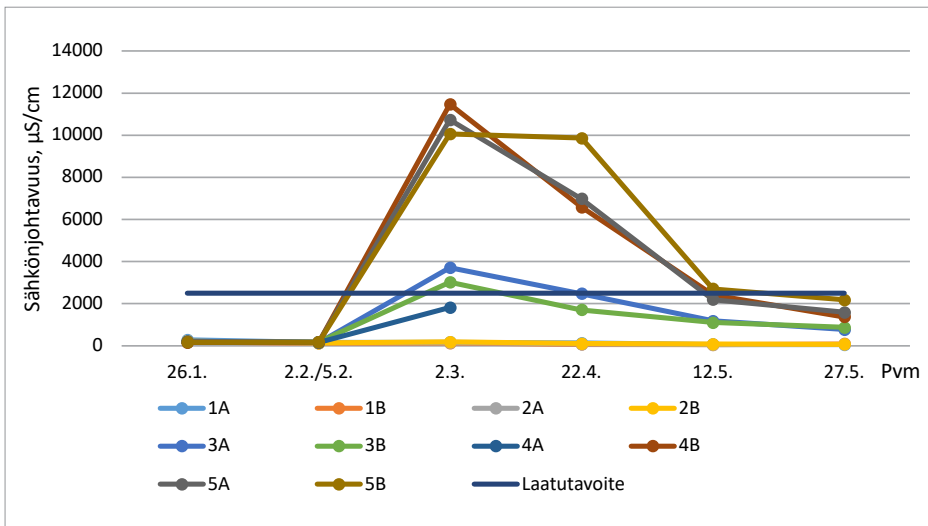
Vain yhteen kolonneista, 4A, muodostui tuhkasta vettä läpäisemätön pinta. Kolonni koostui maapohjasta, 3 cm:n tuhkatjasta ja 1 cm:n murskekerroksesta.

Kolonnit, joiden rakenteissa käytettiin tuhkaa, nostattivat pH-arvoja enemmän verrattuna kolonneihin, joissa oli pelkkä maapohja tai maapohja ja murskekerros. Kaikissa kolonneissa tapahtui kokeen aikana pH:n nousua, mutta tuhkaa sisältäneissä kolonneissa nousua tapahtui keskimäärin yhden pH-yksikön verran enemmän. Kokeen edetessä pH-arvot alkoivat kuitenkin tasoittumaan melko pian huippulukeman jälkeen (kuva 3). Tuhkan emäksisyydestä johtuen tämä hetkellinen pH:n nousu oli odotettavissa. Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista (1352/2015) talousveden laatuvaioitteeksi on pH:lle annettu 6,5–9,5.



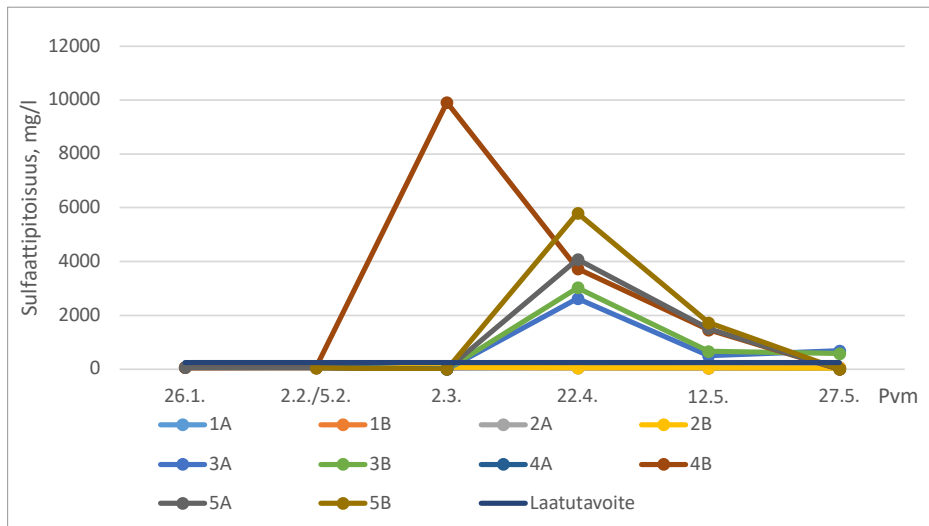
**KUVA 3.** Tiekolonnikokeen suotovesien pH:n mittaustulokset ja laatutavoite.

Sähkönjohtavuuden mittauksissa havaittiin, että pelkkää maapohjaa ja mursketta sisältävien kolonnien sähkönjohtavuus laski kokeen aikana (kuva 4). Tähän voi vaikuttaa se, että säännöllisen vedenlisäyksen myötä suolojen määrä kolonneissa väheni. Tuhkamurskeseosta sisältäneiden kolonnien sähkönjohtavuus nousi korkeimmillaan arvoon 3 000–3 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , josta tilanne kuitenkin tasoittui. Eniten sähkönjohtavuus nousi tuhkatjokolonneissa, joissa korkein arvo oli 4B-kolonnissa 11 470  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Hetkellisen nousun jälkeen myös sähkönjohtavuus tasoittui. Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista (1352/2015) talousveden laatuvaioitteeksi on sähkönjohtavuudelle annettu alle 2 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Arvojen tasoituttua kokeen lopussa suotoveden määritystulokset täyttivät laatutavoitteen.



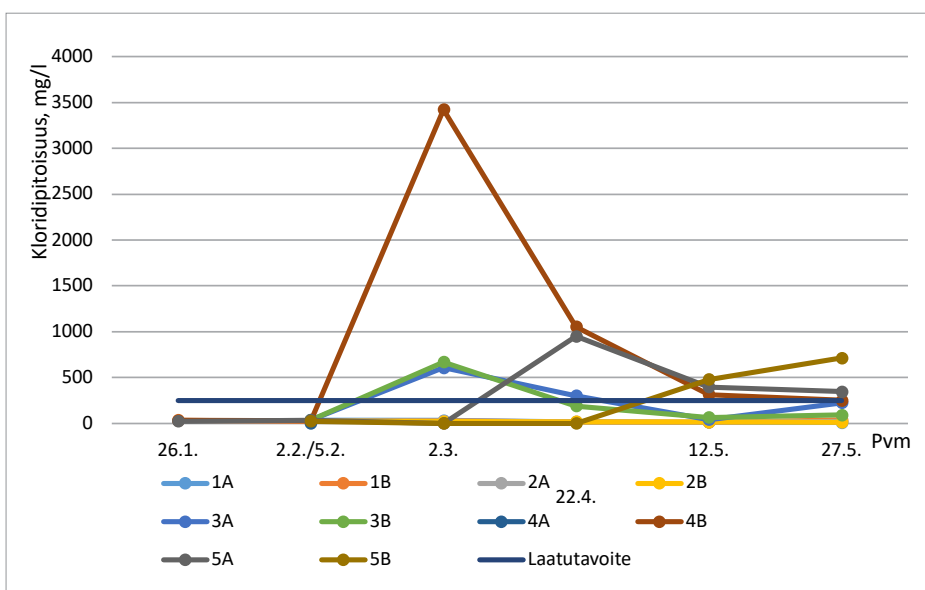
**KUVA 4.** Kolonnien suotovedestä mitattu sähkönjohtavuus ja laatutavoite.

Kolonnien suotoveden sulfaatti- ja kloridipitoisuudet mitattiin fotometrillä. Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa talusveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista (1352/2015) talusveden laatutavoitteeksi on sulfaattipitoisuudelle annettu alle 250 mg/l. Sulfaattitasot alkutilanteessa olivat kaikilla kolonneilla alle laatutavoitteen. Tuhkaa sisältävien kolonneiden pitoisuudet nousivat kokeen aikana hetkellisesti, ja korkein pitoisuus mitattiin 4B-kolonnista, 9 914 mg/l. Vesilisäysten jälkeen pitoisuudet laskivat. Tuhkaa sisältävien kolonneiden osalta arvot jäivät kuitenkin lähtötasoa korkeammalle, kun taas pelkkää maapohjaa ja murskettä sisältävien kolonneiden osalta arvot laskivat jopa lähtötason alapuolelle. Kuvassa 5 on nähtävissä kolonnien sulfaattipitoisuuden määritystulokset. Tuhkaa sisältävien kolonnien määritystulokset ylittivät talusveden laatutavoitteen kokeen päättyessä, mutta pitoisuudet olivat laskeneet voimakkaasti ensimmäisistä määritystuloksista.



**KUVA 5.** Kolonnien suotovedestä mitatut sulfaattipitoisuudet ja laatutavoite.

Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa talusveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista (1352/2015) talusveden laatutavoitteeksi on kloridipitoisuudelle annettu alle 250 mg/l. Tuhkaa sisältävistä kolonneista mitatut pitoisuudet olivat maata ja murskettä sisältäviä kolonneita suurempia. Suurin pitoisuus, lähes 3 500 mg/l, mitattiin 4B-kolonnin suotovedestä. Maapohja- ja murskekerroskolonnien (1A, 1B, 2A ja 2B) kloridipitoisuudet olivat kaikissa määrittelyissä alle 100 mg/l, joten ne täyttivät talusvesiasetuksen laatutavoitteen. Tuhkaa sisältävien kolonnien (3A, 3B, 4B, 5A ja 5B) pitoisuudet nousivat kokeen aikana yli talusvesiasetuksen laatutavoitteen. Kokeen lopussa 3A-kolonnin määrittystulos (225 mg/l) täytti laatutavoitteen, ja 4B-kolonnin pitoisuus (251 mg/l) ylitti sen vain hieman. Muut tuhkaa sisältävät kolonnit ylittivät talusvesiasetuksen laatutavoitteen. Kuvassa 6 on nähtävissä kolonnien suotovesistä mitatut kloridipitoisuudet. On huomioitava kuitenkin se, että sekä sulfaatti- että kloridinäytteitä jouduttiin laimentamaan runsaasti, jotta pitoisuudet voitiin mitata fotometrillä. Laimennuksen vaikutusta kokeen tuloksiin on vaikea arvioida.



**KUVA 6.** Kolonnien suotovedestä mitatut kloridipitoisuudet ja laatutavoite.

Suotovesien raskasmetallipitoisuuksia analysoitiin voltammetrin avulla. Kadmiumin osalta suurimmassa osassa näytteistä pitoisuudet olivat alle määrittäysrajan ja määrittystuloksia saatiin vain satunnaisista näytteistä. Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista (1352/2015) talousveden kemiallisiksi laatuvaatimukseksi on kadmiumipitoisuudelle annettu 5,0 µg/l. Jo ensimmäisissä maapohjista läpi suodatetuissa lähtötasovesinäytteissä kadmiumipitoisuudet (53,4 µg/l ja 28,1 µg/l) ylittivät laatuvaatimuksen enimmäisarvon (taulukko 2). Happohajottamisen vaikutusta tuloksiin ei ole arvioitu.

**Taulukko 2.** Kolonnien suotovesistä määritetyt kadmiumipitoisuudet µg/l.

Kolonnitunnus/ näytteenottopvm.	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B
26.1.		53							28	
2.2./5.2.			115	192						
2.3.			5					38		
22.4.										
12.5.										
27.5.	155									

Sosiaali- ja terveysministeriön talousvesiasetuksen (1352/2015) asettama enimmäisarvo talousveden kuparipitoisuudelle on 2,0 mg/l (2 000 µg/l). Näytteiden kuparipitoisuudet olivat alkutilanteessa alle enimmäisarvon, mutta 1,5 kuukautta kokeen aloittamisen jälkeen tuhkaa sisältäneiden kolonneiden arvot nousivat yli enimmäisarvon. Korkein määritetty pitoisuus oli kolonnissa 5A (5 cm:n tuhkatapja), jossa pitoisuus oli 29 622 µg/l eli 29,6 mg/l. Kokeen aikana kaikki kolonnit lukuun ottamatta 1B-kolonnia ylittivät talousvesiasetuksen enimmäisarvon. Kokeen lopussa pelkkää maapohjaa tai maapohjaa ja murskettua sisältävien kolonneiden (1A, 1B, 2A ja 2B) suotovedet täyttivät talousvesiasetuksen vaatimuksen. Tuhkaa sisältäneiden kolonneiden viimeisimmät mittausarvot olivat yli talousvesiasetuksen enimmäisarvon, mutta kuitenkin korkeimmista lukemista selkeästi pienentyneitä (taulukko 3).

**Taulukko 3.** Kolonnien suotovesistä määritetyt kuparipitoisuudet (µg/l).

Kolonnitunnus/ näytteenottopvm.	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B
26.1.								479	742	
2.2./5.2.	633	900	2 670	3 711			1 889	1 393	968	
2.3.	2 921	925	2 670	1 039	7 840	8 037		16 080	29 622	23 089
22.4.	902		1 446	249	10 133	19 824		13 645	5 358	7 579
12.5.									14 828	23 905
27.5.					2 426	3 299		5 107	5 899	4 936

Lyijypitoisuudelle on Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa talousveden laatuvaatimuksesta ja valvontatutkimuksista (1352/2015) asetettu enimmäisarvoksi 10 µg/l. Lähtötaso pelkkien maapohjakolonniensa osalta oli yli enimmäisarvon. Taulukosta 4 on nähtävissä, että veden lisäysten myötä sekä tuhkatapjoissa että tuhkaa sisältävissä kolonneissa lyijypitoisuus nousi. Kuitenkin kokeen loppua kohden arvot lähtivät jälleen laskemaan. Laskusta huolimatta viimeisimmät määritykset antoivat arvoja, jotka olivat selkeästi yli talousvesiasetuksen enimmäisarvon.

**Taulukko 4.** Kolonnien suotovesistä määritetyt lyijypitoisuudet (µg/l).

Kolonnitunnus/ näytteenottopvm.	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B
26.1.		1 055						1 436	222	
2.2./5.2.	272	378					696	3 560	2 267	
2.3.	535	648	1 418	412	477	401		794	1 040	1 403
22.4.	542	1 277		333	323	199		567		
12.5.	1 026	516		337	309	855		222		191
27.5.	124		1 057		180	361		936	872	1 174

Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista (1352/2015) ei veden sinkkipitoisuudelle ole annettu laatusuositusta. Aiemmin vuoden 1994 asetuksessa laatusuositus oli 3,0 mg/l eli 3 000 µg/l. Sinkin osalta tämä arvo ylittyi pääsääntöisesti kaikissa kolonneissa (taulukko 5). Noin kuukauden jälkeen testin aloittamisesta lähes kaikkien kolonnien suotovesissä havaittiin kokeen suurimmat sinkkipitoisuudet. Huomionarvoista oli, että pelkkää maapohjaa tai maapohjaa ja murskettä sisältävät kolonnien 1A, 2A ja 2B sinkkipitoisuudet nousivat myös. Kokeen aikana suurin sinkkipitoisuus saavutettiin kolonnilla 1A (19 836 µg/l), jossa ei ollut lainkaan tuhkaa. Tuhkaa sisältäneiden kolonnien (4B, 5A ja 5B) pitoisuudet olivat viimeisissä mittauksissa kuitenkin selkeästi suurempia kuin pelkkää maapohjaa ja maapohjaa ja murskettä sisältäneillä kolonneilla. Kolonneista 3A ja 3B, jotka sisälsivät 3 cm:n tuhkamurskekerroksen, määritetyt pitoisuudet olivat viimeisessä analyysissä pienempiä kuin pelkän murskekerroksen sisältäneiden kolonnien 2A ja 2B.

**Taulukko 5.** Kolonnien suotovesistä määritetyt sinkkipitoisuudet (µg/l).

Kolonnitunnus/ näytteenottopvm.	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B
26.1.								3 364	4 523	
2.2./5.2.	5 774	2 070			592	7 243	12 437	9 029	14 149	3 602
2.3.	19 836	1 461	16 610	6 704	4 153	5 001		7 325	18 251	12 847
22.4.	7 478	730	9 093	4 513	836	1 134		4 146	3 444	1 488
12.5.	1 485	361	1 164	564	564	674		1 644	2 294	1 019
27.5.	2 360	342	3 831	2 460	490	1 933		5 919	18 691	8 594

## YHTEENVETO

Tutkimuksessa oli paljon epävarmuustekijöitä, kuten kolonnien rakentamisen onnistuminen, kolonnien säilytysolosuhteet ja määritysten luotettavuus, joiden vuoksi selkeitä johtopäätöksiä kolonnien tuloksista on haastava tehdä. Huomioitavaa on, että laboratorio-olosuhteissa toteutettu kolonnikoe ei vastaa todellista tierakenteen seurantaa. Koe kuvaa lähinnä pahinta mahdollista vaihtoehtoa, jolloin sadevesi ei valu tien pinnalta pois, kuten luonnossa, vaan kaikki vesi voi imeytyä tierakenteeseen. Samoin on tilanne myös lumen suhteen, sillä kaikki lumi sulii kolonneihin eikä päässyt haihtumaan osittain ilmaan. Kokeella saatiin kuitenkin tietoa siitä, että tuhkarakenne vaikuttaa suotautuvan veden määrään ja voi myös muodostaa vettä läpäisemättömän pinnan.

Tarkastelu talousveden laatuvaatimuksiin voi antaa virheellisen kuvan, sillä itse suotovettä ei käytetä talousvetenä. Mikäli suotovettä pääsee pohjaveden joukkoon, se laimenee. Yhteenvetona voi kuitenkin todeta, että kokeen perusteella tuhka tierakenteessa nostattaa



hetkellisesti suotoveden pH-arvoja ja sähkönjohtavuutta enemmän kuin perinteinen mursketie. Pitoisuudet lähtivät kuitenkin näinkin lyhyen kokeilun (4 kk) aikana laskuun, joten oletettavaa on, että pidemmällä ajanjaksolla arvot palautuvat lähelle lähtötasoa. Tuhkaa sisältävien kolonneiden sulfaatti- ja kloridipitoisuudet jäivät huomattavasti maata ja murskettä sisältäviä kolonneita korkeammalle kokeen päättyessä.

Suotovesien raskasmetallipitoisuuksia tarkasteltaessa niin maa-, murske- kuin tuhkakolonnitkin ylittivät talousvedelle annetut enimmäisarvot jossain vaiheessa koetta. Huomionarvoista oli se, että hetkellisen pitoisuuksien kohoamisen myötä arvot kuitenkin lähtivät laskuun. Verrattuna aidoilla tiekohteilla toteutettuihin seurantoihin tuloksille oli yhtäläistä arvojen äkillinen nousu ja sitä seurannut lasku.

Aineiden huuhtoutuminen tuhkarakenteesta ei vaikuta tämän kokeen perusteella olevan yksiselitteistä, sillä tulokset vaihtelivat analyysikertojen ja myös rinnakkaiskolonnien välillä. Tuhkan tasalaatuisuus ja rakenteen vedenläpäisevyys vaikuttanee veden mukana tuhkasta liukenevien aineiden määriin ja kokeessa kolonnien vedenläpäisevyydessä todettiin myös olevan eroa. Laboratorio-olosuhteissa toteutetussa kokeessa pystyttiin pitämään eri tierakenteiden olosuhteet samankaltaisina ja mittamaan tarkasti tiekolonniin lisätty vesimäärä. Tuloksiin tulee kuitenkin suhtautua vain suuntaa antavina kokeeseen liittyvien epävarmuustekijöiden vuoksi.

## LÄHTEET

Arnkil, N., Joensuu, S., Kauppila, M., Kontinen, K., Kotiharju, A., Lahti, E. & Tenhola, T. 2020. Tuhka osana kestäväää liiketoimintaa – Opas tuhkan tuottajille ja käyttäjille. Tapion raportteja 42. Tapio Oy. ISBN 978-952-5632-93-4 ISSN 2342-804X(pdf). Saatavissa: <https://tapio.fi/wp-content/uploads/2021/11/Tuhka-osana-kestavaaa-liiketoimintaa-opas-Tapio-16112021.pdf> Opas päivitetty 16.11.2021.

Harju, I., Dettenborn, T., Forsman, J., Jyrävä, H. & Lahtinen, P. 2019. Kokemuksia uusio-materiaaleista tierakenteissa. Väyläviraston tutkimuksia 7/2019. ISSN 2490-0982. ISBN 978-952-317-678-2.

Joensuu, S. 2017. Tuhkan käyttö tienrakennuksen materiaalina – ympäristövaikutusten seuranta. WWW-dokumentti. Saatavissa <https://tapio.fi/projektit/tuhkan-kaytto-tienrakennuksen-materiaalina-ymparistovaikutusten-seuranta/> [päivitetty 27.2.2017, viitattu 11.10.2021].

Kauppila, M., Kontinen, K. & Tenhola, T. 2021. Tuhkan hyötykäyttö metsätaloudessa. Tapio Oy. ISBN 978-952-5632-98-9. Saatavissa: <https://tapio.fi/wp-content/uploads/2021/03/Tuhkan-hyotykaytto-metsataloudessa-esite.pdf> [viitattu 8.10.2021].

Matinlauri, S., Rossi, J., Kalliainen, A. & Kolisoja, P. 2016. Vaihtoehtoisia maarakennusmateriaaleja sisältävien tie- ja katurakenteiden vaurioituminen. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 52/2016. ISSN 1798-6664. ISBN 978-952-317-340-8.

Ryhti, K. 2016. Aineiden huuhtoutuminen metsätiekokeiden rakenteissa käytettävästä tuhkasta. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto. Metsätieteiden laitos. Metsien ekologia ja käyttö.

Sosiaali- ja terveystieteiden tutkimuskeskuksen asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista. 1352/2015.

# TUHKATEIDEN JA TUHKALANNOITUSALUEIDEN YMPÄRISTÖSEURANNAN TULOKSIA

Riina Tuominen & Henna-Riikka Haikonen & Juha Vihavainen

Vastuullista liiketoimintaa tuhkasta -hanke on Tapio Oy:n, Suomen metsäkeskuksen ja Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun yhteishanke. Hankkeen tavoitteena on parantaa tuhkan tuottajien ja hyötykäyttäjien liiketoimintaedellytyksiä sekä luoda mahdollisuuksia uudelle vastuulliselle yritystoiminnalle tuhkan hyötykäytössä. Hankkeen toteutusaika on 1.9.2019–31.12.2021, ja sitä rahoittaa Hämeen ELY-keskus Euroopan maaseudun kehittämisen maatalousrahastosta.

Vastuullista liiketoimintaa tuhkasta -hankkeessa seurattiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun toimesta tuhkan hyötykäyttökohteiden ympäristöturvallisuutta neljällä seurantakohteella. Seurantakohteina oli kaksi tuhkatietä ja kaksi tuhkalannoitusalaa. Kohteisiin käytetyn tuhkan laatu selvitettiin ja tie- ja lannoituskohteissa otettiin vuosien 2020 ja 2021 aikana vesi- ja maaperänäytteitä. Näiden lisäksi tuhkalannoitetuilla aloilla analysoitiin myös neulas-, marja- ja varpunäytteitä. Seurattavilla kohteilla mitattiin myös pintavesien pH ja sähkönjohtavuus kenttämittarilla 2–4 viikon välein. Kohteita on esitelty tarkemmin esimerkiksi artikkelissa Tuhkan ympäristövaikutukset (Vihavainen ym. 2020). Tässä artikkelissa kerrotaan tarkemmin vesinäytetuloksista ja kenttämittauksista hankkeessa seuratun vanhemman tiekohteen osalta. Maanäytetulokset koskevat hankkeen aikana perustettua tiekohdetta, ja tuhkalannoitusalan tulokset koskevat hankkeen aikana lannoitettua metsäkohdetta.

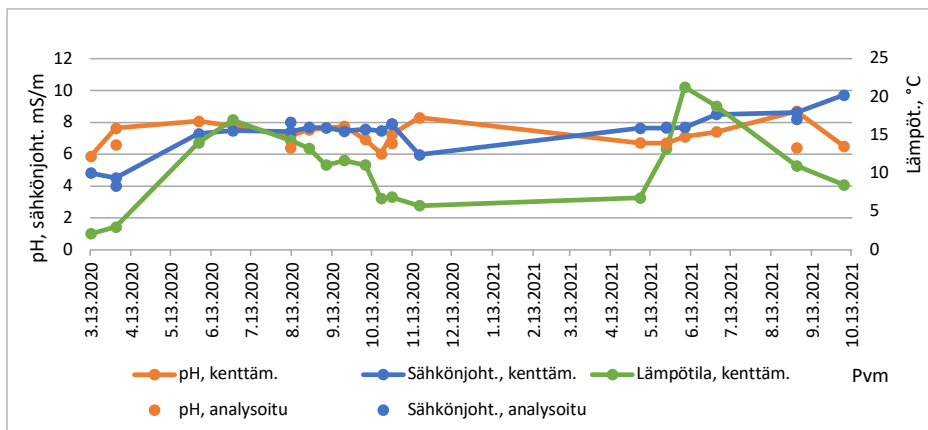
## TUHKATEIDEN SEURANNAN TULOKSIA

Seurantakohteiksi hankkeelle saatiin tuhkapatjatiet, joista toinen oli rakennettu vuosina 2017–2018 ja toinen rakennettiin hankkeen jo käynnistyttyä vuonna 2020. Teihin käytetty lentotuhka ei täyttänyt kaikkien raja-arvojen osalta MARA-asetuksen vaatimuksia, ja rakennukseen oli haettu ja saatu ympäristöluvut.

Kohteilta valittiin taustatietoihin ja aiempiin tutkimuksiin perustuen tietyt näytepisteet vesi- ja maanäytteiden ottoon. Näytteet lähetettiin analysoitavaksi ulkopuoliseen laboratorioon. Vesinäytepisteistä tehtiin näytteenottojen yhteydessä ja myös niiden välillä kenttämittauksia.

Vedentarkkailuun valittiin vanhemmasta tieseurantakohteesta kahden lammen välinen laskuoja, joka alittaa tuhkapatjtien. Tiekohteessa käytetyn tuhkan liukoisuustesteissä osoittautuivat ympäristö- ja terveysvaikutusten kannalta olennaisimmiksi aineiksi kromi, sinkki, sulfaatti ja kloridi. Kohteessa oli tehty pintavesiseuranta jo ennen hankkeen aloitusta ja aiemmat määritystulokset annettiin hankkeen käyttöön. Vuoden 2017 näytteet otettiin ennen tuhkatien rakentamisen aloitusta, ja ne kuvaavat kohteen ojaveden luonnontilaa ja toimivat ns. nollanäyteinä. Ensimmäisessä määrittäyksessä tarkkailupisteen pH-luku oli 5,9. Tämän jälkeen pH on vakiintunut analysoinneissa 6,2–6,7 välille. Myös sähkönjohtavuuden osalta ensimmäisen määrittäyksen arvo oli alhaisin, 2,9 mS/m, mikä jälkeen vuosien 2018–2020 aikana arvo on noussut ollen tarkkailun lopussa laboratoriomäärittäyksessä 8,0 mS/m. Tarkastelupisteessä pH ja sähkönjohtavuus ovat laboratorioanalyysien osalta pääosin pysyneet luonnonvesistä yleisesti mitatuissa arvoissa. Luonnonvesissä pH on yleensä 6,5–6,8 ja sähkönjohtavuus 5–10 mS/m (Oravainen 1999).

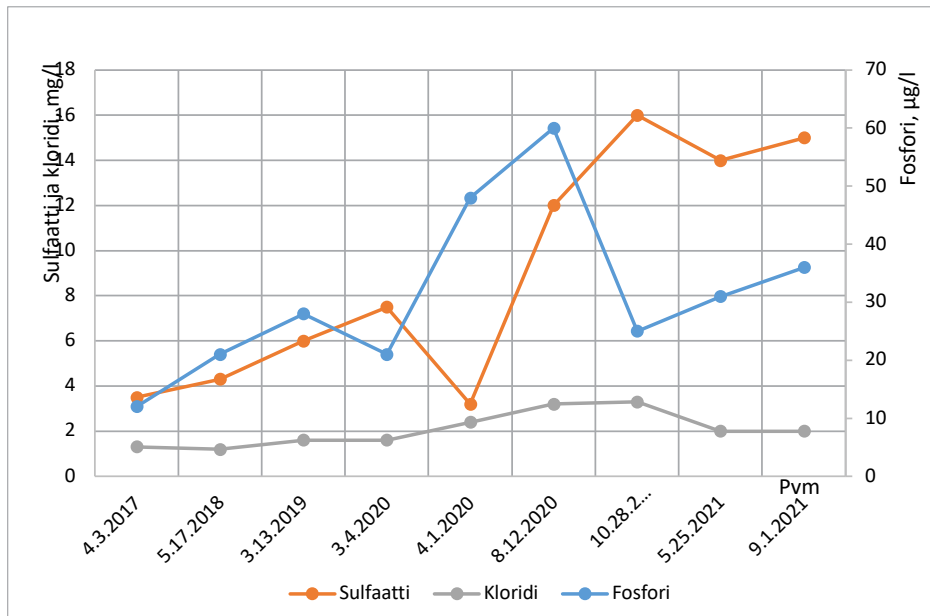
Kuvassa 1 on nähtävissä tarkkaillun tiekohteen vesinäytepisteen laboratoriomäärittäysten ja kenttämittausten tulokset veden lämpötilan, pH:n ja sähkönjohtavuuden osalta. Kuvasta nähdään, että veden lämpötila on oletetusti ollut matalampi keväällä ja syksyllä ja noussut kesäisin. Kenttämittauksissa veden pH-arvo vaihteli välillä 5,9–8,7 ja sähkönjohtavuus 4,5–9,7 mS/m. Suurimmat pH- ja sähkönjohtavuusarvot mitattiin silloin, kun ojassa oli vettä normaalia vähemmän. Kenttämittausten ja laboratoriomäärittäysten arvot ovat olleet hyvin lähellä toisiaan.



**KUVA 1.** Tiekohteen ojaveden laboratorioanalyysien ja kenttämittausten tulokset.

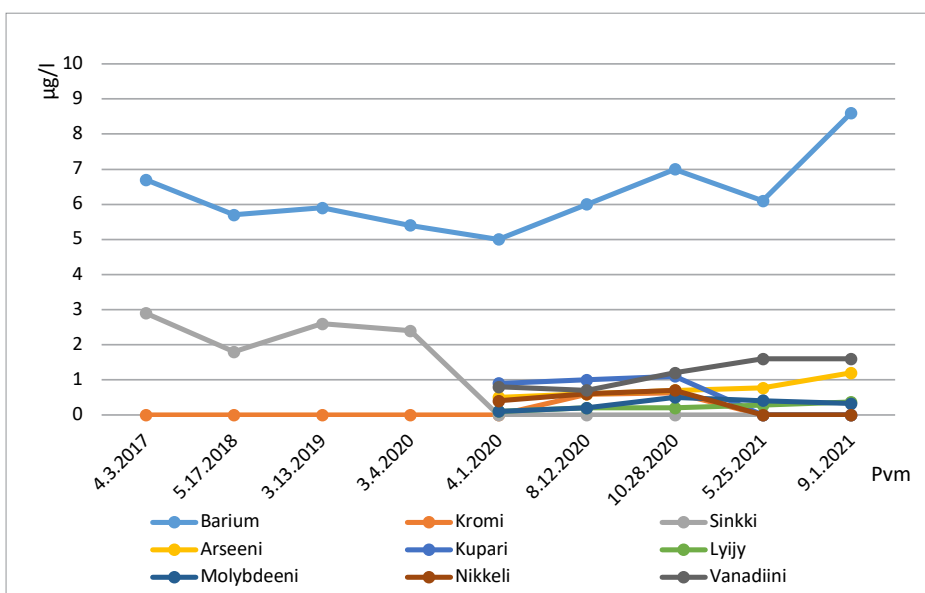
Kuvaan 2 on koottu tarkkaillun tuhkatien laskuojan näytepisteen fosfori-, sulfaatti- ja kloridipitoisuudet. Fosforin pitoisuus lähtötilanteessa oli 12 µg/l, ja pitoisuus on tarkkailun aikana noussut. Elokuussa 2020 fosforin pitoisuudeksi määritettiin 60 µg/l, ja viimeisessä määrittäyksessä fosforipitoisuus oli laskenut arvoon 36 µg/l. Sulfaattipitoisuus oli ennen

tien rakentamista 3,5 mg/l ja viimeisessä mittauksessa 15,0 mg/l. Kloridipitoisuus oli lähtötilanteessa 1,3 mg/l, nousi tarkkailun aikana pitoisuuteen 3,3 mg/l ja laski viimeisissä analysoinneissa pitoisuuteen 2,0 mg/l.



**KUVA 2.** Tuhkatien laskuojan vesinäytteistä määritetyt fosforin (µg/l), sulfaatin (mg/l) ja kloridin (mg/l) pitoisuudet.

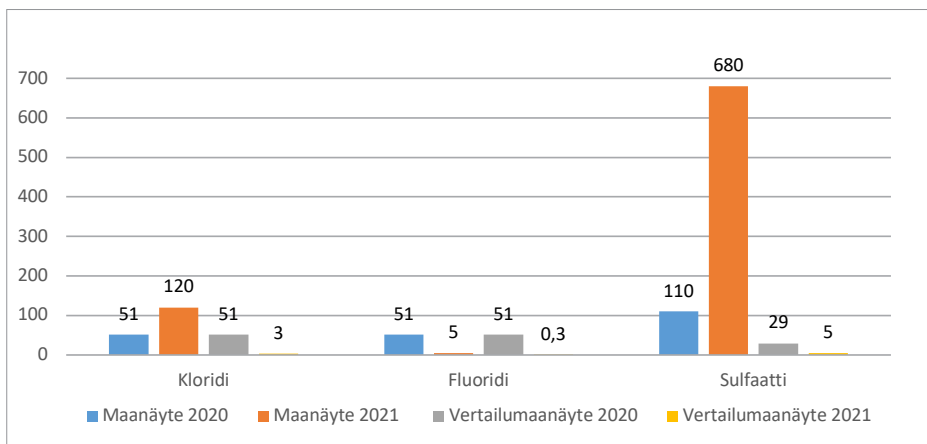
Laskuojan vesinäytteistä määritettiin hankkeen aikana myös raskasmetallipitoisuuksia. Näytteiden barium-, kromi-, sinkki-, antimoni-, arseeni-, elohopea-, kadmium-, kupari-, lyijy-, molybdeeni-, nikkeli- ja vanadiinipitoisuuden määrittystulokset on esitetty kuvassa 3. Metalleista bariumia, kromia ja sinkkiä oli määritetty lähtötilanteesta alkaen. Muita raskasmetallimäärittämiä lisättiin hankkeen toimesta. Bariumipitoisuus oli lähtötilanteessa 6,7 µg/l, ja tarkkailun aikana arvot vaihtelivat 5,0–8,6 µg/l. Sinkin pitoisuus vedessä ennen tienrakentamista oli 2,9 µg/l. Hankkeen aikana analysoidut sinkkipitoisuudet ilmoitettiin tarkkuudella <5 µg/l, joten pieniä muutoksia viimeisten vuosien määrittämisistä on mahdollista havaita. Muiden määritettyjen raskasmetallipitoisuuksien osalta pitoisuudet pysyivät melko tasaisina. Suurin havaittu pitoisuuden nousu oli vanadiinilla, pitoisuudesta 0,8 µg/l pitoisuuteen 1,6 µg/l. Antimoni-, elohopea-, kadmium-, kromi- ja seleenipitoisuudet jäivät kaikissa analysoinneissa alle määrittämissärajat.



**KUVA 3.** Tuhkatien laskuojaan vesinäytteistä määritetyt raskasmetallipitoisuudet.

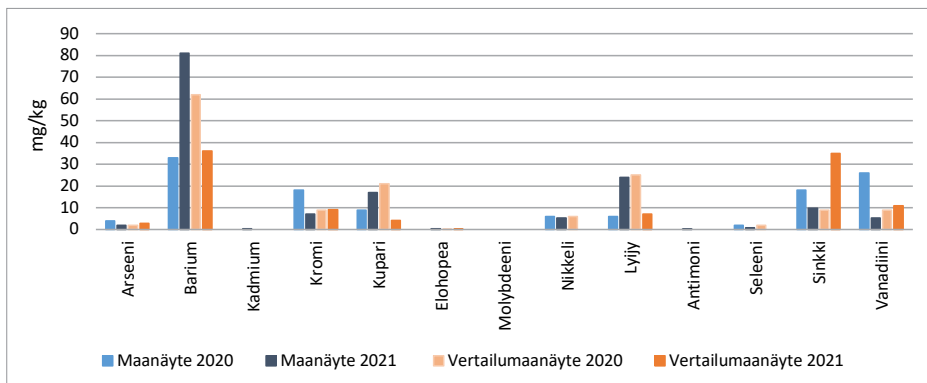
Maanytteitä otettiin vuosina 2020 ja 2021 molemmilta tieseurantakohteilta. Hankkeen aikana helmikuussa 2020 perustetusta uudemmasta tiekohteesta saatiin otettua näyte heti roudan sulamisen jälkeen tien rakentamisvuonna, joten näytteen voidaan olettaa kuvaavan lähtötasoa. Varmuudeksi otettiin myös vertailunäyte tieosuudelta, johon ei ollut käytetty tuhkaa.

Tiekohteen maanäytteen pH-luku oli lähtötilanteessa 5,1 vuonna 2020 ja 4,3 vuonna 2021. Vertailukohteen maanäytteen pH-luku oli 4,2 vuonna 2020 ja 5,0 vuonna 2021. Sähkönjohtavuus tiekohteen maanäytteessä oli 16 mS/m vuonna 2020 ja 15 mS/m vuonna 2021. Vertailukohteen maanäytteen sähkönjohtavuus oli 32 mS/m vuonna 2020 ja 2 mS/m vuonna 2021. Kuvassa 4 on nähtävissä maanäytteiden kloridi-, fluoridi- ja sulfaattipitoisuudet vuosina 2020 ja 2021. Määrittystulosten perusteella tiekohteen kloridipitoisuus on noussut arvosta 51 mg/kg arvoon 120 mg/kg. Vastaavasti vertailukohteessa pitoisuus laski arvosta 51 mg/kg arvoon 2,7 mg/kg. Fluoridipitoisuus laski tiekohteessa pitoisuudesta 51 mg/kg pitoisuuteen 4,5 mg/kg, ja myös vertailukohteessa oli havaittavissa pitoisuuden lasku. Sulfaattipitoisuus nousi tiekohteessa arvosta 110 mg/kg arvoon 680 mg/kg. Vertailukohteessa sulfaattipitoisuus oli jo lähtökohtaisesti pienempi (29 mg/kg) ja pieneni yhä vuonna 2021 (5 mg/kg).



**KUVA 4.** Tiekohteen maanäytteiden kloridi-, fluoridi- ja sulfaattipitoisuuksien muutos vuodesta 2020 vuoteen 2021.

Raskasmetallipitoisuuksien osalta määrittystulokset ovat nähtävissä kuvassa 5. Tiekohteessa ovat arseenin, kromin, nikkelin, seleenin, sinkin ja vanadiinin pitoisuudet laskeneet lähtötilanteesta. Bariumin, kuparin ja lyijyn pitoisuudet ovat vastaavasti nousseet lähtötilanteen arvoista. Kadmiumin, elohopean, molybdeenin ja antimonin määrittystulokset ovat pysyneet molempina vuosina lähellä määrittysrajaa. Vertailukohteessa vastaavasti sinkin ja vanadiinin pitoisuudet ovat nousseet, mutta muiden raskasmetallien osalta pitoisuus on laskenut tai pysynyt lähes samana.



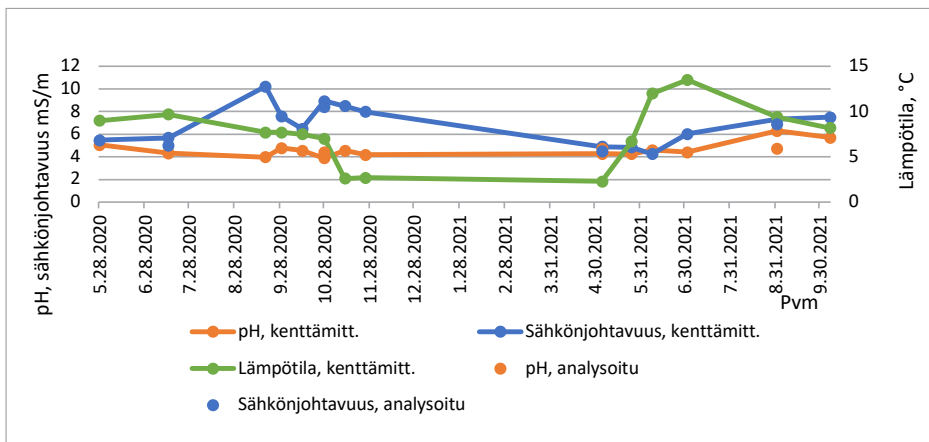
**KUVA 5.** Tiekohteen maanäytteiden raskasmetallipitoisuuksien muutos vuodesta 2020 vuoteen 2021.



## TUHKALANNOITETUN METSÄALUEEN TULOKSIA

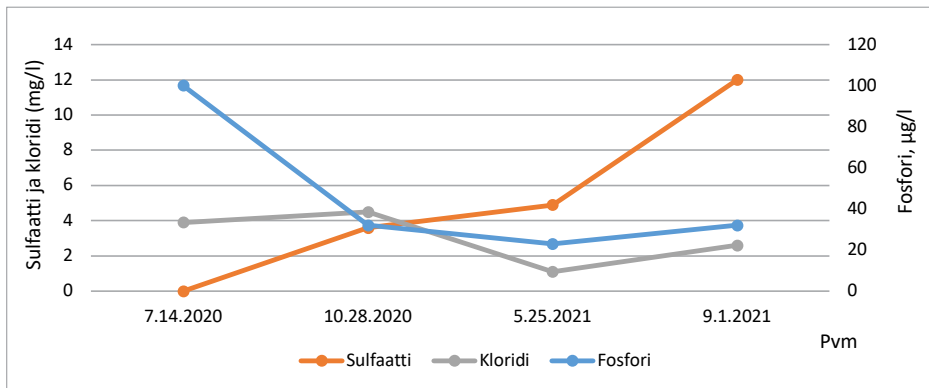
Seurantakohteeksi saatiin metsäalue, jossa toteutettiin tuhkalannoitus lentoleivityksellä elokuun lopulla 2020. Lannoitteena käytettiin alueelle sopivaa tuhkalannoitetta.

Metsäalueella tehtiin kenttämittauksia ja otettiin vesinäytteitä metsäojasta. Kuvaan 6 on koottu vesinäytteiden kenttämittaukset sekä ulkopuolisen laboratorion tulokset ojaveden lämpötilan, pH:n ja sähkönjohtavuuden osalta. Vesinäytteiden perusteella sähkönjohtavuus pysyi koko seurannan ajan luonnonvesien viitearvon 5–10 mS/m sisällä. Myös pH-taso pysyi melko stabiilina. Vuonna 2020 otetuissa näytteissä pH-arvot olivat 4,3 ja 4,4, ja vuoden 2021 näytteissä tulos oli kummallakin kerralla 4,7. Matala pH-taso on turvemaille tyypillistä. Kenttämittauksissa saatiin laboratoriotuloksia vastaavia lukuja.



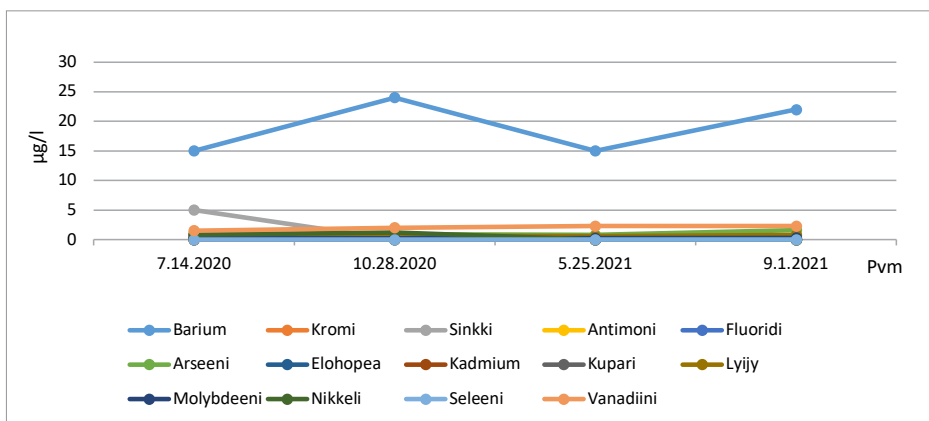
**KUVA 6.** Lannoituskohteen ojaveden laboratorioanalyysien ja kenttämittausten tulokset.

Kuvaan 7 on koottu tarkkaillusta lannoituskohteesta analysoidut vesinäytteen fosfori-, sulfaatti- ja kloridipitoisuudet. Fosforin pitoisuus oli ennen lannoitusta 100 µg/l, ja viimeisessä määrittäyksessä pitoisuus oli 32 µg/l. Sulfaattipitoisuus oli lähtötilanteessa alle määrittäysrajan (< 1 mg/l) ja viimeisessä analysoinnissa 12 mg/l. Kloridipitoisuus oli ennen lannoitusta 3,9 mg/l ja laski viimeisissä analysoinneissa pitoisuuteen 2,6 mg/l.



**KUVA 7.** Lannoituskohteen ojan vesinäytteistä määritetyt fosforin (µg/l), sulfaatin (mg/l) ja kloridin (mg/l) pitoisuudet.

Kuvaan 8 on koottu vesinäytteistä määritetyt raskasmetallipitoisuudet. Suuria muutoksia lähtötilanteeseen ei lannoituksen myötä tullut. Bariumpitoisuus oli lähtötilannetta korkeampi lokakuussa 2020, mutta laski samaan arvoon toukokuussa 2021. Syyskuussa 2021 pitoisuus oli jälleen hieman korkeampi. Sinkkipitoisuudelle saatiin lähtötilanteessa määritettyä pitoisuus 5 µg/l, mutta muissa määrittelyissä arvo jäi alle määrittysrajan (< 5 µg/l). Vanadiinipitoisuus oli lähtötilanteessa 1,5 µg/l ja viimeisessä näytteessä 2,3 µg/l. Arseeni-, molybdeeni-, kromi-, elohopea-, nikkeli-, kadmium-, seleeni-, antimoni-, kupari-, fluoridi- ja lyijypitoisuudet eivät juuri muuttuneet vuoden aikana.



**KUVA 8.** Lannoituskohteen metsäojan vesinäytteistä määritetyt raskasmetallipitoisuudet.

Taulukossa 1 on nähtävissä tulokset metsäkohteen maaperänäytteiden osalta ennen lannoitusta ja lannoituksen jälkeen. Kohteen kasvupaikka oli varputurvekangas (Vatkg I), ja puuston kehitysluokka vaihteli kuvioittain taimikkovaiheisesta metsästä (kuvio 15) nuoreen kasvatusmetsään (kuvio 28). Kyseisen alueen pääpuulaji oli mänty, ja kohde oli aikoinaan ojitettu. (Teittinen 2021)

**Taulukko 1.** Vertailutulokset metsäkohteella ennen lannoitusta (2020) ja lannoituksen jälkeen (2021).

Ravinneanalyysit		25.6.2020	11.8.2021	25.6.2020	11.8.2021
Analyytti	Yksikkö	Kuvio 15	Kuvio 15	Kuvio 28	Kuvio 28
pH		4,3	3,9	4,7	3,9
Typpi (N)	g/kg	17,8	15,9	14,3	13,8
Fosfori (P)	g/kg	0,5	0,6	0,4	0,6
Kalium (K)	g/kg	0,2	4,5	0,2	0,4
Kalsium (Ca)	g/kg	1,8	2,7	1,5	1,7
Magnesium (Mg)	g/kg	0,3	3,9	0,3	0,4
Boori (B)	g/kg	0,4	2,7	0,2	2,8
Kupari (Cu)	mg/kg	<0,4	0,4	<0,4	<0,4
Sinkki (Zn)	mg/kg	3,6	3,6	3,1	4,4
Mangaani (Mn)	mg/kg	74,0	33	49,0	26
Tuhka	%	3,97	3,96	2,38	3,07

Maaperäanalyysi ennen lannoitusta osoittaa, että kuviolla 15 typpi-, fosfori-, kalium-, magnesium- ja booripitoisuudet olivat huononlaisia ja kalsiumpitoisuus oli huono. Myös kokonaistyyppi oli huononlainen. Kuviolla 28 fosfori-, kalium-, magnesium- ja booripitoisuudet olivat myös huononlaisia ja kokonaistyyppi- sekä kalsiumpitoisuudet huonoja. Kuvioiden pH-tasot 4,3 ja 4,7 olivat tyydyttävällä tasolla.

Mikäli kohteen typpipitoisuus on alle 1,5 prosenttia, pidetään sitä alhaisena. Tulosten perusteella voi todeta, että kuvion 15 typpipitoisuus oli ennen tuhkalannoitusta yli 1,5 prosenttia (1,78 %), kun taas kuvion 28 typpipitoisuus oli alhainen (1,43 %).

Maanäytteet uusittiin noin vuoden päästä lannoituksesta. Erityisesti taimikkovaiheisen kuvion 15 kalium- (0,2 > 4,5 tyydyttävä), kalsium- (1,8 > 2,7 huono), magnesium- (0,3 > 3,9 tyydyttävä) ja booritasoissa (0,4 > 2,7 tyydyttävä) oli havaittavissa nousua. Fosforipitoisuudessa ei juurikaan ollut tapahtunut muutosta (0,5 g/kg > 0,6 g/kg). Kokonaistyyppi-prosentti (1,78 % > 1,59 %) ja kokonaistypen (17,8 > 15,9) määrä laskivat. Myös pH (4,3 > 3,9) oli laskenut.

Kuvion 28 osalta lannoituksen vaikutus ravinteisiin oli hyvin vähäistä. Ainoastaan boorin määrässä oli tapahtunut selkeämpi muutos (0,2 > 2,8 tyydyttävä). Myöskin tällä kohteella pH (4,7 > 3,9) ja kokonaistypen (14,8 > 13,8) määrä olivat laskeneet. Typpiprosentti oli 1,38. pH-arvot laskivat vuoden aikana kummallakin kuviolla huonolle tasolle. Kuvion 15 typpi-prosentti ylitti kuitenkin alhaisen typpipitoisuuden (1,5 %) rajan vielä niukasti (1,59 %).

Näytteistä analysoitiin myös kupari-, mangaani- ja sinkkipitoisuus. Analyysin perusteella nämä hivenravinteet olivat vähintään tyydyttävällä tasolla sekä vuoden 2020 että 2021 tuloksissa. Muutokset olivat vähäisiä. Isoin muutos oli mangaanipitoisuudessa, joka oli vuoden aikana laskenut kummallakin kuviolla.

Ajanjakso, jolla alueita tarkastelimme, oli hyvin lyhyt. Luultavasti vaikutukset tulevat näkymään paremmin vasta tulevaisuudessa, sillä tuhka lisää puustonkasvua hitaammin, ja vaikutus on jopa 40 vuotta (Äijälä 2019).

## VARPUJEN JA MARJOJEN LABORATORIOTULOKSET

Marja- ja varpunäytteitä kerättiin lannoitetulta alueelta mahdollisimman edustavasti. Taulukkoon 2 on koottu lannoituskohteelta kerättyjen marjojen laboratoriotulokset. Laboratoriotulosten perusteella mustikan marjan booripitoisuus nousi eniten (5,5 g/kg > 8,7 g/kg). Kalsiumpitoisuus säilyi ennallaan, ja kaliumpitoisuus nousi (6,2 g/kg > 7,0 g/kg). Myös juolukan marjan tulokset olivat vastaavanlaiset. Booripitoisuus juolukan marjoissa nousi 6,9 g/kg > 11 g/kg, kalium 5,4 g/kg > 7,2 g/kg ja kalsiumpitoisuus säilyi ennallaan. Magnesium-, natrium- ja fosforipitoisuuksissa ei tapahtunut juurikaan muutoksia. Marjojen raskasmetallipitoisuudet olivat pääosin ennallaan. Ainoastaan alumiinitasoissa oli nousua. Mustikan marjan alumiinipitoisuus nousi 60 mg/kg > 100 mg/ka ja juolukan marjan 20 mg/kg > 67 mg/kg.

**Taulukko 2.** Lannoituskohteen marjojen vertailutulokset ennen ja jälkeen lannoitusta.

Analyysi	Yksikkö	6.8.2020	11.8.2021	6.8.2020	11.8.2021
		Mustikka/ marja	Mustikka/ marja	Juolukka/ marja	Juolukka/ marja
Fosfori (P)	g/kg ka	0,97	0,9	1,0	1,1
Kalium (K)	g/kg ka	6,2	7,0	5,4	7,2
Kalsium (Ca)	g/kg ka	1,3	1,3	1,1	1,1
Magnesium (Mg)	g/kg ka	0,61	0,6	0,57	0,61
Natrium (Na)	g/kg ka	0,28	<0,23	<0,22	<0,23
Alumiini (Al)	mg/kg ka	86	100	20	67
Boori (B)	mg/kg ka	5,5	8,7	6,9	11
K/(Ca+Mg) ekv. suhde		1,4	1,7	1,4	1,9
Arseeni (As)	mg/kg	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Kromi (Cr)	mg/kg	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Titaani (Ti)	mg/kg	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5

Taulukossa 3 nähtävät varpujen laboratoriotulokset olivat melko samanlaiset kuin marjojen. Ravinteiden osalta ainoastaan booritasoissa oli selkeämpää muutosta. Mustikan varvulla taso nousi 13 mg/kg > 29 mg/kg ja juolukalla 13 mg/kg > 49 mg/kg. Varpujen osalta raskasmetallitasot pysyivät samoina kuin lähtötilanteessa tai laskivat. Määritettyjä raskasmetalleja ei näiden tutkimusten perusteella suuressa määrin kertynyt marjoihin tai varpuihin.

**Taulukko 3.** Lannoituskohteen varpujen vertailutulokset ennen ja jälkeen lannoitusta.

Analyysi	Yksikkö	6.8.2020	11.8.2021	6.8.2020	11.8.2021
		Mustikka/ varpu	Mustikka/ varpu	Juolukka/ varpu	varpu
Fosfori (P)	g/kg ka	0,8	0,81	0,86	0,98
Kalium (K)	g/kg ka	3,9	4,1	3,2	4,8
Kalsium (Ca)	g/kg ka	8,5	8,4	5,0	5,4
Magnesium (Mg)	g/kg ka	1,6	1,6	1,8	1,9
Natrium (Na)	g/kg ka	<0,21	<0,21	<0,21	<0,21
Alumiini (Al)	mg/kg ka	200	150	41	31
Boori (B)	mg/kg ka	13	29	13	49
K/(Ca+Mg) ekv. suhde		0,18	0,19	0,21	0,30
Arseeni (As)	mg/kg	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Kromi (Cr)	mg/kg	0,7	<0,1	0,6	0,2
Titaani (T)	mg/kg	1	0,7	0,7	<0,5

Alueen varvuista ja sammalista otettiin kuvia multispektrikameralla, mutta kuvista ei saatu oleellisia havaintoja. Marjasadossa ja varpujen määrässä ei silmämääräisesti ollut merkittäviä eroja vuositasolla. Myöskään lisääntyvää heinä- tai ruoholajien määrää ei ollut havaittavissa. Normaali vuosittain vaihtelu vaikuttaa myös marjasadon ja kasvuston määrään.

## YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tieseurantakohteilla otettiin vesinäytteitä ja tehtiin kenttämittauksia vuosina 2020–2021 koko sulan kauden ajan. Tulosten tulkinnessa ja vertailussa tuleekin huomioida näytteenottoajankohdan vaikutus tuloksiin. Kesäkaudella otetuissa näytteissä pitoisuudet ovat pääsääntöisesti suurempia kuin aikaisin keväällä ja myöhään syksyllä otetuissa näytteissä. Lisäksi on huomioitava se, että vuonna 2020 hankkeessa otetut näytteet analysoitiin eri laboratoriossa kuin aiemmin vuosina 2017–2019 tien rakennuttajan toimesta otetut näytteet. Vuonna 2021 hankkeen näytteiden analysoijaksi vaihdettiin sama laboratorio, joka oli analysoinut näytteitä ennen hanketta mahdollisen laboratorion johtuvan eroavuuden vuoksi.

Tieseurantakohteiden vesinäytteiden perusteella tuhkalisäys nostaa osittain vesinäytteiden pitoisuuksia. Tuhkan emäksiset yhdisteet sitovat raskasmetalleja vaikealiukoiseen muotoon, minkä vuoksi metallien huuhtoutuminen on yleensä vähäistä. Jos maaperän pH alkaa laskea, raskasmetalleja voi liueta veteen. Myös aiemmissa tutkimuksissa on havaittu, että pH-, sähkönjohtavuus- ja raskasmetallitasot nousevat hetkellisesti tuhkan käytön seurauksena. Tilanne tasoittuu kuitenkin normaalille tasolle hyvin pian, eikä pidemmällä aikavälillä tuhkatiekohteilla ole havaittu merkittäviä pinta- tai pohjaveden laadun muutoksia. Tien huolellisella suunnittelulla ja rakentamisella voidaan vähentää haitta-aineiden huuhtoutumista. Esimerkiksi seurantakohteen osalta tien ali kulkevan laskuojan molemmin puolin jätettiin noin 30 metriä leveä alue, johon ei käytetty tuhkaa.

Tiekohteista otetuissa maanäytteissä havaittujen muutosten syytä on vaikea arvioida. Näytteiden välillä aikaa kului vain vuosi, joka on lyhyt aika seurannassa. Määrittystuloksiin vaikuttavat myös näytteenoton edustavuuden onnistuminen sekä analysoivan laboratorion vaihtuminen vuosien välillä. Seuranta tulisivikin jatkaa, jos tuhkan mahdollisia vaikutuksia halutaan todentaa.

Ojitetuilla turvemaidella on kivennäismaita yleisempää se, että ravinne-epätasapaino rajoittaa kasvua. Ojituksen myötä puuston kasvua on saatu parannettua, mutta ajan myötä kasvu heikkenee kivennäisaineiden puutostilojen takia. Turvemaidella puusto kärsii eniten kaliumin, fosforin ja boorin puutteesta. (Yara 2012, Äijälä 2019) Laboratorionäytteiden perusteella tällä metsäkohteella oli näitä puutostiloja.

Metsälannoituskohteilta otettujen maaperä- ja kasvinäytteiden välillä ei tapahtunut merkittävän suuria muutoksia vuoden aikana. Taimikkovaiheisen metsäalueen (kuvio 15) maaperä reagoi vahvemmin lannoitukseen kuin nuori kasvatusmetsä (kuvio 28). Suurimmat muutokset tapahtuivat boori- ja kaliumtasossa sekä maaperä- että kasvinäytteiden osalta, vaikka seuranta-aikamme oli lyhyt. Huotarin (2012) tutkimusten mukaan kaliumin ja boorin puutostilat korjaantuvatkin usein jo seuraavana vuonna, mikä tukee tuloksiamme. Fosfori liukenee tuhkasta hitaammin kuin esimerkiksi kalium ja boori, minkä vuoksi vaikutus ei vielä näy tuloksissa. Fosforipitoisuus korjaantunee keskimäärin 3–4 vuoden kuluttua tuhkalannoituksesta (Huotari 2012).

pH ja kokonaistyyppipitoisuus laskivat kummallakin kuviolla lannoituksen myötä. Liukoisen typen määrä maassa voi laskea tuhkalannoituksen myötä, mikä selittäisi sen, miksi tyyppipitoisuus oli vuoden aikana laskenut. Tuhkalannoitus lisää maaperän hajotustoimintaa, joka pitkällä aikavälillä edistää maan orgaanisen aineksen hajoamista. Tämän myötä myös tyyppiä vapautuu enemmän kasvien käyttöön, jolloin maaperässä olevan liukoisen typen määrä voikin laskea lannoituksen seurauksena. (Huotari 2012)

Mikäli kohteen typpipitoisuus on alhainen, alle 1,5 prosenttia, on typpilannoitus tarpeellinen kasvun kannalta (Yara 2012). Tulosten perusteella kuvion 15 typpipitoisuus oli ennen tuhkalannoitusta yli 1,5 prosentin viitearvon, kun taas kuvion 28 typpipitoisuus oli alhainen. Onkin huomioitava, että typpipitoisuus turvemailla voi vaihdella paljonkin saman alueen sisällä (Äijälä 2019). Jatkoa ajatellen tällä kohteella voisi kiinnittää huomiota typpipitoisuuteen ja tarkkailla, lähteekö se nousemaan ja aiheuttaako tuhkalannoitus hetkellisen laskun.

Vesinäytteiden perusteella lannoitus ei vaikuttanut ojaveden pH-arvoon, sähkönjohtavuuteen, kokonaisfosfori-, sulfaatti- tai kloridipitoisuuksiin haitallisesti. Myöskään raskasmetallipitoisuuksiin ei lannoituksella ollut merkittävää vaikutusta.

Myös metsänlannoituskohteiden tutkimuksissa on havaittu, että raskasmetallipitoisuudet kohoavat hetkellisesti lannoituksen takia. Lannoitettavan tuhkan laatu ja sen käyttömäärä vaikuttavat raskasmetallitasojen muutoksiin maaperässä. Kuten jo tiekohteiden seurannan tulokinnassa todettiin, maaperän happamuus vaikuttaa osaltaan raskasmetallien liukeneamiseen. pH:n lasku lisää riskiä, että raskasmetalleja voi liueta maaveteen pidemmän päälle. Myös äkillinen maan tasapainotilan muuttuminen lannoituksen takia voi aiheuttaa maaperän omien raskasmetallivarastojen vapautumisen. Tuhka on kuitenkin hyvin emäksistä, minkä ansiosta haitalliset raskasmetallit, kuten kadmium ja lyijy, ovat erittäin hidasti liukenevia muodossa. (Huotari 2012, Kauppila ym. 2021) Tuhkalannoitteiden ympäristövaikutuksista pidemmällä aikavälillä ei kuitenkaan ole tutkimustietoa. Tämän vuoksi tuhkalannoitteelle on asetettu raskasmetallien raja-arvot. Niiden avulla estetään haitallisten raskasmetallien liiallinen kertyminen maaperään.

Varpujen ja marjojen raskasmetallitasot eivät nouse lannoituksen myötä, vaan pääasiassa laskivat. Vastaaviin havaintoihin ovat päätyneet myös Tuovinen ym. (2019) ja Huotari (2012) kirjallisuusselvityksissään. Tuovisen ym. (2019) mukaan tuhkalannoitus ei vaikuta marjojen raskasmetallipitoisuuksiin ensimmäisinä vuosina, kun taas Huotarin (2012) mukaan pitoisuudet voivat tilapäisesti nousta, minkä vuoksi marjojen poimintaa lannoitusta seuraavana vuonna kannattaa välttää.

On havaittu, että tuhkalannoitus voi vähentää varpukasvien määrää niin kangas- kuin suometsissä. Sen sijaan heinä- ja ruoholajien määrä voi lisääntyä. Muutos on usein voimakkaampi typpirikkaalla turvemailla kuin kangasmailla tai niukatyyppisillä soilla. Myös sammalpeitteen väheneminen aluksi on mahdollista. Kasvupaikan lajiston muutoksista huolimatta monipuolisuus voi lisääntyä. (Huotari 2012) Lannoitus ei vaikuttanut seurattavan kohteemme marjasatoon tai varpujen määrään. Tulosten luotettavuuden kannalta olisi näytteidenottoa jatkettava vielä tulevaisuudessa. Tuloksiin vaikuttaa myös lannoitteen laatu ja levityksen tasaisuus.



## LÄHTEET

Huotari, N. 2012. Tuhkan käyttö metsänlannoitteena. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/504366/tuhkan-kaytto-metsalannoitteena%5b1%5d.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [viitattu 18.10.2021]

Kauppila, M., Kontinen, K. & Tenhola, T. 2021. Tuhkan hyötykäyttö metsätaloudessa. Tapio Oy. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://tapio.fi/wp-content/uploads/2021/03/Tuhkan-hyotykaytto-metsataloudessa-esite.pdf> ISBN 978-952-5632-98-9

Oravainen, R. 1999. Vesistötulosten tulkinta -opasvihkonen. Saatavissa: <https://kvvy.fi/wp-content/uploads/2015/10/opasvihkonen.pdf> [viitattu 15.10.2021].

Teittinen, A. 2021. Metsäasiantuntija. MHY Etelä-Savo. Henkilökohtainen tiedonanto, puhelinkeskustelu. 21.10.2021.

Tuovinen, N., Heikkilä, R. & Lindholm, T. 2019. Tuhkalannoituksen vaikutus marjoihin ja sieniin. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://tapio.fi/wp-content/uploads/2019/10/Tuhkalannoituksen-vaikutus-marjoihin-ja-sieniin-SYKE.pdf> [viitattu 18.10.2021]

Vihavainen, J., Tuominen, R. & Tenhola, T. 2020. Tuhkan ympäristövaikutukset. Julkaisussa: Soininen, H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. (toim.) Metsä, ympäristö ja energia. Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Vuosijulkaisu 2020. Xamk kehittää 131. ISBN: 978-952-344-294-8.

Yara. 2012. Metsänlannoitusopas. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://tuhtametsasta.fi/wp-content/uploads/2017/11/YARA\\_Metsalannoitusopas.pdf](https://tuhtametsasta.fi/wp-content/uploads/2017/11/YARA_Metsalannoitusopas.pdf) [viitattu 20.10.2021]

Äijälä, O., Koistinen, A., Sved, J., Vanhatalo, K. & Väisänen, P. (toim.) 2019. Metsänhoidon suositukset. Tapion julkaisuja. ISBN 978-952-5632-75-0. Julkaistu verkossa 31.5.2019. Saatavissa: [https://tapio.fi/wp-content/uploads/2020/09/Metsanhoidon\\_suosituksset\\_Tapio\\_2019.pdf](https://tapio.fi/wp-content/uploads/2020/09/Metsanhoidon_suosituksset_Tapio_2019.pdf)

# EFSOA-HANKKEEN ENSIMMÄISEN MONITOROINTI- VUODEN TULOKSIA

Leena Pekurinen & Tuija Ranta-Korhonen & Anssi Laamanen

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulussa on käynnissä luomuviljelyn ympäristövaikutuksia tutkiva Environmentally Friendly Smart Organic Agriculture – EFSOA-hanke. Hankkeen pääpartneri on Pietarissa sijaitseva maatalousalan tutkimusinstituutti Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEAP). Lisäksi hankkeeseen osallistuvat Suomesta Luonnonvarakeskus (Luke) sekä Venäjältä kasvinsuojeluun erikoistunut tutkimuslaitos All-Russian Institute of Plant Protection (FSBSI VIZR). Hanketta rahoitetaan Kaakkois-Suomi–Venäjä CBC 2014–2020 -ohjelmasta, ja sen kesto on 1.3.2020–31.8.2022.

## HANKKEEN SEURANTAKOhteet

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun toteuttamassa hankkeen osuudessa on kaksi seurantakohtetta: ”Saunapello” ja ”Kekkonen”. Ne sijaitsevat Juvan kunnan alueella. Saunapellon pinta-ala on 11,76 ha ja Kekkonen pinta-ala 6,88 ha. Kuvassa 1 on esitetty kohteet kartalla. Tarkasteltava alue on merkitty karttaan vaaleanvihreällä värillä. Pelloilla on toteutettu luomuviljelyä yli 20 vuoden ajan.

Saunapellon maaperä on multavaa hienoa hietaa ja Kekkonen maa runsasmultaista hietamoreenia. Saunapellolla on viimeksi viljelty syysrypsiä, jonka sato on korjattu heinäkuussa 2021. Kekkosella kasvaa monivuotista nurmea. Saunapellon peltolohkolla noudatetaan viiden vuoden viljelykiertoa ja Kekkonen peltolohkolla kuuden vuoden viljelykiertoa. Viljelykierron alkuvuosina kasvatetaan nurmea, jonka lisäksi viljelykiirroissa vuorottelevat viljat, herne ja syysrypsi. Viljelykierrat ovat:

Saunapello: nurmi1-nurmi2-syysrypsi-herne-kevätilja+heinänsiemen

Kekkonen: nurmi1-nurmi2-nurmi3-kevätilja-herne-kevätilja+heinänsiemen

Saunapellon viljelykierrossa syysrypsin kylvö tapahtuu kolmannen vuoden kesällä nurmen ensimmäisen sadonkorjuun jälkeen. Viljelykierrossa käytetään esikasvina hernetta, joka on hyvä typensitojakasvi. Suojakasvina on viljelty kevävehnä tai kauraa. Välivuosina peltolohkoilla viljellään monivuotista heinää. Aktiivisella viljelykierrolla edistetään peltojen kasvukuntoa, parannetaan hiilen ja typen sidontaa, alennetaan kasvitautiliskiä sekä torjutaan rikkakasveja.



**KUVA 1.** Kuvassa vasemmalla Saunapelto ja oikealla Kekkonen (kuva Maanmittauslaitos – Karttapaikka)

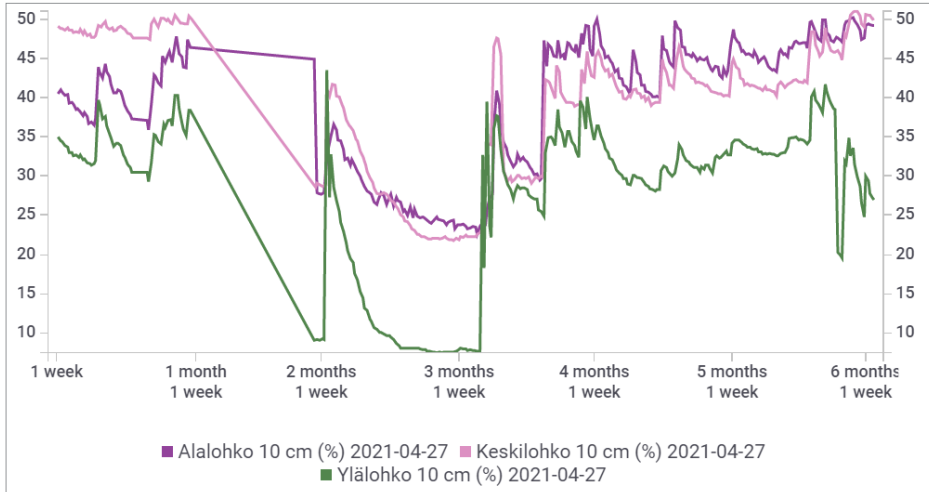
Peltolohkoilla on tehty perusviljavuustutkimus huhtikuussa 2020, ja peltomaan laatu testiin kuuluvan itsearvioinnin viljelijä on tehnyt toukokuussa 2021. Niiden tuloksia hyödynnetään hankkeessa.

## MAAPERÄANTURIT

Marraskuussa 2020 Saunapellolle asennettiin suomalaisen Soil Scout Oy:n kehittämä ja valmistama maaperäanturijärjestelmä. Järjestelmä koostuu tukiasemasta, vahvistimesta ja antureista. Saunapellolla antureita on kuusi. Tukiasema vaatii toimiakseen verkkovirtaa, vahvistin puolestaan toimii aurinkoenergialla. Langattomat anturit on asennettu peltoon kolmeen eri mittauspisteeseen (ylä-, keski- ja alalohko) siten, että kussakin pisteessä on kaksi anturia 10 ja 30 cm:n syvyydessä. Horisontaalisesti anturit ovat noin 60 cm:n päässä toisistaan.

Anturit mittaavat maaperän lämpötilaa, kosteutta ja johtokykyä. Järjestelmään kuuluu lisäksi erillinen pilvipalvelu, johon tulokset kootaan. Palvelussa on saatavilla analyysityökalu, jonka avulla voidaan esimerkiksi vertailla pellon eri osien mittaustuloksia tai tarkastella tietyn mittauspisteen olosuhteiden muutosta pitkällä aikavälillä. Pilvipalvelusta pääsee myös tarkastamaan järjestelmän eri osien tilan. Kuvassa 2 on esitetty kosteuden kehittyminen

pellon eri osissa 10 cm:n syvyydessä puolen vuoden jaksolla. Kesäkuun lopulta elokuun alkuun kestänyt kuiva kausi näkyy erityisesti peltolohkon yläosassa. Keski- ja alaosassa peltoa kosteuden vaihtelut ovat selvästi pienemmät. Yläosassa kosteuspitoisuus laski alle nuutumisrajan, mikä näkyi kasvuston kuivumisena.



**KUVA 2.** Maaperän kosteuspitoisuus 10 cm:n syvyydessä Saunapellon eri osissa ajanjaksolla 27.4.–27.10.2021

Kuva 3 on otettu 21.7.2021 Saunapellon ylälohkolta, ja siinä näkyy selvästi kasvuston nuutuminen ja kasvun pysähtyminen.



**KUVA 3.** Kuivuudesta kärsinyttä herne-kevävehnäkasvustoa Saunapellolla 21.7.2021 (kuvat Tuija Ranta-Korhonen).

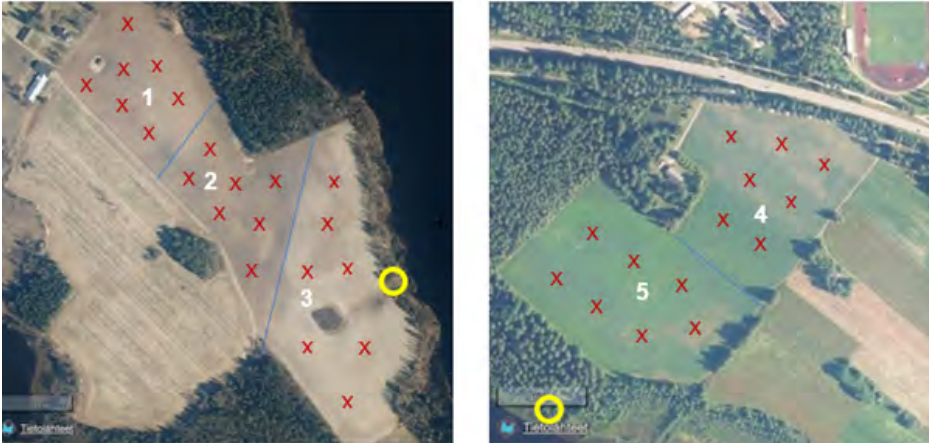
Keskitalvella järjestelmän vahvistin oli hetken poissa käytöstä, koska aurinkoenergiaa ei ollut riittävästi saatavilla. Järjestelmä oli kokonaan pois käytöstä myös 27.5.2021–23.6.2021 välisen ajan tukiaseman vioittumisen vuoksi. 5.8.2021 kahden alemman lohkon anturit nostettiin ylös pellon muokkauksen ajaksi. Samasta syystä ylimmän lohkon anturi nostettiin tilapäisesti ylös 18.10.2021.

## MAAPERÄNÄYTTEET

Maaperä on monimutkainen kokonaisuus, jossa sekä kemiallisilla, fysikaalisilla että biologisilla tekijöillä on oma roolinsa. Kemiallisia ominaisuuksia ovat muun muassa kasvien tarvitsemien alkuaineiden kokonaisvarannot (N, S, P, K, Ca, Mg ja Na) sekä kasveille käyttökelpoiset varannot. ProAgrian NIR-analyysi tarkastelee myös maaperän C/N- sekä C/S-suhteita. Fysikaalisia ominaisuuksia ovat muun muassa maaperän pH, johtokyky, orgaanisen hiilen ja muun orgaanisen aineksen osuus ja niiden välinen suhde sekä maaperän koostumus. Maan mururakenne, liettyminen ja tuulieroosioriski kuuluvat myös fysikaalisiin ominaisuuksiin. Merkittävä fysikaalinen muuttuja on myös maan vedenpidätyskyky. Biologisia ominaisuuksia puolestaan ovat mikrobien biomassa, mikrobiaktiivisuus sekä sienien ja bakteerien välinen suhde.

Mikrobiologinen laatu vaikuttaa moniin maan kasvukuntoon vaikuttaviin ominaisuuksiin. Peltoviljelyssä biologista kasvukykyä ei ole vielä paljoakaan huomioitu, vaikka parantamalla biologista kasvukykyä voidaan saada suurempia ja parempilaatuisia satoja. Maan biologinen kasvukunto korostuu erityisesti luomutuotannossa. Tulevaisuudessa voidaan kemiallisten lannoitteiden ja kasvinsuojeluaineiden käyttöä rajoittaa, jolloin maan biologisten prosessien tunteminen ja kasvukunnon huomioiminen tulevat yhä tärkeämmiksi.

ProAgrian NIR-analyysillä määritetään maaperän kemiallisia, fysikaalisia ja biologisia ominaisuuksia. Analyysiin voidaan sisällyttää lannoitusosuudet, kun tiedetään, mitä kasvia pelloilla kasvatetaan seuraavaksi. Kesällä 2021 molemmilta monitoroinnin kohteena olevilta pelloilta otettiin maaperäkairalla näytteet, jotka toimitettiin Eurofins Viljavuuspalvelu Oy:n laboratorioon NIR-analyysiä varten. Saunapellon peltolohko jaettiin näytteenottoa varten kolmeen eri alueeseen (alueet 1–3). Kekkonen puolestaan jaettiin kahteen eri alueeseen (ylä- ja alaosa, alueet 4 ja 5). Kultakin alueelta otettiin yksi kokoomanäyte. Kokoomanäytteet koostuivat seitsemästä osanäytteestä. Osanäytteiden näytteenottopaikat on esitetty kartoissa (kuva 4). Kukin kokoomanäyte edustaa enintään viiden hehtaarin pinta-alaa.



**KUVA 4.** Näytteenottoaikat kartoissa. Vasemmalla Saunapelto ja oikealla Kekkonen (Kuva: Maanmittauslaitos – Karttapaiikka)

Kummankin tutkittavana olevan peltolohkon maalaji on enimmäkseen (79–83 %) hienoa hietaa ja hiekkaa. Seassa on 9–17 prosenttia hiesua ja 2–14 prosenttia savea. Mururakenne on hyvä, ja tuulieroosio- ja liettymisriskit ovat matalia. Saunapellon alaosassa tuulieroosioriski on hieman suurempi kuin keski- ja yläosissa. Maaperän rakenne on NIR-analyysin mukaan hyvä tai välttävä, mutta Saunapellon alaosassa pellon rakenteessa on parantamisen varaa. Vedenpidätyskäyrät kertovat maaperässä olevan veden määrän ja kenttäkapasiteetin sekä kastelun aloituspisteen. Saunapellon yläosassa kastelu tulisi aloittaa, kun kosteus on 16,5 prosenttia ja kastelu enintään 37 mm (keskiosassa 14,6 % ja 38 mm, alaosassa 22 % ja 32 mm). Kekkonen yläosassa kastelu tulisi aloittaa kosteuspitoisuuden ollessa 18,2 prosenttia ja kastelu enintään 35 mm. Alaosassa vastaavat lukemat ovat 15,2 prosenttia ja 38 mm. Kastelumäärät määräytyvät kenttäkapasiteetista, joka puolestaan kuvaa maan vedenpidätyskykyä. Orgaanista ainesta lisäämällä vedenpidätyskykyä voidaan kasvattaa.

## VESINÄYTTEET

Molempien peltokohteiden laskuajasta otettiin vesinäytteet kahdesti kasvukauden aikana. Koska molemmat kohteet sijaitsevat vesistöjen äärellä, otettiin myös vesistä vertailunäytteet. Näytteet toimitettiin Eurofins Viljavuuspalvelu Oy:n laboratorioon analysoitavaksi. Laboratorioanalyysien tulokset on esitetty taulukossa 1.



**Taulukko 1.** Vesinäytteiden laboratorioanalyysien tulokset alkukesällä ja syksyllä 2021.

	Ominaisuus	Yksikkö	Saunapello	Saunapello vertailu	Kekkonen	Kekkonen vertailu
15.6.2021	COD <sub>Mn</sub>	mg O <sub>2</sub> /l	36	27	3,9	14
	P <sub>tot</sub>	mg/l	0,4	0,2	0,2	<0,2
	N <sub>tot</sub>	mg/l	1,8	<1,0	<1,0	<1,0
	DOC	mg/l	30	25	4,0	14
	TOC	mg/l	30,9	24,8	4,5	17,4
	KMnO <sub>4</sub>	mg KMnO <sub>4</sub> /l	140	110	15	55
30.8.2021	COD <sub>Mn</sub>	mg O <sub>2</sub> /l		22	4,2	14
	P <sub>tot</sub>	mg/l		<0,2	<0,2	<0,2
	N <sub>tot</sub>	mg/l		<1,0	<1,0	<1,0
	DOC	mg/l		22	4,3	15
	TOC	mg/l		23,1	5,2	15,2
	KMnO <sub>4</sub>	mg KMnO <sub>4</sub> /l		87	17	54

Kesäkuussa näytteenottopäivänä riehui Vieno-myrsky, mutta se ei juurikaan näy tuloksissa. Elokuun lopussa vedenpinta oli laskenut niin paljon, että Saunapellon laskuojasta ei saatu otettua näytettä. Kesäkuussa Saunapellon näytteet sisälsivät runsaasti humusta. Vertailunäytteessä elokuussa humusta oli vähemmän. Kekkonen vesinäytteissä humusta oli vähän, mutta vertailunäytteet olivat keskiumuksisia.

Vesinäytteiden lisäksi ojavedestä ja vertailukohteesta tehtiin mittauksia ProDSS-kenttämittauslaitteella. Laite oli varustettu antureilla, jotka mittaavat pH:ta, johtokykyä (µS/cm), sameutta (FNU), veden lämpötilaa sekä happipitoisuutta (% ja mg/l).

## PELTOMAAN LAATUTESTI

Peltomaan laatutesti kattaa itsearvioinnin, kuoppahavainnot (lapiotestit) ja täydentävinä mittauksina lierot, pinta- ja pohjamaan vedenjohtavuudet sekä maahengityksen. Peltomaan laatutesti tehtiin Saunapellon ja Kekkonen peltolohkoilla 26.5.2021 ja osittainen testi 11.10.2021. Efsoa-hankkeessa maaperää tutkittiin pelkästään ruokamultakerroksen osalta. Testin täydentävistä mittauksista tehtiin pintamaan vedenjohtavuudet ja lieromääritykset kummallakin peltolohkolla. Peltomaan laatutesti tehtiin 26.5.2021, ja osittainen testi 11.10.2021. Viljelijä teki itsearvioinnit Saunapellolle ja Kekkoselle toukokuussa 2021.

Osana peltomaan laatutestiä tutkittavana olevissa kohteissa tehdyt lapiotestit ja sinappikoeket ovat yksinkertaisia, eikä niiden suorittamiseen tarvita erikoisvälineitä. Lapiotestissä maahan kaivetaan testikuoppa. Mikäli näyte otetaan ainoastaan ruokamultakerroksesta,

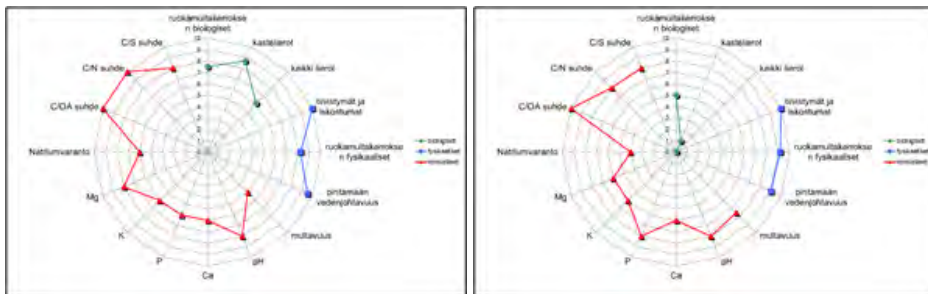


riittää kuopan kooksi 20 x 20 cm. Kuopan syvyys vastaa ruokamultakerroksen paksuutta. Mikäli halutaan näyte myös pohjamaasta, tulee kuopan olla mitoiltaan 40 x 50 cm ja lopulliselta syvyydeltään 40 cm. (ProAgria 2014)

Lapiotestin avulla tarkastellaan maaperän ominaisuuksia, kuten maalajia, maaperän kosteustilaa, yleisrakennetta, murtumista sekä murujen muotoa ja kokoa. Lisäksi arvioidaan maan pintarakenteen kestävyyttä ja multavuutta sekä tutkitaan lierokäytävien määrää. Lapiotestissä testikuopasta nostetusta maapalasta laskettiin lierot. Kasteliero laskettiin erikseen ja samoin muut erikseen.

Sinappikokeen avulla arvioitiin lierojen määrää. Kokeessa rajattiin pellostä noin 0,25 m<sup>2</sup>:n suuruinen ala, jolle kaadettiin sinappivettä. Sinappiveden annettiin imeytyä noin 15 minuuttia, jonka aikana sinappivesi imeytyi maaperään ja ajoi maassa olevat lierot maan pinnalle. Lierot kerättiin purkkeihin niin, että kasteliero kerättiin eri purkkiin kuin muut lierot. Sinappikaatoja tehtiin kokeen aikana kaksi kertaa.

Peltomaan laatutestin tulokset kirjattiin ProAgrian lomakkeelle. Niistä piirtyi ympyräkuvio, joka havainnollistaa peltomaan laadullisten ominaisuuksien tilaa. Kuvassa 5 on esitetty sekä Saunapellon että Kekkonen kesäkuussa tehdyn peltomaan laatutestin tulokset. Niitä on täydennetty viljavuusanalyysin tuloksilla (pH, Ca, P, K, Mg) ja ProAgrian NIR-analyysistä saaduilla tuloksilla (natriumvaranto, C/OA-, C/N- ja C/S-suhde).



**KUVA 5.** Peltomaan laatutestin tulokset Saunapellon (vas.) ja Kekkonen (oik.) peltolohkoilla. Punainen graafi on saatu viljavuusanalyysin ja ProAgrian NIR-analyysin tuloksista.

Testipäivänä toukokuussa Saunapelloilta löytyi lieroja 266–380 kpl/m<sup>2</sup>. Eniten lieroja oli peltolohkon keskiosassa. Lokakuussa ei tehty sinappikoetta, mutta lapiotestissä havaitut kasteliero kirjattiin sinappitestikohtaan lomakkeella. Lokakuussa lierojen määrä vaihteli pellon yläosan 79:stä alaosan 379 lieroon per m<sup>2</sup>. Pintamaan vedenjohtavuus vaihteli 8,8–10,0. Maaperässä ei havaittu tiivistymiä tai iskostumia, ja fysikaaliset ominaisuudet olivat muutenkin hyvät.

Kekkosen peltolohkolta pellon alaosasta ei löytynyt toukokuussa yhtään lieroa lapiotestissä tai sinappikokeessa. Yläosasta löytyi yksi kasteliero sinappitestissä (4 kpl/m<sup>2</sup>). Sinappitesti toistettiin Kekkosella lokakuussa, jolloin lierojen määräksi saatiin 29 kpl/m<sup>2</sup>. Pintamaan vedenjohtavuus vaihteli 8,1–9,9. Maaperässä ei havaittu tiivistymiä tai iskostumia, ja fyysikaaliset ominaisuudet olivat muutenkin hyvät.

NIR-analyysien tuloksia ei voi suoraan verrata perinteisen viljavuusanalyysin tuloksiin, koska niissä sovelletaan eri uuttomenetelmiä. Esimerkiksi maaperän biologiset ominaisuudet ovat perinteistä viljavuusanalyysiä paremmat.

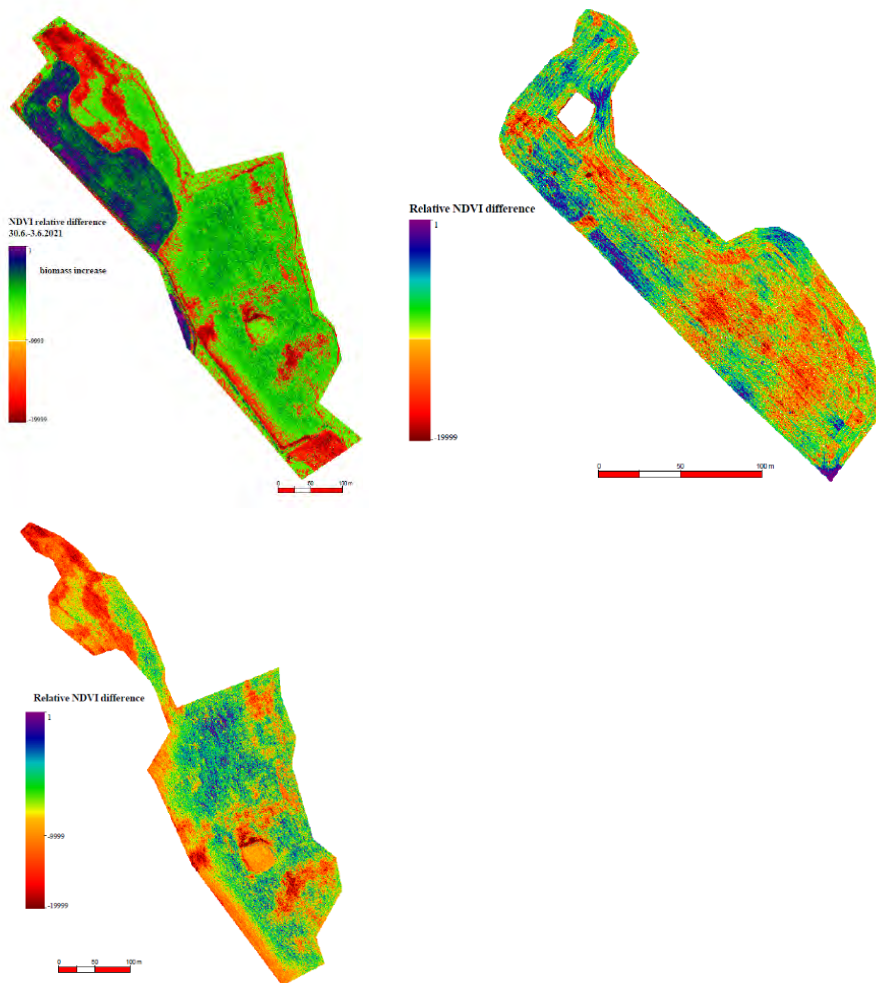
## DRONE-KUVAUS

Pekurilan saunapeltoa myös kuvattiin droonin ja multispektrikameroiden avulla. Kuvaus tehtiin kahdesti kesällä 2021. Ensimmäinen kuvaus järjestettiin 3.6.2021 ja toinen noin kuukautta myöhemmin, 30.6.2021. Kuvausten tarkoituksena oli tarkastella multispektrikuvausten käyttökelpoisuutta viljelykasvien kunnan ja sadon kehittymisen selvittämisessä. Multispektrikuvien pohjalta voidaan laskentaohjelmien avulla tuottaa erilaisia kasvillisuusindeksejä, kuten NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). NDVI määrittää kasvimassan määrän mittaamalla kasvien heijastaman lyhytaaltoisen infrapunavalon ja kasvien absorboiman punaisen valon välistä eroa. (GIS Geography 2021) Hankkeen kuvaukset suoritti droonikuvauksiin erikoistunut BVDrone Oy, ja kuvien tulkinnassa saatiin apua Luonnonvarakeskukselta. Kuvassa 6 on nähtävillä kuvauksissa käytetty drooni ja kuvauksissa käytetty kamera sekä punaisella värillä pisteet, joista kamera on ottanut kuvan.



**KUVA 6.** Kuvauksissa käytetty kiinteäsiipinen drooni, kuvauksissa käytetty kamera ja kuvauspisteet (kuvat Tuija Ranta-Korhonen ja BVDrone Oy)

Kuvausten avulla saatu raakadata käsiteltiin Pix4DMapper-ohjelmalla ja siitä laskettiin suhteellinen kasvillisuusindeksi NDVI. Kuvassa 7 on esitetty kasvuston kehitys Saunapellon eri osissa 3.6.2021 ja 30.6.2021 välisenä aikana.



**KUVA 7.** NDVI-laskennan tulokset Saunapelton eri osissa (kuva Luke, Jere Kaivosoja)

Kuvissa käytetään eri värejä merkitsemään suhteellista kasvillisuusindeksin muutosta. Kuvassa 7 on esitetty koko Saunapelto, ja siinä sinisellä värillä näkyy osalle peltoa rypsin tilalle keväällä kylvetty herne-vehnäseos, jonka kasvu kyseisellä aikavälillä on ollut selvästi muuta peltoa intensiivisempää. Tämä on selitettävissä sillä, että kyseinen alue kylvettiin vasta toukokuun lopussa. Kun kyseistä pellon osaa tarkastellaan yksityiskohtaisemmin alueen eri osia sisäisesti vertaillen, voidaan havaita, että suuri osa alueesta on merkitty punaisella värillä, mikä tarkoittaa suhteellisen heikkoa kasvua. Kuvassa on nähtävillä kasvillisuusindeksin muutos pellon rypsiä kasvavalla osalla. Siitä voidaan nähdä, että suhteellisesti parhaita kasvu on ollut pellon keskilohkolla, joka on muuta peltoa hieman kosteampi.

Multispektrikuvia voidaan käyttää viljelykasvien kunnon ja kasvunedistymisen tarkkailuun. Kuvien tulkinta vaatii kuitenkin ammattitaitoa sekä suuren määrän erilaista pohjatietoa muun muassa pellon maalajista, viljelykasvista ja sen kasvun vaiheista sekä sääolosuhteista.

## HANKKEEN JATKOTOIMENPITEET

Efsoa-hankkeessa tutkitaan luomuviljelyn ympäristövaikutuksia tutkimuskohteina olevilla kahdella pellolla. Tietoa kerätään erilaisilla seuranta- ja monitorointitavoilla ja näytteiden analysoinnilla. Seuranta ja monitorointia on toteutettu noin vuoden ajan. Ympäristövaikutukset alkavat näkymään usein vasta useiden vuosien toimien seurauksena, joten nyt saadut tulokset eivät kerro vielä muutoksesta, vaan tämänhetkisestä tilasta. Lisäksi vuoden 2021 kasvukausi oli monella tapaa poikkeuksellinen kevään kylmyyden ja sateisuuden ja toisaalta kesän pitkien hellejaksojen ja kuivuuden vuoksi. Monin paikoin pellot kärsivät kuivuudesta ja sato jäi normaalista. Seuranta ja monitorointia jatketaan seuraavan kasvukauden ajan hankkeen päättymiseen asti. Pro DSS -mittauksia suoritetaan jatkossakin, ja keväällä 2022 teetetään NIR-analyysit ja vesinäytteiden analyysit kummaltakin peltolohkolta.

## LÄHTEET

BVDrone Oy. Pekurilanniemi, Juva. Loppuraportti.

GIS Geography. 2021. What is NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). WWW-dokumentti. Päivitetty 14.6.2021. Saatavissa: <https://gisgeography.com/ndvi-normalized-difference-vegetation-index/>.

Luke 2021. Pekurilanniemi multispektrikuvien tulkinta. Jere Kaivosoja 16.9.2021.

ProAgria. 2014. Peltomaan laatutesti: Havaintojen ja mittausten teko-ohje. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.proagria.fi/sisalto/peltomaan-laatutesti-5583>

# KANSAINVÄLISELLÄ YHTEIS- TYÖLLÄ VIERASKASVEJA TORJUMAAN

Tuija Ranta-Korhonen & Päivikki Liukkonen

Prevention and utilization of Invasive Alien Species – PURE -hankkeessa (tästä eteenpäin PURE) lisätään tietoisuutta vieraskasvilajeista ja niiden torjunnasta Etelä-Savossa sekä Pietarissa ja Leningradin alueella. Koulutus- ja neuvonta-aineistossa käytetään esimerkkikasveina jättiputkea, jättipalsamia sekä komealupiinia. Lisäksi hankkeessa tutkitaan jättiputken käyttöä energian ja erilaisten kemiallisten yhdisteiden raaka-aineena. Hanketta toteuttavat Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun (Xamk) lisäksi Luonnonvarakeskus (Luke) sekä Venäjän puolelta ITMOn yliopisto (ITMO), Pietarin valtiollinen metsäteknillinen yliopisto (FTU) sekä tutkimusinstituutti IEAP (Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production). Hankkeen toteutusaika on 1.1.2021–30.11.2022, ja sitä rahoittaa Kaakkois-Suomi–Venäjä CBC 2014–2020 -ohjelma.

## VIERASLAJIT SUOMESSA

Vieraslajit.fi-sivuston määritelmän mukaan vieraslajilla tarkoitetaan ”kasvia, eläintä tai muuta eliölajia, jonka siirtymistä luontaisen levinneisyysalueen ulkopuolelle ihminen on tahattomasti tai tarkoituksella edesauttanut” (vieraslajit.fi). Haitallisiksi vieraslajit määritellään silloin, kun ne uhkaavat luonnon monimuotoisuutta ja siihen liittyviä niin sanottuja ekosysteemipalveluja.

Haitalliset vieraslajit muuttavat muun muassa elinympäristöjä ja syrjäyttävät alkuperäisiä lajeja. Ne voivat myös vaikuttaa haitallisesti ihmisten terveyteen tai elinkeinon harjoittamiseen. (EU:n asetus 1143/2014.) Laki vieraslajeista aiheutuvien riskien hallinnasta 1709/2015 täydentää edellä mainittua asetusta, ja siinä säädetään myös toimenpiteistä vieraslajeista aiheutuvien vahingollisten vaikutusten ehkäisemiseksi ja vähentämiseksi. Valtioneuvoston asetuksella vieraslajeista aiheutuvien riskien hallinnasta 704/2019 muun muassa täydennetään Euroopan unionin vieraslajien luetteloa kansallisesti merkityksellisillä haitallisilla vieraslajeilla. (Vna 704/2019.) Hankkeen esimerkkilajeista jättipalsami ja jättiputket on säädetty haitallisiksi vieraslajeiksi koko EU:n alueella, kun taas jättilupiini kuuluu kansallisesti haitalliseksi säädettyjen vieraslajien listaan.



## HANKKEEN TOIMENPITEET

PURE-hankkeen toimenpiteet jakautuvat kolmeen osa-alueeseen, joita ovat tiedonvälitys ja vieraslajitietoisuuden lisääminen, jättiputken torjuntaan keskittyvät toimenpiteet sekä jättiputken hyötykäyttömahdollisuuksia selvittävät toimenpiteet.

Tiedonvälitystä tehdään sekä Suomessa Kaakkois-Suomen alueella että Venäjän puolella Pietarissa ja Leningradin alueella. Kohderyhminä näissä toimenpiteissä ovat koululaiset ja opiskelijat sekä paikalliset asukkaat ja yhteisöt. Hankkeen asiantuntijat ovat vuoden 2021 aikana vierailleet kouluissa ja erilaisissa tilaisuuksissa sekä järjestäneet luento- ja talkootilaisuuksia paikallisille asukkaille. Suomessa tätä toimenpidettä toteuttavat yhteistyössä Xamk ja Luke ja Venäjän puolella FTU. Kuvassa 1 on näkymä Mikkelissä Suomenniemen kylässä järjestetyistä jättiputken torjuntatalkoista.



**KUVA 1.** Talkoot Suomenniemellä kesäkuussa 2021 (kuva Päivikki Liukkonen)

Jättiputken torjunnan uusia keinoja tutkitaan Venäjän puolella IEAP:n koepelloilla Pietarin eteläpuolella Pushkinin alueella. Tutkittavia torjuntakeinoja ovat mekaaninen muokkaus, kemiallinen torjunta sekä jättiputkikasvuston korvaaminen toisilla kasveilla. Mekaanista muokkausta on toteutettu kasvukauden 2021 aikana erilaisilla laitteilla ja eri syvyyksillä. Korvaavina kasveina on käytetty artisokkaa, kauraa, nurmea sekä perunaa. Maa-artisokkakasvustoa näkyy kuvassa 2.



**KUVA 2.** Hankkeessa on kokeiltu muun muassa maa-artisokkaa korvaavana kasvina (kuva Sergey Chugunov)

Hankkeessa tarkastellaan jättiputken hyödyntämistä raaka-aineena monin eri keinoin. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun ympäristölaboratoriossa on tutkittu jättiputken sisältämiä yhdisteitä tislaukokeiden avulla, lisäksi on tutkittu jättiputken käyttökelpoisuutta biokaasuprosessin raaka-aineena sekä otettu selvää jättiputken lämpöarvosta. ITMOn yliopiston laboratoriossa puolestaan testataan jättiputkea selluloosan, bioetanolin ja peptidien lähteenä. FTU:n laboratoriossa tutkitaan jättiputkessa saatavilla olevia hyödyllisiä uutteita. Hyödyntämiskeinojen toivotaan tulevaisuudessa luovan lisäkannustetta torjuntatoimiin. Kuvassa 3 on esitetty tislauksen avulla jättiputkesta erotettuja uutteita.



**KUVA 3.** Tislauksen avulla jättiputkesta erotettuja uutteita (kuva Marjatta Lehesvaara)



## YHTEENVETO

Vieraslajit eivät tunne valtioiden rajoja. Tämän vuoksi kansainvälinen yhteistyö on erittäin tärkeää taisteltaessa eri lajien leviämistä vastaan ja pyrittäessä vähentämään vieraslajien aiheuttamia haittavaikutuksia. Koska vieraslajit ovat levinneet laajoille alueille Suomessakin, tarvitaan niitä vastaan taisteltaessa yhteistyötä ja joukkovoimaa. Vieraslajien torjuntatyö onkin viime aikoina ollut ilahduttavasti esillä julkisuudessa. Myös Venäjän puolella aiheutta on käsitelty laajalti eri tiedotusvälineissä.

## LÄHTEET

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) N:o 1143/2014 haitallisten vieraslajien tuonnin ja leviämisen ennalta ehkäisemisestä ja hallinnasta

Laki vieraslajeista aiheutuvien riskien hallinnasta 1709/2015. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20151709>

Vieraslajit.fi. Tietoa vieraslajeista Suomessa. Saatavilla: <https://vieraslajit.fi/>

Vna 704/2019. Valtioneuvoston asetus vieraslajeista aiheutuvien riskien hallinnasta. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2019/20190704>

# VIERASKASVILAJITIEDOUTTA PAIKALLISILLE TOIMIJOILLE JA KOULULAISILLE

Päivikki Liukkonen & Tuija Ranta-Korhonen

Vieraskasvilajit ovat lajeja, jotka ovat levinneet luonnollisten levinneisyysalueidensa ulkopuolelle ihmisen tahallisen tai tahattoman toiminnan edesauttamana. Vaikka kaikki vieraslajit eivät aiheuta uhkaa ympäristölle, EU:n vieraslajiasetuksen (EPNA 1143/2014) mukaan huomattava osa vieraslajeista voi kuitenkin levitessään aiheuttaa merkittäviä haittoja luonnon monimuotoisuudelle. Muun muassa ekosysteemipalveluiden kautta näillä haitoilla on sekä välittömiä että välillisiä taloudellisia ja sosiaalisia vaikutuksia. Ilmastonmuutoksen myötä haitallisiin vieraskasvilajeihin liittyvien riskien on katsottu kasvavan entisestään.

Haitallisten vieraskasvilajien aiheuttamien haittavaikutuksien ennalta ehkäisemiseksi ja hallitsemiseksi on laadittu sekä Euroopan unionin jäsenvaltioita koskevia että kansallisia lakeja ja asetuksia (EPNA 1143/2014; Laki vieraslajeista aiheutuvien riskien hallinnasta 1709/2015; VNA 704/2019). Viimeistään näiden lakien ja asetusten myötä haitallisten vieraskasvilajien tuntemuksesta voidaan katsoa tulleen tärkeä kansalaistaito. Kansalaisten on oltava tietoisia esimerkiksi omistamallaan kiinteistöllä kasvavista lajeista sekä niiden vaikutuksista, sillä vieraslajilain mukaan haitalliseksi luokiteltujen vieraslajien hallussa pitäminen, kasvattaminen, kuljettaminen, myyminen tai muulla tavoin luovuttaminen on yksiselitteisesti kielletty (Laki vieraslajeista aiheutuvien riskien hallinnasta 1709/2015, § 11).

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulussa toteutettavan Prevention and Utilization of Invasive Alien Species – PURE -hankkeen yhtenä tavoitteena on lisätä Kaakkois-Suomen, Pietarin ja Leningradin alueen asukkaiden tietoutta ja tietoisuutta haitallisista vieraskasvilajeista sekä niiden vaikutuksesta ympäristöön. Tietouden lisäämiseksi hankkeen toimenpiteenä toteutetaan vieraslajiaiheista tiedotus- ja valistustoimintaa esimerkiksi valikoituneista jättiputkesta, jättipalsamista ja komealupiinista. Toiminnan kohderyhmänä ovat koululaiset ja opiskelijat sekä paikalliset asukkaat ja yhteisöt. Tässä artikkelissa esittelemme PURE-hankkeen vuoden 2021 aikana Kaakkois-Suomen alueella toteutettavia yleisötalaisuuksia ja kouluvierailuja. Suomessa hanketta toteuttaa Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun lisäksi Luonnonvarakeskus ja Venäjällä ITMO-yliopisto, Pietarin metsäteknillinen yliopisto sekä Maataloustuotannon ja -tekniikan instituutti. Hanke kuuluu Kaakkois-Suomi–Venäjän CBC 2014–2020 –ohjelmakokonaisuuteen, jota rahoittavat Euroopan unioni, Venäjän federaatio ja Suomen tasavalta. Hankkeen toteutusaika on 1.1.2021–30.11.2022.

## YLEISÖTILAISUUDET

PURE-hanke järjesti ensimmäisenä toimintavuonnaan yhteensä kolme hankesuunnitelmassa määriteltyä yleisötilaisuutta Kaakkois-Suomen alueella, yhden Otavan koulutilalla ja kaksi Suomenniemen kirkonkylällä yhteistyössä paikallisen kotiseutuyhdistyksen kanssa. Vieraslajitietouden lisäksi kaikissa yleisötilaisuuksissa tutustuttiin myös jättiputkien torjuntaan käytännössä. Kohteet valikoituivatkin näin ollen entuudestaan tiedettyjen jättiputkiesiintymien perusteella, joiden torjumiseen oli saatu lupa maanomistajalta. Koska molemmat esiintymät sijaitsevat lähellä asutusta tai virkistysalueita, torjuntamenetelmäksi valikoitui mekaaninen torjunta.

Kesäkuun alussa Otavan koulutilalla järjestetty tilaisuus alkoi asiantuntijaluennolla haitallisista vieraskasvilajeista ja niihin liittyvistä velvollisuuksista. Luennon jälkeen osallistujat siirtyivät maastoon PURE:n asiantuntijoiden opastuksella tutustumaan käytännössä jättiputkien torjuntatoimiin. Jättiputket ovat haitallisista vieraslajeistamme ainoita, joihin liittyy myös välittömiä, ihmisten terveyteen liittyviä riskejä. Jättiputkien kasvinesteen sisältämät fototoksiset furanokumariinit voivat paljaalle iholle joutuessa ja UV-säteilylle altistuessa aiheuttaa vakavia, palovammoja muistuttavia iho-oireita, jotka voivat olla pysyviä (mm. Terve askel luontoon 2018; Compound Interest 2017). Tämän vuoksi jättiputkia torjuttaessa iho on suojattava kauttaaltaan tarkasti esimerkiksi pitkähihaiseen paitaan sekä pitkiin housuihin pukeutumalla. Hanke tarjosi talkoisiin osallistujien käyttöön myös paksut kumihansikkaat ja suojalasit.

Koska vieraslajijätteen käsittely vaatii aina huolellisuutta, jättiputkien ja muiden haitallisten vieraslajien torjuntatoimet kannattaa esimerkiksi ajoittaa mahdollisuuksien mukaan niin, että hävitettävää kasvijätettä syntyy mahdollisimman vähän. Otavan kohteella kasvukauden alussa jättiputkien mekaanisen torjunnan havaittiin sujuvan kätevästi parityöskentelynä siten, että parin toinen osapuoli huolehti kasvien kaivamisesta ja kitkemisestä ja toinen osapuoli keräsi poistetut osat saman tien jätesäkkiin. Jätesäkit toimitettiin hävitettäväksi Metsäsairilan lajittelu- ja kierrätyskeskukseen. Kitketyt jättiputken juurakot tai muut lisäantymisosat tulee siis aina hävittää polttamalla osana sekajätettä. Esimerkiksi tavallisen kotitalouskompostoinnin lämpötila ei riitä takaamaan, että jättiputken juurakot menettäisivät kasvukykynsä ja mahdolliset siemenet itämiskykynsä. Samaan tapaan myös mahdollisesti haitallisten vieraslajien siemeniä tai juurakoita sisältävän maa-aineksen käsittelyssä tulee noudattaa erityistä varovaisuutta. (Huusela ym. 2021)



**KUVA 1.** Jättiputken ylös kaivettua juurakkoa Suomenniemen kirkonkylän jättiputki-kohteella kesäkuussa 2021 (kuva Päivikki Liukkonen)

Suomenniemen kirkonkylällä niin ikään kesäkuun alussa järjestetty vieraslajitilaisuus sekä syyskuun puolivälissä pidetyt vieraslajitalkoot toteutettiin yhteistyössä paikallisen kotiseutuyhdistyksen kanssa. Yhdistys otti hankkeen asiantuntijoihin yhteyttä, sillä yhdistyksen jäsenet olivat huolestuneet kirkonkylällä varsin keskeisellä paikalla sijainneen autioituneen kiinteistön alueella valtoimenaan levinneestä jättiputkikasvustosta. Kiinteistön omistajalta oli saatu luvat kasvuston poistamiseen, mutta yhdistys kaipasi asiantuntija-apua ja käytännön opastusta tarvittaviin toimiin. Aiemmat mekaaniset torjuntayritykset alueella eivät olleet tuottaneet toivottuja tuloksia.

Myös Suomenniemen kirkonkylän ensimmäinen yleisötilaisuus alkoi asiantuntijaluennolla, joka herätti runsaassa osanottajamäärässä vilkasta keskustelua muun muassa maanomistajien vastuista ja haitallisten vieraskasvilajien aiheuttamista taloudellisista menetyksistä. Luennon ja keskustelun jälkeen osallistujat siirtyivät sovitulle kiinteistölle, jossa osallistujat saivat Otavan tilaisuuden kaltaisen opastuksen niin jättiputkien torjuntaan liittyvistä suojautumistoimista kuin mekaanisen torjunnan vaiheista. Läpikäytävää aluetta lähdettiin perkaamaan parityöskentelynä laidoilta keskustaa kohden. Jättiputken suurimmat lehdet katkaistiin ja jätettiin maanomistajan luvalla torjuntakohteelle kasattuna maatumaan, mutta juurakot pyrittiin kaivamaan ylös vähintään 20 senttimetrin matkalta. Edellisen

vieraslajitilaisuuden tapaan juurakot kerättiin jätösäkkeihin ja säilöttiin joko hankkeen biokaasukokeiden materiaaliksi tai toimitettiin hävitettäväksi asianmukaisesti lajittelu- ja kierrätyskeskukseen.

Useimmat haitallisista vieraskasvilajeista vaativat torjuntatoimilta pitkäjänteisyyttä ja vuosia kestävää seuranta. Hankkeen esimerkkikasveiksi valikoituneista jättipalsamista, komealupiinista ja jättiputkista kaksi jälkimmäistä on monivuotisia kasveja. Lisäksi etenkin jättiputkien ja komealupiinin siemenpankkien tiedetään säilyvän maaperässä jopa vuosikymmenten ajan. PURE jatkoikin torjuntatoimia Suomenniemen kirkonkylän kohteella jo syyskuussa avoimien vieraslajitalkoiden muodossa. Samalla tilaisuus antoi hyvän mahdollisuuden arvioida ja dokumentoida kesäkuussa aloitettujen toimien tehoa. Syyskuun talkootilaisuus osoitti, että kasvukykyisiä juurakkoja oli jäänyt maahan kesäkuussa tarkasta työskentelystä huolimatta ja kasvustoon oli ehtinyt muun kasvillisuuden suojassa kehittyä myös kaksi kukintoa. Rohkaisevaa kuitenkin oli, että valtaosa ylös kaivetuista kasveista oli kuitenkin ensimmäisen vuoden siementaimia. Seuranta ja mekaanista torjuntaa jatketaan kiinteistöllä edelleen vuoden 2022 aikana yhteistyössä paikallisten toimijoiden kanssa.

Kerätyn palautteen perusteella PURE:n yleisötilaisuudet tarjosivat osallistujille uutta tietoa vieraskasvilajeista ja niiden torjunnasta. Tilaisuuksista saatua tietoa pidettiin myös hyödyllisenä ja sitä oltiin valmiita jakamaan myös eteenpäin.



**KUVA 2.** Jättiputkia koon mukaan lajiteltuina ennen säkitystä Suomenniemen kirkonkylän jättiputkikohteella syyskuussa 2021 (kuva Päivikki Liukkonen )

## KOULUVIERAILUT

Kouluvierailujen sisällöt sekä työskentelytavat koettiin heti alkusuunnittelusta alkaen tärkeäksi kytkeä voimassa olevaan perusopetuksen opetussuunnitelmaan (Opetushallitus 2014) etenkin ympäristöopin oppiainekohtaisten mutta myös niin kutsuttujen laaja-alaisten, oppiainerajat ylittävien tavoitteiden osalta. Tavoitteena oli varmistaa, että asiantuntijavierailut lomittuvat luontevaksi osaksi kohderyhmän oppimispolkua ja että hankkeen asiantuntijoilla olisi jo ennen vierailua edes jonkinlainen käsitys oppilaiden oletettavasta taito- ja tietotasosta. Myös yhteistyöstä neuvottelemisen mahdollisten yhteistyökoulujen ja -luokkien kanssa oli mielekkäämpää, kun hankkeen teemojen kytkeytyminen perusopetukseen oli perusteltavissa. Yhteistyökumppaniksi valikoitui melko nopeasti mikkeliäinen perusopetuksen neljäs luokka opettajineen. Näin vierailun räätälöimiseen kyseiselle oppilasryhmälle sekä esimerkiksi henkilötietojen keräämiseen tarvittavien ja kuvauslupien hankkimiseen oppilaiden huoltajilta jäi riittävästi aikaa.

Suomessa perusopetuksen vuosiluokkien 3–6 ympäristöopin oppiaine koostuu biologian, maantiedon, fysiikan, kemian ja terveystiedon tiedonaloista, joiden pohjalta oppilaita tuetaan oman ympäristösuhteen rakentamisessa, maailmankuvansa kehittämässä sekä ihmisenä kasvamisessa. Myös kestävän kehityksen ja ihmisten tekemien valintojen vaikutukset elämälle ja ympäristölle ovat oppimisessa keskeisessä roolissa. Haitallisten vieraslajien ja niiden vaikutusten tunteminen lomittuvat näiden oppiaineen perustavoitteiden lisäksi myös luontevasti useisiin oppiaineelle määriteltyihin sisältöalueisiin, kuten *S2 – Arjen tilanteissa ja yhteisöissä toimiminen* (mm. turvallisuuden edistäminen omassa ympäristössä); *S3 – Löytöretkelle monimuotoiseen maailmaan* (mm. luonnonympäristöjen ja ihmisen toiminnan välisten suhteiden hahmottaminen); *S4 – Ympäristön tutkiminen* (mm. lajien tunnistaminen, ympäristön merkitys hyvinvoinnin kannalta ja siihen liittyvät oikeudet sekä velvollisuudet) sekä *S6 – Kestävän tulevaisuuden rakentaminen* (mm. luonnon monimuotoisuuden vaaliminen ja ympäristövastuullinen toiminta omassa lähiympäristössä). Esimerkiksi ympäristövastuullisen toiminnan, omasta elinympäristöstä huolehtimisen ja ympäristöturvallisuuden teemat korostuvat myös laaja-alaisissa, oppiainerajat ylittävissä perusopetuksen tavoitteissa. (Opetushallitus 2014)

Kouluvierailujen suunnittelussa tärkeänä työkaluna toimivat myös yksityiskohtaiset pedagogiset tuntisuunnitelmat, joissa vierailuille asetettiin selkeät, hankesuunnitelman mukaiset oppimistavoitteet. Lisäksi määriteltiin tavoitellut oppimisen tavat, asiantuntijoiden sekä tilaisuuden muiden osallistujien roolit ja tilaisuuden mahdollinen kesto. Näiden pohjalta lähdettiin edelleen kehittämään yksittäisiä aktiviteetteja ja toimia, joilla aiottuihin tavoitteisiin päästään toivottuja oppimisen tapoja hyödyntäen. Tämäntyyppinen systemaattisuus ja johdonmukaisuus asiantuntijavierailujen suunnittelussa vaatii vaivannäköä sekä aikaresursseja, mutta antaa varmuutta itse tilaisuuden koittaessa. Kun tilaisuuksiin liittyvät tehtävät, materiaalit ja etukäteisvalmistelut on suunniteltu hankesuunnitelmaan perustuvien



tavoitteiden pohjalta jo etukäteen, jää kohtaamistilanteessa huomattavasti enemmän energiaa aidolle vuorovaikutukselle. Selkeä, kirjalliseen muotoon dokumentoitu suunnitelma toimii myös tehokkaana kehittämistyökaluna myöhempiä toimenpiteitä varten. Tilaisuuden jälkeen kirjataan ylös omien havaintojen, osallistujapalautteiden tai muun dokumentoinnin perusteella, mitkä asiat toimivat kyseisen ryhmän kanssa ja mitkä yksityiskohdat vaativat mahdollisesti vielä hiomista. Seuraavien toimenpiteiden suunnitelmia voidaan muokata ja kehittää kokemusten perusteella edelleen.

Kouluvierailujen tavoitteeksi asetettiin, että oppijat tutustuisivat käsitteisiin ”vieraslaji” ja ”haitallinen vieraslaji”; ymmärtäisivät, mitkä tekijät tekevät joistakin vieraslajeista haitallisia ja millaisia uhkia ne voivat aiheuttaa; tutustuisivat hankkeen kolmeen esimerkkilajiin eli komealupiiniin, jättipalsamiin ja jättiputkiryhmään sekä kiinnostuisivat tekemään havaintoja näistä lajeista myös lähiympäristöstään. Opetussuunnitelmassa määriteltyjä ympäristöopin oppiainekohtaisia sekä laaja-alaisia tavoitteita mukaillen pyrkimyksenä oli, että oppilaat pääsisivät kartuttamaan tietojaan ja taitojaan ennen kaikkea toiminnallisten, osallistavien ja tutkivien tehtävien kautta. Näin oppijoiden roolina oli itse aktiivisesti PURE:n asiantuntijoiden ohjaamina rakentaa ymmärrystään ja tiedollista sekä taidollista pohjaansa vieraskasvilajeista. Kaikki vierailuun liittyvät tehtävät suunniteltiin näiden tavoitteiden pohjalta.

PURE:n ensimmäinen kouluvierailu kesäkuun alussa toteutettiin pistetyöskentelynä niin, että oppilaat kiersivät vierailun aikana pienissä ryhmissä neljällä erilaisella toimintapisteellä koulun pihalla ja keräsivät ryhminä tietoja etukäteen laadittuun tehtävämonisteeseen. Jättipalsamipisteellä oppilaat pääsivät muun muassa tarkastelemaan aitoja kasvinäytteitä, seuraamaan hidastettua videota jättipalsamin siemenkodan aukeamisesta sekä testaamaan kuitunauhapätkien avulla, kuinka kauas jättipalsamin siemenet voivat lentää emokasvistaan. Jättiputkipisteellä oppilaat tutustuivat esimerkiksi jättiputkeen liittyviin terveystriskeihin ja ihmettelivät havainnollistavien mittatikkujen avulla jättiputkien mahdollista korkeutta. Lupiinipisteellä oli esillä niin ikään aitoja kasvinäytteitä juurakkoineen, joista etsittiin tyypeä sitovia juurinystyröitä. Neljännellä työskentelypisteellä oppilaat keskustelivat PURE:n asiantuntijan kanssa siitä, mitä he itse voivat tehdä, mikäli he havaitsevat haitallisia vieraslajeja ympäristössään, sekä keinoista, joilla kuka tahansa voi ennalta ehkäistä haitallisten vieraslajien leviämistä.





**KUVA 3.** Toiminnallisuus oli keskeisessä roolissa ensimmäisellä kouluvierailulla. Oppilasryhmä kokeilemassa kuitunauhojen avulla, kuinka pitkälle jättipalsami voi singota siemenensä. (kuva Marianna Närhi)

Syyskuussa PURE:n asiantuntijat vierailivat kesäkuulta tutun koululaisryhmän luona uudelleen. Tällä kertaa tavoitteena oli palautella mieliin ja kerrata kesäkuun vierailulla opittua, joten toiminnallisuuden sijaan pääpaino oli keskusteluissa ja tiedollisen sisällön syventämisessä havainnollistavien kuvien avulla. Oppilaiden aktiivisuuden perusteella kesäkuun vierailun toiminnallisista tehtävistä oli jäänyt runsaasti sekä yksittäisiä kasveja koskevia että yleisempääkin vieraslajitietoutta mieleen. Näitä tietoja oppilaat pääsivät syventämään edelleen pienryhmissä keskustellen sekä PURE:n asiantuntijoiden ohjaamina. Lopuksi ryhmät saivat tehtäväkseen suunnitella oman haitallisen mielikuvitusvieraslajin ja esitellä, millaisia uhkia kyseinen laji väärään paikkaan ihmisen avulla levitessään voisi ympäristölle tuottaa.

Vierailun lopuksi oppilailta kerättyjen palautteiden perusteella iso osa osallistujista uskoisi tunnistavansa kolme esimerkkilajia myös luonnossa sekä tietävänsä, kuinka toimia niiden kanssa. Vuoden 2021 kouluvierailuista kartutettuja kokemuksia ja palautteita käytetään edelleen tulevien tilaisuuksien kehittämisessä. Lisäksi hyväksi havaituista ja testatuista aktiviteeteista kootaan PURE-hankkeessa vieraslajiaiheista tehtävä- ja materiaalipakettia perusopetuksen käyttöön.

## KEHITYSTYÖSTÄ PUHTIA VIERASLAJITIEDOUDEN KOHDENTAMISEEN

Kansalaisten vierasrajitiedouden lisääminen on vierasrajilakien ja -asetusten myötä noussut useiden tiedotus- sekä talkooprojektien tavoitteeksi. Koska tällä hetkellä tietoa ja tarjontaa eri tahojen järjestämistä vierasrajitilaisuuksista on runsaasti, tietyille kohderyhmille kohdennettujen kokonaisuuksien kehittäminen voi nousta entistäkin tärkeämpään rooliin. Esimerkiksi Suomenniemen kirkonkylässä käynnistetty ja edelleen jatkuva jättiputkien torjuntatyö perustuu paikalliseen aktiivisuuteen, jota PURE on asiantuntijatahona tuke-  
massa koko hankekauden ajan. Samaan tapaan kokemukset kouluvierailuista osoittivat, että yksittäisen vierailun sijaan asiantuntijayhteistyön jatkuminen lukukaudesta toiseen auttaa oppilaita syventämään oppimaansa.

Vaikka avoimille vierasrajitalkoille ja -tilaisuuksille on edelleen varmasti kysyntää, osallistuu niihin usein henkilöitä, jotka jo lähtökohtaisesti ovat ympäristöön liittyvissä asioissa varsin valveutuneita. Jatkossa haasteena onkin tavoittaa sellaiset tahot, yhteisöt ja yksilöt, joille haitallisiin vieraskasvilajeihin liittyvät sisällöt ja muun muassa lainsäädäntö ovat vielä tuntemattomampia. Vaikka kansallinen vierasrajilainsäädäntömme ei vielä toistaiseksi ole tiittävästi johtanut esimerkiksi haitalliseksi luokiteltujen lajien hallussapidosta, kasvatuksesta tai levittämisestä aiheutuviin sanktioihin, voi tilanne tulevaisuudessa muuttua. Tässä vaiheessa olisikin ensisijaisen tärkeää tavoittaa yleishyödyllisten yhteisöjen lisäksi esimerkiksi yksittäisiä kiinteistönomistajia, tiedottaa heitä haitallisiin vieraslajeihin liittyvistä vastuista ja velvollisuuksista sekä opastaa oikeanlaisiin toimenpiteisiin lajista riippuen.

Lasten ja nuorten kohdalla on tärkeää huolehtia siitä, että perustiedot haitallisista vieraslajeista, niihin liittyvistä vastuista, mutta myös jokaisen toteutettavissa olevista torjuntakeinoista tulevat tutuksi mahdollisimman varhaisessa vaiheessa oppimispolkua. PURE-hanke on osaltaan kehittämässä toimintamalleja ja toimenpiteitä, joilla nämä tavoitteet toteutuvat niin paikallisten yhteisöjen, alueen asukkaiden kuin lasten ja nuorten osalta hankkeen toiminta-alueella.

## LÄHTEET

Compound Interest. 2017. The Chemistry of Giant Hogweed and how it causes skin burns. <https://www.compoundchem.com/wp-content/uploads/2017/08/Giant-Hogweed-Skin-Burns.pdf>

EPNA 1143/2014. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) haitallisten vieraslajien tuonnin ja leviämisen ennalta ehkäisemisestä ja hallinnasta. [EUR-Lex - 32014R1143 - EN](#) - [EUR-Lex \(europa.eu\)](#)

Huusela, E., Aukia, L.-M., Jauni, M., Rastas, M. & Tuhkanen, E.-M. 2021. Toimintamalliehdotus vieraslajijätteen hallintaan – Selvitys, kuinka vähentää, vastaanottaa ja käsitellä vieraskasvijätettä. Luonnonvarakeskus, Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 3/2021. [https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/547067/luke-luobio\\_3\\_2021.pdf](https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/547067/luke-luobio_3_2021.pdf)

Laki vieraslajeista aiheutuvien riskien hallinnasta 1709/2015. [Laki vieraslajeista aiheutuvien riskien... 1709/2015 - Säädökset alkuperäisinä - FINLEX °](#)

Opetushallitus. 2014. Perusopetuksen opetussuunnitelman perusteet 2014. Määräykset ja ohjeet 2014:96. [perusopetuksen\\_opetussuunnitelman\\_perusteet\\_2014.pdf \(oph.fi\)](#)

Terve askel luontoon. 2018. Terve askel luontoon -hankkeen vieraslajiopas. Allergia-, Iho- ja Astmaliiitto & WWF Suomi. [vieraslajiopas-1.pdf \(allergia.fi\)](#)

VNA 704/2019. Valtioneuvoston asetus vieraslajeista aiheutuvien riskien hallinnasta. [Valtioneuvoston asetus vieraslajeista aiheutuvien... 704/2019 - Säädökset alkuperäisinä - FINLEX °](#)

# YMPÄRISTÖKASVATUSTA DIGITAALISEN MATERIAALIN AVULLA LUGABALT2- HANKKEESSA

Marina Markova & Tuija Ranta-Korhonen

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu (Xamk) osallistuu rajat ylittävään yhteistyöhön Safe Environment and Cleaner Waterways to Blue Baltic Sea – LUGABALT2 -hankkeessa. Hanketta toteuttavat Luga alueen kehitysorganisaatio (Municipal Fund for Support of Development of Economics and Entrepreneurship of the Luga District), maatalouden tutkimuslaitos IEAP (Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production) ja ympäristöalan kansalaisjärjestö Society for Assistance of Sustainable Rural Development Venäjältä sekä Suomesta Xamkin lisäksi Luonnonvarakeskus (Luke). Hanketta rahoittaa Kaakkois-Suomi–Venäjä CBC 2014–2020 -ohjelma, ja sen kesto on 1.2.2019–31.12.2021. Osana hankkeen toimenpiteitä järjestetään ympäristöalan neuvontaa ja ympäristökasvatusta eri kohderyhmille.

## YMPÄRISTÖKASVATUSTA HANKKEESSA

Yhtenä LugaBalt2-hankkeen merkittävänä tavoitteena on kehittää ja parantaa kohderyhmien ympäristötietoisuutta koulutuksen ja tiedotuksen avulla. Merkittävimmäksi kohderyhmäksi on määritelty koululaiset ja nuoret. Hankkeessa pyritään lisäämään nuorten ja lasten tietoisuutta oman toimintansa ympäristövaikutuksista esimerkiksi kertomalla heille jätteen lajittelusta, materiaalien ja käyttötavaroiden kierrätyksestä tai vaikkapa liikkumiseen käytettävän kulkuvälineen valinnan merkityksestä. Ympäristökasvatuksen avulla on myös mahdollista herättää laajemmin kiinnostusta ympäristöalaa kohtaan ja tuoda esiin alalle kouluttautumisen ja työskentely yhtenä tulevaisuuden uravaihtoehtona.

Alkuperäisen hankesuunnitelman mukaan luennot ja muut koulutustilaisuudet oli tarkoitus toteuttaa hanketoimijoiden Suomen ja Venäjän vierailujen aikana. Pandemian vuoksi tilaisuudet jouduttiin kuitenkin järjestämään virtuaalisina. Onneksi erilaiset digitaaliset työkalut, kuten Padlet, mahdollistavat monipuolisen materiaalin tuottamisen eri kohderyhmille. Hankkeessa toteutettiin verkko-opetuksena venäläisille koululaisille suunnattu sarja ympäristöaiheisia luentoja. Xamkin osuuteen sisältyvien luentojen aiheina olivat jätteen lajittelu, kompostointi ja yhdyskuntajätteen käsittely sekä veden laadun monitorointi ja vesistöjen tutkimus.

Hankkeen aikana järjestettiin Luken ja Xamkin yhteistyönä Urpolan koulun viidennen luokan koululaisten vierailu Urpolan luontokeskukseen. Luontokeskus on osa UNESCO:n Saimaa Geopark -verkostoa. Koululaiset tutustuivat luontokeskuksessa esillä olevaan näyttelyyn sekä kiersivät Urpolan jokilaaksossa kulkevan luontopolun. Luontopolkukierroksen aikana koululaiset ottivat joen vedestä näytteitä, joita tarkasteltiin yhdessä luontokeskuksen ohjaajien ja vierailulla mukana olleiden Luken ja Xamkin asiantuntijoiden kanssa. Koululaisten vierailusta kuvattiin videoita, jotka tekstitettiin venäjäksi ja lähetettiin tervehdyksenä Venäjällä järjestetyn lasten luontokoulun osallistujille.

## DIGITAALISET OPPIMISMATERIAALIT

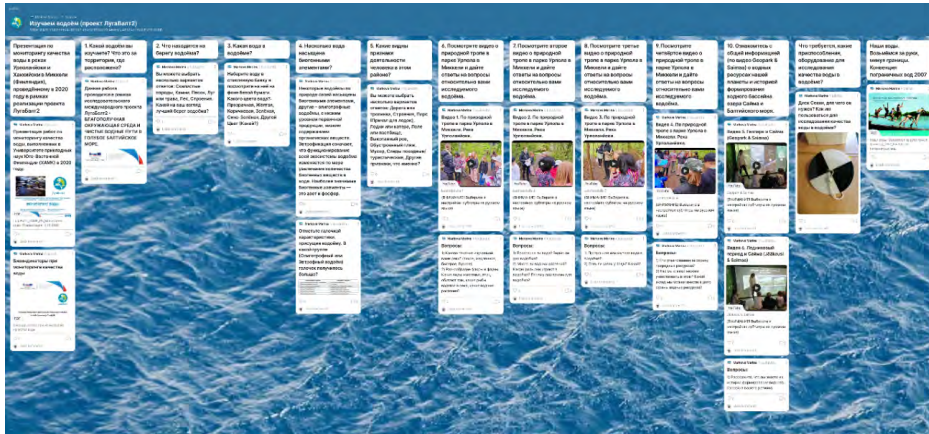
Digitaaliset materiaalit mahdollistavat virtuaalisen tutustumiskäynnin erilaisiin kohteisiin, esimerkiksi luontopolulle, vaikka paikan päällä käyminen ei olisikaan mahdollista. Esimerkiksi Padlet-alustan avulla on mahdollista luoda ja käyttää interaktiivista materiaalia, joka mahdollistaa koululaisten yhdessä työskentelyn ja samalla tekee heistä oppimisprosessin aktiivisia toimijoita. Padlet-seinälle on mahdollista ladata esimerkiksi videomateriaalia, kuvia, tekstimuotoisia tiedostoja ja tehtäviä. Oppilaat voivat Padletin avulla tutustua eri materiaaleihin ja tehdä muistiinpanoja tai lisätä kommentteja vapaamuotoiseen tekstikenttään. Myös muut oppilaat tai opettaja voivat lisätä kommentteja samalla seinälle, mikä mahdollistaa keskustelun ja vuorovaikutuksen käsiteltävästä aiheesta.

Digitaaliset työkalut ja verkossa tapahtuvat työskentely mahdollistavat myös opiskelun monipaikkaisuuden sekä oman opiskeluaikataulun noudattamisen. Digitaalista materiaalia on monesti helppo muuttaa tai täydentää ajankohtaisilla aiheilla ja tiedoilla. Oppijoille osallistumista vaativa interaktiivinen materiaali voi olla mielenkiintoisempaa kuin perinteinen opettajajohtoinen opiskelu. Digitaalisten alustojen avulla oppijan on myös mahdollista luoda oma aineisto, esimerkiksi karttapohjaan voidaan ladata valokuvia kohteesta ja lisätä muistiinpanoja.

## LUGABALT2-HANKKEEN PADLET-AINEISTOT

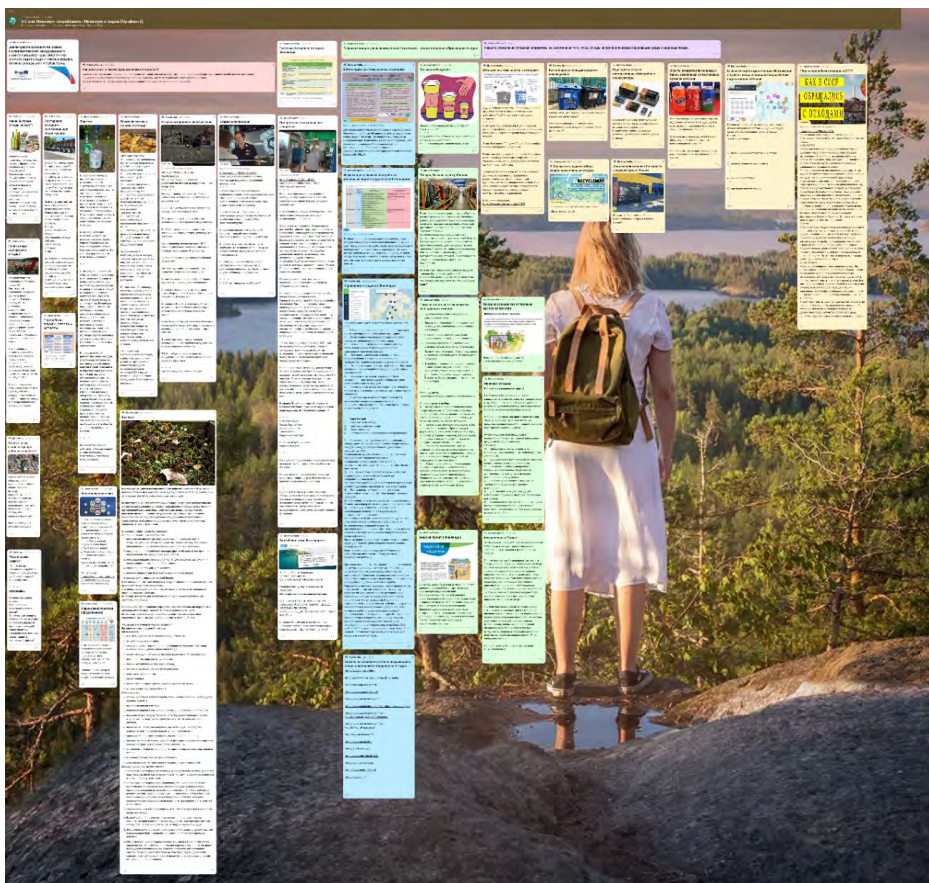
Hankkeessa tuotettiin Padlet-aineistoja vesistöjen veden laadun seurannasta. Seinälle on ladattu muun muassa esitys Xamkin hankkeesta tekemästä veden laadun seurannasta sekä linkkejä muihin tietolähteisiin. Lisäksi seinällä voi kysymyksiin vastaamalla kasvattaa omalla asuinalueella sijaitsevien vesistöjen tuntemusta. Seinälle on ladattu myös linkit Luken ja Xamkin yhteistyössä toteuttamiin Youtube-videoihin. Padlet-seinän sisältöä on esitelty kuvassa 1.





**KUVA 1.** Padlet-seinä vesistöjen veden laadun tutkimisesta (kuva Marina Markova)

Toisen Padlet-seinän aiheena on jätehuolto, ja siinä käydään läpi eri jätelajeita, niiden lajittelua ja kierrätystä. Lisäksi seinällä on linkkejä videomateriaaliin, jossa kerrotaan vaarallisten jätteiden oikeista käsittelytavoista (lääkkeet, akut) tai sähkö- ja elektroniikkaromun kierrätyksestä. Seinän sisältöä on esitetty kuvassa 2.



**KUVA 2.** Padlet-seinä jättehuollosta (kuva Marina Markova)

Hankkeessa luotuihin Padlet-seiniin voi tutustua seuraavien linkkien avulla:

- Изучаем водоём (проект ЛугаБалт2). 2021. Хамк (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala. Web: <https://padlet.com/marinamarkova/Bookmarks>
- 0:0 или Минимум потребления: Минимум отходов (ЛугаБалт2). 2021. Хамк (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala. Web: <https://padlet.com/marinamarkova/bdez27no8tqputfi>
- Исследуемые водные объекты на карте (ЛугаБалт2 проект). 2021. Хамк (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala. Web: <https://padlet.com/marinamarkova/odsr8y3rbqvct4vh>

## YHTEENVETO

Uudenlaiset digitaaliset työkalut ja alustat mahdollistavat monipuolisen opetusmateriaalin tuottamisen eritasoisille oppijoille. Oppijoiden fyysinen sijainti ei enää ole rajoittava tekijä, vaan digitaalisten työkalujen avulla voidaan koota aiheesta kiinnostuneita saman sisällön äärelle. Toivottavasti ЛугаБалт2-hankkeessa tuotetuille Padlet-materiaaleille löytyy käyttöä myös hankkeen päättymisen jälkeen.

## PADLET-SEINÄLLÄ JAETUT AINEISTOT

Käytetyn elektroniikan kierrätys. 2019. Elisa.

Video YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=8WOxL8HsMTM>

Lääkkeiden kierrätys. 2018.

Video YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=EhCXqgU5yRA>

Suomen virallinen tilasto (SVT): Jätetilasto [verkkojulkaisu].

ISSN=1798-3339. 2019. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 28.10.2021].

Saantitapa: [http://www.stat.fi/til/jate/2019/jate\\_2019\\_2021-06-16\\_tie\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/jate/2019/jate_2019_2021-06-16_tie_001_fi.html)

VESISTÖT. 2021. Saimaa Geopark. Web: <https://www.saimaageopark.fi/ymparisto/>

Virtalähteestä uusiomateriaaliksi. 2018. Paristokierrätys.

Video YouTube: [https://www.youtube.com/watch?v=r7QxRD\\_-Ajo](https://www.youtube.com/watch?v=r7QxRD_-Ajo)



# KESTÄVYYS- JA LUONTO- ARVOJEN HUOMIOIMINEN PUUNKORJUUSSA

Anna Dunderfelt & Petri Leirivirta

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu toteuttaa yhdessä Etelä-Savon ammattiopiston (Esedu) ja Itä-Savon ammattiopiston (Samiedu) kanssa Metsäalan osaajat 2020 -hanketta. Hankkeessa keskitytään parantamaan pilottiyritysten tuottavuutta ja tehokkuutta sekä samalla kehitetään yritysten työhyvinvointia. Näiden lisäksi toimenpiteissä seurataan puunkorjuutyön laatua ja omavalvontaa sekä kestävyys- ja luontoarvojen huomiointia. Hanketta rahoittaa Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan sosiaalirahastosta. Hanke alkoi 1.6.2019, ja se päättyi 31.5.2022.

## TYÖMAAKOhteet

Hankkeessa on mukana yhteensä 18 yritystä, joista kaksi yritystä on puunkuljetusyrityksiä ja loput ovat metsäkoneyrityksiä. Näiden pilottiyritysten työkohteissa tehtiin syksyn 2020 ja kevään 2021 aikana työmaavierailuja. Vierailujen tarkoituksena oli videokuvata työprosesseja ja tunnistaa työtekniikkaan liittyviä hidastumisia. Kuvaukset tehtiin yhteistyössä metsä- ja ajokoneiden sekä puutavara-autojen kuljettajien kanssa. Paikan päällä hanketoimijat tarkastelivat työprosessien lisäksi luontoarvojen ja metsän monimuotoisuuden huomioimista korjuutyössä. Työmailla kiinnitettiin huomiota korjuujäljen omavalvontaan, vesiensuojeluun sekä luonto-kohteisiin. Oman huomionsa saivat mahdolliset korjuu-urakoitsijoita sitovat metsäsertifikaatit.

Hanketoimijat vierailivat yhteensä 31 työmaalla. Suurin osa vierailuista kohdistui Etelä-Savon alueelle, erityisesti Savonlinnan ja Mikkelin seuduille. Lisäksi hanketoimijat kävivät Pohjois- ja Etelä-Karjalassa sekä Pohjois-Savossa ja Kymenlaaksossa. Kohteiden sijoittuminen maakunnan ulkopuolelle kertoo puunkorjuuyrittäjien työmaiden sijainnista melko normaalin tarinan. Yritysten kotimaakuntana oli yhtä yritystä lukuun ottamatta Etelä-Savo, mutta silti työmaat saattavat sijaita kaukanakin ns. kotihallista. Tämä tarkoittaa pitkiä kuljetusmatkoja raskaalla kalustolla. Pitkät työmatkat rasittavat työntekijöitä ja sitä kautta heikentävät tuottavuutta. Pitkä välimatka kotihalliin vaikeuttaa koneiden tarvitsemaa huoltoa, korjausta ja polttoaineiden ja tarvikkeiden logistiikkaa. Lähiseudun tuntemus metsäalan töissä on tärkeää. Se vähentää turhaa ajoa ja lisää työn sujuvuutta.

Hankkeessa seuratuista työmaista pääte- eli uudistushakkuut olivat avohakkuualueita (kuva 1). Suurin avohakkuualue oli kooltaan kahdeksan hehtaaria. Uudistushakkuiden lisäksi kohteissa tehtiin kasvatushakkuita sekä ensiharvennus- ja harvennushakkuita.



**KUVA 1.** Uudistushakkuualue, johon on jätetty lahot pystypuut ja säästöpuuryhmiä (kuva Petri Leirivirta).

Suurin osa hankkeen maastokohteista oli kuusikkoja, jotka kasvoivat tuoreella kankaalla tai turvekangasmailla. Se, että työmaakohteiksi valikoitui juuri tuon tyyppisiä hakkuualueita, ei ollut sattumaa. Tuorekankaiset eli mustikkatyyppin leimikot ovat hyvin usein talvikorjuukelpoisia, ja hankkeen työmaavierailut ajoittuivat pääsääntöisesti roudan aikaan. Suurin osa kuusikoista oli päätehakkuiässä. Kuusi saavuttaa päätehakkuiän noin 60–100 vuoden iässä riippuen kasvupaikasta, jolloin siitä odotetaan normaalikasvulla saatavaksi noin 250–300 m<sup>3</sup>/ha. Biologisesti kuusi on vielä tuolloin verrattain nuori, sillä kuusi voi elää satoja vuosia.

## ERITYISEN TÄRKEÄT ELINYMPÄRISTÖT

Metsänkäsittelyä säätelee metsälaki (1093/1996). Suomessa aloitettiin kiinnittämään huomiota 1990-luvulla aiempaa enemmän luontokohteisiin ja erityisen tärkeät elinympäristöt kirjattiin tuolloin metsälakiin (10§). Metsälaki säättää vähimmäistason metsien monimuotoisuuden ylläpitämiseksi. Erityisen tärkeät elinympäristöt eli luontokohteet voivat olla pienialaisia ja vaikea tunnistaa ympäristöstä etenkin talvella tai lehdettömänä aikana. Luontokohteen erityispiirre on erottua ominaisuuksiltaan muusta ympäröivästä metsäluonnosta, kuten kuvassa kaksi oleva luonnontilainen noro ja sen lähiympäristö. Laki velvoittaa huomaamaan ja tunnistamaan nämä arvokkaat ja tärkeät elinympäristöt. Useimmiten paikatietoaineistosta löytyy metsälain 10 §:n kohteet, ja ne otetaan huomioon leimikon suunnittelussa ja hakkuiden toteutuksessa. Erityisen tärkeät elinympäristöt tulee selkeästi rajata

ja jättää metsänkäsittelyn ulkopuolelle. Vastuu luontokohteiden huomioimisesta on metsänomistajalla, hakkuiden suunnittelijalla ja hakkuun suorittajalla. Kaikkia luontokohteita ei ole kuitenkaan kartoitettu, jolloin on tärkeää, että ne tunnistetaan ja otetaan huomioon jo leimikon suunnitteluvaiheessa. Luontokohteilla on tärkeä rooli metsän monimuotoisuuden ylläpitämisessä, mutta ne ovat merkittäviä myös riistalle, virkistyskäytölle ja maisemalle.

Koneenkuljettajilla on mahdollisuus saada ennakkoon tieto erityisen tärkeistä elinympäristöistä paikkatietona avoimen tiedon kautta oman koneen näytölle. Kartassa voi olla kuitenkin virheitä tai puutteita, jolloin tärkeään arvoon nousevat kuljettajan oma havainnointikyky, leimikon suunnitteluvaiheen maastokäynti, metsänomistajan kanssa käydyt keskustelut ja laadukas paikkatietojärjestelmä. Talvella näiden huomaaminen on haastavampaa. Maaperän ravinteikkuuden vaihtelu tai lähteen sijainti voi tuolloin olla haasteellista tunnistaa. Lisäksi haasteita tuovat pimeys ja lehdetön vuodenaika. Karttatason kosteusindeksin avulla voidaan talvellakin saada selville käsittelyalueella sijaitseva lähde, noro tai erityisen kostea maaston kohta.



**KUVA 2.** Luonnontilainen noro ja suojavyöhyke. Erityisen tärkeä elinympäristö, joka oli merkitty leimikkokarttaan kuljettajalle tiedoksi, ja suojavyöhyke oli ennen hakkuiden aloittamista rajattu metsään kuitunauhoilla. (kuva Anna Dunderfelt)

## METSÄSERTIFIKAATIT

Metsäsertifiointi on vapaaehtoinen laatujärjestelmä. Suomessa on käytössä kaksi metsiin kohdistuvaa sertifiointijärjestelmää PEFC ja FSC, jotka eroavat toisistaan kriteereiltään. Näistä PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification) on Suomessa yleisempi sertifiointimuoto. Sertifiointijärjestelmät ovat tuoneet luonnonhoidon Suomen talousmetsiin, sillä Suomen lainsäädännössä ei vaadita suoranaisia luonnonhoidon toimenpiteitä. Sertifikaatti kertoo puun alkuperän ja varmistaa, että puu on tuotettu vastuullisesti ja kestävästi. Metsänhoidon tulee olla ekologisesti, taloudellisesti ja sosiaalisesti kestävä. Monimuotoisuus ja luonnonhoito ovat keskeisessä roolissa sertifoinnissa. Sertifikaateissa on esimerkiksi määritelty tietyin osin joitakin vaalittavia monimuotoisuuden piirteitä, kuten sitä, kuinka monta säästö- ja lahoppuuta hehtaaria kohden tulee jättää hakkuiden yhteydessä tai kuinka monta metriä leveä suojakaista vaaditaan vesistön ja käsittelyalueen väliin.

# MONIMUOTOISUUDEN YLLÄPITÄMINEN

## SUOJAKAISTA

Suomen metsien erityispiirre on vesistöjen läheisyys. Etenkin Etelä-Savossa metsäisiä rantavyöhykkeitä on runsaasti. Suojakaistan (kuva 3) tarkoitus on estää ja hidastaa sadevesien mukana valuvien ravinteiden ja kiintoaineiden kulkeutumista vesistöön. Suojakaistan maaperää ei muokata eikä raivata, koska kasvillisuudella on tärkeä rooli valumisen ehkäisemisessä. (Saaristo & Vanhatalo 2015, 74) Hakkuukoneen kuljettajan näkökulmasta tärkeää on kiinnittää lisäksi huomiota maaston kaltevuuteen. Vaikeampaa on ilman tarkempaa paikkatietoa (RUSLE2015 eroosiomalli) tietää maaston eroosioherkkyyttä. Suojakaistaan voi sijoittaa säästöpuuryhmän, jolloin sitä saadaan leveämmäksi esimerkiksi eroosioherkän maaston kohdalla. Purojen varsille jätettyjen suojakaistojen puut suojaavat puroa aurinvalolta eli veden lämpiämiseltä. Lisäksi puroon tippuu kariketta ja oksia, jotka osaltaan monipuolistavat vesiekosysteemiä.



**KUVA 3.** Uudistushakkuun yhteydessä vesistön rantaan on jätetty PEFC-sertifikaatin vaatimusten mukainen suojakaista. Suojakaistaa ei ollut raivattu eikä muokattu. (kuva Anna Dunderfelt)



## LAHOPUU

Suomen metsissä on 5 000 eliölajia, jotka ovat riippuvaisia lahoppuusta jossain vaiheessa elämäänsä (Saaristo & Vanhatalo 2015, 26). Lahoppuussa elää hajottaja- ja lahottajaeliöitä, jotka ovat elintärkeitä ravinteiden kiertokululle. Lahoppuun kierto tuoreesta kaatuneesta tai pystyyn kuivuneesta puusta (kuva 4) hauraaseen maalahoön on pitkä, ja se tarjoaa elinympäristöjä koko tämän ajan erilaisille eliöille. Lahoppuun säilyttämisessä tärkeää on jatkuvuus, joka tarkoittaa, että talousmetsissä tulisi olla kaiken ikäisiä lahoppuita, joilla turvataan monimuotoisuuden säilyminen metsässä. Metsäkoneenkuljettaja pystyy omilla toimillaan vaikuttamaan esimerkiksi maalahojen säästymiseen kiertämällä ne, tai jos suhteellisen tuore maalaho kestää noston, siirtämällä sen sopivampaan kohtaan. Jos käsittelyalueella tiedetään ennakkoon olevan runsaasti maalahoja, voidaan asia huomioida jo urien suunnitteluvaiheessa. (Keto-Tokoi ym. 2019)



**KUVA 4.** Pystyyn lahonneen koivun rungossa kasvaa taulakääpää, joka on yleisimpiä lehtipuidemme kääpiä (kuva Anna Dunderfelt).

Laki metsätuhojen torjunnasta (1087/2013) tulee huomioida tuoreissa tuulenkaatamisissa, lumen tuhoamisissa puissa tai muuten vaurioituneissa elävissä havupuissa. Metsätuholaki määrää tuhoutuneelle havupuulle poisvientivoitteen tietyn kynnyksarvon ( $m^3/ha$ ) ylittävältä osalta. Lailla estetään metsätuhojen, kuten kirjanpainajien, leviäminen Suomessa ja ylläpidetään metsiemme terveydentilaa. Myös turvallisuuden kannalta vaaralliset lahopuut tulee siirtää onnettomuuden välttämiseksi.

## SÄÄSTÖPUURYHMÄ

Säästöpuuiden tarkoitus on taata monipuolinen elinympäristö metsän lajeille. Säästöpuuryhmät kannattaa suunnitella pidemmälle ajanjaksolle ja miettiä ryhmien sijoittelua tulevaisuuden harvennus- ja uudistushakkuiden kannalta. Säästöpuista tulee myöhemmin lahopuita. Säästöpuuryhmät voidaan sijoittaa luontokohteiden tai muun arvokkaan elinympäristön yhteyteen. Järeät lehtipuut ja metsän monimuotoisuudelle tärkeät haapa, raita ja jalot lehtipuut olisi hyvä säilyttää. Lisäksi suositellaan jätettäväksi erilaisia ja eri-ikäisiä puulajeja monimuotoisuuden turvaamiseksi. Säästöpuut voivat olla taloudellisesti vähämerkityksellisiä puita (puulaji, runkovika). Koneenkuljettajalla on merkittävä rooli säästöpuuiden valitsemisessa, jos metsänomistaja ei ole esittänyt toiveitaan niiden suhteen. Sertifikaatit ja metsänhoidon suositukset antavat vähimmäisvaatimuksia säästöpuuiden määrään. Säästöpuita suositellaan jättämään enemmän kuin niitä nykyisin jätetään. Säästöpuilla on merkittävä rooli monimuotoisuuden ylläpidossa, ja säästöpuuiden tuleekin antaa rauhassa kasvaa, elää ja kuolla. Täimikon ja nuoren metsän hoidossa valittu säästöpuuryhmä toimii mainiosti alkuvuodet myös riistatiheikkönä. Säästöpuita ei tule jättää sellaisille paikoille, joissa ne kaatuessaan voivat aiheuttaa vahinkoa (rakennukset, sähkölinjat, tiet).

## TEKOPÖKKELÖT

Tekopötkkelö (kuva 5) on noin 3–6 metrin korkeudelta katkaisu puu, yleisimmin lehtipuu. Katkaisun tarkoituksena on nopeuttaa elävän puun lahoamista. Tekopötkkelön latvus pyritään jättämään maapuuksi. Tekopötkkelöllä korvataan lahoppuuta, jos sitä esiintyy metsässä käsittelyalueella vähän. Tekopötkkelöistä hyötyvät monet eliöt ja linnut, kuten tiaiset ja tikat. Jos käsittelyalueella sijaitsee muinaisjäännöksiä, ovat tekopötkkelöt oiva tapa merkitä muinaisjäännos metsään (Saaristo & Vanhatalo 2015, 30). Koneenkuljettajalla on merkittävä rooli tekopötkkelöiden sijoittelussa ja teossa.



**KUVA 5.** Kuvan etualalla on tekopötkkelö edellisistä hakkuista. Taaempana säästöpuiksi jätettyjä lehtipuita. (kuva Anna Dunderfelt)

## SEKAPUUSTO

Suomen talousmetsien yleisimmät puulajit ovat mänty, kuusi ja rauduskoivu. Ilmastonmuutoksen kannalta olisi tärkeää, että Suomen metsät olisivat ilmastokestäviä tulevaisuudessa. Metsien tulee kestää paremmin kuivuutta, tulvia ja myrskyjä. Tästä syystä metsänhoidon suositukset sekä sertifiikatit suosittavat sekapuustoisuutta. Lehtipuiden jättämisestä havupuiden sekaan on hyötyä. Lehtipuut rikastuttavat eliöryhmillään metsäluontoa, ja maaperästä tulee ravinteikkaampi karikkeen ansiosta. Myös havupuusekoitus on monimuotoisuuden kannalta parempi vaihtoehto kuin puhdas kuusikko tai männikkö. Erilaisten puiden erilaiset juuristot vaikuttavat metsän vesitalouteen myönteisesti. Tärkeää olisi jättää ainakin yhtä monta puulajia käsittelyalueelle kuin siellä oli sinne tultaessa. Mitään puulajia ei tulisi kokonaan poistaa alueelta. Aina hakkuukoneen kuljettaja ei pysty asiaan vaikuttamaan. Metsää on voitu hoitaa niin, ettei sinne ole jätetty sen elinkierron aikana muuta kuin yhtä puulajia. Väkisin ei sekapuustoakaan saa. Jos metsätyyppi on karukkokangas, kasvaa siellä yleensä vain mänty.



## RIISTATIHEIKÖT

Riistatiheikköjä jätetään käsittelyalueelle sekä raivauksissa että hakkuissa. Tiheiköt ovat etenkin kanalinnuille sopivia piilopaikkoja ja ravinnon hakupaikkoja. Kyseessä on yleensä noin parin aarin kokoinen pensaita ja lehtipuustoa sisältävä alikasvoskuusikko, joka voi sijaita säästöpuuryhmien yhteydessä. Riistatiheikköjä hyödyntää kanalintujen lisäksi moni muukin riistaeläin. Niillä on myös maisemallinen vaikutus.

Metsälainsäädäntö ei vaadi metsänomistajaa jättämään metsäänsä käsittelyiden yhteydessä säästöpuita tai lahoppuuta eikä vaalimaan sekapuustoista metsää. Jos sertifikaatti ei sido metsänomistajaa, on kyseessä täysin vapaaehtoinen toimi. Luonnonhoidon ja monimuotoisuuden kannalta tärkeitä asioita ovat metsänomistajan tavoitteet, joita tulee kuunnella herkällä korvalla. Luontokohteiden tunnistamisessa auttavat metsäalan asiantuntijat ja laadukkaat paikkatietoaineistot, joista suurin osa on ilmaisia. Metsäkoneenkuljettajan ammattitaidolla on suuri rooli talousmetsien kestävyys- ja luontoarvojen ylläpitämisessä.

## LÄHTEET

Keto-Tokoi, P., Saaristo, L., Valkeapää, A. & Kunttu, P. 2019. WWF:n metsänhoito-opas – metsänhoitoa sinun ja luonnon ehdolla. Saatavissa: [https://wwf.fi/app/uploads/2/g/r/9t46iyom5d3tge2xrbv99/metsaopas\\_2019\\_fn\\_web.pdf](https://wwf.fi/app/uploads/2/g/r/9t46iyom5d3tge2xrbv99/metsaopas_2019_fn_web.pdf) [viitattu 10.9.2021].

Laki metsätuhojen torjunnasta 1087/2013

Metsälaki 1093/1996

Saaristo, L. & Vanhatalo, K. (toim.) 2019. Metsänhoidon suositukset talousmetsien luonnonhoitoon, työopas. Tapion julkaisuja. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://tapio.fi/wp-content/uploads/2020/09/Metsanhoidon\\_suosituksset\\_talouismetsien\\_luonnonhoitoon\\_TAPIO\\_2019.pdf](https://tapio.fi/wp-content/uploads/2020/09/Metsanhoidon_suosituksset_talouismetsien_luonnonhoitoon_TAPIO_2019.pdf) [viitattu 18.7.2021].

Tarkastusohje 15.2.2021. Suomen metsäkeskus. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/document/tarkastusohje.pdf> [viitattu 10.9.2021]

# SAFECON-HANKKEESSA TEHTYJEN YLIMMÄN JOHDON HAASTATTELujen VERTAILUA: ASENTEET JA KÄYTÄNTEET SUOMESSA JA VENÄJÄLLÄ

Milla Sairanen & Henna-Riikka Haikonen

Safe, Skilled and Productive Construction Sites, SAFECON -hankkeen tavoitteena on parantaa rakennusalan pk-yritysten työturvallisuutta ja samalla lisätä alan yritysten tuottavuutta sekä parantaa työolosuhteita. Työpaketin 1 (WP1) tavoitteena oli tutkia ja kehittää ylimmän johdon asennetta ja ymmärrystä työturvallisuuden suhteesta yrityksen tuottavuuteen ja tarjota työkaluja oman asenteen kehittämiseen.

Hankkeen ensimmäisenä vuotena haastateltiin Suomessa ja Venäjällä yritysten johtoa työturvallisuuskulttuurista, turvallisuushaasteista ja -asenteista sekä arvoista. Tulosten pohjalta tehtiin vertailu, jossa painotettiin erityisesti ylimmän johdon näkemyksiä ja asenteita.

Ajatukset työturvallisuudesta ovat melko yhteneviä rajan molemmin puolin. Suomalaisilla haastateltavilla korostui näkemys, että tapaturmat ovat vältettävissä, sekä koulutusmyönteisyys. Samoin venäläiset näkivät, että turvallinen työ on arvo jo itsessään.

Hanke on osa Kaakkois-Suomi–Venäjä CBC 2014–2020 -ohjelmaa, jota rahoittavat Euroopan unioni, Venäjän federaatio ja Suomen tasavalta.

## JOHDANTO

Vaikka laki asettaa vaatimukset työturvallisuuden tasolle, lopulta rakennusliikkeiden johtajien asenne vaikuttaa laajemmin yrityksen turvallisuuskulttuuriin. SAFECON-hankkeen työpaketissa WP1 tutkittiin Kaakkois-Suomessa ja Venäjällä Pietarin alueella pienten ja keskisuurten rakennusyritysten turvallisuuskulttuuria ja asenteita haastattelemalla ylintä johtoa. (Potinkara ym. 2019) Ylimmän johdon haastattelujen sekä kirjallisuuden pohjalta laadittiin ohjenuorat työmaan työturvallisuuden johtamisen kehittämisen tueksi (Sairanen ym. 2020).

Tässä artikkelissa verrataan eri puolin raja-aluetta tehtyjen tutkimusten tuloksia. Tutkimuksissa käytetyt kysymyssarjat poikkesivat jonkin verran toisistaan kuten myös tiedonkeruumenetelmät ja tulosten käsittely, mutta tulokset ovat riittävän vertailukelpoisia. Vertailussa painotetaan ylimmän johdon omaa asennetta.

## MATERIAALIT JA MENETELMÄT

SAFECON-hankkeessa vertailtiin työpaketissa 1 (WP1) vuonna 2019 tehtyjä haastattelututkimuksia ja niiden tuloksia. Suomalaisten yritysten ylintä johtoa haastattelivat Xamkin hanketyöntekijät ja venäläisiä venäläisen partneriyliopiston eli Leningradin valtiollisen yliopiston LSU:n tutkijat. Suomessa haastateltiin pääasiassa Kaakkois-Suomen, Päijät-Hämeen ja Uudenmaan alueella toimivia yrityksiä ja Venäjällä Luoteis-Venäjän ja Pietarin alueella toimivia yrityksiä.

Vertailu tehtiin käymällä läpi molempien ryhmien tuottamaa, julkaisematonta aineistoa kohta kohdalta. Venäläisten tutkimuksesta oli saatavilla vain lopullinen raportti, ei kysymyslomaketta tai alkuperäisiä vastauksia. Xamkin haastattelutuloksia on jo aiemmin käsitelty Potinkaran ja Haatasen artikkelissa (2019).

LSU lähetti kyselylomakkeen kaikille johdon eri tasoille sekä asiantuntijoille. Xamk haastatteli vain ylintä johtoa, jota jokaisessa yrityksessä edusti toimitusjohtaja. Ne kohdat, joita ei ollut kysytty molemmin puolin, jätettiin lähtökohtaisesti pois. Suomalaisten haastatteluaineistosta oli mahdollista hyödyntää haastattelussa ilmenneitä asioita, joita ei suoraan kysytty.

## TULOKSET

Kirjallisuuden pohjalta laadittu kyselylomake pyrittiin yhtenäistämään tutkimuksen alussa, mutta tutkimusraporttien perusteella on lopulta kysytty ja hieman tutkittukin eri asioita.

Suomessa Xamk haastatteli viiden eri yrityksen toimitusjohtajaa kasvokkain. Haastattelut tallennettiin ja aineistoista kirjattiin myös vapaita vastauksia. Vastauksia käsiteltiin vähäisen määrän takia enemmän laadullisesti kuin tilastollisesti. Venäjällä LSU lähetti kyselylomakkeet kahdentoista yrityksen ylimmälle johdolle, keski johdolle, työmaajohdolle sekä muille asiantuntijoille, ja vastauksia tulkittiin myös tilastollisesti. LSU tutki myös erikseen ylimmän johdon kompetenssia sekä yrityksen organisaatiokulttuuria käyttäen psykologisia menetelmiä.

## YRITYKSEN TYÖTURVALLISUUSKULTTUURI

Yrityksen työturvallisuuskulttuuriin kuuluvat esimerkiksi yrityksen arvot, vastuun jakaminen, tavoitteet, erilaiset työturvallisuustoimet ja -suunnitelmat, turvallisuushavaintojen

tekeminen, läheltä piti -tilanteiden ja tapaturmien raportointi, rikkeiden käsittely, perehdytys, koulutus sekä kaikki muut käytänteet työtaturmien välttämiseksi.

Xamkin haastattelemissa yrityksissä työturvallisuusvastuu jakautuu kaikille, minkä lisäksi vähintään toimitusjohtaja on työturvallisuuspäällikkö. LSU ei suoraan kysynyt samaa, mutta kysymyksistä voidaan päätellä, että yrityksissä on erikseen nimetty työsuojeluun perehtynyt asiantuntija.

Xamkin haastatteluissa nousi esiin periaate, että työmaat voidaan tehdä turvallisiksi ja että työntekijät saavat kaikki tarvitsemansa varusteet turvalliseen työskentelyyn. Haastatteluissa myös mainittiin riittävien varusteiden olevan yksi keino saada työntekijät sitoutumaan turvalliseen työskentelyyn tai vaikuttamaan työturvallisuuteen. Toisaalta varusteiden käyttö tai käyttämättä jättäminen nähtiin myös haasteena sekä syynä huomautukselle.

Suurin osa (83 %) LSU:n haastattelemasta ylimmästä johdosta uskoo vaatimus- ja varustelutason olevan riittävä. Lisäksi yli puolet uskoi, että varusteiden huono taso ei voi olla syy olla käyttämättä niitä.

LSU:n haastattelemista 83 prosenttia uskoo, että kiire lisää onnettomuuksien todennäköisyyttä. Xamk ei kysynyt kiireestä suoraan, mutta merkittävistä työturvallisuushaasteista kysyttäessä yksi haastateltava mainitsi kiireen. Vastauksissa myös mainittiin, että ylipäättään tarvittaisiin enemmän aikaa perehdytykseen työmaalla sekä turvallisen työn suunnitteluun. Toisaalta yksi vastaaja totesi, että aika kyllä saadaan riittämään.

Xamkin haastattelemat arvioivat läheltä piti -tilanteiden määrän alle kymmeneen kertaan, ja yksi vastaajista arvioi, että niitä saattoi olla enemmänkin, ja yksi ei tiennyt. Onnettomuuksista todettiin, ettei sellaisia ole ollut, joista olisi pitänyt maksaa korvauksia, ja toiset listasivat pieniä tapaturmia, kuten liukastumisia ja nyrjähdysyksiä. LSU:n tutkimasta ylimmästä johdosta suurin osa (91 %) totesi, että onnettomuudet ovat harvinaisia. Toisaalta ylin johto listasi vähemmän onnettomuuksia kuin keskijohto tai työnjohto.

LSU:n haastattelemista 75 prosenttia arvelee, että yrityksessä ei ole sanktioita sääntöjen rikkomiselle. Jos on, ne ovat lähinnä sakkoja tai esimerkiksi bonusten vähentämistä. Xamk ei kysynyt sanktioista suoraan, mutta kysymykseen reagoinnista ja raportoinnista kaikki mainitsivat varoituksen. Kahdessa yrityksessä oli käytössä sanktiot ja jopa irtisanominen varoitusten jälkeen. Toisessa yrityksessä arveltiin työntekijöiden olevan välittämättä sanktioista, koska niitä ei koskaan käytetty, ja toisessa yrityksessä vasta harkittiin sanktioiden käyttöön ottamista.

Kysymykseen siitä, ketä rangaistaan, Xamkin haastattelemat vastasivat, että ensisijaisesti sitä, joka on rikkonut sääntöjä, mukaan lukien aliurakoitsijat. LSU:n haastattelemat arvelivat, että ensisijaisesti esimiestä ja työntekijää.

Xamkin haastattelemissa yrityksissä tapaturmat raportoidaan ja selvitetään aina. LSU:n haastattelemissa yrityksissä ”tehdään tutkimukset”. Puolet LSU:n vastaajista piti tutkimuksia hyödyllisinä ja toinen puoli byrokraattisena harjoitteena.

Xamk ei suoraan kysynyt työturvallisuuskoulutuksesta. Haastatelluissa yrityksissä on kuitenkin käytössä pakolliset rekisterit ja niiden vaatimat koulutukset. Yksi johtajista sanoi, että työntekijöitä ei niinkään kouluteta, vaan heitä kannustetaan kehittämään taitojaan. Toisaalta 3/5 ei osannut arvioida, onko riittämättömällä koulutuksella merkitystä työturvallisuushaasteisiin. LSU:n haastattelemista 75 prosenttia uskoo, että nykyinen koulutus on riittävä turvallisen työskentelyyn, ja 92 prosentin mielestä satunnaisesta työturvallisuusohjeistamisesta on hyötyä. Kolmannes ylimmästä johdosta totesi, että turvallisuusohjeistus on epäsäännöllistä.

Kaikilla Xamkin haastattelemilla on käytössä perehdytys sekä työntekijöille että työmaalle. 3/5 käyttää lomaketta, 1/5 mainitsi erillisen ohjelmiston ja 1/5 käy perehdytyksen keskustellen. LSU:n kyselyyn vastanneista 60 prosenttia kirjoitti, että perehdytys pidetään muodollisesti, mutta he eivät tarkemmin kuvanneet, miten se järjestetään.

LSU haastattelemista 2/3 arveli kaikkien tai ainakin suurimman osan työntekijöistä tiedostavan työturvallisuusvaateet. Yksi Xamkin haastattelemista arveli, että kaikilla työntekijöillä ei työturvallisuus ole etusijalla johtuen esimerkiksi koulutuksen puutteesta.

## HYVÄN TYÖNTEKIJÄN OMINAISUUDET

Johtajilta kysyttiin työntekijän hyvistä ja huonoista ominaisuuksista sekä huonojen ominaisuuksien kohdalla siitä, mitä on valmis sietämään ja mitä ei. Osa ominaisuuksista oli vapaasti lueteltavina, ja osa annettiin valmiina listana, joka oli yhdenmukainen rajan molemmin puolin.

Xamkin haastattelema ylin johto mainitsi työntekijöiden hyväksi ominaisuuksiksi erilaisia vuorovaikutus- ja sosiaalisia taitoja, luotettavuuden ja rehellisyyden, osaamisen, oikean asenteen, ahkeruuden ja sitoutuneisuuden. Toisaalta tuotiin esille, ettei tarvitse olla täydellinen. LSU:n haastattelemat valitsivat tutkimusryhmän tulkitsemana enemmän tuotantoon kuin turvallisuuteen liittyviä ominaisuuksia, kuten pystyvyys, vastuullisuus, itsekuri, älykkyyys ja huolellisuus.

Xamkin haastattelema johdosta yksi taho ei siedä mitään huonoja ominaisuuksia, ja toinen ei lähes mitään. Yhdelle on merkitystä ainoastaan se, ettei joku noudata ohjeita. Kaksi muuta valitsi 4–5 ominaisuutta, joihin kuuluivat päihteiden käyttö ja ohjeiden noudattamatta jättäminen. LSU:n haastattelema ylin johto valitsi kunkin ominaisuuden vain kerran. LSU päätteli tästä, että negatiivisia piirteitä ei pohdita tuotannon vaan enemmänkin ylimmän johdon mieltymysten kautta.

Kun kysyttiin, mitä negatiivisia työntekijöiden piirteitä ylin johto on valmis sietämään, Xamkin haastattelemista 2/5 ei valinnut mitään ja 3/5 valitsi 2–5 ominaisuutta, kuten hajamielisyyden. Yksi vastaajista oli kommentoinut, että jos työntekijä ei kykene tehtäviinsä, kyse on riittämättömästä perehdytyksestä tai kokonaan väärästä tehtävästä. LSU:n haastattelemista kukaan ei valinnut mitään ominaisuutta.

Xamkin haastatelluilta ei kysytty päihteiden käytöstä suoraan, mutta 4/5 johtajista vastasi, etteivät hyväksy päihteiden väärinkäyttöä. Venäläiset vastaajat arvelivat, että pienikin määrä alkoholia häiritsee työntekoa ja että pienikin päihtymys tekee työstä turvatonta. LSU:n vastaajista 2/3 arveli, että työntekijät ovat harvoin tai eivät koskaan päihtyneinä töissä, ja 1/3 ei osannut sanoa.

## TYÖTURVALLISUUSHAASTEISIIN REAGOIMINEN

Haastateltaville tarjottiin valikoima valmiita vastausvaihtoehtoja kysymykseen, mitkä asiat motivoivat työntekijöitä turvalliseen työskentelyyn. Xamkin haastattelemat valitsivat useimmin halun olla jättämättä tiimiä pulaan ja halun välttää fyysisiä vammoja (3/5) sekä mahdollisen palkitsemisen (2/5). Lisäksi valittiin halu välttää rangaistus ja se, ettei haluta jättää työnjohtoa pulaan, sekä opittu tapa. Lisäksi mainittiin vapaana tekstinä, että halutaan välttää mahdollisesta tapaturmasta jäävä henkinen vamma sekä työskennellä hyvässä ilmapiirissä. LSU:n haastattelemat olivat valinneet merkittävimpänä halun välttää fyysistä vammaa, ja lisäksi he mainitsivat rangaistuksen välttämisen, halun olla aiheuttamatta pettymystä työnjohdolle ja omalle tiimille sekä tottumuksen.

Kun kysyttiin, miksi työntekijät rikkovat sääntöä, Xamkin haastattelemista 3/5 valitsi valmiista listasta kohdan, että sääntöjen noudattaminen vaikeuttaa työntekoa. LSU:n kyselyyn vastanneesta ylimmästä johdosta 92 prosenttia valitsi saman. Lisäksi LSU:n haastattelemista lähes kaikki valitsivat syyksi sen, että työntekijät pitävät omia sääntöjään parempina.

Työturvallisuushaasteita aiheuttavat Xamkin haastattelemissa yrityksissä ylipäättään turvallisuuskulttuuri, asenne, kiire ja viestintä. Mainittiin myös käytännön asioita, kuten työmaan siisteys ja kulkuväylät tai kypärän käyttö sisätiloissa (erityisesti aliurakoitsijat). LSU:n kyselyyn vastanneista puolestaan 58 prosenttia koki, että onnettomuudet liittyvät vuodenaikoihin. Kyselyssä muiksi onnettomuustekijöiksi arveltiin, että suojarusteet suojaavat vain joiltakin osin, työntekijät eivät käytä suojarusteita, koska ne haittaavat työtä, ja työntekijöillä on omat sääntönsä. Lisäksi mainittiin kiire ja alkoholin vaikutuksen alaisena työskentely.

Kysymykseen työturvallisuushaasteiden kehittämisestä vastattiin, että tarvittiin paremmat käytänteet sekä enemmän aikaa koko yrityksen työturvallisuussuunnitteluun ja perehdytykseen. Toisaalta osa haastateltavista totesi, että aikaa on ja aikaa löydetään tarvittaessa.

LSU:n haastattelemista johtajista 67 prosenttia uskoo, että yrityksessä kohdistetaan riittävästi huomiota turvallisuusasioihin. Toisaalta samassa kyselyssä asiantuntijat arvelivat, että enemmänkin pitäisi kiinnittää työturvallisuuteen huomiota.

Xamkin haastattelemista toimitusjohtajista kolme mainitsi yrityksensä työturvallisuustavoitteeksi nolla tapaturmaa ja pitää sitä täysin mahdollisena. Kaksi haastateltavista mainitsi tavoiteltavan TR-mittausten tason (92 ja 95). Lisäksi mainittiin yleisesti turvallisuushavaintojen lisääminen ja erityisesti positiivisten havaintojen tekeminen sekä se, että tavoitteena on päästä terveenä töistä kotiin. LSU ei kysynyt, millaisia turvallisuustavoitteita yrityksillä on, mutta kysyttäessä, onko mahdollista poistaa tuotannollisten onnettomuuksien mahdollisuus, 75 prosenttia näkee, että onnettomuuksia voidaan vain vähentää, mutta ei kokonaan poistaa.

Kysymykseen, miten työturvallisuushaasteisiin on reagoitu, Xamkin haastateltavat mainitsivat siisteyden ja organisoinnin, kiireen vähentämisen, muilta oppimisen, turvapuistovie-railut, vakuutusyhtiön edustajan vierailun, turvallisuusasioiden käsittelyn tapaamisissa ja turvallisuuden tekemisen työntekijöiden ykköstavoitteeksi. LSU:n haastateltavat arvelevat, että onnettomuuksia voidaan vähentää paremmilla työvälineillä ja suojavarusteilla, työntekijöiden koulutuksen kehittämällä, työnjohdon parantamisella, korottamalla sanktioita ja tuomalla palkkiojärjestelmän turvalliseen työskentelyyn.

## YLIIMMÄN JOHDON ASENNE

Ylimmän johdon asennetta ei voitu suoraan verrata. Xamkin haastattelussa kysyttiin, kuinka olennaisia erinäiset seikat ovat suhteessa ylimmän johdon omaan työturvallisuuteen sitoutumiseen. Haastatelluista 2/5 ei pitänyt mitään valmiiksi annetuista vaihtoehdoista merkittävänä, vaan mainitsi jonkin muun seikan, kuten ennakoimattomuuden johtuen muun muassa vuodenojoista. Yksi piti menetelmien yksinkertaisuutta ja asenteita merkittävänä, ja yksi aikaa ja resursseja. Yksi kommentoi erikseen, kuinka henkilökohtaiset asenteet tuottavat haasteita.

LSU:n kyselyyn vastannut ylin johto mieluummin käyttäisi ylimääräisen rahan tuotannon lisäämiseen ja työvoiman laadun kehittämiseen kuin suoraan työturvallisuuden parantamiseen. Ylin johto arvelee, että onnettomuuksien mahdollisuutta ei voida täysin poistaa, vain vähentää. LSU:n kyselyyn vastanneista ylimmän johdon edustajista kolmannes vastasi, että tiettyjen sääntöjen noudattamattomuus ei lisää vaaraa.

Xamkin haastattelemat toimitusjohtajat korostivat, kuinka työturvallisuus on arvo itsessään ja että kaikki laadukas työ sisältää työturvallisuusajatuksen. Myös LSU:n haastatteleuille turvallisuus on arvo itsessään. LSU arvioi tämän heijastavan tutkittujen yritysten organisaatiokulttuuria, joka voidaan määritellä klaanimaiseksi. Xamk ei määritellyt osallistuneiden



pk-yritysten yrityskulttuuria, mutta voidaan todeta, että klaanikulttuuriin kuuluva matala hierarkiataso, perhemäisyys ja porukassa tekeminen kuvaavat myös hankkeeseen osallistuneita suomalaisia yrityksiä.

## JOHTOPÄÄTÖKSET

Huolimatta kysymyslomakkeen yhdenmukaistamisesta Xamk ja LSU kyselivät eri asioita tutkimukseen osallistuneilta. Lisäksi kyselyt toteutettiin ja vastaukset käsiteltiin eri tavoin: Xamk haastatteli johtajat kasvokkain ja kirjasi myös vapaita vastauksia ja kommentteja, LSU käsitteli vain suorat vastaukset. Xamk käsitteli vastaukset laadullisesti, LSU tilastollisesti. Tämä yhdistettynä kulttuurisiin eroihin tulosten vertailu vaikeutuu jonkin verran. Aineistosta oli kuitenkin mahdollista löytää vertailukohtia ja havaita, että asenne-erojakin on, mutta yleisesti ottaen ajatukset ovat samansuuntaisia.

Aineistosta voi esimerkiksi saada vaikutelman, että Venäjällä kyselyyn osallistunut ylin johto kokee, että tapaturmia tapahtuu, kun taas suomalaiset näkevät, että tapaturmat voidaan estää. Eräs ero oli myös se, että venäläisten vastauksissa tuotiin esille vuodenajat ja päihteiden käyttö, mutta suomalaiset eivät näitä erikseen kysyneet.

Vastaukset voidaan tulkita kulttuurin kautta, mutta myös haastateltavan ryhmän valikoitumisen mukaan. Esimerkiksi Suomessa haastateltu ylin johto yrityksineen ovat kaikki aktiivisesti mukana Rakennusteollisuuden toiminnassa ja sitoutuneet sitä kautta muun muassa erilaisiin nolla tapaturmaa -kampanjoihin. Venäläisten osallistujien taustoista ei tarkemmin tiedetä, mutta voidaan olettaa heidänkin valikoituneen paikallisen yhdistyksen kautta. Suomessa myös laki on melko tiukka ja sitä noudatetaan.

## LÄHTEET

Gaivoronskaia, I. B., Boiko, E. A., Kunitsina, I. A., Sidorova, I. A., Pinchuk, D. V., Makarov, S. P. & Lubimova, E. D. 2019. Organizational, Psychological and Cultural Safety Factors in Russian Construction Industry. Pushkin Leningrad State University. Julkaisematon tutkimusraportti.

Potinkara, T. & Haatanen, N. 2019. Rakennustyömailla tavoitteena nolla tapaturmaa – SAFECON-hankkeen ensimmäisen vuoden tuloksia Suomesta. Teoksessa Soininen, H. ym. (toim.) Metsä, ympäristö ja energia. Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Vuosijulkaisu 2019. Mikkeli: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu (Xamk kehittää), 283–289. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-344-226-9>.

Sairanen, M. & Haikonen, H.-R. 2020. Ohjenuorat työturvallisuuden kehittämiseen rakennusalan pk-yritysten ylimmälle johdolle. Teoksessa Soininen, H. ym. (toim.) Metsä, ympäristö ja energia. Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Vuosijulkaisu 2020. Mikkeli: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu (Xamk kehittää), 184–189. Saatavissa: <http://www.theseus.fi/handle/10024/355599>.

# THE USE OF IT SYSTEMS IN MANAGING CONSTRUCTION SITE SAFETY IN FINNISH SMES

Henna-Riikka Haikonen & Milla Sairanen

This survey was carried out as part of the Safe, Skilled and Productive Construction Sites project, “SAFECON”. The goal of SAFECON is to develop occupational safety skills, increase productivity, and decrease the level of human suffering in SME construction companies in the cross-border area. The project is implemented as part of the cross-border cooperation South-East Finland-Russia CBC 2014–2020 programme and it is funded by the Russian Federation, the Republic of Finland and the European Union.

## INTRODUCTION

The construction industry, especially the small and medium-sized enterprise (SME) sector, lags behind other industries in both occupational safety and digitalisation. Accidents on construction sites have decreased due to improvements in occupational safety, but too many accidents still happen, and there is a need for safety work (Lantto et al., 2019). There is some progress in the use of information technology (IT) systems and the digitalisation of the construction sector (Vihmo, 2020); however, much project management and communication is still paper-based, especially in SMEs (Martelin, 2019; Häikiö et al., 2020).

Companies have a legal responsibility to ensure safe workplaces (Työturvallisuuslaki 23.8.2002/738). In addition to regulations, there are voluntary actions in the form of Corporate Social Responsibility (CSR), which aim for societal, environmental and economical sustainability in a business (Shaw, 2021). Companies that face a lot of risks due to the nature of their work operations, including the construction industry, integrate occupational health and safety (OHS) into their CSR strategies (Tsalis et al., 2018). The role of corporate responsibility will grow because it is believed that the impact of occupational safety on the attractiveness of the industry will increase (Singh, 2016).

Common challenges that affect the adoption of IT systems are the difficulties such as negative attitudes in introducing new technologies and measuring the benefits of adoption (Martelin, 2019; Vihmo, 2020). Other key challenges are differences in the level of IT skills and the lack of training with new systems, and how to find the right system to match the actual need from a wide range of software and information systems on offer (Vihmo, 2020).

Building information modelling (BIM) is believed to be a great benefit for the construction sector, but there is still a lot to do to integrate it with other technologies (Martínez-Aires et al., 2018). Both financial and time resources are needed to develop and test the systems and to tailor them to specific needs (Azhar, 2017; Martelin, 2019). Otherwise, there is a risk that the chosen software is not solving the problems that have been identified (Vihmo, 2020). In addition, training and possibly separate IT personnel or the outsourcing of development and maintenance are needed (Martelin, 2019).

In the future, technologies like BIM and especially 3D could prevent some of the communication failures and increase the understanding of safety issues (Akinlolu et al., 2020). By using a Virtual Reality (VR) 3D construction site walkthrough, it is possible to pinpoint the risks in advance and enhance workers' understanding of safety (Akram et al., 2019). However, it must be taken into consideration that BIM and VR technologies can only improve occupational safety at construction sites if attitudes towards safety and new IT systems are positive (Azhar, 2017). Finnish construction companies see potential in digitalisation, especially in communication and the flow of information, but also in occupational safety (Vihmo, 2020).

Influencing construction site safety with real-time communication and flow of information also came up in various activities in the project this survey was designed for. The top managers of construction SMEs who took part in the project emphasised the importance of communication and making safety observations (Potinkara et al., 2019). Research activities in the project highlighted how the flow of information and real-time communication are key issues in reducing construction site accidents, and how the adoption of occupational safety on construction sites is affected by differences in working culture, especially communication and interaction.

Based on the challenges recognised in the project, and the literature on construction site safety-related IT systems, a questionnaire was carried out to survey the attitudes of Finnish SME construction businesses towards the digitalisation of the construction business and the use of information systems in monitoring and developing occupational safety on a construction site. Digitalisation and IT systems could be used to develop communication and the flow of information. With well-functioning technological systems, the flow of information and the making of observations can be improved.



**FIGURE 1** SAFECON project enhances safe, skilled, and productive construction sites (figure Veera Miettinen, Kixit Oy)

## METHODS

A questionnaire was formulated based on the literature and previous findings in the project. Webropol software was used to perform the questionnaire and to analyse the results. The questionnaire was sent by email to 152 CEOs of randomly selected SME construction companies in Finland. The questionnaire was sent several times during spring and summer 2021. Also, the possibility of live interviews was offered.

The questionnaire focused on what kinds of IT systems SMEs use for health and safety, and how the managers feel about the systems. In some of the questions, respondents were able to choose several options or add their free text.

The first part of the questionnaire consisted of background questions such as company size and the respondent's position in the company. Respondents could choose whether they wanted to remain anonymous or not. The second part consisted of questions about digitalisation in the construction business.

The third part dealt with programs used in the construction business. The last question in this section was the parting question, which asked whether the company has safety-related IT systems or not. If the answer was negative, the respondent was directed to the last question, which asked for reasons why occupational safety systems are not in use. If the answer

was positive, the respondent was directed to the fourth part, which consisted of specific questions about IT systems in use for occupational safety in the construction business.

## RESULTS

All the respondents were in senior management roles. One of the respondents was also a safety chief of a company. All worked in the field of building construction. Four out of the five respondents had 10–49 employees and 1/5 of respondents had 50–100 employees. Three out of the five respondents believed that they were lagging behind others in the development of IT systems, 1/5 felt that they are at the same level and 1/5 could not answer to this.

IT systems are seen as a part of the development of construction site safety and productivity in general. Four of the five respondents believed IT systems bring positive development to the different aspects of safety such as planning, monitoring and communication. All respondents believed that in the future there will be more and more technological safety systems that develop safety. One of the five respondents chose “I cannot say” whether the IT systems can develop the different aspects of safety systems or not.

The most common IT system in use are email (5/5 of respondents), MS Office programs (5/5 of respondents), electronic site diaries (4/5 of respondents), data model and cloud model-based systems (3/5 of respondents), CAD programs (2/5 of respondents) and safety reporting applications like Incy (2/5 of respondents). All the respondents said that systems work both on mobile and desktop versions.

All the respondents had systems related to safety in use. Three of the five respondents had BIM-based systems in use. The remainder (2/5) did not have any of the systems listed in our questionnaire. When asked about the compatibility of IT systems, only one answered that all systems work together. Others said that some of the systems work together, some do not.

Three of the five respondents have used safety-related systems for 1–5 years, one of the respondents for over five years and one for less than one year. Four of the five respondents answered that top management uses IT systems, all the respondents answered that middle management uses IT systems and 2/5 of respondents said that employees also use IT systems.

In our research, 5/5 of respondents mentioned that when a new IT system is presented to employees, the common attitude towards it is negative or at least somewhat questionable. All the respondents had observed some sort of resistance to change. Two of the respondents also said that some of the employees were excited and positive about the new IT system. Four of the five respondents educate employees on how to use information systems. Four respondents said that all the IT systems users have sufficient information about how to use them, while one said that users do not have enough information to use IT systems.

Considering the reasons for using IT systems, 4/5 of respondents chose flow of information, 4/5 monitoring, 3/5 reporting and 2/5 archiving. When asked what work tasks are done with information systems, all the respondents chose occupational safety monitoring. In this question, respondents were able to choose several options. Three respondents also chose safety communication and safety risk management. Two of the five respondents chose following worktime and site-specific employee monitoring. One of the respondents chose planning occupational safety and one chose education.

In response to the question about which programs they have experience with related to the construction site, 3/5 of the respondents had experience with Congrid and 2/5 with Tocoman. One of the respondents had experience with JD, one with Zeroni, and one with the Turvallinenyritys service.

Three of the five respondents said that there is a suitable number of IT systems in use. One of the respondents answered that there are too many and one said that there is an insufficient number of them.

Three of the five respondents said that the company's occupational safety has developed in a better direction due to IT systems. Work-related accidents had decreased and attitudes had improved. Two of the five respondents answered that safety levels have remained at the same level.

## DISCUSSION

Despite several rounds of emails and calls, only five out of 152 companies answered our survey. Due to the small number of participants, we cannot say if the results are representative of the population. The respondents were positive about IT systems and are very likely active users, which might affect the results. However, similar surveys have been conducted previously and the results of our survey are in line with theirs.

Most of the respondents felt that IT systems have helped raise the level of occupational safety, which is in line with the literature. Some of the respondents answered that safety levels had remained the same. On the other hand, if there are problems with the process itself, even the latest and the most modern IT systems cannot alone improve levels of occupational safety (Martelin, 2019).

Communication on construction sites is demanding (Kiviniemi et al., 2011) and unsuccessful communication is often a major influence behind fatalities and accidents (Akram et al., 2019). In response to the question about what the important things in the usage of IT systems are, 4/5 of respondents chose flow of information, 4/5 chose monitoring, 3/5 reporting and only 2/5 chose archiving. It could be possible to create better communication



for construction companies with the help of BIM-based systems, for example (Kiviniemi et al., 2011).

Attitudes towards occupational safety on construction sites has developed, especially during the 2000s, but there is still much to do, particularly in the SME sector. Attitudes and behaviour can be considered a major barrier to development (Azhar, 2017). For example, all the respondents said that there is a negative attitude among employees towards the adoption of new IT systems. Especially for older workers, IT systems might feel useless and cause a negative attitude because they trained for their profession when IT systems were not widely used (Martelin, 2019). The younger generation might be more used to IT systems and technology, so they are likely embrace it more easily.

Without commitment from top management, it is difficult to build a strong safety culture. It can be assumed that this also applies to IT systems. If senior management is not committed to adopting and developing new IT systems, it can be demanding for employees to fully embrace new IT systems.

Educating employees as the new IT system is taken into use is as important as sharing knowledge of occupational health issues. Most of the respondents provided some training to their employees on the new systems. The respondents answered that all the workers who will use the IT systems have sufficient information to use them, while only one felt that users do not have enough information. On the other hand, IT skills are not that good among employees in the construction sector, and the benefits of IT systems are often wasted (Martelin, 2019).

Only one respondent stated that all the systems work together. It can be assumed that most of the safety-related programs available are difficult to integrate, which hinders their use in daily work. The biggest problems related to IT systems are that the applications are not suitable for a company's needs, there are too many different logins, and lack of guidance (Martelin, 2019). To find or create an IT system that is the right fit for the company's needs requires money and time, and SMEs do not have the same level of resources as larger companies (Martelin, 2019).

Most of the respondents felt that they were lagging behind other sectors in the development of IT systems, which is in line with the literature. However, respondents said that they believe that in the future there will be more safety-related IT systems. Also in the literature, it is proposed that in the future virtual reality and the use of BIM-based 3D and 4D models will be more common from a safety perspective (Akram et al., 2019). For example, drones, 3D machine controls for work machines, artificial intelligence and robotics will also become more common in future construction (Martelin, 2019). However, we did not ask about these; nor did the respondents write anything.

## CONCLUSION

There is a link between productivity and occupational safety. Communication is a major part of occupational safety and IT systems can be used in the management and planning of safety, and to enhance communication, monitoring and reporting. There are still challenges in adopting a safety culture and IT systems in construction companies. Aspects of social responsibility also came up in interviews and discussions with senior and on-site managers who took part in the project this survey was designed for.

Finnish construction SMEs were surveyed about their use of IT systems and especially construction site safety-related systems. Only five out of 152 companies responded, and most likely those that did respond are more active users of IT systems, which may influence the results. For example, in the survey for the Confederation of Finnish Construction Industries RT, 85% of respondents see digitalisation as a trend that will keep developing (Vihmo, 2020).

All the respondents indicated that there will be IT systems and safety-related IT systems in use in the future. All respondents believed that it is possible for the safety standards of the company to be enhanced by IT systems, and most of the respondents felt that occupational safety had improved with the use of IT systems. The literature is aligned with this observation. However, there is still quite a lot of work to do in the construction sector to fully realise the potential of safety-related IT systems. In the survey by RT (Vihmo, 2020), 36% of the forward-looking respondents saw the benefits of digitalisation in developing safety, whereas the same was true for only 10% of those who were lagging behind.

Money, time and expertise are needed to make IT systems fit the needs of the company. Otherwise, the benefits of the IT systems are wasted. Both the survey and the literature confirmed that the introduction of the IT system must be supported as well as awareness of the importance of occupational safety in SMEs. Even if there is a positive attitude towards IT systems and safety, the challenge is to get people in the construction industry and especially in SMEs to fully realise the benefits of a good IT system in terms of safety.

Future research in the digitalisation of occupational safety on construction sites could be to find SMEs that use different kinds of systems and compare and contrast these systems in action, as well as how to measure the benefits of digitalisation and IT systems on construction site safety in SMEs.

## REFERENCES

- Akinlolu, M., Haupt, T. C., Edwards, D. J. & Simpeh, F. 2020. A bibliometric review of the status and emerging research trends in construction safety management technologies. *International Journal of Construction Management*. DOI: 10.1080/15623599.2020.1819584.
- Akram, R., Thaheem, M. J., Nasir, A. R., Ali, T. H. & Khan, S. 2019. Exploring the role of building information modeling in construction safety through science mapping. *Safety Science*, 120, 456–470. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.07.036.
- Azhar, S. 2017. Role of Visualization Technologies in Safety Planning and Management at Construction Jobsites. *Procedia Engineering*, 171, 215–226. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.329.
- Häikiö, J., Kallio, J., Mäkelä, S.-M. & Keränen, J. 2020. IoT-based safety monitoring from the perspective of construction site workers. *International Journal of Occupational and Environmental Safety*, 4, 1–14. DOI: 10.24840/2184-0954\_004.001\_0001.
- Kiviniemi, M., Sulankivi, K., Kähkönen, K., Mäkelä, T. & Merivirta, M. L. 2011. BIM-based safety management and communication for building construction. *VTT Tiedotteita – Research Notes 2597/VTT*. PDF. Available at: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2011/T2597.pdf> [Accessed: 5.5.2021]
- Lantto, E. & Räsänen, T. 2019. Rakennusalan työturvallisuuden kehitys. Nolla tapaturmaa rakennusteollisuudessa 2020 -hanke. Työterveyslaitos (Finnish Institute of Occupational Health). Available at: [https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/tyoturvallisuus/2020\\_sekalainen/raportti\\_final.pdf](https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/tyoturvallisuus/2020_sekalainen/raportti_final.pdf). [Accessed: 5.5.2021]
- Martelin, W. 2019. Tietotekniikan hyödyntäminen rakennustyömaalla. Nykytilanne ja kehitysnäkymiä. Tampere University. Civil Engineering. Master's Thesis. PDF. Available at: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/27545/Martelin.pdf?sequence=4&isAllowed=y> [Accessed: 5.5.2021].
- Martínez-Aires, M. D. López-Alonso, M. & Martínez-Rojas, M. 2018. Building information modeling and safety management: A systematic review. *Safety Science*, 101, 11–18. doi: 10.1016/j.ssci.2017.08.015
- Potinkara, T. & Haatanen, N. 2019. Rakennustyömailla tavoitteena nolla tapaturmaa - SAFECON-hankkeen ensimmäisen vuoden tuloksia Suomesta. In Soininen, H. et al. (eds) *Metsä, ympäristö ja energia. Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Vuosijulkaisu 2019*. Mikkeli: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu (Xamk kehittää), 283–289. Available at: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-344-226-9>

Shaw, F. 2021. Corporate responsibility: an introduction. CIPD. Website. Available at: <https://www.cipd.co.uk/knowledge/strategy/corporate-responsibility/factsheet#gref> [Accessed: 5.5.2021].

Singh, D. 2016. Yritysvastuun rooli rakennusalalla nykypäivänä ja tulevaisuudessa. Lappeenranta University of Technology. Master's Thesis. PDF. Available at: <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/124442>

Tsalis, T. A., Stylianou, M. S. & Nikolaou, I. E. 2018. Evaluating the quality of corporate social responsibility reports: The case of occupational health and safety disclosures. *Safety Science*, 109, 313–323. DOI: 10.1016/j.ssci.2018.06.015.

Työturvallisuuslaki 2002. Available at: <https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2002/20020738#L2>

Vihmo, J. 2020. Rakennusteollisuuden digitutkimus 2020 yhteenveto tuloksista. Rakennusteollisuus RT. PDF. Available at: <https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/ajankohtaista/ajankohtaista-liitteet/2020b/rt-digitutkimus-2020-yhteenveto-tuloksista.pdf>

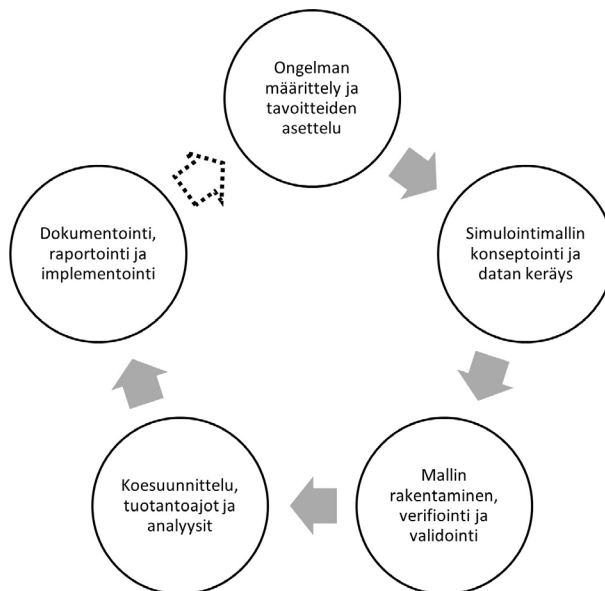
# KOKOONPANON KEHITTÄMINEN SIMULOINNIN AVULLA

Mikko Hokkanen & Ari-Pekka Hyttinen

”Kiertotalous ja kehittyvien yritysten uudet liiketoimintamallit 2020-luvun alustataloudessa” on Etelä-Savon maakuntaliiton Euroopan aluekehitysrahastosta rahoittama ja Mikkelin kehitysyhtiö Miksei Oy:n sekä Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun toteuttama hanke, jossa yritysten toimintakulttuurin muutosta pyritään tukemaan ja vauhdittamaan muun muassa ketterien kokeilujen ja työpajatoiminnan avulla. Hankkeen yhtenä tavoitteena on tuoda simulointityökaluja tuotannollisten yritysten käyttöön ja osoittaa niillä saavutettavia hyötyjä yritysten kilpailukyvyn kehittämiseksi. Tässä artikkelissa käsitellään kokoonpanotyön kehittämistä simuloinnin avulla hankkeessa toteutetun yritys-casen näkökulmasta. Yritys on tyypillinen eteläsavolainen pk-konepaja, jolla on omien tuotteiden valmistuksen lisäksi alihankinta- ja sopimusvalmistusta.

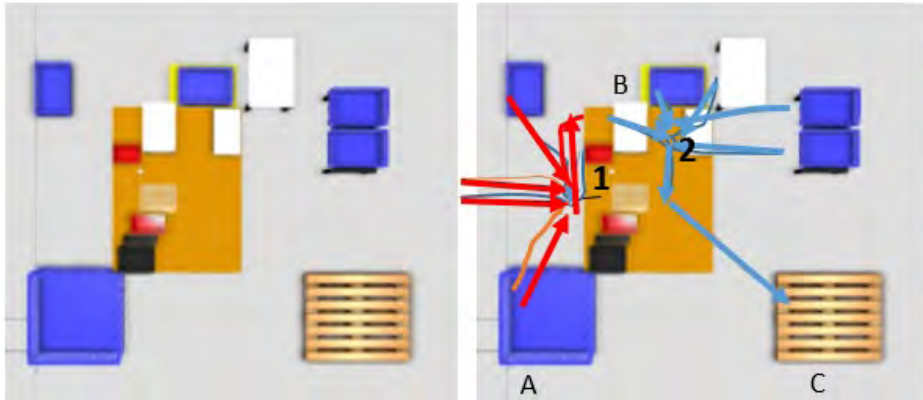
## SIMULOINTIPROJEKTIN VAIHEET

Simulointiprojektin kulku esitetään Banksin ym. (2010, 35) mukaan syklimäisenä prosessina, jonka vaiheet jatkuvat, kunnes tavoiteltu lopputulos saavutetaan. Simulointiprojektin vaiheet on esitetty tiivistetysti kuvassa 1.



**KUVA 1.** Simulointiprojektin vaiheet (mukaiillen Banks 2010)

Kokoonpanon kehittäminen aloitettiin ongelman määrittelyllä, lähtötilanteen kuvauksella ja tavoitteiden asettelulla. Lähtötilannetta vastaava layout rakennettiin Visual Componentsin simulointiohjelmistoon ja kokoonpanosta kuvatusta videosta selvitettiin kokoonpanosolun materiaalivirrat, jotka merkittiin soluun ns. spagettikaavioksi (kuva 2). Tavoitteeksi asetettiin kokoonpanotyön kustannustehokkuuden parantaminen.



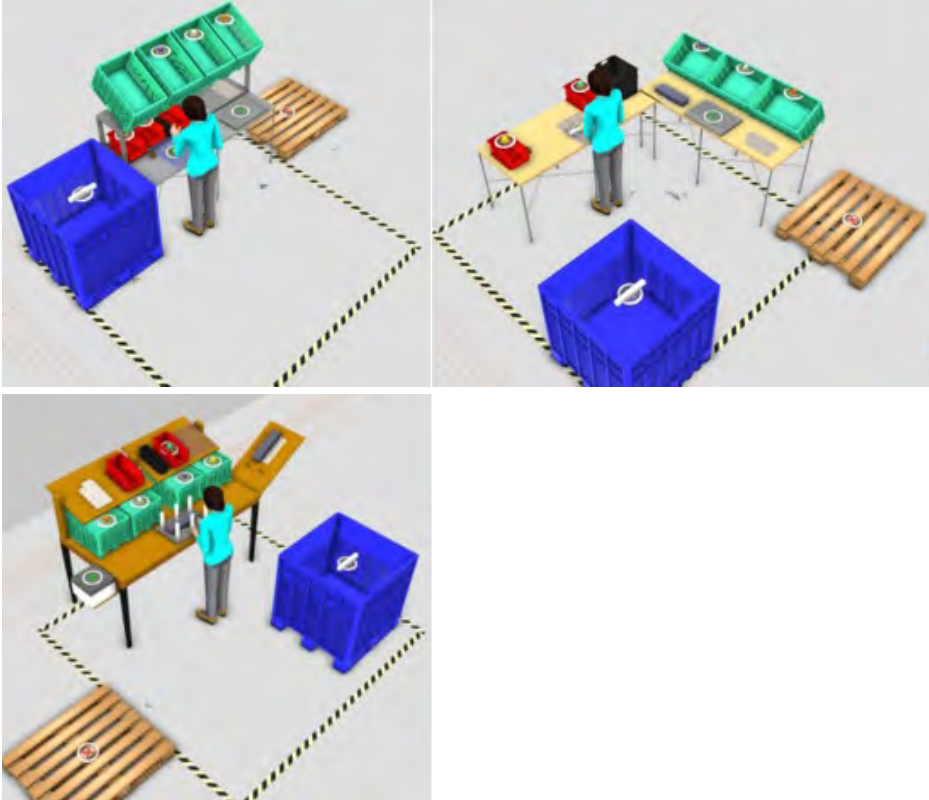
**KUVA 2.** Kokoonpanosolun layout ja materiaalivirrat lähtötilanteessa (kuva Ari-Pekka Hyttinen).

Lähtötilanteessa kokoonpano tapahtui kuvan pisteissä yksi ja kaksi siten, että pisteessä yksi kokoonpano kulki A:sta B:hen ja pisteessä kaksi B:stä C:hen. Lähtötilanteesta tehtiin simulointimalli, joka sisälsi kokoonpanotyön lisäksi kaikki tarvittavat materiaalien siirrot (kuva 3). Mallin validointi tehtiin kokoonpanotyöstä kuvatun videon avulla, johon simuloituja kokoonpanon läpimenoaikoja verrattiin.



**KUVA 3.** Lähtötilanteen simulointimalli (kuva Ari-Pekka Hyttinen).

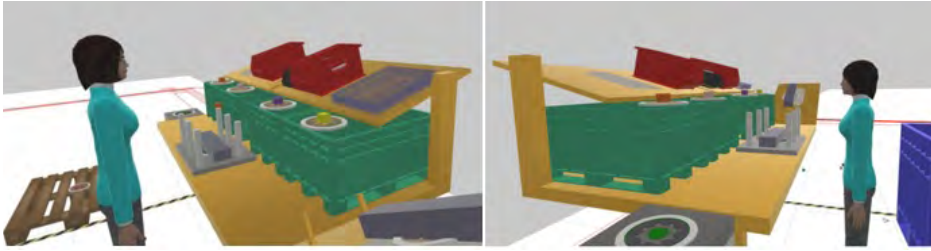
Lähtötilanteesta pääteltiin, että materiaalien siirtoja voidaan selkeyttää tuomalla tarvittavat osat mahdollisimman lähelle kokoonpanopistettä. Simulointimallien konseptoinnissa huomioitiin materiaalien virtaus siten, että tarvittavat siirrot tapahtuvat kokoonpanotyön edetessä oikeaan aikaan ja materiaalit ovat oikeilla paikoilla. Konseptointivaiheessa tuotettiin viisi vaihtoehtoista layout-mallia, jotka esitettiin kokoonpanoa tekeväälle henkilölle. Layout-malleja muokattiin saatujen kehitysideoiden pohjalta, minkä jälkeen niistä rakennettiin simulointimallit. Käytetyt kokoonpano- ja siirtoajat perustuivat lähtötilanteen simulointimalliin. Kuvassa neljä on esitetty vaihtoehtoisten layout-mallien simulointia.



**KUVA 4.** Vaihtoehtoisten layout-mallien simulointimalleja (kuva Ari-Pekka Hyttinen).

Mallien ergonomiatarkastelu tehtiin Visual Components Experience -ohjelmiston ja HTC Vive -VR-lasien avulla. Vaihtoehtoisia layout-malleja tutkittiin VR-ympäristössä, jolloin esimerkiksi eripituisten henkilöiden ulottumat saatiin varmennettua ja työpisteen mitoitusta tarkennettua. Kuvassa 5 on esitetty tarkastelu 170-senttisen ja 152-senttisen henkilön osalta ennen työpisteen mitoituksen muuttamista. Pöytätasoa päätettiin toteuttaa sähköisellä korkeussäädöllä.





**KUVA 5.** Ergonomiatarkastelua eripituisille henkilöille (kuva Ari-Pekka Hyttinen).

Kuvassa 6 opinnäytetyöntekijä tutkii työpisteen ergonomiaa VR-lasien avulla.



**KUVA 6.** Ergonomiatarkastelua VR-lasien avulla (kuva Mikko Hokkanen).

## TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Simulointien tuloksia verrattiin lähtötilanteeseen ja huomio kiinnitettiin sovitun eräkoon läpimenoaikaan sekä henkilöstökustannuksista muodostuvaan suhteelliseen kustannukseen. Vaihtoehtoisten mallien simulointitulokset on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1.** Simulointiajojen tulokset.

	Työntekijät	Suhteellinen aika	Suhteellinen kustannus
Lähtötilanne	2	1	1
Vaihtoehto 1	2	0,75	0,75
Vaihtoehto 2	2	0,96	0,96
Vaihtoehto 3	1	1,25	0,63
Vaihtoehto 4	1	1,33	0,67
Vaihtoehto 5	1	1,17	0,58
Vaihtoehto 5, kaksi työpistettä	2	0,58	0,58

Simulointien perusteella parhaaksi vaihtoehdoksi osoittautui vaihtoehto viisi. Tällä layout-ratkaisulla suhteellinen kustannus on 42 prosenttia pienempi lähtötilanteeseen verrattuna. Lisäksi vaihtoehto tuo joustavuutta työn järjestelyyn, sillä kokoonpanotyö voidaan tehdä yhden tai kahden henkilön toimesta esimerkiksi toimituksen kiireellisyydestä riippuen. Kahdella henkilöllä kokoonpanoon käytetään 42 prosenttia vähemmän ja yhdellä henkilöllä 17 prosenttia enemmän aikaa lähtötilanteeseen verrattuna. Vaihtoehtoinen layout-malli on toteutettu yleisesti saatavilla olevilla kalusteratkaisuilla, joten vaihtoehdon edellyttämien investointien takaisinmaksuaika on lyhyt ja vastaavia yleiskäyttöisiä kokoonpanosoluja tai -työpisteitä voidaan toteuttaa helposti useampia. Kokoonpanosolun ja työpisteen järjestely uudelleen parantaa virtaustehokkuuden lisäksi todennäköisesti myös laaduntuottokykyä, kun kokoonpanoon tarvittavat osat ja materiaalit ovat selkeässä vakioidussa järjestyksessä ja jokaisen työntekijän saatavilla.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että simulointia voidaan soveltaa hyvin erilaisiin kehitystehtäviin. Sen avulla voidaan havainnollistaa ja tutkia erilaisia ratkaisuja kustannustehokkaasti ja selvittää jatkokehityksen kannalta parhaat vaihtoehdot nopeasti.

## LÄHTEET

Banks, J., Carson, J., Nelson, B. & Nicol, D. Discrete-Event System Simulation. New Jersey: Pearson Education Inc., 2010.

# KAPPAREDUKTION MALLINNUKSEN HAPPIDELIGNIFIOINNIN

Jari Käyhkö & Antti Pappinen & Kari Peltonen

Kemiallisen massan valmistuksen päätehtävänä on poistaa massasta ligniini. Merkittävä osuus tästä tapahtuu keiton ja valkaisu- ja sijoittuvassa happidelignifiointivaiheessa, jossa liuotetaan suuri osa keiton jälkeen massassa kiinni olevasta ligniinistä. Kuitulaboratoriossa on tehty tutkimusta aiheesta jo yli kymmenen vuoden ajan kiinteässä yhteistyössä Andritzin kuitulinjaryhmän kanssa (Mutikainen ym. 2014a, Mutikainen ym. 2014b, Mutikainen ym. 2015, Mutikainen ym. 2017, Käyhkö ym. 2018a, Käyhkö ym. 2018b, Käyhkö ym. 2019, Käyhkö ym. 2021a, Käyhkö ym. 2021b). Työ on lähtenyt liikkeelle kaasumaisten kemia-kaalien sekoittamisesta, mutta kehitetyn uuden mittaus- ja testitekniikan, laboratorio- ja tehdaskokeiden sekä perustutkimuksen ansiosta on nyt laajentunut kattamaan koko happivaiheen toiminnan. Se alkaa prosessin toteutuksesta ja jatkuu koko prosessin päivittäiseen ajoon sekä prosessin seurantaan ja säätöön, ja siinä huomioidaan myös happivaiheen ympärillä toteutettavat pesuvaiheet. Tärkeä osa tutkimuksia on ollut happidispersioon kuplakoon havainnointi tehtailla sekä kuplakoon merkityksen selvittäminen laboratorio-, tehdas- ja mallinnustutkimuksilla. Kyseessä olevat tutkimukset antavat aivan uuden pohjan mallintaa happivaiheen toimintaa, ja tässä artikkelissa keskitytään juuri happidelignifioinnin (kuva 1) mallinnuksen kehittämisen tarkasteluun.

Artikkelin pohjana olevat tutkimukset on toteutettu pääosin KuHa – Kuitulinjan kaasujen hallinta -hankkeessa, jossa rahoittajina ovat Etelä-Savon maakuntaliitto Euroopan aluekehitysrahastosta (EAKR), Andritz Oy, Vaisala Oy ja Solenis Oy.



**KUVA 1.** Erään biotuotetehtaan happidelignifiointivaihe (kuva Jari Käyhkö).

## MALLINNUKSEN PERUSTEET

Tutkimuksissa toteutettu mallinnus perustuu hyvin pitkälle van Heiningenin et al. (2003) julkaisussaan soveltamiin funktioihin ja parametreihin. Julkaisussa mallinnettiin kappa-reduktiota havupuumassan happidelignifioinnissa yhtälön 1 mukaisesti.

$$\Delta K = -\left(3 * \frac{10^6}{60}\right) e^{-51000/(8,314T)} ([OH^-])^{0.7} (C_{O_2})^{0.7} (K)^2 \Delta t \quad (1)$$

Jossa:

K: Kappaluku

T: Lämpötila, K

[OH<sup>-</sup>]: Hydroksidi-ionien konsentraatio, mol/l

C<sub>O<sub>2</sub></sub>: Liuenneen hapen konsentraatio, mol/l

Hapen kulutus  $r_{O_2}$  [mol/l] riippuu kappareduktiosta seuraavasti (yhtälö 2):

$$r_{O_2} = \frac{1,5b_1}{32} \left( \frac{c}{100} \right) \Delta K \quad (2)$$

Jossa:

- $b_1$ : Stoikiometrinen kerroin (g  $O_2$  kulutettu / g ligniini poistettu). Tässä käytetty van Heiningenin et al. (2003) mukaan arvoa 1,0.  
 $c$ : Massan sakeus, %

Arvo 1,5 yhtälössä 2 tulee yleisestä kokemuksesta, jonka mukaan yksi havupuun kappayksikkö vastaa 1,5 grammaa ligniiniä 1,0 kilossa massaa. Numero 32 on happimolekyylin moolimassa.

Hydroksidi-ionien kulutus lasketaan seuraavasti (yhtälö 3):

$$\Delta[OH^-] = \frac{1,5b_2}{40} \left( \frac{c}{100} \right) \Delta K \quad (3)$$

Jossa:

- $b_2$ : Stoikiometrinen kerroin (g NaOH kulutettu / g ligniiniä poistettu). Tässä on käytetty van Heiningenin et al. (2003) mukaan arvoa 0,90. Numero 40 on natriumhydroksidin moolimassa.

Hapen aineensiirto lasketaan aineensiirtokerroimen avulla alla olevan yhtälön (yhtälö 4) mukaisesti.

$$N = k_L a (C_{O_2}^* - C_{O_2}) \Delta t \quad (4)$$

Jossa:

- $N$ : Hapen aineensiirto, g/l  
 $k_L a$ : Hapen aineensiirtokerroin  
 $C_{O_2}^*$ : Paineesta riippuva hapen saturaatiokonsentraatio, g/l  
 $C_{O_2}$ : Hapen konsentraatio liuoksessa, g/l  
 $t$ : Aika, s

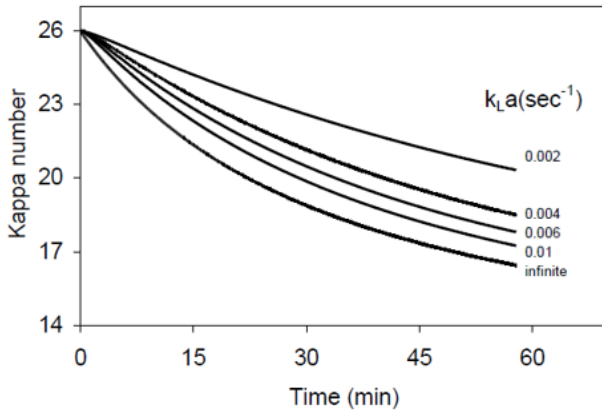
Paine reaktorissa korkeudella  $h$  lasketaan seuraavasti (yhtälö 5):

$$p = p_{in} - 0,1h \quad (5)$$

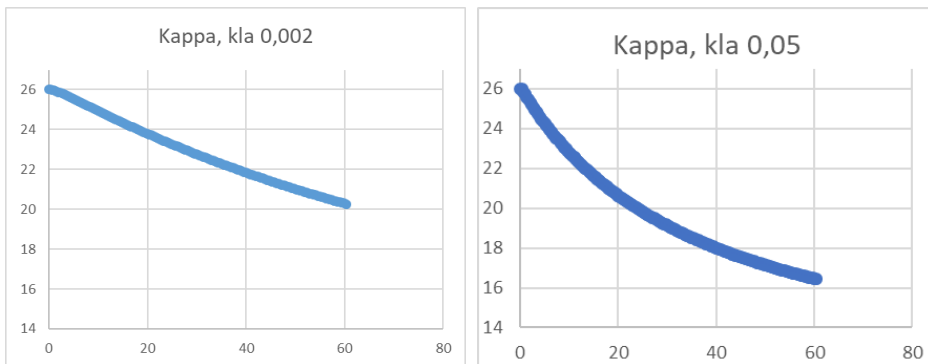
Jossa:

- $p_{in}$ : Paine reaktorin syötössä, bar  
 $h$ : Reaktorin korkeus, m

Yllä esitelyihin yhtälöihin ja sen parametreihin perustuen rakennettiin Exceliin numeerinen laskentapohja, jonka toimivuus verifioitiin vertaamalla sitä van Heiningenin toteuttamiin simulointeihin (kuvat 2 ja 3).

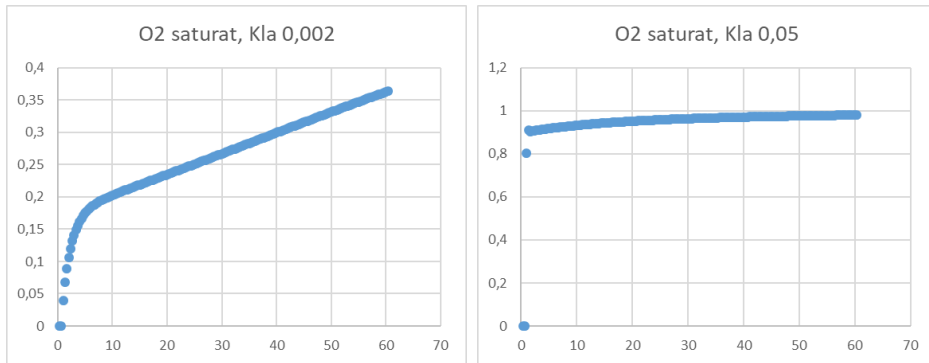


**KUVA 2.** Kappa-arvon kehittyminen reaktorissa eri hapen aineensiirtokertoimien arvoilla. Havupuumassan sakeus 10 %, NaOH-annos 2,0 %, happiannos 2,0 %. Paine reaktorin syötössä 8,3 bar, reaktorin korkeus 38 m ja lämpötila 95 oC (kuva van Heinigen et al. 2003).



**KUVA 3.** Vastaava laskenta tehtynä Excel-laskentamallilla (kuva Jari Käyhkö).

Sen lisäksi, että kyseisellä Excel-laskentamallilla voidaan nyt varioida kaikkia happidelignifioinnin muuttujia ja mallinnuksen laskentaparametrejä, sillä voidaan myös seurata eri prosessiin vaikuttavien tilasuureiden tilaa. Esimerkiksi kuvassa 4 on esitetty, kuinka liuenneen hapen konsentraatio suhteessa saturaatiokonsentraatioon kehittyi kuvan 3 tilanteessa reaktion edetessä.



**KUVA 4.** Liuenneen hapen konsentraatio suhteessa saturaatiokonsentraatioon kuvan 3 tapauksissa (kuva Jari Käyhkö).

## Hapen kuplakokoon perustuvan aineensiirron sekä muiden olennaisten tekijöiden sisällyttäminen mallinukseen

Aiemmin tehdyissä mallinuksissa hapen aineensiirtoa ei ole voitu huomioida lähellekään käytäntöä vastaavalla tavalla. Tässä mallinuksessa hapen aineensiirtokerroin huomioitiin perustuen alla olevaan yhtälöön (yhtälö 5) (Käyhkö ym. 2021a).

$$k_L a = \frac{12 D_{O_2} X_g}{A \left( \left( \frac{1}{X_g} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right) a_b^2} \quad (5)$$

Jossa:

- $k_L a$ : Hapen aineensiirtokerroin, 1/s
- $D_{O_2}$ : Hapen diffuusiovakio, mallinnuksessa on käytetty arvoa  $5,7 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$
- $X_g$ : Kaasun tilavuusosuus
- $d_b$ : Kuplan halkaisija, m
- $A$ : Prosessissa esiintyy epähomogeenisuutta ja erinäisiä tekijöitä, jotka antava aiheita olettaa, että yhtälö 5 antaa liian suuria arvoja aineensiirtokertoimelle. Vakio  $A$ :lla pienennetään laskettua  $k_L a$ -arvoa, mallinnuksessa on käytetty arvoa 4,0.

Lisäksi pesuhäviön vaikutusta ei myöskään ole aikaisemmissa mallinuksissa huomioitu. Pesuhäviö eli massan mukana tulevat liuenneet, lähinnä ligniinipohjaiset aineet kuluttavat happia ja alkalia. Näiden määrä lasketaan suhteessa mitattuun liuenneeseen COD:hen ja näiden oletetaan reagoivan hapen kanssa samalla tavalla kuin kuiduissa oleva ligniini. Pesuhäviö tuo reaktoriin mukanaan myös alkalia. Jäännösalkalin määrä on mahdollista arvioida titraamalla tai tekemällä delignifiointi ilman alkalilisäystä ja mallintamalla havaittuun delignifiointiin tarvittavan jäännösalkalin määrä.

Kappalukua määritettäessä tuloksessa näkyvät myös hexeeniuronihapot (HexA), jotka eivät reagoi happidelignifioinnissa. Varsinkin lehtipuussa HexA:n määrä on merkittävä.



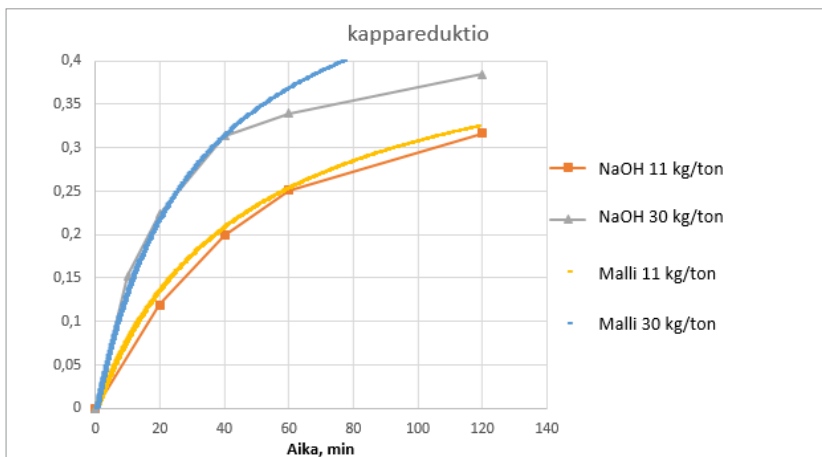
Tämän vuoksi massasta määritettiin HexA-pitoisuus ja laskennassa käytettiin HexA-vapaata kappalukua. Kappareduktiossa HexA on puolestaan mukana, jolloin tulokset vastaavat tehtaalla tehtyä kappareduktiomäärittystä. HexA määritettiin University of Mainen toimesta standardin TAPPI T 282 om-13 mukaisesti.

Usein tehtaissa käytetään natriumhydroksidin sijaan tai lisäksi alkalilähteenä hapetettua valkolipeää, joka ei kuitenkaan koskaan ole täysin hapettunutta. Valkolipeän käyttöä mallinnettaessa lähtökohtaisesti oletetaan, että valkolipeä on 75-prosenttisesti hapettunut ja se hapettuu reaktorissa täydellisesti.

## MALLIN PARAMETRIEN MÄÄRITYS

Kirjallisuudesta saatavien arvojen lisäksi laskentamallia parametroidaan tapauskohtaisesti laboratoriossa tehtävillä kokeilla sekä tehtaalta saatavan datan perusteella. Laboratoriossa parametrintokokeita tehdään Mark-reaktorissa, jossa prosessiolosuhteita voidaan säätää hallitusti ja esimerkiksi kaasun kuplakokoa voidaan säätää sekoituksella ja kemikaaleilla sekä todentaa tämä kuvantavalla kuplakokomittauksella. Pääsääntöisesti kokeita tehdään siten, että kuplakoko saatetaan mahdollisimman pieneksi, jolloin voidaan olettaa, että neste on koko kokeen ajan saturoituneena liuenneen hapen osalta.

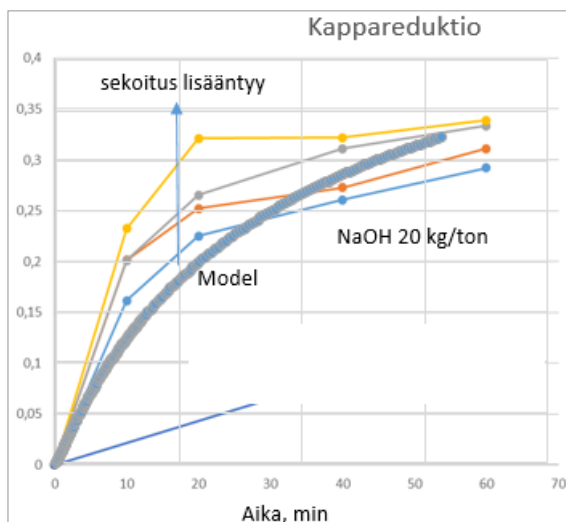
Kuvassa 5 on esitetty kappareduktion kehittyminen Mark-laboratorioreaktorissa sekä mallin antamat ennusteet.



**KUVA 5.** Kappareduktion kehittyminen Mark-laboratorioreaktorissa sekä mallin antamat ennusteet eri NaOH-annoksilla. Lehtipuumassa, sakeus 10 %, kappa 17,5, josta HexA:n osuus 6,5, lämpötila 90 °C, paine 9 bar. Pesuhäviön liuennut COD 100 kg/ton, ja tämän perusteella hapettumattomien ligniiniyhdisteiden määräksi on asetettu 6 kg/ton ja jäännösalkalin määräksi 2 kg/ton.

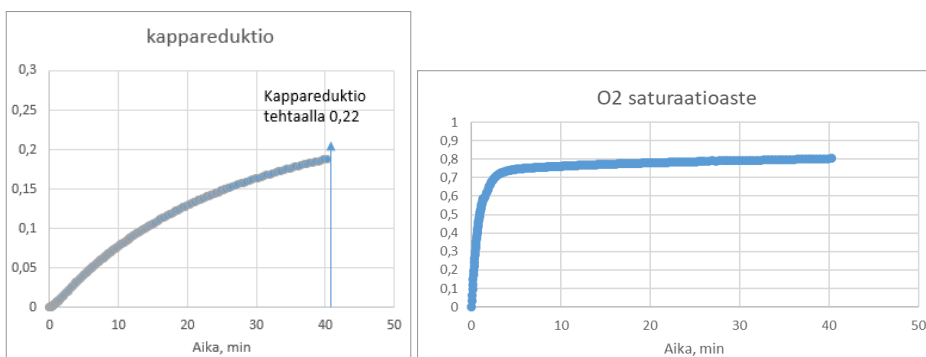
Kuvan 5 mallinuksessa käytetty yhtälö (1) on sovitettu havupuumassalle, jolla delignifointireaktioiden tiedetään olevan hitaammat kuin lehtipuulla (Yuin, Ji. et al. 2009). Lisäksi kyseinen yhtälö on sovitettu tilanteeseen, jossa kappaluvusta ei ole vähennetty HexA:n osuutta. Mark-delignifointikokeiden tulosten perusteella mallinuksessa yhtälö 1 kerrottiin kahdeksalla, jolloin mallinnus ja koetulokset saatiin parhaiten vastaamaan toisiaan.

Malli ja koetulokset saadaan vastaamaan hyvin toisiaan, pois lukien malli korkeammalla NaOH-annoksella ja pitemmällä ajalla, mikä antaa selvästi liian optimistisen arvion delignifointitulokselle (kuva 5). Toisessa testissä 20 kg:n/ton NaOH-annoksella kyseinen malli puolestaan vastaa lopussa hyvin koetuloksia, mutta reaktion alussa antaa puolestaan liian pienen kappareduktion (kuva 6).



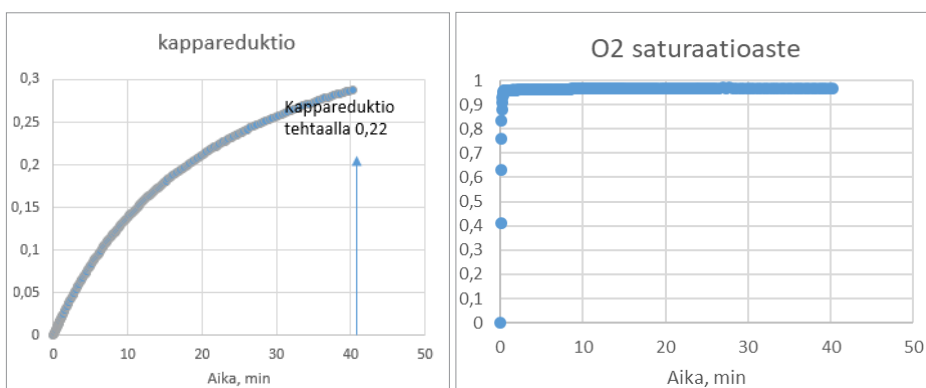
**KUVA 6.** Mark-delignifointikokeet 20 kg:N/ton NaOH-annoksella sekä mallinnettu kappareduktio. Muuten olosuhteet samat kuin kuvassa 5.

Sovellettaessa kyseistä mallia tehdasprosessiin saadaan todellisuutta hieman alhaisempi, mutta melko hyvä arvio kappareduktiolle (kuva 7). Lisäksi mallinnus indikoi, että kyseisessä tapauksessa liuenneen hapen konsentraatio reaktorissa on noin 80 prosenttia saturaatio-konsentraatiosta.



**KUVA 7.** Prosessiolosuhteiden perusteella mallinnettu kappareduktio ja hapen saturaatioaste reaktorissa. Massa muuten sama kuin kuvassa 5 paitsi sakeus 11 %. Paine reaktorin syötössä 6,5 bar, lämpötila 90 °C, NaOH-annos 9,5 kg/ton, happiannos 8 kg/ton, keskimääräinen kuplakoko 0,4 mm ja reaktorin korkeus 34 m.

Malliin ja sen parametreihin liittyvästä epävarmuudesta huolimatta se kokoaa kuitenkin parhaan tietämyksen prosessista, ja sillä voidaan muun muassa helposti laskea skenaarioita eri toimenpiteiden vaikutuksista prosessissa. Esimerkiksi kyseisessä tapauksessa reaktorin toimintaa olisi mahdollista tehostaa noin 40 prosenttia nostamalla NaOH-annos tasolle 20 kg/tonni (kuva 8). Tällöin hapen annostelu tulisi olla tasolla 11 kg/ton, ja kuplakoko pitäisi saada pienennettyä tasolle 0,15 mm, jotta liuenneen hapen määrä olisi lähellä saturaatiota ja hapen aineensiirto ei rajoittaisi delignifointireaktioita.



**KUVA 8.** Mallinnettu kappareduktio sekä hapen saturaatioaste tehtaalla. NaOH-annos 20 kg/ton, happiannos 11 kg/ton ja hapen kuplakoko 0,15 mm. Muuten olosuhteet samat kuin kuvassa 5.

Käytännössä kyseiset muutokset lisäävät suodosten kierrätyksen myötä myös liuennneiden aineiden ja jäännösalkalin määrää reaktorin syötössä, jolloin tarvittava happiannos sekä kuplakoon pienentämisen tarve on myös todennäköisesti hieman mallinnettua suurempi.

## JATKOSUUNNITELMAT

Happidispersion sekä sen merkityksen ymmärtämisen tuoma kehitys happidelignifoinnin mallinnuksessa avaa aivan uusia mahdollisuuksia happidelignifointiprosessien toiminnan ymmärtämisessä, kehittämisessä sekä käytännön optimoinnissa ja ohjauksessa. Mallinnukseen ja siinä käytettävien parametrien arvoihin liittyy vielä merkittäviä epävarmuuksia: ovatko delignifoinnin perusyhtälöt lähelläkään oikeaa, ovatko niissä edes mukana kaikki oleelliset parametrit, muuttuvatko parametrit ja kuinka paljon esimerkiksi eri puulajeilla tai vuodenaikoina. Erityisesti hapen aineensiiirtoa kuvaava yhtälö kaipaa tarkempaa kokeellista verifiointia. Kokeellisen datan tuottaminen mallinnukseen vaatii vielä paljon menetelmäkehitystä, jota on juuri meneillään, sekä huomattavan määrän laboratoriodelignifointeja ja erilaisia parametroinnissa tarvittavia kokeita.

Nykyiselläänkin malli toimii jo hyödyllisenä työkaluna happidelignifoinnin perusteiden selvittämisessä sekä tehdastutkimuksissa. Yhtenä tavoitteena jatkossa on kehittää ja selkeyttää koemetodiikkaa niin, että suhteellisen pienellä työllä eri tehdasprosessit voitaisiin parametroida ja mallintaa tehtaalta saatavan perusdatan sekä syöttömassan analysoinnin ja delignifointikokeiden perusteella.

Tässä kuvattua mallinnusta sekä yleensäkin kaasudispersioihin liittyvää osaamista on mahdollista hyödyntää myös laajemmin biotuotetehtaissa (happi- ja otsonivalkaisu, valkolipeän hapetus) sekä muissa prosesseissa, joissa kaasudispersio, sen käyttäytyminen ja vaikutukset ovat olennaisia prosessin toiminnan kannalta.

## LÄHTEET

- Ji, Y., Vanska, E. & van Heiningen, A. New kinetics and mechanisms of oxygen delignification observed in a continuous stirred tank reactor. *Holzforschung*, 63(2009):12, s. 264–271.
- Käyhkö, J., Peltonen, K., Mutikainen, H., Kopra, R., Eloranta, H., Pesonen, A. & van Heiningen, A. 2021a. The Role of Gas Dispersion in the Oxygen Delignification Process, *TAPPI Journal* 20(2021):5.
- Käyhkö, J., Mutikainen, H., Peltonen, K., Kopra, R. & Honkanen, M. 2021b. Gas Dispersion in the Oxygen Delignification Process, *TAPPI Journal* 20(2021):5.
- Käyhkö, J., Peltonen, K., Mutikainen, H., Kopra, R., Eloranta, H., Pesonen, A. & van Heiningen, A. 2019a. The Role of Gas Dispersion in the Oxygen Delignification Process. *Proc. of the TAPPI PEERS Conference*, 30.10-2.11. 2019, Saint Louise, MO, USA.
- Käyhkö, J., Mutikainen, H., Peltonen, K., Kopra, R., Eloranta, H., Honkanen, M. & Pesonen A. 2019b. The State and Effect of Gas Dispersion in the Oxygen Delignification Process. *Paper Week 2019*, March 24-26, 2019, Montreal, Canada.
- Käyhkö, J., Mutikainen, H., Peltonen, K., Kopra, R., Hakala, M. & Honkanen, M. 2018a. The State and role of gas dispersion in the oxygen delignification process, *Proc. of the the 51<sup>o</sup> Congresso Internacional ABTCP-CIADICYP 2018*, October 23-25, 2018, Sao Paulo, Brazil.
- Käyhkö, J., Mutikainen, H., Peltonen, K., Kopra, R., Hakala, M. & Honkanen, M. 2018b. Gas dispersion in the oxygen delignification process, *Proc. of the TAPPI PEERS Conference*, October 28-31, 2018, Portland, OR, USA.
- Mutikainen, H., Kopra, R., Pesonen, A., Hakala, M., Honkanen, M., Peltonen, K. & Käyhkö, J. 2017. Measurement, State and Effect of Gas Dispersion on Oxygen Delignification, *Proceedings of the International Pulp Bleaching Conference 2017*, Porto Seguro, BA, Brazil, s. 57–61.
- Mutikainen, H., Strokina, N., Eerola, T., Lensu, L., Kälviäinen, H. & Käyhkö, J. 2015. Online Measurement of the Bubble Size Distribution in Medium-Consistency Oxygen Delignification, *Appita Journal*, 68(2015):2, s. 159–164.
- Mutikainen, H., Peltonen, K., Tirri, T. & Käyhkö, J. 2014a. Characterisation of Oxygen Dispersion in Medium-Consistency Pulp Mixing, *Appita Journal*, 67(2014) 1, s. 37–42.

Mutikainen, H., Peltonen, K., Pikka, O. & Käyhkö, J. 2014b. Characterization of Oxygen Dispersion in Delignification Process, Proceedings of the International Pulp Bleaching Conference 2014, Grenoble, France, s. 51–56.

Van Heiningen, A., Krothapalli, D., Genco, J. & Justason, A. A chemical reactor analysis of industrial oxygen delignification. *Pulp and Paper Canada*, 104(2003):12: s. 96–101.

# HAPPIDELIGNIFIOINNIN LABORATORIOTUTKIMUKSIIN LIITTYVÄN ANALYYSI- JA KOEMETODIIKAN KEHITYS JA KÄYTTÖÖNOTTO KUITULABORATORIOLLA

Jari Käyhkö & Antti Pappinen

Kuitulaboratoriolla on tehty lähiaikoina kansainvälisesti katsoen uraauurtavaa happidelignifioinnin perusteisiin menevää tutkimusta. Johtolankana on ollut kappareduktion muodostumiseen vaikuttavien tekijöiden selvitys, joka johtaisi kyseisen prosessivaiheen perusteiden ymmärtämisen lisäksi myös merkittäviin käytännön sovelluksiin, jopa prosessien on-line-säätöön asti. Tutkimuksen perustana on aiempi tietämys prosessin mallinnuksesta (van Heiningen ym. 2003, Ji ym. 2009), kyseisessä mallinnuksessa käytettävien parametrien yleinen sekä tapauskohtainen tarkentaminen sekä tärkeimpänä happidispersion kuplakoon määrittämisen hapen aineensiirron (Käyhkö ym. 2021a) sekä liuenneiden aineiden ts. pesuhäviön tuominen mukaan mallinukseen. Kahta viimeistä ei ole aiemmin huomioitu mallinnuksissa, ja näiden mukaanotto mahdollistaa mallinuksen hyödyntämisen tehdas-sovelluksissa. Tutkimukset vaativat uudenlaista koe- ja analyysitekniikkaa, ja kyseiseen tekniikkaan liittyvä kehitystyö on tämän artikkelin pääaiheena.

Artikkelin pohjana olevat tutkimukset on toteutettu pääosin KuHa – Kuitulinjan kaasujen hallinta -hankkeessa, jossa rahoittajina ovat Etelä-Savon maakuntaliitto Euroopan aluekehitysrahastosta (EAKR), Andritz Oy, Vaisala Oy ja Solenis Oy.

## MARK-REAKTORIN MODIFIOINTI

Mark-reaktoria on jo aiemmin modifioitu muun muassa tekemällä reaktoriin läpinäkyvä kansi, kehittämällä sekoituselementtejä sekä tekemällä yhteet kuplakuvauksen sekä mahdollisten muiden mittauksen asennusta varten (Pappinen & Käyhkö 2019, 2020). Näiden lisäysten myötä on voitu todentaa kaasun sekoittuminen sekä kuplakoko reaktorissa sekä arvioida näiden vaikutusta hapen aineensiirtoon (Pappinen & Käyhkö 2020). Mallinnustutkimusten osalta olennaista on, että delignifiointikokeiden voidaan suhteellisen turvallisesti olettaa tapahtuvan tilanteessa, jossa suodos on hapen konsentraation osalta kylläisessä tilassa.



Mark-reaktorissa sekä yleensä myös muun tyyppisissä MC-reaktoreissa massanäyte saadaan vain kokeen lopussa. Kuitulaboratorion Mark-reaktoriin on jo aiemmin rakennettu mahdollisuus ottaa näytteitä myös kokeen aikana. Mallinnuksen kannalta tämä on erittäin hyödyllistä, koska samasta kokeesta saadaan reaktion edetessä useampi näyte. Erillisinä kokeina tehtäessä materiaali- ja työmäärä moninkertaistuu sekä koehajonta kasvaa.

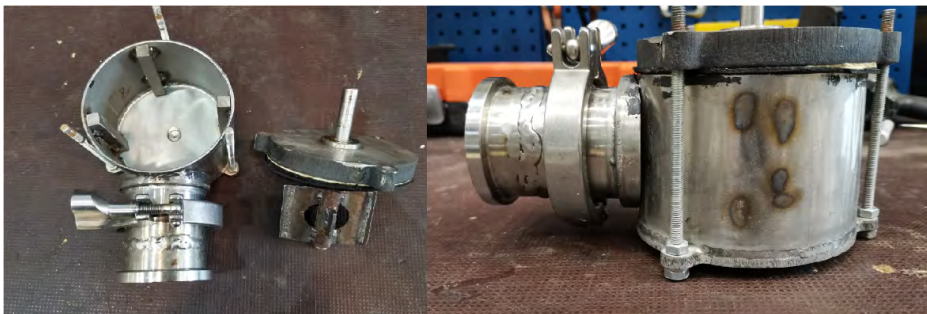
Markissa on ollut aiemmin lämpötilamittausmahdollisuus ainoastaan reaktorin kannessa, jolloin lämpötilan mittaus luotettavasti reaktioiden aikana ei ole mahdollista. Erityisen tärkeää tämä on delignifioitaessa havumassoja, koska näillä hapetusreaktioiden tuottama lämpötilan nousu on noin kolminkertainen verrattuna lehtipuumassoihin. Tämän johdosta reaktoriin rakennettiin lämpötilamittausmahdollisuus reaktorin keskiosaan valmiina olleeseen kuplakuvausyhteeseen, joka nähdään kuvassa 1. Tämän lisäksi myös kannessa olevaa lämpötilamittausa hyödynnetään kokeissa happikaasun lämpötilan määrittämiseen. Näiden kahden mittauksen avulla pystytään laskennallisesti määrittämään reaktion alussa tapahtuvan kaasun lämpenemisen vaikutus reaktorin paineeseen.



**KUVA 1.** Mark-reaktoriin asennettu lämpötila-anturi reaktorin kyljessä ja toinen lämpötila-anturi kannessa (kuva Antti Pappinen).

## MINI MARK

Kuplakuvauksien tarpeisiin rakennettiin myös pienempi kannettava, noin 0,5 litran tilavuudella varustettu sekoitin, jota voidaan ajaa esimerkiksi akkukäyttöisellä porakoneella. Kuplakuvausjärjestelmä voidaan liittää sekoittimeen samalla tavalla kuin Quantum Mark IV -laboratoriosekoittimeen Sandvikin L-tyyppin laippaan. Tämän ansiosta sekoitin voidaan ottaa mukaan tehtaalle ja suorittaa mittauksia siellä. Sekoittimella voidaan myös tehdä laboratoriokokeita kuplanmuodostuksesta pienemmillä massamäärillä.



**KUVA 2.** Pieni sekoitin kaasudispersiokokeisiin. Sekoitinta voidaan ajaa akkukäyttöisellä porakoneella, ja se on mahdollista ottaa mukaan tehtaalle. (kuva Antti Pappinen)

## MARK-REAKTORIN HYÖDYNTÄMINEN HAPPI-DELIGNIFIOININ MALLINNUKSEN VERIFIOINNISSA

### DELIGNIFIOINTIKOKEET

Mark-reaktorilla voidaan hallitusti kontrolloida delignifiointiolosuhteita ja siten määrittää eri tekijöiden vaikutusta kappareduktioon. Tärkeimmät tekijät ovat OH-ioni ja happikonsentraatio, koska näillä voidaan aktiivisesti säätää prosessia. OH-ionikonsentraatio säädetään alkalilisäyksellä ja happikonsentraatio paineella sekä tuottamalla niin hyvä kaasudispersio, että nesteeseen voidaan olettaa olevan kylläinen hapen konsentraation osalta. Happidispersio kuplakokoa säädetään sekoituksella sekä käyttämällä tarvittaessa pinta-aktiivista ainetta kuplakoon pienentämiseksi tai vaahdonestoainetta kuplakoon kasvattamiseksi. Lisäksi kappaarvo on olennainen suure, koska delignifiointinopeus riippuu olennaisesti tästä. Myös lämpötila on olennainen, mutta yleensä tämä on prosessikohtaisesti suhteellisen vakio eikä sitä käytetä yleisesti säätösuurena.

### HAPEN JA ALKALIN KULUTUKSEN MÄÄRITYS

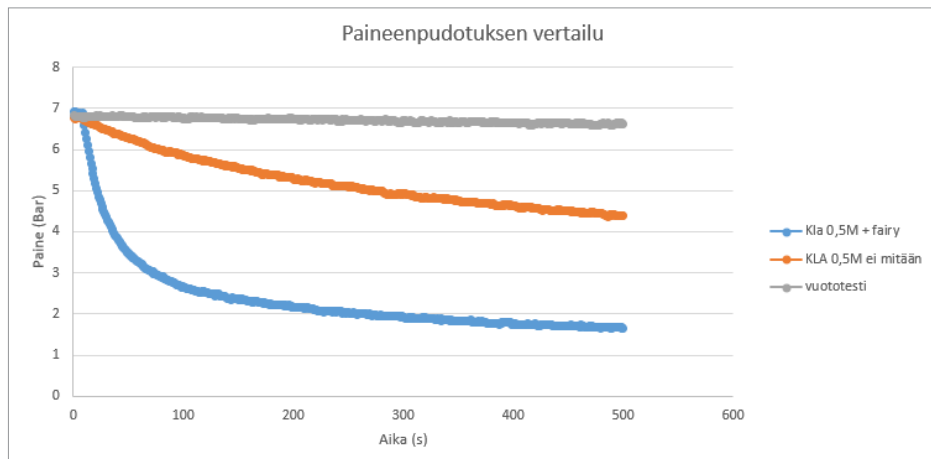
Mallinnuksen kannalta on myös olennaista tietää, kuinka paljon happea ja alkalia kuluu prosessissa. Näihin löytyy kirjallisuudesta valmiita arvioita, mutta nämä voidaan myös

tapauskohtaisesti määrittää. Hapen kulutus voidaan määrittää toteamalla, kuinka paine alenee reaktion edetessä. Alkalin kulutus voidaan mahdollisesti määrittää titraamalla reaktion kuluessa reaktorista otetut näytteet, mutta tätä ei ole vielä sovellettu tutkimuksissa.

## HAPEN AINEENSIIRTO-KUPLAKOKO-YHTEYDEN VERIFIOINTI

Mallinnustutkimusten perustan luo hapen aineensiirron tuominen mukaan mallinukseen. Tämän perustana on tehdasreaktoreissa sekä laboratoriossa tehdyt havainnot happidisperiosta ja sen käyttäytymisestä sekä havaintojen perustalle rakennettu hapen aineensiirron (Kla) ja kuplakoon yhteyttä kuvaava yhtälö. Lisäksi yhtälön toimivuutta on voitu jossain määrin verifioida tehdashavainnoilla ja laboratoriokokeilla (Käyhkö ym. 2021a, 2021b).

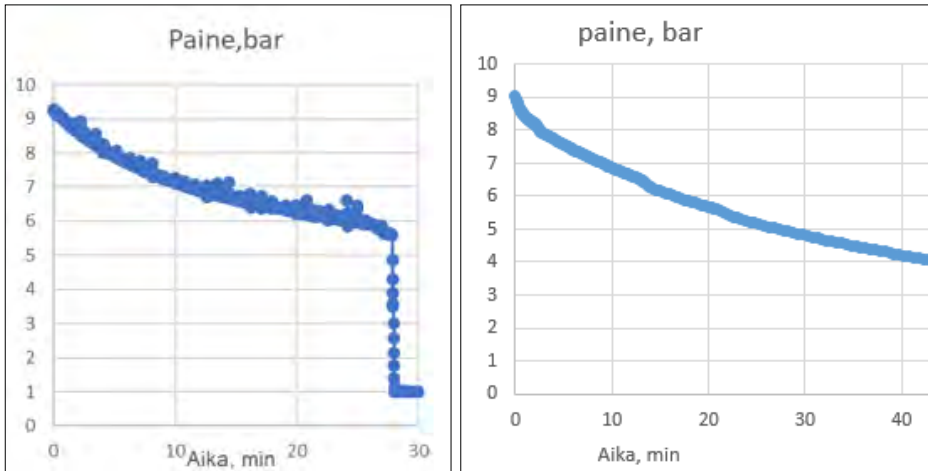
Tämän lisäksi aineensiirtoyhtälöä on pyritty verifioimaan (Pappinen & Käyhkö 2020) ns. sulfittimenetelmällä, jota on myös aiemmin sovellettu happidelignifoinnin aineensiirtokertoimen (Kla) määrittämiseen (Krothapalli 2004). Sulfittimenetelmällä saatujen alustavien tulosten perusteella pystytään todentamaan kuplakoon vaikutusta hapen aineensiirtoon. Menetelmä perustuu sulfiitin hapettumiseen sulfaatiksi, jolloin happi sitoutuu sulfittiin ja kaasumaisen hapen määrä reaktorissa vähenee. Tämä johtaa paineenpudotukseen reaktorissa. Kuvassa kolme nähdään esimerkkinä, kuinka paineen pudotus eli hapen aineensiirto nopeutuu, kun massaan on lisätty kuplien muodostusta parantavaa ainetta.



**KUVA 3.** Kuplan muodostusta parantavan aineen vaikutus reaktorin paineeseen eli hapen aineensiirtonopeuteen. Reaktorin vuototesti referenssinä. Sulfiittimäärä suspensiossa 0,5 mol. (kuva Antti Pappinen)

Paineenpudotuskäyrästä voidaan suoraan laskea aineensiirtokertoimen arvo. Sulfiittimenetelmään liittyy kuitenkin kaksi perustavaa laatua olevaa ongelmaa. Menetelmässä oletuksena on, että hapen konsentraatio bulkkifaasissa on nolla, eli oletettava matka, jonka

hapen täytyy diffundoitua, on pienempi kuin happidelignifoinnissa. Lisäksi ei tiedetä, kuinka katalyyttikemia tulisi säätää happidelignifointia vastaavalle tasolle. Näiden johdosta menetelmällä saatuja  $K_{La}$ -arvoja ei voida välttämättä soveltaa suoraan happidelignifointiin. Seuraavana tavoitteena on määrittää  $K_{La}$ -arvo varioimalla kuplakokoa Mark-reaktorissa ja detektoimalla delignifoinnin aikana tapahtuva paineenpudotus (kuva 4).



**KUVA 4.** Paineen pudotus delignifoinnissa. Kuplakoko oli reaktorissa noin 0,05 mm, jolloin hapen aineensiirto on oletettavasti niin nopeaa, että neste on käytännöllisesti katsoen saturoituneena hapesta. Vasemmalla mitattu ja oikealla mallinnettu paineen pudotus. (kuva Antti Pappinen)

Alustavien tulosten perusteella menetelmä näyttäisi toimivan. Suurimmaksi hankaluudeksi kuplakoon suurentamisessa on osoittautunut kuplien jakauman hallinta. Kuplakoon suurentuessa muun muassa osa kaasuista pyrkii syrjäytymään reaktorin keskelle sekoittimen ympärille (Pappinen & Käyhkö 2019), ja tällöin aineensiirron määrittäminen ei onnistu. Lisäksi menetelmässä täytyy huomioida tai minimoida erinäisiä virhetekijöitä, kuten hapen lämpeneminen sekoituksen alkaessa, vesihöyryn ja typen osuus sekä mahdollisesti delignifointireaktioissa muodostuvien kaasujen, lähinnä hiilimonoksidin osuus. Kyseisellä menetelmällä on mahdollista määrittää myös hapen kulutus kappayksikköä kohden sekä varmentaa muita mallinnuksessa käytettäviä parametrejä, esimerkiksi se, onko liuenteilla aineilla merkittävää vaikutusta hapen liukoisuuteen.

## ANALYYSIT

### HEXA-ANALYYSI

Happivaiheeseen menevässä lehtipuumassassa noin kolmasosa kappamäärityksen indikoimasta ligniinistä on HexA:ta (hexeeniuronihappo). HexA ei reagoi happivaiheessa, joten kappareduktiomallinnuksessa HexA:n osuus täytyy vähentää kappa-arvosta. Siten mallinnuksen kannalta on ensiarvoisen tärkeää tietää, kuinka paljon massassa on HexA:ta.

HexA:n määritykseen massasta kokeiltiin kahta eri menetelmää. Ensimmäinen oli vanhempi, yleisesti käytetty menetelmä, jossa näytettä keitetään miedosti happamissa olosuhteissa 120 °C:ssa 60 minuuttia. Kokeissa käytetty pH säädettiin arvoon 4,5 (Colodette ym. 2011). HexA:n määrä näytteestä analysoitiin tekemällä kappa-analyysit massalle ennen ja jälkeen käsittelyn ja tulos saatiin kappatulosten erotuksesta.

Toinen käytetty menetelmä HexA:n määrityksessä oli Tappi T 282 pm-07. Menetelmässä käytetään keittoliuosta, joka sisältää näytteen kuivapainosta mitattuna 0,7 % elohopeakloridia ja 0,6 % natriumasetatitrihydridiä. Sellunäytettä punnitaan noin 0,5 g ja tarkka arvo otetaan ylös. Tämän jälkeen näyte asetetaan keittoliuokseen ja sen annetaan reagoida 30 minuuttia 60–70 °C:ssa. Reaktioajan päätyttyä liuosta otetaan talteen ruiskulla ja se suodatetaan ruiskusuodattimen (0,2 µm) lävitse. Liuos mitataan UV-spektrometrillä aallonpituuksilla 260 nm ja 290 nm, jolloin mahdollisesti liuenneen ligniinin vaikutukset 260 nm:n aallonpituudella saadaan minimoitua. Liuosta asetetaan UV-spektrometriin 10 ml. Tulokseksi saadaan HexA:n määrä liuoksessa µmol/g aallonpituuksien absorption voimakkuudesta kaavalla 1.

$$x = 0,287 * \frac{(A_{260} - 1,2 * A_{290}) * V}{w} \quad (1)$$

Jossa:

- x: HexA:n määrä (µmol/g)
- A<sub>260</sub>: 260 nm aallonpituuden absorption voimakkuus
- A<sub>290</sub>: 290 nm aallonpituuden absorption voimakkuus
- V: Liuoksen tilavuus (ml)
- w: Tarkka näytemäärä (g)

Omien HexA-analyysien lisäksi näytteitä on lähetetty Mainen yliopistoon analysoitavaksi yhteistyössä Adriaan van Heiningenin kanssa. Näillä määrityksillä pystytään toteuttamaan vertailua kahden eri laboratorion saamista tuloksilla ja todentamaan niiden oikeellisuus.

## JÄÄNNÖSALKALIMITTAUS

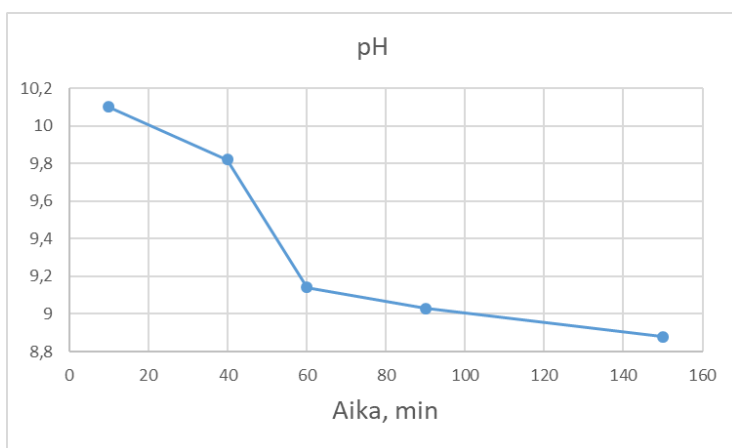
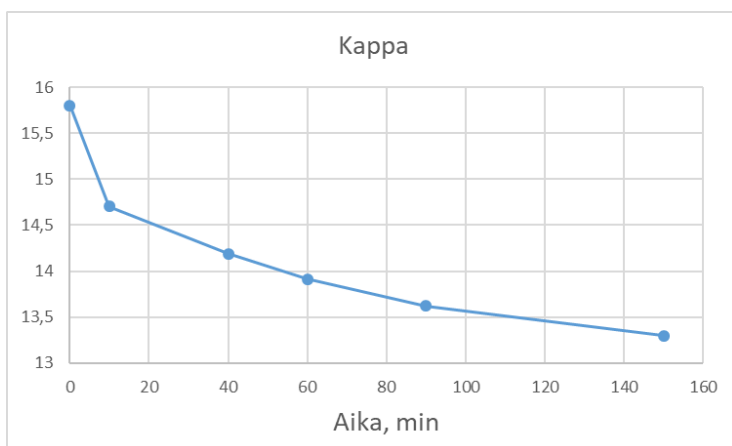
Happivaiheeseen massan mukana tulevan mustalipeän sekä happivaiheen jälkeiseltä pesurilta palautuvan hapettuneen mustalipeän mukana reaktoriin tulee myös merkittäviä määriä alkalia, joka vaikuttaa happivaiheen toimintaan, ja siten sen määrä pitäisi pystyä määrittämään. Mustalipeän jäännösalkalin mittaukseen on olemassa standardimenetelmä (SCAN-N 33:94) sekä erilaisia tehtaalla sovellettuja menetelmiä.

SCAN-menetelmässä näytettä titrataan hapolla pH-arvoon 11 asti. Tämän mukaan mustalipeä ei sisällä jäännösalkalia, jos sen pH on tätä alempi. Eräessä tehdasmäärityksessä titrausrajana pidettiin pH-arvoa 10,5. Yleensä happivaiheeseen tulevan massan pH-arvo on alle 10,5, jolloin sen ei pitäisi sisältää jäännösalkalia. Lisäksi happivaiheen lopussa pH-arvo voi pudota selkeästi alle 10,5:n, eli myös tätä alhaisemmassa pH:ssa tapahtuu alkalia kuluttavia delignifointireaktioita. Käytännössä tämä voisi tarkoittaa sitä, että happivaiheeseen tulevan massan jäännösalkalin määrittämiseksi titraus tulee tehdä alhaisempaan pH-arvoon.

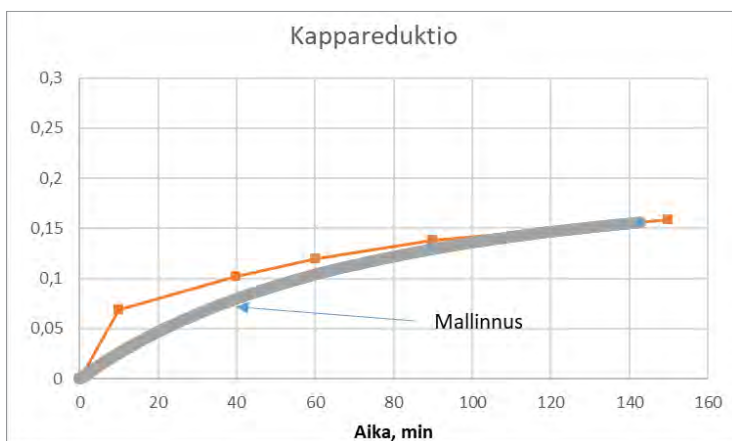
Asiaa testattiin myös Mark-reaktorilla delignifioimalla happivaiheen syöttömassaa ilman alkalilisäystä (kuva 5). Massan pH on alussa vain noin 10, mutta silti pitkän ajan kuluessa saavutetaan noin 20 prosentin delignifointiaste ja mallinuksella saadaan jäännösalkaliestimaatiksi 6 kg/o.d.t. Delignifoinnin lopussa pH on alle 9 ja vielä laskusuunnassa, kun mallinuksen jäännösalkalista on kulumatta vielä 0,9 kg/ton. Tämä indikoi, että happivaiheen toimintaa ja jäännösalkalin määrää tutkittaessa titrauksen sopiva pH-arvo delignifoinnin lopussa voisi olla esimerkiksi luokkaa 8.

Mark-reaktorilla tehtiin myös vastaava koe niin, että happea ei ollut läsnä. Tällä oli tavoitteena selvittää, voiko osa kappareduktiosta tulla pelkästään ligniinin liukenemisesta ja diffundoitumisesta kuiduista alkalisuuden ja korkean lämpötilan vaikutuksesta. Kappa-arvo laski tunnin kestävässä uutossa noin 0,5 yksikköä pH-arvon pysyessä vakiona, eli lievää uuttumista näyttäisi tapahtuneen.

Vastaavaa uuttumista saattaa tapahtua myös happidelignifoinnissa, mikä osaltaan voisi selittää, miksi kappareduktiomallinnus (kuva 6) näyttäisi tuottavan liian pieniä reduktioita delignifointivaiheen alussa (Käyhkö ym. 2021c).



**KUVA 5.** Kappaluku ja pH ajan funktiona delignifioinnissa. Delignifiointiolosuhteet: koivumassa, sakeus 10 %, lämpötila 90 °C, paine 9 bar, kaasuosuus 10 %. (kuva Antti Pappinen)



**KUVA 6.** Kuvan 3 kappatuloksista laskettu kappareduktio sekä mallinnettu kappareduktio (kuva Antti Pappinen).



## HAPETETUN VALKOLIPEÄN HAPETUSASTEEN MÄÄRITYS

Nykyisin tehtaalla käytetään hyvin yleisesti happidelignifoinnissa alkalilähteenä hapettua valkoliipeä. Valkoliipeä ei ole hapettunut täysin, ja se sisältää tiosulfaattia, joka hapettuessaan sulfaatiksi kuluttaa reaktorissa happea (Mullen 2016). Normaalisti happivalkaisussa käytettävä valkoliipeä on noin 75-prosenttisesti hapettunutta (Lintunen 2021). Eri tutkimusten perusteella voidaan aika hyvin olettaa, että valkoliipeän mukana tuleva tiosulfaatti hapettuu reaktorissa lähes täydellisesti viimeistään siinä vaiheessa, kun happivaiheen jälkeiseltä pesurilta tuleva suodos palautuu takaisin happivaiheeseen (Tigerström ym. 2005, Tomoda ym. 2021, Salmela ym. 2004). Näistä voidaan laskea, että käytettäessä hapettua valkoliipeä alkalilähteenä happea kuluu noin 0,13 kg/kg valkoliipeää. Normaali valkoliipeäannos on luokkaa 20 kg/o.d.t, jolloin tämän kuluttama happimäärä (2,6 kg/o.d.t.) on käytännön kannalta merkittävä. Hapetetun valkoliipeän hapetusasteen määrittämiseen ei ole olemassa standardimenetelmää, mutta tämä on mahdollista tarvittaessa määrittää Mark-reaktorilla hapettamalla valkoliipeää korkeassa lämpötilassa (120 °C) ja määrittämällä paineen pudotuksen perusteella hapetukseen kuluneen hapen määrä. Toinen mahdollisuus on määrittää valkoliipeästä sulfidi-, tiosulfaatti- ja sulfaattipitoisuudet ja näiden perusteella laskea valkoliipeän hapetusaste.

## YHTEENVETO JA JATKOSUUNNITELMAT

Tehty koemetodiikan ja analytiikan kehitystyö antaa näillä näkymin hyvinkin riittävän pohjan happidelignifointimallinnuksien verifioimiseksi. Onnistuessaan mallinnustyö antaa aivan uuden pohjan kehittää happidelignifointiprosesseja käytännössä. Jatkossa koemetodiikkaa on vielä tavoitteena kehittää ja standardoida siten, että yhdessä mallinnusosaamisen kanssa suhteellisen pienellä työmäärällä voidaan olemassa oleva happidelignifointiprosessi mallintaa tekemällä parametroiintiin tarvittavat laboratoriokokeet kyseisen prosessin syöttömassalla ja siten esimerkiksi tehdä Kuitulaboratoriolla tuotteistettuja tutkimuksia ostopalveluna.

## LÄHTEET

Colodette, J. L., Regazzi, A. J. & Gomide, J. L. 2011. Evaluating the Application of an Analytical Method for the Determination of Hexenuronic Acids in Eucalyptus Pulps, 5th International Colloquium of Eucalyptus pulp, Brazil.

Ji, Y., Vanska, E. & van Heiningen, A. 2009. New kinetics and mechanisms of oxygen delignification observed in a continuous stirred tank reactor. *Holzforschung*, 63(2009):12, s. 264–271.

Krothapalli, Deep. 2004. "Gas-liquid Mass Transfer in Oxygen Delignification Systems". Electronic Theses and Dissertations. 888. Saatavissa: <http://digitalcommons.library.umaine.edu/etd/888>

Käyhkö, J., Peltonen, K., Mutikainen, H., Kopra, R., Eloranta, H., Pesonen, A. & van Heiningen, A. 2021a. The Role of Gas Dispersion in the Oxygen Delignification Process, *TAPPI Journal* 20(2021):5.

Käyhkö, J., Mutikainen, H., Peltonen, K., Kopra, R. & Honkanen, M. 2021b. Gas Dispersion in the Oxygen Delignification Process, *TAPPI Journal* 20(2021):5.

Käyhkö, J., Pappinen, A. & Peltonen K. Kappareduktion mallinnus happidelignifoinnissa. Hyväksytty julkaistavaksi; 2021c. Metsä, ympäristö ja energia - soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä.

Lintunen, T. 2021. Andritz. Suullinen tiedonanto.

Miller, W., Shackford, L., Jiang, H. & Genco, J. 1991. Effect of entrained black liquor carry-over on medium consistency oxygen delignification. *Tappi J.* 74(1991):2, 117–122.

Mullen, T. 2016. Using white liquor as the alkali source in oxygen delignification, *Tappi J* 15(9) 609–618:2016.

Pappinen, A. & Käyhkö, J. 2020. Laboratoriokokeet kuplanmuodostuksesta, aineensiir-  
rosta ja näiden merkityksestä happidelignifoinnissa. 2020 Metsä, ympäristö ja energia  
- soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Xamk kehittää. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-344-295-5>

Pappinen, A. & Käyhkö, J. 2019. Mark reaktorin modifointi kaasumaisten kemikaalien  
dispergoitumisen sekä tehokkuuden määrittämiseen. 2019 Metsä, ympäristö ja energia -  
soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Xamk kehittää 101. ISBN:978-952-344-225-2 (nid.).

Sankari, M., Ala-Kaila, K., Dahl, O. & Perämäki, P. 2004. Real wash loss compounds in oxygen delignification of softwood kraft pulp NPPRJ 19(2): 264–270 (2004).

SCAN-N 33:94 Black liquor – Residual alkali (Hydroxide ion content). Standardi.

Tappi T 282 pm-07, 2007, Hexeneuronic acid content of chemical pulp, TAPPI. Saatavissa: [https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2007/fpl\\_2007\\_zhu005.pdf](https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2007/fpl_2007_zhu005.pdf)

van Heiningen, A., Krothapalli, D., Genco, J. & Justason, A. 2003. A chemical reactor analysis of industrial oxygen delignification. Pulp and Paper Canada 104(12):96–101 (2003).

Vuorenvirta, K., Furman, A. & Gullichsen, J. 2002. Effect of black liquor carry-over on selectivity of oxygen delignification, International Pulp Bleaching Conference. Pulp and Paper Technical Association of Canada, Montreal.

# MITTAUSJÄRJESTELYT KUIVA- AINETASEEN LASKEMISEEN SELLUTEHTAAN KUITULINJALLA

Riku Kopra

Kemiallisen massan valmistuksella on maailmanlaajuisesti ja etenkin Suomen mittakaavassa merkittävää potentiaalia bioenergian tuotannon lisäämiseen, energian käytön vähentämiseen sekä ympäristö- ja materiaalitehokkuuden parantamiseen. Xamkin Kuitulaboratoriossa on jo toiminnan alusta lähtien tehty uraauurtavaa tutkimusta biotuotetehtaan kuitulinjan ja sen osaprosessien kehittämiseksi, erityisesti ruskean massan pesulinjan kuiva-ainetaseen mittaamiseksi.

Sellun pesussa poistetaan massasulpuista nestefaasin epäpuhtaudet ennen seuraavia prosessivaiheita mahdollisimman tehokkaasti käyttäen mahdollisimman vähän vettä. Liiallinen vedenkäyttö muun muassa laskee haihdutettavan laihalipeän kuiva-ainepitoisuutta ja nostaa täten haihdutuskustannuksia. Toisaalta liian vähäisellä pesuvedellä massa ei puhdistu riittävästi seuraaviin osaprosesseihin siirryttäessä ja kuorma jätevedenkäsittelyyn myös kasvaa. Nykyaikainen on-line-mittaustekniikka mahdollistaa kuiva-aineen muutoksien seurannan ja kuiva-ainetaseiden jatkuvatoimisen laskennan niin pesuvaiheissa kuin ainetta liuottavissa osaprosesseissa kuitulinjalla. Kuitulaboratorio on tehnyt pitkäjänteistä yhteistyötä sellutehtaan pesulaitteita valmistavan Andritz Oy:n sekä liuenneen kuiva-aineen mittaamiseen soveltuvia refraktometrejä kehittävän Vaisala Oy:n kanssa. Tässä artikkelissa esitellään, millaisilla mittausjärjestelyillä voidaan seurata sellutehtaan kuitulinjalla tapahtuvan ruskean massan pesun sekä muiden osaprosessien kuiva-aineen muutoksia. Lisäksi kerrotaan, millaisia vaikutuksia neste- ja kuiva-aine virroilla on tehtaan kokonaistalouteen.

Tutkimustyö toteutetaan 1.9.2020 alkaneessa ja 31.8.2022 päättyvässä KUHA –Kuitulinjan kaasujen hallinta -hankkeessa. Hankkeen päärahoittaja on Etelä-Savon maakuntaliitto Euroopan aluekehitysrahastosta. Hankkeen muut kumppanit ovat Andritz Oy, Vaisala Oy ja Solenis Finland Oy.

## JOHDANTO

Sulfaattisellun valmistus on yksinkertaistettuna sarja vesipohjaisia kemiallisia prosesseja. Yhden selluloosatonnin valmistukseen tarvitaan noin 5 m<sup>3</sup> puuta, erilaisia kemikaaleja ja vettä. Puuraaka-aine sekä kemikaalit pyritään hyödyntämään mahdollisimman tarkkaan,

jotta selluloosan valmistus olisi taloudellisesti kannattavaa. Puusta noin 45 prosenttia saadaan talteen selluloosana lopputuotteeseen, loput eli hemiselluloosa, ligniini ja uuteaineet voidaan polttaa ja tuottaa energiaa tai jatkojalostaa esimerkiksi ligniiniksi, alkoholeiksi, sokereiksi ja erilaisiksi polttoaineiksi.

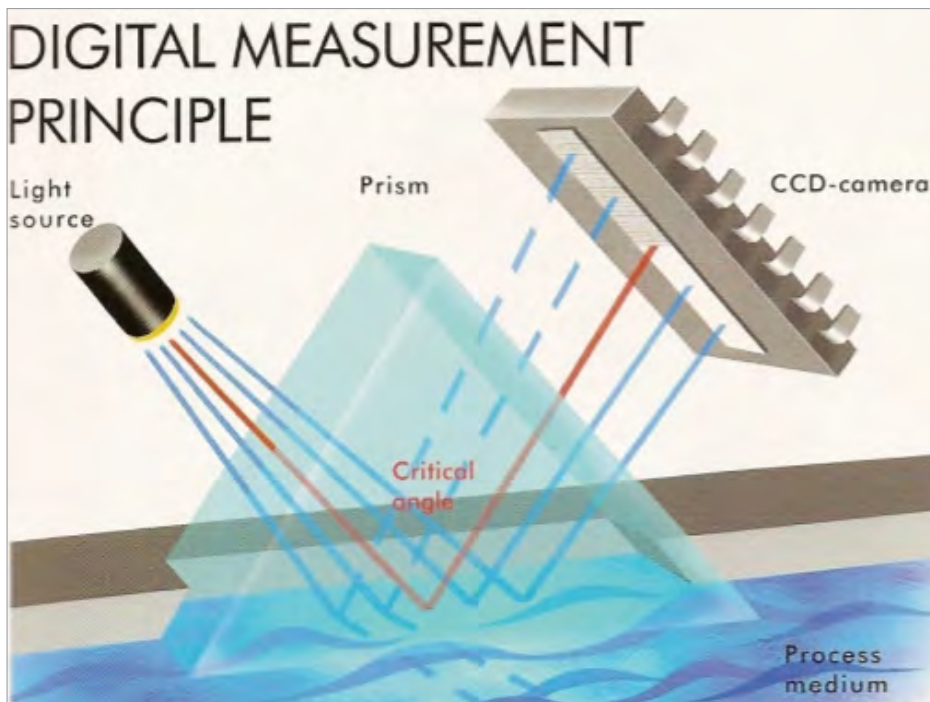
Taloudellisesta ja ympäristöllisestä näkökulmasta on erittäin tärkeää saada mahdollisimman korkea saanto tuotteeseen ja muut liukoissa muodossa nesteen mukana kulkeutuvat aineet mahdollisimman tarkkaan hyötykäyttöön eikä jätevesiin. Eri osaprosessit, laitteet ja pumpaus edellyttävät, että massaa pestään ja laimennetaan/sakeutetaan kuitulinjan aikana useaan kertaan. Vedenkäyttöä on viimeisten vuosikymmenten aikana saatu merkittävästi vähennettyä tehostamalla prosesseja ja kehittämällä laitteita sekä mittaustekniikkaa. Erot vedenkäytössä ovat kuitenkin suuria verrattaessa vanhoja ja nykyaikaisia tehtaita. Uusi, kehittynyt on-line-mittausteknologia avaa uusia mahdollisuuksia mitata ja monitoroida liunneen kuiva-aineen pitoisuuksien muutoksia osaprosesseissa ja laskea, miten tehokkaasti laitteet toimivat.

Sellun pesussa massasta erotetaan liunneen puuaineksen ja kemikaalit sisältävä mustalipeä. Massaa pestään, jotta voidaan hyödyntää mustalipeän liunnut aines energian tuotannossa ja kierrättää keittokemikaalit. Siten kuitulinjalla tapahtuva pesu on tärkeä osaprosessi kemiallisen sellun valmistuksessa, koska sillä on vaikutuksia seuraaviin prosessivaiheisiin ja toisaalta se on ensimmäinen osa kemikaalien talteenottolinjaa. Jos massa pääsee likaisena ruskean massan pesua seuraavaan valkaisuun, kasvaa valkaisukemikaalien tarve, massan saanto heikkenee, lujuusominaisuudet voivat heiketä ja lisäksi jätevesien käsittelyyn kulkeutuu enemmän liunnutta ainesta. Jos massa pestään huonosti, kulkeutuu myös arvokkaita keittokemikaaleja ja orgaanista poltettavaa tai uusiksi tuotteiksi muokattavaa ainesta jätevesiin. Toisaalta jos käytetään hyvin paljon vettä, jotta saataisiin puhdasta massaa, haihdutuskustannukset nousevat ja haihduttamossa saattaa tulla kapasiteettiongelmia. Täten ilman optimoitua ja tehokasta ruskean massan pesua sellun valmistus ei ole taloudellisesti kannattavaa. Optimoinnissa tärkeäksi asiaksi nousee pesunesteiden hallinta ja taseet sekä massan sakeuksien hallinta, jolla on myös suoraan vaikutusta nestetaseeseen ja toisaalta pesulaitteiden tehokkaaseen toimintaan. Edellä mainittujen asioiden vuoksi pesun tilan seurantaan, mittaamiseen ja säätämiseen tarvitaan reaaliaikaisia virtaus-, sakeus- ja pitoisuusmittauksia. (Crotogino et al. 1987, Tervola et al. 2011)

## MITTAUSMENETELMÄT

Mitattaessa yksittäisen osaprosessin tai vaikka koko kuitulinjan yli tapahtuvaa materiaalivirtaa tarvitaan erilaisia pitoisuusmittauksia. Pääsääntöisesti sellutehtailla on paljon mittauksia ja automaatiotekniikkaa. Laskennan pohjana on hyvä olla ainakin toimivat tuotanto-, sakeus- ja virtausmittaukset sekä tässä tarkemmin esiteltyjä liunneen kuiva-aineen pitoisuusmittauksia. Liunneen kuiva-aineen pitoisuutta voidaan mitata jatkuvatoimisesti prosessirefraktometrillä. Sen toiminta perustuu valonnopeuden muutoksen mittaamiseen. Valo kulkee nesteessä sitä hitaammin, mitä enemmän siihen on liunnut ainesta.

Refraktometrissa valolähde lähettää valoa vasten prisman ja prosessiliuoksen rajapintaa (kuva 1), jossa säteet kohtaavat pinnan eriasteisissa kulmissa. Kulmasta riippuen osa säteistä heijastuu täysin ja osa heijastuu vain osittain. Suurin osa valosta taittuu prosessiliuokseen. Heijastuneista säteistä muodostuu optinen kuva tummasta ja vaaleasta sektorista. ”Varjoaluetta” vastaavaa kulmaa kutsutaan kokonaisheijastuksen kriittiseksi kulmaksi. Kriittinen kulma on taitekertoimen funktio ja tässä liuoksen konsentraatio. Digitaalinen CCD-kamera havaitsee optisen kuvan ja ”varjorajan”. Kamera muuntaa optisen kuvan piste pisteeltä elektroniseksi signaaliksi. Näin saadaan tarkasta ”varjorajasta” määritettyä taitekerroin  $n_D$ . Sisäänrakennettu lämpötilasensori mittaa lämpötilan prosessinesteen pinnasta. Indikoiva lähetin muuntaa taitekertoimen ja lämpötilan konsentraatioyksiköksi. Vianmääritysohjelma varmistaa, että mittaus on luotettava. Mittaustuloksen luotettavuuteen vaikuttaa lähinnä mittapään puhtaus ja kontakti mitattavaan liuokseen. Likaantumista pyritään estämään tarvittaessa mittapään pesulla, joka tapahtuu tavallisimmin höyryllä. (Kopra 2015)

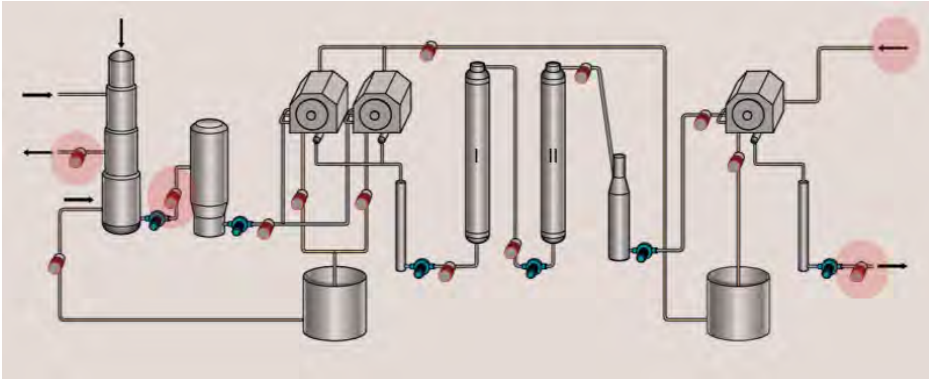


**KUVA 1.** Refraktometrin mittauseriaate (Vaisala Oy).

Tässä artikkelissa esitellään, miten liuonnan kuiva-aineen pitoisuusmittauksia voidaan hyödyntää materiaalivirtojen pääpiirteittäiseen laskentaan koko kuitulinjan ruskean massan pesun, happivaiheen ja yksittäisen pesulaitteen yli.

## TULOKSET

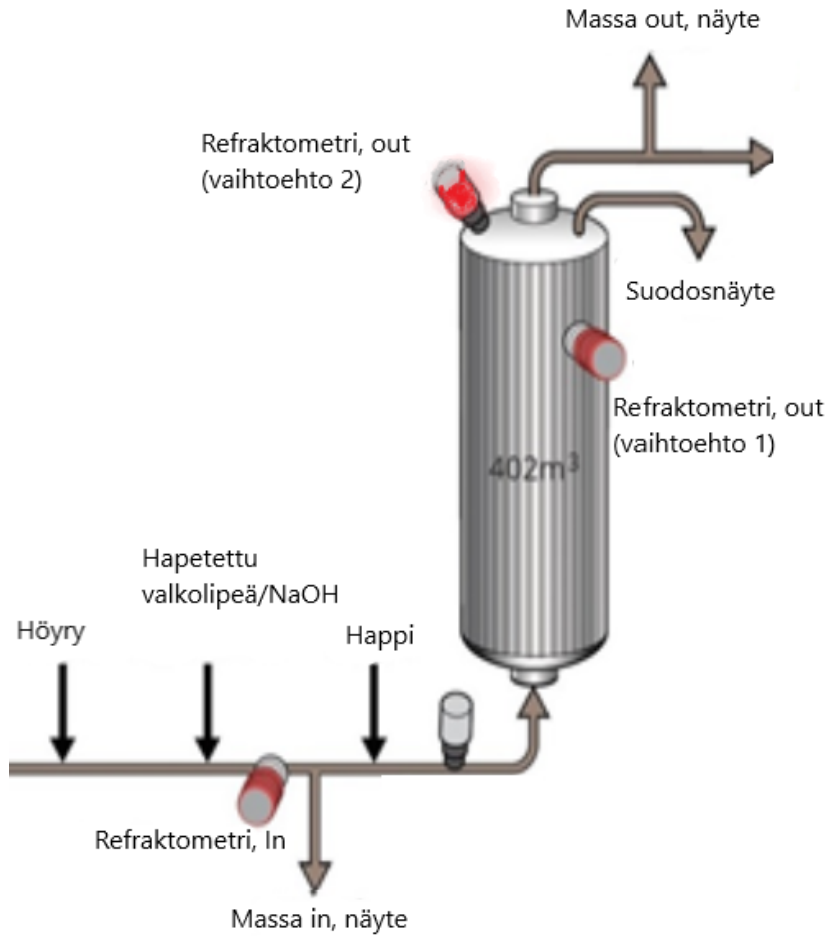
Kuvassa 2 esitetyllä punaisella värillä korostetuilla mittauksilla voidaan seurata koko ruskean massalinjan yli tapahtuvaa kuiva-ainetaseen muutosta. Yksinkertaisuudessaan pitää mitata, paljonko massaa, missä sakeudessa ja missä nesteosan liuenneen aineen pitoisuudessa massa tulee linjalle, toiseksi, mitä linjalta lähtee valkaisuun, kolmanneksi, paljonko linjalle tuodaan pesunestettä, ja lopuksi, paljonko nestettä lähtee ja missä kuiva-ainepitoisuudessa se lähtee kohti haihduttamoa. Tehtailla tehdään perinteisesti sakeus- ja virtausmittaukset, mutta lisäksi tarvitaan ainakin liuenneen kuiva-aineen mittaukset.



**KUVA 2.** Kuitulinjan ruskean massan pesemön materiaalivirran optimointi perustuen on-line-refraktometreihin (kuva Riku Kopra).

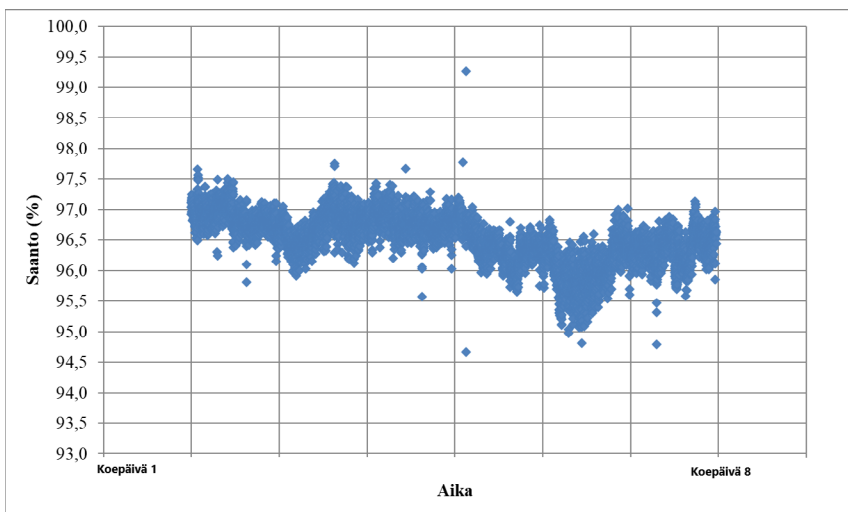
Kuvassa 3 esitetyllä mittausjärjestelyllä voidaan mitata ja seurata, miten ainetta liukenee massasta suodoksiin happivaiheessa. Happivaiheen tarkoituksena on poistaa ligniiniä massasta hapen avulla alkalisissa olosuhteissa korkeassa lämpötilassa. Olosuhteiden sopivalla valinnalla yritetään estää, ettei selluloosaa liukene liikaa. Jos näin tapahtuu, menetetään saantoa ja massan lujuusominaisuuksia.





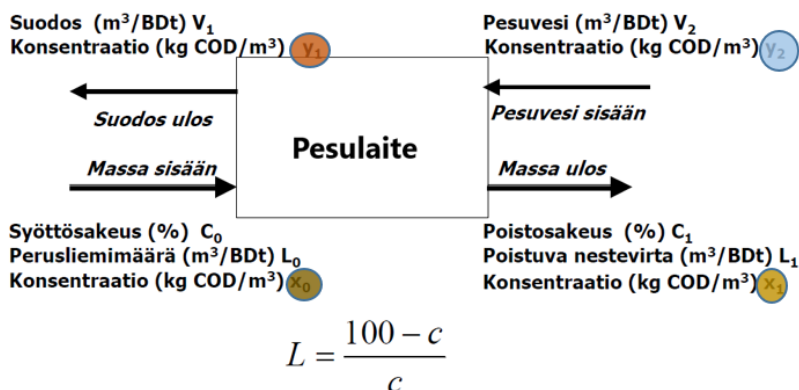
**KUVA 3.** Happivaiheen optimointi refraktometreilla (Riku Kopra).

Mittausten avulla on mahdollista laskea ja tarvittaessa seurata, kuinka paljon kyseisessä prosessissa menetetään massan saantoa. Tähän vaikuttaa kemiallisten reaktioiden lisäksi vahvasti reaktiolämpötila. Kuvassa 4 on esitetty happivaiheen saanto ajanfunktiona erään koejakson aikana. Siinä saanto vaihtelee 95–97,5 prosenttiin.



**KUVA 4.** Happivaiheen saantolaskenta perustuen refraktometrimittauksiin erään koejakson aikana (Riku Kopra).

Kuvassa 5 on esitetty yksittäisen pesurin niin sanottu mustalaaikko-taselaskentamalli. Mittaamalla massojen sakeudet, pesunesteen määrät ja kaikkien virtausten kuiva-ainepitoisuudet saadaan tase täydennettyä ja pystytään laskemaan pesurin kuiva-ainetase ja laskemaan tehokkuusarvoja reaaliajassa. Neljällä pitoisuusmittauksella saadaan koko kuiva-ainetase suljettua pesulaitteen ympäriltä. Mittauksissa on kuitenkin usein pieniä virheitä johtuen esimerkiksi epätarkasti tehdyistä kalibroinneista tai mittapään likaantumisesta. Tällöin kertynyt mittausvirheiden summa pitää ”hävittää” taselaskennassa. Luonnostaan se tapahtuu, jos käytetään kolmea mittausta neljästä mittauskohteesta ja virhe hävitetään neljanteen arvoon. Tasekorjaus voidaan tehdä esimerkiksi pesurin syöttövirtaan tai pesurilta poistuvaan suodokseen. Jos mitataan kaikkia neljää pitoisuutta, tasekorjaus voidaan tehdä käytettyyn ylimääränesteeseen eli toisin sanoen laimennuskertoimeen.



**KUVA 5** Yksittäisen pesurin tasemalli, jossa mitattavat pitoisuudet ympäröity (kuva Riku Kopra).

## JOHTOPÄÄTÖKSET

Reaaliaikaisten mittausten avulla voidaan laskea kuitulinjalla eri osaprosesseissa tai vaikkapa koko kuitulinjan yli liuenneen kuiva-aineen tasetta ja seurata reaaliajassa muutoksia taseessa. Tämä mahdollistaa optimin ajotavan etsinnän kussakin ajotilanteessa. Pienilläkin pitoisuusmuutoksilla voi olla merkittävä vaikutus kuitulinjalla käytettyjen kemikaalien kulutukseen ja täten suora vaikutus kemikaalitalouteen tai toisaalta pesuvesimäärien muutoksella haihdutuskustannuksiin. Nykyaikaiset pitoisuusmittaukset antavat operaattoreille, kehityshenkilökunnalle ja insinööreille mahdollisuuden tehostaa kuitulinjan toimintaa ja tehdä sellun valmistuksesta entistä kannattavampaa.

## LÄHTEET

Crotogino R.H., Poirier N.A. & Trinh D.T. (1987) The principles of pulp washing, *Tappi Journal*, 70(6):95–103.

Kopra, R. (2015) Application of the Refractometer in the Measurement and Monitoring of Brown Stock Washing, Ph.D. Dissertation, Aalto University, Helsinki, Finland.

Tervola, P., Andersson, R., Danielsson, M., Engelfeldt, A., Kiero, S., Olsson, K., Pikka, O., Samuelsson, A. & Siik, S. (2011) Washing, screening and cleaning of pulp, in: Fardim, P. (ed.) *Chemical Pulping Part 1, Fibre Chemistry and Technology*. Paper Engineers' Association, Helsinki, Finland, pp. 382–456.

# SELLUTEHTAAN VALKAISU- SUODOSTEN PUHDISTAMINEN KALVOTEKNIIKAN AVULLA

Meeri Häyrynen & Mia Pursiainen & Juhani Turunen

Sellutehtaan vesikiertojen sulkeminen vähentää vedenkulutusta, mutta lisää vierasaineiden, kuten kalsiumin, bariumin ja siirtymämetallien, kertymistä prosesseihin. Nämä vierasaineet voivat valkaisuprosesseissa aiheuttaa esimerkiksi saostumista, lisätä valkaisu- ja kalvosuodatustekniikan avulla. Valkaisun  $D_0$ -, Eop- ja  $D_1$ -suodoksista voitiin nanosuodatuksen avulla vähentää kemiallista hapenkulutusta, väriä sekä ligniiniyhdisteiden, haitallisten anionien, kuten oksalaatin, karbonaatin ja sulfaatin, ja haitallisten metallien konsentraatioita. Oikean kalvotyypin valinta kuhunkin käyttökohteeseen on erittäin tärkeää vaativien prosessiolosuhteiden sekä kalvojen läpäisykapasiteetin ja likaantumisominaisuuksien takia.

## JOHDANTO

Sellu- ja paperiteollisuuden prosessit kuluttavat runsaasti vettä. Suurin osa sulfaattisellun valmistuksen vedenkulutuksesta aiheutuu valkaisusta (Ashrafi et al. 2015, Gavrilesco et al. 2012). Viimeisten vuosikymmenien aikana merkittäviä kehitysaskelaita on otettu erityisesti sellun keitto-, pesu- ja valkaisu- ja kalvosuodatuksen ympäristövaikutusten vähentämiseksi (Stratton, Gleadow & Johnson 2004). Kiristyvät ympäristölupavaatimukset jätevesien suhteen samoin kuin taloudelliset näkökohdat ajavat tehtaita suljettujen vesikiertojen suuntaan. Tehdasprosesseissa suljetuilla vesikiertoilla on kuitenkin negatiivisia vaikutuksia: erilaisten saostumien lisääntyminen prosessilaitteiden pinnoilla, materiaalikorroosion kiihtyminen ja lopputuotteen sisältämien epäpuhtauksien lisääntyminen. Täysin suljettuja vesikiertoja ei kyetä vielä nykytekniikalla toteuttamaan, mutta kehitystä siihen suuntaan on tapahtunut esimerkiksi sellun valkaisu- ja pesu- ja kalvosuodatuksissa (Bajpai 2012, Stratton et al. 2004).

Eräs mahdollisuus puhdistaa valkaisu- ja kalvosuodatuksen suodoksia on käyttää kalvosuodatustekniikkaa, jossa syötettävästä vesivirrasta muodostuu kaksi jaetta: konsentraatti (kalvon pidättämä jae) ja permeaatti (kalvon läpäissyt jae). Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli tutkia nanosuodatuksen soveltuvuutta sellutehtaan happamien ja alkalisten suodosten puhdistukseen. Tutkittavat jakeet olivat ensimmäisen klooridioksidivaiheen ( $D_0$ ) suodos, hapella ja peroksidilla vahvistetun alkalivaiheen (Eop) suodos ja toisen klooridioksidivaiheen ( $D_1$ ) suodos.

Tehty tutkimus on osa Metsäbiojalostamon valkaisu-jätevesien karakterisointi ja tehokkaat käsittelytekniikat PUREWA -hanketta. Hankkeen tavoitteena on selvittää valkaisuvesien orgaanista ja epäorgaanista koostumusta ja toisaalta testata soveltuvaa tekniikkaa valkaisuvesien biohajoavuuden parantamiseksi uudentyypisen, nykyistä paremman vedenpuhdistusprosessin kehittäessä. Hanke toteutetaan Xamk Kuitulaboratoriossa vuosina 2020–2022, ja päärahoittajana on Euroopan aluekehitysrahasto Etelä-Savon ELY-keskuksen kautta. Yrityskumppaneita ovat Aquaflow Oy, Andritz Oy, Metsä-Fibre Oy ja Vaisala Oyj.

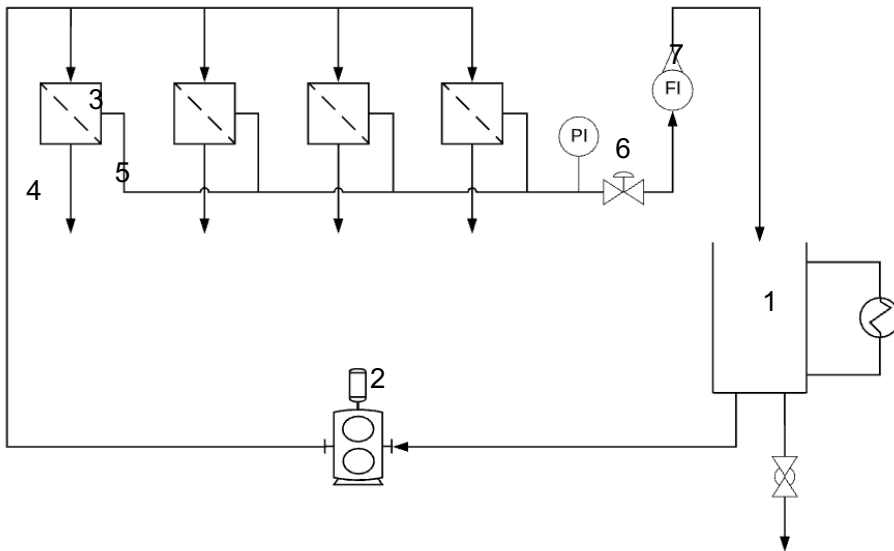
## MENETELMÄT

Tutkitut D<sub>0</sub>-, Eop- ja D<sub>1</sub>-vaiheiden suodokset ovat peräisin suomalaiselta havusulfaattia valmistavalta sellutehtaalta. Ennen nanosuodatuskokeita näytteet on esisuodatettu kahden suodattimen läpi (huokoskoot 1,6 µm ja 0,45 µm). Kalvosuodatustesteissä käytetyt kalvot ja niille yleisesti sopivat prosessiolosuhteet on esitetty taulukossa 1.

**TAULUKKO 1.** Nanosuodatustesteissä käytetyt kalvot.

Kalvo	Valmistaja	Huokoskoko [Da]	Materiaali	pH-alue	Maksimi-lämpötila [°C]	Maksimi-paine [bar]
<b>NP030</b>	Microdyn Nadir	500–600	Polyeeterisulfoni (PES)	0–14	95	40
<b>NTR-7450</b>	Nitto Denko	600–800	Sulfonoitu PES	2–11	60	40
<b>NP010</b>	Microdyn Nadir	1 000	PES	0–14	95	40
<b>ETNA 01PP</b>	Alfa Laval	1 000	Komposiitti fluoro-polymeeri	1–11	60	10

Nanosuodatuskokeet tehtiin noin 50 °C:n lämpötilassa crossflow-tyyppisellä suodatuslaitteistolla, jossa on neljä rinnakkaista suodatuskanavaa (kuva 1). Laitteistoon kuuluu lämmitetty syöttösäiliö (1), pumppu (2), paineensäädin (6) ja virtausmittaus (7). Permeaatti otetaan talteen (4) ja konsentraattia kierrätetään takaisin syöttösäiliöön (5). Testit on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston omistamalla laitteistolla.



**KUVA 1.** Laboratoriomittakaavainen kalvosuodatusprosessi. 1 = syöttösäiliö, 2 = pumpu, 3 = kalvosuodatusyksikkö, 4 = permeaatin talteenotto, 5 = konsentraatin kierrätys, 6 = painesäätö, 7 = virtausmittaus.

Valkaisuvesien sisältämän ligniinin määrää arvioitiin Mettler Toledo UV5Bio UV/Vis -spektrofotometrillä semikvantitatiivisesti aallonpituudella 280 nm (alkaliset näytteet) ja 205 nm ja 203 nm (happamat näytteet). Vesien väri mitattiin Merck Spectroquant NOVA 60 -fotometrillä käyttäen aallonpituutta 340 nm ja Pt/Co-standardia. Kemiallinen hapenkulutus COD mitattiin Merck Spectroquant TR 420 -lämpöhauteen ja Merck Spectroquant NOVA 60 -fotometrin avulla. Sähkönjohtavuus mitattiin WTW inoLab Cond7110 -laitteella. pH määritettiin käyttäen Mettler Toledo SevenCompact -mittaria. Metallit on määritetty ICP-OES-laitteistolla (Labtium Oy) ja anionit Thermo Fisher Scientific ICS 6000 -laitteistolla.

## TULOKSET

Taulukossa 2 on esitetty tutkittujen valkaisuodosten ominaisuudet ja taulukossa 3 Eop-suodoksen permeaatin ominaisuudet. Kuten taulukosta 3 havaitaan, kalvosuodatuksella on voitu saada aikaan suuria reduktioita anioni-, kationi-, väri-, COD- ja ligniinititoisuuksissa. Esimerkiksi ligniiniä on voitu vähentää kalvosta riippuen jopa 96–99 prosenttia. Menetelmä poistaa hyvin myös kalsiumia (95–98 %) ja bariumia (96–99 %). Oksalaattia on voitu vähentää 86–97 prosenttia ja sulfaattia 85–100 prosenttia. Yleisesti ottaen heikoimmat reduktiot saatiin ETNA 01PP -kalvolla.

Kaikki anionit ja kationit ovat kooltaan sitä suuruusluokkaa, että ne pystyisivät helposti läpäisemään tutkitut kalvot (huokoskoko 500–1 000 Da). Kuitenkin kationien ja anionien reduktiot ovat olleet huomattavan suuria. Mahdollisena selityksenä (Dahlman et al. 1995,

Zhao et al. 2018) mainitaan esimerkiksi anionien ja kationien keskinäiset vuorovaikutukset, kyky kompleksinmuodostukseen toistensa kanssa ja tarttuminen hyvin suurimolekyylisiin ligniiniyhdisteisiin ja muuhun orgaaniseen ainekseen.

**TAULUKKO 2.** Tutkittujen valkaisuodosten ominaisuudet. \*Alle määrittysrajan.

	Eop-suodos	D <sub>0</sub> -suodos	D <sub>1</sub> -suodos
pH	11,3	2,4	3,4
Johtokyky, mS/cm	4,02	5,83	2,68
COD, mg/l	2 070	2 363	917
Ligniini, mg/l	787	589	195
Väri, Pt/Co	1 324	852	120
Ca, mg/l	17,8	120	20,9
Ba, mg/l	0,18	0,44	0,16
Fe, mg/l	<0,05*	0,46	0,21
Mn, mg/l	<0,05*	2,28	0,4
Cu, mg/l	<0,05*	<0,05*	<0,05*
Na, mg/l	943	682,5	522
K, mg/l	7,95	19,30	5,03
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , mg/l	484	11	10
C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , mg/l	87	147	21
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , mg/l	177	399	441
Cl, mg/l	237	938	372

**TAULUKKO 3.** Eop-suodoksen permeaatin ominaisuudet eri kalvoja käyttämällä (su-luissa muutos Eop-lähtösuodokseen nähden). \*Alle määrittysrajan.

	NP030	NTR 7450	NP010	ETNA 01PP
pH	10,4	10,4	10,6	11,1
Johtokyky, µS/cm	1 336 (-67 %)	645 (-84 %)	1 758 (-56 %)	1 904 (-53 %)
COD, mg/l	431 (-79 %)	332 (-84 %)	503 (-76 %)	570 (-72 %)
Ligniini, mg/l	22,1 (-97 %)	6,3 (-99 %)	29,2 (-96 %)	31,9 (-96 %)
Väri, Pt/Co	66 (-95 %)	12 (-99 %)	105 (-92 %)	179 (-86 %)
Ca, mg/l	0,32 (-98 %)	<0,01*	0,42 (-97 %)	0,81 (-95 %)
Ba, mg/l	0,002 (-99 %)	<0,002	0,003 (-98 %)	0,007 (-96 %)
Fe, mg/l	<0,05*	<0,05*	<0,05*	<0,05*
Mn, mg/l	<0,05*	<0,05*	<0,05*	<0,05*
Cu, mg/l	<0,05*	<0,05*	<0,05*	<0,05*
Na, mg/l	262,3 (-72 %)	124,0 (-87 %)	366,8 (-61 %)	354,0 (-62 %)
K, mg/l	1,32 (-83 %)	0,68 (-91 %)	1,64 (-79 %)	2,83 (-64 %)
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , mg/l	120 (-75 %)	63 (-87 %)	115 (-76 %)	140 (-71 %)
C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , mg/l	10 (-89 %)	2,8 (-97 %)	9,3 (-89 %)	12 (-86 %)
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , mg/l	11 (-94 %)	0,2 (-100 %)	12 (-93 %)	27 (-85 %)
Cl, mg/l	185 (-22%)	36 (-84%)	157 (-34%)	175 (-26%)



Taulukossa 4 on esitetty määrittystulokset  $D_0$ -suodoksen permeaatin osalta. Kuten nähdään, toteutettu  $D_0$ -suodoksen kalvosuodatus vähentää hyvin tehokkaasti anioneja, kationeja, ligniiniä, väriä ja kemiallista hapenkulutusta. Yleisesti ottaen reduktiot ovat kuitenkin hieman heikkomat kuin Eop-suodoksen kohdalla. Tämänkin suodoksen osalta pienimmät reduktiot saatiin ETNA 01PP -kalvolla.

**TAULUKKO 4.**  $D_0$ -suodoksen permeaatin ominaisuudet eri kalvoja käyttämällä (suluis-sa muutos  $D_0$ -lähtösuodokseen nähden). \*Alle määrittysrajan.

Membrane	NP030	NTR 7450	NP010	ETNA 01PP
pH	2,7	2,8	2,7	2,6
Johtokyky, $\mu\text{S}/\text{cm}$	2 530 (-57 %)	1 638 (-72 %)	2 620 (-55 %)	4 130 (-29 %)
COD, mg/l	721 (-69 %)	832 (-65 %)	772 (-67 %)	1 193 (-49 %)
Ligniini, mg/l	72 (-88 %)	62 (-89 %)	81 (-86 %)	225 (-62 %)
Väri, Pt/Co	36 (-96 %)	26 (-97 %)	43 (-95 %)	257 (-70 %)
Ca, mg/l	3,5 (-97 %)	13,01 (-89 %)	34,1 (-72 %)	82,8 (-31 %)
Ba, mg/l	0,03 (-93 %)	0,05 (-89 %)	0,12 (-73 %)	0,3 (-32 %)
Fe, mg/l	0,08 (-83 %)	0,1 (-78 %)	0,15 (-67 %)	0,3 (-32 %)
Mn, mg/l	0,1 (-0,96)	0,28 (-88 %)	0,67 (-71 %)	1,58 (-31 %)
Cu, mg/l	<0,05*	<0,05*	<0,05*	<0,05*
Na, mg/l	150 (-78 %)	205,5 (-70 %)	266,5 (-61 %)	456 (-33 %)
K, mg/l	1,34 (-93 %)	4,12 (-79 %)	8,23 (-57 %)	13,03 (-32 %)
$\text{CO}_3^{2-}$ , mg/l	10 (-9 %)	2 (-82 %)	2 (-82 %)	2 (-82 %)
$\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ , mg/l	31 (-79 %)	37 (-75 %)	48 (-67 %)	77 (-48 %)
$\text{SO}_4^{2-}$ , mg/l	16 (-96 %)	18 (-95 %)	23 (-94 %)	129 (-68 %)
Cl <sup>-</sup> , mg/l	383 (-59 %)	454 (-52 %)	254 (-73 %)	715 (-24 %)

Taulukossa 5 on esitetty kalvosuodatuskokeiden tulokset  $D_1$ -suodoksen permeaatista. Menetelmä tehoaa hyvin myös tähän suodokseen, joskin reduktiot ovat yleisti ottaen hieman heikkomat kuin  $D_0$ -suodoksen osalta. ETNA 01PP:n suorituskyky oli jälleen huonoin.

**TAULUKKO 5.** D<sub>1</sub>-suodoksen permeaatin ominaisuudet eri kalvoja käyttämällä (suluisa muutos D<sub>1</sub>-lähtösuodokseen nähden. \*Alle määrittäysrajan.

	NP030	NTR 7450	NP010	ETNA 01PP
<b>pH</b>	3,2	3,8	3,5	3,5
<b>Johtokyky, µS/cm</b>	1170 (-58 %)	595 (-78 %)	1303 (-51 %)	1692 (-37 %)
<b>COD, mg/l</b>	458 (-50 %)	460 (-50 %)	482 (-47 %)	624 (-32 %)
<b>Ligniini, mg/l</b>	38 (-81 %)	23 (-88 %)	40 (-79 %)	92 (-53 %)
<b>Väri, Pt/Co</b>	4,5 (-96 %)	0 (-100 %)	5,0 (-96 %)	50,5 (-58 %)
<b>Ca, mg/l</b>	3,2 (-85 %)	0,08 (-100 %)	3,1 (-85 %)	9,1 (-56 %)
<b>Ba, mg/l</b>	0,02 (-88 %)	0,006 (-96 %)	0,025 (-84 %)	0,07 (-56 %)
<b>Fe, mg/l</b>	0,21 (-0 %)	<0,05*	0,07 (-67 %)	0,1 (-52 %)
<b>Mn, mg/l</b>	0,09 (-78 %)	0,025 (-94 %)	0,09 (-78 %)	0,19 (-53 %)
<b>Cu, mg/l</b>	<0,05*	<0,05*	<0,05*	<0,05*
<b>Na, mg/l</b>	157 (-70 %)	101,9 (-80 %)	160,5 (-69 %)	269,5 (-48 %)
<b>K, mg/l</b>	1,48 (-71 %)	0,53 (-89 %)	1,01 (-80 %)	2,17 (-57 %)
<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, mg/l</b>	10 (-0 %)	7 (-30 %)	11 (+10 %)	3 (-70 %)
<b>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub><sup>2-</sup>, mg/l</b>	2 (-90 %)	5 (-76 %)	4 (-81 %)	10 (-52 %)
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, mg/l</b>	11 (-98 %)	5 (-99 %)	13 (-97 %)	110 (-75 %)
<b>Cl, mg/l</b>	156 (-58 %)	52 (-86 %)	172 (-54 %)	278 (-25 %)

Käytännön tehdasprosesseissa riittävien reduktioiden lisäksi tärkeitä tekijöitä ovat esimerkiksi kalvojen tukkeutumisherkkyys, niiden mekaaninen ja kemiallinen kestävyys vaativissa prosessiolosuhteissa ja laitteiston energiankulutus. Näiden tekijöiden arvioimiseksi tarvitaan kuitenkin pilot-mittakaavan koeajoja.

## JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimustulosten perusteella nanosuodatustekniikan avulla voidaan puhdistaa sellutehtaan valkaisuodoksia. Ligniiniyhdisteet ja monet haitalliset kationit ja anionit jäävät suurelta osin konsentraattiin käytettäessä huokoskokojen 500–1 000 Da kalvoja. Nanosuodatuksen permeaatti on puhtaustasoltaan niin korkealaatuista, että sen käytöllä olisi erittäin merkittävä positiivinen vaikutus prosessilaitteiston ja lopputuotteen puhtauteen. Mikäli permeaatin puhtaustasosta voidaan tinkiä, kalvot voisivat olla huokoskooltaan nanokalvoja suurempia (esim. 1 000–2 000 Da). Tämä mahdollisesti vähentäisi kalvojen tukkeutumisalttiutta ja pienentäisi energiankulutusta. Pilot-mittakaavaisia testejä tarvitaan, jotta saadaan lisää tietoa kalvotekniikan käytännön suorituskyvystä.

## LÄHTEET

Ashrafi, O., Yerushalmi, L. & Haghghat, F. 2015. Wastewater treatment in the pulp and-paper industry: A review of treatment processes and the associated greenhouse gas emission. *Journal of environmental management*, 158, pp. 146–157.

Bajpai, P. 2012. *Environmentally benign approaches for pulp bleaching*. 2nd edition. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science. 416 p. ISBN: 978-0-444-59421-1.

Dahlman, O., Reimann, A., Strömberg, L. & Mörck, R. 1995. High-molecular-weight effluent materials from modern ECF and TCF bleaching. *TAPPI Journal*, 78(12), pp. 99–109.

Gavrilescu, D., Puitel, A., Dutuc, G. & Craciun, G. 2012. Environmental impact of pulp and paper mills. *Environmental Engineering and Management Journal*, 11(1), pp. 81–85.

Stratton, S., Gleadow, P. & Johnson, A. 2004. Pulp mill process closure: a review of global technology developments and mill experiences in the 1990s. *Water science and technology*, 50 (3), pp. 183–194.

Zhao, H., Wu, H., Hu, H., Li, Y., Jing, L. & Zhang, X. 2018. Cooperative Decomposition of Hydrogen Peroxide by Lignin-combined Transition Metals in Pulp Bleaching. *Biore-sources*, 13(2), pp. 3922–3931.

# ENERVE-PROJEKTI – MITTAUS- JA MALLINNUSMENETELMIÄ ENERGIATEHOKKAASEEN VEDENPOISTOON

Yrjö Hiltunen & Ekaterina Nikolskaya

Enerve-projektin päätavoitteena on kehittää ja pilotoida uusia mittaus- ja mallinnusmenetelmiä energiatehokkaaseen vedenpoistoon metsäbionotalouden ja bioenergiateollisuuden teollisissa prosesseissa. Keskeisiksi prosesseiksi on valittu jätevesi-, sellu- ja viiluprosessit, joissa pyritään hyödyntämään NMR (Nuclear Magnetic Resonance) -mittausmenetelmää ja tekoälyyn perustuvia mallinnusmenetelmiä. Tähän mennessä hankkeessa on keskitytty mittaamaan näytteitä jätevesiprosessista, jossa käsitellään sekä teollisuus- että yhdyskuntajätevettä. Lisäksi projektin tavoitteena on demonstroida mittauksiin ja mallinnukseen perustuvien järjestelmien toimivuutta pilot- ja todellisessa kohdeprosessissa ja tehdä kaupallistamisselvityksiä mahdollisille tuotteille. Tämän vuoksi projektissa ollaan aloittamassa online-mittauksia kyseisellä jätevesilaitoksella. Mukana projektissa ovat Xamk, Itä-Suomen yliopisto, Andritz, Metsä Board, Mondi Poweflute ja Raute. Enerve-hanketta rahoittaa Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan aluekehitysrahastosta.

## JOHDANTO

Veden sijainnin ymmärtäminen on prosessitekniikassa tärkeää, koska se vaikuttaa monien prosessien vedenpoistoon ja kuivatusenergiaan. Esimerkiksi sellukuitujen sisältämä vesi voidaan jakaa kuitujen sisäiseen ja ulkoiseen veteen. Näissä tiloissa vesi voi olla puolestaan vapaana tai sitoutuneena. Veden määrään kuidussa ja kuidun lähellä vaikuttavat ympäristön kemiallinen tila, kuituseinämän huokoisuus, kuidun hydrofilisyys ja kuidun pinnalla olevat fibrillit. Kemiallisen tilan muutoksia aiheuttavat muun muassa sellutehtaalla keitto- sekä pesuprosessi ja paperi-/kartonkitehtailla pH-säätö. Kuituseinämän huokoisuus on peruja kuituraaka-aineen ominaisuuksista ja edelleen ympäristön kemiallisesta tilasta. Kuidun pinnalla olevien mikro- ja makrofibrillien määrään vaikuttaa edellisten lisäksi mekaaniset käsittelyt, kuten kuidutus ja jauhatus.

Näin ollen veden sijainti vaikuttaa esimerkiksi paperi- ja kartonkikoneella muun muassa puristinosan vedenpoistoon ja kuivatusosalla tarvittavaan kuivatusenergiaan. Esimerkiksi kartonkikoneella 90 prosenttia energiasta kuluu vedenpoistoon. Kyse ei ole pelkästään

vesimolekyylien haihduttamisesta, vaan kuidun selluloosapolymeerien ja veden välisten sidosten purkamisesta. On myös huomattava, että kuivatusenergia on erittäin merkittävä osa paperin- ja kartonginvalmistuksen energiatarpeesta, joten sen parempi ennakointi ja hallinta tarkoittavat merkittäviä kustannussäästöjä tuotannossa. Mittaus- ja mallinnusmenetelmällä on oletettavasti merkittävää hyötyä esimerkiksi selluloosan ja vaneriviilujen kuivausprosessien energiatehokkuuden parantamisessa.

Xamkin Kuitulaboratoriossa on tehty usean vuoden ajan soveltavaa NMR-tutkimusta (ydinmagneettinen resonanssi), jolla pystytään mittaamaan vesimolekyylien tilat sekä kuitu- että puunäytteissä. Tutkimuksen tuloksena on syntynyt useita keksintöilmoituksia ja tieteellisiä julkaisuja (Liukkonen et al. 2016, Nikolskaya et al. 2015, Nikolskaya & Hiltunen 2018, Nikolskaya & Hiltunen 2019, Nikolskaya et al. 2019, Nikolskaya et al. 2020, Raunio et al. 2018, Raunio et al. 2020) sekä kaksi patenttia (FI128507B 2020, FI128877B 2021) ja kaksi patenttihakemusta. Tämän lisäksi projektissa mukana oleva Itä-Suomen yliopiston Ympäristö- ja biotieteiden laitoksen prosessi-informatiikan tutkimusryhmä on tehty vuodesta 2004 lähtien teollisuuden prosessien tekoälytutkimukseen liittyvää kehitystyötä, jonka avulla voidaan tuottaa ratkaisuja prosessien mallinnukseen ja hallintaan (Liukkonen et al. 2018, Liukkonen et al. 2019). Näihin osaamisiin perustuva reaaliaikainen mittaaminen ja mallinnus mahdollistavat energiatarpeen ennakkoinnin ja sitä kautta prosessien kustannustehokkaan säädön. Paremman ennakkoinnin ja säädön myötä tulee mahdollisuus energiatuotannon optimointiin, jolloin saavutetaan sekä ympäristön että taloudellisuuden suhteen paremmat tulokset.

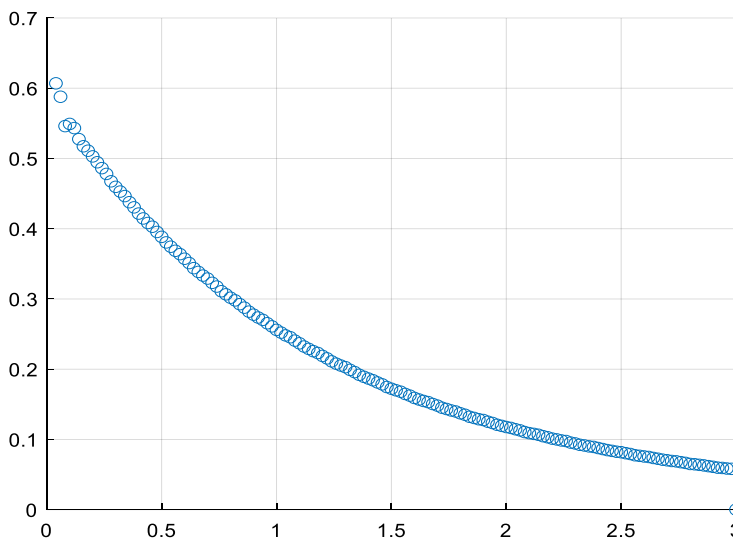
Tässä projektissa tullaan keskittymään jäteveden, sellun ja viilun NMR-mittauksiin. Pyrkimyksenä on kehittää näille sovelluksille online-mittauksia. Seuraavassa esitellään jätevedestä saatuja alustavia tuloksia. Jätevesinäytteet ovat tehtaalta, jossa jätevedessä on sekä kuitu- että biolietettä.

## TULOKSET

NMR-mittauksissa kokeellinen signaali  $S$  on eksponenttimuotoa

$$S = Ae^{-\frac{t}{T_2}},$$

jossa amplitudi  $A$  kertoo protonitiheyden (esim. vesimolekyylien vetyatomien määrän) ja relaksaatioaika  $T_2$  molekyylien liiketilasta. Kuvassa 1 on esitetty puhtaasta vesinäytteestä mitattu kokeellinen signaali.



**KUVA 1.** Puhtaasta vesinäytteestä mitattu kokeellinen yksieksponttinen NMR-signaali (kuva Ekaterina Nikolskaya).

Jos näytteessä on useampi tila, joissa on vesimolekyylejä, ja niiden välillä on hidaskvaihto, kokeellinen signaali  $S$  on lineaarikombinaatio useammasta eksponenttitermistä (esim. kolme tilaa):

$$S = A_1 e^{-t/T_{21}} + A_2 e^{-t/T_{22}} + A_3 e^{-t/T_{23}}$$

Kaavan amplitudit mahdollistavat tilojen veden suhteellisten osuuksien laskemisen. Lisäksi relaksaatioajat mahdollistavat sitoutuneen ja vapaan veden osuuksien laskemisen jokaisessa tilassa erikseen nopean kemiallisen vaihdon NMR-teoriolla.

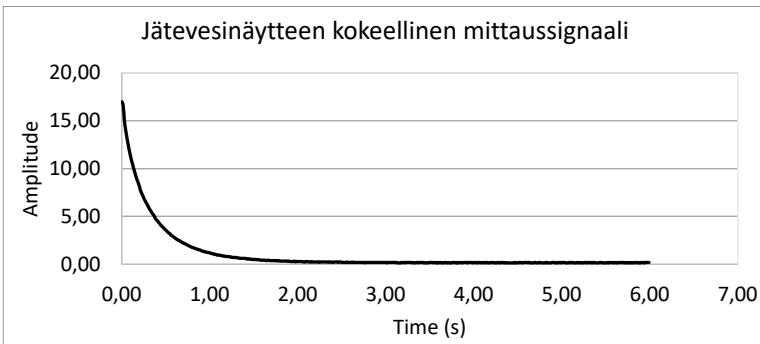
Usein ajatellaan, että jätevedessä oleva vesi voidaan jakaa neljään luokkaan:

- vapaa vesi, joka ei ole sitoutunut flokkeihin
- välivesi: kapillaarivoimien sitoma vesi flokkien välitilojen sisällä
- pintavesi: kiinteän aineen pintaan sitoutunut vesi
- sitoutunut solunsisäinen vesi.

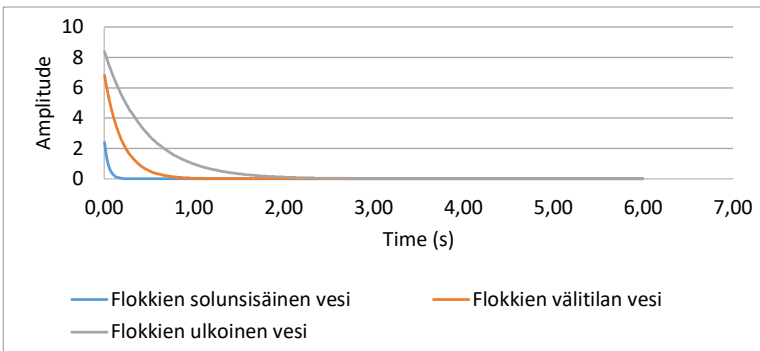
Koska yleisesti vesi kuitenkin vaihtaa hyvin nopeasti tilaansa sitoutuneesta vapaaksi ja päinvastoin, NMR-mittauksen aikaskaalassa kokeellinen signaali muodostuu kolmen tilan lineaarikombinaationa eli

- flokkien ulkoinen vesi
- flokkien välitilan vesi
- flokkien solunsisäinen vesi.

Viimeisessä tilassa vesi on pääsääntöisesti sitoutuneena ja kahdessa muussa sekä sitoutuneena että vapaana. Koska vapaan ja sitoutuneen veden välinen vaihto on hyvin nopeaa, niitä ei nähdä erillisenä eksponenttignaalinä mittauksessa, vaan niiden osuudet yhden tilan sisällä voidaan määrittää nopeaan vaihtoon liittyvän NMR-teorian avulla. Kuvassa 2 on kokeellinen NMR-signaali, joka on mitattu jätevesinäytteestä ja johon ei ole lisätty polymeeriä. Kuvassa 3 on puolestaan esitetty ulkoisen veden, flokkien välitilan veden ja solunsisäisen veden signaalit, jotka on saatu matemaattisesti sovittamalla kokeellisesta NMR-signaalista. Näiden sovitettujen signaalien suhteelliset amplitudit ilmaisevat sen, kuinka paljon vettä on kyseisessä tilassa, sekä niin sanotun relaksaatioajan, joka on veden keskimääräinen liiketila.



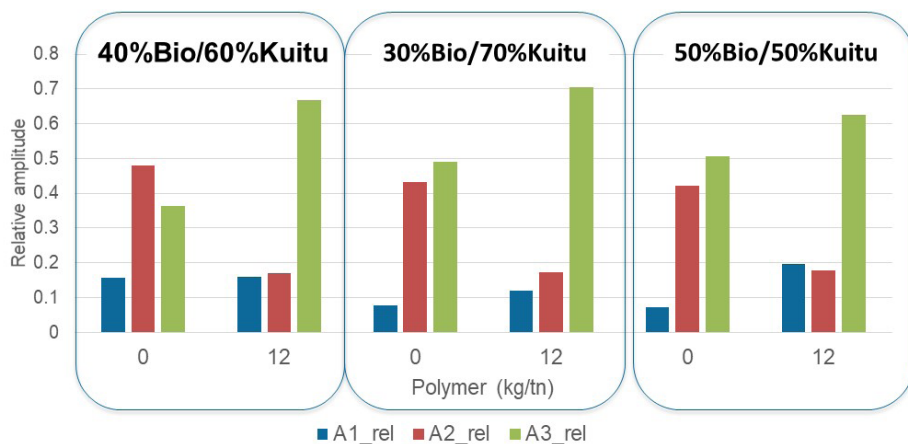
**KUVA 2.** Jätevesinäytteestä mitattu kokeellinen NMR-signaali (kuva Ekaterina Nikolskaya)



**KUVA 3.** Flokkien ulkoisen veden (harmaa), välitilan veden (oranssi) ja solunsisäisen veden (sininen) signaalit, jotka on saatu matemaattisesti sovittamalla kokeellisesta signaalista (kuva Ekaterina Nikolskaya).

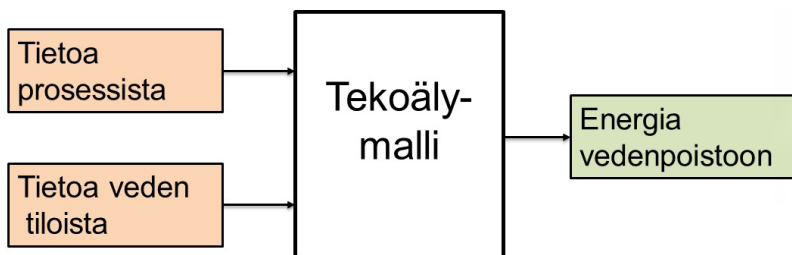
Kuvassa 4 on esitetty NMR-mittaukseen perustuen veden jakaantuminen erilaisilla kuitu- ja biolieteseoksilla. Jätevedenkäsittelyssä polymeerin tehtävänä on siirtää vettä flokkien sisäpuolelta niiden ulkopuolelle, jotta lietteen kuivaminen olisi jatkossa helpompaa. Kuvista voidaan päätellä, että polymeerivaikutus on selvä eli vesi on siirtynyt flokkien välitilasta niiden ulkopuolelle.





**KUVA 4.** Veden jakaantuminen erilaisilla kuitu- ja biolieteseoksilla ennen ja jälkeen polymeerin lisäyksen (12 kg/t). Sininen = flokkien solunsisäinen vesi, punainen = flokkien välitilan vesi ja vihreä = flokkien ulkoinen vesi (kuva Ekaterina Nikolskaya).

Projektin seuraavassa vaiheessa aloitetaan todellisessa jätevesiprosessissa suoritettavat online-mittaukset. Koska Enerve-projektissa keskeisenä tavoitteena on kehittää ja pilotoida uusia mittaus- ja mallinnusmenetelmiä energiatehokkaaseen vedenpoistoon, tullaan NMR-mittauksia yhdistämään tekoälymalleihin, jolloin energiatarpeen ennakoiminen olisi mahdollisimman luotettavaa. Malleissa voidaan myös hyödyntää muuta prosesseihin liittyvää dataa kuvan 5 mukaisesti.



**KUVA 5.** Kaaviokuva tekoälymallista, jossa hyödynnetään NMR-mittaustietoa ja muuta prosessitietoa vedenpoiston energiamäärän ennustamiseen (kuva Ekaterina Nikolskaya).

## YHTEENVETO

Enerve-projektin päätavoitteena on kehittää ja pilotoida uusia mittaus- ja mallinnusmenetelmiä energiatehokkaaseen vedenpoistoon metsäbiotalouden ja bioenergiateollisuuden teollisissa prosesseissa. Tähän mennessä projektissa on keskitetty jätevesinäytteiden mittauksiin. Näytteet on saatu teollisuuden jätevesiprosessista, jossa käsitellään myös yhdyskuntajätevetä. Tulokset ovat lupaavia, joten hankkeessa ollaan aloittamassa online-mittauksia kyseisellä jätevesilaitoksella.

## LÄHTEET

FI128507B - Menetelmä ja laite kuitususpension jauhatusasteen määrittämiseksi, Patentti, 2020, Haltija: Kaakkois-Suomen Ammattikorkeakoulu Oy, Keksijät: Hiltunen Yrjö, Käyhkö Jari ja Tirri Tapio.

FI128877B - NMR mittausyksikkö ja NMR mittausjärjestelmä. Patentti, 2021, Haltija: Kaakkois-Suomen Ammattikorkeakoulu Oy, Keksijät: Yrjö Hiltunen, Ekaterina Nikolskaya.

Liukkonen, M., Nikolskaya, E., Selin, J. & Hiltunen, Y. Water Content Analysis of Sludge Using NMR Relaxation Data and Independent Component Analysis. In: Proc. the 9th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation (Eurosime 2016), pp. 289–293. <https://doi.org/10.1109/EUROSIM.2016.191>.

Liukkonen, M., Silvennoinen, J. & Hiltunen, Y. (2018). Toward better control of water-intensive processes: Case study in fluting manufacturing. IFAC-PapersOnLine; 51(2): 683–688. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.03.116>.

Liukkonen, M., Silvennoinen, J. & Hiltunen, Y. (2019). Machine learning tools for analyzing the quality of fiber-based corrugated medium”, Automaatiopäivät23, 15.–16.5.2019, Oulu, Finland.

Nikolskaya, E. & Hiltunen, Y. (2018). Determination of Carbon Chain Lengths of Fatty Acid Mixtures by Time Domain NMR. Applied Magnetic Resonance, 49: 185–193. <https://doi.org/10.1007/s00723-017-0953-2>.

Nikolskaya, E. & Hiltunen, Y. (2019). Molecular Properties of Fatty Acid Mixtures Estimated by Online Time-Domain NMR. Applied Magnetic Resonance, 50: 159–170. <https://doi.org/10.1007/s00723-018-1046-6>.

Nikolskaya, E., Janhunen, P., Haapalainen, M. & Hiltunen, Y. (2019). Solids content of black liquor measured by online Time-Domain NMR. Applied Sciences, 9(10), 2169. <https://doi.org/10.3390/app9102169>.

Nikolskaya, E., Liukkonen, M. & Hiltunen, Y. 2020. Real-time measurement system for determining metal concentrations in water-intensive processes, Open Engineering Open Engineering, 10 (1), 512–518. <https://doi.org/10.1515/eng-2020-0063>.

Nikolskaya, E., Liukkonen, M., Kankkunen, J. & Hiltunen, Y. (2015). A non-fouling online method for monitoring precipitation of metal ions in mine waters. IFAC-PapersOnLine, 48(17), 098–101. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.10.085>.

Raunio, J., Nikolskaya, E. & Hiltunen, Y. (2018). On-line monitoring of cationic starch gelatinization and retrogradation by <sup>1</sup>H NMR-relaxometry. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 33(4), 625–631. <https://doi.org/10.1515/npprj-2018-0010>

Raunio, J., Nikolskaya, E. & Hiltunen, Y. (2020). Jet-cooked papermaking starches studied using <sup>1</sup>H NMR-relaxometry and viscometry. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*; 35(3): 376–38. <https://doi.org/10.1515/npprj-2019-0092>.

# LIGNIININ MÄÄRITYS MUSTALIPEÄSTÄ KÄYTTÄEN MATALA KENTTÄ <sup>1</sup>H NMR -SPEKTROSKOPIAA

Yrjö Hiltunen & Ekaterina Nikolskaya

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli osoittaa matala kenttä <sup>1</sup>H NMR (Nuclear Magnetic Resonance) -spektroskopian soveltuvuus biojalostamoiden orgaanisen aineen analysointiin. Kohteeksi valittiin ligniinipitoisuuden määrittäminen mustalipeästä. Kalibroitimalli tehtiin käyttämällä kaupallista ligniiniä ja sitä sovellettiin ligniinin määrittämiseen todellisen sellutehtaan mustalipeänäytteenä. Menetelmä on lupaava, ja sitä voitaisiin käyttää esimerkiksi sellutehtaiden rutiinianalyysissä. Tulokset osoittavat, että sellutehtaiden kemiallisten analyysien sovellusten kehittämisellä on paljon potentiaalia tulevaisuudessa.

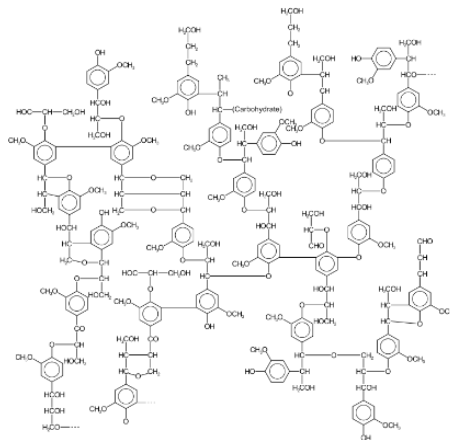
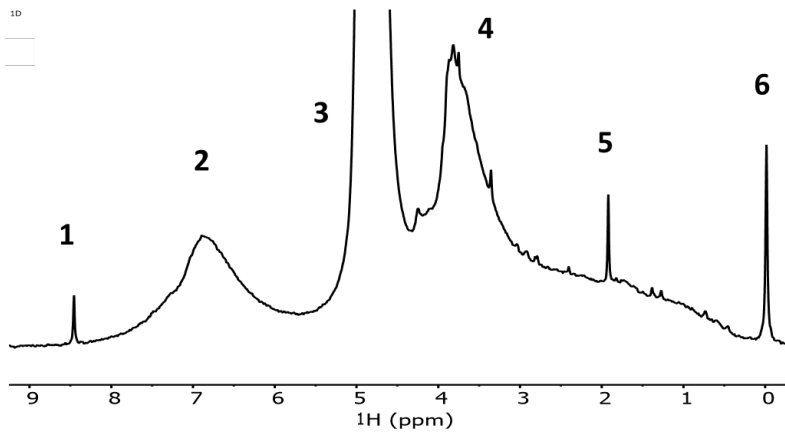
## JOHDANTO

Sellutehtaiden prosessivirtojen kemiallisen koostumuksen tunnistaminen on tärkeää, koska se voi tarjota tarkemman valvonnan tuotteen laadusta ja ominaisuuksista. Matalan kentän <sup>1</sup>H NMR -spektroskopiaa voidaan pitää yhtenä sopivana menetelmänä, koska se voidaan asentaa prosessin linjalle ja se tarjoaa samalla riittävän spektroskooppisen resoluution. Huolimatta eduista, kuten pienemmät koot, helppo käyttöönotto, nopea ja vankka analyysi sekä suhteellisen edulliset kustannukset, tätä tekniikkaa ei vielä käytetä laajasti teollisuudessa. Sen soveltuvuus reaaliaikaisten reaktioiden ja prosessien seurantaan on kuitenkin osoitettu eri sovelluksissa ja toimialoilla (Yu et al. 2021).

Mustalipeä on sellutehtaiden tärkein sivutuote, jonka kemiallinen koostumus olisi tärkeää analysoida, koska se ei ole pelkästään energianlähde tehtailla vaan myös talteen otettavien kemikaalien lähde. Mustalipeän koostumus muuttuu sellutehtaan raaka-aineen alkuperän ja prosessin mukaan. Tyypillisesti mustalipeä sisältää orgaanisia ja epäorgaanisia yhdisteitä sekä vettä. Orgaanisia aineita tarjoavat ligniini, hemiselluloosa, karboksyylihapot ja muut uutteen (hartsit ja rasvahapot). Mustalipeän kiintoainepitoisuus vaihtelee 15–40 painoprosentin välillä, ja ligniinipitoisuus voi nousta 30–45 painoprosenttiin kiintoaineiden kokonaisuudesta (Tian et al. 2015). Ligniinin erottaminen mustalipeästä on tärkeää, koska sitä voidaan käyttää raaka-aineena bioöljylle (Tian et al. 2015), arvokkaille kemikaaleille ja uusille tuotteille (Niemi et al. 2011, Pinto et al. 2015, Tian et al. 2015). Lisäksi ligniinin kvantifointi mustalipeästä auttaa hallitsemaan erotusmenetelmissä käytettyjä prosesseja.

## TULOKSET

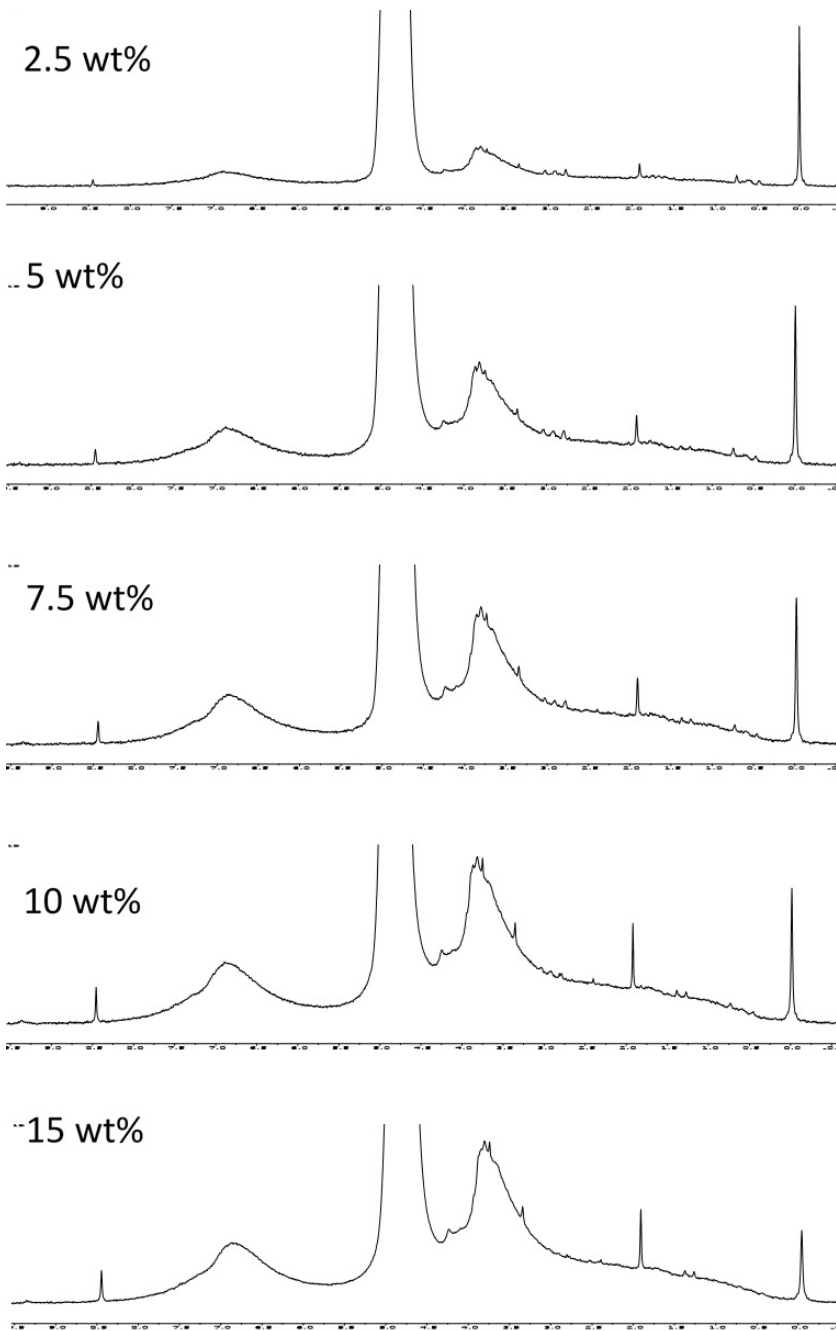
Ligniini on monimutkainen polymeeri, jonka yksityiskohtaista rakennetta on vaikea tunnistaa. Koska ligniinimolekyylit ovat suuria ja ne sisältävät erilaisia rakenteita ja epäsuunnollisyyksia yksiköiden välisissä sidoksissa, on sen  $^1\text{H}$  NMR -spektrit kompleksisia ja yksittäisiä spektriviivoja on vaikea havaita (Wen et al. 2013). Tyypilliset ligniinin matalan kentän  $^1\text{H}$  NMR -spektrit sisältävät kuitenkin alifaattisen, hapetetun alifaattisen ja aromaattisen alueen (Rönnöls et al. 2020). Kuvasta 1 nähdään ligniinin spektri mitattuna Kuitulaboratorion 60 MHz:n  $^1\text{H}$  NMR -spektrometrilla. Kuvassa on myös eräs molekyylirakenne ligniinille (Ligniini\_kuva). TSP (Trimethylsilylpropanoic acid) toimii spektreissä sekä kemiallisen siirtymän että kvantifoinnin referenssinä.



1. formate, 2. aromatic, 3. water, 4. methoxy, 5. acetate, 6. TSP.

**KUVA 1.** Ligniinin matalan kentän  $^1\text{H}$  NMR -spektri ja sen eräs molekyylirakenne (Ligniini\_kuva)

Tässä tutkimuksessa mitattiin kaupallisen ligniinin  $^1\text{H}$ -spektrit erilaisilla konsentraatioilla, jolloin pystyttiin tekemään kalibraatio ligniinipitoisuuksille. Kuvassa 2 on esitettyinä kaupallisen ligniinin vesiliuospektit viidellä eri konsentraatiolla.

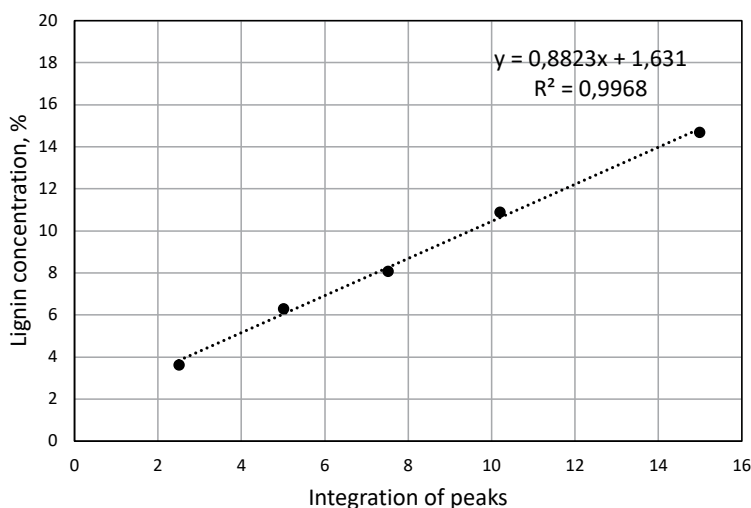


**KUVA 2.** Ligniinin matalan kentän  $^1\text{H}$  NMR -spektri eri konsentraatioilla (kuva Ekaterina Nikolskaya)

Taulukossa 1 on puolestaan esitetty spektreistä integroitujen aromaattisten (6–8 ppm) ja hapetettujen alifaattisten (3–4,4 ppm) alueiden pinta-alat eri ligniinikonsentraatioilla. Pinta-alat on laskettu TSP-referenssin suhteen (kaikissa näytteissä sama konsentraatio TSP-referenssiä). Tulosten perusteella laskettiin kalibraatiosuora, joka on esitetty kuvassa 3. Mallin korrelaatiokerroin on 0,997, joka on erittäin hyvä. Suoran avulla voidaan ligniinipitoisuuksia erilaisissa näytteissä, kuten mustalipeänäytteissä.

**TAULUKKO 1.** <sup>1</sup>H NMR -spektreistä integroitujen aromaattisten ja hapetettujen alifaattisten alueiden pinta-alat eri ligniinikonsentraatioilla

Ligniini, %	8–6 ppm	4,36–3 ppm	Ratio
2,50	3,63	6,9	1,90
5,01	6,3	12,55	1,99
7,51	8,09	16,01	1,98
10,19	10,9	23,11	2,12
14,98	14,69	28,19	1,92

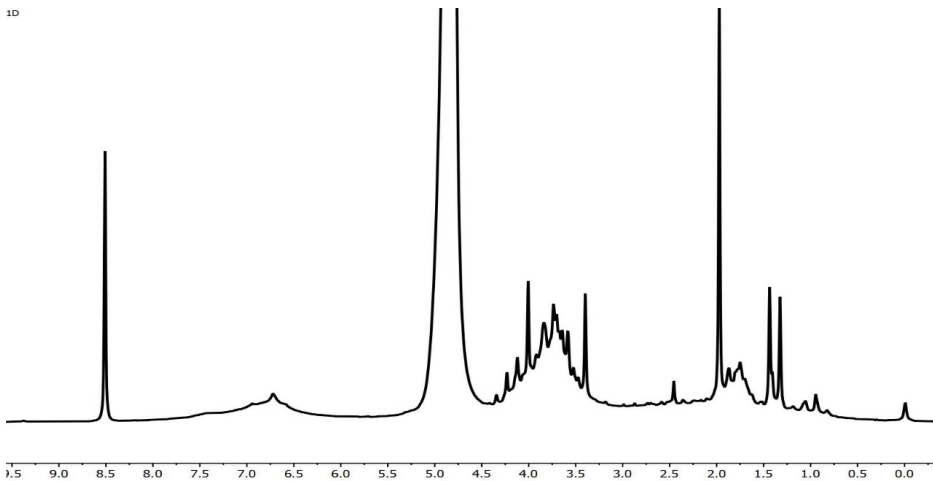


**KUVA 3.** Ligniinin kvantifiointimalli (kuva Ekaterina Nikolskaya)

Rönnols et al. (2020) esittivät julkaisussaan, että happipitoisten alifaattisten ja aromaattisten signaalien integraalien suhde voi kertoa prosessissa käytetyn puun alkuperästä. Havupuun osalta tämä suhde oli 1,92 ja lehtipuun 3,39. Taulukkoon 1 on myös laskettu vastaava suhde kalibraationäytteille. Suhteiden keskiarvo on 1,98, joten kyseinen kaupallinen ligniini on lähtöisin havupuusta.



Kuvassa 4 on esitetty syöttölipeästä mitattu  $^1\text{H}$ -spektri, jossa on selvästi havaittavissa lisäsignaaleja alifaattisilla (0,5–2 ppm) ja hapetetuilla alifaattisilla (3–4,4 ppm) alueilla, jotka ovat peräisin esimerkiksi hemiselluloosasta ja rasvahapoista. Toisaalta aromaattinen alue on edelleen pääsääntöisesti peräisin ligniinistä, joten sitä voidaan käyttää ligniinipitoisuuden määrittämiseen. Tämän alueen pinta-ala TSP-referenssin suhteen on syöttölipeänäytteesä 15,1, joten kuvassa 3 olevan kalibraation perusteella syöttölipeän ligniinipitoisuus on 14,9 wt%. Laajentamalla kalibraatiota voitaisiin myös määrittää pitoisuudet esimerkiksi yksiköissä g/l, mikä olisi vielä käyttökelpoisempaa. Tulokset kuitenkin osoittavat, että matala kenttä NMR -spektroskopia soveltuu hyvin biojalostamoiden orgaanisten aineiden pitoisuuksien määrittämiseen.



**KUVA 4.** Mustalipeän (syöttölipeä) matala kenttä  $^1\text{H}$  NMR -spektri (kuva Ekaterina Nikolskaya)

## YHTEENVETO

Olemme osoittaneet, että matalan kentän  $^1\text{H}$  NMR -spektroskopiaa voidaan soveltaa ligniinin määrittämiseen mustalipeänäytteistä. Työssä toteutettiin kalibroitimalli, joka perustuu lineaariseen riippuvuuteen ligniinimolekyylien aromaattisten rakenteiden ja ligniinipitoisuuden välillä. Vaikka mustalipeällä on monimutkainen koostumus ja samalla  $^1\text{H}$ -spektri, tämä malli mahdollistaa mustalipeän ligniinipitoisuuden kvantifoinnin, koska mustalipeän spektrin aromaattisella alueella ligniinistä saatu signaali on hallitseva.

## LÄHTEET

Ligniini\_kuva. real name: Karol Głabpl.wiki: Karol007commons: Karol007e-mail: kamikaze007 (at) tlen.pl, CC BY-SA 3.0 <<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, via Wikimedia Commons Saatavissa: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/ee/Lignin\\_structure.svg/500px-Lignin\\_structure.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/ee/Lignin_structure.svg/500px-Lignin_structure.svg.png).

Niemi, H., Lahti, J., Hatakka, H., Kärki, S., Rovio, S., Kallioinen, M., Mänttari, M. & Louhi-Kultanen, M. (2011). Fractionation of Organic and Inorganic Compounds from Black Liquor by Combining Membrane Separation and Crystallization. *Chem. Eng. Technol.*, 34, No. 4, 593–598. <https://doi.org/10.1002/ceat.201000520>.

Pinto, P.C.R., Oliveira, C., Costa, C.A., Gaspar, A., Faria, T., Ataíde, J. & Rodrigues, A.E. (2015). Kraft delignification of energy crops in view of pulp production and lignin valorization. *Industrial Crops and Products*, 71, 153–162.

Rönnols, J., Danieli, E., Freichels, H. & Aldaeus, F. (2020). Lignin analysis with benchtop NMR spectroscopy. *Holzforschung*, vol. 74, no. 2, pp. 226–231. <https://doi.org/10.1515/hf-2018-0282>.

Tian, Z., Zong, L., Niu, R., Wang, X., Li, Y. & Ai, S. (2015). Recovery and characterization of lignin from alkaline straw pulping black liquor: As feedstock for bio-oil research. *Inc. J. Appl. Polym. Sci.* 132, 42057. <https://doi.org/10.1002/APP.42057>

Yu, H.-Y., Myoung, S. & Ahn, S. (2021) Recent Applications of Benchtop Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy. *Magnetochemistry*, 7, 121. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry7090121>.

Wen, J.-L., Sun, S.-L., Xue, B.-L. & Sun, R.-C. (2013). Recent Advances in Characterization of Lignin Polymer by Solution-State Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Methodology. *Materials*, 6, 359–391; <https://doi.org/10.3390/ma6010359>.

# KOIVUHAKKEEN KUUMAVESIUUTTO PAKKOKIERTOKEITTIMELLÄ

Lotta Pirinen & Tuomas Vellonen & Marja Mikola  
& Idamaria Romakkaniemi

Hemiselluloosat ovat maailman toiseksi yleisimpiä biopolymeerejä, ja niiden hyödyntämispotentiaali on valtava. Niitä kuitenkin hyödynnetään tämän päivän metsäteollisuudessa rajallisesti nykyisten erotusprosessien kustannustehottomuuden vuoksi. Kuitulaboratoriolla on tutkittu kemiallisessa massan valmistuksessa irtoavan hemiselluloosan erotusta keittohakkeesta ennen varsinaista käsittelyprosessia ja pyritty näin parantamaan biojalostamoiden hemiselluloosavirtojen hyödynnettävyyttä. Tässä tutkimuksessa pyrittiin talteenottamaan koivuhakkeesta helposti irtoavat pitkäketjuiset ksylaanit esihydrolyysillä sekä etsimään optimaalinen uuttolämpötila ja -aika prosessin skaalaukselle varten. Esihydrolyysi toteutettiin pakkokiertokeittimellä paineistettuna kuumavesiuuttuna. Samalla selvitettiin uutto-olosuhdeiden vaikutus saatavien hemiselluloosapitoisten uutteen koostumukseen ja pitoisuuksiin.

Tutkimus on osa Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Kuitulaboratorion ja Oulun yliopiston Kemiallisen prosessitekniikan tutkimusyksikön yhteistyönä toteutettavaa Hemiselluloosan tehokas hyödyntäminen biojalostuksessa -hanketta. Hankkeessa on tutkittu mahdollisuuksia talteenottaa hemiselluloosia kemiallisen metsäteollisuuden sivuvirtana. Rahoittajina hankkeessa toimii Euroopan aluekehitysrahasto Pohjois-Pohjanmaan ja Etelä-Savon maakuntaliitton kautta sekä Andritz Oy, StI Oy, Vaisala Oyj ja Mondi Powerflute Oy.

## JOHDANTO

Puu koostuu pääasiassa kolmesta komponentista, selluloosasta (40–45 %), ligniinistä (20–30 %) ja hemiselluloosista (25–35 %), lisäksi puussa on uuteaineita ja epäorgaanisia yhdisteitä (Alén 2000, 28). Perinteinen kemiallinen metsäteollisuus on keskittynyt hyödyntämään näistä materiaaleista pääasiassa selluloosan, mutta muiden komponenttien hyötykäyttö on vähäisempää. Ligniini käytetään käytännössä aina energiantuotantoon sen hyvän lämpöarvon vuoksi. Hemiselluloosat pyritään säilyttämään lopputuotteessa, mutta puuta käsitellessä hemiselluloosia liukenee kuitenkin aina. Prosesseissa liuenneet hemiselluloosat käytetään perinteisesti ligniinin mukana energiantuotantoon, vaikka sen lämpöarvo onkin huono. Hemiselluloosien ja ligniinin hyödyntämismahdollisuuksia biojalostamoissa kuitenkin pyritään kehittämään tulevaisuuden tarpeisiin.

Hemiselluloosan tehokasta talteenottoa on pyritty kehittämään joko poistamalla koko hemiselluloosafraktio massasta ennen tai jälkeen pääkäsittelyn tai ottamalla liuenneet hemiselluloosat talteen prosessivesistä. Esimerkiksi esihydrolyysi on yleisesti liukoselluntuotannossa käytetty prosessi, jolla poistetaan hemiselluloosat massasta ennen alkalista keittoa. Otettaessa talteen kaikki massan sisältämä hemiselluloosa itse päätuotteen saanto ja laatu kuitenkin heikkenevät hemiselluloosan vaikuttaessa merkittävästi massan lujuusominaisuuksiin. Prosessivesistä talteen otetut hemiselluloosat taas ovat pääsääntöisesti lyhytketjuisia pääprosessin pilkkoessa sakkariidiketjuja.

## HEMISELLULOOSA

Hemiselluloosat ovat erilaisista sakkariidisyksiköistä koostuvia, rakenteeltaan haarautuneita hiilihydraattipolymeerejä. Niiden tehtävä puussa on vahvistaa puukuidun rakennetta yhdistämällä selluloosa ja ligniini toisiinsa. Samalla hemiselluloosat säätelevät puun kosteustasapainoa yhdessä ligniinin kanssa. Rakennusyksikköinä ovat viisihiiliset pentoosit, kuusihiiliset heksoosit, deoksiheksoosit ja uronihapot. Hemiselluloosien polymerisaatioaste (*Degree of Polymerization*, DP) on tyypillisesti alle 200. (Alén 2000.)

Eri puiden hemiselluloosat eroavat merkittävästi toisistaan niin rakenteeltaan, koostumukseltaan kuin sijainniltaan. Havupuun hemiselluloosat ovat suurimmaksi osaksi glukomannaaneja, kun taas lehtipuiden hemiselluloosat koostuvat pääosin ksylaaneista. (Sjöström & Janson 1977, 138.)

Lehtipuissa ksylaanit esiintyvät glukuronoksylaanina, jota on 20–30 prosenttia puun kuiva-ainepitoisuudesta. Glukuroniksylaani koostuu toisiinsa sitoutuneista ksyloosiyksiköistä. Ksylaaniketjuun on liittynyt noin joka kymmenenteen ksyloosiyksikköön glukuronihapporyhmiä. Pääketjun ksyloosiyksiköiden hydroksyyliyhdistelmäosa on asetyloitunut. Lisäksi voi esiintyä pieniä määriä L-ramnoosia ja galakturonihapporyhmiä. (Alén 2000, 37.)

Hemiselluloosien liukenemismekanismit ovat erilaisia eri pH-alueilla. Happamissa olosuhteissa hemiselluloosista lohkeavat asetyyliyhdistelmät muodostavat etikkahappoa, joka happamoittaa liuosta. pH:n laskettua riittävän alhaiselle tasolle hemiselluloosat alkavat liueta. pH:n edelleen laskiessa liuenneet oligomeerit pilkkoutuvat monomeereiksi ja siitä edelleen furaaneiksi. Alkalisissa olosuhteissa hemiselluloosat pilkkoutuvat päätepilkkoutumis- eli peeling-reaktion kautta, mutta myös alkalista hydrolyysiä tapahtuu. Ksylaani kestää alkalisia olosuhteita glukomannaania paremmin, kun taas happamissa olosuhteissa ksylaani hydrolysoituu helpommin kuin glukomannaani. (Malinen & Sjöström 1977, 148–153.)

## ESIHYDROLYYSI PAKKOKIERTOKEITTIMELLÄ

Hemiselluloosan tehokas hyödyntäminen biojalostuksessa -hankkeessa on tutkittu koivuhakkeen esihydrolyysiä, joka toteutettiin pakkokiertokeittimellä panostoimisella kuumavesiuutolla. Tässä tutkimuksessa kuumavesiuutolla pyrittiin uuttamaan helposti liukeneva ksylaani puumateriaalista ennen varsinaista tuotantoprosessia. Aiemmin Kuitulaboratoriolla on toteutettu galaktoglukomannaanin uuttoa kuusen sahanpurusta BOKASVU-hankkeessa.

Pakkokiertokeitin (Haato) on panostoiminen laboratoriokeitin, joka kierättää uuttonestettä pumpun avulla keittosäiliöstä lämmönvaihtimen kautta takaisin keittosäiliöön. Keittimen liuosäiliö mahdollistaa kemikaalien lisäyksen kesken uuton. Pakkokiertokeittimen tilavuus on 10 dm<sup>3</sup>, maksimikäyttölämpötila 200 °C ja maksimipaine 16 bar (abs). Pakkokiertokeitin on esitetty kuvassa 1.



**KUVA 1.** Pakkokiertokeitin Haato (kuva Lotta Pirinen)

Kuitulaboratoriolla esihydrolyysi toteutettiin kuumavesiuuttona eli autohydrolyysinä (pressurized hot water extraction, PHWE). PHWE:ssa liuottimena toimii pelkkä kuuma vesi. Lämpötilan kohotessa veden permittiivisyys, viskositeetti ja pintajännitys muuttuvat, jolloin vesi liuottaa helpommin orgaanisia aineita. Vesi saa glukuronoksyylanin asetyyliryhmät

liukenemaan, ja niistä muodostuva etikkahappo saa keittoliuoksen happamoitumaan ja hydrolyysin käynnistymään. Hemiselluloosien liukoisuus kasvaa lämpötilan kohotessa ja uuttoajan pidetessä. Uuton intensiivisyyden kasvaessa hemiselluloosien pilkkoutuminen nopeutuu ja polymerisaatioaste pienenee. (Teo ym. 2010.)

Hemiselluloosan uuttuminen esihydrolyysissä voidaan esittää yhdellä muuttujalla, prehydrolyysitekijällä eli P-tekijällä. P-tekijä kuvaa hemiselluloosan uuttumista ajan sekä lämpötilan funktiona, ja se on johdettu ksylaanin aktivoitumisenergiasta. P-tekijä määritetään yhtälöllä 1. P-tekijä on suhteellisen hyvin verrannollinen puun delignifioinnissa käytettyyn H-tekijään (ligniinin liukenemisen suhteellinen nopeus). Hemiselluloosasaantoon ja saataviin tuotteisiin vaikuttaa uuttolämpötilan ja -ajan lisäksi muitakin tekijöitä, kuten hydrolysaatin pH ja hakkeen palakoko. (Sixta ym. 2006.)

$$P - factor = \int_0^t \frac{k(T)}{k_{100^\circ\text{C}}} dt = \int_0^t e^{40.48 - \frac{15106}{T}} dt \quad (1)$$

jossa

$T$  lämpötila [K]

$t$  aika [h]

## MENETELMÄT JA MATERIAALIT

Tutkimuksessa käytettiin 8–12,5 mm:n palakokoon seulottua koivuhaketta (Mondi Powerflute, Kuopio). Uutto tapahtui puu–nestesuhteessa 200 g/l jokaisen koepisteen kokonaistilavuuden ollessa 10 litraa. Haketta uutettiin pakkokiertokeitimellä 150 °C:n, 160 °C:n ja 170 °C:n lämpötiloissa 30, 45, 60 ja 90 minuuttia ja lisäksi 160 °C:n lämpötilassa 120 minuuttia.

Näytteet analysoitiin Oulun yliopiston Kemiallisen prosessitekniikan tutkimusyksikössä. Analyysimenetelmänä käytettiin korkean erotuskyvyn nestekromatografiaa (High Performance Liquid Chromatography, HPLC), jolla mitattiin ksyloosi-, glukoosi- ja arabiinimonomeerit sekä etikkahappo-, furfuraali- ja hydroksimetyylifurfuraalipitoisuudet. Oligomeeristen sokereiden mittausta varten näytteille tehtiin happokatalysoitu totaalihydrolyysi, jonka jälkeen pitoisuudet mitattiin edellä mainitulla HPLC-analyysillä. (NREL/TP-510-42618.)

## TULOKSET

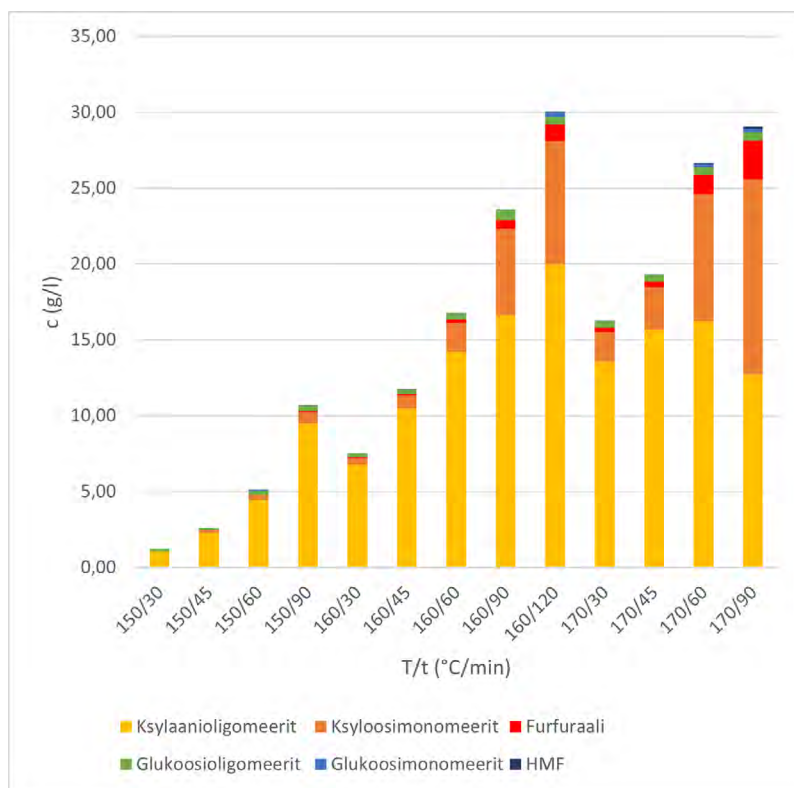
Taulukossa 1 on esitetty esihydrolyysikokeiden uutto-olosuhteet ja P-tekijät, hakkeen jään-nöshemiselluloosapitoisuudet sekä hydrolysaattien kuiva-aineet ja kokonaissakkaridipitoisuudet. Uuttamattoman hakkeen hemiselluloosapitoisuus oli 27,3 prosenttia.

**TAULUKKO 1.** Esihydrolyysien uutto-olosuhteet ja P-tekijät, hakkeiden jäännöshemiseluloosapitoisuudet ja hydrolysaattien kuiva-aineet sekä sakkariidipitoisuudet.

Näyte		P-tekijä	Loppu-pH	Hakkeen jäännös hemiseluloosa (%)	Uutteen kuiva-aine c (g/l)	Kokonais-sakkariidipitoisuus c (g/l)
T (°C)	t (min)					
150	30	60	3,6	26,2	4,13	1,3
150	45	89	3,5	22,4	6,29	2,6
150	60	119	3,4	25,0	9,81	5,1
150	90	179	3,1	26,6	17,23	10,6
160	30	136	3,1	26,6	13,05	7,5
160	45	204	3,1	22,5	17,50	11,7
160	60	272	3,0	24,7	23,49	16,6
160	90	408	2,9	23,2	31,36	23,0
160	120	544	3,0	19,5	37,28	28,9
170	30	299	3,1	20,7	25,16	16,0
170	45	448	3,4	19,4	23,16	18,9
170	60	597	3,0	17,5	39,19	25,2
170	90	896	2,9	15,7	34,51	26,4

Kuvassa 2 on esitetty uuttoajan ja -lämpötilan vaikutus hydrolysaatin sakkariidipitoisuuksiin. Kaaviossa on esitetty hydrolysaattiin sakkariidiligomeerit ja -monomeerit sekä furaanit.





**KUVA 2.** Uuttoajan ja -lämpötilan vaikutus uutteen sakkariidipitoisuuksiin

Taulukosta 1 ja kuvasta 2 voidaan todeta kasvavan uuttolämpötilan ja uuttoajan lisäävän uutuvien sakkariidien määrää, mutta liian intensiivisen hydrolyysin pilkkovan oligomeerit monomeereiksi ja siitä edelleen furaneiksi, kuten odotettavissa olikin.

## YHTEENVETO

Oligomeeristä ksylaania saadaan uutettua koivuhakkeesta pakkokiertokeitimellä toteutetulla panostoimisella kuumavesiuutolla. 150 °C:n lämpötilassa 90 minuuttia tai 160 °C:ssa 45–60 minuuttia uutetuissa hydrolysaateissa ksylaania saatiin uutettua kohtalaisia määriä ilman, että oligomeerit alkoivat pilkkoutua suuremmissa määrin. 150 °C:n lämpötilassa uuttoajan pituus voi kuitenkin aiheuttaa ongelmia teolliseen mittakaavaan skaalattaessa. Jatkotutkimuksia varten optimaalisena uuttolämpötilana voidaan siis pitää 160 °C:ta ja uuttoaikana 45–60 minuuttia.

Jatkokäsittelynä ksylaani tulee eristää ja puhdistaa hydrolysaatista. Kuitulaboratoriolla on tutkittu uutteen konsentrointia alipainehaihdutuksella sekä ultrasuodatuksella ja ksylaanin saostusta etanolilla. Tästä lisää artikkelissa *Ksylaanin saostaminen esihydrolysaatista*. Olenaista on myös selvittää prosessin vaikutukset lopputuotteen laatuun eli tutkia, kuinka esihydrolyysillä tehty hemiselluloosan poisto muuttaa kartonkimassan ominaisuuksia.

## LÄHTEET

- Alén, R. 2000. Structure and chemical composition of wood. Teoksessa Technical Association of the Pulp and Paper Industry, Suomen paperi-insinöörien yhdistys, Stenius, P., Paulapuro, H. & Gullichsen, J. Papermaking science and technology: Book 3, Forest products chemistry. Helsinki: Fapet.
- Malinen, R. & Sjöström, E. 1977. Hiilihydraattien reaktiot. Teoksessa Jensen, W. (toim.) Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja. 1, Puukemia. 2. painos. Helsinki: Suomen paperi-insinöörien yhdistys.
- NREL/TP-510-42618. 2012. Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass.
- Sixta, H. 2006. Pulp properties and applications. Teoksessa Sixta, H. (toim.) Handbook of pulp. Weinheim: Wiley-VCH.
- Sjöström, E. & Janson, J. 1977. Hemiselluloosat. Teoksessa Jensen, W. (toim.) Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja. 1, Puukemia. 2. painos. Helsinki: Suomen paperi-insinöörien yhdistys.
- Teo, C. C., Tan, S. N., Yong, J. W. H., Hew, C. S. & Ong, E. S. 2010. Pressur-ized hot water extraction (PHWE). Journal of Chromatography A 1217 (16) 2484–2494. Verkkolehti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.12.050> [viitattu 3.5.2021].

# KSYLAANIN SAOSTAMINEN ESIHYDROLYSAATISTA

Lotta Pirinen & Idamaria Romakkaniemi

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Kuitulaboratoriolla on tutkittu oligomeerisen ksylaanin eristämistä koivun esihydrolysaatista etanolisaostuksella, kun esikäsittelevaihtoehtoina oli alipainehaihdutus ja ultrasuodatus. Esihydrolysaatti on laimeaa hemiselluloosapitoista liuosta, joka on uutettu puusta ennen pääprosessia. Uutossa hydrolysaattiin liukenee hemiselluloosien lisäksi uuteaineita ja muita puun liukoisia ainesosia. Ennen ksylaanin jatkojalostusta se täytyy eristää vedestä ja puhdistaa uutteen muista komponenteista esimerkiksi etanolisaostuksella. Ennen saostusta tapahtuva uutteen konsentrointi vähentää etanolin tarvetta ja pienentää näin prosessin kustannuksia.

Hemiselluloosan tehokas hyödyntäminen biojalostuksessa -hankkeessa on tutkittu hemiselluloosan talteenottomahdollisuuksia kemiallisen metsäteollisuuden sivutuotteena. Hankkeessa on pyritty talteenottamaan normaalisti keitossa irtoava hemiselluloosa ennen varsinaista keittoprosessia. Hanke toteutetaan Oulun yliopiston Kemiallisen prosessitekniiikan tutkimusyksikön ja Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Kuitulaboratorion yhteistyönä. Rahoittajina hankkeessa toimii Euroopan aluekehitysrahasto Pohjois-Pohjanmaan ja Etelä-Savon maakuntaliittojen kautta sekä Andritz Oy, St1 Oy, Vaisala Oyj ja Mondi Powerflute Oy.

## JOHDANTO

Hemiselluloosat ovat erilaisista sakkariidisyksiköistä koostuvia hiilihydraattipolymeerejä, joita esiintyy kaikissa kasveissa sammalista puihin. Hemiselluloosaa kuitenkin hyödynnetään kemiallisessa metsäteollisuudessa rajallisesti, vaikka sen jalostuspotentiaali on valtaisa.

Lehtipuiden yleisin hemiselluloosa on ksylaani, joka on hyödynnettävissä useissa eri soveluksissa. Siitä voidaan valmistaa bulkkituotteita, kuten furfuraalia ja etanolia, teollisuuden sekä liikenteen tarpeisiin. Ksylaanista voidaan valmistaa elintarvikkeita, lisäravinteita sekä rehuja ihmisten ja eläinten ravinnoksi. Ksylaanista valmistetuista elintarvikkeista ehdottomasti tunnetuin on koivusokeriksikin kutsuttu ksylytoli. Ksylaania voidaan käyttää myös useiden korkean lisäarvon tuotteiden, kuten barrierikalvojen tai hydrogeelien, valmistukseen. (Naidu ym. 2018)

Lähes kaikki nykyiset ksylaanin jatkojalostusvaihtoehdot tarvitsevat raaka-ainekseen hydrosyylaattiliuosta väkevämpää ja puhtaampaa ksylaania. Ksylaani, kuten muutkin he-

miselluloosat, voidaan saostaa hydrolysaatista veteen sekoittuvalla orgaanisella liuottimella. Tällaisia liottimia ovat esimerkiksi etanoli, metanoli ja asetoni. Lisäämällä uutteeseen riittävästi liuotinta hemiselluloosien liukoisuus veteen pienenee ja hemiselluloosat saostuvat. (Al-Rudainy 2020.)

Etanolin käytön etuja ksylaanin saostuksessa ovat sen helppokäyttöisyys ja turvallisuus. Songin ym. (2013) mukaan lisäävän etanolin määrällä pystytään vaikuttamaan saostuvan hemiselluloosan määrään, mutta saannon kasvaessa hemiselluloosamolekyylien koko pienenee. Willförin ym. (2008) mukaan optimaalinen vesi–etanolisuhde pitempiketjuisille oligosakkarideille on 4:1. Ligniinin saostaminen orgaanisella liuottimella tapahtuu hemiselluloosien saostamista pienemmissä sekoitussuhteissa (Song ym. 2013).

Ennen saostamista hydrolysaatti on konsentroitava. Tässä tutkimuksessa perehdyttiin kahteen vaihtoehtoiseen konsentroitimenetelmään, alipainehaihdutukseen ja ultrasuodatukseen. Alipainehaihdutus soveltuu lämpöherkkien näytteiden väkevöimiseen. Veden kiehumislämpötila muuttuu paineen vaikutuksesta, joten painetta laskemalla höyrystymiseen vaadittava lämpötila alenee. Koska hydrolysaatin koostumuksen tai pH:n ei haluttu muuttuvan konsentroinnin aikana, oli haihdutuslämpötilan edullista olla normaalihöyrystymislämpötilaa alhaisempi.

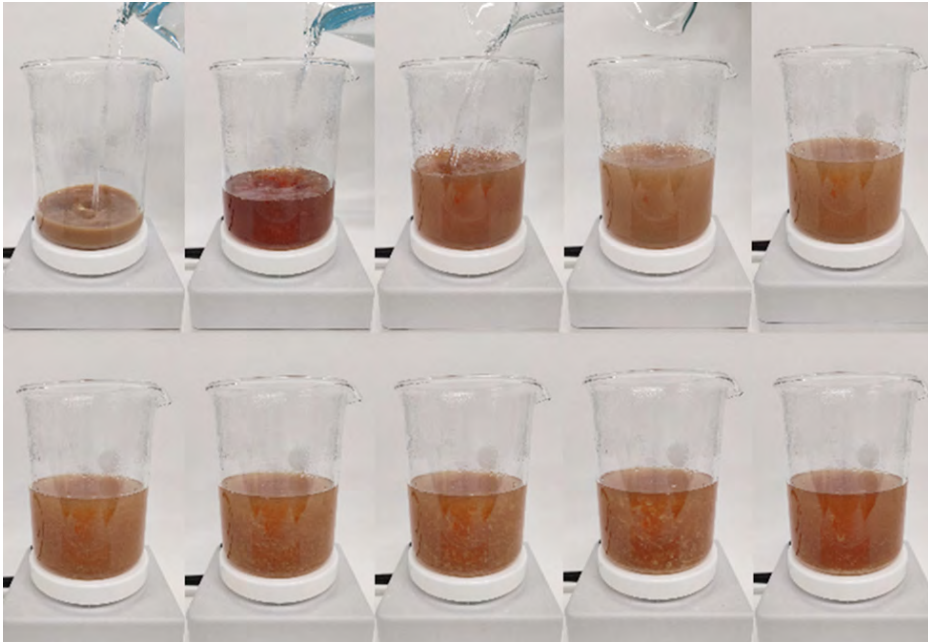
Ultrasuodatuksessa membraanikalvo toimii selektiivisenä esteenä, joka pidättää tiettyä kokoluokkaa suuremmat partikkelit ja päästää lävitseen hienompijakaisen aineksen (Tolonen 2018). Erottelutapahtuman ajavana voimana toimii usein paine-ero.

## MENETELMÄT JA MATERIAALIT

Tutkimuksessa käytetyt esihydrolysaattinäytteet oli uutettu koivuhakkeesta pakkokiertoiteittimellä kuumavesiuuttuna (Pressurized Hot Water Extraction, PHWE) toteutetulla esihydrolyysillä. Haketta uutettiin pakkokiertoiteittimellä 150 °C:n, 160 °C:n ja 170 °C:n lämpötiloissa 30, 45, 60, 90 ja 120 minuuttia. Uuttoprosessi ja sen tulokset on esitetty tarkemmin artikkelissa *Koivuhakkeen kuumavesiuutto pakkokiertoiteittimellä*. Uutettaessa hemiselluloosia lehtipuusta uutteeseen liukenee oligomeeristä ksylaania ja glukoosia. Uuton jatkuessa hemiselluloosaoligomeerit pilkkoutuvat monomeereiksi ja siitä edelleen ksyloosi furfuraaliksi ja glukoosi hydroksimetyylifurfuraaliksi (HMF).

PHWE:n jälkeen esihydrolysaateista otettiin näytteet väkevöitäväksi alipainehaihdutuksella. Haihdutus toteutettiin Heidolph VV2000 -rotavaporilla. 600 ml uutetta haihdutettiin noin puoleen alkuperäisestä tilavuudesta 0,2 bar:n absoluuttisessa paineessa noin 60 °C:n lämpötilassa. Haihdutuksen jälkeen näytteet jäähdytettiin 4,0 °C:n lämpötilaan.

Väkevöidyt hydrolysaattinäytteet saostettiin denaturoidulla etanolilla (Industol PEA2, Altia) etanoli-vesisuhteella 4:1. Kylmän (4 °C) uutteen joukkoon lisättiin näytteen tilavuuteen nähden nelinkertainen määrä etanolia samalla uutetta sekoittaen. Sekoitus lopetettiin ksylaanin alettua flokkaantumaan. Sekoituksen loputtua flokit kasvoivat ja lopuksi vajosivat näyteastian pohjalle. Kuvassa 1 on esitetty saostustapahtuman eteneminen.



**KUVA 1.** Alipainehaihdutetun esihydrolysaatin etanolisaostuksen eteneminen (kuva Lotta Pirinen).

Saostuksen jälkeen uutesta poistettiin neste alipainesuodatuksella. Dekanterilasien pohjalle painunut hemiselluloosapitoinen sakka kaadettiin suodatinpaperille suodatuksen jälkeen. Lopuksi sakkanäytteet kuivattiin 55 °C:ssa lämpökaapissa. Kuivista näytteistä analysoitiin kuiva-ainepitoisuus, jota verrattiin alkuperäisen hydrolysaatin kuiva-ainepitoisuuteen. Tarkempi sokerianalyysi tehtiin näytteille, joiden kuiva-ainesaanto oli yli viisi prosenttia.

Ultrasuodatus toteutettiin näytteille, joista saatiin haihdutus-saostuskokeissa saostumaan kohtalaisia määriä ksylaania. Kalvosuodatus tehtiin Merck Milliporen Amicon 400 mL Stirred Cell -ultrasuodatuslaitteistolla (kuva 2). Näytteiden suodatuksessa käytettiin regeneroidusta selluloosasta (*Regenerated Cellulose*, RC) valmistettuja kalvoja, joiden leikkauskoko (*Molecular Weight Cut-Off*, MWCO) oli 10 kDa. Suodatuksissa käytettiin kolmen baarin painetta, joka toteutettiin aluksi ilmalla ja mahdollisen hapettumisen tutkimiseksi myös typpellä. Suodatettavien hydrolysaattinäytteiden koot olivat 150–300 ml ja suodatusaika 60–80 minuuttia. Suodatuksen jälkeen näytteet saostettiin samalla menetelmällä kuin alipainehaihdutetutkin näytteet.



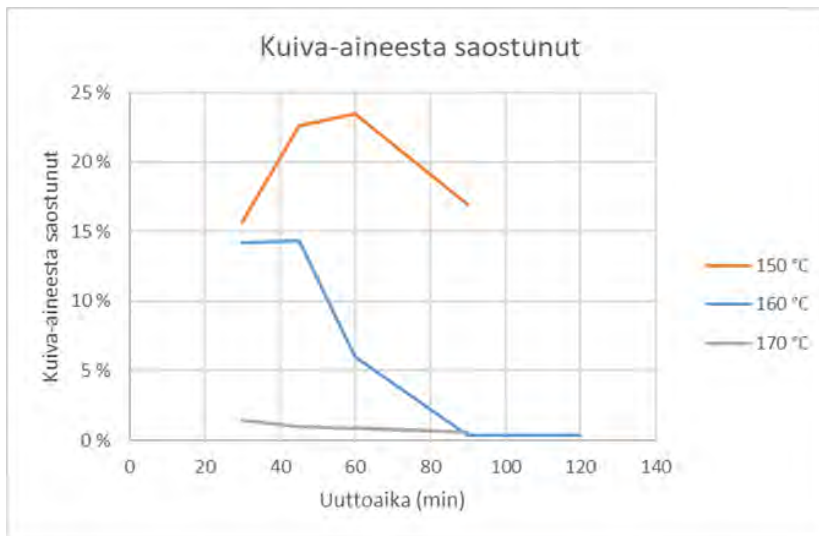
**KUVA 2.** Amicon 400 mL Stirred cell, Merck Millipore (kuva Lotta Pirinen)

Näytteiden hemiselluloosapitoisuudet analysoitiin Oulun yliopiston Kemiallisen prosessitekniikan tutkimusyksikössä. Analyysimenetelmänä käytettiin korkean erotuskyvyn nestekromatografiaa (*High Performance Liquid Chromatography*, HPLC), jolla mitattiin ksyloosi-, glukoosi- ja arabinoosimonomeerit, etikkahappo, sekä furfuraali- ja HMF-pitoisuudet. Oligomeeristen sokereiden mittausta varten näytteille tehtiin happokatalysoitu totaalihydrolyysi, jonka jälkeen pitoisuudet saatiin mitattua edellisellä HPLC-analyysillä. (NREL/TP-510-42618.)

## TULOKSET

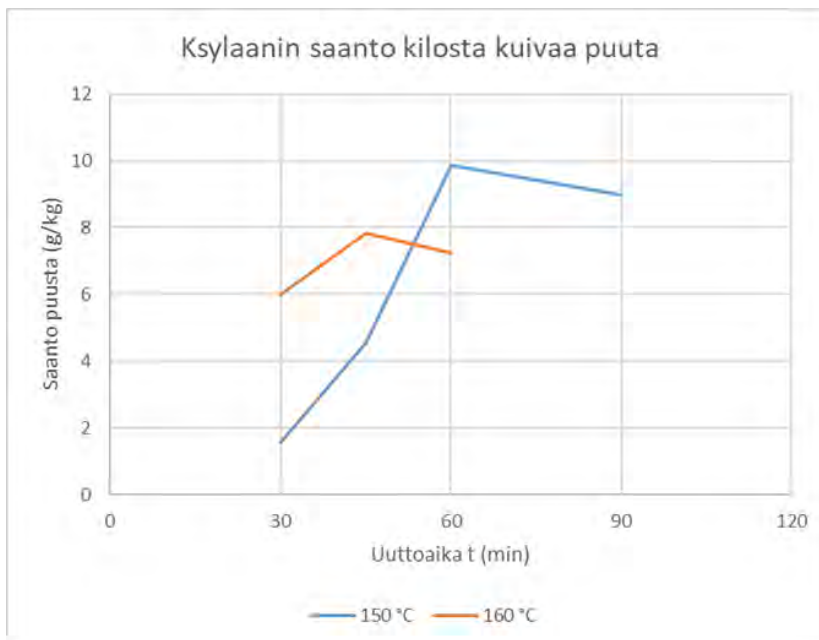
Hydrolysaattinäytteet konsentroitiin alipainehaihdutuksella noin puoleen alkuperäisestä. Haihdutettaessa furfuraali ja osa etikkahaposta haihtuvat veden mukana lauhteeseen, kun muut uutteen analysoidut komponentit pysyvät konsentraatissa.

Alipainehaihdutetuista näytteistä saatiin etanolilla saostumaan enimmillään 23,5 prosenttia alkuperäisen uutteen kuiva-aineesta (150 °C / 60 min). Kaikkien näytteiden kuiva-ainesaannot on esitetty kuvassa 3.



**KUVA 3.** Alipainehaihdutettujen ja etanolisaostettujen hydrolysaattinäytteiden kuiva-ainesannot alkuperäisen hydrolysaatin kuiva-aineesta.

Tarkemmin analysoiduista näytteistä eniten ksylaania saatiin hydrolysaattinäytteestä, jota oli uutettu 150 °C:ssa 60 minuuttia. Tästä uutteesta saatiin saostettua 9,9 grammaa ksylaania kilosta kuivaa puuta. Kuvassa 4 on esitetty kaikkien analysoitujen uutteiden ksylaanisannot uuttoajan funktiona.



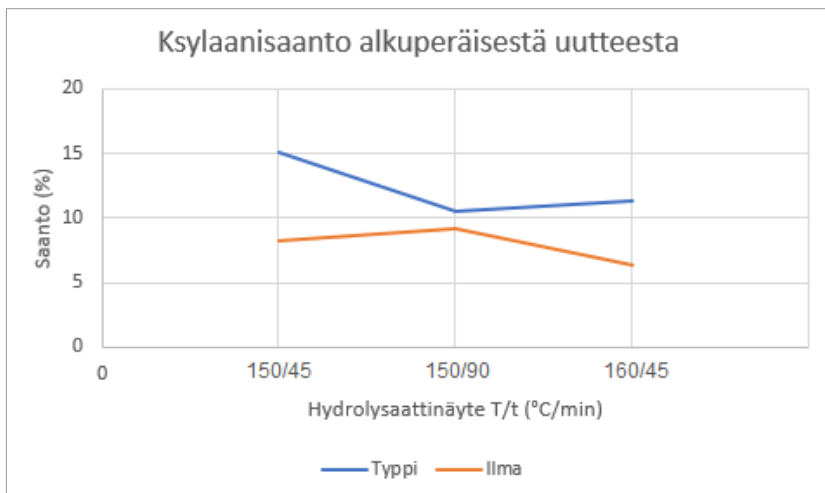
**KUVA 4.** Alipainehaihdutettujen ja etanolisaostettujen hydrolysaattinäytteiden kuiva-ainesannot kilosta kuivaa puuta.



Ultrasuodatuksessa hydrolysaattinäytteistä suodatettiin permeaattiin noin kolmasosa. Suodatuksessa 80–90 prosenttia oligomeereistä jäi retentaattiin uutteen muiden komponenttien pitoisuuksien ollessa samat sekä permeaatissa että retentaatissa. Paineen tuotossa käytettävällä kaasulla ei havaittu olevan huomattavaa vaikutusta eri komponenttien pitoisuuksiin. Permeaatin ja retentaatin yhteenlaskettu oligomeerimäärä oli kuitenkin kaikissa näytteissä alkuperäistä uutetta pienempi.

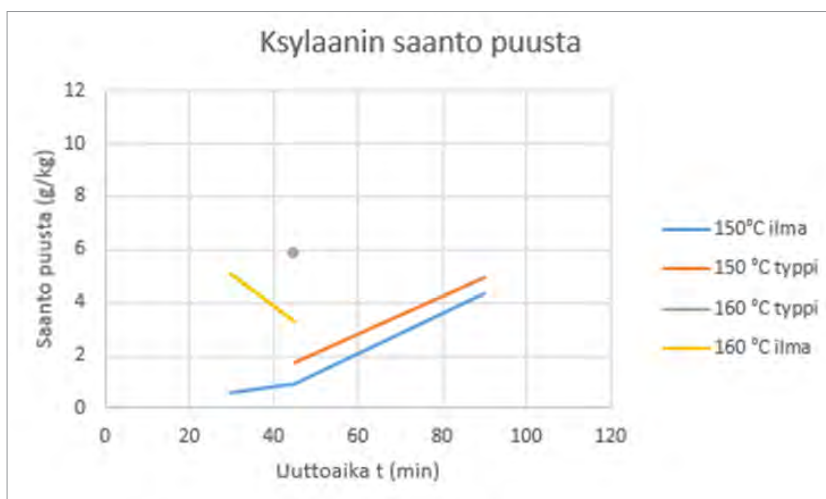
Ultrasuodatettujen hydrolysaattinäytteiden saostuminen oli kauttaaltaan alipainehaihdutettuja uutetta vähäisempää. Vain näytteessä 160/45, jonka suodatus oli paineistettu tyypellä, sakkaa muodostui niin paljon, että sitä alkoi kasaantua näyteastian pohjalle. Muissa näytteissä sakka ei flokkaantunut kunnolla, mikä aiheutti hankaluuksia suodatusvaiheessa. Sakka kerrostui imupaperin päälle ja hidasti huomattavasti suodattumista. Toisaalta hienojakoisinta osaa sakasta ei saatu talteen, vaan se suodattui jäännöslieemeen.

Kalvosuodatuksessa painentuottoon käytetyn kaasun vaikutus etanolisaostuksen ksylaanisaantoon (kuva 5). Tyypeä käytettäessä saannot olivat jokaisessa koepisteessä korkeammat kuin vastaavat koepisteet ilmalla.



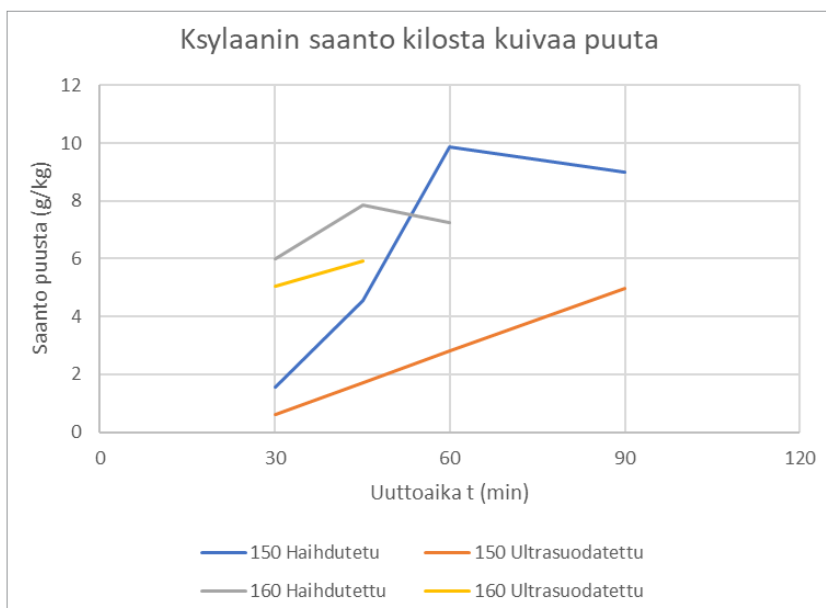
**KUVA 5.** Ultrasuodatuksessa paineen tuottoon käytetyn kaasun vaikutus etanolisaostuksen ksylaanisaantoon verrattuna alkuperäisen uutteen ksylaanipitoisuuteen

Ksylaania saatiin saostumaan ultrasuodatetuista näytteistä parhaimmillaankin alle kuusi grammaa kilosta kuivaa puuta. Ksylaanisaannot on esitetty kuvassa 6. Eniten ksylaania (5,9 g) saatiin näytteestä 160/45, jonka ultrasuodatuksessa painekaasuna käytettiin tyypeä. Tämä oli myös ainoa näyte, joka saostui kunnolla.



**KUVA 6.** Ultrasuodatettujen ja etanolisoitettujen näytteiden ksylaanisaannot kilosta kuivaa puuta

Konsentrintivaihtoehdoista alipainehaihdutus näyttäisi toimivan paremmin. Haihdutettujen uutteen etanolisoituksen ksylaanisaannot olivat huomattavasti ultrasuodatettujen uutteen saantoja suurempia. Ksylaanisaannot kilosta kuivaa puuta molemmilla esikäsittelyvaihtoehdoilla on esitetty kuvassa 7.



**KUVA 7.** Ksylaanin saannot etanolisoituksella, kun konsentrintivaihtoehtoina on alipainehaihdutus ja ultrasuodatus.

Erot eri menetelmillä esikäsitellyissä näytteissä voivat selittyä joko furfuraalin vaikutuksesta ksylaanin saostuvuuteen tai oligomeerien pilkkoutumisella ultrasuodatuksen aikana.

## YHTEENVETO

Oligomeeristä ksylaania voidaan ottaa talteen koivun esihydrolysaatista etanolisaostuksella, ainakin kun konsentroidaan alipainehaihdutuksella. Paras ksylaanisänto, 9,9 grammaa ksylaania kilosta kuivaa puuta, saatiin 150 °C:ssa 60 minuuttia uutetusta hydrolysaatista. Näytteistä 150 °C / 90 min, 160 °C / 45 min ja 160 °C / 60 min saatiin myös yli seitsemän gramman saannot. Ultrasuodatuksella esikäsitellyistä näytteistä paras saanto oli 5,9 g/kg, joka saatiin 160 °C:ssa 45 min uutetusta näytteestä.

Tutkimuksen tarkoituksena oli talteenottaa helposti irtoava pitkäketjuinen ksylaani vaikuttamatta päätuotteen laatuun. Tästä syystä lopputuotteen määrä verrattuna alkuperäisen materiaalin massaan voi vaikuttaa vähäiseltä. On kuitenkin otettava huomioon biojalostamoissa tuotantoon käytettävät puumäärät, joten vuositasolla ksylaanin tuotto voi muodostua vähintäänkin kohtuulliseksi.

Jatkotoimenpiteenä olisi hyvä selvittää, onko paineen muutoksella ultrasuodatuksessa vaikutusta kalvon likaantumiseen tai konsentraation polarisaatioon ja näin ksylaanisäntöön. Myös furfuraalin vaikutusta ksylaanin saostumiseen olisi hyvä selvittää jatkossa.

Etanolisaostuksella hydrolysaatista saostuu ksylaanin mukana myös muita komponentteja, joten sakan puhdistus ennen jatkojalostusta on tarpeen. Saostuneiden sokeriketjujen pituus olisi oleellista selvittää jalostettavuuden ja potentiaalisten käyttökohteiden kannalta.

## LÄHTEET

Al-Rudainy, B. 2020. Galactoglucomannan recovery from softwood spent sulfite liquor: Challenges, process design and techno-economic evaluations. Lund University. Chemical engineering. Väitöskirja. PDF-dokumentti. Saatavissa: [portal.research.lu.se](http://portal.research.lu.se) [viitattu 17.4.2021].

Naidu, D. S., Hlangothi, S. P. & John, M. J. 2018. Bio-based products from xylan: A review. Carbohydrate Polymers 179, 28–41. Verkkolehti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.09.064> [viitattu 18.4.2021].

NREL/TP-510-42618. 2012. Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass.

Song, T., Pranovich, A. & Holmblom, B. 2013. Separation of polymeric galactoglucomannans from hot-water extract of spruce wood. Bioresource Technology 130, 198–203. Verkkolehti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.11.149> [viitattu 7.5.2021].

Tolonen, P. 2018. Kalvosuodatus sellutehtaan kuitulinjalla. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energiateknikka. Diplomityö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201901081535> [viitattu 16.5.2021].

Willför, S., Sundberg, K., Tenkanen, M. & Holmbom, B. 2008. Spruce-derived mannans – A potential raw material for hydrocolloids and novel advanced natural materials. Carbohydrate polymers 72 (2), 197–210. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.08.006> [viitattu 17.4.2020].

# KORKEAN SAKEUDEN VAIKUTUS SELLULOOSAKARBAMAATIN VALMISTUKSEEN

Noora Haatanen

Selluloosa on tärkeä ja monipuolinen raaka-aine monien uusien biopohjaisten tuotteiden valmistuksessa. Sitä käytetään myös useissa jo käytössä olevissa tuotteissa muun muassa tekstiiliteollisuudessa. Kaikki valmistusmenetelmät eivät kuitenkaan ole uusiutuvasta raaka-aineestaan huolimatta ympäristöystävällisiä. Muun muassa viskoosin valmistuksessa käytettävät kemikaalit, kuten rikkivety, aiheuttavat vesien ja ilman saastumista sekä ihmisen terveydelle haitallisia päästöjä.

Eräs viskoosiprosessille esitetty vaihtoehtoinen menetelmä on selluloosan kemiallinen käsittely nimeltä selluloosakarbamointi. Perinteisesti selluloosan kemialliset käsittelyt tehdään matalalla tai keskisakealla massalla. Korkeassa sakeudessa tarvittavan veden ja kemikaalien määrä on kuitenkin pienempi. Sakeuden noston oletetaan lisäksi pienentävän energiankulutusta ja prosessilaitteiden kokoa ja näin ollen myös prosessin ja lopputuotteen hintaa. Korkean sakeuden vaikutusta karbamointiprosessiin tutkittiin opinnäytetyönä osana opetus- ja kulttuuriministeriön rahoittamaa Bioproduct and Clean Bioeconomy - RDI FlagShip in Xamk -hanketta. Hankkeen tavoitteena on kasvattaa biotuotteisiin ja puhtaaseen biotalouteen liittyvän TKI-toiminnan vaikuttavuutta, parantaa tutkimusfasiliteetteja ja yhteistyötä sekä kehittää uusia tuotteita ja prosesseja. Hanke toteutetaan ajalla 1.10.2018–31.12.2021.

## JOHDANTO

Kiinnostus fossiilisia korvaaviin uusiin ympäristöystävällisiin ratkaisuihin ja tuotteisiin kasvaa jatkuvasti. Selluloosa on jo tällä hetkellä tärkeä raaka-aine, josta valmistetaan monia tuotteita, kuten sellua ja sen erilaisia johdannaisia sekä paperi- ja tekstiilituotteita (forest.fi-verkkolehti, Baghaei 2020). Raaka-aineena se on hyvinkin potentiaalinen, mutta samaan aikaan myös kyseenalainen. Selluloosaa saadaan muun muassa puusta. Metsäteollisuus ja kasvava kiinnostus puupohjaisiin tuotteisiin vaikuttaa vahvasti hiilinieluun ja metsien monimuotoisuuteen. Uusien kestävien ja uusiutuvien puupohjaisten tuotteiden pohjana onkin aina oltava kestävä metsätalous (Metsäteollisuus, 2020). Vaikka Suomi on metsäinen maa, tälle arvokkaalle raaka-aineelle tulee hakea myös mahdollisimman korkean lisäarvon sovelluksia ja lopputuotteita.

Maailman väkiluvun kasvaessa tekstiilien kysyntä kasvaa. Suuri osa siitä kohdataan tällä hetkellä puuvillalla, jonka tuotantoa varjostavat ympäristöongelmat, kuten suuri veden ja kemikaalien kulutus, sekä suuri kasvatuspinta-ala (Kooistra ym., 2006). Tekstiiliteollisuus etsii vimmattusti vaihtoehtoisia menetelmiä, ja katseet ovatkin kääntyneet kohti selluloosaa (Suomalainen, 2017). Puupohjaisia tekstiilituotteita on jo tällä hetkellä olemassa useita. Myös hyvin yleisesti käytetty materiaali, viskoosi, tuotetaan selluloosasta. Viskoosilla on useita hyviä ominaisuuksia, kuten keveys, hengittävyys ja laskeutuvuus, jonka vuoksi se on hyvin yleinen materiaali vaatteissa. Sen varjopuolena on perinteisen viskoosiprosessin valmistusmenetelmä ja erityisesti siinä käytetty kemikaali, rikkivety. Eräs viskoosiprosessille esitetty vaihtoehtoinen menetelmä on selluloosan kemiallinen käsittely nimeltä selluloosakarbamointi. (Paunonen ym., 2019, Gelbke ym. 2009)

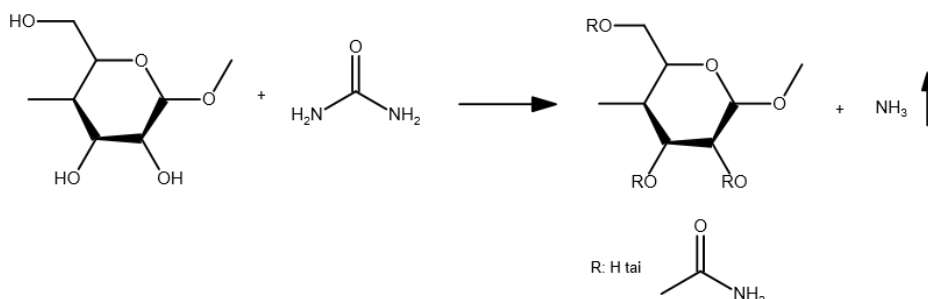
Perinteisesti selluloosan kemialliset muokkaukset tehdään matalalla (LC, low consistency) tai keskisakealla (MC, medium consistency) massalla. Korkea sakeus (HC, high consistency) eli yli 30 prosentin sakeus (kuiva-aineen osuus märkápainosta) on niin korkea, että sitä on vaikea saavuttaa perinteisellä massalla. Viskoosin raaka-aineena käytetään normaalisti liukosellua. Korkean sakeuden saavuttamiseksi tässä työssä käytettiin vaihtoehtoisesti mikrokiteistä selluloosaa (MCC, micro crystalline cellulose). Se on happokäsittelyllä valmistettua selluloosaa, jonka kuitumainen olemus on muuttunut jauhemaiseksi. Sen polymerisoitumisaste (DP) on noin 300–600, joka on huomattavasti natiiviselluloosaa ja liukoselluloosaa alhaisempi. Matala polymerisoitumisaste tarkoittaa, että se on käsittelyssä pilkkoutunut lyhyemmiksi ketjuiksi. Mikrokiteisen selluloosapartikkelin kokoluokka on noin D50 50–150 µm. (Heinze ym. 2018)

On syytä vielä huomauttaa, että tekstiiliteollisuus ei ole ainoa viskoosin valmistaja ja käyttäjä. Viskoosia käytetään myös esimerkiksi kalvojen valmistukseen ja paperituotteiden lujittamiseen sekä tekstiilikuituihin, mutta myös filmeihin. Selluloosakarbamaatin alkaliliuosta voidaan käyttää samalla tavalla kuin viskoosiselluloosaa useisiin eri sovelluksiin (Ekman ym. 2015).

## **MIKROKITEISEN SELLULOOSAN KARBAMOINTI KORKEASSA SAKEUDESSA**

Tässä artikkelissa esitellään tutkimustuloksia mikrokiteisen selluloosan karbamoinnista korkeassa sakeudessa (Taskinen, 2021). Selluloosakarbamaatti (CCA, cellulose carbamate) on selluloosajohdannainen, joka kuuluu alkaliliuoksiin. Karbamointi on menetelmä, jossa selluloosa ja urea reagoivat keskenään (kuva 1) tietyssä lämpötilassa. Selluloosakarbamaatti valmistetaan käsittelemällä selluloosaa urealla 133 astetta korkeammassa lämpötilassa. Tässä lämpötilassa urea alkaa sulaa ja hajota isosyaanihapoksi ja ammoniakiksi. Isosyaanihappo reagoi selluloosamolekyylin hydroksyyliiryhmän kanssa muodostaen karbamyyliryhmän (kuva 1). Näin saavutettu selluloosakarbamaatti on liukoisuusominaisuuksiltaan muuttunut,

ja siitä voidaan kemiallisesti tai fysikaalisesti muokata edelleen uusiksi tuotteiksi, kuten viskoosiksi/langaksi. (Palsanen, 2012, Harlin, 2019)



**KUVA 1.** Selluloosan ja urean reaktio karbamaatioreaktiossa (Kuva Noora Haatanen)

Modifiointiin vaikuttavat useat muuttujat, kuten pH, raaka-aineen puhtaus, sakeus, reaktioaika ja partikkelin koko. Koejärjestelyssä päädyttiin tutkimaan sakeuden lisäksi myös reaktioajan sekä pH:n säätökemikaalin vaikutusta. Tutkittavat sakeudet olivat 20, 30 ja 40 prosenttia. Reaktioajoiksi valittiin yksi tunti ja kolme tuntia. Ensimmäiseen sarjaan lisättiin pelkästään urea (10 %). Toiseen sarjaan lisättiin urean lisäksi viisi prosenttia lipeää (NaOH). Taulukossa 1 on kuvattu kokeessa käytettyjen näytepisteiden sakeus, kemikaaliannostelu sekä reaktioaika.

**TAULUKKO 1.** Kokeessa käytettyjen näytepisteiden sakeus, kemikaaliannostelu sekä reaktioaika

Sarja 1	Sakeus	NaOH	Urea	Reaktioaika
Näyte 1	20 %	0 %	10 %	1 h & 3 h
Näyte 2	30 %	0 %	10 %	1 h & 3 h
Näyte 3	40 %	0 %	10 %	1 h & 3 h
Sarja 2	Sakeus	NaOH	Urea	Reaktioaika
Näyte 1	20 %	5 %	10 %	1 h & 3 h
Näyte 2	30 %	5 %	10 %	1 h & 3 h
Näyte 3	40 %	5 %	10 %	1 h & 3 h

## MATERIAALIT JA MENETELMÄT

Työn raaka-aineena käytettiin valkaistusta havumassasta valmistettua mikrokiteistä selluloosaa. Massan polymerisaatioaste DP oli 321. Ennen koeajoa massa pestiin vedellä ja kuivattiin suotonauhapuristimella. Pesun ja kuivauksen jälkeen suotonauhan poistoveden sekä suotonauhan kakun pH oli neutraali (7,7 ja 7,43 tässä järjestyksessä).

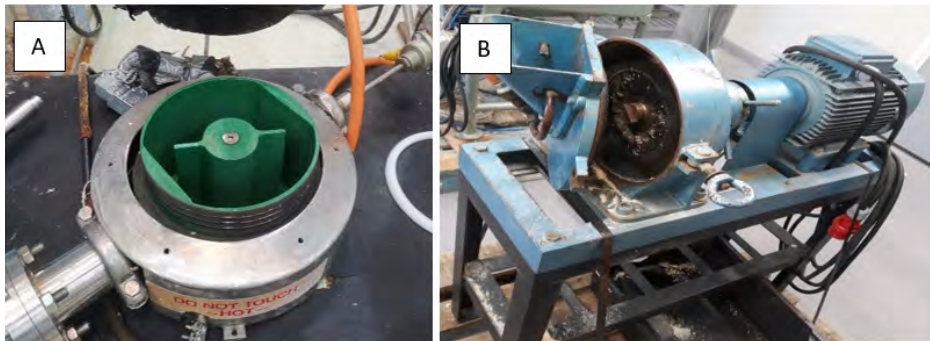


Massa jaettiin kolmeen sakeuteen, 20, 30 ja 40 prosenttia, ja kaikille sakeuksille valmistettiin kaksi sarjaa. Sarjojen näytteiden sekoituksessa käytettiin Quantum Mark IV -laboratoriosekoitinta (kuva 2 A). Lisättävien reaktiokemikaalien määrä laskettiin prosentteina kuiva-aineesta (ilmakuiva). Reaktiokemikaalit lisättiin massan joukkoon vasta sekoitusreaktorissa. Sekoitus aika oli kolme kertaa 30 sekuntia. Reaktorin lämpötilaa seurattiin sekoituksen ajan infrapunälämpömittarilla, sillä on tärkeää, ettei sekoituslämpötila nouse vielä tässä vaiheessa yli reaktiolämpötilan (130 °C). Sekoituksessa on oltava käytössä tehokas kohdepoisto mahdollisesti muodostuvien terveydelle vaarallisten höyryjen vuoksi.

Reaktiokemikaalien kanssa sekoitetut massanäytteet kuivattiin uunissa (70 °C) yön yli ja kuivuneet kakut jauhettiin reaktiopinta-alan maksimoimiseksi. Massan jauhamisessa käytettiin kiekkojauhinta (kuva 2 B). Keskimääräinen partikkelikoko jauhamisen jälkeen oli silmämääräisesti halkaisijaltaan noin < 5 mm (kuva 3).

Karbamointireaktion saavuttamiseksi esikäsitellyt näytteet asetettiin foliolautasilla uuniin 160 asteeseen ja annettiin olla reaktioajasta riippuen yksi tai kolme tuntia. Tässä vaiheessa tulee erityisesti huomioida hyvä ilmanvaihto, sillä prosessissa muodostuu ammoniakkia ja isosyaanihappoa.

Karbamoinnin jälkeen näytteet lopuksi pestiin vedellä, suodatettiin Büchner-suppilolla ja kuivattiin. Suodoksen puhtaus eli sähkönjohtavuus määritettiin WTW Inolab Cond 7110 -laitteella. Saadun näytteen kokonaistypen (LecoCN analyysi) määrittämiseen käytettiin LECO TruMac -laitetta (2012).



**KUVA 2.** A: Quantum Mark IV -laboratoriosekoitin, B: Kiekkojauhinta (Kuva Riku Korpa)



**KUVA 3.** Kiekkojauhimella jauhettu näyte, 20 % ja 30 % (Kuva Tomi Taskinen)

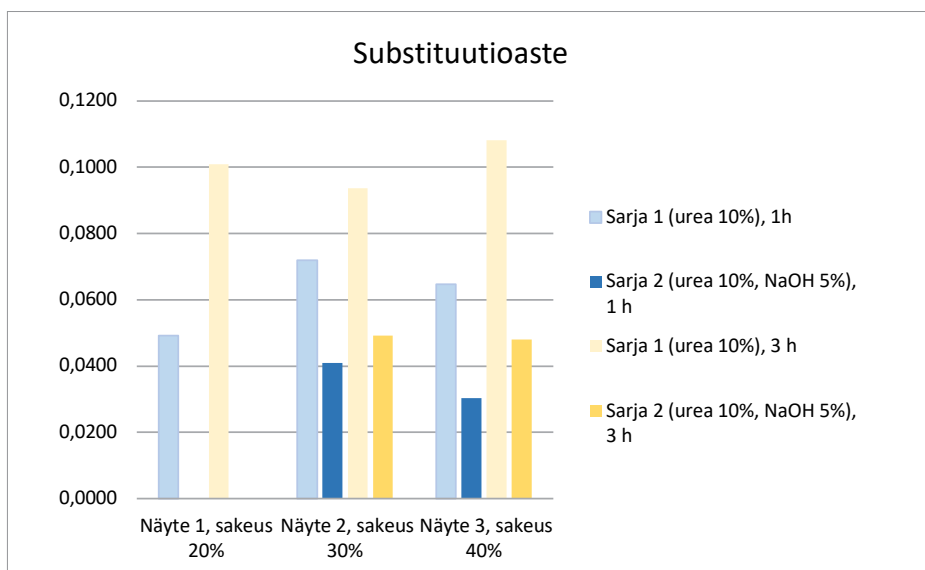
## TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Työssä tutkittiin sakeuden, lipeälisäyksen sekä reaktioajan vaikutusta karbamontiprosessiin. Reaktion onnistumista mitataan substituutioasteen avulla. Substituutioaste kuvastaa selluloosaketjussa olevien hydroksyyliyhmiem määrän, jotka ovat korvautuneet kemiallisen käsittelyn seurauksena karbanyyli ryhmillä. Substituutioaste lasketaan kokonaistypen avulla kaavalla 1 (Heinze ym. 2018).

$$DS = \frac{M_{AGU} \times N(\%)}{(M_N \times 100) - (43 \times N(\%))} \quad (\text{Kaava 1})$$

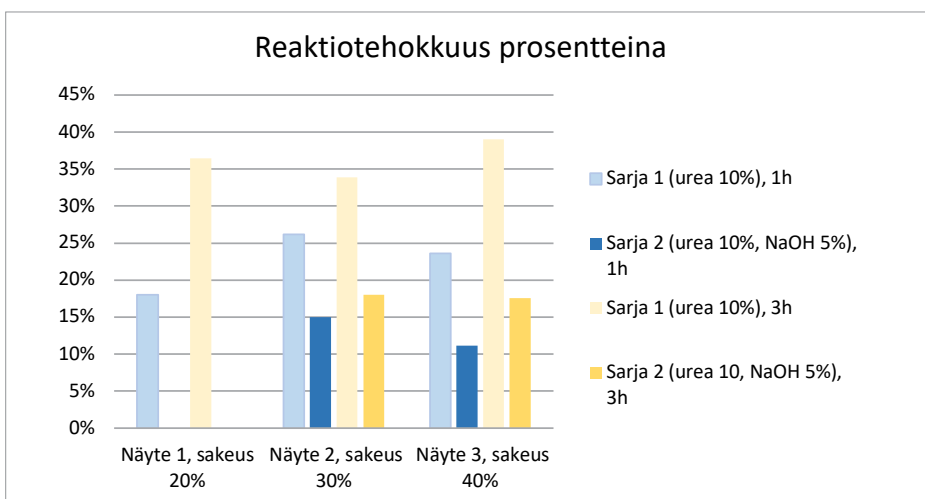
DS	substituutioaste (degree of substitution)
$M_{AGU}$	anhydroglukoosiyksikön moolimassa g/mol (162 g/mol)
N(%)	typpipitoisuus prosentteina
$M_N$	typen moolimassa g/mol (14 g/mol)
43	karbamaattiryhmän moolimassa eli moolimassan lisäys, joka tulee anhydroglukoosiin karbamaattiryhmän substituutiosta

Tulosten valossa korkea sakeus ei ainakaan haittaa reaktiota. Oros on hyvin pieni, mutta tulosten mukaan korkea sakeus jopa parantaa reaktiota. Korkein substituutioaste, 0,108, saavutettiin 40 prosentin sakeudessa, kolmen tunnin reaktioajalla ja ilman NaOH:n lisäystä (kuva 3). Lipeän lisääminen ei koeajon perusteella paranna reaktiota.



**KUVA 3.** Sakeuden, lipeän ja reaktioajan vaikutus substituutioasteeseen. Huom. kakkossarjan ensimmäisen näytteen (eli näyte, jossa pitäisi olla 20 %:n sakeudessa sekä ureaa ja lipeää) valmistuksessa tapahtui virhe, joten sitä ei ole huomioitu tulosten tarkastelussa lainkaan.

Reaktiotehokkuus lasketaan karbamointiprosessista saadun näytteen sisältämän typen (N%) ja urean mukana prosessiin lisätyn typen määrän suhteesta. Korkein reaktiotehokkuus, 39 prosenttia, saavutettiin myös 40 prosentin sakeudessa, kolmen tunnin reaktioajalla ja ilman NaOH:n lisäystä (kuva 4). Myös reaktiotehokkuuden perusteella lipeän lisäyksellä ei ole positiivista vaikutusta reaktioon.



**KUVA 4.** Sakeuden, lipeän ja reaktioajan vaikutus reaktiotehokkuuteen. Huom. kakkossarjan ensimmäisen näytteen (eli näyte, jossa pitäisi olla 20 %:n sakeudessa sekä ureaa ja lipeää) valmistuksessa tapahtui virhe, joten sitä ei ole huomioitu tulosten tarkastelussa lainkaan.

Pestyn ja pesemättömän selluloosakarbamaattinäytteen typpipitoisuuden erosta voitiin laskea lisäksi pesuhäviö, joka suurimman reaktiotehokkuuden koepisteellä oli 17 kg/tonnia CCA.

## VIRHETARKASTELU

Tuloksien tarkastelussa kakkosarjan ensimmäisen näytteen eli näytteen, jossa pitäisi olla 20 prosentin sakeudessa sekä ureaa ja lipeää, molemmilla reaktioajoilla saatu tulos on jätetty huomioimatta. Tämä johtuu siitä, että näytteen valmistuksessa tapahtui virhe kemikaaliannostelussa, joten sitä ei ole huomioitu tulosten tarkastelussa lainkaan.

Koejärjestelyssä ei tehty rinnakkaisia koeajoja, mikä tulee ottaa huomioon tuloksien virhetarkastelussa. Vastaavasta koejärjestelystä ei myöskään löydy mainintoja kirjallisuuslähteistä, minkä vuoksi tuloksien vertaaminen aiempiin tuloksiin ei ole mahdollista.

## JOHTOPÄÄTÖKSET

Tulosten perusteella voidaan tehdä vain alustavia johtopäätöksiä. Valitettavasti koeajossa ei saavutettu haluttua substituutioastetta. Karbamointiprosessin tehostamiseksi on mahdollista muun muassa kasvattaa urean annostelumäärää tai muuttaa reaktiolämpötilaa, mutta näillä on negatiivinen vaikutus prosessin taloudellisuuteen. Tuloksista voidaan kuitenkin huomata, että näissä sakeuksissa sakeuden nosto ei vaikuta negatiivisesti prosessitehokkuuteen. Lisäksi voidaan todeta, että mikrokiteinen selluloosa mahdollistaa selluloosan prosessoinnin korkeissa sakeuksissa. Jatkotutkimuksissa tulee ottaa mukaan lisää matalan sakeuden koepisteitä sekä sarjoille rinnakkaisia verrokkipisteitä. Myös koesarjan toistaminen korkeissa sakeuksissa liukosellulla on mielenkiintoinen jatkotutkimusaihe.

## LÄHTEET

Baghaei, B. & Skrifvars, M. 2020. All-Cellulose Composites: A Review of Recent Studies on Structure, Properties and Applications. *Molecules*, 25(12): 2836. <https://doi.org/10.3390/molecules25122836>.

Gelbke, H.-P., Göen, T., Mäurer, M. & Sulsky S.I. 2009. A review of health effects of carbon disulfide in viscose industry and a proposal for an occupational exposure limit. *Crit. Rev. Toxicol.*, 39 (2009), pp. 1–126.

Harlin, A. 2019. *Cellulose carbamate: production and applications*. VTT Technical Research Centre of Finland. Saatavissa: <https://doi.org/10.32040/2019.978-951-38-8707-0>

Heinze, T., El Seoud, O.A. & Koschella, A. 2018. Principles of Cellulose Derivatization. In: *Cellulose Derivatives*. Springer Series on Polymer and Composite Materials. Springer, Cham. Saatavissa: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-73168-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-73168-1_4)

Kooistra, K.J., Termorshuizen, Aad & Pyburn, R. (2006). The sustainability of cotton: consequences for man and environment. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/40115240\\_The\\_sustainability\\_of\\_cotton\\_consequences\\_for\\_man\\_and\\_environment](https://www.researchgate.net/publication/40115240_The_sustainability_of_cotton_consequences_for_man_and_environment)

Metsäteollisuus, 2020. Metsäteollisuuden ilmastotiekartta, Vihreä ja vireä talous. 2032. [https://global-uploads.webflow.com/5f44f62ce4d302179b465b3a/5fae9c3de86a240e06b76565\\_Metsa\\_Esite\\_Email.pdf](https://global-uploads.webflow.com/5f44f62ce4d302179b465b3a/5fae9c3de86a240e06b76565_Metsa_Esite_Email.pdf)

Palsanen, A. 2012. Puunjalostusinsinöörit, Innovaatioportfolio, 9.7. Selluloosakarbamaatit. Saatavissa: [www.puunjalostusinsinoorit.fi/biometsateollisuus/innovaatiot/9-sivutuotteet-ja-selluloosan-jatkojalosteet/9.7-selluloosakarbamaatit/](http://www.puunjalostusinsinoorit.fi/biometsateollisuus/innovaatiot/9-sivutuotteet-ja-selluloosan-jatkojalosteet/9.7-selluloosakarbamaatit/)

Paunonen, S., Kamppuri, T., Katajainen, I., Hohenthal, C., Heikkilä, P. & Harlin, A. 2019. Environmental impact of cellulose carbamate fibers from chemically recycled cotton. *Journal of Cleaner Production*, Volume 222, pp. 871–881.

Suomalainen, S. 2017. Ympäristömyötäisempiä vaihtoehtoja puuvillalle Case: Arela. Opinnäytetyö, Metropolia Ammattikorkeakoulu. Saatavissa: [Suomalainen\\_Silja.pdf;jsessioid=E1D03C93564A9B797977A47051F27D0A](https://theseus.fi/handle/10137/447051) (theseus.fi)

Taskinen, T. 2021. Sakeuden vaikutus selluloosan modifointiin. Opinnäytetyö, Kaakois-Suomen ammattikorkeakoulu, Prosessitekniikka.

# BIO-BASED FIBRE NETWORKS: FIBRE FLOCCULATION AND FRACTIONATION

Ramjee Subramanian

Bio-based products network formation is a prerequisite for the creation of novel breakthrough sustainable products and quality improvement in current fibre-based paper and paperboards. A fundamental knowledge of fibre fractions and flocculation is a keystone on which product quality development is founded.

In the manufacture of bio-based products on a paperboard or paper machine, the sheet formation, i.e. the local variation in the mass distribution or small-scale basis weight variation, is determined largely by the state of fractions in the stock, flocculation and hydrodynamics while depositing on the wire. In both the fibre network and the stock from which it is formed, there is a large but defined number of flocculated fibres and additives (fillers and fine fractions).

The materials involved in the papermaking process characterise the fibre suspension. The fundamental elements of a suspension are the fibres, with a given fibre length and width distribution, the typical wet-end chemicals added in optimised amounts to the stock suspension in order to retain fines and filler materials, the suspending aqueous medium and some other specific materials. In normal papermaking operations, these materials are suspended in water in a consistency range of 0.5–1.5%.

The review is part of the Bioproduct and Clean Bioeconomy – RDI FlagShip in Xamk project, funded by the Ministry of Education and Culture.

## FRACTIONATION

A deep insight into and understanding of fractions are critical to optimise the use of pulp and fines feedstock for specific fibre-based bio-products. Heikkurinen, et al. (Heikkurinen, 1991) elucidated that basic fibre characteristics can be categorised as follows:

- Size distribution
- Shape
- Structure of the cell wall
- Fibre surface

The above properties are independent of each other. The basic properties cannot be determined by a single analysis and need to be determined by multiple methods (Table 1) to characterise the stock suspension.

**TABLE 1** Basic fibre properties and possible analysis methods (modified from Heikkurinen, 1991)

Size distribution	Shape	Structure of cell wall	Fibre surface
Fibre length	Specific surface	Flexibility	Chemical composition
Fibre width and cell wall thickness	External fibrillation	Pore volume	ESCA
Coarseness	Curl	Specific volume	Fibril angle
		Misaligned zones in structure	

One of the key analytical methods to characterise the fibre stock is to fractionate the components and analyse the fractions for their individual characteristics. The idea of fractionation has been used for many years to characterise mechanical and waste pulp streams. Later, driven by the need for new pulp and paper grades, strength improvement, and energy optimisation, new technological research and development blossomed in the pulp and paper industry. The novel technological studies combined fractionation and refining as a tool to optimise the chemical pulp fibre properties for stratified multilayer sheet forming.

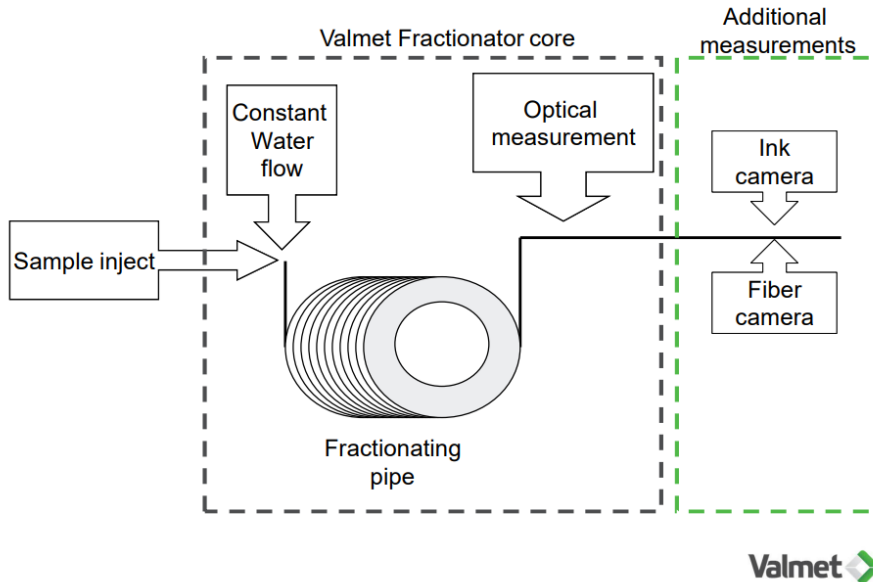
Fractionation separates the fibres into two or more fractions with different properties. Conventionally, fractionation analysis was carried out using a Bauer McNett classifier (SCAN – Test Method 6:05) besides consistency, freeness and fibre dimensions characterisations. A Bauer Mcnett classifier typically consists of four units assembled to a set which classifies pulp into five fractions, mainly based on fibre length. This analysis gives a reliable picture of the fibre length and fibre length distribution of the pulp. Forgacs (Forgacs, 1963) elucidated different mechanical pulp fractions and suggested that pulp properties can be forecasted based on determining two factors: the specific surface of the P48/R100 fraction and the L-factor, which is the sum of (%) of R 28 & R 48 fractions. Based on his work, subsequent researchers have proposed different means to characterise pulps based on fibre length and bonding ability (Maanström, 1967, Clark, 1968). Fibre analysis based on optical analysis were introduced in the 1980s (Piainen, 1985, Tiikkaja, 2007).

Recently, an analyser has been evaluated as part of the Xamk PURE project (Tapio Tiiri, 2020) combining fractionation and optical features (Fig. 1). Using this measurement technique, further industrial collaboration process studies are being planned to gain deeper



insights into chemical pulp stock fractions, flocculation and hydrodynamics. These application-based studies will enable the optimisation of fibre-based network structure based on product quality requirements and data-based technological solutions to the circular economy.

## Schematic presentation of Valmet Fractionator



**FIGURE 1:** Schematic depiction of Valmet Fractionator (Figure, Valmet)

## FLOCCULATION

Flocculation of papermaking fibres and stock suspensions has been studied since the 1950s. The fundamental studies elucidate the mechanisms, modelling and wet end chemistry. The literature quoted here is of specific interest to fibre flocs mechanisms and measurement techniques, and to gain insights into application-based research and development.

### a. Flocs: Network and Modelling

Mason (Mason, 1954) and Robertson (Robertson, 1957) in Montreal were the first to elucidate, measure and model the cohesive properties of networks of pulp fibres. The accepted view of the mechanism of the formation of a continuous fibrous structure is based on the hypothesis of Mason, assuming a limited volume for the free rotational movement of the fibres in suspensions of industrial consistency which, as a rule, is higher than the critical consistency, i.e. the sediment concentration. The flow of the suspension causes entrapment

and deformation of the fibres since, according to Mason's hypothesis, the freedom of movement decreases as the number of fibres per unit volume increases. When the concentration limit for free rotation is exceeded, flocculation inevitably occurs. These concepts were further developed by Wahren (Wahren, 1967 and 1972), defining theoretical flocculation intensity and formation. He was able to show that fibre networks can be coherent for purely geometrical and mechanical reasons.

Böhm and Luner (Böhm, 1977) studied the flocculation characteristics of micro crystalline cellulose (MCC) with polyacrylamide (PAM), altering several key parameters basic to flocculation. The degree of flocculation was monitored by determining the solids content of the suspension using turbidity measurements. According to their theory, cellulose particles are laced together by a single PAM molecule. The formation of these large aggregates greatly reduces the Brownian motion of constituent particles. When shear is applied, collisions occur between aggregates with simultaneous deformation. Shearing forces align the microfibrils and elongate the aggregates. This process increases their density, leading to settling. At a higher polymer dosage, retardation in flocculation occurs due to the low number of particles per polymer molecule (less dense aggregates). Floc morphology varies below and above OPD (optimum polymer dosage).

### **b. Flocs (Structure): Image Analysis**

Jordan and Page (Jordan, 1981) introduced the applications of image analysis to pulp fibre characterisation. Measurements and a theoretical model were elucidated defining fibre area, perimeter (including concavities), convex perimeter (wrapping a string around the object) and longest dimension (maximum projected length is termed as longest dimension). Fibre characteristics, such as fibre length, width, coarseness and curl of unrefined and refined mechanical pulp, have been investigated in this study. Later, Kropholler, Clarke & Gores (Kropholler, 1981) studied B-radio graph and image analysis, and direct measurement from an uncalendared paper, to get more precise information on the structure of paper. They measured the mass density distribution to model and investigate the structure of paper. Fibres have also been analysed by image analysis (Taylor, 1985).

### **c. Flocs (Formation and Hydrodynamics): Cinematography**

A detailed study on the flocculation of fibres was carried out by Kerekes et al. (Kerekes, 1985). They observed floc formation in the wake turbulence behind a grid using high-speed cinematography, and they measured turbulence intensities in the flow using laser anemometry. Key factors that govern the state and process of fibre flocculation over the entire range of consistency found in pulp and paper manufacturers include the number of contacts between fibres, cohesive forces at these contacts, and stresses supplied by the suspending fluid.

The creation of coherent flocs in decaying turbulence is of considerable interest to paper-makers because wake turbulence is commonly used to disperse pulp in headboxes. However, as the turbulence decays downstream, transient flocs turn into coherent ones, and the pulp suspension becomes increasingly non-uniform. This process is often referred to as reflocculation. It takes place quickly, as shown by the experimentally determined decay times (less than a second).

They enunciated that there are four types of forces at fibre contact points: Type A: colloidal; Type B: mechanical surface linkage; Type C: elastic fibre bending, and Type D: surface tension.

Types A, B and C's cohesive forces may all be present in the LC range of  $0.3\% < C_m < 5\%$ . Type D forces may also exist when there is substantial air present in the suspension, although this is not normally the case. Where Types A, B and C all exist, Type C is usually dominant, but Types A and B may also contribute significantly to network strength. For example, if the fibres in a pulp suspension are highly contorted and stiff, Type B flocs may be larger than Type C ones. If strong flocculants are present, Type A forces may also be significant. As consistency decreases, the relative importance of Type C forces decreases with respect to Types A and B because there are fewer contacts, and there are lower forces at each contact point owing to less fibre bending. Below  $C_m \sim 0.3\%$ , Type C forces may cease to exist altogether.

In papermaking, flocs produced by mechanical entanglement (Types B and C), are generally associated with paper "formation" – the uniformity of a paper sheet visible to the naked eye in transmitted light. On the other hand, Type A cohesion is generally linked to "retention" – the adhesion of fines and fillers on fibre surfaces. The latter is also termed "flocculation" but is considered "micro-flocculation" as opposed to "macro-flocculation" of long fibres in a pulp suspension.

Chemical additives are often introduced into pulp suspensions to improve retention. To be effective, however, they must impose very large Type A forces to withstand the high shear stresses imposed on fibre surfaces in the wet ends of modern paper machines. These forces may be sufficiently large to cause macro-flocculation as well. Alternatively, chemical additives called formation aids are sometimes added solely to decrease macro-flocculation. It is not certain how they achieve their effect, but in most cases, they appear to lower the coefficient of friction between fibres, and hence diminish Type C cohesion.

The magnitude of flocculation in flowing pulp suspensions has been measured by various light transmission and reflection techniques. These range from the earliest using ordinary light to more recent ones using fibre optics and laser beams. Spectral analyses of the light intensity signals, studied by multiple authors, have shown that a dominant floc size exists

in the range from 5mm to 12mm. The studies suggest that the floc size appears to be a characteristic of a given stock, the minimum dominant size being one to two times the longest fibre length. In the case of long-fibre chemical pulps, this would be approximately 5–10mm, about the level cited in the measurements by experimental studies.

Hydrodynamic, aerodynamic or mechanical stresses may rupture pulp networks at their weak points and thereby create flocs. These may act as independent entities called coherent flocs. Larger stresses disperse these flocs into individual fibres. The degree of floc dispersion attained in a flowing system is dependent on the relative strength of the flocs and the magnitude of the applied stresses. For example, strong hydrodynamic stresses applied to weak Type A flocs give substantial floc dispersion, whereas weak aerodynamic forces applied to flocs held together by Types B, C, D cohesion barely rupture them at all.

Van de Ven (Van de Ven., 1989) elucidates the physico-chemical and hydrodynamic forces involved in the retention of fines and fillers. According to him, in particle size interactions relative size is very important.

The capture of single fillers and small fines in the forming sheet is negligible. Particles of roughly the same size can approach one another very closely during an encounter and coagulate when sufficiently strong attractive colloidal forces are operating. In the absence of retention aids, long-range hydrodynamic interactions are high, preventing the closer approach of particles. High molecular weight polymers can bridge the gap, and under suitable electrostatic conditions, lead to deposition onto fibres. Under turbulent flow, the rearrangement of polymer configurations can reduce the efficiency of deposition. Dissolved materials in white water can interfere with the mechanism of fines and filler retention.

#### **d. Flocs (Filler and Retention Aids): Image Analysis and Malvern analyser, laser beam**

Fumihiko Onabe and Kunio Sakurai (Onabe, 1989) studied the applications of the flow visualisation technique to study wet end chemistry of model dual systems with filler. A microcomputer aided flow visualisation system consisting of Strobvision analyser (SVA) and image processing apparatus was applied to analyse the following at low concentrations, far lower than the stock consistency in a conventional headbox:

- (a) single polymer addition systems and dual component additive systems
- (b) low and high filler content suspensions
- (c) colloidal force and hydrodynamic shear force.

Analysis by digital geometry was carried out to represent features of projected images of flocs and fibre network supporting flocs. The flocculation states were represented numerically. To summarise the digital geometrical analysis data, the number of flocs generally decreases

with the progress of flocculation by decreasing the flow velocity. Bentonite increases the number of flocs in the case of high filler content suspensions. The fraction of flocs and mean floc area generally increase with the progress of flocculation by decreasing the flow velocity.

Lars Wegberg, et al. (Wegberg, 1989) studied the confirmation of polyelectrolytes adsorbed onto the pulp suspension, and Malvern analyzer has been used to analyze the particle size in this study. Flocculation mechanisms are usually discussed in terms of bridging, patch or charge neutralisation flocculation. Flocculation is a complex process and must be viewed as a sequence of events. First the polymer adsorbs onto the particle and then the polymer starts to re-conform to reach its equilibrium configuration on the particle surface, which is different from the conformation of the polymer in solution. When two flocculating particles meet, one or both of the particles may carry polymer, which may or may not have reached its equilibrium conformation. Obviously, the relative rates of all these events are of great importance for the flocculating process.

In this study, kinetics of flocculation of cellulosic fibres were studied with a laser optical device. First of all, the experiments show that the flocculation induced by the cationic MAP-TAC (methacrylamido propyl trimethyl ammonium chloride) polymers is a very rapid process with almost all the flocculation completed in less than one second after polymer addition. The degree of substitution of the polymer is very important for flocculation efficiency and confirmation (repulsion and bridge forming) vs flatter polymer structure and the number of adsorbed polymer molecules.

Hannu Karema et al. (Karema, 2001) modelled the prediction of paper formation through fluidisation and re-flocculation experiments. Floc size was measured using a CCD camera (transmitted light and image analysis). Reference geometries consisting of a constriction block and a secondary pipe were used to provide reference information for estimation of the performance of more complex geometries resembling real headbox designs. This information included the fluidisation ability curves, i.e. the minimum attained floc size in the function of mechanical energy loss, the rate of fluidisation in sudden expansion, the rate of subsequent re-flocculation, and the level of saturation floc size. The functionality of this approach was illustrated with measured information of a particular complex geometry in several research environments of different scales. By using paper samples produced with a similar geometry, the tight connection of the fluidised state of the suspension and the attained formation was verified.

#### **d. Flocs (Filler and Retention Aids): Flash Mixing Technology**

Flash mixing technology and its advantages over conventional mixing in bio-based product development has been demonstrated at lab, pilot and commercial scales, with Trump Jet technology developed by WETEND Technologies Oy (Käykhö, 2018). Computational

Fluid Dynamics (CFD) calculations clearly show that flash mixing additives distribution is uniform across stock lines in less than a second, compared to a conventional T-mixer. The advantages of this technology are material conservation, multiple chemicals injection and mixing, higher filler retention, enhanced produce quality and sustainability.

### **FLOCCULATION – PILOTING:**

Dodson, Farnood and Loewen (Dodson, 1989) investigated the forming and formation of paper in a pilot papermaking machine. The study focused on the following: characterisation of flow, flocculation and formation in papermaking machines, the effect of major process variables, such as consistency, jet speed, fabric speed, and pulp characteristics, and modelling of the forming process in terms of major process variables.

The online measurements of speed and flocculation are performed using a Dantec SensorLine 7510, modified to receive raw back-scattered signals. Online measurements were performed on four Fourdrinier paper machines in different operating conditions.

The average number of fibres in a floc can be characterised using the flocculation number ( $n$ ). For a model suspension of flocculated fibres, it is shown that the flocculation number is a multiple of the flocculation index. Thus, in principle, either of them can be used to characterise the state of flocculation.

### **FLOCCULATION STUDIES IN OTHER FIELDS:**

Flocculation has also been studied in other fields, such as mineral and environmental engineering. Some of the key literature in this field are given below.

“A floc generation reactor (FGR)” and its high kinetic energy of dissipation has been studied by Carissimi et al. (Carissimi, 2005). They propose a coiled floc generation reactor for the flocculation of additives and colloids. The aim of this work was to describe basic studies and determine the hydrodynamic parameters of FGR and correlate with particle aggregation efficiency (using  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  as a colloidal model).

Electrocoagulation has been studied by Yang et al. (Yang, 2021). This process is an alternative to the chemical coagulation process. Flow growth and structure has been studied using analysis of floc size, strength and fractal dimensions using image analysis and light scattering. The measurement techniques used in the study are as follows:

- Floc size: light scattering
- Floc strength: ultrasonics and agitation
- Floc fractal dimensions: image analysis

## SUMMARY

The available literature summary on fractionation and flocculation in fibre-based stock suspensions illustrate the following:

- Understanding of pulp suspension properties is critical for making high quality fibre-based products
- The following fibre characteristics have been studied using different analytical methods: size distribution, shape, structure of cell wall and fibre surface
- Fractionation has been used to study the mechanical and waste pulp streams. Recently, fractionation and optical analysis have been combined to study mechanical pulp characteristics
- Pulp flocs – critical concentration: A limited volume for the free rotational movement of the fibres in suspensions is exhibited at industrial pulp suspension consistency, which, as a rule, is higher than the critical consistency, i.e. the sediment concentration. This leads to the formation of a continuous fibre structure.
- Pulp flocs – floc formation: Key factors that govern the state and process of fibre flocculation over the entire range of consistency found in pulp and paper manufacturers are the number of contacts between fibres, cohesive forces at these contacts, and stresses supplied by the suspending fluid. There are four types of forces acting at fibre contact points and that are crucial to floc formation: colloidal, mechanical surface linkage, elastic fibre bending, and surface tension.
- Pulp flocs – additives and mixing: Materials and technologies have evolved significantly over time. Multiple additives are being dosed at different points along the circulation loops with higher efficiency by using flash mixing technology.
- Pulp flocs – measurement: The physico-chemical and hydrodynamical properties involved in floc formation has been measured using the following methods: turbidity, settling, polymer analysis, image analysis: light transmission and reflectance, laser-optical analysis,  $\beta$  – radiograph, and cinematography. Modelling studies have been extensively carried out to elucidate the theory and corroborate the experimental data.



## **R&D - CONCEPT TO COMMERCIALISATION: TO BE EXPLORED**

### **SHORT TO MEDIUM TERM**

- Floc characteristics: floc characteristics, and their impact on paperboard and tissue paper properties, after addition of multiple chemical additives.
- Novel formulations: impact on novel formulations with increasing fraction of fibrils and fines on floc formation.
- Online measurements, with a feedback loop, correlating fibre characteristics, floc characteristics and product quality.
- Modelling of wet-end process parameters and evaluating their relationship to mill-scale process parameters and product quality.

### **LONG TERM**

- Floc Generation Reactor: to study and scale up this new technology for multiple applications, such as pulp fibre suspension, environmental wastewater treatment.
- Electrocoagulation-based pH modification to be evaluated as an alternative to alum addition in colloidal coagulation and flocculation studies.

## REFERENCES

- Böhm, J. A. (1977). Shear-induced flocculation of micro-crystalline cellulose with polyacrylamide. *Transactions of the Fundamental Research Symposium*, 1, pp. 251–260. Cambridge.
- Carissimi, A. R. (2005). The flocs generator reactor - FGR: A new basis for flocculation and solid-liquid separation. *International Journal of Mineral Processing* (75), 237–247.
- Dodson, C. T. (1989). Forming and formation of paper. *Transactions of the 10th fundamental research symposium*, (pp. 183–208). Oxford.
- Gorres, J. K. (1985). Measuring flocculation using Image Analysis. *Transactions of the 8th Fundamental Research Symposium*, (pp. 363–380). Cambridge.
- Jordan, B. P. (1981). Applications of image analysis to pulp fiber characterization. *Role of Fundamental Research in Papermaking*, *Transactions of the Symposium*, Vol.1., Sep. 1981, (pp. 745–766). Oxford.
- Karema, H. S. (2001). Prediction of Paper Formation by Fluidization and Reflocculation Experiments. *Transactions of the 12th fundamental research symposium*, 1, pp. 559–590. Oxford.
- Kerekes, R. J. (1985). The flocculation of pulp fibers. *Transactions of the 8th Fundamental Research Symposium*, (pp. 265–310). Oxford.
- Kropholler, B. C. (1981). Investigating paper structure using image analysis. *Role of Fundamental Research in Papermaking*, *Transactions of the Symposium*, Vol.1., (pp. 767–776). Cambridge.
- Käykhö, J. M. (2018). System for feeding and mixing wet end additive. In *Advances in Papermaking Wet End Chemistry Application Technologies* (pp. 69–102). TAPPI.
- Lars Wegberg., et.al., (1989). Confirmation of adsorbed polymers and flocculation of microcrystalline cellulose and pulp suspensions. *Transactions of the 9th fundamental research symposium*, (pp. 413–436). Cambridge.
- Mason, S. (1954). Fiber motion and flocculation. *Tappi Journal*, 37(11), 494–501.
- Onabe, F. a. (1989). Applications of flow visualization technique in wet end chemistry. *Transactions of the 9th Fundamental Research Symposium*, (pp. 219–250). Cambridge.

Robertson, A. a. (1957). The flow characteristics of dilute fiber suspensions. *Tappi*, 40(5), 326–334.

Sakurai, F. O. (1989). Applications of flow visualization technique in wet end chemistry. *Transactions of the 9th Fundamental Research Symposium*, (pp. 219–250). Cambridge.

Taylor, C. a. (1985). Image Analysis applied to fiber images. *Transactions of the 8th Fundamental Research Symposium*, (pp. 777–784). Oxford.

Van de Ven., T. (1989). Physico-chemical and hydrodynamic aspects of fines and fillers retention. *Transactions of the 9th Fundamental Research Symposium*, (pp. 471–494). Cambridge.

Wahren, D. (1967). Proposed Definitions of some basic papermaking terms. *Svensk Papperstidning*, 70(21), 725–729.

Wahren, D. (1972). Flocculation phenomena in wet processing. *Symposium on man-made polymers in papermaking*, (pp. 241–255). Helsinki.

Yang, L. Z. (2021). Comprehensive review of floc growth and structure using electrocoagulation. *Chemical Engineering Journal*, 417, 129–310.

# HUGGER – UUDENTYYPPI- MENETELMÄ MATERIAALIEN PROSESSOINTIIN

Niina Paasovaara & Irina Turku & Hannu Kuopanportti

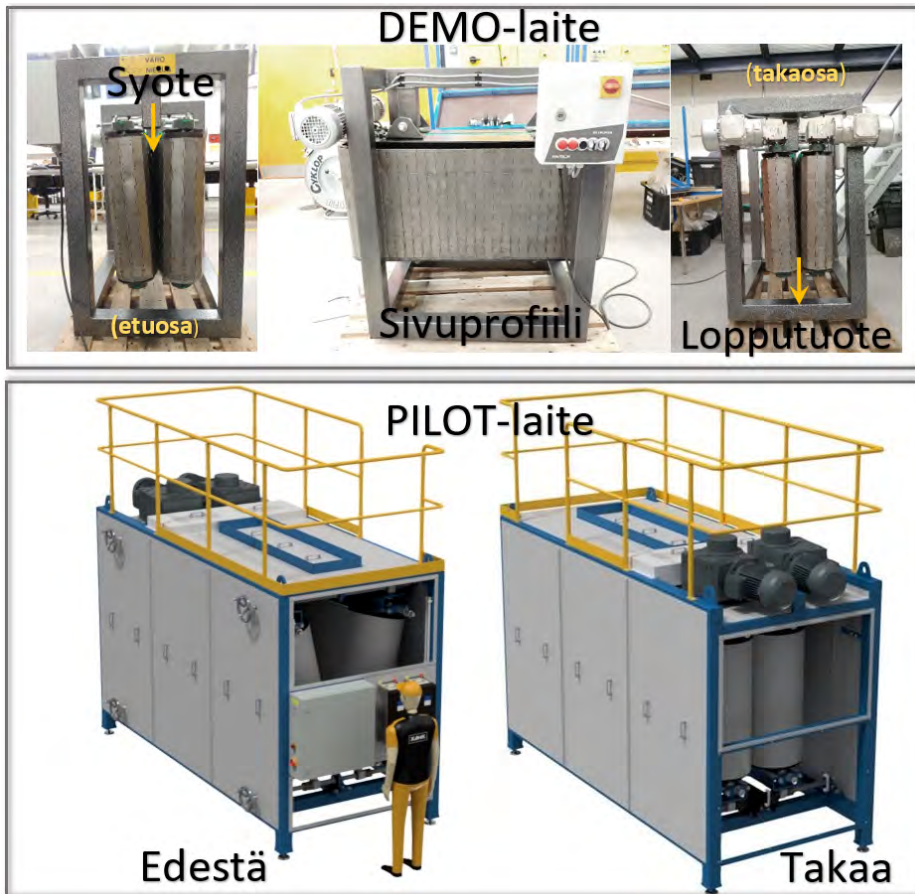
Hienonnutusprosessit kuluttavat noin neljä prosenttia maailman sähkönkulutuksesta, joka vastaa suuruusluokaltaan tavallisesti 20–60 kWh/t, mutta joissain tapauksissa jopa 100–1000 kWh/t. Monessa teollisessa prosessissa tulisi parantaa energiatehokkuutta ja saavutettua liberaatioastetta. HUGGER-hankkeessa tavoitteena on selvittää, mitä etuja uudella innovatiivisella murskausmenetelmällä on mahdollista saavuttaa kiertotalouden materiaalivirtojen sekä erilaisten bio- ja kivimateriaalien prosessoinnissa ja kierrätyksessä verrattuna perinteisesti työstetyn materiaalin prosessointimenetelmiin. Hankkeessa toteutetaan uudentyyppinen murskauslaitteisto, jossa toteutuu poikkeuksellisesti jatkuvatoimisesti partikkelikohtainen ja hidas kuormitus. Tämä menetelmä mahdollistaa energiatehokkaimman tavan käsitellä erilaisia materiaaleja.

Hugger-hankkeessa tutkittavina materiaaleina ovat muun muassa elektroniikkaromu, jätteenpolttolaitoksen tuhka, arvomineraaleja sisältävä kivimateriaali, betoni ja biotuhka. Tavoitteena on saada tietoa reologisesti erilaisten materiaalien ominaisenergiankulutuksesta (kWh/t). Mittausten avulla saadaan energiakulutustieto paitsi uusissa sovelluskohteissa myös arvio siitä, kuinka laajalti Huggeria voitaisiin käyttää nykyisissä prosessiteollisuuden ja kiertotalouden hienonnutusprosesseissa. Hankkeen tuloksena parannetaan prosessoinnin energiatehokkuutta, edistetään materiaalitehokkuutta ja vähähiilisyttä sekä synnytetään uusia prosessointi- ja toimintatapoja teollisuuden käyttöön, erityisesti Etelä-Savon ja Kaakkois-Suomen alueella. HUGGER-hankeparia rahoittavat Etelä-Savon ELY-keskus ja Etelä-Savon maakuntaliitto Euroopan aluekehitysrahastosta.

## HIONNUKSEN LÄHTÖKOHTA JA TARPEET

Hionnonuksen tavoitteeksi on viimeisten vuosikymmenien aikana yleisesti muodostunut materiaalin koon pienentäminen tiettyyn kokoluokkaan tai -jakaumaan asti. Teollisissa prosesseissa todellinen tavoite on kuitenkin tuottaa kokoluokkia, joiden prosessointi erottamalla, liuottamalla tai sulattamalla tuottaa ekologisesti ja taloudellisesti parhaan lopputuloksen. Tavoitteeksi tulisi asettaa materiaalikomponenttien hallittu mekaaninen käsittely ja erottaminen, joiden ansiosta jatkoprosessointi helpottuu ratkaisevasti. Toistaiseksi esteenä on ollut tarkoitukseen sopivan teollisen menetelmän ja laitteiston puuttuminen.

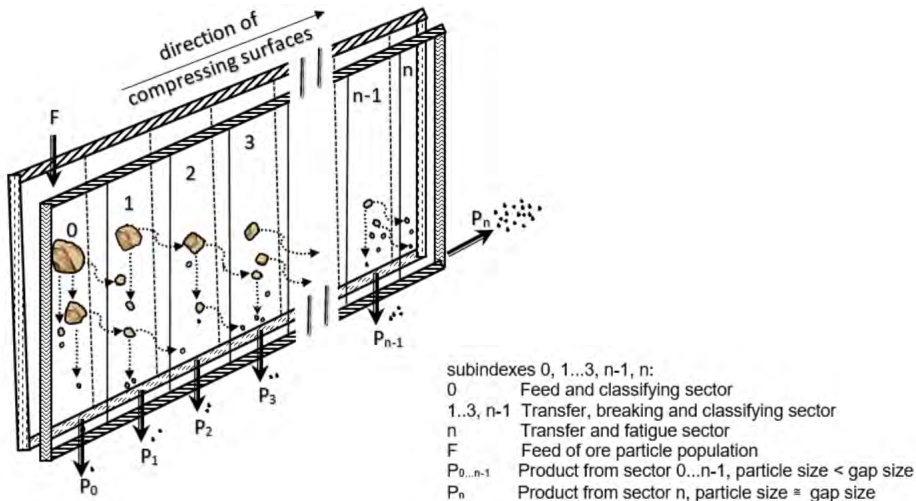
Vastikään patentoitu (Kuopanportti & Hynynen 2018) Huggeriksi kutsuttu puristumene-  
 telmä ja -laite pyrkii vastaamaan mekaanisen erottelun ja käsittelyn haasteeseen. Patentin  
 omistaa nykyisin koneenrakentamiseen erikoistunut raahelainen yritys Tevo Oy. Meneillään  
 olevassa ”HUGGER – Bio- ja kiertotalousmateriaalien energiategokas murskaus” -hank-  
 keessa selvitetään menetelmän soveltuvuutta teollisessa käsittelyssä ensimmäistä kertaa  
 laajemmin. Hugger-laitteen pienimittakaavainen demoversio sijaitsee Oulu Mining Schoolin  
 tutkimuskeskuksessa (kuva 1, yläosa), ja Hugger-laitteen seuraava pilot-mittakaavan versio  
 rakennetaan Savonlinnan kuitulaboratorion yhteyteen sovellusprojektin rinnalla olevan  
 Hugger-laiteprojektin puitteissa (kuva 1 alaosa).



**KUVA 1.** Yläosassa kuvasarja (kuvat Niina Paasovaara) Hugger-laitteen demoversiosta ja alaosassa suunnitteluvaiheen kuvat pilot-mittakaavan Hugger-laitteesta.

Hugger-menetelmän nykyisiin laitteisiin verrattuna yksinkertainen ja poikkeuksellinen  
 toiminta perustuu puristustilan suureen pinta-alaan, hitaaseen puristukseen ja siihen,  
 että jokaista partikkelia puristetaan suoraan ja yksilöllisesti (kuva 2). Nykyisissä laitteissa

partikkelien kuormitus on nopeaa (iskumaista), suhteellinen muodonmuutosnopeus tyypillisesti luokkaa  $10^2$ – $10^6$  1/s, Huggerissa sen sijaan hyvin hidasta, tyypillisesti  $10^{-2}$  1/s. Hidas kuormitus edistää murtumien etenemistä materiaalissa olevia rajapintoja pitkin, nopeassa kuormituksessa murtumat etenevät iskualueiden läheisyydessä riippumatta komponenttien mekaanisista ominaisuuksista. Toisin sanoen hidas kuormitus erottaa ja reagoi paremmin reologisilta ominaisuuksiltaan erilaisiin komponentteihin. Lisäksi hidas kuormitus on energiataloudellisempaa tuotettua uutta pintaa kohti.

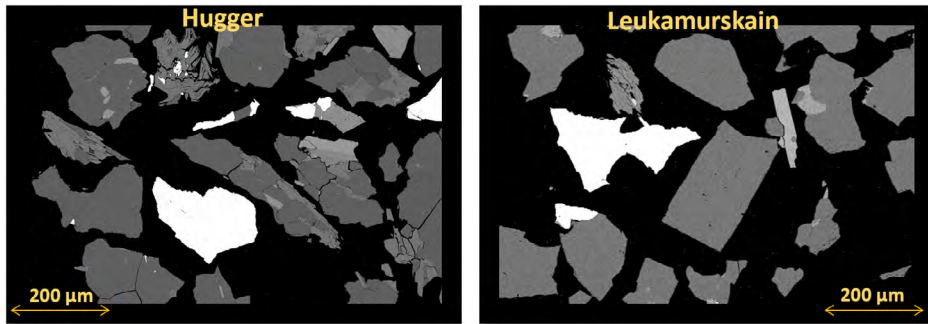


**KUVA 2.** Hugger-laitteen toimintaperiaate (kuva Niina Paasovaara).

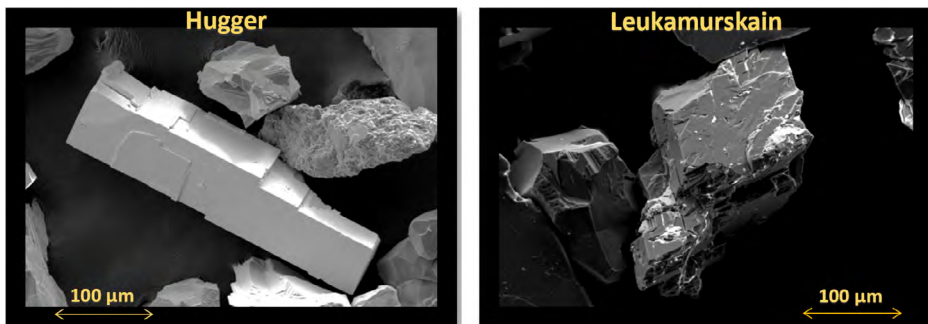
## HUGGER-HANKKEEN ALUSTAVAT TUTKIMUSTULOKSET

Toimivuudesta on saatu lupaavia tuloksia pienimittakaavaisella demolaitteella (kuva 1 yläosa) Oulun yliopistossa meneillään olevan väitöskirjatutkimuksen yhteydessä. Verrattuna perinteiseen murskaimeen vaatimattomalla demolaitteella on todettu kivimateriaalissa sisältävien arvomineraalien liukoisuuden nousseen merkittävästi Hugger-käsittelyn jälkeen. Yksittäisiä partikkeleja tarkemmin tutkimalla on myös todettu, että Hugger-murskain tuottaa enemmän mikrohalkeilua (kuva 3) ja partikkelit ovat luonnonmukaisempia ja rosoisempia pintatekstuurltaan (kuva 4) verrattuna perinteisesti tuotettuihin partikkeleihin. Parempien pintaominaisuuksien (mikrohalkeamat ja rosoisuus) ansiosta useat jatkoprosessit, kuten liuotus ja vaahdotus, nopeutuvat ja tehostuvat nykyisestäään, ja muun muassa näitä asioita HUGGER-hankkeessa tullaan vielä tutkimaan tarkemmin uuden pilot-laitteen valmistuessa. Hugger- ja leukamurskauksen lisäksi kivimateriaaleille on tehty hitaita puristuskokeita verrokkidatan aikaansaamiseksi. Partikkelikokojaumat osoittavat, että eri kuormitustavat tuottavat eri kokojakaumallisia tuotteita ja että Hugger-murskaimella ja yksiaksiaalisten puristuskokeiden avulla tuotetut jakaumat muistuttavat hyvin paljon

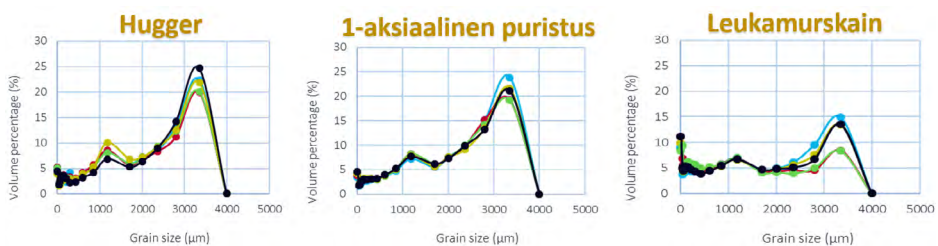
toisiaan ja ovat muodoltaan kapeampia ja vähemmän hienoainesta sisältäviä kuin leukamurskaimella tuotetut jakaumat (kuva 5).



**KUVA 3.** Hugger-laite tuottaa enemmän mikrohalkeillumpia partikkeleja perinteiseen leukamurskaimen verrattuna (kuva Niina Paasovaara).



**KUVA 4.** Hugger-laite tuottaa kidepinnoiltaan puhtaampia ja luonnonmukaisempia partikkeleja kuin leukamurskain (kuva Niina Paasovaara).



**KUVA 5.** Partikkelikokojakaumat Hugger-murskaimella, leukamurskaimella ja yksiakiaalisten puristuskokeiden avulla hienonnetuista kivit tuotteista (kuva Niina Paasovaara).

Kivimateriaalin lisäksi alustavia tutkimuksia on tehty myös kiinteäjätteen polttotuhkal-  
le (PT). PT on jätteenpolttolaitosten polttoprosessissa syntynyttä kiinteää materiaalia.  
Suomessa suurin osa kiinteästä yhdyskuntajätteestä poltetaan, ja sen myötä polttotuhkaa  
syntyy noin 0,3 Mt vuosittain. PT sisältää paljon rautapitoista jätettä (5–15 p-%) ja ei-rau-



tapitoista metallijaetta väliltä 1–5 p-%, ja kiinnostus ja tarve eri metallien talteenottoon ja kierrätykseen kasvaa maailmalla koko ajan. Nyky menetelmissä haasteena on ollut materiaali- ja metallikomponenttien hallittu erottaminen, joka on asia, johon tässä hankkeessa kiinnitetään erityistä huomiota ja jota pyritään tehostamaan Hugger-laitteen uudella erotelumekanismeilla.

Jätteenpolton pohjatuhkalle tehdyt alustavat tarkastelut osoittavat, että suuri osa metallihiukkasista ovat kuona- ja/tai mineraalikerrosten peittämiä. Testikokeissa metallihiukkasten vapauttamiseksi PT-partikkelit murskattiin käsin keraamisessa huhmareessa. Alustavat tulokset osoittavat, että epäpuhtaudet ovat saatavissa helposti irti metallien pinnoilta. Tämän esikokeen perusteella voidaankin olettaa, että Hugger-murskaimen hidas/lempeä käsittely tulisi riittää vapauttamaan metallihiukkaset vaikuttamatta itse metallipartikkeleihin tai synnyttäen liian hienoa materiaalipölyä, kuten voi käydä perinteisiä isku- tai leukamurskaimia käytettäessä.

## TULEVAISUUDENNÄKYMÄT HUGGER-HANKKEESSA

HUGGER-hankkeessa käytettävä pilot-mittakaavan tutkimuslaite valmistuu vuoden 2021 syksyllä (kuva 1, alaosa). Koelaitte anturoidaan monipuolisesti eri materiaalien murskausvoiman, käsiteltävien materiaalien laadun sekä prosessin toimivuuteen liittyvän datan keräämiseksi ja analysoimiseksi. Tutkimuslaitteelle onkin odotettavissa paljon koetoimintaa niin kaivosteollisuuden, pohjatuhkan kuin erilaisten kiertotalousmateriaalien prosessointitutkimuksissa. Näitä tuloksia tullaan raportoimaan seuraavissa katsauksissa hankkeen jatkuessa vielä vuoden 2022 loppuun saakka.

## LÄHTEET

Kuopanportti Hannu & Hynynen Ilkka 2018. Laitteisto ja menetelmä materiaalin hienonamiseen. Patentti FI127385 B, 30.4.2018. Applicant: Tutkimuspalvelut Kuopanportti Ky, Finland. Moniste/Pdf. 28 p.

# ANALYSIS OF MUNICIPAL SOLID WASTE COMBUSTION BOTTOM ASH

Irina Turku & Oona Karjalainen

This study is provided in the frame of the *HUGGER bio- ja kiertotalousmateriaalien energiatehokas murskaus* project (1.1.2021–31.12.2022) at FiberLaboratory, Savonlinna, South-Eastern Finland University of Applied Science (Xamk). The project aims to build a full-scale experimental version of the Hugger crusher and develop Hugger technology working parameters using several testing materials, including municipal solid waste incineration bottom ash. Along with FiberLaboratory, Kymilabs Research Center, Kymenlaakso's division of Xamk, participated in the testing part of the project. The project received funding from the Regional Council of South Savo from the European Regional Development Fund.

## INTRODUCTION

Incineration with energy and heat recovery is the best solution for the utilisation of non-recyclable poor-quality solid waste. The major solid residue from incineration is called incinerator bottom ash (IBA), which is about 20–25% of the waste mass input. In Finland, the largest portion of municipal solid waste is incinerated, yielding around 0.3 Mt of IBA annually (Sormunen 2017). Until recently, the main option for IBA was deposition in a landfill; however, land shortages, economic and environmental reasons, as well as increasingly demanding landfill legislation, stimulated a reconsideration of the treatment of IBA.

There are several ways to use IBA: as an alternative to virgin materials, such as gravel and sand in road construction; as a replacement for cement and concrete fabrication; and as a secondary raw material for metal extraction. IBA contains a large quantity of metals, both ferrous and nonferrous, and interest in their recovery is growing. In many industrialised countries, metal extraction from IBA is common practice with further their recycling. The latest data shows that the average metal recovery capacity is 63 kg of iron scrap and 17 kg of nonferrous metal per tonne of incinerated BA (Šyc et al. 2018). In addition to the economic benefits, the ecological issue of using a metal sorted IBA in civil engineering or landfilling is essential due to the removal risk of their leaching into the ecosystem.

One of the challenges in metal recovery is the accumulation of metal pieces with slag, which reduces the metal extraction rate. Crushing is a common practice to reduce the particle size

of the IBA and liberate metal particles from the aggregates. Crushing is usually associated with high energy demand and rapid wear of equipment. Nevertheless, this process is required to increase the efficiency of metal recovery technology. Mostly, impact and jaw crushers are used for IBA processing (Holm & Simon 2017).

Recently, novel Hugger technology for mineral grain size reduction was patented, and a demonstration version of the Hugger crusher was built at Oulu University (Kuopanportti & Hynynen 2018). Today all rights to the Hugger technology belong to Tevo Oy (Finland). There are several features that distinguish the Hugger technology from the traditional technology: (i) the large surface area of the compression chamber; (ii) the uniaxial slow compression of an individual particle; (iii) the same device crushes, grinds, classifies and transports the material; (iv) Hugger technology is energy-efficient; and (v) the equipment is quiet and almost vibration-free during operation. A project recently started at the South-Eastern University of Applied Science aims to build a full-scale experimental version of the Hugger crusher and develop Hugger technology working parameters using several testing materials, including IBA.

The main aim of the work was to estimate the physical parameters of IBA and its components. The IBA was collected in an incinerator located at Fortum Oyj in Riihimäki, Finland. Mostly household and industrial solid waste is incinerated at this plant. The plant uses a grate-type incinerator with a burning temperature of 1300°C. After incineration, the hot IBA is cooled with water and stored in an open field before further use. The IBA sample in this study was collected from the interim storage field, and after separation of the coarse fraction, > 16 mm, the sample was delivered to the FiberLaboratory, South-Eastern University of Applied Science, Figure 1.



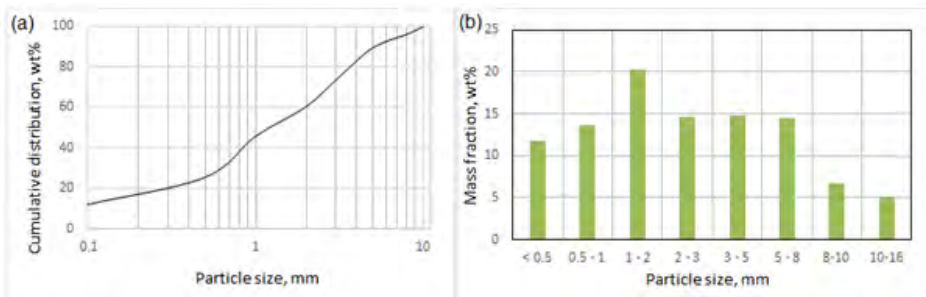
**FIGURE 1.** Incineration bottom ash (IBA) sample delivered to FiberLaboratory; IBA is fractionated with 16 mm hole screen (Photo Irina Turku).

## RESULTS AND DISCUSSION

### SORTING ANALYSIS

Particle screening analysis is used to determine the grain size distributions in the bulk IBA. Particle size analysis is important when the intended use of IBA is as a secondary aggregate for road construction or other civil engineering applications. The particle characterisation is also important for metal recovery technology.

The cumulative particle size distribution curve is shown in Figure 2(a). The curve has a well-defined S-shape with a gentle slope that indicates the easy sealability of the material (Izquierdo et al. 2001). The mass fraction distribution vs particle size is shown in Figure 2(b). The IBA has a broad particle size distribution, ranging from very fine (< 0.5 mm) to a maximum of 16 mm. Results also illustrated that the particles were almost homogeneously distributed for the < 0.5–8 mm fractions, except for the 1–2 mm fraction, which showed the largest mass, being ~6% larger. The 8–10 mm and 10–16 mm fractions were the smallest, accounting for ~12% and ~10%, respectively. The fine fraction, 0–2 mm, was the heaviest, accounting for ~47% of the total weight of the IBA sample. According to the literature, 30–40% of BA particles are smaller than 2 mm, and 20% are larger than 2 cm (Šyc et al. 2020). According to Rantsi, who analysed bottom ashes located in Ilmajoki and Ämmässuo in Finland, the largest grain fractions in the bottom slag were 0–2 mm; the fractions 2–12 mm and > 12 mm grain size account 15% for each (Saarinen 2015). Thus, it can be said that despite the limited 16 mm grain size in our analysis, the obtained results are in line with what has been commonly observed. In the conventional techniques of metal recovery, fine fractions of < 2 mm are usually discharged despite the large content of the nonferrous metals. Fine particles accumulate moisture due to large surface areas, making the particles sticky and challenging to treat.



**FIGURE 2.** Distribution of IBA sample, < 16 mm, into size fractions: (a) cumulative particle size distribution and (b) mass distribution (figure Irina Turku).

## BULK DENSITY AND MOISTURE CONTENT

The measured bulk density for uncompacted IBA samples is shown in Table 1, along with the benchmark parameters found in the literature. The bulk density, 1140 kg/m<sup>3</sup>, is very close to values reported in the literature, which range from 1200 to 1800 kg/m<sup>3</sup> (Šyc et al. 2020). The density of IBA mostly depends on the chemical composition, grain size and porosity. Thus, ashes with high iron content will have a higher density. In addition, the smaller size grain IBA fraction will have a higher bulk density than the fraction containing large grains. In our case, a sorted IBA of < 16 mm, the density fits the range of values published in the literature, also displayed in the table.

The moisture content analysis of the IBA is also reported in Table 1. In general, the moisture content depends on the type of IBA discharge, wet or dry. The moisture of the wet discharge BA is 18–25%, whereas dry discharge IBA has moisture below 1% (Šyc et al. 2020). To achieve some balance in the control parameters that is important for further use, IBA is usually conditioned for some period under atmospheric conditions. In our case, the IBA was wet discharged and then stored for several months before samples were collected. The measured moisture content of 10.9 wt% corresponds to approximately half a year of storage for the wet-quenched IBA.

Another important feature that influences IBA moisture is grain size. A smaller grain size results in a larger surface area and, hence, the capacity to absorb a larger amount of moisture. With increasing IBA particle size, the moisture content decreases. Thus, Allegrini et al. reported that the total moisture content of unsorted IBA after four months of outdoor storage was 12 wt%. The moisture content decreased from 17 wt% to 4.9 wt%, in line with the grain size increase from fine (< 2 mm) to 16–50 mm fractions (Allegrini et al. 2014). Consequently, the Riihimäki IBA sample has moisture comparable to those reported in the literature for aged IBA consisting of particles of heterogeneous size. The standard deviation of the measurement is small, showing the uniformity of the IBA sample. However, the parameters include a certain inaccuracy due to some moisture evaporation mostly from the surface of the IBA during transportation and subsequent storage in closed containers (condensation water drops on the container lid were observed).

**TABLE 1.** BA bulk density and moisture content parameters. Standard deviation is given in parentheses.

Parameter	Value	Reference value
Bulk density, kg/m <sup>3</sup>	1140 (21)	1200–1800 kg/m <sup>3</sup> (Šyc et al. 2020)
Moisture content, wt%	10.9 (0.1)	12 wt% (Allegrini et al. 2014)

## IBA MATERIALS CHARACTERISATION

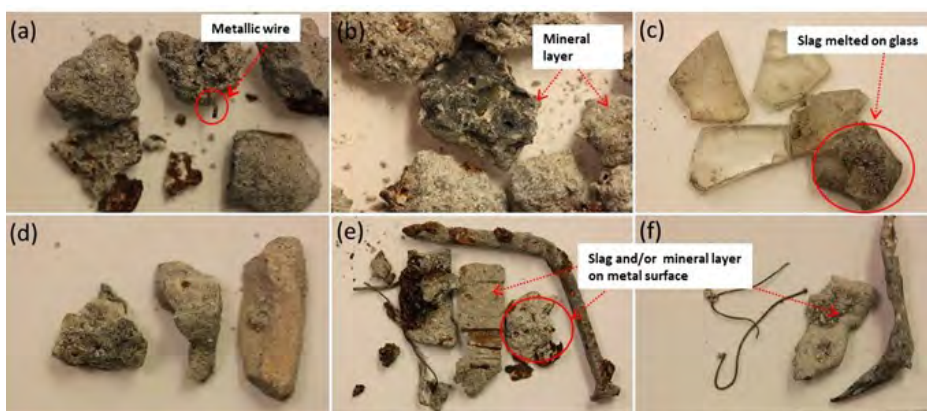
Bottom ash is a multi-component material consisting of the materials that survived incineration and novel phase originating from the melt. Normally, IBA consists of the following components: slag, minerals/construction waste, glass shards, scrap metal and a small amount of unburnt organic material. In this work, each size fraction larger than 3 mm was separated by hand into the above-considered fractions. The selected results are displayed in Figure 3.

Slag is the product resulting from melting waste at elevated temperatures followed by very rapid cooling; see Figure 3(a). Typical slag can be described as black in colour, with a high vesicular glassy matrix (> 95%) incorporating minor ingredients such as microcrystals, metal-rich inclusions and refractory fragments. Because of the rapid cooling, a major part of the slag consists of porous, thermally fractured particles. The pores and fractures originate from the escape of gases during combustion and quenching.

In Figure 3(b), traces of vesicles in a black glassy matrix can be observed. However, these particles are covered with a thin mineral layer. The mineral layer is composed of a so-called “quenching product”, a mineral phase precipitated during wet exhausting of hot IBA (Inkaew et al. 2016), and the minerals formation and IBA solidification process continue during the storage period (Bunge 2019).

Figure 3(c) shows the separated glass shards. The main sources of waste glass in the IBA are domestic items such as bottles, other glass containers and windows. With increasing glass recycling rates, the weight percentage of glass in the bottom ash stream should decrease. Glass particles are usually clean, translucent and easily recognised. Sometimes slag is melted onto the surface of the glass particles, as in Figure 3(c). This particle was categorised as glass due to the predominance of glass. IBA glass, scrap metal and construction waste survive burning because their melting temperatures are higher than the temperature in the incinerator.

Ferrous and nonferrous scrap metals, shown in Figures 3(d) and (e), respectively, are also easily identified because they appear in their base forms, such as in nails and wire. It can be seen that slag is melted on the surface of these metallic particles along with some mineral phase that forms during the wet quenching of the IBA (Lamers 2015). Figure 3(f) illustrates the construction waste particles, including stone and ceramic particles, which were separated from the IBA.



**FIGURE 3.** BA separated fraction, 10–16 mm. (a) slag particles; (b) slag particle fracture; (c) glass shards; (d) construction waste; (e) ferrous metals; (f) nonferrous metals (Photo Irina Turku and Oona Karjalainen).

## CONCLUSIONS

This work analysed the physical parameters and grain size distribution of IBA and classified the materials comprising IBA. Despite the high levels of recycling achieved in many industrial countries today, a large portion of metal remains in the bottom ash for many reasons. One reason is the impossibility of separating the metallic particles when they are agglomerated with slag. Often the metallic particles are enclosed in a slag matrix, or slag is melted on the surface of the metal. The rate of metal recovery and the quality of the extracted materials can be improved when the crushing procedure is applied. The Hugger technology, which is characterised by improved working parameters compared to conventional technologies, can be applied in this context.



## REFERENCES

- Allegrini, E., Maresca, A., Olsson, M.E., Holtze, M.S., Boldrin, A. & Astrup, T.F. 2014. Quantification of the resource recovery potential of municipal solid waste incineration bottom ashes. *Waste Management* 34, 1627–1636.
- Bunge, R. 2018. Recovery of metals from waste incineration bottom ash. Removal, treatment and utilisation of waste incineration bottom ash. *Vivis* 63–141.
- Holm, O. & Simon, F.-G. 2017. Innovative treatment trains of bottom ash (BA) from municipal solid waste incineration (MSWI) in Germany. *Waste Management* 59, 229-236.
- Inkaew, K., Saffarzadeh, A. & Shimaoka, T. 2016. Modeling the formation of the quench product in municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash. *Waste Management* 52, 159–168.
- Izquierdo, M., Vazquez, E., Querol, X., Barra, M., López, A. & Plana, F. Use of bottom ash from municipal solid waste incineration as a road material. 2001 International Ash Utilization Symposium, Center for Applied Research, University of Kentucky.
- Kuopanportti, H. & Hynynen, I. Laitteisto ja menetelmä materiaalin hienostamiseen. International Patent Application WO2018/078221 A1, 3.5.2018.
- Lamers, F. Treatment of Bottom Ashes of Waste-to-Energy Installations – State of the Art, in: Thomé-Kozmiensky, K.J. & Thiel, S. (Eds.). *Waste Management, Volume 5 – Waste-to-Energy* - TK Verlag/Karl Thomé-Kozmiensky, 2015, 271-390. ISBN 978-3-944310-22-0.
- Rantsi, R. Pohjakuonaa katukiviin ja kenttäpohjiin. Tekes Green Growth. Uusiouutiset 1/2015. toim. Saarinen, E.
- Sormunen, A. Jätteenpolton pohjakuonien käyttö maarakentamisessa ja betoniteollisuuden tuotteissa. PP-esitys tuhkaseminaarissa 2.11.2017.
- Šyc, M., Simon, F.-G., Hykš, J., Braga, R., Biganzoli, L., Costa, G., Funari, V. & Grosso, M. 2020. Metal recovery from incineration bottom ash: state-of-art and recent developments. *Journal of Hazardous Materials* 393, 122433.
- Šyc, M., Simon, F.-G., Biganzoli, L., Grosso, M. & Hykš, J. 2018. Resource recovery from incineration bottom ash: Basics, Concept, Principles, *Vivis*.

# UUSI BIOJALOSTUSKONSEPTI UUSIUTUVIEN BIPOHJAISTEN KEMIKAALIEN JA MATERIAALIN VALMISTUKSEEN

Noora Haatanen & Juha-Pekka Ontronen

Erilaisilla puhdistus- ja erotusmenetelmillä biojalostamon jatkokäsittelyvaiheina on tärkeä rooli lisäarvoa tuottavien biokemikaalien tuotannossa. Tehokkailla konversio- ja erotustekniikoilla voidaan saavuttaa puhtaampia lopputuotteita sekä ympäristöystävällisempiä materiaaleja ja kemikaaleja korvaamaan fossiilisia vaihtoehtoja. Tutkimus on osa IMPRESS-hanketta, jonka tavoitteena on kehittää uusi tehokas prosessi biopohjaisten kemikaalien ja materiaalien valmistukseen. Hankkeella on jo saavutettu merkittäviä tuloksia muun muassa membraaneista ensimmäisen vaiheen sokerivirran vedenpoistossa sekä erilaisten adsorptiomateriaalien testaamisen tehostamisessa. IMPRESS - Integration of efficient downstream PRocessEs for Sugars and Sugar alcohols -hanke on saanut rahoitusta Euroopan unionin Horisontti 2020 -tutkimus- ja innovaatio-ohjelmasta rahoitussopimuksen No. 869993 mukaisesti, ja sen kesto on 1.9.2019–31.8.2023.

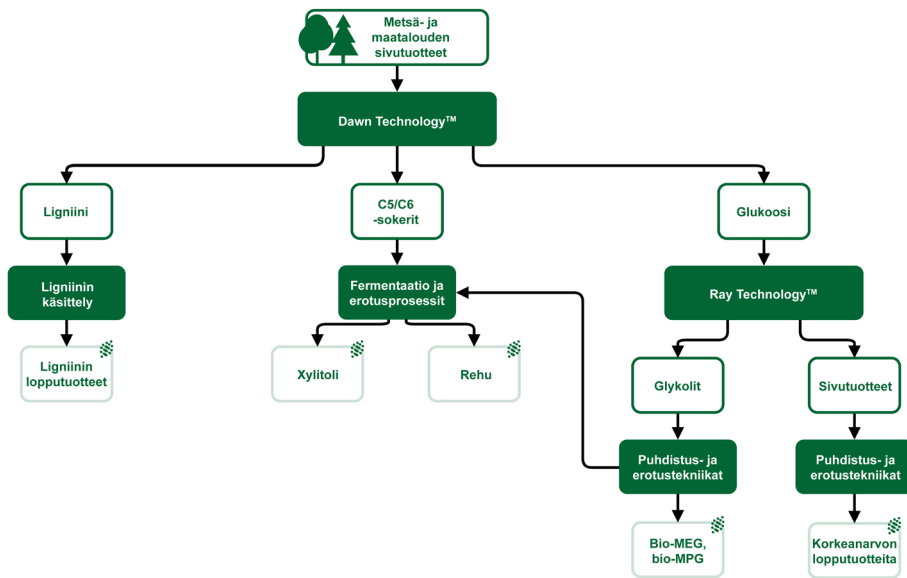
## JOHDANTO

IMPRESS (Integration of efficient downstream PRocessEs for Sugars and Sugar alcohols) -hankkeessa kehitetään uudenlainen biojalostamokonsepti, jolla tuotetaan ruoantuotantoon kelpaamattomasta kasvipohjaisesta raaka-aineesta uusiutuvia kemikaaleja ja materiaaleja. Hankkeen tavoitteena on suunnitella mahdollisimman tehokas ja ympäristöystävällinen menetelmä integroimalla valikoituja todennettuja konversioteknologioita sekä tarvittavia puhdistus- ja erotustekniikoita. Jatkokäsittelyvaiheiden (*downstream processes*) yksityiskohdaisella suunnittelulla pyritään varmistamaan prosessivirtojen hyödynnettävyys seuraavassa prosessivaiheessa sekä lopputuotteiden puhtaus. Esimerkiksi ligniini hyödynnetään edelleen enimmäkseen polttamalla ja hemiselluloosa muuntamalla polttoaineiksi. Tehokkaan esikäsittelytekniikan löytäminen, joka pystyy käsittelemään useita raaka-aineita, ja kaikkien prosessivirtojen kattava hyödyntäminen uudentyypisillä jatkokäsittelymenetelmillä on avain biopohjaisten kemikaalien tehokkaaseen tuotantoon.

## IMPRESS-BIOJALOSTAMOKONSEPTI

IMPRESS-biojalostamokonsepti perustuu jo todennettujen puhdistus- ja erotustekniikoiden, kuten kiteytyksen, tislauksen, suodatuksen, SMB (*simulated moving bed*)-kromatografian ja adsorption, tehokkaaseen integrointiin prosessin eri tuotevirtojen laadun optimoimiseksi (Kuva 1). Konseptiin kuuluvat keskeiset konversiotekniikat ovat Dawn Technology™ ja Ray Technology™, ksylitolin fermentointitekniikka sekä ligniinin aktivointi sekä prosessointi ligniininanopartikkeleiksi.

Hankekonsortio koostuu kymmenestä eurooppalaisesta partnerista, joista jokaisella on oma erityinen osaamisalueensa hankkeessa. Hanke on nelivuotinen, ja ensimmäisen kolmanneksen aikana on saavutettu merkittäviä tuloksia (IMPRESS Cordis 2021). Tässä artikkelissa esitellään tarkemmin suunniteltua biojalostamokonseptia, eri partnereiden roolia siinä sekä edistysaskeleet muun muassa membraaniteknologian ja adsorption osalta.

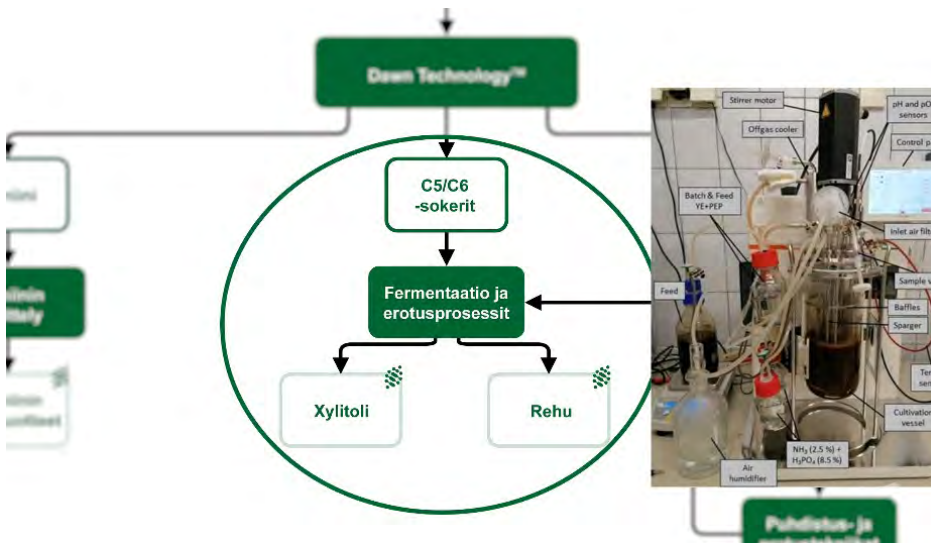


**KUVA 1.** IMPRESS-biojalostamokonsepti (kuva Juha-Pekka Ontronen).

## XYLITOLIN TALTEENOTTO

Kyseessä olevan IMPRESS-biojalostamokonseptin ensimmäisessä vaiheessa hyödynnetään Dawn Technology™-teknologiaa. Kyseinen tehostettuun suolahappohydrolyysiin perustuva menetelmä mahdollistaa kasvipohjaisen biomassan muuntamisen kolmeen fraktioon: kahdenlaisiksi teollisuussokereiksi ja ligniiniksi.

Prosessissa muodostuu kaksi erillistä sokerivirtaa, C6-sokerit (pääasiassa glukoosia) sekä C5/C6-sokerit (pentoosi/heksoosi, hemiselluloosa). Hankkeessa tutkitaan glukoosipitoisen sokerivirran muuntamista uusiutuviksi teollisuuskemikaaleiksi Avantiumin Ray Technology™ -prosessia hyödyntäen. Tällaisia kasvipohjaisia kemikaaleja ovat muun muassa monoetyleeniglykoli (plantMEG™), jota käytetään esimerkiksi muovin tuotannossa, tai monopropyleeniglykoli (plantMPG™) esimerkiksi lääke- ja kosmetiikkasovelluksiin. Toinen prosessin sokerivirroista, hemiselluloosavirta (C5/C6), on heterogeenisyytensä vuoksi vaikeampi hyödyntää. Se kuitenkin sisältää arvokkaita komponentteja, jotka on tarkoitus ottaa talteen ennen kyseisen sokerivirran prosessointia jatkotuotteiksi, kuten rehuksi. Tässä hankkeessa hemiselluloosahydrolysaatti käsitellään fermentaatioprosessilla (kuva 2), jossa mikro-organismit muuttavat sen sisältämän xyloosin korkeamman arvon tuotteeksi, xylitoliksi. Vogelbush on itävaltalainen bioteknologiayhtiö, jonka erityisosaamisalueisiin kuuluu muun muassa erilaisten biologisten tuotantotekniikoiden yhdistäminen niihin liittyviin jatkoprosesseihin. Vogelbusch on testannut useiden Dawn Technology™ -prosessista saatujen sokerivirtojen soveltuvuutta fermentointiin, ja tulokset ovat lupaavia.

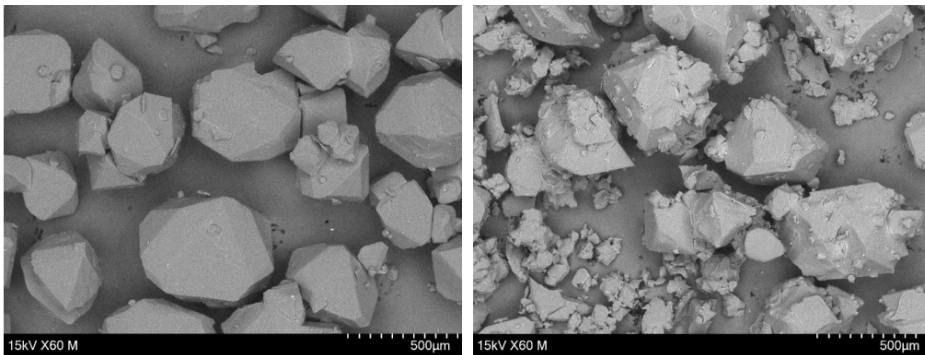


**KUVA 2.** Fermentaatiokokeen prosessilaitteisto (Kuva Vogelbusch)

Tämän jälkeen xylitoli talteenotetaan fermentaatiosta syntyvästä matriisista kromatografisella erotusprosessilla, simulated moving bed (SMB). Tästä vaiheesta vastaa saksalainen yritys nimeltä KNAUER, joka kehittää ja valmistaa korkealaatuisia tieteellisiä instrumentteja nestekromatografiajärjestelmiin ja -komponentteihin sekä tarjoaa metodikehityspalveluja. KNAUER on testannut erilaisia kolonnimateriaaleja sekä erotusprosessin toimivuutta keino- ja todellisilla fermentaationäytteillä. Kromatografisesta erotusprosessista saatuja tuloksia pystyttiin hyödyntämään myös toiseen suuntaan. Niiden perusteella pystyttiin

säätämään aiempaa käsittelyvaihetta eli fermentointiprosessia ja sen ajoparametreja ja näin parantamaan ksylitolin talteenottoa.

Ennen loppukäyttöä erotettu ksylitoli tulee vielä puhdistaa. Ksylitolia käytetään muun muassa elintarvikkeissa, lääkkeissä ja kosmetiikassa. Partikkelikoolla ja -muodolla on suuri vaikutus näiden jatkokäyttösovellusten kannalta, kuten tuotteen suotautuvuus- ja kuivausominaisuuksiin. Aalto-yliopisto on tutkinut kolmen erilaisen kiteytysprosessin soveltuvuutta ksylitolin kiteytykseen: jäähdytyskiteytystä, haihdutus kiteytystä sekä ksylitolin liukoisuutta alentavan liuottimen lisäyksen perustuvaa kiteytystä (anti-solvent crystallization) (Zaykovskaya 2021). Työstä on Aalto-yliopistossa vastannut Kemian tekniikan ja metallurgian laitos. Tulosten perusteella kiteytysprosessin onnistumiseen, erityisesti jäähdytys- ja haihdutus kiteytyksessä, vaikuttaa liuoksen viskositeetti. Suurimmat kiteet, tasalaatuisin kidejakauma sekä paras saanto on saavutettu riittävän pitkällä panosajoilla.

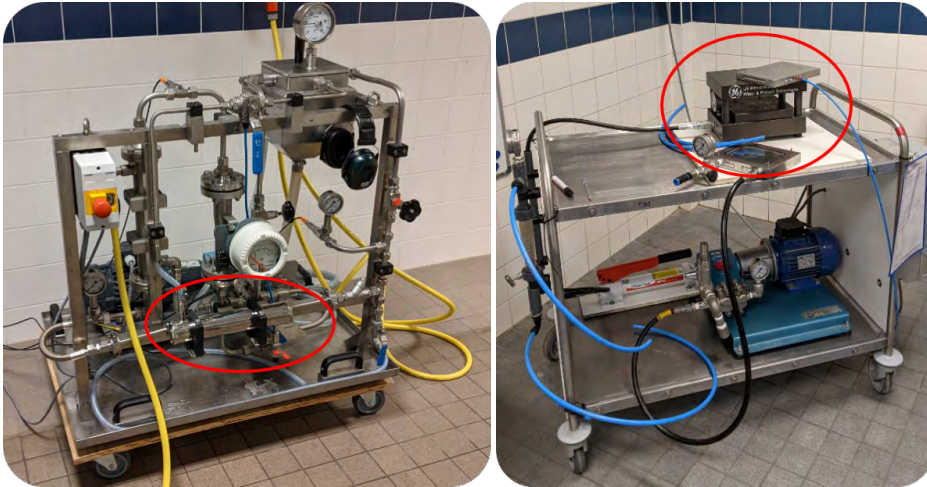


**KUVA 3.** SEM-kuvia ksylitolikiteistä jäähdytys- (vasen) ja haihdutus- (oikea) kiteytyksellä (Kuva Aalto-yliopisto)

## MEMBRAANITEKNOLOGIA VEDENEROTUKSESSA

Molempien edellä kuvattujen sokerivirtojen hyödynnettävyyden parantamiseksi hankkeessa etsitään sopivaa vedenerotusprosessia kyseisten virtojen konsentroimiseksi. Vedenpuhdistukseen erikoistunut hollantilainen teknologiayritys nimeltä Lenntech vastaa tästä osuudesta ja on testannut erilaisia kalvoerotusmenetelmiä, kuten nanosuodatusta ja kalvotislausta. Nanosuodatus (*nanofiltration*) perustuu erikoiskalvon eri puolilla vallitsevaan paine-eroon. Putkimaisen laitteen (kuva 4) kalvo läpäisee veden ja pienimolekyyliset ionit (kuten suolat), mutta sulkee isommat molekyylit (kuten sokerit) pois. Alustavien tulosten perusteella menetelmän soveltuvuus kyseessä oleville sokereille on vielä osittain epäselvää. Kalvotislaus (*membrane distillation*) sen sijaan perustuu lämpötilaeroon, jossa mikrohuokoinen hydrofobinen kalvo erottaa kaksi vesiliuosta eri lämpötiloissa. Kalvo läpäisee kaasumaisen faasin, kuten vesihöyryn ja haihtuvat orgaaniset yhdisteet, mutta pidättää haihtumattomat yhdisteet, kuten sokerit. Koeajojen tulosten perusteella kyseinen menetelmä soveltuu hyvin

sokereiden erottamiseen lähes 100 prosentin saannolla, mutta valitettavasti se pidättää myös suolat. Tulokset ovat joka tapauksessa olleet lupaavia, ja kokeita jatketaan soveltuvan tekniikan löytämiseksi ja ajoparametrien optimoimiseksi.



**KUVA 4.** Nanosuodatuslaitteisto (Kuva Lenntech)

## LIGNIINIJOHDANNAISET

Ensimmäisestä erotusvaiheesta syntyy sokereiden lisäksi myös ligniinivirta, niin sanottu Dawn Technology™ -ligniini (jatkossa Dawn-ligniini). Hankkeessa tarkastellaan Dawn-ligniinille kahta jalostuspolkua, ligniininanopartikkeli- sekä aktiivihiihisovellusta. Ligniininanopartikkeleiden tutkimuksesta vastaa Aalto-yliopiston Biotuotteiden ja biotekniikan laitos. Yleisesti ligniinin jatkokäyttöä vaikeuttaa sen alkuperäisen käsittelemättömän rakenteen heterogeisuus sekä molekyylipainon laaja hajonta. Erillisellä käsittelyllä ligniinin ominaisuuksia voidaan säätää jatkokäytölle ihanteellisemmiksi. Nanomateriaaliksi muunnetun ligniinin molekyylipainojakauma on pieni, ja sen pinnan muoto on tarkkarajainen (Österberg 2020). Tutkimusten osalta on edetty alustavissa muun muassa Dawn-ligniinin liukoisuutta ja rakennetta analysoivissa kokeissa, mutta ligniininanopartikkeleiden valmistuksen optimointi on vielä kesken. Potentiaalisia käyttökohteita ligniininanopartikkeille ovat muun muassa puuliimat, komposiitit tai dispergointiaineet.

Ligniinin aktivointikokeista vastaa hankkeen koordinaattorina toimiva ja Dawn ja Ray Technology™ -prosessit omistava hollantilainen kehitysyritys nimeltä Avantium. Heidän johdolla on demonstroitu Dawn-ligniinin aktivointi suuren ominaispinta-alan aktiivihieksi. Seuraavaksi tutkitaan kyseisten aktiivihiihen puhdistustehokkuutta sekä testataan myös niiden soveltuvuutta muun muassa IMPRESS-konseptiin.



## ADSOPTIO JA GLYKOLITUOTEVIRRRAN PUHDISTUS

Yksi projektin tavoitteista on puhdistaa Ray Technology™ -prosessivaiheesta muodostuneet glykoluotevirrat. Eräs puhdistusmenetelmistä on adsorptio, ja tavoitteena on tutkia useita erilaisia adsorptiomateriaaleja. Avantium rakensi tätä varten erityisen laitteen, niin sanotun suuren suorituskyvyn nesteadsorption demonstraatiolaitteiston (A dedicated high throughput liquid adsorption demonstration unit, kuva 5). Laitteisto on otettu käyttöön, ja ensimmäinen sarja prosessiin liittyviä kokeita monoetyleeniglykolin (MEG) puhdistamiseksi on valmistunut. Laitteiston avulla on mahdollista testata hyvin suuri määrä erilaisia adsorptiomateriaaleja samanaikaisesti ja automatisoidusti. Myös ligniinistä valmistettuja aktiivihiliä tullaan testaamaan tällä laitteistolla hankkeen aikana.



**KUVA 5.** Suuren suorituskyvyn nesteadsorption demonstraatiolaitteisto, engl. *A dedicated high throughput liquid adsorption demonstration unit* (Kuva Avantium)

Glykoluotevirtojen parissa työskentelee useita hankkeen partnereita. KNAUER suoritti ensimmäiset kokeilut SMB-kromatografiatekniikan avulla erytritolin ja sorbitolin puhdistamiseksi. Sulzer Chemtech on sveitsiläisen kemianteollisuuden johtavan asiantuntijayrityksen Sulzer Oy:n divisioona, jonka portfolioon kuuluu muun muassa kiteytys- ja tisluserotusprosessit. Sulzer ja Avantium tekevät yhteistyötä tislauksessa, ja edistymistä on tapahtunut muun muassa jatkuvan tislaukolonnin kehittämisessä ensimmäisen kaupallisen Ray Technology™ -laitoksen MEG:n ja MPG:n puhdistamiseksi.

## KONSEPTIN MALLINNUKSEEN JA JATKOSUUNNITELMAT

Lisäksi biojalostamoprosessin kokonaisuutta tutkitaan niin taloudellisesta kuin ympäristönäkökulmasta. Tästä kokonaisuudesta vastaa kaksi alan asiantuntijayritystä, joilla molemmilla on kehitetty oma teknologia kyseiseen mallinnukseen. Hollantilainen Process



Design Center (PDC) on erikoistunut prosessien kehittämiseen ja integrointiin ja vastaa IMPRESS-konseptin mallintamisesta (conceptual process design) käyttäen omaa PRO-SYN<sup>®</sup>-järjestelmää. Sphera on konsortion elinkaariarvioinnin (LCA) asiantuntija. Sphera tarjoaa LCA-ohjelmistoja ja tietokantoja (oma GaBi-ohjelmisto ja tietokannat) sekä erityisiä konsultointipalveluja kestävän kehityksen alalla ja vastaa IMPRESS-konseptin elinkaari-mallinnuksesta. Molemmat selvitykset ovat edenneet hyvin, mutta on ilmeistä, että niiden tulokset tulevat valmistumaan vasta hankkeen loppuvaiheessa, kun prosessikonsepti on varmistunut. Elinkaarimallinnuksessa on kerätty tarvittavaa dataa fossiilisista verrokkituotteista sekä käytettyjen raaka-aineiden kasvihuonepäästöistä. IMPRESS-konseptilla tavoitellaan huomattavaa vähennystä niin kasvihuonekaasupäästöissä kuin käyttö- ja pääomamenoissa.

## LÄHTEET

IMPRESS Cordis. 2021. Cordis EU research results. Periodic Reporting for period 1 - IMPRESS (Integration of efficient downstream PProcessEs for Sugars and Sugar alcohols). Saatavissa: <https://cordis.europa.eu/project/id/869993/reporting>

Zaykovskaya, A., Temmel, E., Stepanski, M., Gevers Deynoot, B., de Jong, E. & Louhi-Kultanen, M. 2021. Batch crystallization of xylitol by cooling, evaporation and anti-solvent addition. Poster presentation, ISIC 2021 21st International Symposium on Industrial Crystallization.

Österberg, M., Sipponen, M., Mattos, B. & Rojas O. 2020. Spherical lignin particles: a review on their sustainability and applications. *Green Chem.*, 2020, 22, 2712–2733.

# LESSONS LEARNED – VERKKO- OPPIMATERIAALIN TUOTTAMISEN KEHITYSPROSESSI

Kati Jordan

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu Oy (Xamk) tuottaa IMPRESS-hankkeessa 15 opintopisteen verkko-opiskelukokonaisuuden The Future of Biorefining. Kokonaisuus rakennetaan Moodle-pohjaiseen Open Learn -oppimisympäristöön yhteistyössä yhdeksän eurooppalaisen hankekumppanin kanssa. Hanketta koordinoi hollantilainen Avantium. Muita hankekumppaneita ovat Sulzer, Knauer, Lenntech, Vogelbusch, Sphera, PDC, CNRS ja Aalto-yliopisto. Xamk vastaa hankkeen viestinnästä ja tulosten levittämisestä sekä koulutusmateriaalin tuottamisesta. IMPRESS - Integration of efficient downstreAM PRocessEs for Sugars and Sugar alcohols -hanke on saanut rahoitusta Euroopan unionin Horizon 2020 -tutkimus- ja innovaatio-ohjelmasta, ja hankkeen kesto on 1.9.2019–31.8.2023.

## JOHDANTO

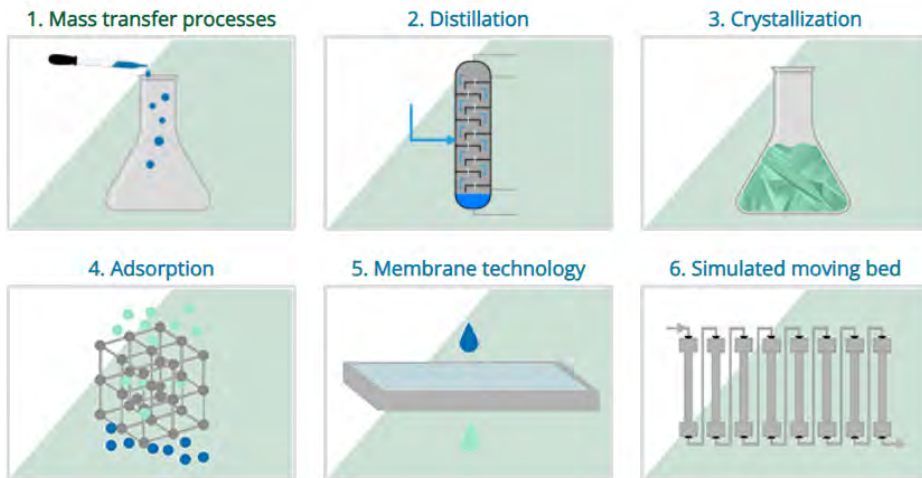
The Future of Biorefining -opintokokonaisuus jakaantuu kolmeen 5 opintopisteen moduuliin:

- Module 1: Separation and purification processes in biorefineries
- Module 2: Process design and analysis
- Module 3: Conversion technologies

Tällä hetkellä työn alla on ensimmäinen moduuli. Tässä artikkelissa käsitellään verkko-opiskelukokonaisuuden rakentamiseen liittyviä haasteita ja sitä, kuinka niitä on IMPRESS-hankkeessa ratkottu.

## RYHTIÄ RAKENTEILLA

Moduulin rakenteeksi on valittu ruudukkonäkymä (kuva 1). Visuaalinen ilme noudattelee hankkeen värimaailmaa ja tyyliä. Hankkeen viestintävastaava Juha-Pekka Ontronen on luonut osioille omat kuvakkeet, joita hyödynnetään valikoissa ja osaamismerkeissä.



**KUVA 1.** Separation and purification processes in biorefineries -moduulin ruudukonäkymä (kuva Kati Jordan).

Jokaisen kuvakkeen takaa löytyy samantyylinen, tasoihin jaoteltu rakenne, jonka avulla pyritään luomaan selkeyttä (kuva 2). Teoria on koottu Moodle-kirjoihin, jotka opiskelija voi itse merkitä suoritetuiksi. Testeihin tulee vihreä suorituserkintä automaattisesti, kun testi on suoritettu hyväksytysti.

## 1. MASS TRANSFER PROCESSES

		Your progress
	Getting started	<input checked="" type="checkbox"/>
	Level 1: Mass transfer principles	<input checked="" type="checkbox"/>
	TEST 1: Mass transfer	<input checked="" type="checkbox"/>
	Level 2: Mechanisms of mass transfer	<input checked="" type="checkbox"/>
	TEST 2: Mass transfer	<input checked="" type="checkbox"/>
	Level 3: Industrial processes	<input type="checkbox"/>
	TEST 3: Mass transfer	<input type="checkbox"/>
	Glossary of mass transfer	

**KUVA 2.** Kaikissa osiossa sisältö on jaoteltu tasojen mukaan (kuva Kati Jordan).

Oppimateriaali on jaoteltu tasojen mukaan. Tällä pyritään luomaan oppimiskokemuksesta sujuva ja loogisesti etenevä. Etenemistä ei kuitenkaan ole lukittu, vaan käyttäjä voi liikkua tasojen välillä ja etsiä itselleen sopivan tason.

Myös Moodle-kirjojen kappaleiden rakenne haluttiin pitää yhtenäisenä, joten jokaisessa luvussa on samat osiot: Learning objectives, Study the basics, Watch the video, Practice, Bonus material. Visuaalista ulkoasua päivitettiin vielä yhtenäisemmäksi muuttamalla kaikkien upotusten leveydeksi 640 px.

Teorian esitystapa vaihdettiin H5P-työkalulla tehdystä diaesityksestä upotettuun PowerPointiin. Näin varmistettiin materiaalin parempi jatkohyödynnettävyys sekä helpotettiin materiaalin yhteistyöstämistä partnereiden kanssa.

Bonusmateriaalin esitystapa muutettiin upotuksista painikkeiksi. Bonusmateriaalit ovat pääasiassa linkkejä videoihin. Painikkeen yhteyteen lisättiin tieto videon pituudesta ja lyhyt kuvaus videon sisällöstä. Näin pyritään alentamaan käyttäjän kynnystä klikata materiaali auki. Bonusmateriaalit voivat olla myös pdf-tiedostoja.

## UPOTUKSILLA SUJUVUUTTA OPISKELUUN

Jo hankkeen alkuvaiheessa valittiin teorian esitysmuodoksi Moodle-kirjat, joiden lukuihin teoria, videot ja tehtävät lisättiin upotuksina. Upotusten avulla pyrittiin selkeyttämään opiskelijan etenemistä. Opiskelijan ei tarvitse avalla erillisiä linkkejä tai tiedostoja, vaan eteneminen tapahtuu (bonusmateriaaleja lukuun ottamatta) samassa Open Learnin välilehdessä.

YouTube-upotukset toteutettiin YouTube'n omalla upotuskoodilla, joka on saatavilla videon Share-toiminnon kautta. Videon koon parametreiksi muutettiin 640 px (height) ja 360 px (width). Upotukset toimivat ongelmitta, ja käyttöliittymä on useimmille tuttu. YouTube-upotusten käyttöoikeuksista oli kuitenkin hieman epäselvyyttä. Periaatteessa YouTube'n käyttöehdot sallivat upotuksen, jos videon lataaja ei ole sitä erikseen estänyt, mutta Xamkin suosituksena on käyttää linkkejä upotusten sijaan. Upotuslupaa päätettiin tiedustella suoraan videoiden tuottajilta. Kysely lähetettiin 12 tuottajalle, ja kaikki yhdeksän vastannutta sallivat upotuksen, kunhan materiaali ei ole maksumuurin takana ja upotus toteutetaan YouTube'n oman upotuskoodin avulla. Tällöin katselukerrat kertyvät videon tuottajalle.

Jos Learnissa haluaa YouTube-upotusten sijaan käyttää linkkejä, pitää Learnin asetuksista ottaa pois päältä multimedialisäosa, joka muuttaa YouTube-linkit automaattisesti Moodlen omiksi upotuksiksi.

## UPOTUSTEN KÄÄNTÖPUOLIA

Kurssia rakennettaessa on haluttu pitää mielessä myös hallinnoinnin helppous ja materiaalin uudelleenhyödynnettävyys. Upotusten käyttäminen on tuonut tähän omat haasteensa.

H5P-tehtävät on luotu erillisiin, opiskelijoilta piilotettuihin osioihin. Aluksi upotuskoodi otettiin suoraan H5P-elementin Embed-komennon kautta. Tällöin upotuskoodit joudutaisiin kuitenkin luomaan uudelleen, jos kurssista tehtäisiin kopio. Tämä voidaan välttää käyttämällä editorin H5P-painiketta, jolloin tiedosto ladataan uudestaan kyseiselle sivulle. Tällöin haasteena on päivitys. Jos H5P-elementtiä joutuu päivittämään, pitää se myös ladata sivulle uudestaan. Yhtenäisen ilmeen vuoksi H5P-elementtienkin leveydeksi asetettiin 640 px. Tämä onnistuu lisäämällä upotuksen html-koodiin `style="width:640px"`.

PowerPoint-esitysten upottamisessa ilmeni yllättäen monenlaisia ongelmia. Microsoft tarjoaa upotuskoodin luomisen OneDrive-tilien kautta, kun tiedosto on asetettu julkiseksi. Tällöin upotus on kuitenkin työntekijän henkilökohtaisen tilin takana ja upotuskoodi lakkaa toimimasta henkilön poistuttua Xamkin palveluksesta. Upotuskoodin luominen Sharepointin kautta ratkaisisi tämän ongelman, mutta julkisen linkin luominen Sharepointista ei ole tällä hetkellä mahdollista. Hankkeessa haluttiin välttää henkilökohtaisten tilien käyttöä, joten upotukset päädyttiin toteuttamaan Xamkin Slideshare-tilin kautta. Tässä haasteena on tiedoston päivittäminen. Jos tiedostoa joutuu muokkaamaan, pitää se ladata uudelleen Slideshareen, luoda uusi upotuskoodi ja vaihtaa se Learniin. PowerPointit kannattaa siis hioa huolellisesti esityskuntoon ennen upotusta. Opettajan henkilökohtaisilla kursseilla on järkevämpää käyttää OneDrivesta luotavaa upotuskoodia, jolloin tiedostoa muokattaessa uusi versio päivittyy automaattisesti myös oppimisympäristöön.

## AUTOMAATTISTA ARVIOINTIA

Kurssin arviointi perustuu Moodlen Quiz-työkaluilla toteutettuihin testeihin. Jokaisessa osiossa (Mass transfer, Distillation, Crystallization jne.) on kolme testiä (Test 1, Test 2, Test 3). Tehtävien hallinnoinnin helpottamiseksi kysymyspankkiin luotiin jokaiselle osiolle oma kategoria, jonka alle lisätiin testikohtaiset alakategoriat. Näiden alle voi vielä luoda aihekohtaisia kategorioita.

Testeistä haluttiin tehdä täysin automaattisesti arvioitavia. Quiz-työkalu sisältää perinteisten monivalinta-, vastauskenttä- ja aukko tehtävien lisäksi numeerisia tehtävyytypejä, joissa voi hyödyntää satunnaislukuja. Satunnaisuutta lisättiin myös kysymyspankin kategorioiden avulla. Yhteen kategoriaan luotiin useita samantasoisia tehtäviä eri lähtöarvoilla tai vaihtoehtoilla. Testiin Moodle arpoo yhden tehtävän valitusta kategoriasta. Näin testeihin saatiin lisättyä satunnaisuutta myös siinä tilanteessa, kun opiskelija haluaa tehdä testin uudestaan.

## NUMEROTEHTÄVIÄ JA SATUNNAISLUKUJA

Moodle tarjoaa monia erilaisia tehtävätyyppejä numeerisille tehtäville. Numerical-tehtävätyypissä vastaukset ovat numeerisessa muodossa ja vastaus voi sisältää myös yksiköitä. Arviointia varten voidaan määrittää virherajat, jolloin vältetään vääriä pistevähennyksiltä, jotka johtuvat erilaisen tarkkuuden käyttämisestä. Tehtävään voi myös lisätä vaihtoehtoisia oikeita vastauksia. Tässä tehtävätyypissä ei voida kuitenkaan käyttää satunnaislukuja.

Satunnaislukuja hyödyntävistä numeerisista tehtävätyypeistä helppokäyttöisin on Calculated Simple. Lisäksi käytettävissä on hieman monipuolisempi Calculated-tehtävätyyppi sekä Calculated Multichoice, jossa monivalintatehtävän vaihtoehtoihin voi lisätä satunnaislukuihin perustuvia vastauksia. Näiden tehtävätyyppien huonona puolena on kuitenkin se, että vastauskenttiä on vain yksi. Embedded answers (Cloze) -tehtävätyyppi puolestaan mahdollistaa useamman vastauskentän ja eri tehtävätyyppien yhdistämisen samaan tehtävään (monivalinta, aukkotehtävä, numeeriset tehtävät). Käyttö vaatii hieman opettelua, mutta on vaivan arvoista.

Numeeristen tehtävien työkaluista STACK on tällä hetkellä monipuolisin. Se mahdollistaa moniosaisenkin matemaattisten tehtävien rakentamisen, joissa on laaja satunnaisuus, useita vastauskenttiä ja monipuoliset palautteet. Tehtävien tekeminen on kuitenkin melko aikaa vievää eikä ohjelmointikokemuksestakaan ole haittaa. Tehtävätyyppi palkitsee arviointivaiheessa. Opiskelijoille tulee automaattisesti tehtävät eri satunnaisluvuilla, ja opettaja säästyy arviointiurakalta. Käytön myötä opettajalle kertyy myös tehtäväpankki, josta voi pienemmällä vaivalla muokata uusia tehtäviä.

## KIRJANPITO KUNTOON

Arviointikirja toimii sekä opettajan että opiskelijan työvälineenä opiskelun etenemisen seurannassa. Kaikki tieto opiskelijan suorittamista tehtävistä kertyy automaattisesti arviointikirjaan. Tällä kurssilla arviointi perustuu kuitenkin pelkästään testeihin ja H5P-tehtävät toimivat vain harjoitusmateriaalina.

Jokaiselle osiolle luotiin arviointikirjaan oma kategoria, jonka alle lisättiin osion testit. Opiskelijalle näkyvä arviointikirjanäkymä on pelkistetty siten, että siinä näkyvät vain testien tulokset prosentteina ja koko osion arvosana (kuva 3).

Grade item	Grade
<b>■ Separation and purification processes in biorefineries</b>	
<b>■ Course total</b> Mean of grades. Include empty grades.	-
<b>■ 1. Mass transfer</b>	
<b>■ 1. Mass transfer total</b> Mean of grades. Include empty grades.	2 (61 %)
<b>■ TEST 1: Mass transfer</b>	96 %
<b>■ TEST 2: Mass transfer</b>	88 %
<b>■ TEST 3: Mass transfer</b>	-
<b>■ 2. Distillation</b>	
<b>■ 2. Distillation total</b> Mean of grades. Include empty grades.	Fail (0 %)
<b>■ TEST 1: Distillation</b>	-
<b>■ TEST 2: Distillation</b>	-
<b>■ TEST 3: Distillation</b>	-

**KUVA 3.** Opiskelijan arviointikirjan näkymä (kuva Kati Jordan).

Opettajan näkymästä H5P-tehtäviä ei saa kokonaan poistettua, mutta näkymää selkeytettiin siirtämällä H5P-tehtävät erillisiin kategorioihin arviointikirjan loppuun ja muuttamalla Grade-tyypiksi None.

Arvosanoja varten Learniin luotiin oma arviointiskaala asteikolla Failed, 1, 2, 3, 4, 5. Moodle laskee arvosanat jokaiselle osiolle erikseen. Näiden keskiarvosta muodostuu koko moduulin (Separation and purification processes in biorefineries) arvosana.

## KIVIJALKANA MOTIVAATIO

Yhtenä kantavana ajatuksena kurssin rakentamisessa on ollut opiskelijan motivaation ylläpitäminen. Tähän on pyritty muun muassa selkeällä rakenteella ja sisällön jakamisella erillisiin osioihin ja tasoihin. Lisäksi opiskelijan saavutuksia ja suorituksia huomioidaan erilaisin keinoin.



Testit toimivat perustana kurssin arvioinnille. Completion progress -palkki seuraa kurssilla suoritettuja testejä. Jokaiselle testille on oma ruutu, joka muuttuu vihreäksi, kun testi on suoritettu hyväksytysti (kuva 4).



## COMPLETION PROGRESS



Progress: 19%






 TEST 1: Mass transfer  
Completed (achieved pass grade) 

**KUVA 4.** Completion progress -palkista opiskelija näkee nopeasti omien testiensä tilanteen (kuva Kati Jordan).

Kun opiskelija on suorittanut yhden osion kaikki kolme testiä hyväksytysti, hän ansaitsee kyseisen osion osaamismerkkin (badge). Osaamismerkeissä käytetään samoja kuvia kuin kurssin aloituksen ruudukkonäkymässä (kuva 5). Kun opiskelija on ansainnut osaamismerkit kaikista osioista eli suorittanut koko moduulin, hän voi tulostaa Open Learnista omalla nimellään varustetun sertifikaatin todistukseksi opintojakson suorituksesta.

## SEPARATION AND PURIFICATION PROCESSES IN BIOREFINERIES: BADGES

NUMBER OF BADGES AVAILABLE: 3

Image	Name 	Description	Criteria	Issued to me 
	Membrane technology	User has passed all three levels of the Membrane technology module.	Users are awarded this badge when they complete the following requirement: <ul style="list-style-type: none"> <li>• ALL of the following activities are completed: <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ "Quiz - TEST 1: Membranes"</li> <li>◦ "Quiz - TEST 2: Membranes"</li> <li>◦ "Quiz - TEST 3: Membranes"</li> </ul> </li> </ul>	
	Mass transfer	User passed all three levels of the Mass transfer module.	Users are awarded this badge when they complete the following requirement: <ul style="list-style-type: none"> <li>• ALL of the following activities are completed: <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ "Quiz - TEST 1: Mass transfer"</li> <li>◦ "Quiz - TEST 2: Mass transfer"</li> <li>◦ "Quiz - TEST 3: Mass transfer"</li> </ul> </li> </ul>	
	Distillation	User has passed all three levels of the Distillation module.	Users are awarded this badge when they complete the following requirement: <ul style="list-style-type: none"> <li>• ALL of the following activities are completed: <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ "Quiz - TEST 1: Distillation"</li> <li>◦ "Quiz - TEST 2: Distillation"</li> <li>◦ "Quiz - TEST 3: Distillation"</li> </ul> </li> </ul>	

**KUVA 5.** Osaamismerkkien visuaalinen ilme noudattelee hankkeen teemaa (kuva Kati Jordan).

Edellä kuvattuja edistymisen seurannan välineitä voidaan pitää jo oppimisen pelillisinä elementteinä. Lisäksi suunnittelemme erillisen Block Game -lisäosan käyttöönottoa, jolla voitaisiin luoda vielä henkilökohtaisempi käyttäjäkokemus avatarineen, pisteineen ja Ranking-listoineen. Lisäosan avulla opiskelijaa kannustettaisiin suorittamaan myös kurssin niitä aktiviteetteja, jotka eivät suoraan vaikuta arvosanaan. Pisteitä voisi kerätä esimerkiksi tekemällä H5P-tehtäviä ja kirjautumalla säännöllisesti kurssille.

## JATKUVAA OPPIMISTA

Hankkeen edetessä tuotetaan lisää materiaalia eri aihepiireistä ja oppimisympäristön kehittäminen jatkuu siinä ohessa. Palautetta kerätään pitkin matkaa niin opiskelijoilta, partnereilta kuin muilta yhteistyökumppaneilta. Tavoitteena on luoda verkko-opiskelukokonaisuus, josta oppimisen esteet ja hidasteet on karsittu pois mahdollisimman tehokkaasti. Tämä on jatkuvaa oppimista etenkin oppimisympäristön rakentajille.

# KOKEMUKSIA 3D-TULOSTUKSEN UUDESTA PILOT-YMPÄRISTÖSTÄ

Mikko Nykänen & Ilkka Vanttaja & Eetu Huttunen & Toni Pesonen  
& Jonne Tynkkynen

Valmistava teollisuus etsii ja löytää jatkuvasti uusia kannattavia käyttökohteita lisäävän valmistuksen eli 3D-tulostuksen parista. Alueellisesti tätä työtä omalta osaltaan edistämään Xamk käynnisti rahoituksen saatuaan AMAP-hankeparin ”Ainetta lisäävän valmistuksen sovellukset/laitteet alueellisessa teknologiaklusterissa 2020–2021”, jonka puitteissa rakennettiin Elektroniikan 3K-tehtaalle Savonlinnaan 3D-tulostuksen PILOT-ympäristö yritysten ja tutkijoiden yhteiseksi uusien ideoiden testauspaikaksi.

Hankkeessa keskityttiin kuitukomposiitteihin, mukaan lukien puukuitukomposiitteihin, sekä teknisiin muoveihin vaativammissa käyttökohteissa. PILOT-ympäristöön hankittiin 2020 hankeparin investointiprojektissa (AMAP-laite) kaksi teollista ja kaksi tutkimuksellisempaa 3D-tulostinta sekä 3D-skanneri. Niillä jo tehdyn koetoiminnan tulokset eritoten case-esimerkkien osalta kannustavat toimijoita jatkamaan töitä tämän teknologian parissa. Muovi- ja komposiittitulosteita voidaan käyttää jatkossa protomallien valmistamisen lisäksi yhä enemmän myös lopputuotteissa.

## JOHDANTO

Ajatus 3D-tulostusteknologiaan tarttumisesta Xamkilla Savonlinnassa syntyi niistä keskusteluista, joita Xamk jatkuvasti järjestää alueen teknologiaklusteriin kuuluvien yritysten kanssa. Asiasta teetettiin Tikomat Oy:llä selvitys keväällä 2018 ja tarveselvitystä jatkettiin yhtenä työpakettina TEMin rahoittamassa Biokasvu-hankkeessa 2018–2019. Vuosina 2020–2021 toteutuvaa AMAP-hanketta rahoittavat Etelä-Savon maakuntaliitto Euroopan aluekehitysrahastosta (EAKR), Xamk, Andritz, Esmarin Composites, Ket-Met, Savox Communications, Joros, Riitek, Makron Engineering, Punkaharjun Puutaito, SAMI-palvelut ja Savonlinnan Oopperajuhlat.

Lisäävä valmistus tarjoaa useita etuja, jotka tekevät siitä kiinnostavan tutkimus- ja kehityskohteen. Materiaalihukka on pieni ja suunnittelun vapaus suuri verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin. Puhutaan jopa ilmaisesta monimutkaisuudesta. Osia voidaan optimoida siten, että turha materiaali jätetään pois. Siten voidaan esimerkiksi keventää kappaleita menettämättä niiden jäykkyyttä ja lujuutta. Osia voidaan yhdistää ja vähentää

siten kokoonpanotyötä. Valmistus voi olla hyvin paikallista, jolloin logistiikkaketjut ja toimitusajat lyhenevät. Osien väheneminen ja varaosien digitalisoiminen vähentävät varastojen tarvetta. Prototyyppejä ja lyhyiden sarjojen valmistamiseksi ei tarvita työkaluja tai kalliita muotteja. (Redwood ym. 2017)

Uusi teknologia on kuitenkin nähtävä muita menetelmiä täydentävänä menetelmänä. Kaikkiin sovelluksiin se ei tietenkään sovi. Kaksi kysymystä korostuvat sitä pohdittaessa: täyttävätkö 3D-tulosteen ominaisuudet sille asetettavat vaatimukset ja miten kustannukset asettuvat perinteiseen valmistukseen verrattuna. Kysymyksiin vastataksemme Xamkin Elektroniikan 3K-tehdas tarjoaa testipaikan ja koekentän uusille innovaatioille. Tämä työ on nyt AMAP-hankkeessa aloitettu ja jatkuu varmasti eri muodoissaan sen jälkeenkin. Seuraavassa muutama esimerkki siitä, mitä on tehty. Perimmäisenä tavoitteena on huolehtia alueellisen teknologiaklusterin kilpailukyvyistä tältäkin osin.

## PILOT-YMPÄRISTÖN ESITTELY

Xamkin 3K-tehtaalle Savonlinnaan on rakennettu teollisuustasoinen 3D-tulostuksen testaus- ja pilotointiympäristö tutkijoille ja yrityksille. Kohteena ovat lisäävän valmistuksen prosessit, jotka soveltuvat muovi- ja kuitumateriaalien työstämiseen. Testausympäristö toimii tutkimus- ja kehittämistoiminnan koekenttänä 3D-tulostuksen uusille teollisuuteen soveltuville materiaali- ja konstruktioideoille.

PILOT-ympäristön laitteisto koostuu erikoismuovien tulostimesta (Ultra), kuitukomposiittien tulostimesta (Mark Two), bioprintteristä (Brinter), hartsitulostimesta (Asiga) ja 3D-skannerista (Handyscan 307). Laitteisto on esitetty kuvassa 1.



**KUVA 1.** AMAP-laitteistoa. Vasemmalla vaativiin kohteisiin tarkoitettujen muovien lankatulostin Ultra, siitä oikealla ylhäällä ns. komposiittitulostin Mark Two, sen alapuolella bioprintteri Brinter, edelleen oikealla hartsitulostin Asiga ja oikeassa yläkulmassa 3D-skanneri Handyscan 307 (kuvakollaasi Mari Rasku).

Minifactoryn Ultra on pursotusmenetelmään perustuva erikoismuovien lankatulostin, jossa tulostuslämpötiloja voidaan hallita laajasti ja tarkasti. Erikoismuoveilla tarkoitetaan vaativiin olosuhteisiin soveltuvia muoveja, joilla on joku tai joitakin seuraavista ominaisuuksista: hyvä lämpötilan kesto (> 200 °C), kemiallinen kestävyys, autoklaavikäsittelyn kestävyys, sähköisiä ominaisuuksia (esim. ESD), elintarvikehyväksyntä jne. Laitteella voidaan siis tulostaa myös lopputuotteita prototyyppien lisäksi. Ultralla on tulostettu 3K-tehtaalla yli kymmentä eri materiaalia, joukossa muun muassa PEI (ULTEM1010 ja 9085), PEKK-A, PPSU ja PA-CF, joissa PEI on polyeetteri-imidi, PEKK polyeetteriketoni, PPSU polyfenyyli-sulfoni ja PA-CF hiilikuitulujitettu polyamidi.

Markforgedin Mark Two on pätkäkuitua ja haluttaessa jatkuvaa kuitua yhdistelevä tulostin. Laite on toiminut erittäin tarkasti ja luotettavasti. Lopputuloksena saadaan erityisesti jatkuvan kuidun suuntaan jopa alumiinien lujuusluokkaa edustavia kappaleita. Tulostimelle on paljon käyttöä työkalujen, jigien ja erilaisten varaosien valmistamisessa. Muoveina ovat polyamidit, lyhyttä kuitua sisältävä Onyx sekä Nylon White. Jatkuvaksi kuiduksi voidaan valita hiilikuitu, Kevlar, lasikuitu tai lämmönkestävä lasikuitu.

3DTech Brinter -tulostimessa on modulaarinen rakenne. Samaan mekaniikkaan ja ohjaukseen voidaan liittää esimerkiksi geelejä, pastoja ja tahnoja tulostavia ruiskupäitä tai tulostuspää termoplastisille muoveille. PILOT-ympäristön laitteessa on ruiskupää geeleille ja toinen työkalu kestumuovirakeille eli granulaateille. Tutkimukseen liittyen laitteella on jo tulostettu PLA:ta, UPM Formia (PLA + selluloosa), Stora Enson DuraSensea (PP + havupuu, kuva 2) sekä muita kokeellisia puupohjaisia materiaaleja. Immonen ym. (2021) kuvaavat hyvin sitä, minkälaista tutkimusta muun muassa VTT tekee tällä sektorilla.



**KUVA 2.** Bioprintterillä Stora Enson DuraSensestä (50 % puuta + 50 % PP) tulostettuja kuksia (kuva Ilkka Vanttaja).

Kuvassa 2 vasemmalla on kuksa, joka on tulostettu 1,2 mm:n suuttimella, ja oikealla 2,0 mm:n suuttimella tulostettu. Pienemmällä suuttimella saa siistimpää jälkeä, mutta sen käyttöön liittyy tukkeutumisriski. Materiaalin valmistaja suosittelee vähintään 2,0 mm:n suutinta.

Asiga PRO 4K 65 on nestehartsitulostin, jolla voidaan tehdä tarkkoja ja hyvännäköisiä prototyyppjejä. Sillä voidaan myös tulostaa suhteellisen kirkkaita kappaleita. Asiga on aloittanut yhteistyön Henkelin kanssa, ja laitteelle on kehitetty entistä teknisempiä ja parempia ominaisuuksia omaavia Loctite-tuoteryhmän hartseja, jotka voivat lisätä jatkossa hartsiteknologian käyttöä myös lopputuotteissa.

Lasertekniikkaan perustuva HandyScan 307 -3D-skanneri hankittiin laadunvalvonnan ja takaisinsuunnittelun sovelluskohteita varten. Näissä tehtävissä skannerin oma ohjelmisto on ratkaiseva. Skannerin mukana tulee VXElements-ohjelmisto, jossa on kattavat muokkaus- ja mittausominaisuudet itse skannaukseen liittyvien toimintojen lisäksi. HandyScan 307:ää suositellaan kappaleille, joiden koko on 0,1–4 metriä.

## MATERIAALITESTIEN TULOKSIA

AMAP-hankkeessa standardien mukaisia veto-, taivutus- ja iskukokeita 3D-tulostetuille koesauvoille toteutettiin Xamkin Materiaalitekniikan laboratoriossa Mikpoliksessa Mikkelissä. Materiaalien valmistajat tarjoavat paljon valmistakin dataa tuotteistaan, mutta omilla testeillä haluttiin koestaa ja vertailla niitä samoissa olosuhteissa tehdyissä testeissä ja samalla tarkastella omien tulostusprosessien toimivuutta.

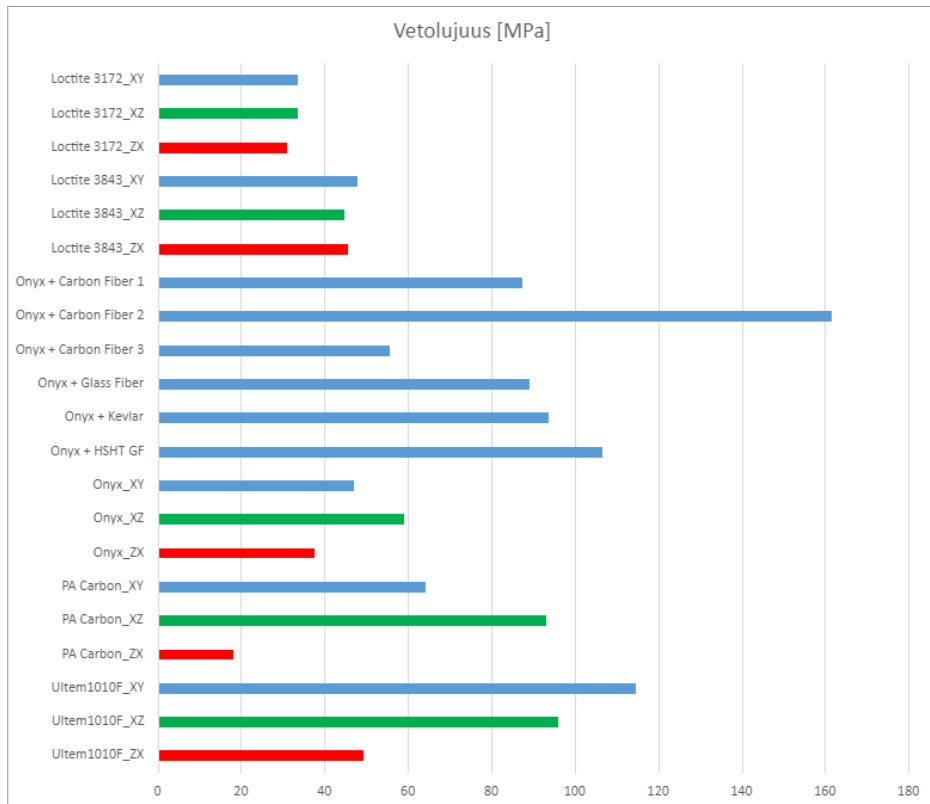
Myös kuitulujittamisen vaikutusta haluttiin testata. Vetokokeissa käytettiin standardia ISO527-2/1A (tai /1B), taivutuskokeissa jatkuvalla kuidulla lujitetuille ISO14125 Class II:ta ja muille ISO178:aa sekä iskukokeissa ISO179-1/1:tä, joissa sauvan leveys oli muutettu 10 --> 20 mm:iin. Testeihin valitut materiaalit on esitetty taulukossa 1.

**TAULUKKO 1.** Koemateriaali vetokoeesteissä.

Vetolujuus ISO527	3D-tulostin
Materiaali	
PEI 1010 (Ultem)	Minifactory Ultra
PA6/66 + CF 10% (PA Carbon)	Minifactory Ultra
PA6 + CF (Onyx)	Markforged Mark Two
PA6 + CF + jatkuva hiilikuitu 1	Markforged Mark Two
PA6 + CF + jatkuva hiilikuitu 2	Markforged Mark Two
PA6 + CF + jatkuva hiilikuitu 3	Markforged Mark Two
PA6 + CF + jatkuva lasikuitu	Markforged Mark Two
PA6 + CF + jatkuva HSHG GF	Markforged Mark Two
PA6 + CF + jatkuva Kevlar	Markforged Mark Two
Henkel Loctite 3843	Asiga PRO 4K65
Henkel Loctite 3172	Asiga PRO 4K65

Taulukossa 1 PEI on polyeetteri-imidi, PA polyamidi, CF lyhytkuituinen hiilikuitu ja HSHT GF korkean lämpötilan lasikuitu. Hiilikuitu 1 ja 2 edustavat eri määriä jatkuvaa hiilikuitua. Jälkimmäisessä on enemmän. Hiilikuitu 2 ja 3 ovat muuten samat, mutta ”kolmosessa” on pitkien kuitujen suunta 45 astetta vetosuuntaan nähden.

Kuvassa 3 siniset palkit edustavat lappeellaan, vihreät kyljellään ja punaiset pystyasennossa tulostettuja vetosauvoja. Kuvan tulokset ovat keskiarvoja kuuden keskenään samanlaisen vetosauvan kokeista.



**KUVA 3.** Vetokoetuloksia (ISO527) kuuden vetokokeen keskiarvoina.

Vähemmän yllättäen parhaat vetolujuudet saavutettiin myös jatkuvalla kuidulla lujitetuilla materiaaleilla, ja lujin niistä, 161,5 MPa, oli laatu, jossa pitkää kuitua oli eniten. Kuiduttomista materiaaleista huomattavan lujaa, 114,7 MPa, oli lappeellaan tulostettu Ultem 1010. Sen lujuus pystyssä tulostettuna oli sekin vielä 49,3 MPa.

Lankatulostukselle on tyypillistä, että pystyssä tulostetut sauvat ovat heikoimpia. Mielenkiintoinen havainto on sekin, että allasvalokovetetun Loctiten vetolujuudet ovat melko samoja tulostussuunnasta riippumatta (3843:lla 44,7–48 MPa ja 3172:lla 31,1–33,7 MPa).



Taivutuskokeet antoivat hyvin samansuuntaisia tuloksia kuin vetokokeetkin – sen sijaan iskusitkeystestit näille samoille koemateriaaleille muuttivat järjestystä. Paras testissä oli Loctite 3172 ja muista selkeä kakkonen jatkuvalla lasikuidulla lujitettu Onyx. Iskusitkeyden kohdalla allasvalokovetetunkin materiaalin tulostussuunnalla näytti olevan merkitystä. Paras tulos tuli kyljellään tulostetuilla sauvoilla, toiseksi paras lappeellaan ja huonoin pystyasennossa.

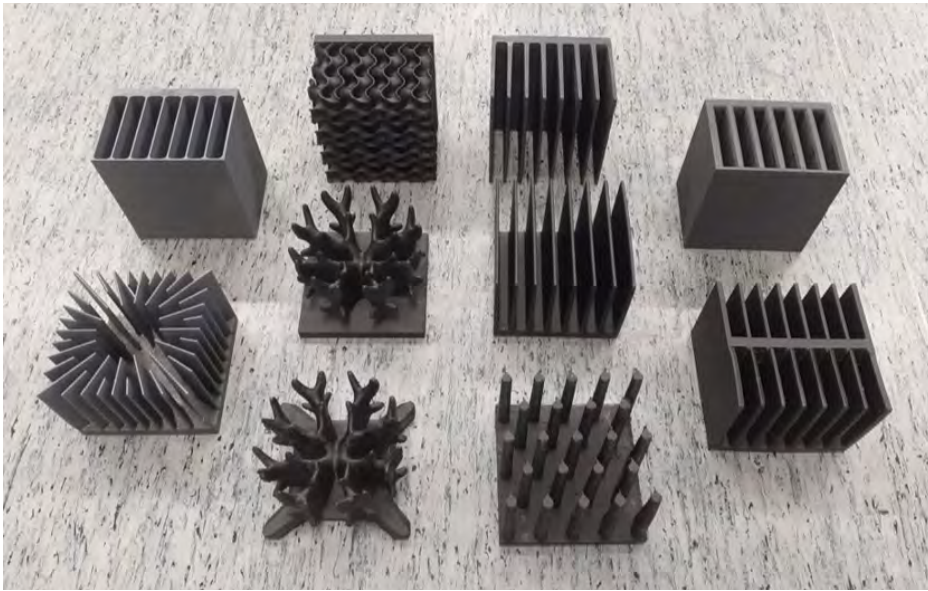
Koetoiminta AMAPin osalta Mikpoliksessakin jatkuu. Uudet allasvalokovetetettävät materiaalit kiinnostavat. Niiden käyttöä lopputuotteissa rajoittaa niiden väitetyksi huono UV-säteilyn kestävyys. Mikpoliksessa vanhennetaan vetosauvoja xenonlappujen avulla auringonvaloa mukaillen. Altistusajat (UVA-340, lämpötila 40 °C, kosteus 50 %) ovat 0, 100, 200, 600 ja 1200 tuntia, jonka jälkeen kukin erä vetosauvoja koetetaan. 600 tuntia vastaa yhden vuoden ulkoilman UV-altistusta Suomessa.

## JÄÄHDYTYSRAKENTEITA ULTRALLA

Elektroniikan jäähdytysrakenteet ovat Elektroniikan 3K-tehtaalla jatkuvan mielenkiinnon kohteina. 3D-tulostuksen odotetaan mahdollistavan nykyistä monimutkaisempien muotojen käytön jäähdytyslementeissä. Nykyiset ratkaisut eivät ole jäähdytysominaisuuksien mukaan optimoituja, vaan perinteisten valmistusmenetelmien vaatimusten mukaisia.

Jäähdytyslementit on tyypillisesti valmistettu alumiinista tai jostain muusta hyvin lämpöä johtavasta metallista. Nyt niiden rinnalle on tullut myös 3D-tulostettavia lämpöä johtavia muoveja. TCPoly Inc. on ensimmäisenä kaupallisena toimijana tuonut niitä myös markkinoille. Heidän tuotteistaan Ice9 Rigid Nylon on otettu sillä tavalla haltuun, että sille on kokeellisesti haettu 3K-tehtaalla miniFactoryn Ultralle sopivat tulostusparametrit ja sopiva vesiliukoinen tukimateriaali.

Jäähdytysrakenteiden optimointi jäähdytyksen ehdoilla on haasteellista. Viimeisimmän tiedon äärelle päästäksemme haimme suunnittelutukea AMAP-hankkeelle kilpailutettuna tutkimuspalveluna Etteplan Oy:ltä sekä vapaana akateemisena yhteistyönä Etelä-Tanskan yliopistossa työskentelevältä Joe Alexandersenilta, joka on alan tutkijoita (Lazarov ym. 2018). Etteplania pyydettiin suunnittelemaan verrokiksi annettua standardielementtiä parempia jäähdytyslementtejä sekä alumiinista että lämpöjohtavasta muovista. Alumiiniset hankittiin kilpailuttamalla (kaksi vasemmanpuoleista kuvassa 4), mutta muoviset 3D-tulostettiin Ultralla 3K-tehtaalla (kaksi oikeanpuoleista kuvassa 4).



**KUVA 4.** Esimerkkejä testattavista jäähdytysselementeistä (kuva Eetu Huttunen)

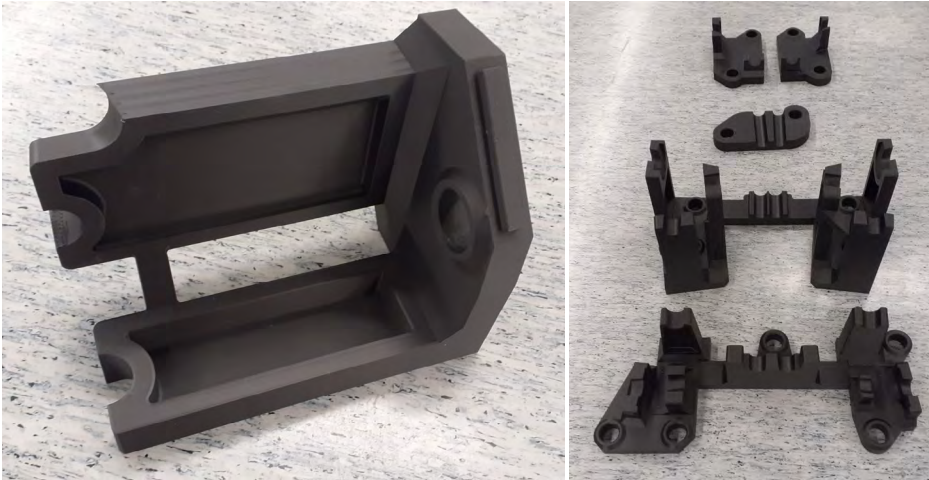
Myös korallimaiset rakenteet (kuvassa 4 toinen ”sarake” vasemmalta) ovat Ultralla tulostettuja. Ne ovat peräisin Joe Alexandersenilta, joka optimoi topologiaa yliopistossaan käyttäen siihen supertietokoneita ja useiden vuorokausien laskenta-aikoja. Korallirakenteiden yläpuolella on LUTin diplomityöntekijän Eetu Huttusen itse Matlab-ohjelmalla laskema matemaattinen gyroidirakenne.

Kolmas ”sarake” vasemmalta käsittää pari yksinkertaista levyrakenteista standardielementtiä sekä tappirakenteen, jossa 3K:n tutkijat ovat ideoineet tappien poikkileikkauksen muodoksi pisanan.

Nämä erilaiset passiivisen jäähdytyksen jäähdytysselementit testataan vielä vastuksien, lämpökameran ja lämpömittareiden avulla. Simuloituja arvioita niiden toimivuudesta jo on. Sähkötekniikan kandidaatti Eetu Huttunen tekee diplomityötään erillisellä rahoituksella, mutta Xamkin työntekijänä AMAP-hankkeen rinnalla saman aiheen parissa.

## HITSAUSKIINNITTIMIÄ MARK TWO -TULOSTIMELLA

3K-tehtaan PILOT-ympäristössä kokeiltiin Mark Two -tulostimella kokoonpanojigien valmistusta 3D-tulostamalla niitä kuitulujitetusta ja Kevlarilla vahvistetusta polyamidimuovista. Kiinnittimien avulla hitsataan Joros Oy:llä taivutetuista putkista esimerkiksi veneiden kaiteita. Nykyisellään käytössä on teräksestä koneistetut jigit, jotka ovat painavia ja työläitä varastoida, koska niitä on paljon erilaisia.



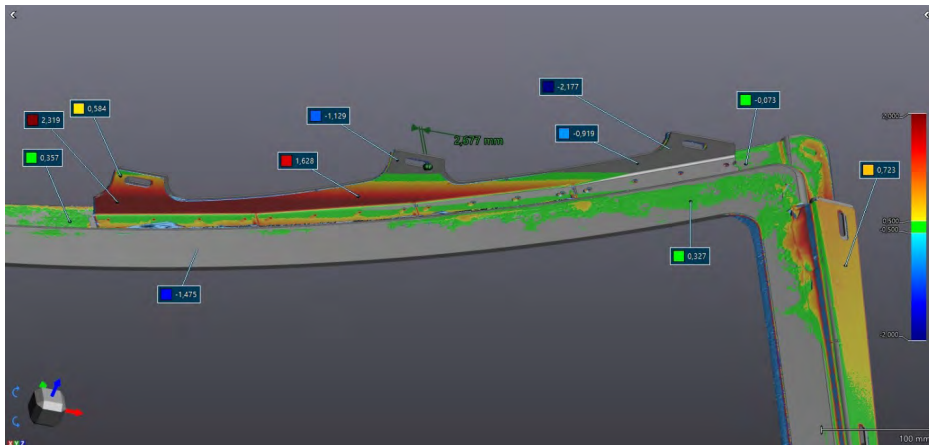
**KUVAT 5 a ja b.** Kuvassa vasemmalla (a) lähikuvaa yksittäisestä jigien osasta ja oikealla (b) koko PILOT-ympäristössä 3D-tulostettu setti (kuva Mikko Nykänen).

Kuvissa 5 a ja b on esitetty yksittäinen jig sekä koko sarja (13 osaa). Jigin osat kiinnitetään mittatarkkaan reikäpöytään, ja kiinnitin on valmis. Tuotannossa testattaessa lyhyellä kokemuksella 3D-tulostetut näyttäisivät olevan riittävän jäykkiä ja lämpötilan kestäviä. Haasteita ovat materiaalikustannus tällä materiaalilla sekä tulostusaika (491 tuntia). Vertailun vuoksi jigien osia valmistettiin vanhalla lankatulostimella (Sigma R19) myös tavallisesta PETG-muovista, joka ratkaisisi materiaalikustannushaasteen (709 e → 90 e) ja nopeuttaisi tulostusta (200 h). Kokeiltaessa se vaikutti olevan jäykkää ja lämmönkestävää, mutta ei niin mittatarkkaa kuituvahvistetussa tapauksessa.

Koska jigien tulostaminen on mahdollista suhteellisen edullisilla pöytätulostimilla, yksi ratkaisu tulostamisen nopeuttamiseen olisi hankkia useampi laite 3D-tulostamaan samaan aikaan. Materiaalia voitaisiin säästää myös topologian optimoinnilla. Se vaatii kuitenkin aika paljon työaika, eikä ainakaan bulkkimuovin kohdalla olisi järkevää. Joros Oy jatkaa tutkimuksen parissa. Reino Voutilainen tekee kokoonpanojigien kehittämisestä Joroksessa insinöörityötä Savonia AMK:lle.

## 3D-SKANNERIN HANDYSCAN 307 KÄYTTÖ LAADUNVALVONNASSA

AMAP-projektissa tehtiin skanneriavusteisena laadunvalvonta-casena Esmarinilla valmistetun raitiovaunun tuulilasin kehysten 3D-skannaus. Kehys on valmistettu muovikomposiitista, ja siihen on kiinnitetty liimaamalla seitsemän kappaletta alumiinisia kiinnikeosia. Casen tavoitteena oli tarkastella liimattujen kiinnikkeiden paikoituksen mittatarkkuutta verrattuna CAD-malliin. Kuvassa 6 on esimerkinomaisesti esitetty väärävarikartta yksittäisen kiinnikkeen kohdalta.



**KUVA 6.** Mittatarkkuuden tarkastelu väärävärिकartan avulla. Skannattu data ja CAD-referenssi on sovitettu päällekkäin. Positiivinen lukema tarkoittaa, että skannattu data on CAD-mallin edessä ja negatiivisella päinvastoin (kuva Mikko Nykänen).

Kuvassa 6 on käytetty pituussuuntaisen virheen määrittämiseen ohjelmasta löytyvää työntömittatyökalua, jolla voidaan ottaa mittoja pisteiden väliltä esimerkiksi tietyn akselin suuntaisesti. Esimerkiksi kahden yhdensuuntaisen pinnan välinen mitta voidaan määrittää näihin sovitettujen tasojen välisenä etäisyytenä.

Laadunvalvontasovelluksia varten skannerin ohjelmasta löytyy raportointityökalu, jolla voidaan esittää kootusti raporttimuodossa perustietojen lisäksi halutut mitat ja kuvaruutukaappauksia väärävärिकartoista. Raportti voidaan toimittaa esimerkiksi asiakkaalle valmistetun kappaleen mukana. Sarjatuotantokappaleiden laadunvalvontaa varten hyödyllinen ominaisuus on mahdollisuus lisätä yksi tai useampi uusi skannaus samoilla asetuksilla kuin ensimmäisessä on käytetty. Näin 3D-skannaustoimintaa laadunvalvonnassa voidaan nopeuttaa oleellisesti, kun yksittäisen kappaleen tarkastamiseksi tarvitsee suorittaa itse skannauksen lisäksi vain raportin tallennus.

## YHTEENVETO

AMAP-hankeparissa vastattiin alueellisen teknologiaklusterin tarpeeseen saada lisätietoja 3D-tulostuksen hyödyntämismahdollisuuksista. Hankkeessa rakennettiin PILOT-ympäristö Xamkin Elektroniikan 3K-tehtaalle Savonlinnaan erilaisten ideoiden ja innovaatioiden testaamiseksi käytännössä.

Laitteistolla voidaan testata lisäävää valmistusta lujilla kuitulujitetuilla komposiiteilla ja vaativiin olosuhteisiin tarkoitetuilla teknisillä erikoismuoveilla. Sillä voidaan valmistaa hyvin tarkkoja prototyyppjeä sekä tulostaa kestopuoveja ja esimerkiksi puukuitukomposiitteja

suoraan rakeista tekemättä niitä ensin langaksi. Lisäksi voidaan käyttää 3D-skanneria käänteiseen suunnitteluun tai laadunvarmistukseen.

Lisäävän valmistuksen muovit ja komposiitit ovat kehittyneet teknisiltä ominaisuuksiltaan siten, että niille löydetään jatkossa yhä enemmän käyttöä myös lopputuotteissa. Materiaalien bioperäisyyteen ja kierrätettävyyteen kiinnitetään lisääntyvässä määrin huomiota.

Lukuisat koe-esimerkit, joita yritykset ovat PILOT-ympäristöön tuoneet testattaviksi ja joista tässä esitettiin tilan puutteen vuoksi vain muutama, kannustavat jatkamaan tutkimusta ja kehitystyötä 3D-tekniikan parissa paikallisten tarpeiden pohjalta.

## LÄHTEET

Redwood, B., Schöffler, F. & Garret, B. 2017. The 3D printing handbook: technologies, design and applications. Amsterdam, The Netherlands: 3D Hubs B.V., 289 p.

Immonen, K., Willberg-Keyriläinen, P., Ropponen, J., Nurmela, A., Metsä-Kortelainen, S., Kaukoniemi, O.-V. & Kangas, H. 2021. Thermoplastic Cellulose-Based Compound for Additive Manufacturing. *Molecules* 2021, 26(6), 1701.

Lazarov, B., Sigmund, O., Meyer, K. Erik & Alexandersen, J. 2018. Experimental validation of additively manufactured optimized shapes for passive cooling. *Applied Energy* 226. 330–339.

# TESTITALOT OTANIEMESTÄ SAVONLINNAAN TUTKIMUSYMPÄRISTÖKSI

Lasse Pulkkinen & Samuli Hottinen & Anti Rohumaa

Teollinen puurakentaminen, uudet biopohjaiset eristemateriaalit sekä rakentamisen energiatehokkuusvaateiden kasvu edellyttävät uuden empiirisen tiedon tuottamista rakennusmateriaalien ja myös kokonaisten rakennusten fysikaalisesta toimivuudesta. Mittausdataa tarvitaan tulevaisuudessa entistä enemmän myös uusien rakennusten mallintamiseen sekä materiaalikehityksen tueksi. Xamkin teollisen puurakentamisen laboratoriossa saadaan tulevaisuudessa erilaisilla koejärjestelyillä ja -kammioilla tutkittua rakennusmateriaalien toimivuutta erilaisissa sää- ja ilmasto-olosuhteissa. Tämän lisäksi Xamk kehittää yliopisto- ja yhteistyössä testitalo-konseptia, jonka ensimmäistä vaihetta ja niin sanottujen Aalto-yliopiston testitalojen tilannetta ja hyödynnettävyyttä käsitellään tässä artikkelissa. Testitalojen siirto, kuntoarviot sekä mittausdatan keräyksen uudistaminen ovat merkittäviä kehittämistoimenpiteitä. Testitalot tarjoavat mielenkiintoisen demonstraatioympäristön alan opiskelijoille. Lisäksi niiden tarjoamia mahdollisuuksia hyödynnetään kansainvälisen tutkimusyhteistyön vahvistamisessa.

## TAUSTALLA AALTO-YLIOPISTON KANSAINVÄLINEN TUTKIMUS JA MONIPUOLISET PUUMATERIAALIT

Keski-Euroopassa on rakennettu energiatehokkaita puurakennuksia hyvällä menestyksellä jo 1990-luvulta saakka. Rakennuksissa ei ole havaittu rakennusfysikaalisia ongelmia, vaikka niissä onkin käytetty normaalia paksumpia lämpöeristeitä ja tuulettamattomia puurakenteita. Suomalaisessa ilmastossa biogeenisten materiaalien, puun ja esimerkiksi puupohjaisten kuitueristemateriaalien käyttöön suhtaudutaan hyvin epäillen erityisesti rakennettaessa U-arvoltaan tason 0,2 W/m<sup>2</sup>K alittavia rakennuksia.

Rakennusten energiatehokkuusvaateiden kasvaessa tulevaisuudessa tarvitaan tutkimusdataa eri materiaalien ja rakenteiden rakennusfysikaalisesta käyttäytymisestä, ja testitalotkin toteutettiin 2010-luvun alussa Teknillisen korkeakoulun käyttöön. Taustalla oli myös kansainvälinen tutkimusyhteistyö. Suomeen kutsuttua FiDiPro-professuuria rahoitti silloinen Teknologian kehittämiskeskus Tekes, ja testitalot suunniteltiin ja toteutettiin Münchenin teknillisestä yliopistosta (TUM) Suomeen vierailijaksi saapuneen professori Stefan Winterin aloitteesta ja ohjauksessa.

Testitaloja on kolme kappaletta, ja ne poikkeavat toisistaan seinä- ja kattoratkaisujen osalta. Rakenteissa onkin käytetty kolmea yleistä puurakennetyyppiä, jotta kosteuden siirtymistä ja lämmön varastointia on mahdollista mitata ja vertailla eri lailla käyttäytyvissä rakenteissa ja materiaaleissa. Kahdessa testirakennuksessa on käytetty seinissä ja katossa Finnjoist I -profileja. Ulkoseinien pintamateriaalina on 25 mm paksu puukuitulevy ja julkisivupanelointi, jonka takana on tuuletusrako. Toisessa kevytrakenteisessa testirakennuksessa on käytetty 15 mm paksua kuusivaneria ilman erillistä höyrynsulkua sisäseinien ja katon pintamateriaalina ja toisessa taas 15 mm paksua kipsilevyä erillisellä höyrynsululla. Kolmannen testirakennuksen sisäpuolella on käytetty seinissä ja katossa Honkarakenteen kehittämää 128 mm leveää massiivista liima-hirttä, jossa uloimmat lamellit olivat pitkittäin ja sisin lamelli pystysuoraan muodostaen cross laminated timber -rakenteen (CLT-hirsi). Rakennuksien julkisivut ja katon pintamateriaalit ovat samat. Eristyksessä käytettiin puukuitueristettä sekä mineraali- ja kivivillaa.

## ANTUROINNIT JA MITTAUSDATAN KÄSITTELY

Kaikki kolme testirakennusta on liitetty pyörivällä lämmönsiirtimellä varustettuun ilmanvaihtoyksikköön ja sen lisäksi rakennuksiin on asennettu myös lattialämmitykset ja ilmankostuttimet. Ilmanvaihto, lattialämmitys ja ilmankostutin ovat kytketty myös yhteiseen ohjausjärjestelmään. Ohjausjärjestelmän avulla voidaan säädellä ilmanvaihtonopeutta, sisään tulevan ilman lämpötilaa sekä lämmönvaihtonopeutta. Kosteutta ja lämpötilaa mittaavia sensoreita on asennettu jokaisen testirakennuksen seiniin, kattoon ja lattiaan. Koska testitalot rakennettiin Otaniemeen noin kymmenen vuotta sitten, on Xamk joutunut tarkistamaan rakenteisiin kiinnitettyjen kosteus- ja lämpötila-antureiden toiminnan sekä anturidataa käsittelevien tiedonkeruu- ja analyysijärjestelmien toiminnan. Tässä onkin hyvänä apuna ollut Xamkin Elektroniikan 3K-tehtaan asiantuntijat.

## TESTITALOT SAVONLINNAAN YHTEISTYÖSSÄ RAKENNUSTEKNIIKAN OPETUKSEN KANSSA

Xamk käynnisti keskustelut testitalojen siirtämiseksi Otaniemestä Savonlinnaan jo vuoden 2019 puolella. Aallolla oli tarve hakea testitaloille uusi sijoituspaikka. Savonlinnassa oli käynnistynyt rakennustekniikan insinöörikoulutus, ja näköpiirissä oli myös teollisen puu- ja hybridirakentamisen tutkimusympäristön kehittäminen laboratorioineen, ja tähän kokonaisuuteen testitalot liittyvät erinomaisesti. Vuoden 2020 aikana perehdyttiinkin Xamkin toimesta talojen rakenteeseen ja tehtiin ennakkovalmisteluja talojen siirtämiseksi Savonlinnaan. Esimerkiksi Xamk Kuitulaboratorioon kesätyöntekijöiksi palkatut rakennustekniikan insinööriopiskelijat kartoittivat tonttivaihtoehdot rakennusten sijoittamiselle sekä laativat rakennuslupahakemukset talojen sijoittamiseksi Savonlinnan teknologiapuistoon.

Testitalot siirrettiin Savonlinnaan kesällä 2021 (kuva 1). Sijoituspaikaksi tuli Teknosavo Oy:ltä vuokrattu tontti, kunnes rakennukset vuoden 2022 lopulla siirretään uuden valmistuvan puurakentamisen laboratorion yhteyteen (kuva 2).





**KUVA 1.** Testitalot siirrettiin Espoosta Savonlinnaan erikoiskuljetuksella (Kuva Samuli Hottinen)

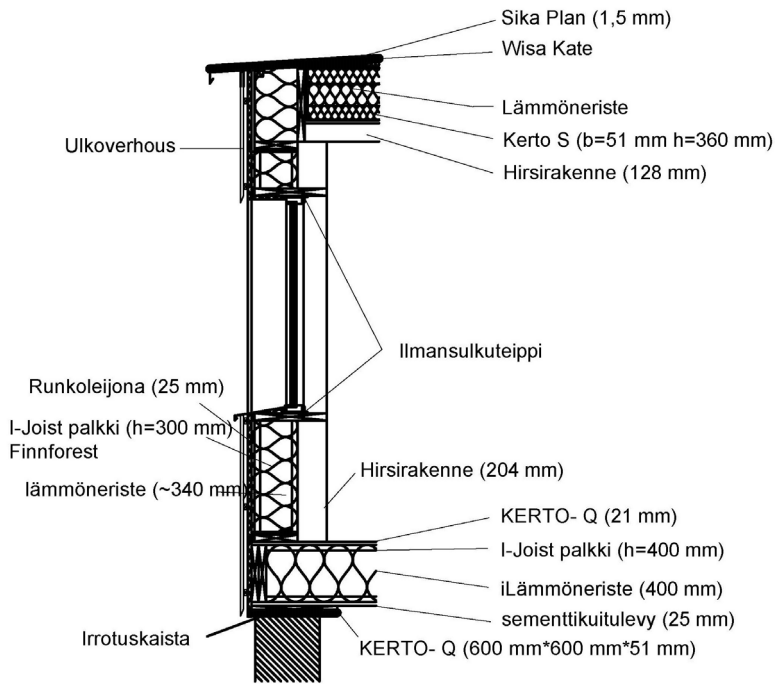


**KUVA 2.** Testitalot Savonlinnassa (Kuva Anti Rohumaa)

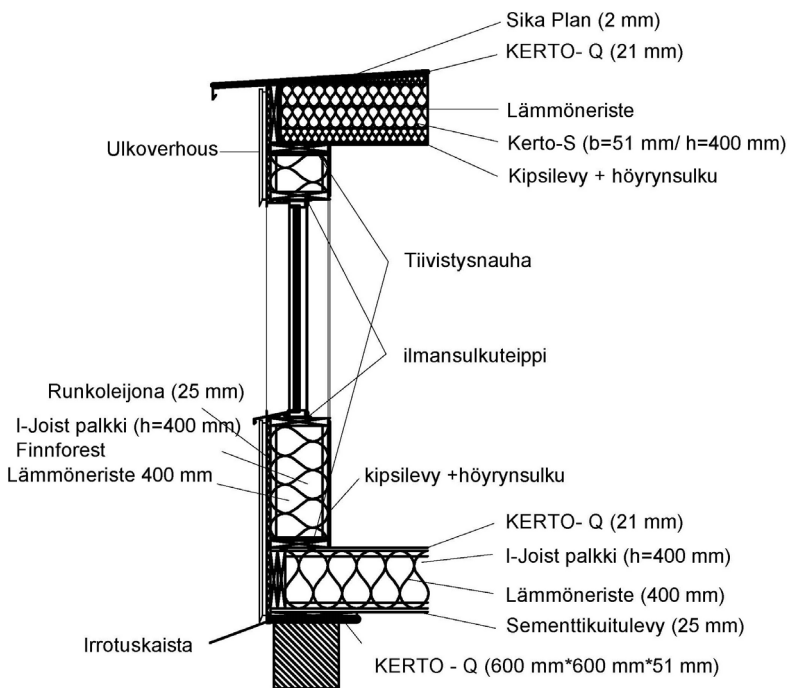
Rakennetut testirakennukset ovat samanlaisia, paitsi että niiden seinä- ja kattorakenteet eroavat toisistaan ja vaihtelevat kevyistä puurakenteista massiivipuuhun ja näissä käytetään erilaisia eristemateriaaleja (kuva 3). Testirakennukset on varustettu talotekniikkajärjestelmillä ja niiden tilaa seurataan lukuisilla lämpötilaa ja kosteutta mittaavilla sensoreilla.



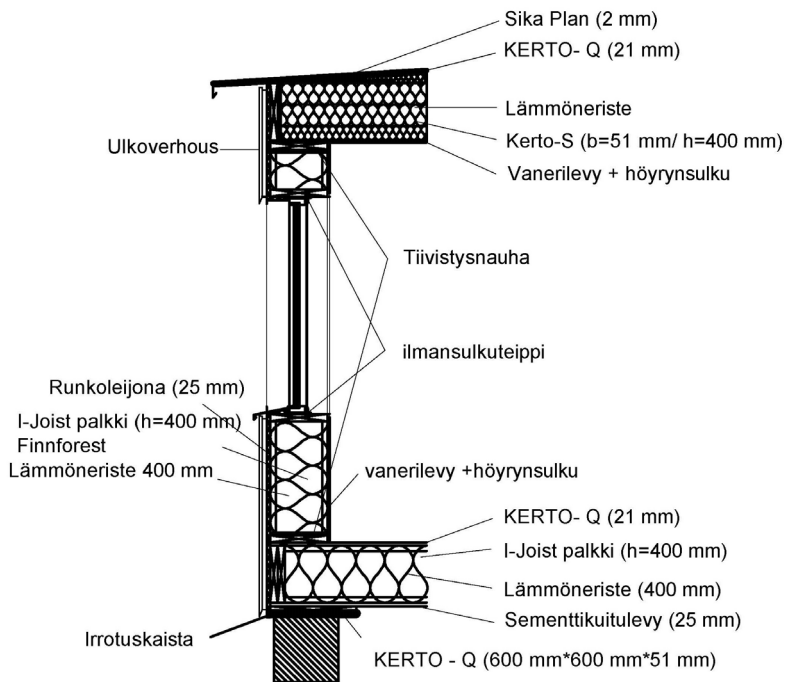
## a) Leikkauspiirustus hirsirakenteesta



## b) Leikkauspiirustus kipsilevyrakenteesta



## c) Leikkauspiirustus vanerilevyrakenteesta



**KUVA 3.** Testirakennusten rakenneleikkaukset: a) hirsirakenne, b) kipsilevyrakenne, c) vanerilevyrakenne (Kuva Samuli Hottinen)

## KOKEMUKSIA MITTAUSDATASTA

Testirakennuksissa tehtyjen mittausten ja havaintojen perusteella voidaan jo nyt havaita selkeitä eroja testirakennusten välillä (Winter ym. 2012). Vaikka testirakennukset ovatkin suhteellisen ilmatiiviitä, on osoitettu, että sisäilma pääsee silti vaihtumaan ulkoilmaan pienten rakojen ja liitosten kautta. Vanerirakennuksen ja massiivipuurakennuksen yhtä suuresta ilmatiivyydestä huolimatta massiivipuurakennuksen suhteellinen kosteus laskee hitaammin. Samalla massiivipuuseinä kuivuu hitaammin, ja sen ylläpitämä sisäilma on miellyttävämpi kahteen muuhun rakennukseen verrattuna. Seinärakenteessa oleva kosteus voi johtaa myös kosteusongelmiin, jos kosteustaso on korkea eikä se pysty kuivumaan tai poistumaan rakenteista, kun ulkoilman lämpötila laskee nollan alapuolelle.

## KANSALLINEN JA KANSAINVÄLINEN YHTEISTYÖ ALAN PARHAIDEN TUTKIMUSLAITOSTEN KANSSA

Koska Suomessa toteutetut testitalot ovat olleet osa kansainvälistä yhteistyötä, tarjoaakin tämä uudistettu tutkimusympäristö mielenkiintoisia mahdollisuuksia Xamkin ja kansainvälisten kumppaneiden väliselle yhteistyölle. Erityisesti tutkimuksellinen mielenkiinto kohdistuu erilaisten rakennusmateriaalien rakennusfysikaalisen käyttäytymisen, pitkäaikaiskeston sekä energiatehokkuuden todentamiseen. Digitalisaation näkökulmasta testiympäristöä voidaan käyttää rakennusten käyttäytymistä ja kuntoa todentavien anturointien ja mittarointien testialustana. Tärkeää on tuottaa dataa myös rakennusfysikaalisen mallinnuksen tueksi.

Koska testitaloja on jo nyt erilaisissa ilmasto-olosuhteissa ja tarpeet puurakentamiselle kasvavat eri puolilla maapalloa, tarjoaa Savonlinnaan toteutettu koeympäristö hyvät mahdollisuudet kansainväliselle yhteistyölle. Kokonaisuuteen liittyen Savonlinnaan tullaan toteuttamaan myös ”Testitalo 4”, jossa yhteistyössä teollisuuden kanssa edelleen kehitetään alan tutkimusympäristöä erityisesti rakennusten ilma- ja vesitiiveyden ja kosteuskäyttäytymisen optimoinnin ja hallinnan näkökulmista. Yhteisiä hankkeita suunnitellaankin muun muassa virolaisten ja saksalaisten korkeakoulujen kanssa yhteistyössä.

### LÄHTEET

Winter, S., Schulte-Wrede, M. & Jebens, K. 2012. Highly insulated wooden structures in Nordic climate. In World Conference on Timber Engineering 2012: Architecture and Engineering Case Studies, WCTE 2012, Auckland, 15 July 2012-19 July 2012 (pp. 227–234)

# RÖNTGENMIKROSKOPIA TUTKIMUSMENETELMÄNÄ PUUPOHJAISTEN TUOTTEIDEN TUTKIMUKSESSA

Olli Paajanen & Anti Rohumaa & Eetu Paasonen

Röntgenmikroskopia on ainetta rikkomaton kuvantamis- ja tutkimusmenetelmä, jolla on paljon sovelluksia muun muassa materiaali- ja puutuoteteollisuudessa. Menetelmän avulla voidaan selvittää ja mallintaa näytteiden mikrorakennetta tai, niin kuin tässä tutkimuksessa, selvittää insinööripuutuotteiden liimasaumojen ominaisuuksia.

## JOHDANTO

Röntgenmikroskopia tai mikrotomografia on ainetta rikkomaton tutkimusmenetelmä, jolla voidaan tarkastella näytteitä kolmiulotteisesti. Xamkin Mikropolis-tutkimusyksikön Nanotomo-hankekokonaisuudessa hankittiin 2020 mikrotomografialaitteisto (Neoscan N80).

Nanotomo-hankkeessa tutkitaan erilaisten komposiittien ominaisuuksia. Hankkeessa keskitytään tutkimaan teollisista tai teknisistä komposiiteista hiili- ja lasikuitua ja uusiutuvista komposiittimateriaaleista puuviilupohjaisia tuotteita. Tämän lisäksi tutkimuskohteina on myös perinteisempiä sekä modifioituja puutuotteita. Hankkeessa otetaan käyttöön uusi tutkimusmenetelmä ja sovelletaan sitä komposiittiteollisuuden tuotteiden ja prosessien kehittämiseen. Mukana ovat seuraavat yritykset: Raute Oyj, Prefere Resins Finland Oy, Metsäliitto osuuskunta/Metsä group ja Royal Composites Oy. Etelä-Savon maakuntaliitto on myöntänyt hankekokonaisuudelle rahoitusta Euroopan aluekehitysrahastosta.

Komposiitti- ja puutuoteteollisuus ovat tärkeitä työllistäjiä Etelä-Savossa ja Itä-Suomessa. Vaneria valmistetaan Suomessa noin miljoona kuutiota vuodessa, josta viennin osuus vuonna 2020 oli 83 prosenttia (Metsäteollisuus ry). Vaneria ja LVL:ää (laminated veneer lumber) valmistetaan Etelä-Savossa kolmessa tehtaassa, joista suurin on Pellos Ristiinassa lähes 480 000 m<sup>3</sup>:n kapasiteetillaan. Vanerin loppukäyttökohteet ovat muun muassa rakennus-, kuljetusväline, pakkaus- ja huonekaluteollisuudessa, ja LVL puolestaan on tärkeä viilupohjainen rakennusteollisuuden tuote, jota käytetään muun muassa palkeissa, tolpiissa ja rakennuselementeissä.

## RÖNTGENMIKROSKOPIA YLEISESTI

Menetelmää voidaan kutsua useammalla termillä. Röntgenmikroskopian lisäksi sitä kutsutaan myös mikrotomografiaksi ( $\mu$ CT). Tässä julkaisussa päädyttiin käyttämään termiä röntgenmikroskopia, koska se kuvaa selkeästi hankkeessa tehtävän tutkimustyön perusideaa eli pienten rakenteiden tutkimista.

Nimityksestä riippumatta kyseessä on menetelmä, jossa näytettä kuvataan kolmiulotteisesti ja siitä rakennetaan 3D-malli, jota voidaan edelleen analysoida monipuolisesti. Yksinkertaistettuna kyse on vastaavasta menetelmästä kuin lääketieteessä paljon käytetty tietokonetomografia tai viipalekuvaus. Menetelmän avulla voidaan tarkastella kappaleen rakennetta kolmiulotteisesti suurella tarkkuudella koskematta siihen fyysisesti. Useimmat mikroskopiamenetelmät vaativat näytteen esikäsittelyä tai rikkomista. Mittaukseen voidaan myös yhdistää kappaleen mekaaninen kuormitus tai muu laitteiston mahdollistama fyysinen manipulointi esimerkiksi lämpötilaa muuttamalla, jolloin voidaan nähdä muutokset kappaleessa kolmiulotteisesti lähes reaaliajassa. Menetelmällä voidaan teoriassa tutkia kaikkia materiaaleja, jotka läpäisevät röntgensäteitä, ja käytännössä laitteiden tekniset ominaisuudet ja rajoitteet määrittävät tutkittavan kappaleen koon, kuvantamisen tarkkuuden ja käytettävän suurennoksen. Puututkimuksessa röntgeniin perustuvat kuvantamismenetelmät ovat suhteellisen paljon käytettyjä, ja niitä on sovellettu myös tutkittaessa puun ja liiman vuorovaikutusta ja liimasauman muodostumismekanismeja (Jakes et al. 2019).

Mittauksessa tutkittava näyte pyörii paikallaan akselinsa ympäri, ja siitä otetaan suuri määrä kuvia eri kulmista. Näistä kuvista puolestaan määritetään 3D-mallin rakenne. Rakenteen muodostava laskentaprosessi perustuu röntgensäteen vaimentumiseen näytteen eri osissa. Menetelmä vaatii suurta laskentatehoa, tarkasti ohjattua röntgentekniikkaa ja hienomekaanista laitteistoa kappaleen hallitsemiseksi.

## KUVANTAMINEN – KUVAUS- JA REKONSTRUKTIOPROSESSI

Mikrotomografianäyte ei vaadi erityistä valmistelua tai esikäsittelyä. Näyte pitää kiinnittää tiukasti alustansa eli näytepitimeen, jotta kappale ei pääsisi liikkumaan kuvantamisprosessin aikana. Kappaleen liike aiheuttaa virheitä, jotka näkyvät epätarkkuutena rakennetussa mallissa. Kiinnityksessä voidaan käyttää esimerkiksi liimoja, vahaa tai teippejä. Myös erilaisia näytettä tukevia rakenteita voidaan käyttää, mutta ne eivät saa vaimentaa röntgensäteitä liikaa. Näytepidin kiinnitetään mekaanisesti liikuteltavaan alustaan, jonka liikkeitä voidaan ohjata erittäin tarkasti näytteen asennon määrittämiseksi.

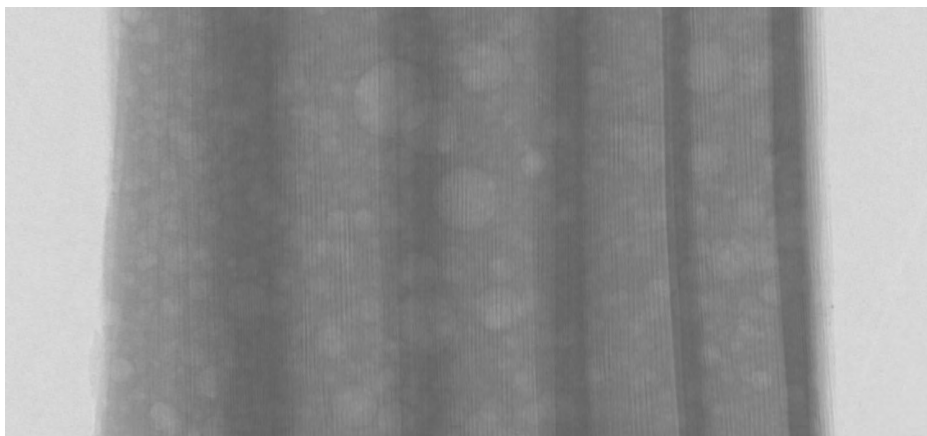
Kuvausprosessin aikana näyte pyörii akselinsa ympäri askeleittain, tyypillisesti asteen kymmenesosia kerrallaan. Jokaisen pyörähdysaskeleen kohdalla näytteestä otetaan kuva,

joten kuvia otetaan yhteensä satoja tai jopa tuhansia. Kappaleen liike voi olla joko täysiympyrä tai puoliympyrä. Teoriassa puoliympyrän avulla saadaan riittävä määrä informaatiota, mutta joissain tapauksissa voi olla tarpeen kuvata näyte joka puolelta esimerkiksi silloin, jos näytteessä on kerroksittain materiaaleja, joilla on hyvin erilainen tiheys. Tässä tapauksessa on mahdollista, että esimerkiksi raskas metallikomponentti varjostaa taakseen jääviä osia näytteestä.

Jokaisesta pyörähdysaskeleesta muodostetaan 2D-kuva kameran detektorilla. Käytännössä detektorille muodostuu läpivalaisukuva näytteestä. Detektorin jokainen pikseli tallentaa intensiteettiarvon, joka kuvaa säteilylähteen ja vastaanottavan pikselin välillä tapahtuvaa signaalin vaimentumista. Kun kappale on kuvattu kattavasti eri kulmista, varsinainen kuvausprosessi on valmis.

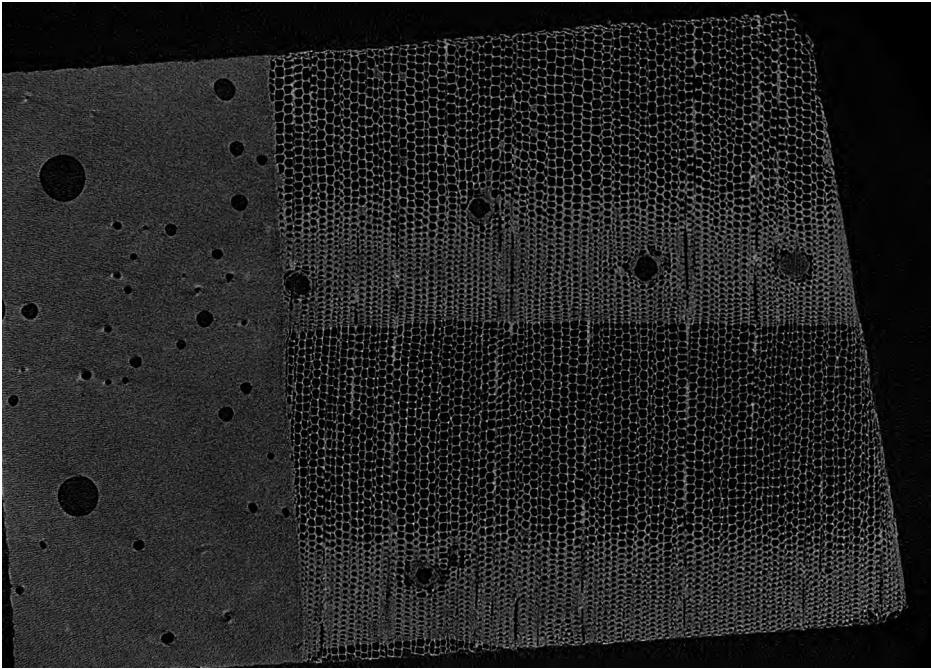
Tämä on kuitenkin vasta ensimmäinen vaihe kuvantamisprosessissa. Sarjasta läpivalaisukuvia pitää seuraavaksi muodostaa kolmiulotteinen aineisto rekonstruktioprosessin avulla. Laskentaprosessi on monimutkainen matemaattinen operaatio, jossa jokaiselle skannattavan volyymin koordinaatiston pisteelle eli vokselille lasketaan intensiteettiarvo koko kuvausdatan perusteella. Jotta rakennettava malli on tarkka, kuvadatan ja näytteen position pitää olla hyvin tarkasti kohdistettua. Datan systemaattisen käsittelyn mahdollistamiseksi muodostetusta 3D-informaatiosta pilkotaan edelleen sarja kaksikulotteisia leikekuvia. Yksi leike on käytännössä kuin yhden pikselin paksuinen siivu näytteestä xy-tasossa. Leikkeiden orientaatio voidaan muokata tarkastelusuunnan tai prioriteetin perusteella halutuksi.

Kuvassa 1 on yhden pyörähdysaskeleen kohdalla otettu kuva, jossa nähdään näyte läpivalaistuna. Kappaleessa on puuta ja epoksiliimaa. Liima on kevyttä, joten se erottuu taustasta heikosti, mutta toisaalta näytteessä erottuu liimassa olevia ilmakuplia. Puumateriaalista puolestaan erottuvat syyt ja kevät- ja kesäpuun tiheysero.



**KUVA 1.** Yksityiskohta tomografiakuvasta, jossa läpivalaistunutta mäntyä ja epoksiliimaa (kuva Olli Paajanen)

Kuvassa 2 on 2D-leike samasta mänty-epoksinäytteestä. Kuvan 1 sisältämää informaatiota on hyödynnetty leikekuvan muodostamisessa.



**KUVA 2.** Leikekuva, jossa nähdään mäntyä ja epoksiliimaa (kuva Olli Paajanen)

Kuvassa 2 nähdään kuvassa 1 havaittuja kuplia epoksissa sekä männyn rakenteellisia yksityiskohtia. Kuvasta erottuvat muun muassa kevä- ja kesäpuu ja pihkatiehityt. Kuvassa näkyvän näytteen leveys on noin 4 mm ja korkeus noin 3 mm, pikselikoko 1,1  $\mu\text{m}$ .

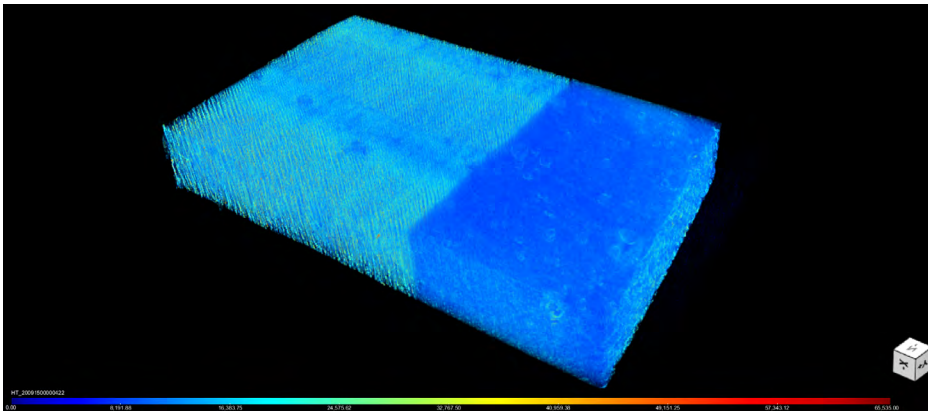
## KUVANTAMISDATAN ANALYSOINTI

3D-pistepilvestä ihmisäivot pystyvät hahmottamaan rakenteita, mutta miten tämä saadaan tietokoneen ymmärtämään muotoon? Skannatun kappaleen eri osat hidastavat röntgensäteitä eri tavoin riippuen materiaalista. Kuvantamisdatassa näytteen rakenteen vaimentamiskykyä kuvataan puhumalla mustavalkoinformaation intensiteetistä eli käytännössä kirkkaudesta. Jos kappaleen eri osat, komponentit tai rakenteet saadaan eroteltua toisistaan luokittelemalla ne intensiteetin perusteella, niistä voidaan muodostaa isompia rakennekonaisuuksia. Yksinkertaisimmillaan voidaan käyttää niin sanottua kynnystämistä, eli luokille määritetään intensiteetin kynnyсарvot tai vaihteluväli, joihin osat tai partikkelit voidaan jakaa tai luokitella. Toinen vaihtoehto on määrittää luokat puhtaasti visuaalisesti, jolloin käytännössä joudutaan merkitsemään tai maalaamaan kuviin manuaalisesti eri



luokat. Tämä vaatii paljon aikaa, joten konenäön hyödyntäminen on tehokas ratkaisu suurten datamäärien käsittelyyn.

Rakennemallia voidaan visualisoida käytettävissä olevilla työkaluilla. Kappaleessa olevia yksityiskohtia voidaan korostaa esimerkiksi väreillä, jolloin voidaan paremmin hahmottaa yksityiskohtia. Segmentoitua rakennemallia voidaan tarkastella pelkästään visuaalisesti, mutta koska se on myös matemaattinen 3D-malli, sen pohjalta voidaan myös määrittää laskennallista informaatiota. Laskennallisesti määritettäviä asioita ovat esimerkiksi huokosten tai rakenteiden koko, eri komponenttien suhteellinen osuus, eri materiaalien sijoittuminen toisiinsa nähden, halkeamat tai ontelot.



**KUVA 3.** 3D-malli männyn liimasaumasta, osa isompaa näytettä (kuva Olli Paajanen)

Yllä olevassa kuvassa 3 on 3D-malli puun ja liiman rajapinnasta. Malli sisältää samaa dataa kuin aiemmat kuvat. Alareunassa oleva skaala kertoo näytteen intensiteeteistä värijanan avulla. Tässä lineaarisessa skaalassa tumma sininen merkitsee matalaa intensiteettiä ja vaaleampi sävy korkeampaa intensiteettiä. Kuvassa erottuu epoksi tummemmalla sävyllä ja puuainesta vaaleampana. Männyn vuosikasvun tiheyserot ja anatomiset yksityiskohdat erottuvat tässä kuvassa myös eri sinisen sävyinä.

## TIETOKONETOMOGRAFIALAITTEISTO

Neoscan N80 on uusimman sukupolven desktop-tyyppinen  $\mu$ CT-laite, jonka tarkkuus riittää tieteelliseen tutkimukseen mikrometritasolla (Neoscan 2020). Laitteessa on 16 Mp:n röntgenkamera, ja laitteen pikselikoko maksimisuurennoksella on alle  $0,5 \mu\text{m}$ . Röntgenlähteen teho on 16 W ja suurin kiihdytysjännite 110 kV.

Röntgensäteiden käyttöön perustuvaa tietokonetomografiaa voidaan tehdä teknisesti hyvin erilaisilla laitteilla, ja pienimmät ovat Neoscanin laitteen kaltaisia pöytämalleja. Toisaalta vastaavia näytteitä voidaan tutkia jopa täysikokoisilla hiukkaskiihdyttimillä, jotka ovat suurten kustannusten vastapainoksi erittäin tarkkoja ja nopeita. Laitteiston koko ei itsessään määrittele kuvantamisen tarkkuutta, vaan laitteiden ominaisuudet ja hinta riippuvat muista teknisistä ratkaisuista ja rajoitteista eli siitä, mihin käyttöön laite on suunnattu. Esimerkiksi teollisuustuotteiden jatkuvaan skannaukseen käytetään erityyppisiä laitteita kuin tieteellisessä tutkimuksessa tai esimerkiksi lääketieteellisyydessä.

## MATERIAALIT

Koemateriaaleina tässä tutkimuksessa käytettiin liimattua koivuviilua. Viilu on vanerin ja muiden puukomposiittien valmistuksessa käytettävää puuta, joka on leikattu hyvin ohuiksi arkeiksi, joiden paksuus on tyypillisesti 0,3–3,2 mm.

Tutkimukseen valittiin puumateriaaliksi koivu (*Betula pendula* Roth). Koivuviilu valmistettiin Tallinnan teknillisen yliopiston laitteilla. Tukit sahattiin pölleiksi, joiden nimellispituus oli 1,2 metriä, ja ne upotettiin sitten kokonaan haudonta-altaaseen 48 tunniksi 20 °C:seen. Haudonnan jälkeen tukit leikattiin pyörivällä teollisen mittakaavan sorvilla jatkuvaksi viilumatoksi, jonka nimellispaksuus oli 1,0 mm. Sorvausnopeus oli 60 m/min ja puristusaste 10 prosenttia. Sorvauksen jälkeen viilumatto leikattiin arkeiksi, joiden mitat olivat 950 x 450 mm, ja arkit kuivattiin välittömästi 4,5 prosentin kosteuspitoisuuden saavuttamiseksi 175 °C:n lämpötilassa. Ennen liimasauman muodostumista viilut varastoitettiin 20 prosentin suhteellisessa kosteudessa ja lämpötilassa 20 °C tavoitekosteuspitoisuuksien ylläpitämiseksi. Testinäytteet, joiden mitat olivat 120 x 20 mm, leikattiin tasaannutuista arkeista. Testinäytteet tarkastettiin silmämääräisesti, jotta niissä ei olisi ilmeisiä vikoja, kuten oksia, lahoa tai vinosyisyyttä.

Viiluista liimattiin koekappaleita, joista tutkittiin liimasauman muodostumista. Liimatut koekappaleet valmistettiin ABES:llä (Automated bonding evaluation system) ASTM D7998-19:n mukaisesti. Testissä käytettiin aiemmin leikattuja ja tasaannuttuja koekappaleita, joiden mitat olivat 120 x 20 mm. Tutkimuksessa käytettiin kaupallisesti saatavilla olevaa fenoliformaldehydi (PF) -hartsia. Nestemäistä PF-liimaa levitettiin 5 x 20 mm<sup>2</sup>:n alueelle viilun toiseen päähän. Liiman levitysmäärä oli 150 g/m<sup>2</sup>. Liiman levittämisen jälkeen koekappale asetettiin ABES:iin. Kuumapuristus suoritettiin kolmen minuutin ajan 1,8 MPa:n paineessa ja 130 °C:n lämpötilassa. Ennen lopullista ja tavanomaista lujuuksien suorittamista koekappaleet poistettiin ABES:sta analysointia varten.

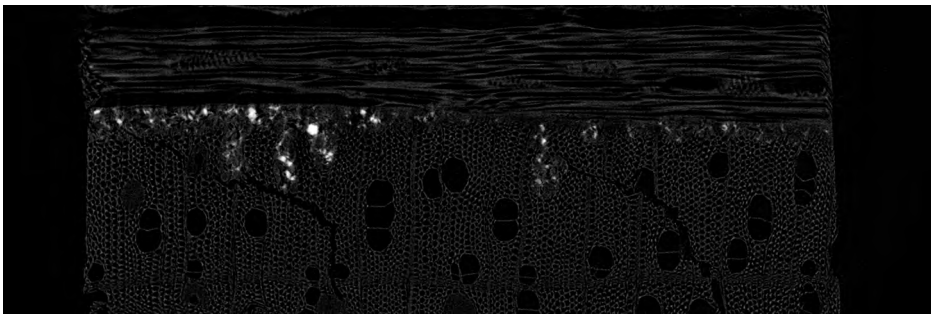
Viilunäytteiden ja ABES:n avulla tutkitaan liimasauman muodostumista sekä kehitetään vanerin valmistusprosessia. Valmistusprosessin tarkkuus ja sen dokumentointi on edellytys luotettaville ja vertailukelpoisille mittaustuloksille.

ABES-näytteiden lisäksi tutkittiin teollisesti valmistetuista vanerilevyistä sahattuja näytteitä vertailumateriaalina. Näissä on käytetty 1,5 mm paksua koivuviilua tai 3,2 mm paksua havuvaneria ja saman tyyppisiä fenolihartseja kuin ABES-mittauksissa.

Kuvantamisprosessi tehtiin 50 kV:n kiihdytysjännitteellä ja 80 mA:n virralla, koska Neoscan-laitteisto antaa näillä perusparametreilla tämän tyyppisissä näytteissä parhaan kuvantamislaidun. Pyörähdysaskel oli 0,3°, eikä filtereitä käytetty. Pikselikoko vaihteli näytteestä riippuen tyypillisesti 0,8–1,5 µm. Rekonstruktio tehtiin Neoscan-laitteeseen sisältyvällä ohjelmistolla ja visualisointi tehtiin Dragonfly-ohjelmistolla versio 2021.2, valmistaja Object Research Systems, Montreal, Kanada.

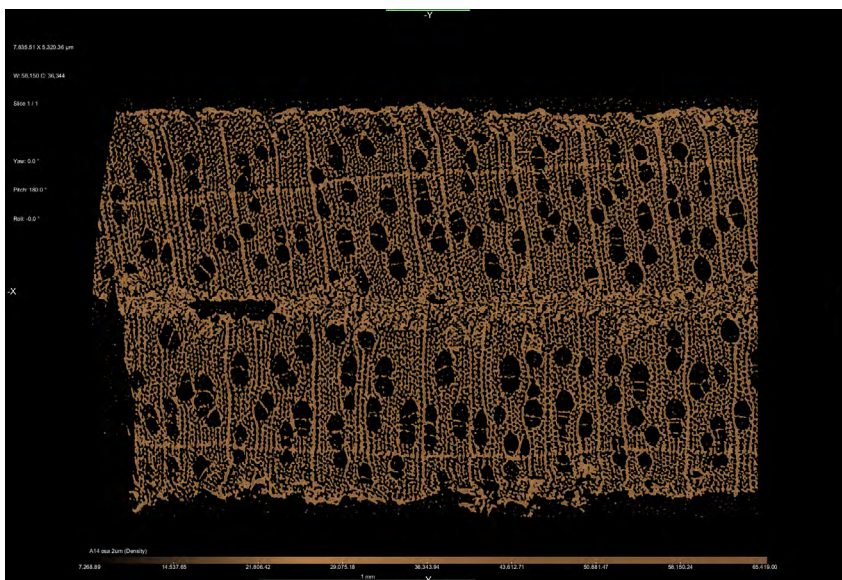
## TULOKSET

Nanotomo-hankkeessa on skannattu paljon näytteitä. Seuraavassa esitellään muutamia esimerkein vanerin liimasauman tutkimusta mikrotomografian avulla.



**KUVA 4.** Teollisen koivuvanerin liimasauma (kuva Olli Paajanen)

Kuva 4 on yhden liimasauman kokoinen yksityiskohta teollisesta koivuvanerinäytteestä. Tässä saumassa viilujen syysuunnat ovat ristikkäin, koska viilut on ladottu toisiinsa nähden poikittain. ABES-näytteissä viilujen syysuunta on molemmissa sama. Kuvasta erottuvat muun muassa putkiloiden anatomiset yksityiskohdat (putkilot, soluseinät, tikasmaiset rakenteet säteen suuntaisessa viilussa), liimasaumat (kirkas aines kahden erisuuntaisen viilukerroksen välissä) ja sorvaushalkeamat (vinot halkeamat alemmassa poikkileikkauksen suuntaisessa viilupinnassa).



**KUVA 5.** Visualisointi kokonaisesta ehjästä ABES-näytteestä (kuva Olli Paajanen)

Kuvassa 5 nähdään poikkileikkauskuvat ehjästä ABES-näytteestä. Viilukerrostojen välissä erottuu liimasauma. Kuvasta voidaan määrittää liimasauman paksuus ja liiman tunkeutuminen puuhun. Sauman vasemmalla osuudella näkyy ontto kohta. Puumateriaalissa erottuvat muun muassa putkilot, pystysuuntaiset ydinsäteet ja vuosikasvun rajat. Ylä- ja alapinnoista voidaan havaita, että viilun pinta on karhea ja epätasainen. Mustavalkokuvan visualisoinnissa on käytetty apuna Dragonfly-ohjelmiston Look up table -työkalua, jolla saadaan korostettua rakenteiden yksityiskohtia. Tässä käytetyt asetukset ("Wood") toimi tämän näytteen yksityiskohtien tarkastelussa hyvin ilman muutoksia. Modernit visualisointityökalut ovat suhteellisen helppokäyttöisiä, mutta siitä huolimatta näytteiden rekonstruoinnissa ja visualisoinnissa joudutaan usein muokkaamaan työkalujen asetuksia toimivan lopputuloksen saavuttamiseksi.

## JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTENVETO

Uusi Neoscan-röntgenmikroskopiaaliteisto kykenee tuottamaan kuvadataa, jota voidaan käyttää materiaalin rakenteen analysoinnissa. Näytteistä pystytään havaitsemaan puun rakenneyksityiskohdat. Valmistusprosessin vaikutus viilun fysikaalisiin ominaisuuksiin pystytään havaitsemaan, ja tällainen on esimerkiksi voimakkaan puristuksen vaikutus solukkoon. Myös komposiitin liimasauma pystytään havaitsemaan. Liimasaumojen segmentoinnin jälkeen niistä voidaan määrittää esimerkiksi liiman tunkeumaa, pinta-aloja ja tilavuutta numeerisesti. Tätä informaatiota voidaan hyödyntää kehitettäessä puupohjaisia tuotteita ja niiden valmistusprosesseja.

## LÄHTEET

Dragonfly 2020. Tietokoneohjelmisto. Object Research Systems (ORS) Inc, Montreal, Canada, 2020. Saatavilla: <http://www.theobjects.com/dragonfly>

Jakes, J. E., Frihart, C. R., Hunt, C. G., Yelle, D. J., Plaza, N. Z., Lorenz, L., ... & Xiao, X. 2019. X-ray methods to observe and quantify adhesive penetration into wood. *Journal of Materials Science*, 54(1), 705–718.

Neoscan BV. 2021. Specifications. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://neoscan.com/system/neoscan-n80> [Viitattu 6.9.2021]

Metsäteollisuus ry. 2021. Viennin osuus metsäteollisuuden tuotannosta. WWW-dokumentti. Päivitetty 1.2.2021. Saatavissa: <https://www.metsateollisuus.fi/uutishuone/viennin-osuus-metsateollisuuden-tuotannosta>. [Viitattu 6.9.2021]

# DIGITAALISTEN TEKNOLOGIOIDEN HYÖDYNTÄMINEN ETELÄ-SAVON TEKNOLOGIATEOLLISUUDEN LIIKETOIMINNASSA

Juha-Pekka Ontronen & Kiti Venäläinen & Ari Mielo

Xamkin Elektroniikan 3K-tehtaalla toteutettiin osana Osaava teknologiaklusteri 2025 – OSKU 2025 -hanketta kartoitus, jossa selvitettiin Etelä-Savon teknologiayritysten tilannetta ja kehitystarpeita digitaalisuuden hyödyntämisessä. Sekä suurempien että pienempien teknologiayritysten on mahdollista menestyä tuotteiden ja palveluiden valmistajina digitalisaation avulla nykyisessä toimintaympäristössä. Edellytys digitaalisten teknologioiden käyttöönottoon ja tehokkaaseen hyödyntämiseen on riittävä tietotekninen osaaminen, jonka lisäämistä pyritään tukemaan hankkeessa kartoituksen tulosten avulla.

## JOHDANTO

OSKU 2025 -hankkeen tavoitteena on tukea osaamisen kehittämisen avulla Etelä-Savon teknologia-alan yritysten positiivista tuottavuuden ja liiketoiminnan kehittymistä. Hankkeessa tuotetaan koulutuksia sekä digitaalisia oppimissisältöjä vastaamaan henkilöstön ja alalla tarvittavien osaajien koulutustarpeita. Lisäksi hanke tuottaa tapahtumia, joilla pyritään vahvistamaan alan vetovoimaisuutta. Hanketta rahoittaa Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan sosiaalirahastosta.

Digitaalisuus on yksi hankkeen keskeisimmistä teemoista. Hankkeen vaikuttavuuden tehostamiseksi ja osittain myös yritysten verkostoitumisen edistämiseksi perustettiin Digitalisaatio-asiantuntijatyöryhmä, jonka tehtävänä on muun muassa ohjata ja tukea hankkeen sisältöihin ja tavoitteisiin liittyvää osaamista. OSKU 2025 -hankkeen ja asiantuntijatyöryhmän tueksi tehtiin kartoitus, jonka tavoitteena oli selvittää Etelä-Savon teknologiayritysten nykytilanne ja kehitystarpeet digitaalisuuden hyödyntämisessä. Kartoituksen tulosten perusteella hanke pyrkii tukemaan yritysten digitaalisuuteen liittyviä osaamistarpeita esimerkiksi koulutusten avulla.

Yritysten digiosaamista on selvitetty aiemmin Pohjois-Pohjanmaalla (DigiLeap-hanke), Satakunnassa (TEUVO-hanke) ja Pohjois-Savossa (NewTech-hanke). Elinkeinoelämän keskusliitto EK puolestaan toteutti yrityskyselyn digitalouden osaamistarpeista joulukuussa

2018. #DigiLAHTI-hankkeessa tehdyssä haastattelututkimuksessa (Rantala et al. 2019) oli tutkittu halukkuutta digitaalisten teknologioiden hyödyntämiseen pienyrityksissä. Tutkimuksessa havaittiin pienyritysten sisäisten tekijöiden – kasvuhalukkuuden ja tietoteknisen osaamisen – merkittävä vaikutus digitaalisten teknologioiden käyttöönottohalukkuuteen, kun taas toimintaympäristöön liittyvien tekijöiden (markkinatilanne, kilpailutilanne ja alan teknologinen kehitys) vaikutus oli vähäisempi.

Digitalisaatioissa tietoa ja tietotekniikkaa hyödynnetään toiminnan muuttamiseen tai uuden mahdollistamiseen. Digitalisaatio ei tarkoita tietotekniikkaa eikä digitointia, joka on vain vanhan toimintatavan korvaamista vastaavalla digitaalisella toiminnalla, vaan tiedon hallinta on digitalisaation ydin. Käytännössä digitalisaatioissa on kyse organisaatiokulttuurin muutoksesta. (Kasvi 2019)

Digitalisaatio ja digitaaliset teknologiat liiketoiminnassa ovat laaja kokonaisuus erilaisia yritystoimintaa tukevia toimintatapoja, sovelluksia ja työkaluja, joilla käsitellään tietoa tehokkaasti. Digitaaliset teknologiat voidaan jakaa muun muassa (Rantala et al. 2019) yleisiin digitaalisiin työvälineisiin, digitaalisiin yritysjärjestelmiin, digitaaliseen asiakaspalveluun ja digitaaliseen myyntiin ja markkinointiin. Digitaaliset teknologiat ovat vakiinnuttaneet asemansa muun muassa johtamisen, myynnin ja markkinoinnin, logistiikan ja suunnittelun työkaluna. Teknoliateollisuudessa ja valmistavassa teollisuudessa käytetään yleisesti digitaalisia teknologioita edellisten lisäksi laitteiden numeeriseen ohjaukseen ja tiedonsiirtoon sekä ihmisen ja laitteen että kahden laitteen välillä.

## TOTEUTUS

Kartoituksessa haastateltiin 15 yritystä Etelä-Savon alueelta huhti–toukokuussa 2021. Kysymykset lähetettiin haastateltaville ennakoon. Haastattelun tulokset oli sovittu esitettäväksi siten, että yksittäisiä yrityksiä ei voi tunnistaa vastauksista. Haastateltavaksi oli haettu asiantuntijoita muun muassa Etelä-Savon teknoliateollisuuden yrityksistä OSKU 2025 -hankkeen esittelyn/yrityskartoituksen yhteydessä. Yritysprofiiliksi muotoutui seuraava jakauma: 2 mikroyritystä, 5 pientä ja 3 keskisuurta yritystä sekä 5 suuryritystä.

Menetelmäksi valittiin puolistrukturoitu kyselytutkimus, johon sisältyi myös teemahaastattelu. Menetelmä antoi haastatelluille tilaa vastata monimuotoiseen tutkimusaiheeseen mahdollisimman avoimesti tekemättä kuitenkaan haastatteluista vertailukelvottomia keskenään. Aineiston analyysimenetelmänä hyödynnettiin aineistolähtöistä sisällön analyysia.

Kartoituksen strukturoidussa osassa haluttiin selvittää valmiin kysymyslistan avulla, mitä digitaalisia menetelmiä yrityksissä on käytössä ja missä on tarvetta kehittyä tai ottaa menetelmiä käyttöön. Lista oli jaoteltu neljään osaan, joista ensimmäisessä kolmessa osassa kysyttiin valmistuksen, tuotteiden ja palveluiden sekä muun liiketoiminnan prosesseihin



liittyviä digitaalisia teknologioita. Neljäs osa oli alustettu eri ohjelmistotyypeistä. Lisäksi yrityksiltä kysyttiin, miten he näkevät asemansa digitalisoitumiskehityksessä verrattuna muihin alan yrityksiin. Teemahaastattelulla haluttiin selvittää yritysten tilannetta muun muassa paikkariippumattomuuden toteutumisesta, tavoitteista ja kiinnostuksen kohteista sekä esiin tulleista digitalisaatioon liittyvistä haasteista.

## TULOKSET

### STRUKTUROIDUT KYSYMYKSET

Strukturoidun osan kysymyspatterissa oli useita kymmeniä kysymyksiä, joista tässä esite-tään osio, jossa kysyttiin, mitä digitaalisia teknologioita yrityksillä on käytössä tuotteiden ja palveluiden liiketoimintaprosesseissa. Kysymykset ja tulokset kokonaisuudessaan ovat saatavissa hankkeen kotisivuilta [www.xamk.fi/osku2025](http://www.xamk.fi/osku2025).

**TAULUKKO 1.** Tuotteiden ja palveluiden digitalisaatio, mitä digitaalisia teknologioita teillä on käytössä ja millä tasolla?

Digitaalinen teknologia:	Käytössä	Käytössä ja kehitystarve	Kehitystarve	Ei kiinnosta	Huomioita vastauksiin liittyen:
Virtuaalitodellisuus (VR) / Lisätty todellisuus (AR):	5	3	6	4	Käytetty esim. messumarkkinoinnissa; kunnossapidon puolella voisi simuloida erilaisia asioita. Teknologian käyttöönotolle ja kehitykselle on tarvetta.
Verkkokauppa tuotteiden / palveluiden myynnissä:	1	1	6	8	Suurimmalla osalla tuotteet ja palvelut eivät ole verkkokauppamyymäviä, mutta osalle voisi olla kehitystarve, jota on mietittykin.
Digitaalinen itsepalvelu:	3	2	5	7	Muutama yritys käyttää jo digitaalista itsepalvelua ja noin puolet yrityksistä näkee tässä kehitystarpeen, toisaalta noin puolet ei näe teknologiaa tarpeellisenä tällä hetkellä.
Palvelukokemuksen personointi:	6	4	2	7	Palvelukokemuksen personointia on käytössä tai suunnitteilla noin puolella yrityksistä, mutta vaatii myös jatkokehitystä. Noin puolet ei näe teknologiaa tarpeellisenä tällä hetkellä.
Älypakkaukset:	2	2	5	8	Älypakkaukset ovat vain harvoilla käytössä ja ne eivät kiinnosta puolta yrityksistä. Älypakkauksiin liittyvä paikannus, esim. jo valmistuksessa tapahtuva seuranta voisi olla kiinnostava kehityskohde, nähtäisiin vaunun liike solusta toiseen ja minkä aikaa se viettää missäkin kohtaa.

Digitaalinen teknologia:	Käytössä	Käytössä ja kehitystarve	Kehitystarve	Ei kiinnosta	Huomioita vastauksiin liittyen:
Puettava teknologia:	3	3	5	7	Puettavan teknologian alueelta on käytössä lähinnä älylaseja ja hälyttimiä, kehitystarve nähdään etenkin VR/AR-teknologiassa.
Dronet:	3	3	3	9	Dronet on käytetty kuvauksissa ja kartoituksissa esim. sellaisten tilojen kuvauksissa, missä ei muuten pysty liikkumaan. Kehitystarpeena nähtiin muun muassa skannauslennot tarkentamaan sijaintitietoja.
Pelillistäminen:	1	1	4	10	Pelillistäminen ei ole kaikille tuttu asia, eikä sen hyötyjä siten osata vielä nähdä tuotteissa palveluissa kuten ei valmistuksessakaan nähty. Jotkut haastatelluista näkivät kehittämismahdollisuuksia sekä oman henkilökunnan että kumppanuusverkoston kouluttamisessa esim. kyberturvallisuushätkien simuloimiseen.
3D-tulostus:	5	3	5	5	3D-tulostusta on käytetty esim. pienisarjatuotannossa, ja koetaan, että teknologialle on kasvavaa kehitystarvetta.
IoT:	6	3	4	5	IoT on monella yrityksellä käytössä. Kehitystarvetta nähdään, seuraavana askeleena pilviteknologia.

Taulukosta 1 nähdään, kuinka monella yrityksellä on kyseinen digitaalinen teknologia käytössä, kuka haluaisi kehittää sen käyttöönottoa tai mikä teknologia ei kiinnosta yritystä tällä hetkellä. Lisäksi tiedusteltiin kehitystarvetta, vaikka kyseinen teknologia olisikin jo käytössä. Teknologioihin liittyvät huomiot ovat oikeanpuoleisissa sarakkeissa.

Tuloksista huomataan, että 5–9 yritystä 15:stä (33–60 %) kokee kehitystarvetta kustakin kysytystä teknologiasta (joko uutena tai käytössä olevana). Kaikki digitaaliset teknologiat eivät välttämättä sovellu suoraan yrityksen toimintaan. Kuitenkin esimerkiksi älypakkauksen yhteydessä havaittiin mahdollisuus soveltaa teknologiaa sisälogistiikan hallintaan muun muassa tuotteeseen tai kuormausyksikköön liitetyn seurantalaitteen avulla.

## TEEMAHAASTATTELUKYSYMYKSET

Seuraavassa on koostettu tiivistelmä haastateltujen henkilöiden kokempohjaisista vastauksista teemahaastattelukysymyksiin.

### **Miten määrittelette digitalisaation (omasta näkökulmasta)?**

Vastauksista havaittiin, että digitalisaatio nähdään kovin moninaisena ja muuttavana ilmiönä, mutta yhteisenä nimittäjänä voinee pitää muutosta tiedon keräämisessä, siirtämisessä ja käsittelyssä sekä saavutettavuudessa.

### **Miten paikkariippumattomuus toteutuu yrityksissä?**

COVIDin pakottamana lisääntynyt kotitoimistossa työskentely on vahvistanut uskoa siihen, että asioita pystyy tekemään paikkariippumattomasti. Erityisesti toimihenkilötehtävät, suunnittelu ja projektinhallintaan liittyvät työtehtävät onnistuvat hyvin missä tahansa.

### **Mitä tavoitteita yrityksillä on digitalisaation suhteen?**

- Tiedon käsittelyn tehostaminen, saadun tiedon avulla ennustaminen, tekoälyn hyödyntäminen, tiedon visualisointi mittareiden ja data-analyysien avulla
- Digitaalisten teknologioiden hyödyntämisen suunnitelmallisuus, esim. keskipitkän tähtäimen suunnittelu, oikeasti omasta toiminnasta kertovat mittarit
- Paikkariippumattomuus, etätöön ja etäohjauksen kehittäminen, tehokas yhteistyö ja tuki etänä sekä yrityksen sisällä että asiakkaalle
- Teollisen Internetin maturiteettitason nosto
- Yleinen toiminnan tehostaminen automaation ja päällekkäisten toimintojen poistamisen avulla

### **Mitkä ovat suurimmat haasteet digitalisaation etenemiselle?**

**Yrityksen sisäiseksi haasteiksi** voidaan lukea muutokseen liittyvät haasteet osaamisessa: nopea muutossykli ja niihin liittyvä koulutus, omaksuminen, resurssit sekä konservatiivinen ajatusmaailma toiminnassa.

**Toimintaympäristöön liittyviksi haasteiksi** mainittiin edellisten lisäksi yhteistyökumppaneiden valmius kehittyä yhtä aikaa, laitevalmistajien hajanaiset järjestelmät ja yhtenäisen tiedon kerääminen niistä.

### **Millaisia (henkilö)resursseja teillä on varattu digitalisaation kehittämiseen ja ylläpitoon?**

Haastattelussa kehittämisen resurssit nähtiin yleisesti henkilöresursseina ja erityisesti niiden puutteena. Suurimmalla osalla yrityksistä ei ole erikseen nimettyjä resursseja, eri ihmiset hoitavat kehittämistä oman toimen ohessa tai käytetään ulkopuolisia resursseja. Todettiin myös, että taloudellisia resursseja on pakko varata kohtuudella.

## **Onko henkilöstönne digitaidoissa puutteita, jotka vaikeuttavat tällä hetkellä yrityksen toimintaa?**

Puutteita tai haasteita koetaan olevan monellakin tasolla. Huippuosaajia on aika vähän, ja erilaisia järjestelmiä on paljon. Sisäisen viestinnän kulttuurissa todettiin olevan kehittämistä muun muassa tiedon jakamisessa. Yrityksillä on eriäviä näkemyksiä henkilöstön iästä digitaalisten taitojen suhteen, myös motivaation puute ja ennakkoluulot digitalisaatiota kohtaan voivat vaikeuttaa uusien teknologioiden omaksumista.

### **Kiinnostavimmat aiheet digitalisaatioon liittyen**

- Datan kerääminen ja analysointi: data-alustat, Business Intelligence, muu data-analytiikka, prosessien ennustaminen ja valvonta sekä toiminnan parantaminen
- IoT, ekosysteemit, koneoppiminen, strateginen tietoturva
- Viestintäsovellukset, markkinointi digimuodossa
- Pilviteknologian hyödyntäminen entistä enemmän, SaaS-palvelut
- Automaatio yleensäkin niin ohjelmisto- kuin rautapuolella, automatisoitu työstökonesofta
- Etäyhteydet, etätiedonkeräys, etähallinta ja hälyttämiset
- 3D-tulostaminen, AR/VR, cobotit
- Materiaalihukan pienentäminen
- Asiat, jotka tukevat liiketoiminnan tulevaisuuden tekemistä
- Yritysesimerkit ja verkostoituminen

Vähiten kiinnostavia aiheita osalle alueen teknologiayrityksistä olivat ”helppojen asioiden” digitalisointi, mobiiliverkkojuttu, pelillistäminen ja some-hypeytys.

## **JOHTOPÄÄTÖKSET**

Haastattelut toivat esille hyvin alueen yritysten digitalisaatioon ja digitaalisiin teknologioihin liittyvät kehitystarpeet ja mielenkiinnon kohteet. Kartoitusta tukee hankkeen tavoitteita ja antaa suuntaa, mihin koulutustarjontaa tulisi tarjota yrityksille. OSKU 2025 -hankkeessa tehokkain keino edistää digitaalisten teknologioiden käyttöönottoa on tuoda yritysten tietoteknistä osaamista yrityksissä. Haastatteluiden yhteydessä todettiin myös pienempien yritysten mahdollisuus menestyä tuotteiden ja palveluiden valmistajina digitalisaation tehokkaan hyödyntämisen avulla.

## LÄHTEET

Kasvi, J. 2019. Digi digi digi. TIEKE Tietoyhteiskunnan kehittämiskeskus ry. [Verkkoaineisto] [Viitattu 2.8.2021]. Saatavissa: / <https://tieke.fi/digi-digi-digi/>

Rantala, T., Saunila, M., Ukko, J. & Sore, S. 2019. Digitaalisten teknologioiden hyödyntäminen pienyrityksissä. LAMK Pro. [Verkkoaineisto] [Viitattu 2.8.2021]. Saatavissa: <https://www.lamkpub.fi/2019/04/12/digitaalisten-teknologioiden-hyodyntaminen-pienyrityksissa/>

# BIO- JA KIERTOTALOUDEN VERKOSTOJEN VOIMA

Kirsi Tallinen & Kari Laine & Mika Kainusalmi & Tomi Höök

Yhdessä tekeminen ja toiminnasta tiedottaminen lisäävät Kymenlaakson näkyvyyttä parantaen mahdollisuutta laajenevaan yhteistyöhön ja jatkuvaan kehittämiseen. Biosivuvirtamateriaalien muotoilupilotoinnit, pakkausalan tuotekehityksen edistäminen ja uusiutuvaan energiaan perustuvien lämmitysvaihtoehtojen etsiminen toimivat sekä yhteistyön lisääjinä yritysten ja korkeakoulujen välillä että tiedotuskanavana. Uusista mahdollisuuksista tiedottaminen sekä yritystoiminnan tukeminen niin, että vähähiilisyden edistäminen omalta osalta helpottuu, on kaikkien etu. Toisaalta tilaisuudet, joissa kerrotaan alueellisesta kehitystyöstä, mahdollistavat niin kansallisen kuin kansainvälisen TKI-toimijoiden kohtaamisen ja uusien kehitysaihioiden muodostumisen.

Biotalous uudet tuulet – BUT -hanke toimii yhteistyön, kokeilujen ja tiedonkokoamisen sekä -välittämisen apuvälineenä, ja sen päärahoitus tulee Kymenlaakson liiton puoltamana Uudenmaan liitolta Euroopan aluekehitysrahastosta (EAKR).

## JOHDANTO

Kymenlaakson tunnettuuden nosto ja yhteinen aluekehittäminen toimivat monin tavoin. Esimerkiksi BUT-hankkeessa edistetään yritysten sivuvirtojen hyödyntämistä sekä muovittomuutta sekä tiedotetaan fossiilittoman lämmöntuotannon vaihtoehtoista kohde-esimerkein. Kansainvälistä tunnettuutta parannetaan webinaarilla sekä markkinointivideolla, joissa alueen bio- ja kiertotaloustoimintaa tuodaan esiin.

Yritysten biosivuvirroista, kuten kuusenkuoresta, okarasta, kahvipavun kuoresta ja olutmäskistä, tehdyt muotoilupilotoinnit etsivät ratkaisuja hyödyntää sivuvirtoja pakkausmateriaaleina, ja esiin nousi myös mahdollisuuksia yleisemmin hyödyntää sivuvirtoja. Toiminta oli erinomainen esimerkki hankkeiden sekä yritysten kanssa tehtävästä yhteistyöstä.

Pakkausalan tuotekehityksen edistämistä on tehty kartoittamalla tarpeita ja tuomalla esille uusia mahdollisuuksia muun muassa muovin korvaamiseksi. Pakkausten pilotointikonseptien määrittely ja pakkausratkaisujen ja teknologian pilotointikohteita on tunnistettu, ja niiden työstäminen jatkuu.

Uusiutuvaan energiaan perustuvien lämmitysvaihtoehtojen esiin tuominen ja erilaisille öljylämmityskohteille sopivien vaihtoehtojen etsiminen toimivat tiedonkoontina ja antavat pohjan myös tiedonjakamiselle.

Syksyllä 2021 järjestettävässä kansainvälisessä webinaarissa on edustava otos alueella toimivia osajia: metsäteollisuus, korkeakoulut ja yritykset esittävät ratkaisujaan bio- ja kiertotalouden edistämiseksi. Samaisessa tilaisuudessa on myös hankkeessa toteutetun aluemarkkinointivideon ensiesitys. Videolla nostetaan esiin Kymenlaaksossa olevia biotalouden mahdollisuuksia nykypäivänä ja sen taustalla vaikuttaneita tekijöitä.

## PAKKAUSTEN ARVOKETJUN KASVATTAMINEN

### MUOTOPURISTEET BIOSIVUVIRROISTA

Hankkeessa tavoitteena on ollut muun muassa etsiä, luoda ja toteuttaa uusia avauksia, joilla voidaan tarttua biotalouden mahdollisuuksiin. Tällaisia ovat muun muassa biohajoavat tuotteet ja uudet pakkaukset. Materiaalitehokkuuden kehittäminen ja sivuvirtojen hyödyntämisen lisääminen sisälsivät kokeiluosuuden, jossa Xamk hyödynsi yritysten sivuvirtoja ja etsi mahdollisuuksia entistä tehokkaampaan ja ympäristöystävälliseen materiaalikäyttöön lämpöpuristusmenetelmällä tehdyissä pilotoinneissa. Samalla luotiin pohjaa biotuotemuotoilun kokonaisuuden rakentumiselle Kouvolaan, kun hankitut laitteet ja tarvikkeet tulevat jatkossakin olemaan Xamkin muotoilukoulutuksen hyödynnettävänä. Tehtävät pilotoinnit puolestaan loivat pohjatietoa myös koulutukselle.

Käsiteltäviä materiaaleja saatiin kymenlaaksolaisilta yhteistyöhaluisilta yrityksiltä muun muassa maataloudesta, metsäteollisuudesta sekä elintarviketeollisuudesta. Kuvassa 1 on ensimmäisiä kokeiluja materiaalien soveltuvuudesta lämpöpuristukseen.



**KUVA 1.** Puristeita viljapölystä ja perunasta (vas.) sekä kuusenkuoresta ja perunasta (kesk. ja oik.). (Kuva: Jaana Teiskonon, Xamk)



Useammalla materiaalilla ilmeni kosteusongelma, minkä vuoksi materiaalia ei viety jatkokotestaukseen: liiallinen kosteus aiheutti kutistumista, homehtumista ja tehdyn puristeen vääntymistä. Oluutmaskilla tehtiin ensimmäisiä pakkausmuotoilukokeita, joiden perusteella nähtiin, että lämpöpuristustekniikalla valmistettava pakkaus voisi olla mahdollinen. Tätä varten suunniteltiin, mallinnettiin ja hankittiin lämmitettävä, kolmen 0,33 l tölkin ulkopakkaukseksi sopiva puristusmuotti, jota hyödynnettiin muidenkin alkutestausten jälkeen lämpöpuristukseen sopiviksi todettujen materiaalien puristamisessa.

Materiaalien esikäsitteilyllä (hienontaminen), seulonalla ja oikeiden seossuhteiden löytämisellä saatiin useita onnistuneita puristeita, joiden käytettävyyden varmistamiseksi tulee kuitenkin tehdä jatkoselvityksiä. Potentiaalia on kuitenkin usean materiaalin hyödyntämisessä. Kaikki aineet eivät esimerkiksi painonsa vuoksi sovellu pakkauksiin, mutta ne soveltuvat mahdollisesti muuhun tarkoitukseen, kuten kauniiksi pintamateriaaliksi tai maatuvaiksi kasvualustaksi. Kuvassa 2 lämpöpuristuksella tehtyjä muotopuristeita eri materiaaleista.



**KUVA 2.** (vas.) Kuusenkuori (hienonnettuna) ja tärkkelys. (oik.) Kuvassa ylhäällä vasemmalla sellu ja kahvipavunkuori, ylhäällä oikealla puru ja tärkkelys. Alhaalla puru, kahvipavunkuori ja tärkkelys. (Kuvat: Jaana Teiskonen, Xamk)

## KUITUPOHJAISET PAKKAUSRATKAISUT – EKOLOGINEN VAIHTOEHTO TUOTEPAKKAAMISEEN

Ympäristöystävällisyys ja kiertotalouden periaatteet nousevat tulevaisuudessa entistä enemmän esille meidän arjessamme. Monille lyhytikäisille lineaarisille tuotanto- ja kulutusmalleille pyritään löytämään kestävämpiä kiertotalouteen perustuvia ratkaisuja. Muutoksen ajureina toimivat muun muassa ihmisten parempi ympäristötietoisuus, ilmastonmuutos ja huoli ympäristön pilaantumisesta. Usein asioiden muuttamiseksi tarvitaan monenlaista tukea sekä myös regulaatiota.

Heinäkuussa 2021 EU:ssa voimaan tullut SUP-direktiivi (SUP = single-use plastic) pyrkii vähentämään syntyvän jätteen määrää puuttamalla erityisesti kertakäyttötuotteisiin. Direktiivin tarkoituksena on pyrkiä vähentämään muovijätteen määrää ja sen päätymistä ympäristöön ja erityisesti meriympäristöön. Direktiivin avulla pyritään edistämään kiertotalouteen perustuvia toimintamalleja asettamalla etusijalle kestävät ja myrkyttömät uudelleenkäytettävät tuotteet ja uudelleenkäyttöjärjestelmät. EU:n strategiassa muovien ja muovituotteiden suunnittelussa ja tuotannossa tulisi ottaa täysimääräisesti huomioon uudelleenkäyttö-, korjaus- ja kierrätystarpeet kestävämpien materiaalien kehittämiseksi ja edistämiseksi. (Euroopan unioni 2019)

Monissa pakkauksissa muovi on vakiinnuttanut asemansa käyttökelpoisuutensa ja edullisuutensa ansiosta. Muovin käyttö on varmasti perusteltua useiden tuoteryhmien pakkaamisessa myös tulevaisuudessa, mutta kertakäyttömuovin lisäksi myös muut pakkausratkaisut ja -materiaalit tulevat lisääntymään ja erityisesti ympäristönäkökulmat tulevat korostumaan (kuva 3).

Kuluttajat ovat muutoksessa isossa roolissa ja vaikuttavat ostokäyttäytymisellä merkittävästi tulevaisuuden pakkausratkaisuihin. Ympäristöarvot alkavat vaikuttaa entistä enemmän ostopäätökseen, ja ympäristöystävälliseen pakkaukseen pakatuilla tuotteilla voidaan erottua kilpailijoista. Tämän johdosta yritykset etsivät uusia tapoja pakata omia tuotteitaan entistä ympäristöystävällisemmin ja vastuullisemmin.

Etenkin pk-yritysten resurssit ovat usein hyvin rajalliset uusien pakkausratkaisujen kehittämisessä ja ylipäättään jo markkinoilla olevien pakkausratkaisujen tunnistamisessa. Yritykset tarvitsevat usein tukea, ja hyvällä yhteistyöllä voidaan saada merkittäviä kehitysaskelita pienemmillä resursseilla.

Tähän haasteeseen pyritään löytämään ratkaisuja BUT-hankkeen pakkausalaan keskittyvissä työpaketeissa. Työpaketit mahdollistavat tuoreimman tiedonvälityksen uudelaista ekologisista pakkausratkaisuista kymenlaaksolaisille yrityksille. Yritykset saavat tietoa markkinoilla ja kehitystyön alla olevista pakkausratkaisuista ja niiden käyttöön liittyvistä vaatimuksista sekä soveltuvuudesta omille tuotteilleen.

Ajankohtaisen tiedon hankinta ja yritysten toimintaympäristön tunnistaminen vaativat tuekseen systemaattista ja suunnitelmallista tiedon keräämistä ja analysointia. Näistä lähökohdista hankkeessa kehitettiin tiedonhankintamalli tuotteen tai palvelun kehittämistarkoitukseen. Tiedonhankintamallia hyödynnettiin keväällä 2021 tehdyn haastattelututkimuksen toteuttamisessa, jossa paneuduttiin ekologisten pakkausten tulevaisuuden näkymiin Kymenlaaksossa.

Haastattelujen taustalla olivat LUT-yliopistolla olemassa olevat kuitupohjaiset pakkausratkaisut ja teknologia niiden valmistamiseen. Näiden yleisempi käyttöönotto vaatii yhteistyötä

yritysten kanssa. Tarvitaan yrityksiä uuden teknologian valmistamiseen, lisäksi tarvitaan hyödyntäjiä valmistetulle teknologialle ja ennen kaikkea kysyntää lopputuotteille.



**KUVA 3.** LUT-yliopiston kehittämä ekologinen vuokapakkaus (Kuva: Khelli Palmgren.)

Haastattelututkimuksen kohderyhmäksi valittiin Kymenlaakson alueella toimivia pakkausten hyödyntäjiä, pakkausten valmistajia ja laitevalmistajia. Yhteensä haastateltiin 22:n eri yrityksen edustajaa, joista suurimman otoksen muodostivat pakkausten hyödyntäjinä toimivat pk-yritykset. Ympäristöystävällisyyden arvostus nousi selkeänä teemana esiin pakkausten hyödyntäjien keskuudessa. Pakkausten valmistajat nostivat esille nopeat vaihtoajat laitteiston käytön kannalta tärkeänä asian. Lisäksi arvostettiin laitteiston yksinkertaisuutta käytön ja kunnossapidon näkökulmista. Haastatelluille laitevalmistajille pakkausala ei ollut entuudestaan tuttua, koska toiminta painottui erityyppisiin koneistustoimintoihin. Kiinnostus kehitystyötä kohtaan oli epävarmaa, ja kyseiset yritykset tarvitsisivat mahdollisen liiketoimintapotentiaalin selvittämiseksi laajemman perehtymisen tuotteisiin ja pakkausalaan todellisen potentiaalin määrittämiseksi.

Pakkauksia hyödyntävät yritykset sekä pakkausvalmistajat kokivat aihealueen kiinnostavaksi oman toiminnan näkökulmasta ja olivat pääasiassa kiinnostuneita pilotointimahdollisuudesta. Pakkausten hyödyntäjät olivat kiinnostuneita sekä vuoka- että pussipakkausten pilotoinnista esimerkiksi keittojen, juustojen, lihatuotteiden, marjojen, kahvin tai leivosten pakkaamisessa. Myös haastatellut pakkausvalmistajat ovat kiinnostuneita selvittämään LUT:n kehittämän laitteiston soveltuvuuden oman toiminnan näkökulmasta.

Hankkeessa kehitystyötä jatketaan seuraavaksi pakkausten pilotointikonseptin suunnitellulla. Haastattelututkimuksesta saatua arvokasta tietoa yritysten tilanteesta ja näkökulmista hyödynnetään jatkokehitystyössä. Toteutetun haastattelututkimuksen perusteella alueen yrityksillä olisi kiinnostusta kokeilla LUT-yliopiston pakkausratkaisuja omille tuotteilleen. Kehitettävällä konseptilla helpotetaan etenkin pk-yritysten mahdollisuutta löytää tarvittavaa yhteistyötä omien pakkausratkaisujen parantamiseksi. Pilotointikonseptissa määritellään konkreettiset askeleet ja tarvittavat resurssit uudenlaisen pakkausratkaisun kokeilemisesta. Lopputuloksena saadaan kymenlaaksolaisille yrityksille selkeä polku pakkauskehitystyölle LUT-yliopiston kanssa yrityksen omien pakkausten kehittämiseksi.

## ÖLJYSTÄ UUSIUTUVIIN – LÄMMITYSTAPAMUUTOKSET

Euroopan unioni tavoittelee ilmastoneutraaliutta. Se tarkoittaa EU-alueen taloutta, jonka kasvihuonekaasujen nettopäästöt ovat nolla vuoteen 2050 mennessä. Kukin EU-maa toteuttaa tätä yhteistä tavoitetta kansallisesti. Suomessa Marinin hallitusohjelmassa on kirjattu, että maamme on hiilineutraali vuonna 2035 mennessä ja hiilinegatiivinen nopeasti sen jälkeen. Tämä tehdään maailman keskilämpötilan nousun rajoittamiseksi 1,5 asteeseen. Rakennukset ja rakentaminen tuottavat kolmasosan Suomen ilmastopäästöistä. Vaihdaminen fossiilisesta öljystä kestävämpiin lämmitysmuotoihin on konkreettinen tapa vähentää päästöjä ja toteuttaa hiilineutraaliustavoitetta. Suomen hallitusohjelmassa on määritetty, että fossiilisen öljyn käytöstä lämmityksessä luovutaan asteittain 2030-luvun alkuun mennessä. Valtion ja kuntien kiinteistöjen öljylämmityksestä luovutaan vuoteen 2024 mennessä, ja kannustetaan öljylämmitteisiä kiinteistöjä siirtymään muihin lämmitysmuotoihin 2020-luvun aikana erillisellä toimenpideohjelmalla. (Valtioneuvosto s.a.)

Ilmastotietoisuuden lisääntyessä ja käydessä yhä selvemmäksi, että maapallon ilmasto lämpenee niin nopeasti, että se aiheuttaa merkittäviä muutoksia maapallon ekologialle, on huomio kiinnitetty öljyn kuluttamisen vähentämiseen ja jopa sen käytön lopettamiseen niissä tarkoituksissa, joissa tämän on tutkittu olevan mahdollista.

Asetettujen öljystä luopumistavoitteiden edistämiseksi Suomessa on tarjolla rahallista avustusta vaihtelevien kriteerien mukaisesti. Pientalojen omistajille on tarjottu Pirkanmaan ELY-keskuksen myöntämää avustusta öljylämmityksen vaihtamiseen muuhun lämmitysmuotoon 1.9.2020 alkaen. Avustusta myönnetään 4 000 euroa, kun pientalossa siirrytään kaukolämpöön, maalämpöön tai ilma-vesilämpöpumppuun. Muita lämmitysmuotoja avustetaan 2 500 eurolla. (ELY-keskus. s.a.)

Vastaavasti 5.10.2020 alkaen kunnille on tarjottu Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus ARA:n myöntämää avustusta öljylämmitysjärjestelmän poistamiseen ja lämmitysmuodon muuttamiseen kestävämmäksi niiden omistamissa kiinteistöissä. Kunnille avustuksen määrä on enintään 20–25 prosenttia kustannuksista riippuen siitä, onko kunta liittynyt

vapaaehtoiseen energiatehokkuussopimukseen. Lisäksi ARA myöntää energia-avustusta taloyhtiöille ja ARA-yhteisöille monenlaisiin asuinrakennusten energiatehokkuutta parantaviin korjauksiin ja toimiin, myös öljylämmityksen vaihtamiseen. Myös yritykset voivat saada avustusta kiinteistöjen öljylämmitysjärjestelmien muuttamiseksi hakamalla Business Finlandin energiatukea, jonka keskeisenä tavoitteena on edistää uusien ja innovatiivisten ratkaisujen kehittämistä energijärjestelmän muuttamiseksi vähähiiliseksi pitkällä aikavälillä. Energiatuen suuruus vaihtelee 10–25 prosentin välillä käytetyn teknologian mukaan. Avustukset ovat jouduttaneet lämmitystapasaneeraukseen ryhtymistä. Esimerkkinä avustuksia pientalojen öljylämmitysten muuttamiseksi on haettu elokuun 2021 loppuun mennessä yli 15 600 kpl, joista hyväksytyin päätöksen on saanut yli 92 prosenttia kaikista hakemuksista. (ARA s.a.)

## LÄMMITYSTAPAMUUTOKSET KOHTEISSA

Hankkeessa selvitettiin lämmitystavan muutosmahdollisuuksia kolmelle erilaiselle kohteelle, jotka vielä käyttävät öljykattilaa pääasiallisena lämmitysmuotona. Kohteina olivat suurikokoinen liikerakennus, tuotantokäyttöön siirretty vanha puolilämmin varastohalli sekä kymmenen asunnon luhtitalo. Pientalojen lämmitystapamuutoksiin löytyy internetistä paljon tietoa ja ohjeita toisin kuin suurempien kiinteistöjen. Tässä projektissa on kartoitettu lämmitystapamuutosten mahdollisuuksia ja taloudellista kannattavuutta suurempien kiinteistöjen näkökulmasta. Tarkoituksena on sen lisäksi, että kyseisille yrityksille annetaan tietoa juuri heidän kiinteistöjensä mahdollisuuksista, myös tehdä yleistäviä esimerkkejä vastaavien kiinteistöjen lämmitystavan muutosmahdollisuuksiin. Kohteisiin harkittavia lämmitysmuotoja olivat pääasiassa kaukolämpö, maalämpö, ilma-vesilämpöpumppu ja ilmalämpöpumppu. Tutkimuksen kulku ja raportin runko noudattelivat Motivan energiakatselmuksen toteutusta.

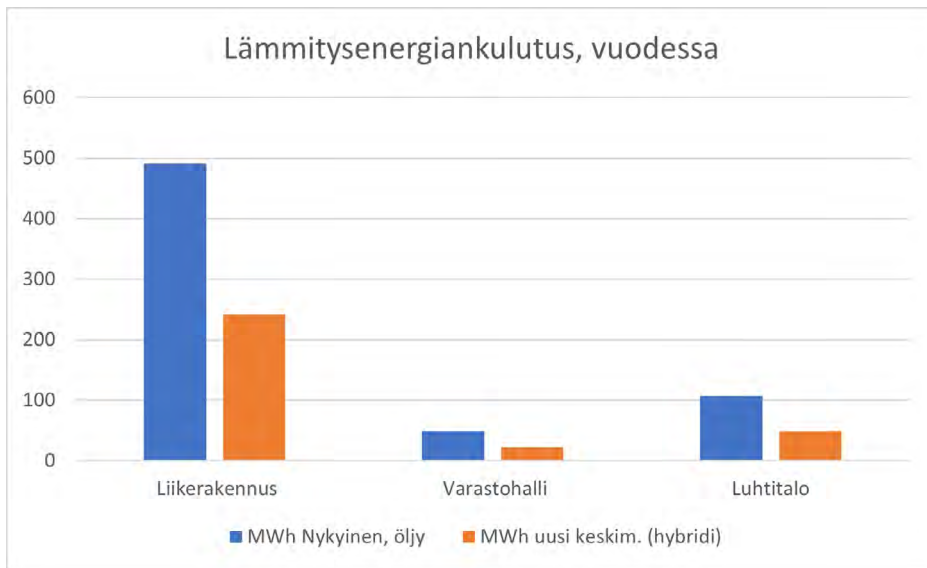
Kunkin kohteen energia- ja kustannuslaskelmissa lähtökohtana olivat toteutuneet tiedot polttoöljyn, sähkön ja käyttöveden kulutuksesta sekä niiden todelliset hankintahinnat. Öljylle käytettyä hintaa oli tosin tarkasteltava useamman vuoden osalta, koska öljyn hinta oli alkuvuonna 2020 poikkeuksellisen alhainen covid-19-pandemian aiheuttaman väliaikaisen hinnan laskun vuoksi.

Laskelmissa polttoöljyn hinta oli kustannusmuuttujista selvästi merkitsevin. Vuoden 2020 alhaisin öljyn hinta verrattuna syksyn 2021 öljyn hintaan tuotti kustannuslaskelmissa lähes kaksinkertaisen investoinnin takaisinmaksuajan. Tavanomaisesti öljylämmityksen korvaavan IVLP-järjestelmän investoinnin takaisinmaksuaika tutkimuksessa oli 4–6 vuotta. Lyhyesti todeten lämpöpumpputeknologiat ja kaukolämpö ovat avustuksien kannalta kannatetuimmat lämmitysmuodot. Yhteen kolmesta tarkastellusta kohteesta kaukolämpö olisi sijainnin ja saavutettavuuden näkökulmasta ollut relevantti vaihtoehto, mutta kokonaiskustannustarkastelussa kaukolämpö ei pärjännyt lämpöpumppuratkaisulle – kaukolämmön

hintakehitys on ollut voimakkaasti kasvavaa noin 15 viime vuoden ajan. Maalämpöpumpuun ja ilma-vesilämpöpumpuun (IVLP) perustuvat teknologiat ovat molemmat toimivia vaihtoehtoja uudisrakennuksiin kuten myös saneerauskohteisiin, mutta maalämpökaivon valintaan vaikuttaa alueella mahdollisesti sijaitseva pohjavesialue. Tarkastelluista kohteistamme kahden todettiin sijaitsevan 1E-luokan pohjavesialueella. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että tarvittavat luvat ovat haettavissa, mutta lupaprosessi on monivaiheinen. Lupahakemus on myös maksullinen, ja on todennäköistä, että maalämpökaivon perustamislupaa ei myönnettäisi ilman erityisiä perusteita, mikäli vaihtoehtoinen tekniikka, esimerkiksi IVLP-järjestelmä, on kohteessa mahdollinen.

Tutkimuksen kolmeen kohteeseen perusteltu lämmitystapa korvaamaan polttoöljyn käyttöä oli ilma-vesilämpöpumpputjärjestelmä. Tämän järjestelmän heikkous maalämpöön nähden on se, että talvikauden kylmimmän pakkasjakson varalle tarvitaan toinen lämmönlähde. Pienehkössä kiinteistössä vaihtoehto voisi olla sähkövastuksen käyttäminen, mutta suuressa kohteessa tarvittava huippulämmitysteho on niin suuri, että tämä ratkaisu vaatisi pääsulakekoon nostamisen. Tästä aiheutuisi sähkön perusmaksun nousu ja toisaalta myös tehomaksu saattaisi nousta riippuen kiinteistön muusta toiminnasta. Toisaalta, jos lähtökohtana on öljylämmitys, lämmitystapamuutoksen yhteydessä mielekäs ja todennäköisesti kustannustehokas vaihtoehto olisi jatkaa olemassa olevan öljylämmitysjärjestelmän käyttöä uuden IVLP-järjestelmän rinnalla. Kylmillä pakkasilla, jolloin IVLP-järjestelmän toiminta-alue ei riitä, lämpö olisi tuotettavissa öljyllä. Laskelmissa IVLP-järjestelmän matalimpana toimintalämpötilana pidettiin konservatiivisesti  $-20$  astetta, vaikka jotkut laitevalmistajat lupaavat lämpöpumpulaitteidensa toimivan kylmemmissäkin olosuhteissa. Laskelmissa oletettiin vanhan öljylämmitysjärjestelmän jäävän huipputehon tarvetta varten ja laskettiin myös vaihtoehto, jossa vanha öljykattila vaihdettaisiin tehokkaaksi öljy-kondenssi-kattilaksi.

Tutkimuksessamme kävi ilmi, että näin myös toimitaan todellisissa lämmitystavan saneerauskohteissa kentällä, koska öljykattilan säilyttäminen on näissä tapauksissa kiinteistönomistajan näkökulmasta arvioitu teknistaloudellisimmaksi vaihtoehdoksi. Kuvassa 4 on kuvattu nykyisen öljylämmityksen ja esitettyjen uusien vaihtoehtojen vaikutusta vuosittaiseen lämmitysenergiankulutukseen. Kuten kuvasta näkyy, eri hybridivaihtoehdoilla lämmitysenergiankulutus puolittuisi nykyisestä. (Lankinen 2021.)



**KUVA 4.** Eri tarkastelukohteiden lämmitysenergiankulutus (MWh) nyt öljylämmityksellä ja esitettyjen muutosten jälkeen (hybridi).

Näin ollen hallituksen avustuksin asettamat ohjausmekanismit eivät yksiselitteisesti johda täysin öljyttömään vaihtoehtoon. Asia voidaan ajatella niinkin, että ”ohjauskeinojen tavoitteiden henki” on aikaansa edellä, koska käytössä olevat lämpöpumpputeknologiat eivät vielä kauttaaltaan kaikissa olosuhteissa ole kattavia yksiselitteisiä vaihtoehtoja. Jos päälämmitysjärjestelmä vaihdetaan esimerkiksi lämpöpumpputeknologiaan, lämmitystapamuutokselle osoitetaan taloudellista avustusta, mutta mikäli vanha öljylämmitysjärjestelmä jää vähäseennkin käyttöön, avustuksen määrää leikataan, vaikka todellisuudessa hiilidioksidipäästöjä on jo onnistuttu laskemaan murto-osaan alkuperäisestä. Suuri hiilidioksidin päästövähennelmä ilmastossa kuitenkin on se tavoite, johon näillä lämmitystavan ohjauskeinoilla pyritään. Kun tavoitteena on luopuminen fossiilisen öljyn lämmityskäytöstä kokonaan nopealla aikataululla, on ymmärrettävää, että ohjauksen on oltava voimakasta.

## YHTEENVETO

Tehdyillä kokeiluilla, nykytilan selvityksillä ja mahdollisuuksien esiin tuomisella päästään taas piiru eteenpäin bio- ja kiertotalouden edistämisessä.

Biosivuvirtamateriaalien muotoilupilotoinneista löytyi kiinnostavia materiaaleja ja muotopuristeisiin pintoja, joita jatkokehittämällä voidaan päästä uusiin kaupallisiin tuotteisiin. Pakkauskonseptin kehittäminen ja pakkauskehityksen tilasta, mahdollisuuksista ja tulokista tiedon jakaminen mahdollistavat biohajoavien pakkausmateriaalien laajemman kiin-



nostuksen ja käytön, jolloin päästään direktiivienkin ohjaamaan suuntaan eli käyttämään pakkauksia, jotka ovat entistä ympäristöystävällisempiä.

Uusiutuvan energian käytön lisääminen siten, että sillä korvataan fossiilisilla polttoaineilla tuotettua lämpöä, edistää hiilineutraalisuustavoitteita. Öljykattiloiden korvaaminen esimerkiksi lämpöpumppuratkaisuilla ja lämmön tuottaminen edes osittain uusiutuvalla energialla osoittautui tarkasteluissa merkittävästi energiatehokkaammaksi ja vähähiiliseksi ratkaisuksi kuin alkuperäinen öljylämmitys. Tehtyjen tarkastelujen perusteella muutos öljylämmityksestä osittainkin toiseen lämmitysmuotoon kannattaa lähes aina taloudellisestikin huolimatta siitä, että suurin julkisin tukitoimin tehtävä ohjaus kohdistuuikin täydelliseen öljystä luopumiseen.

Yhteisesti tehtävä kehittäminen, tiedon kokoaminen ja sen jakaminen luovat jatkuvasti uusia oivalluksia ja mahdollisuuksia, joiden avulla kehitystyötä on hyvä viedä eteenpäin. Niin näissäkin tapauksissa. Kun vielä kansalliseen kehittämiseen saadaan mukaan kansainvälisten toimijoiden ryhmä, koossa on verkosto, joka mahdollistaa suurten kokonaisuuksien kehittymisen.

## LÄHTEET

ARA s.a. Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus. WWW-dokumentti. Avustus kunnille öljylämmityksestä luopumiseen. Saatavissa: [https://www.ara.fi/fi-FI/Lainat\\_ ja \\_avustukset/Avustus\\_kunnille\\_oljylammituksesta\\_luopumiseen](https://www.ara.fi/fi-FI/Lainat_ ja _avustukset/Avustus_kunnille_oljylammituksesta_luopumiseen) [viitattu 7.9.2021]

ELY-keskus s.a. WWW-dokumentti. Avustus pientalon öljylämmityksestä luopumiseksi. Saatavissa: <https://www.ely-keskus.fi/oljylammituksen-vaihtajalle> [viitattu 7.9.2021]

Euroopan unioni. 2019. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2019/904 – tiettyjen muovituotteiden ympäristövaikutuksen vähentämisestä. Pdf. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L0904&from=FI> [viitattu 7.9.2021]

Lankinen, V. 2021. Lämmitystapamuutosraportit kohteista. Ei vapaasti saatavilla.

Valtioneuvosto s.a. Marinin hallitus, hallitusohjelma. WWW-dokumentti. Suomella on hyvät mahdollisuudet kestäväen kehityksen mukaiseen ekologiseen jälleenrakentamiseen. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/marinin-hallitus/hallitusohjelma/hiilineutraali-ja-luonnon-monimuotoisuuden-turvaava-suomi> [viitattu 29.6.2021]

# TEKSTIILIMATERIAALIEN KIERRÄTYS HIENONTAMALLA

Anne Gango & Eveliina Kuokkanen

Euroopan unionissa on päätetty, että tekstiilijätteen kerääminen muuttuu pakolliseksi vuoteen 2025 mennessä. Tämän päätöksen vuoksi on tullut entistä ajankohtaisemmaksi tutkia tekstiilien kierrätystä ja niiden kierrätettävyyttä sekä rakentaa uusia tekstiilienkäsittelylaitoksia. BIOKE – Haastavien materiaalien tutkimus ja kierrätyksen edistäminen BioSammossa -hankkeessa tutkitaan erilaisten teollisuuden sivuvirtojen ja kierrätysyritysten materiaalien hyödyntämistä hienontamalla. Hankkeen aikana on tutkittu muun muassa lasin, tiilen ja tekstiilien kierrättämistä ja tarkasteltu hienontamisen tuomia etuja uudelleenkäytön kannalta.

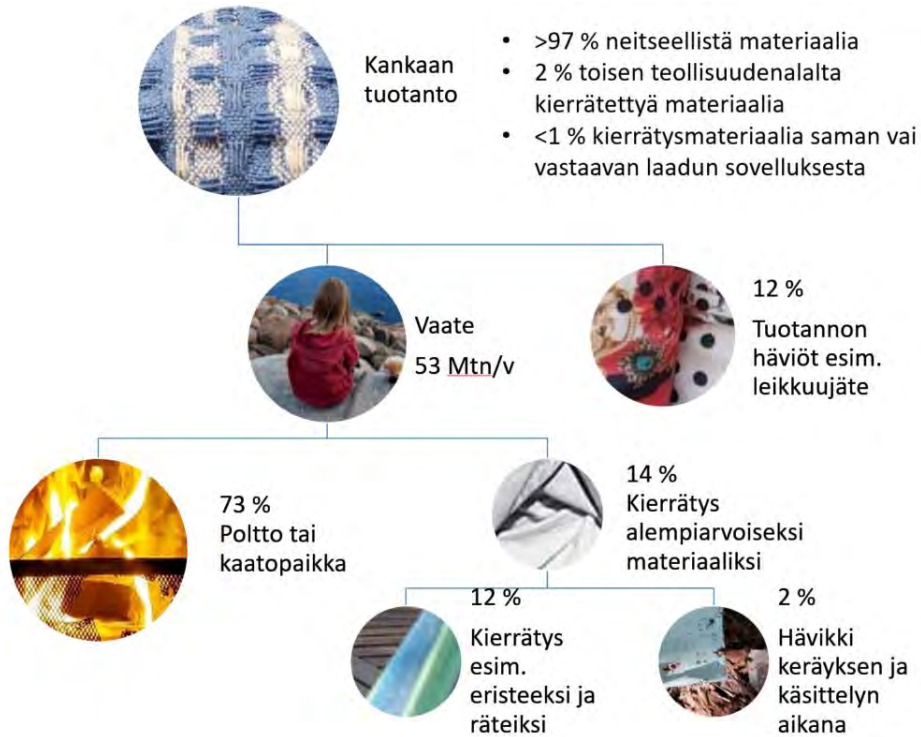
BIOKE-hankkeessa on hienonnettu käsittelemätöntä ja pestyä puuvillakangasta leikkuumyllyllä. Käsittelemättömän kankaan tutkimukset vastaavat vaatteiden valmistuksessa syntyvän materiaalin, esimerkiksi leikkuujätteen, huppioiden, materiaalivirheiden ja pakkojen loppujen, kierrätyksen tarpeisiin. Yleisesti arvioidaan, että noin 15 prosenttia kankaasta menee hävikkiin jo tuotteen valmistuksen aikana. Pestyn kankaan hienontamisen kautta tutkitaan jo valmiin ja käytetyn tekstiilituotteen kierrätettävyyttä ja sen edistämistä. Ensimmäisten hienonnuskokeiden perusteella leikkuumylly soveltuu puuvillakankaan käsittelyyn, joskin menetelmä vaatii lisätutkimusta ja jatkokehittämistä.

Hienontamiskokeet ovat osa BIOKE – Haastavien materiaalien tutkimus ja kierrätyksen edistäminen BioSammossa -hanketta, jonka päärahoittajana toimii Kymenlaakson liitto ja päärahoituslähteenä Euroopan aluekehitysrahasto (EAKR). Lisäksi hanketta rahoittaa Xamk ja Umacon Oy. Hankkeen kesto on 1.1.2020–31.8.2022. Hankkeeseen liittyy BIOKE-investoinnit-rinnakkaishanke, jossa hankitaan hienontamistutkimusta edistäviä ja avustavia laitteita, kuten partikkelikokoanalysointilaitteita, seulakoneita ja eri hienonnuksilaitteita. Myös rinnakkaishankkeen päärahoittajana toimii Kymenlaakson liitto ja päärahoituslähteenä Euroopan aluekehitysrahasto (EAKR).

## TEKSTIILIJÄTTEEN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSIA

Viimeisten vuosikymmenien aikana vaatteiden käyttökerrat ovat laskeneet huomattavasti, samoin tutkimuksissa on todettu ihmisten omistavan enemmän vaatteita kuin he tarvitsevat. Nämä seikat vaikuttavat osaltaan vaatteiden ja ylipäänsä tekstiilien kierrätystarpeeseen ja kierrätettävien tekstiilien määrään. Seuraavassa kuvassa on esitettynä vaatteiden globaali

materiaalivirta vuodelta 2015. Kuvan laatimisessa hyödynnettyjen tietojen mukaan alle yksi prosentti vaatteiden valmistuksessa käytetystä materiaalista kierrätetään uudeksi vaatteeksi ja vain 13 prosenttia materiaaleista ylipäänsä kierrätetään (Ellen MacArthur Foundation 2017, 20).



**KUVA 1.** Vaatteiden valmistuksen materiaalivirtoja ja kierrätysasteita (Mukaiillen Ellen MacArthur Foundation 2017, 20).

Vaatetuksen arvioidaan aiheuttavan Euroopan unionin alueen ympäristövaikutuksista 2–10 prosenttia riippuen tarkasteltavasta vaikutuksesta. Kyseiset ympäristövaikutukset kohdistuvat pääosin kolmansiin, vaatteita tuottaviin maihin. Tekstiileissä käytettävien raaka-aineiden tuotanto ja kuitujen värjäys vaativat suuria määriä vettä, energiaa sekä lukuisten, jopa 2 000:n eri kemikaalin käyttöä. Tekstiili- ja vaateusteollisuuden on arvioitu vuonna 2015 kuluttaneen vettä 79 miljardia kuutiometriä, tuottaneen 1,7 miljardia tonnia CO<sub>2</sub>-päästöjä ja 92 miljoonaa tonnia jätettä. Näiden määrien ennustetaan olevan edelleen kasvussa. (Šajn 2019, 3) Tekstiiliteollisuuden aiheuttamiin ympäristövaikutuksiin voidaan vaikuttaa monella tavalla, esimerkiksi kuluttajien tietoisuuden lisäämisellä ja ostokäyttäytymiseen vaikuttamalla, tekstiilien valmistuksessa resurssien optimoinnilla ja jätteen määrän vähentämisellä, tekstiilituotteiden muutoksella sekä uudelleenkäytön ja kierrätyksen lisäämisellä.

## TEKSTIILIMATERIAALIEN KIERRÄTTÄMINEN

Tekstiilejä on kierrätetty jo vuosisatoja. Jo yli 2 000 vuoden takaa Kiinasta on löytynyt tietoja käytettyjen vaatteiden kierrätyksestä kuidutuksen jälkeen neitseellisten kuitujen kanssa uudeksi langaksi ja sitä kautta vaatteeksi. Euroopassa Napoleonin sotien aikaan oli puutetta sotilasunivormuissa käytettävästä villasta, ja puutteen vuoksi ihmisiltä kerättiin käytettyjä vaatteita kierrätettäväksi. Suomessa vaatteet ja kankaat menivät kortille talvisodan aikana, kun puuvillaa ja villaa ei tuotu Suomeen vuosina 1942–1945. Raaka-ainepulaa korvaamaan kerättiin lumppuja ja hiuksia sekä hyödynnettiin uusia raaka-aineita, kuten sellupohjaisia kuituja (kuva 2). (Perälä 2006) Vaikka tekstiilimateriaalien kierrätys on kehittynyt vuosien saatossa, ei valmista kierrätysjärjestelmää vielä ole.



**KUVA 2.** Lumppujen lajittelijat työssään (kuvaaja Pekka Kyytinen, Kansatieteen kuvakokoelma, Pekka Kyytisen kokoelma, Museovirasto).

Euroopan unionissa pyritään nostamaan tekstiilien kierrätysastetta erilliskeräämisen avulla. Parkkisen (2020) mukaan Suomen vuotuinen tekstiilijättemäärä on 70–100 miljoonaa kiloa. Viidesosa tekstiilijätteestä kierrätetään, loput poltetaan, joten jo pelkästään Suomen tasolla on selvä tarve tekstiilijätteen kierrätysasteen nostamiselle.

Jotta EU:n päätös tekstiilijätteen erilliskeräämisestä toisi suunnitellun muutoksen alalle, on lähdetty enenevässä määrin tutkimaan kyseisten materiaalien kierrättämistä. Oman haasteensa kierrätykselle tuo tekstiilimateriaalien heterogeenisuus. Tekstiilejä valmistetaan

monista eri luonnonmateriaaleista, kuten luonnonkuidusta ja luonnon selluloosasta sekä synteettisistä tekokuiduista. Valmistusmateriaalin lisäksi tekstiileissä voi olla erilaisia funktionaalisuutta lisääviä osia, kuten vetoketjuja, neppareita ja nappeja. Yksittäisessä vaatteessa voi olla myös sekoitettuna eri raaka-ainepohjaisia materiaaleja, ja esimerkiksi takeissa voi olla päälliskankaan lisäksi vuori, eristemateriaali ja vedenpitävyyttä lisäävä kalvo sekä nappeja, nyörejä ja vetoketjuja.

## EUROOPAN UNIONIN JÄTEHIERARKIA JA SEN VAIKUTUKSET TEKSTIILIEN KIERRÄTTÄMISEEN

Euroopan unionin jätedirektiivissä on määritelty jätehierarkia, jonka tarkoitus on edistää luonnonvarojen järkevää käyttöä, vähentää jätteen määrää ja haitallisuutta sekä edistää materiaalien kierrätystä ja sitä kautta jätteistä aiheutuvia haittoja. Jätehierarkian ensimmäisellä portaalla on jätteen synnyn ehkäiseminen. Toimia, joilla jätettä voidaan vähentää, ovat esimerkiksi vaikuttaminen ihmisten ostokäyttäytymiseen niin, että huomioidaan tehtävän hankinnan tarve sekä tuotteen valmistustapa, ympäristöystävällisyys ja kierrätettävyyden. Jätehierarkian ensimmäisen portaan toimiin kuuluu myös erilaiset vaatteiden huoltotoimet ja korjaukset, joilla voidaan yksittäisen vaateen elinkaarta jatkaa. Vaatteita voidaan myös ”tuunata” eli muokata erinäköisiksi. Yleistyneet vaatelainaamot ovat myös yksi esimerkki siitä, miten jakamistalouden kautta voidaan edistää kiertotalouden periaatteita, pidentää vaatteiden käyttöaikaa ja vähentää kulutusta.

Jätehierarkian toinen porras on uudelleenkäyttö. Tämä porras näkyy vaatteiden osalta esimerkiksi kierrätyksessä sellaisenaan erilaisten kirpputorien ja nettikauppapaikkojen kautta tai antamalla käytettyjä vaatteita ystäväpiirille. Tässäkin portaassa vaatteiden tuunaus on yksi tapa ottaa materiaali uusiokäyttöön. Verkossa on lukuisia esimerkkejä, miten tekstiilejä voi hyödyntää uusissa käyttökohteissa. Esimerkkinä tästä on ovistopparin tai lehtikorin tekeminen vanhasta lakanasta. Aina vaatteita tai muita tekstiileitä ei voida sellaisenaan käyttää uudelleen, jolloin niiden kierrättäminen pitää hoitaa muulla tavalla. Kierrätys onkin jätehierarkiassa kolmantena portaana. Kierrätyksen kautta poistettavan tuotteen materiaalit saadaan uuden tuotteen valmistuksen raaka-aineeksi. Neljännessä portaassa materiaali hyödynnetään muussa käytössä, lähinnä poltossa tai soveltuvin osin kompostoinnissa ja bioenergian valmistuksessa (Dahlbo ym. 2015, 34). Viides ja alin porras on jätteen loppukäsittely eli sen vieminen kaatopaikalle.

EU:n jätehierarkian kolmannen portaan mukaisesti tekstiileitä voidaan kierrättää monella tavalla, jotka mahdollistavat tekstiilien uusiokäytön joko tekstiiliteollisuuden tai toisen teollisuudenalan materiaalina. Menetelmät voidaan luokitella mekaaniseen kierrätykseen, kemialliseen kierrätykseen, termiseen kierrätykseen sekä eri menetelmien yhdistelmään. Edellä mainituista menetelmistä mekaaninen kierrättäminen on käytetyin tekstiilien kierrätystapa. Mekaaniseen kierrätykseen kelpaavat sekä ehjät että rikkiäiset tekstiilit,

joiden valmistusmateriaalina voi olla teko- ja luonnonkuituja. Mekaanisessa kierrätyksessä tekstiilin kuitujen rakenteen on havaittu kärsivän, mikä huonontaa kierrätysmateriaalin laatua. Perinteisesti mekaanisesti kierrätetyt tekstiilit uusiokäytetään alkuperäistä ”alempiarvoisissa” tuotteissa, kuten eristemateriaaleissa, räiteissä ja patjojen täytteenä (Šajn 2019, 5). Kemiallisessa kierrätyksessä tekstiileissä olevat kuidut erotellaan toisistaan kemikaalien avulla, jolloin ne saadaan uusien tuotteiden valmistuksessa tarvittavaan muotoon tai kuidut menettävät rakenteensa. Tämän jälkeen massa voidaan valmistaa uudelleen kuiduiksi. Termisessä kierrätyksessä synteettisistä tekokuiduista valmistettujen tekstiilien kuidut sulatetaan lämmön avulla. Saatua materiaalia voidaan hyödyntää esimerkiksi muovi- ja komposiittituotteiden valmistuksessa.

## HIONTAMINEN KIERRÄTYSMENETELMÄNÄ

Mekaaninen kierrätys soveltuu eri tavoilla valmistetuille tekstiileille samoin kuin eri teko- ja luonnonkuiduista valmistetuille tuotteille. Ennen tekstiilimateriaalin hienontamista se voidaan lajitella kankaan tekotavan, värin ja kuidun koostumuksen mukaisesti. Mitä homogeenisempaa kierrätettävä materiaali eräkohtaisesti on, sitä yksinkertaisempaa ja kannattavampaa sen kierrättäminen ja jatko- ja hyödyntäminen on. Kierrätetystä materiaalista tehtäville tuotteille toivotaan yleensä tuotteeseen haluttuja ominaisuuksia, jolloin raaka-aineen homogeenisuus on tärkeää laadun kannalta. Joissain kierrätystuotteissa tosin käytetään tarkoituksella epähomogeenista raaka-ainepohjaa, jotta lopputuotteelle saadaan rosainen, kierrätetyn näköinen ulkoasu. Kierrätysmateriaalin raaka-aine vaikuttaa sen tulevan käyttösovelluksen lisäksi kierrätysmenetelmän valintaan ja kierrätyslaitoksen prosesseissa käytettäviin säätöarvoihin.

Tekstiilejä kierrätettäessä lajittelun jälkeen materiaali rikotaan kuiduiksi mekaanisten prosessien, kuten leikkaamisen, silppuamisen ja karstaamisen, avulla. Leikkaaminen voidaan tehdä erilaisilla hienonnuslaitteilla, kuten giljotiinileikkurilla tai vasaramyllyllä, jotka tekevät tekstiilimateriaaleista silppua. Leikkaamisen jälkeen tekstiilisolpu revitään irrallisiksi kuiduiksi. Prosessoinnin jälkeen kuidut ovat valmiina käytettäväksi langan, kuitukankaan tai vaihtoehtoisesti kierrätyskeräimen valmistuksessa. Mekaaniset prosessit samoin kuin vaatteiden käyttö ja pesu huonontavat kuidun laatua, joten neitseellistä kuitua voidaan lisätä kierrätyskuitujen sekaan parantamaan valmiin tuotteen ominaisuuksia. Mekaanisessa kuitutuksessa muodostuu lämpöä ja kuitujen välistä kitkaa, jotka johtavat synteettisten kuitujen sulamiseen ja selluloosapohjaisten huonontumiseen. Mekaanisessa hienontamisessa tekstiilin sekaan on joissain tutkimuksissa lisätty 0,1–0,5 m-% voiteluainetta, jonka avulla hienontamisessa syntyvää kitkaa on saatu pienennettyä ja siten parannettua kierrätetyn kuidun pituutta. (Lindström ym. 2019)

Mekaanisen kierrätyksen avulla voidaan saada käytöstä poistettujen tekstiilien kuidut talteen. Yhtenä suurimmista eduista tekstiilien mekaanisessa kierrätyksessä on minimissä oleva



värjäyskemikaalien tarve, koska kuiduissa on yhä niiden alkuperäisessä tekstiilissä käytetty väri. Muita etuja ovat prosessoinnin edullisuus, alhainen energiantarve ja soveltuvuus eri raaka-ainepohjaisille tekstiileille.

## PUUVILLAKANKAIDEN HIONNUSKOKHEET LEIKKUUMYLLYLLÄ BIOSAMMOSSA

Bio- ja kiertotalouden tutkimuskeskus BioSampoon saatiin toukokuussa 2021 Retsch-in SM300 -leikkuumylly (kuva 3). Leikkuumylly hankittiin yhteishankintana BIOKE-investoinnit- ja BUT-hankkeissa (BUT – Biotalous uudet tuulet -hanke). Tekstiili oli yksi materiaaleista, joita leikkuumyllyllä haluttiin hiontaa, ja ensimmäiset tekstiiliin hionnuskokeet päätettiin toteuttaa puuvillakankaalla. Tekstiilin hiontaminen leikkuumyllyllä demonstroi tekstiilijätteen mekaanista kierrättämistä, ja koe oli osa BIOKE-hankkeen toimenpiteitä.



**KUVA 3.** Leikkuumylly SM300 bio- ja kiertotalouden tutkimuskeskus BioSammossa. (Kuva Eveliina Kuokkanen)



SM300-leikkuumyllyä voidaan käyttää materiaaleille, jotka ovat esimerkiksi pehmeitä, elastisia ja kuitumaisia. Myllyssä on kerralla kiinni yksi roottori, joita on kolmea erilaista: samansuuntaisen teräosan roottori, 6-levyroottori ja V-roottori. Roottorin alapuolella sijaitsee pohjaseula, jonka reikien koko vaikuttaa materiaalin loppuhienouuteen. Seuloja on eri kokoluokissa, ja reikien koko on 0,25–20 mm. Leikkuumyllyyn on mahdollista kiinnittää sykloni hienonnustuloksen optimoimiseksi, ja sitä suositellaan käytettäväksi esimerkiksi kevyille materiaaleille. (Retsch 2021)

BioSammon leikkuumyllyssä on käytettävissä kaksi roottoria, kolmen samansuuntaisen teräosan roottori ja 6-levyroottori, neljä pohjaseulaa (0,25, 2,00, 4,00 ja 20,00 mm) ja sykloni. Lisäksi sykloni tarvitsee toimiakseen imurin. Puuvillakankaan hienontamisajoihin valittiin 6-levyroottori ja 2,00 mm:n pohjaseula. Ajoissa hyödynnettiin syklonia helpottamaan materiaalin poistumista roottoriosasta. Ajot suoritettiin kesäkuussa 2021.

Hienonnettavaa puuvillakangasta oli kahta erilaista: valkoista ja kirjavaa. Molempia kankaita hienonnettiin sekä pestynä että pesemättömänä. Ennen ajoja kankaista leikattiin noin 3 cm:n kokoisia neliöitä, ja materiaalmäärä yhdessä ajossa oli noin viisi grammaa.

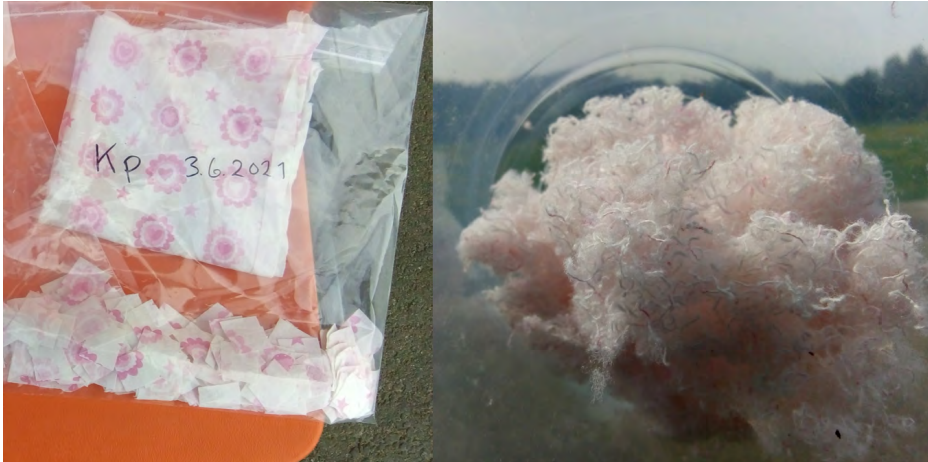
Ensimmäisissä tekstiilihienonnuskokeissa käytettiin leikkuumyllyn roottoria täysillä kierroksilla (3 000 rpm). Alhaisilla kierrosnopeuksilla on mahdollista, että roottori menee jumiin hienonnettavasta materiaalista. Tämä haluttiin estää hienontamalla materiaalia käyttäen roottoria maksimikierronnopeuksilla.

Taulukossa 1 on esitetty ajojen tulokset. Tuloksista voi nähdä, että hienonnettavaa materiaalia päätyi syklonin apuna käytettävän imurin pölypussiin asti, sillä hienonnuksen jälkeen materiaalia oli tallella 52,0–68,1 prosenttia.

**TAULUKKO 1.** Puuvillakankaan hienonnuksajojen tulokset.

Lyhenne	Selite	Hienonnettava määrä (g)	Tallella hienonnuksen jälkeen (g)	Tallella hienonnuksen jälkeen (%)
VA	valkoinen, alkuperäinen, pesemätön kangas	5,06	2,68	53,0
VP	valkoinen, pesty kangas	4,96	3,38	68,1
KA	kirjava kangas, alkuperäinen, pesemätön kangas	5,01	3,34	66,7
KP	kirjava, pesty kangas	5,10	2,65	52,0

Puuvillakankaan hienontaminen leikkuumyllyllä onnistui odotusten mukaisesti, ja hienonustulos koostui langanpätkistä ja kankaan hienommasta aineksesta. Kuvassa 4 on esitetty kirjavaa kangasta ennen leikkuumyllykäsittelyä (vasemmalla) ja samaa kangasta käsittelyn jälkeen (oikealla). Hienonnetun materiaalin joukossa voi nähdä langanpätkiä ja hienompaa kangasmateriaalia.



**KUVA 4.** Vasemmalla kuva kirjavasta kangasta ja oikealla kuva samasta kangasta hienonnettuna (Kuvat Eveliina Kuokkanen).

Pesemättömien ja pestyjen kankaiden välillä ei voitu silmämääräisessä tarkastelussa nähdä eroja hienonustuloksessa. Jatkossa onkin tarkoitus tehdä koeajoja myös selvästi kuluneilla kankailla, jotka samalla paremmin edustavat käytettyä, kulunutta tekstiilijätettä. Näin voidaan paremmin arvioida kankaan kuluneisuusasteen merkitystä hienonustulokselle ja hienontamisprosessille. Nyt hienonnetut puuvillakankaat edustavat parhaiten muun muassa uuden kankaan leikkuujätettä.

Hienonnuksen aikana liian suuri osa materiaalista päätyi syklonin alapuolella olevan keruustian sijaan syklonissa käytettävän imurin pölypussiin, ja tätä materiaalin menetystä on jatkossa tarkasteltava. BioSammossa olevaan leikkuumyllyyn on jo kehitetty isompi sykloni ja keruustia, joiden vaikutusta materiaalmäärän menetykseen voidaan jatkossa arvioida.

## LOPUKSI

Puuvillakankaiden hienonuskokeet leikkuumyllyllä BioSammossa demonstroivat tekstiilijätteen mekaanista kierrätystä, joka on EU:n jätehierarkian kolmannella tasolla. Vielä tarvitaan paljon tutkimusta, jotta voidaan todeta leikkuumyllyn ja sillä hienonnetun kankaan mahdollisuudet tekstiilien kierrättämisessä. Tutkimus on toivottavaa, sillä tekstiilijätettä kertyy maailmalla huomattavia määriä, ja tämä vaikuttaa niin ympäristön puhtauteen, resurssien käyttöön kuin ihmisten terveyteen. BIOKE-hankkeessa ja BioSammossa tutkimus erilaisten materiaalien ja hienontamisen ympärillä jatkuu sopivien kiertotalousratkaisujen löytämiseksi.

## LÄHTEET

Dahlbo, H., Aalto, K., Salmenperä, H., Eskelinen, H., Pennanen, J., Sippola, K. & Huopainen M. 2015. Tekstiilien uudelleenkäytön ja tekstiilijätteen kierrätyksen tehostaminen Suomessa. Suomen ympäristö 4/2015. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/155612/SY\\_4\\_2015.pdf](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/155612/SY_4_2015.pdf) [viitattu 21.4.2021].

Ellen MacArthur Foundation. 2017. A new textiles economy: Redesigning fashion's future. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications> [viitattu 21.4.2021].

Lindström, K., Sjöblom, T., Persson, A. & Kadi, N., 2019. Decreasing Inter-Fiber Friction with Lubricants for Efficient Mechanical Recycling of Textiles. AUTEX2019 – 19<sup>th</sup> World Textile Conference on Textiles at the Crossroads, 11.–15.6.2019, Ghent, Belgia. Julkaisu.

Parkkinen, M. 2020. Suomalainen kuluttaa 13-18 kiloa tekstiilejä vuodessa – Tekstiilijäte on globaali ongelma, jonka ratkaisu vaatii asennemuutosta. *Apu* 18.12.2020. Saatavissa: <https://www.apu.fi/artikkelit/tekstiilijate-suomalainen-kuluttaa-13-18-kiloa-vuodessa> [viitattu 2.8.2021].

Perälä, R. 2006. Hiuksetkin talteen Suomen hyväksi. Yle 8.11.2006, päivitetty 5.10.2016. Saatavissa: <https://yle.fi/aihe/artikkeli/2006/11/08/hiuksetkin-talteen-suomen-hyvaksi> [viitattu 29.4.2021].

Retsch. 2021. Cutting mill SM 300. WWW-dokumentti. Saatavissa: [Cutting Mill SM 300 - excellence for tough jobs - Retsch](#) [viitattu 14.5.2021].

Šajn, N. 2019. Environmental impact of the textile and clothing industry: What consumers need to know. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/633143/EPRS\\_BRI\(2019\)633143\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/633143/EPRS_BRI(2019)633143_EN.pdf) [viitattu 16.4.2021].

# BETONIN HIILIDIOKSIDIKOVETUS

Elli Tykkä & Tiina Kaprio & Hanna-Kaisa Koponen

Betonin hiilidioksidikovetuksen mahdollisuuksiin tutustuva hanke BECO pyrkii edistämään betonirakentamisen vähähiilisyden kehittymistä. Hanke perustuu hiilidioksidikovetusprosessin pilotoinnista saataville tuloksille. Hankkeessa tutkitaan erilaisia toimintamalleja betonin valmistuksen ja hiilidioksidialtistuksen osalta ja testataan kovettuneesta betonista sen ominaisuuksia käytössä olevien menetelmien mukaisesti. Tarkoituksena on kehittää prosessia ja siihen vaadittavaa kalustoa ja tarjota betoniteollisuudelle tietoa hiilidioksidikovetuksen mahdollisuuksista. Hankkeen aikaiset laboratoriokokeet on suunniteltu tehtäväksi perustuen jo olemassa oleviin tutkimuksiin ja prosessia kehitetään koko hankkeen ajan. Tutkimuksesta saadut tulokset ovat vasta suuntaa antavia, ja lisätutkimuksia tarvitaan luotettavien johtopäätösten tekemiseen. Tuloksena toivotaan käyttökelpoisia tutkimustuloksia, jotka osaltaan edistäisivät matkaa kohti hiilineutraalimpaa yhteiskuntaa. Hanketta rahoittaa Euroopan aluekehitysrahasto.

## JOHDANTO

Betoni on Suomessa ja maailmalla eniten käytetty rakennusmateriaali. Betonia käytetään monipuolisesti sekä rakennuksissa että infrarakentamisessa, sillä sen ominaisuudet ovat helposti muunneltavia. Betonin tärkein raaka-aine on sementti. Sementin keskeiset ilmastovaikutukset ovat klinkkerinpolton vaatima energiankäyttö ja polton seurauksena kemiallisesti vapautuva hiilidioksidi.

BECO-hankkeen tavoitteena on edistää rakennetun ympäristön ja erityisesti betonirakentamisen vähähiilisyden kehittymistä. Hankkeessa pilotoidaan betonin hiilidioksidikovetusprosessia, jossa betoni altistetaan hiilidioksidikaasulle joko massan sekoitus- tai kovettumisvaiheessa. Sopivissa prosessiolosuhteissa hiilidioksidi sitoutuu betoniin muokaten syntyviä reaktiotuotteita sekä muodostuvan betonin ominaisuuksia. Hankkeessa tunnistetaan hiilidioksidikovettumisen prosessivaatimuksia, etuja ja haittoja sekä verrataan muodostuneen betonin ominaisuuksia perinteisesti kovetettuun betoniin. Lisäksi tarkastellaan prosessin soveltuvuutta alueen valmisbetoni- ja betonielementtituotannon tarpeisiin. Mäkikourin ym. tutkimuksen (2021, 22) mukaan hiilidioksidikovetusta on toteuttamiskelpoisinta käyttää betonielementtituotteissa, koska tuotteet on mahdollista sulkea hiilidioksidipitoiseen ympäristöön.

Hankkeen tuloksena saadaan tietoa ja osaamista betonin hiilidioksidikovetusprosessin toimivuudesta, toteutettavuudesta sekä vaikutuksista muodostuvan betonin ominaisuuksiin

ja tuotteiden hiilijalanjälkeen. Hanke pyrkii edistämään sekä Suomen että Kymenlaakson hiilineutraalisuustavoitteiden saavuttamista.

## HIILIDIOKSIDIN VAIKUTUS BETONIN OMINAISUUKSIIN

Kun ilman hiilidioksidi reagoi betonin kanssa, reaktiotuotteena syntyy kalsiumkarbonaattia, jolloin puhutaan betonin karbonatisoitumisesta. Betoni on luonnostaan emäksistä. Sen pH on 13–14, ja vahva emäksisyys suojaa betonin raudoitusta korroosiolta. Hiilidioksidi aiheuttaa pH:n laskua ja siten betoniraudoituksen ruostumista. Turvallisena pH-tasona betoniraudoituksen suojaamiseksi on pidetty arviolta korkeampaa pH:ta kuin 9,5 (Mäkikouri ym. 2021, 5). Karbonatisoituminen laskee betonin pH:n noin yhdeksään, mikä asettaa omat haasteensa raudoitteiden käytölle.

Karbonatisoitumisella on myös positiivisia vaikutuksia. Se voi kasvattaa betonin puristus- ja vetolujuutta. Karbonatisoitunut betoni toimii mahdollisena nieluna ilmakehän hiilidioksidille. (Mäkikouri ym. 2021, 4.) Zhangin ym. tutkimuksessa (2017) kerrotaan, että kun hiilidioksidin talteenottoaste on kahdeksan prosenttia, voi sementtipasta kehittää lujuutta 40 prosenttia enemmän kuin normaalisti hydratoitunut pasta. Edelleen tutkimuksen mukaan nopea lujuuden saavuttaminen Portland-sementillä saa aikaan hiilidioksidikövetettujen tuotteiden korkeamman tuotantotehokkuuden.

Hiilidioksidikövetusprosessissa tavoitteena on saada hiilidioksidi sitoutumaan betoniin hallitusti. Karbonatisoitumisreaktion seurauksena betonin huokosiin muodostuu nanokoisia kalsiumkarbonaattipartikkeleita, joiden on raportoitu sopivassa määrin käytettynä parantavan muun muassa taivutus- ja puristuslujuutta. (Hakamy 2021) Mohdin ym. tutkimuksen (2018, 4413) mukaan jatkuva hiilidioksidin syöttö osoittautui teknisesti tehokkaaksi ja käytännössä mahdolliseksi betonituotannossa, jossa käytetään hiilidioksidikövetusta.

## LABORATORIOKOKKEET

Hankkeessa suoritettavien laboratorioskokeiden tarkoitus on tuottaa tietoa hiilidioksidialtistuksen vaikutuksesta betonin ominaisuuksiin ja betonin kyvystä sitoa hiilidioksidia itseensä. Hankkeen aikana testataan betonin lujuus- ja pakkasenkesto-ominaisuuksia ja lisäksi kovettunutta betonia tarkastellaan mikroskoopilla. Laboratorioskokeita jatketaan ja kehitetään hankkeen ajan.

Laboratorioskokeissa koekappaleiksi valmistetaan 100 mm:n betonikuutioita. Betonin valamisessa käytetään öljyntyjä muovimuotteja. Muotit varastoidaan ja puretaan standardin SFS-EN 12390-2 mukaisesti vuorokauden kuluttua valusta, jonka jälkeen koekappaleet siirretään olosuhdesäilytykseen. Koekappaleita säilytetään altistuksen jälkeen 20 (± 2) °C:n lämpöisessä vedessä testaukseen saakka. Jokaisen testierän koekappaleet testataan

samanikäisenä, jotta testaustulosten vertailu keskenään on mielekästä. Luotettavuuden lisäämiseksi testattavia koekappaleita valmistetaan useita, jotka ovat keskenään samalla tavalla altistettuja ja säilytettyjä.

## HIILIDIOKSIDIALTISTUS

Koekappaleita altistetaan hiilidioksidille yhdestä kolmeen vuorokautta, ja se toteutetaan joko muovilaatikossa tai painesäiliössä. Tämän jälkeen hiilidioksidille altistetut koekappaleet siirretään vesisäilytykseen. Muovilaatikkoon syötetyn hiilidioksidin pitoisuutta ei ole vielä monitoroitu, koska altistukseen käytetty muovilaatikko ei ole kaasutiivis. Tarkan hiilidioksidipitoisuuden tuottaminen ja määrittäminen vaatii laitteiston kehittämistä, mikä on yksi hankkeen toimenpiteistä.

Aiempien tutkimusten mukaan hiilidioksidin syöttö paineessa on osoittautunut tehokkaammaksi kuin pelkkä altistaminen ilman painetta. Karbonatisoitumisreaktiossa muodostuva kalsiumkarbonaatti on lähes inertti, mutta paineen avulla siitä saadaan liukoinen ja tätä myötä reaktiivinen (Kärki ym. s.a. 9). Paineen aikaansaamiseksi hankittiin alustavia tutkimuksia varten maaliruisäiliö, johon saadaan aikaiseksi stabiili kahden barin paine. Jo ensimmäisten testausten perusteella huomattiin, että paine on tutkimuksen kannalta merkittävä muuttuja. Hankkeen aikana on tarkoitus tutkia asiaa laajemmin ja laitteistoa pyritään kehittämään myös betonituotannon tarpeisiin soveltuvammaksi.

Laboratoriokokeista pyritään saamaan mahdollisimman toistettavia. Tämä varmistetaan valmistamalla koekappaleet ja suorittamalla testaukset aina kyseessä olevien standardien mukaisesti. Jotta löydettäisiin optimaalisimmat muuttujat hiilidioksidialtistuksen suhteen, altistuksen kesto ja tekotapaa varioidaan. Jokaisesta testattavasta betonierästä tehdään myös referenssikappaleet, jotta hiilidioksidin vaikutuksen vertailu olisi luotettavaa.

## KARBONATISOITUMISEN MÄÄRITTÄMINEN

Karbonatisoitumisen eteneminen määritetään indikaattorina toimivan fenoliftaleiiniliuoksen avulla. Liuos sumutetaan rakenteesta irrotetun kappaleen pinnalle tai koekappaleen halkaistulle poikkileikkauspinnalle, ja emäksisellä pinnalla se värjäytyy purppuraiseksi (kuva 1). Betonin pintaosia, joihin on jo muodostunut neutraalimpaa kalsiumkarbonaattia, indikaattoriliuos ei värjää. Karbonatisoitumisrintama etenee betonin ulkopinnasta sisään päin altistumisen jatkuessa.



**KUVA 1.** Rakenteesta irrotettuja betonilieriöitä, joiden pinta on värjätty fenoliftaleiini-liuoksella (kuva Matti Havuaho).

## TULOKSET

Hankkeessa testatuista koekappaleista määritetään tiheys, puristuslujuus, karbonatisoitumisvyvyys sekä betonin pH karbonatisoitumisrintamalla ja sen sisäpuolella.

## PURISTUSLUJUUS

Tutkituilla altistusolosuhteilla ei ole havaittu olevan merkittävää vaikutusta puristuslujuuteen. Kirjallisuusselvityksen perusteella oli odotettavissa, että betonin varhaislujuus kehittyisi hiilidioksidin ansiosta nopeammin. Tätä ei kuitenkaan ole tämän hankkeen tutkimuksessa todettu. Suurin syy siihen on standardin mukainen kovettumisaika ennen muottien purkamista. Koekappaleen tulee kovettua muotissaan vähintään 16 tuntia, kun useissa aiemmin tehdyissä tutkimuksissa koekappaleet on kuormitettu jo jopa neljän tunnin



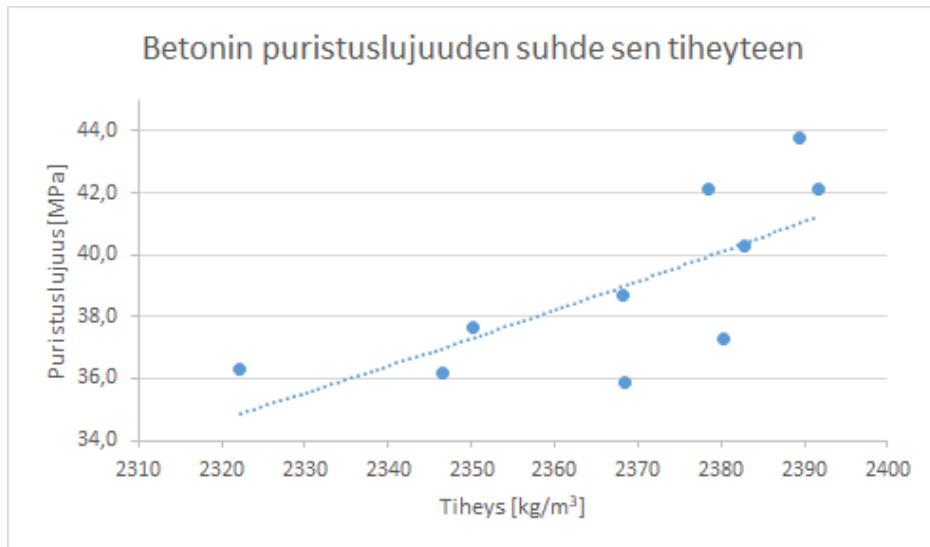
kuluttua valusta (Mohdi ym. 2018, 4413). Tämä luo tarpeen tutkia mahdollisuutta altistaa kappaleet hiilidioksidille heti valun jälkeen niiden vielä ollessa muoteissa.

Yhdessä testierässä oli havaittavissa myöhempää lujittumista hiilidioksidialtistetuilla kappaleilla. Koekappaleita testattiin kahdessa iässä, ja altistettujen kappaleiden lujuus ei nuorempaan yltänyt referenssikappaleiden tasolle. Standardinmukaisen testausiän saavutettuaan ne kuitenkin olivat hieman lujempia kuin vertailukohtansa (taulukko 1).

**TAULUKKO 1.** Puristuslujuuden kehittymisen vertailu standardinmukaisesti säilytetyn ja hiilidioksidille altistetun betonin välillä taulukoituna.

säilytysolosuhde	testaus 11 vrk:n iässä		testaus 28 vrk:n iässä	
	tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]	puristuslujuus [MPa]	tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]	puristuslujuus [MPa]
standardinmukainen	2 390	35,7	2 380	40,3
hiilidioksidialtistus	2 350	35,3	2 390	42,7

Hiilidioksidin ei kuitenkaan voida olettaa olevan tässä tapauksessa asiaan vaikuttanut tekijä. Myöhemmässä iässä testattujen koekappaleiden tiheys oli suurempi kuin aiemmin testattujen. Betonin puristuslujuusominaisuudet paranevat sen tiheyden kasvaessa, kuten tässäkin tutkimuksessa on havaittu (kuva 2).



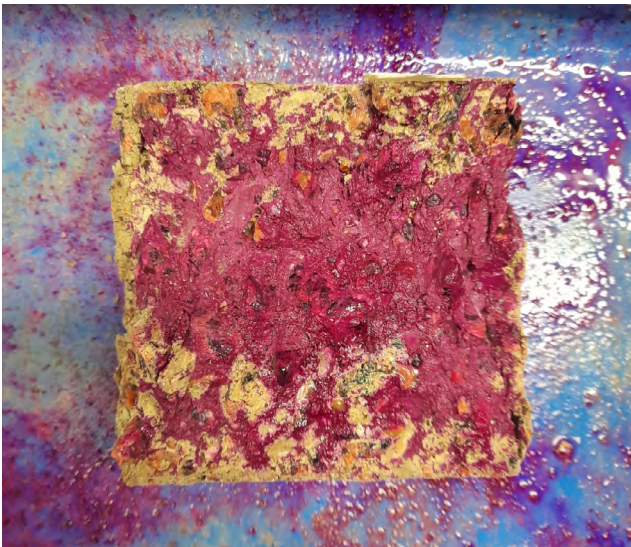
**KUVA 2.** Pistekaavio hankkeen aikana tutkittujen betonisten koekappaleiden puristuslujuuden suhteesta niiden tiheyteen.

Hankkeen aikana testatuista koekappaleista suurin puristuslujuustulos on saatu paineastiassa altistetusta koekappaleesta. Paineella on ollut lähes kaikissa kokeissa positiivinen vaikutus lujudenkehitykseen. Tulos on tosin epävarma, sillä paineistetussa olosuhdesäilytyksessä on ollut vain yksi koekappale kustakin erästä. Epävarmuuden vähentämiseksi on tärkeää järjestää säilytysmuoto, johon mahtuu useampi kappale. Useampaa kappaletta vertailtaessa tulee ilmi, jos yksittäinen tulos poikkeaa keskiarvosta.

Massan huokostamisen oletetaan olevan hiilidioksidialtistuksen lujuutta kasvattavan ominaisuuden kannalta myönteistä. Koska kalsiumkarbonaattia muodostuu betonin huokostilaan, huokostetussa betonissa on laajemmin tilaa muodostaa reaktiotuotetta. Tämä kasvattaa etenkin pintabetonin tiheyttä ja sitä myötä hieman sen puristuslujuutta (Czarnecki & Woyciechowski 2015, 3). Tätä on hankkeessa tutkittu vasta vähän, mutta tulokset tukevat tätä teoriaa.

## KARBONATISOITUMINEN JA PH

Laboratoriokokeissa havaittiin ennakko-oletuksen mukaisesti karbonatisoinnin alentavan betonin pH:ta. Kokeissa oli havaittavissa hiilidioksidin reagoiminen koekappaleen pinnassa. Karbonatisoituminen etenee yleisesti lineaarisena rintamana, johon kiviaines tai suuret ilmatilat saattavat muodostaa poikkeamia. Paineella altistettaessa karbonatisoitumisreaktio tapahtuu kuitenkin tästä poikkeavasti (kuva 3), ja paineellinen altistus on testeissä saanut aikaan selvimmän karbonatisoitumisreaktion. Karbonatisoituneista kappaleista mitataan pH sekä karbonatisoitumisrintamalta että sen ulkopuolelta. Näiden välillä on havaittu selvä ero, ja pintabetoni on alkanut neutralisoitumaan.



**KUVA 3.** Fenoliftaleiiniliuoksella sumutettu halkaistu betoninen koekappale, jossa karbonatisoitumisrintama ei ole lineaarinen (kuva Elli Tykkä).

## JOHTOPÄÄTÖKSET

Hiilidioksidialtistuksella on todettu olevan betonin lujuusominaisuuksia parantavia vaikutuksia. Etenkin paineen vaikutuksen altistuksen aikana on todettu olevan merkityksellinen. Myös hankkeen tutkimustulokset tukevat tätä. Paineen vaikutusta tulee tutkia myös tapauksessa, jossa hiilidioksidi on syötetty tuoreeseen massaan sekoittamisen yhteydessä.

Laboratoriokokeet ovat vasta alkuvaiheessa, ja niistä on herännyt enemmän uusia kysymyksiä kuin saatu vastauksia. Aihe on mielenkiintoinen, ja tulosten luotettavaa analysoimista varten on pureuduttava molekyyalitasolle asti. Kun yhdellä testikerralla on saatu tietynlaisia tuloksia, toisella kerralla tulokset saattavat olla päinvastaisia. Tämä herättää halun selvittää syyn tapahtuneelle ja antaa aiheutta tutkia asiaa pintaa syvemmältä. Tässä vaiheessa hanketta ei siis juurikaan ole valmiita vastauksia, mutta monia kiinnostavia kysymyksiä.

Hiilidioksidialtistus on aiheena laaja ja monimuotoinen. Johtuen sen monista mahdollisuuksista on jatkohankkeelle ja -tutkimuksille tarve. Jotta löydettäisiin betoniteollisuuden kannalta toimivin sovellutus, tulee tehdä laajalti lisätutkimuksia. Kun teollisuudesta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt saadaan otettua talteen ja hyötykäytettyä betonin tuotannossa, on betoniteollisuus ison askeleen lähempänä tavoiteltua hiilineutraaliutta.

## LÄHTEET

Czarnecki, L. & Woyciechowski, P. 2015. Modelling of concrete carbonation; is it a process unlimited in time and restricted in space? *Bulletin of the Polish Academy of Sciences*. Vsk. 63 (1). PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/figure/influence-of-carbonation-of-main-concrete-properties\\_tbl2\\_272535592](https://www.researchgate.net/figure/influence-of-carbonation-of-main-concrete-properties_tbl2_272535592) [viitattu 6.9.2021]

Hakamy, A., Effect of CaCO<sub>3</sub> nanoparticles on the microstructure and fracture toughness of ceramic nanocomposites *Journal of Taibah University for Science*, Volume 14, 2020 - Issue 1 , Pages 1201–1207. Saatavissa: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/16583655.2020.1809840v> [viitattu 26.8.2021]

Kärki, J., Hurskainen, M., Mäkikouri, S., Melin, K., Tsupari, E., Bajamundi, C., Vehmas, T., Thomasson, T., Suomalainen, M., Lehtonen, J. & Alakangas, E. S.a. Uutta kestäväää liiketoimintaa bioperäisestä hiilidioksidista - Kooste projektin päätuloksista. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://projectsites.vtt.fi/sites/BioCO2/www.vtt.fi/sites/BioCO2/tiedotteet.html> [viitattu 2.9.2021]

Mohd, T., Khan, R., Karadia, A. & Shaikh, I. 2018. Curing of Concrete by Carbon Dioxide. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. Vsk. 5 (4). PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.irjet.net/volume5-issue4> [viitattu 30.7.2021]

Mäkikouri, S., Korpijärvi, K., Vares, S. & Papakonstantinou, N. 2021. The Carbon Dioxide Emissions Reduction Potential of Carbon-Dioxide-Cured Alternative Binder Concrete. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.lidsen.com/journals/rpm/rpm-03-02-018> [viitattu 30.7.2021]

Zhang, D., Ghouleh, Z. & Shao, Y. 2017. Review on carbonation curing of cement-based materials. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*. Vsk. 21. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2212982017302524?token=6BD6E6571BF4CDAEA-322D0B437946ED8DE614573C7E0CFCAF15FB4129F8C00E0643645AEF0E1A-21D2B85907E72D5F8AB&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210901101158> [viitattu 26.8.2021]

# ENERGIATEHOKKUUS JA HUKKALÄMPÖJEN HYÖDYNTÄMINEN KANNATTAA

Tuija Korpela & Paulus Kiviranta & Erja Tuliniemi & Teemu Karttaavi & Hannu Sarvelainen & Maunu Kuosa

Energiatehokkuus ja hukkalämpöjen hyödyntäminen on paitsi kannattavaa myös todellinen ekoteko. Hukkalämpö tai -kylmä on kaukolämmitys- tai kaukojäähdytysjärjestelmässä hyödynnettävä väistämättömänä sivutuotteena syntyvää lämpöä tai jäähdytysenergiaa, joka ilman tätä hyödyntämistä katoaisi käyttämättömänä ympäristöön. Kymenlaakson alueella on kartoitettu hukkalämmönlähteitä ja ratkaisuja niiden hyödyntämiseksi ”Hukkalämmön verkostot ja hyödyntämismahdollisuudet – Hukkaveks” -hankkeessa.

Hanke toteutetaan Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun (Xamk) Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusalan alla, ja hankkeen päärahoittajana toimii Kymenlaakson liiton koordinoimana Euroopan aluekehitysrahasto (EAKR). Lisäksi rahoittajina ovat Kotkan Energia, Haminan Energia, KSS Lämpö ja Kotkan kaupunki.

## JOHDANTO

Nykyiset energiatehokkuus- ja uusiutuvan energian EU-direktiivit ohjeistavat hukkalämpöjen hyödyntämisen edistämiseen. Tunnistettuja hukkalämmönlähteitä ovat esimerkiksi teollisuus (prosessit, datakeskukset), energian tuotanto (savukaasut, kaukolämmön paluuvirtaus), lämmönlähteet rakennuksissa (poistoilma, harmaa vesi), kylmälaitteet (kaupan kylmälaitteet, jäähallit) ja julkiset kohteet (jätevedenpuhdistamot, parkkihallit).

Hukkalämmön hyödyntäminen on sen lämpötilatasosta riippuen teknisen toteutuksen osalta hyvin erilaista. Odotettavissa on, että tulevaisuudessa lämpötilatasoa pyritään laskemaan, jotta uusiutuvaa lämpöä ja hukkalämpöjä saataisiin paremmin hyödynnettyä. Lisäksi lämpöpumput tulevat yleistymään Suomen lämmityssektorilla sekä kaukolämmön tuotannossa että erillisenä lämmitysmuotona. (VTT 2020)

Tässä julkaisussa esitetään hankkeessa jo toteutettuja sekä työn alla olevia hukkalämmön hyödyntämiseen liittyviä ratkaisuja eri kohteissa Kymenlaakson alueella. Tarkastelun kohteina kuvataan hukkalämpöpotentiaalia asuinrakennuksissa, jää- ja uimahalleissa sekä muun muassa teollisuuslaitoksissa ja kaukolämmön paluuvirtausta hyödyntäen erilaisin ratkaisuin.

Asuinrakennusten ilmanvaihdon lämmöntalteenotossa piilee suuri energiansäästöpotentiaali, jota ei vanhemmissa rakennuksissa hyödynnetä. Poistoilmalämpöpumpun avulla on mahdollista saada poistoilmasta talteen lämpöenergiaa. Suurin hukkalämpöpotentiaali löytyy vuosien 1960–1990 välillä rakennettujen asuin kerrostalojen poistoilmasta, mikäli ilmanvaihto on toteutettu koneellisesti ilman lämmöntalteenottoa.

Asuinrakennusten lisäksi myös uimahallien allastilojen poistoilman lämpöenergiasäilytys on suuri. Hankkeessa selvitetään pilotoinnin avulla Karhulan uimahallin poistoilman lämpöenergian hyödyntämistä ilmanvaihdon esilämmitykseen käyttäen lämpöpumpputeknologiaa.

Jäähallien kylmäkoneet tuottavat lauhde-energiaa lähes koko vuoden ajan. Hankkeessa seurataan vuoden ajan Kotkan Karhulan jäähallin kylmäkoneiston tuottamaa lauhdelämmön määrää. Tavoitteena on saada mahdollisimman tarkkoja tuloksia todellisesta lauhde-energian määrästä, sillä sitä voitaisiin tulevaisuudessa hyödyntää jäähallin läheisyyteen rakennettavassa uudiskohteessa. Lauhde-energian käytön tehostamisella on merkittävä energiansäästöpotentiaali.

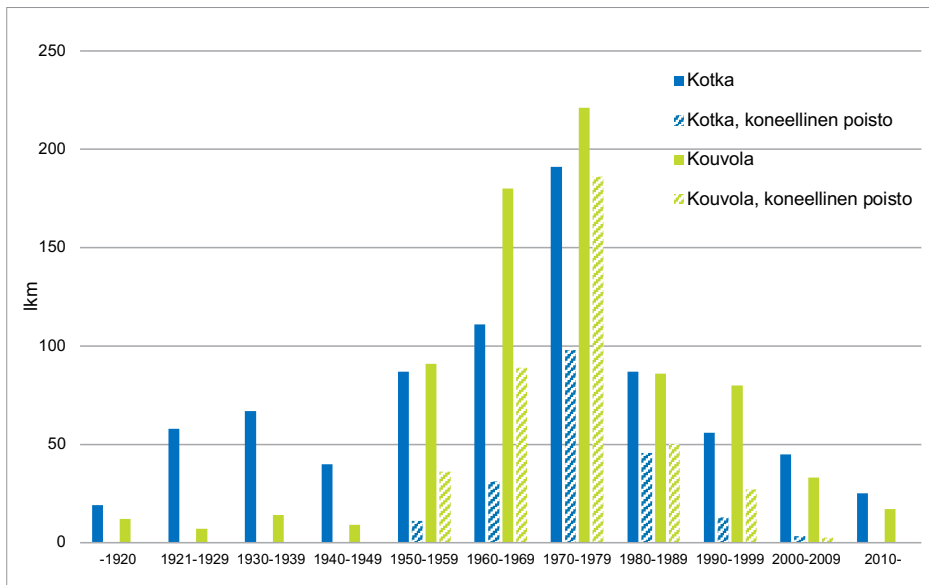
Kaukolämmön paluuvirtaus sisältää lämpöenergiaa, jota voidaan matalalämpöisyydestä huolimatta hyödyntää tiettyihin kohteisiin tai vaihtoehtoisesti nostaa lämpötilatasoa lämpöpumpun avulla. Tässä julkaisussa esitetään hankkeen aikana esiin nousseita tapoja kaukolämmön paluuvirtauksen hyödyntämiseen.

## **KYMENLAAKSON ASUINKERROSTALOJEN HUKKALÄMPÖPOTENTIAALI**

Rakennukset tuottavat hukkalämpöä, jota voidaan hyödyntää kiinteistön oman tai lähi-alueen lämmitysenergiana. Hankkeessa tarkasteltiin tarkemmin Kymenlaakson asuin kerrostalojen poistoilman hukkalämpöenergiamääriä ja niiden käytettävyyttä lämmitykseen ja/ tai käyttöveden lämmitykseen.

Hukkalämpöpotentiaalia lähdettiin kartoittamaan tarkastelemalla ensin yksittäisen kerrostalon lämpöenergiatasetta. Tällä saatiin todennettua se, että suurin hukkalämpöpotentiaali löytyy vuosien 1960–1990 välillä rakennettujen asuin kerrostalojen koneellisessa poistoilmassa. Tuolla aikakaudella kerrostaloihin asennettiin ilmanvaihdoksi pääasiassa pelkkä koneellinen poisto (liesituuletin), josta lämpöä ei oteta talteen. Lisäksi tämän ajanjakson rakennusten ominaislämmönkulutus on suuri verrattuna esimerkiksi 90-luvun kerrostaloihin (VTT 2015).

Tämän jälkeen kartoitettiin Kymenlaakson asuin kerrostalokanta. Kuvassa 1 esitetään eri vuosikymmeninä Kotkassa ja Kouvolassa rakennetut asuin kerrostalot (voi sisältää joitakin käytöstä poistuneita rakennuksia). Eriteltynä on kerrostalot, joissa on koneellinen poistoilmanvaihto (viivoitetut pylväät).

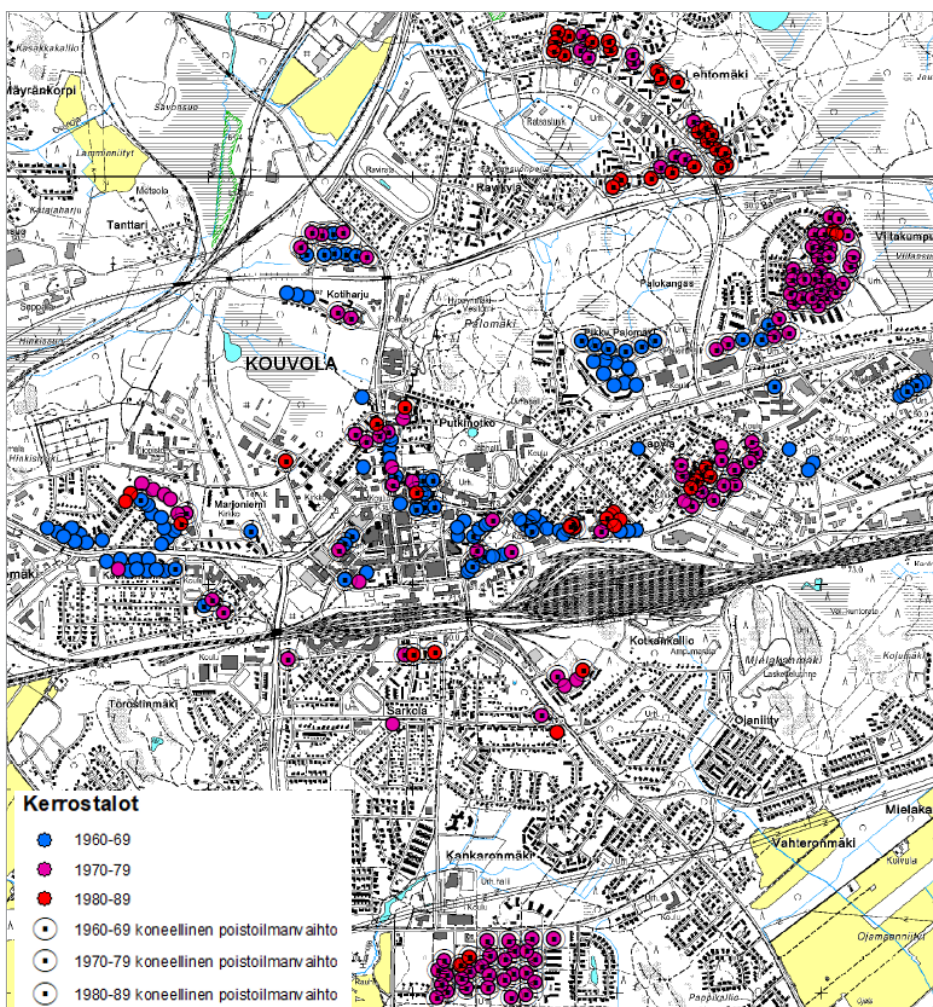


**KUVA 1.** Kotkan ja Kouvolan asuinkerrostalokanta ja kerrostalot, joissa on koneellinen poistoilmanvaihto. (Tuija Korpela)

Kuvasta 1 voidaan havaita 60–70-lukujen lähiörakentaminen, jolloin tavoitteena oli tuottaa mahdollisimman paljon asuntoja (Neuvonen 2006). Kotkassa kerrostalokanta painottuu enemmän ennen 60-lukua rakennettuihin (Kotkassa noin 270, Kouvolassa noin 130), kun taas Kouvolan rakennuskanta painottuu 60–70-luvuille (Kotkassa noin 300, Kouvolassa noin 400). Vaikka sekä Kotkan että Kouvolan kaupungeissa on melko samankokoinen kerrostalokanta, yhteensä noin 750 kerrostaloa, sijoittuu Kouvolaan lähes puolet enemmän 60–70-lukujen asuinkerrostaloja, jotka on varustettu koneellisella poistoilmanvaihdolla.

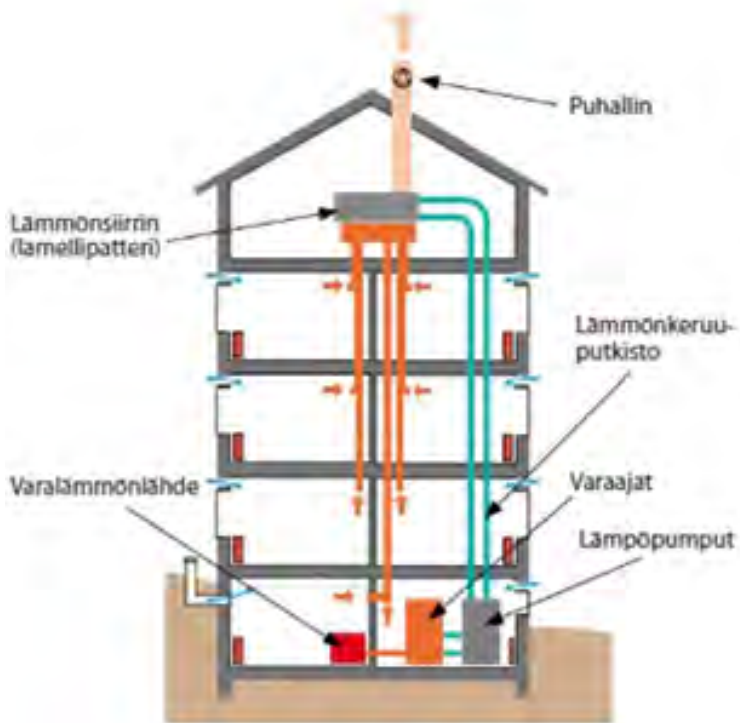
Kouvolan keskusta-alueen kerrostalot 60–80-luvuilta sekä erikseen merkittynä talot, joissa on koneellinen poistoilmanvaihto, on havainnollistettu karttakuvassa 2. Tämän mukaan Kouvolassa on runsaasti kerrostaloja, joissa on koneellinen poistoilmanvaihto. Lisäksi talot sijaitsevat useasti lähellä toisiaan ryhmässä.





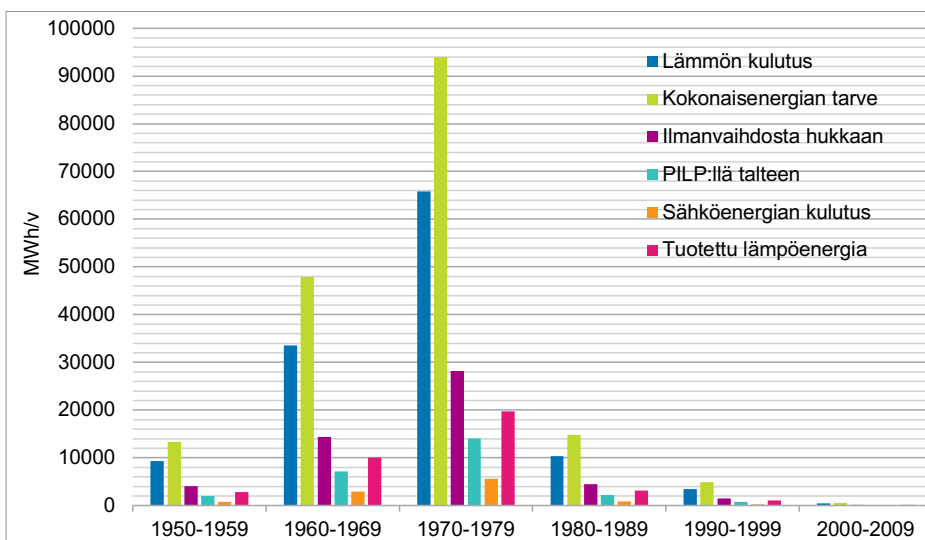
**KUVA 2.** Kouvolan keskusta-alueen kerrostalot 60–80-luvuilta sekä erikseen merkityinä talot, joissa on koneellinen poistoilmanvaihto. (Tuija Korpela)

Poistoilmalämpöpumpulla (PILP) voidaan ottaa lämmitysenergiaa talteen talosta poistettavasta ilmasta lämmönsiirtimen ja lämmönkeruuputkiston avulla (kuva 3). Pumppu siirtää lämmön senhetkisen tarpeen mukaan lämpimään käyttöveteen tai vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään (varaajat, kuva 3). Järjestelmä on aina mitoittettava tapauskohtaisesti. Lisäksi PILP tarvitsee myös ylimääräisen lämmönlähteen (varalämmönlähde), koska poistoilman lämpö ei koskaan riitä kattamaan koko kerrostalon lämmöntarvetta. Poistoilmalämpöpumppujärjestelmän tuottama lämpöenergia kykenee yleensä kattamaan 35–50 prosenttia kerrostalon lämmöntarpeesta. (Pylsy et al. 2011)



**KUVA 3.** Lämmöntalteenotto lämpöpumpun avulla rakennuksessa, jossa on koneellinen poistoilmanvaihto. (Pylsy et al. 2011)

Kuvassa 4 on esimerkkinä Kouvolan asuinkeuhkalojen koneellisen poistoilmanvaihdon laskelmin arvioitu hukkalämpömäärä ja sen hyödynnettävyys. Pylväillä osoitetaan eri vuosikymmeninä rakennettujen asuinrakennusten vuotuinen lämmönkulutus, kokonaisenergiatarve, hukkaenergiamäärä poistoilmanvaihdon kautta (30 % kokonaisenergian tarpeesta), poistoilmalämpöpumpulla (PILP) talteen otettava energia (50 % ilmanvaihdon hukasta), PILPin sähkönkulutus ja lopuksi lämpöpumpulla hyödynnettäväksi tuotettu lämpöenergia (MWh/v).



**KUVA 4.** Eri vuosikymmeninä rakennettujen Kouvolan kerrostalojen koneellisen poistoilmanvaihdon vuotuiset hukkalämpö määrät ja niiden hyödynnettävyys. (Tuija Korpela)

Laskennallisesti arvioiden 60- ja 70-luvun asuinkerroistoaloissa saadaan PILPin avulla tuotettuna lämpöenergiaa ”talteen” Kouvolaissa 21 300 MWh/v ja Kotkassa 9 400 MWh/v. Taloudellinen vuotuinen kokonaissäätöpotentiaali on 1 235 000 euroa Kouvolaissa ja 545 000 euroa Kotkassa. Eri vuosikymmenien aikana rakennettujen rakennusten yhteenlasketut vuotuiset kokonaissäätöpotentiaalit ovat 36,8 GWh ja 1 526 000 euroa Kouvolaissa ja 18,7 GWh ja 775 000 euroa Kotkassa. Kaukolämmitteisissä kerrostaloissa vuotuinen CO<sub>2</sub>-päästövähennys olisi Kotkassa noin 590 tCO<sub>2</sub> ja Kouvolaissa 944 tCO<sub>2</sub>.

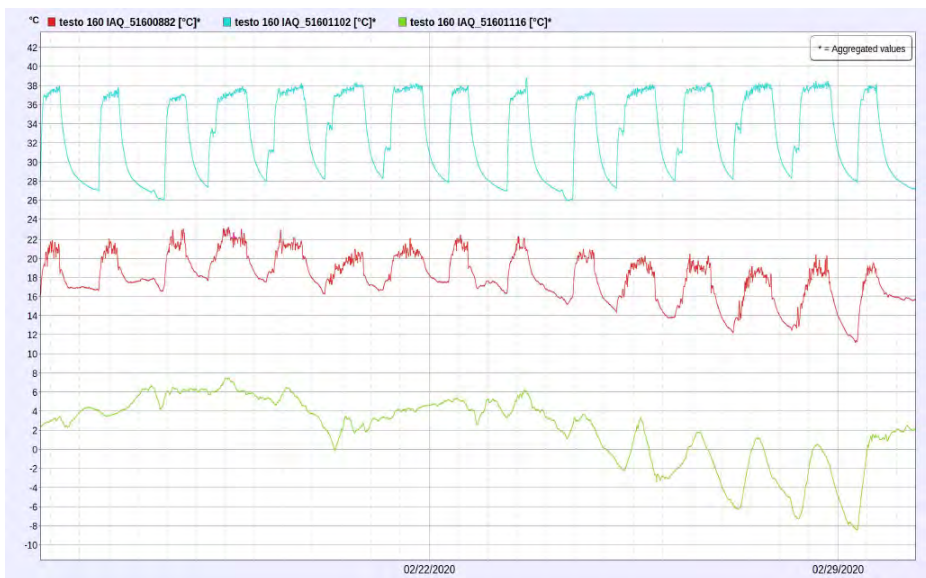
Poistoilmalämpöpumpun kannattavuutta tutkittiin joukkoon kerrostaloja. Kerrostalojen lämmön-, sähkön- ja vedenkulutus tunneittain määritettiin sekä mitoitettiin kyseisiin kerrostaloihin sopiva PILP. Poistoilman lämmön talteenoton rakentaminen on mittava hanke, joka vaatii muun muassa tarvittavien putkistojen asennuksen. Takaisinmaksuajoksi saatiin keskimäärin 7–13 vuotta.

Hukkalämmön hyödyntäminen on järkevää sekä kiinteistön energiankulutuksen että ympäristön kannalta katsottuna. Järjestelmän asennuksen jälkeen kiinteistön hiilijalanjälki pienenee, kiinteistön energiatehokkuus kasvaa ja kiinteistö saa paremman E-luvun.

## LÄMPÖPUMPPU UIMAHALLIN LÄMMÖNTALTEENOTTOON

Karhulan uimahallin energitehokkuutta on tarkoitus parantaa ilmanvaihdon lämmöntalteenottoa kehittämällä. Toimenpiteet lisälämmönvaihtimen asentamiseksi uimahallin pesu- ja pukuhuoneiden poistoilmakanavaan (PK3) on toteutettu kesällä 2021. Talteen otettu lisälämpöenergia tullaan hyödyntämään lämpöpumpun avulla ilmanvaihdon esilämmityksessä.

Kuvassa 5 on esitetty lämpötilamittaus poistoilmakoneesta (PK3) mittausajanjaksoilla 15.2.–1.3.2020. Poistoilman lämpötila oli päiväsaikaan korkea, noin 37 °C (sininen käyrä). Lämmöntalteenoton jälkeenkin lämpötila oli vielä noin 22 °C (punainen käyrä) ulkolämpötilan ollessa jonkin verran 0 °C:n yläpuolella (vihreä käyrä). Selvityksen perusteella lisälämmönvaihtimen talteenoton potentiaali olisi noin 80 kW, kun poistuvan ilman loppulämpötila on 5 °C.



**KUVA 5.** Lämpötilamittaus Karhulan uimahallin PK3:sta ajanjaksolla 15.2.–1.3.2020. (Tuija Korpela)

Laskelmien mukaan PK3:n hukkaan menevä lämpö on hyödynnettävissä ilmanvaihdon esilämmityksessä. Karhulan uimahallissa allastilan ja -veden lämmitys on toteutettu pääosin IV-koneiden avulla. Allaiden seinissä on lämpimän ilman kanavia, ja allastilan lämpötilaa pidetään 2 °C veden lämpötilaa korkeampana. Hankkeessa seurataan uimahallin energia- ja tehokkuuden paranemista lisälämmönvaihtimen ja PILP:n asennuksen jälkeen.

## HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMISRATKAISUJA TODELLISISSA KOHTEISSA

Xamkin energiatekniikan lämpö- ja virtaustekniikan opintojaksoissa on painotettu viime vuosina energiatehokkuutta ja etenkin hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksia. Opintojaksolla opiskelijat suorittavat energiakatselmuksen todelliseen kohteeseen, jonka pohjalta yhdessä hankkeen kanssa pohditaan kohteeseen parannusehdotuksia energiankäyttöön ja hukkalämpövirtojen pienentämiseen. Hukkalämmön hyödyntäminen tulee olemaan jatkossa merkittävä asia energian tehokkaassa käytössä.

Vuoden 2021 aikana on Hukkaveks-hankkeessa tehty useita energiaselvityksiä. Eri toimijoilta on saatu kohteita energiatehokkuusprojektien toteutukseen. Selvitystöiden lisäksi hankkeelle tehdään kuusi opinnäytetyötä, joista kolme on jo valmiina ja muut kolme tekeillä. Opiskelijatoina saadaan arvokasta tulosta hankkeelle, ja ne mahdollistavat Hukkaveks-hankkeen laajempialaisen toteutuksen tavoitteiden mukaisesti [XAMK Read 2021]. Hankkeessa on löytynyt useita energiansäästötoimenpiteitä, jotka ovat toteutettavissa ja vähentävät hiilidioksidipäästöjä.

Yhteenvedo hankkeen aikana tehdyistä/tehtävistä opinnäyte- ja opiskelijatöistä esitetään taulukossa 1.

**TAULUKKO 1.** Hankkeen aikana tehtyjä opinnäytetöitä ja energiankäytön tehostamiseen liittyviä projekteja. (Paulus Kiviranta)

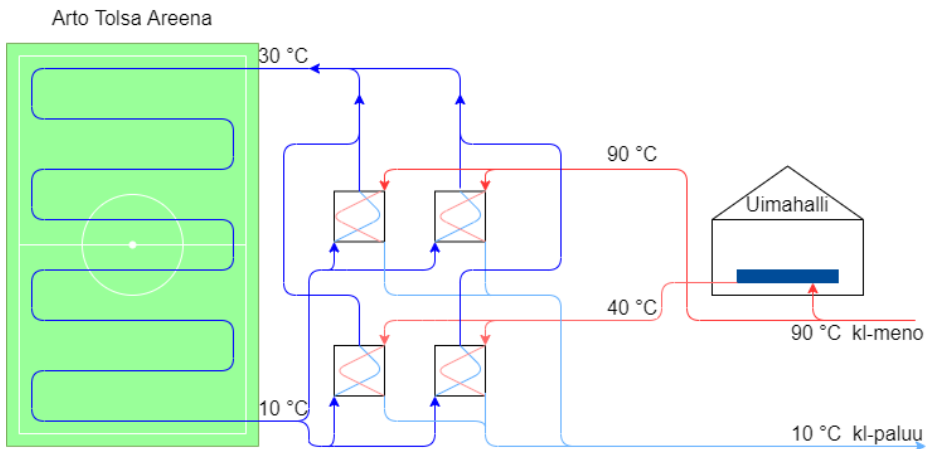
Opinnäytetyö	Kehitystehtävä
Cooling with renewable energy	Tuoda hankkeelle tietoon tekniikoita hybridi-jäähdytysjärjestelmistä, jotka toimivat yhdessä uusiutuvan energian kanssa
Kaukolämmön tuotannon optimointi kulutusmuutoksien ja -ennusteiden mukaisesti	Kaukolämmön lyhytaikainen varastointi kl-verkkoon, jota hyödyntäen fossiilisten polttoaineiden käyttöä voidaan vähentää
Harjun oppimiskeskuksen hybridilämmitysjärjestelmän teknista-loudellinen tarkastelu	Selvitys Harjun oppimiskeskuksen lämmitysjärjestelmän muuttamisesta ympäristöstävällisempään vaihtoehtoon
Matalaenergisien lämmön hyödyntäminen sähkötuotannossa Stirling-tekniikalla	Eri laatuisten hukkalämpöjen hyödyntämismahdollisuuksien tarkastelu sähköntuotannossa Stirling-tekniikan avulla
Jäähallien lauhdelämmön hyödyntämisen mahdollisuudet	Hyödyntää jäähallien kylmälaitteiston tuottamaa lauhdelämpöä jäähallissa sekä mahdollisesti lähialueella sijaitsevilla rakennuksissa
Ulospuhallusilman hyödyntäminen uimahallin ilmanvaihdon esilämmitykseen lämpöpumputekniikalla	Uimahallin pesu- ja pukuhuoneiden poistoilman lämmön hyödyntäminen ilmanvaihdon esilämmitykseen lämpöpumpun avulla

Opiskelijaprojektin kohde	Kehitystehtävä
Kotkan Julkiset Kiinteistöt	Kaukolämmön laskutustehojen ja sähköliittymien kokojen tarkistaminen Kotkan julkisissa kiinteistöissä
Merikeskus Vellamo	Merikeskus Vellamon jäädytyslaitteiston tarkastus käyttökustannusten ja ympäristöystävällisyyden kehittämiseksi
Karhulan jäähalli	Karhulan jäähallin energiakatselmus ja vuotuisen lauhde-energian määrän selvittäminen lähialueen uudisrakennusta varten
Kotkamills Oy	Selvitys Kotkan paperitehtaan hukkalämpövirroista ja siitä, miten hukkalämpövirtoja voisi olla mahdollista hyödyntää
Katariinan alue Uimahalli – Arto Tolsa areena, kaukolämmön paluuvirtauksen hyödyntäminen	Hyödyntää uimahallin kaukolämmön paluuvirtausta Arto Tolsa -jalkapalloareenan nurmen sulana pidossa talvisin
Opetus- ja liikuntatilat	Selvitys Kotkan julkisten rakennusten (koulu, päiväkot, liikuntatila) energiatehokkuuden parantamisesta
Suomen Viljava Oy, KSS Lämpö Oy:n kaukolämpöverkko	Viljavan kattilalaitoksen energiatehokkuuden kehittäminen palamisilmasäädöllä, polttoaineen laadun parantamisella ja lämmöntalteenotolla

## KAUKOLÄMMÖN PALUUVEDEN HYÖDYNTÄMINEN OSANA LÄMMITYSJÄRJESTELMÄÄ

Kaukolämmön paluuveden hyödyntäminen osana lämmitysjärjestelmää on viime aikoina noussut kaukolämmitystekniikassa uutena asiana esille. Tähän teemaan liittyen on hankkeessa löytynyt muutamia erilaisia toteutustapoja.

Katariinan alueella Kotkassa on suunnitteilla uimahallin kaukolämmön paluuvirtauksen hyödyntäminen viereisen Arto Tolsa -jalkapallostadionin nurmen sulana pidossa. Kuvassa 6 esitetään kytkentä uimahallin kaukolämmön paluuveden hyödyntämiseksi jalkapallokentän lämmitykseen. Areenan nurmea pidetään vuosittain sulana riippuen sääolosuhteista tammikuun loppupuolelta maaliskuun puoleenväliin. Kaukolämmön paluuvirtauksen hyödyntämiskäytäntö on mahdollista toteuttaa suhteellisen helposti, koska Arto Tolsa -jalkapalloareenan ja Katariinan uimahallin lämmönjakolaitteistot sijaitsevat samassa teknisessä tilassa. Hyödyntämällä uimahallin kaukolämmön paluuvirtausta kentän sulana pidossa suoran kaukolämmön vähenemäksi saatiin kaukolämmityksessä laskennallisesti 259,92 MWh:n (37,7 %) säästö vuositasolla, mikä vastaa 38,47 tCO<sub>2</sub> päästöjen vähenemää (Motiva 2021).



**KUVA 6.** Katariinan alueen integroidut lämmitysratkaisut. (Paulus Kiviranta)

Katariinan alueen lisäksi kaukolämmön paluuv veden hyödyntämistä on suunniteltu käytettäväksi Kotkan konserttitalossa paluuvirtauslämpöpumpun avulla. Lämpöpumpun toimintaperiaatteena on ottaa rakennuksen tarvitsema lämmitysenergia kaukolämpölinjan paluupuolelta. Vastaavasti jäähdytyskaudella, kun rakennus tuottaa ylimääräistä lämpöä, voidaan sillä lämmittää käyttövettä tai siirtää se kaukolämpölinjan menopuolelle. (Kotkan Energia 2021)

Kotkan konserttitalon paluuvirtauslämpöpumppu on pilottihanke, joka toteuttaa kaksisuuntaista kaukolämmön tuotantoa. Tämä tarkoittaa, että asiakas, Kotkan konserttitalo, voi tilanteesta riippuen olla lämmön ostaja tai myyjä. Tämänkaltaiset uudet pilottihankkeet avaavat uudenlaisia liiketoimintamalleja energiayhtiöille ja edistävät uusia lämmöntuotannollisia ratkaisuja, jotka eivät perustu polttamiseen, sekä vähentävät hiilidioksidipäästöjä.

Kaukolämmön paluupuolen energian hyödyntämisestä hyötyvät sekä asiakas että energiayhtiö. Asiakas saa käyttöönsä halvemmalla energiaa johtuen paluuvirtauksen mahdollisesti halvemmasta energian hinnoittelusta. Lisäksi kaukolämmön tilaustehoa voidaan laskea, kun kaukolämmityksen tarve vähenee. Myös energiayhtiö hyötyy tämänkaltaisista ratkaisuista. Paluuvirtauksen parempi jäähtymä pienentää kaukolämpöverkon siirtohäviöitä (lämpö- ja pumppaushäviöitä), parantaa sähköntuotannon hyötysuhdetta yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa sekä parantaa voimalaitosten savukaasupesureiden toimintaa, kun savukaasuja voidaan jäädyttää matalampaan lämpötilaan (Energiateollisuus ry 2010).

Opiskelijaprojektien pohjalta on selvitystyötä tehty hankkeessa muun muassa Karhulan jää- ja uimahallin sekä Katariinan alueella sijaitsevan Arto Tolsa Areenan osalta. Jäähallilla on käynnissä kylmäkoneiston lauhdepuolen mittaukset, joiden avulla selvitetään vuoden



aikana jäähallilla syntyvän lauhde-energian määrä kuukausitasolla mahdollisimman tarkasti. Syntyvä lauhde-energia pyritään ensisijaisesti hyödyntämään jäähallissa ja ylimenevä osa lähialueelle kaavailussa uudisrakennuksessa.

## ADSORPTIOJÄÄHDYTTIMEN TESTIAJOJA

Hukkaveks-hankkeessa on selvitetty jäähdytykseen liittyviä teknologisia ratkaisuja, joista on vain vähän kokemuksia Suomessa. Tarkastellun adsorptiojäähdyttimen toimintaperiaatteena on käyttää lämmönlähdettä, esimerkiksi kuumaa vettä, jäähdytetyn veden tuottamiseksi esimerkiksi tilojen jäähdytykseen. Hyötysuhde on parhaimmillaan noin 60 prosenttia saadun jäähdytysenergian suhteena käytettyyn lämpöenergiaan. Adsorptio on prosessi, jossa kaasu sitoutuu kiinteän aineen pintaan. Prosessin jäähdytysvaikutus perustuu käytettävän kierroaineen (adsorbaatin) höyrystymiseen ja lauhtumiseen. (VTT 2016) Hankkeessa tehtiin laitteiston kuuma- ja kylmäpiirien energiamittareiden ja moottoriventtiilin lisäasennuksia sekä putkieristystä. Tämän jälkeen suoritettiin adsorptiojäähdyttimen kuormitustestejä BioSampo-tutkimuskeskuksessa kesällä 2021 (kuva 7).



**KUVA 7.** Adsorptiokone BioSampo-tutkimuskeskuksessa. (Maunu Kuosa)



Adsorptiolaitteiston toiminta on voimakkaasti riippuvainen käytettävistä toimintalämpötiloista ja lämpökuormasta. Adsorptiojäähdytintä on mahdollista käyttää monilla eri lämmönlähteillä, kuten hukkalämmöllä tai aurinkoenergialla. Laitteistolla on mahdollista hyödyntää matalalämpötilaista vettä (55 °C). Adsorptiojäähdyttimen lämmönlähteeksi sopisi hukkalämmön lisäksi kesäaikana hyvin myös kaukolämpövesi, koska sen kulutus on tällöin vähäistä. Tämä tekee adsorptiotekniikasta ympäristöystävällisen vaihtoehdon jäähdytysjärjestelmäksi. (VTT 2016).

## JOHTOPÄÄTÖKSET

Hukkaveks-hankkeen keskeisenä tavoitteena on edistää energiatehokkuutta ja kartoittaa Kymenlaakson alueen hukkalämpöpotentiaalia. Hanke haastaa myös alueen eri toimijoita tunnistamaan hukkalämmönlähteitä ja löytämään vaihtoehdot niiden hyödyntämiseen. Samalla edistetään vähähiilisyttä alueellisesti ja kansallisesti.

Hankkeen aikana on kartoitettu useita kohteita, joiden hukkalämpömäärät ja niiden hyödyntämismahdollisuudet on selvitetty. Näitä ovat olleet esimerkiksi Katariinan uimahallin kaukolämmön paluuvirtaus ja sen hyödyntäminen vieressä sijaitsevalla jalkapallostadionilla, Kymenlaakson asuinkerrostalojen hukkalämpöpotentiaali sekä ratkaisut Karhulan uima- ja jäähallissa. Karhulan uimahalliin on asennettu uusi lämmöntalteenottoratkaisu käyttäen lämpöpumpputekniikkaa. Energiatehokkuus- ja hukkalämpöselvityksiä on tehty myös muun muassa Kotkamills Oy:lle ja Suomen Viljava Oy:lle. Lisäksi on tutkittu lämpöenergian hyödyntämistä jäähdytykseen adsorptiotekniikalla BioSampo-tutkimuskeskuksessa.

Hukkalämpöjen hyödyntäminen on ollut kaikkia osapuolia kiinnostava aihe. Tuloksena on löytynyt uusia energiaratkaisuja ja luotu uusia yhteistyömahdollisuuksia. Halu tehdä energiatehokkaampia ja ympäristöystävällisempiä valintoja on ollut suurta.

## LÄHTEET

Energiateollisuus ry. 2010. Kaukolämpöjärjestelmän paluuveden hyväksikäyttö kiinteistöjen lämmityksessä. Saatavissa <http://docplayer.fi/1158112-Energiateollisuus-ry.html> [viitattu 22.07.2021]

Motiva. 2021. CO<sub>2</sub>-päästökertoimet. Saatavissa <https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian-kaytto-suomessa/co2-paastokertoimet> [viitattu 16.08.2021]

Kotkan Energia. 2021. Hukkalämmön hyödyntäminen. Saatavissa <https://www.kotkanenergia.fi/hukkalammon-hyodyntaminen/> [viitattu 16.07.2021]

Neuvonen, P. 2006. Kerrostalot 1880-2000, Arkkitehtuuri, rakennustekniikka, korjaaminen, Rakennustieto Oy.

Pylsy, P. & Virta J. 2011. Energy book of housing company, Kiinteistöalan Kustannus Oy, Sitra, Helsinki, 18–22.

VTI. 2015. Poistoilmalämpöpumput kaukolämpöjärjestelmissä. Rämä, M., Niemi, R., Similä, L. Saatavissa: [https://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/poistoilmalampopumput\\_kaukolampojarjestelmassa.pdf](https://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/poistoilmalampopumput_kaukolampojarjestelmassa.pdf) [viitattu 03.09.2020]

VTI. 2016. Jäähdytyksen teknologiset ratkaisut. Saatavissa [https://energia.fi/files/1359/Jaahdytysteknologiaselvitys\\_VTI\\_221216.pdf](https://energia.fi/files/1359/Jaahdytysteknologiaselvitys_VTI_221216.pdf) [viitattu 30.07.2021]

VTI. 2020. Hukkalämpö kaukolämpöjärjestelmissä. Rämä, M., Klobut, K. Saatavissa: [https://energia.fi/files/4831/Hukkalampo\\_kaukolampojarjestelmissa\\_-\\_maarittely\\_ja\\_luokittelu\\_VTI\\_2020.pdf](https://energia.fi/files/4831/Hukkalampo_kaukolampojarjestelmissa_-_maarittely_ja_luokittelu_VTI_2020.pdf) [viitattu 03.09.2020]

XAMK Read. 2021. Opiskelijat mukana energiatehokkuustoiminnassa. Saatavissa: <https://read.xamk.fi/2021/metsa-ymparisto-ja-energia/opiskelijat-mukana-energiatehokkuustoiminnassa/> [viitattu 03.09.2021]

# LÄMMÖN KULUTUSJOUSTON MAHDOLLISUUDET

Paulus Kiviranta & Tuija Korpela & Erja Tuliniemi

Tiukentuvien päästötavoitteiden myötä energiankäyttöä tullaan optimoimaan tulevaisuudessa yhä enemmän. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Kulutusjouston mahdollisuudet – KULUMA -hankkeessa etsitään lämmön kulutusjoustoon liittyviä toimintatapoja, joilla energiankäyttöä ja siten hiilidioksidipäästöjä saadaan vähennettyä. Samalla kartoitetaan kuluttajien valmiuksia kulutusjoustoon.

Tutkimustyötä tehdään toteuttamalla kyselytutkimus Kymenlaakson alueen kaukolämpöasiakkaille sekä pilotoimalla lämmön kulutusjoustoja kahdessa erilaisessa kohteessa tulevalla lämmityskaudella. Hanke toteutetaan aikavälillä 5/2021–8/2022 yhteistyössä eGain Finlandin, Kotkan Energian ja Kotkan Asuntojen kanssa. Hankkeen päärahoittajana toimii Euroopan aluekehitysrahasto (EAKR) Kymenlaakson liiton koordinoimana.

## LÄMMÖN KULUTUSJOUSTO

Lämmön kulutusjoustolla tarkoitetaan sitä, että rakennuksen energiankäyttöä rajoitetaan hetkellisesti energiayhtiön tuotantotilanteen mukaisesti kulutushuippuja tasaten. Tämä vaikuttaa suoraan käytettäviin energianlähteisiin, kun joustossa on mukana riittävän monta rakennusta (Motiva 2021).

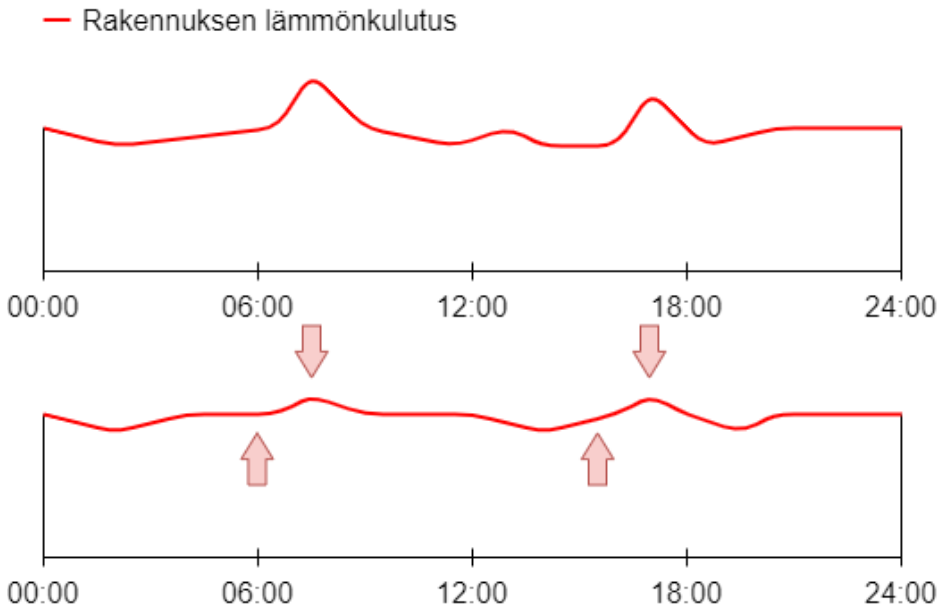


**KUVA 1.** KULUMA-hankkeen viestintä- ja markkinointikuva (kuva iStock).

Kulutusjousto voi käytännössä tarkoittaa esimerkiksi tilannetta, jossa rakennuksen lämmitystä hetkellisesti vähennetään lämmityksen menoveden lämpötilaa säätämällä. Tämä ei näy sisälämpötilan laskuna, koska kulutusjoustossa hyödynnetään rakenteiden lämmönvarauskykyä. Vaikutusta sisälämpötilaan voidaan vähentää myös yllälämmittämällä ennen tai jälkeen kulutushuipun. Myös sisäilman lämpötilan ohjaus ja ilmanvaihdon käyntiaikojen optimointi voivat olla lämmön kulutusjoustoan liittyviä toimenpiteitä.

Kulutusjousto perustuu siihen, että edellä mainitut toimenpiteet lämmön rajoittamisessa eivät vaikuta heikentävästi asumismukavuuteen, mutta pienentävät energiankulutusta (Motiva 2021). Energiansäästöön lisäarvoa tuovat uudet teknologiat ja digitaalisuus, jotka mahdollistavat sisäolosuhteiden paremman hallinnan ja jopa paremmat asumisolosuhteet kuin ennen kulutusjoustoja. (Omakiinteistö 2019)

Kuvassa 2 on esitetty havainnekuva lämmön kulutusjoustoan toimintaperiaatteesta. Rakennuksen energiankulutuksessa on tyypillisesti päivittäin kaksi kulutuspiikkiä. Kulutushuiput ajoittuvat aamuihin noin kello 7.00–9.00 aikaan ja iltopäiviin noin kello 16.00–18.00 aikaan. Tällöin lämpimän käyttöveden kulutus on suurimmillaan johtuen muun muassa aamusuihkuista ja tavallisista arkiaskareista. Lämpimän käyttöveden lisäksi myös ilmanvaihdon koneet menevät aamuisin täydelle teholle aiheuttaen yleisesti lämmönkulutuksen kasvua.



**KUVA 2.** Lämmön kulutusjoustoan toimintaperiaate: lämpöä varataan rakennuksiin ennen kulutushuippuja, jolloin päivittäiset kulutushuiput tasaantuvat (kuva Paulus Kiviranta)

Ylemmässä kuvaajassa on esitetty normaalitilanne rakennuksen lämmönkulutuksen suhteen vuorokauden aikana ja alemmassa kuvaajassa tilanne, kun rakennus on liitettyinä lämmön kulutusjousto. Alemmassa kuvaajassa on esitetty, kuinka rakennuksen rakenteisiin varastoitunut energia purkautuu kulutushuippujen aikaan rakennuksessa tehtyjen kulutusjousto säätöjen myötä. Tämän seurauksena rakennuksen energiankulutus pysyy huomattavasti tasaisempana koko päivän ajan eikä energiayhtiö joudu lisäämään lämmöntuotantoa kulutushuippujen aikaan.

Energiayhtiö hyötyy kulutusjoustoista niin, ettei lämpöä tarvitse tuottaa kulutushuippujen aikaan yhtä paljon eikä varavoimalla. Tämä johtaa lämmöntuotannon kustannusten vähenemiseen. Kun riittävän monta rakennusta on liitettyinä lämmön kulutusjousto, varavoimaa ei välttämättä tarvitse ottaa käyttöön ollenkaan. Yleisesti varavoima tuotetaan fossiililla polttoaineilla, mikä johtaa suureen potentiaaliin hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä. Kaukolämpöasiakas puolestaan hyötyy edullisemmasta kaukolämmön hinnasta alentuneen perusmaksun vuoksi.

Lämmön kulutusjousto liittyvää ohjausta tullaan tulevaisuudessa toteuttamaan koneoppimisen ja älykkäiden ohjausjärjestelmien avulla. Tässä hankkeessa säätöjä tehdään manuaalisesti sekä hyödyntämällä eGain Finlandin digitaalisia ratkaisuja. Tarkoituksena on pyrkiä löytämään optimaalisia säätötapoja ja malleja, joista on jokaiselle hankkeen osapuolelle hyötyä.

## KULUTTAJIEN NÄKÖKULMA KULUTUSJOUSTOON

Lämmön kulutusjousto liittyviä kokeiluja on tehty jo muutamia. Esimerkiksi Tampereella toteutetussa ”Älykäs kaukolämpö” -projektissa saavutettiin 8,2 prosentin kaukolämmön kustannussäästöt samalla pitäen asuinolosuhteet vakiona (Tampereen sähkölaitos 2018). Tässä Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun hankkeessa uutuuksena on se, että pilotoinnit tehdään selvittämällä kuluttajien asenteiden nykytilanne koskien lämmön kulutusjousto kyselytutkimuksen avulla. Tavoitteena on vaikuttaa kuluttajien käyttäytymiseen tuomalla heidän tietoonsa kulutusjousto mahdollisuuksista energia- ja kustannussäästöissä ja näin edistää ilmastotavoitteiden täyttymistä.

Lisäksi kysely antaa energiayhtiölle tietoja, miten asukkaat suhtautuvat lämmön kulutusjousto liittyviin toimenpiteisiin. Näitä tietoja hyödyntäen energiayhtiöt voivat kehittää toimintaansa huomioiden rakennusten käyttäjien toiveita ja tarpeita entistä paremmin. Energiayhtiöiden toiminnan ja uusien palveluiden kehittäminen tuo mukanaan uusia mahdollisuuksia vähentää lämmöntuotannosta aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä.

## TOIMINNAN PILOTOINTI KYMENLAAKSOSSA

Hankkeen aikana tulevalla lämmityskaudella pilotoidaan lämmön kulutusjoustoja kahdessa kohteessa. Kohteet ovat asuinkerrostalo sekä toimitilarakennus Kymenlaakson alueella.

Pilotoinnin aikana kerrostaloon tehdään lämmityskauden aikana säätöjä, joilla rakennuksen lämpöenergiankäyttöä voidaan vähentää hetkellisesti. Säättötoimenpiteiden tavoitteena on optimoida toimintaa siten, että asukas ei havaitse puutteita lämmönsaannissaan. Tästä huolimatta säädöllä on suuremmissa mittakaavassa vaikutusta lämmön kysyntään, ja näin myös energiayhtiöt hyötyvät kulutusjoustosta. Asuinkerrostalossa tehtävää pilotointia verrataan lähialueella sijaitsevaan toiseen asuinkerrostaloon, johon ei tehdä lämmön kulutusjoustoja liittyviä säätöjä. Säättökohteen ja verrokkikohteen asukkaille teetetään sama kyselytutkimus. Kyselytutkimuksen tuloksia analysoidaan ja vertaamalla saadaan selville asukkaiden suhtautumista kulutusjoustoja. Samalla saadaan asukaskokemuksia pilotoinnin vaikutuksista asuinolosuhteisiin.

Toimitilarakennukseen kokeillaan kulutusjoustoja rajoja hieman erilaisesta näkökulmasta. Toimitilarakennuksiin on mahdollista tehdä erilaisia kokeiluja verrattuna asuinrakennuksiin, koska asumismääräykset saattavat rajoittaa tiettyjä säättötoimenpiteitä. Toimitilarakennuksessa on esimerkiksi mahdollista tehdä säätöjä ilmanvaihtokoneiden käyntiaikojen optimointiin liittyen ja mahdollisesti jopa pysäyttää ilmanvaihtokoneet hetkittäin toisin kuin asuinrakennuksissa.

Pilotoinnin tavoitteena on löytää sopivia säättötoimenpiteitä toteutettaviksi eri kohteisiin huomioiden samalla asukkaiden ja toimitilassa toimivien henkilöiden olosuhteiden säilyttäminen suotuisalla tasolla. Laajemmassa kuvassa hankkeen tavoitteena on edistää vähähiilisyttä ja hiilineutraaliutta Kymenlaaksossa. Lisäksi hankkeessa pyritään vaikuttamaan kuluttajien käyttäytymiseen vähähiilisyden edistämiseksi ja tuomaan heille lisää tietoisuutta kulutusjoustoja liittyvistä mahdollisuuksista.

## LÄHTEET

Motiva. 2021. Kulutusjoustoos osallistuminen ja huipputehon vähentäminen. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/koti\\_ ja\\_ asuminen/ taloyhtiot\\_ -\\_ yhdessa\\_ energitehokkaasti/ taloautomaatio/ kulutusjoustoos\\_ osallistuminen\\_ ja\\_ huipputehon\\_ vahentaminen](https://www.motiva.fi/koti_ ja_ asuminen/ taloyhtiot_ -_ yhdessa_ energitehokkaasti/ taloautomaatio/ kulutusjoustoos_ osallistuminen_ ja_ huipputehon_ vahentaminen) [viitattu: 19.10.2021]

Omakiinteistö. 2019. Joustoos energiankäyttöön ja älykkyyttä lämmitykseen. WWW-dokumentti. Saatavissa: [Joustoos energiankäyttöön ja älykkyyttä lämmitykseen | Omakiinteistö \(omakiinteisto.com\)](#) [viitattu: 19.10.2021]

Tampereen Sähkölaitos. 2018. Älykäs kaukolämpö. WWW-dokumentti. Tampereen Sähkölaitos - Älykäs kaukolämpö -projektissa saavutettiin 5-10 % kustannussäästöt (sahkolaitos.fi) [viitattu: 19.10.2021]



# ENERGIAYHTEISÖT VIRTUAALIVOIMALAITOKSIEN AVULLA KYMENLAAKSOON

Turo Laine & Erja Tuliniemi & Tomi Höök

Fossiilisten polttoaineiden käytön vähentäminen ja lopulta niistä luopuminen on ensisijaisen tärkeää ilmastomuutoksen torjumisessa. Uusiutuvista energianlähteistä aurinko- ja tuulivoima ovat hajautetussa pientuotannossa kaksi tärkeintä energiantuotantomuotoa. Sähkömarkkinalain muutos luo pientuotannolle mielenkiintoisia mahdollisuuksia sähkön älykkääseen tuotantoon, käyttöön ja jakamiseen uudelaissa energiayhteisöissä. Virtuaalivoimalan avulla uusiutuva energia hallitusti hyötykäyttöön (VAU) -hanke kartoittaa energiayhteisöiden mahdollisuuksia Kymenlaakson alueella. Hankkeessa yhtenä isona teemanä on myös kontaktien luonti ja yritysysteistyön edistäminen yhteisten ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi. Kotkan kaupunki ja Kotkan Energia ovat olleet projektissa alusta asti vahvasti mukana. Hankkeen toteutusajankaus on 1.5.2021–31.8.2022, ja päärahoittaja on Kymenlaakson liitto, MOKRA-rahoitus. Hankkeen taustalla on hiilineutraali Kymenlaakso 2040 -tiekartta.

## ENERGIAYHTEISÖ UUTENA KÄSITTEENÄ SÄHKÖMARKKINOILLE

VAU-hankkeessa keskitytään sähkön tuotantoon, varastointiin ja jakamiseen energiayhteisöissä Kymenlaakson alueella. Hankkeen painopisteenä on hajautetun pientuotannon lisääminen ja sen tehokas käyttö. Pientuotannoksi lasketaan lain mukaan alle 2 MVA:n suuruinen tuotanto (Motiva 2020).

Energiayhteisö on uusi käsite sähkömarkkinoilla. Energiayhteisöjä voivat muodostaa esimerkiksi lähekkäiset omakotitalot, kerrostalot tai teollisuusrakennukset. Energiayhteisön jäsenet voivat lakimuutoksen myötä rakentaa yhteisiä suuria voimalakokonaisuuksia ja hyödyntää tuottamaansa sähköenergiaa entistä tehokkaammin. Hankkeessa keskitytään eniten aurinko- ja tuulivoimaan, mutta pohditaan myös muita mahdollisia tulevaisuuden vaihtoehtoja.

Sähkövarastojen kehittäminen on suuressa roolissa pientuotannon taloudellisuuden parantamisessa ja älykkään sähköverkon toimintavarmuuden turvaamisessa. Perinteisten akkujen lisäksi yhtenä potentiaalisena vaihtoehtona nähdään vetytalous. Jos vetyä tuotetaan

hiilineutraalisti esimerkiksi aurinkosähköllä, voidaan se laskea hiilineutraaliksi energianlähteeksi. Laitteistojen korkea hinta ja kokonaisprosessin heikko hyötysuhde hidastavat vetytalouden kasvua.



**KUVA 1.** VAU-hankkeen hankekuva (Gettyimages).

## SÄHKÖMARKKINALAIN MUUTOS LUO UUSIA MAHDOLLISUUKSIA

Sähkömarkkinalain muutos 15.7.2021 mahdollistaa erillisen kiinteistörajan ylittävän liittymän rakentamisen ilman erillistä lupaa (Sähkömarkkinalaki 2013/588 § 3, 5 a). Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että aurinkovoimalakokonaisuudesta voidaan jakaa sähköä erillisiä kaapeleita pitkin monelle eri kuluttajalle. Isomman tuotantolaitoksen rakentaminen on halvempaa kuin erillisten pienten voimaloiden rakentaminen, joten uuden lakimuutoksen myötä voidaan saavuttaa selkeää taloudellista hyötyä.

## AURINKO- JA TUULIVOIMA PIENTUOTANNOSSA

Uusiutuvista energialähteistä aurinko- ja tuulivoiman käyttö on lisääntynyt viime vuosina kaikista eniten. Kasvun on mahdollistanut kyseisten tekniikoiden hintatason lasku, ja tuulivoiman kasvua on auttanut sen rakentamiseen saadut suuret tuet. Aurinkovoimassa sen sijaan etuna on kokoluokan skaalattavuus. Se on potentiaalinen vaihtoehto muutamasta kilowatista jopa gigawattien sähkötehoon.

Aurinkovoimaloissa vielä nykyäänkin eniten käytetty tekniikka on monikidepaneelit. VAU-hankkeessa tehdään selvitystä uusista paneelitekniikoista ja tutustutaan niiden luomiin mahdollisuuksiin. Yhtenä esimerkkinä ovat ohutkalvopaneelit, jotka mahdollistavat joustavan ja kevyen rakenteensa ansiosta aurinkovoiman hyödyntämisen muotonsa puolesta haastavissa tai painorajoitetuissa kohteissa. Esimerkkejä näistä kohteista ovat muun muassa veneiden katot ja heikot kattorakenteet. Uusimpana keksintönä aurinkopaneelitekniikassa ovat perovskiihtipaneelit. Perovskiihti on maaperässä yleinen materiaali, minkä ansiosta se on paljon halvempaa kuin pii. Ne eivät myöskään piikennojen tavalla vaadi tyhjiörakennetta, joten niiden valmistus on teoriassa paljon yksinkertaisempaa ja nopeampaa. Perovskiihtipaneelien ongelmana on ollut rakenteen hauraus ja epästabiilius, mutta edistystä näissäkin osa-alueissa on jo saavutettu. (Huckaba ym. 2020). Kalvomaisen ja lähes läpinäkyvän rakenteensa ansiosta kyseistä paneelityyppiä voitaisiin hyödyntää esimerkiksi ikkunalaseissa tai sälekaihtimissa.

Tuulisähköä tuotetaan vielä tällä hetkellä lähinnä suurilla megawattikokoluokan tuulivoimaloilla. Tuulivoimaa pyritään aurinkovoiman tavoin skaalaamaan myös pienemmän kokoluokan tarpeisiin. Useiden kymmenien tai satojen metrien korkeiset mastot vaativat erittäin paljon tilaa ja ovat kalliita investointeja. Suurista tuulivoimaloista aiheuttuvia melu- ja esteettisyshaittoja on myös kritisoitu voimakkaasti. VAU-hankkeessa tutustutaan pienen ja keskikokoisen tuulivoiman nykytekniikkaan. Muutamien kilowattien pystymalliset tuulivoimalat ovat teoriassa hyvä idea, mutta ne eivät ole vielä taloudellisesti lainkaan kannattavia. Mielenkiintoisena vaihtoehtona niiden sijaan nähdään keskikokoiset tuulivoimalat. Esimerkiksi 40–50 metrin mastokorkeudelle rakennetut, alle 1 MW:n voimalat ovat taloudellisesti jo hyvin paljon kannattavampia kuin pienimmät mallit. Isoihin tuulivoimaloihin verrattuna melu- ja esteettisyshaitat vähenevät merkittävästi. Keskikokoiset tuulimyllyt voisivat olla yksi ratkaisu aurinkovoiman rinnalle isomman kokoluokan energiayhteisöissä. Tuulivoimaloissa yksi ongelma-kohta, varsinkin Kymenlaaksossa, on lupatekniset asiat. Puolustusvoimat säätelee tuulivoimaloiden rakentamista tutkahäiriöiden minimoimiseksi.

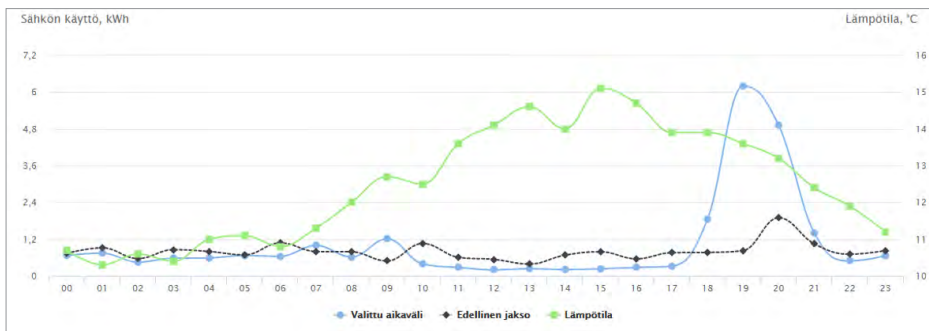
Uutena ratkaisuna tuulivoimalle on myös kehitelty stabiileja rakennemalleja. Ratkaisuna on muun muassa tuulen resonanssitaajuuteen perustuvat tolpat (VortexBladeless 2020), jotka tuottavat sähköä tuulesta käyttämättä perinteistä turbiinigeneraattoriratkaisua. Resonanssitolpat ovat kooltaan huomattavasti pienempiä kuin isot myllyt, joten niiden hyödyntäminen pienemmissäkin energiayhteisöissä on mahdollista.

## AURINKOSÄHKÖÄ MYÖS KERROSTALOIHIN

Hankkeessa yhtenä teemana on tutkia aurinkovoiman lisäämistä kerrostalokäytössä. Tällä hetkellä Suomessa aurinkoenergia kattaa vain noin 0,5 prosenttia energian kokonaiskulutuksesta (Tilastokeskus 2020), ja siitä vain murto-osa tuotetaan kerrostaloissa. Lakimuutos mahdollistaa aurinkovoiman suoraviivaisemman hyödyntämisen kerrostaloissa. Aurinkosähköä haluavat asukkaat voivat ostaa kerrostalon katolle rakennettavasta aurinkovoimalasta osan, ja sen tuottaman sähköenergian hinta vähennetään asukkaan sähkölaskusta. Tätä menetelmää kutsutaan hyvityslaskennaksi. Hyvityslaskennassa huonoina puolina ovat järjestelmän jäykkyys ja ennalta jaettavat tuotanto-osuudet. Toteutusmalli ei tue sektori-integraatiota eikä mahdollista itse tuotetun sähköenergian jakoa naapureiden kesken. Toinen mahdollinen malli kerrostaloille on takamittarointi, jossa jokainen liittymä aurinkovoimalle on mittaroitu. Kyseinen menetelmä mahdollistaa aurinkovoimalan tuoton joustavan käytön ja jakamisen asukkaiden tarpeiden mukaan. Takamittarointi mahdollistaa aurinkosähkön käytön joustavasti myös esimerkiksi sähköautojen lataukseen. Takamittarointi tarvitsee erillisen palveluoperaattorin, mikä hieman vaikeuttaa systeemin käyttöönottoa, mutta toisaalta luo lisää liiketoimintaa palveluoperaattoreille.

## ITSE TUOTETUN SÄHKÖN KÄYTTÖASTEEN PARANTAMINEN SÄHKÖVARASTOJEN AVULLA

Suurena tekijänä uusiutuvien energianlähteiden käytössä on sähköenergian varastointi, koska yleisesti tuotantohuiput eivät vastaa kulutushuippuja. Aurinkovoimalan tuotanto on korkeimmillaan keskellä päivää, kun auringon säteilyn intensiteetti suurinta. Kuvassa 2 esitetään esimerkkitalon sähkönkulutus tunneittain yhden vuorokauden ajalta. Kulutushuippujen voidaan nähdä sijoittuvan aamulle ja illalle, kun taas keskellä päivää kulutus on minimissään.



**KUVA 2.** Omakotitalon vuorokautinen sähkönkulutus tunneittain (Kymenlaakson Sähkö, kulutuksen seuranta)

Tuotannon ylittäessä kulutuksen olisi optimaalista varastoida sähköenergia myöhempää omaa käyttöä varten. Hankkeessa kartoitetaan mahdollisia vaihtoehtoja sähkövarastoille. Helpoimpana nykytekniikan vaihtoehtona nähdään akustot. Akustoja voidaan käyttää energiayhteisön älykkäässä verkossa myös niin sanottuna saarekkeena. Sähkökatkon aikana sähköenergiaa voitaisiin purkaa akustosta käyttöön jopa muutamien sekuntien viiveellä. Sähkövarastojen monipuolisuutta täytyy edelleen kehittää, koska akustojen valmistus vaatii paljon raaka-aineita, joita ei ole loputtomasti.

Yksi vaihtoehto ylijäämä sähkölle on vedyn tuotanto elektrolyysin avulla. Vetyä voidaan sellaisenaan käyttää energiavarastona ja myöhemmin muuttaa takaisin sähköksi polttokennojen avulla. Vaikka elektrolyysin hyötysuhde on laitteiston tyypistä riippuen noin 60–70 prosenttia (Hu ym. 2019) ja uusimmilla polttokennoilla päästään lähes 80 prosentin hyötysuhteeseen (Taner 2021), jää kokonaisprosessin hyötysuhde muut häviöt huomioon ottaen vain noin 40 prosenttiin. Vetyä voidaan myös käyttää power-to-x-teeman sovelluksissa, kuten metaanin tai muiden synteettisten polttoaineiden valmistuksessa (Wang ym. 2019). Vedyn tuotanto, varastointi ja käyttö on vielä kallista, joten se soveltuu lähinnä suuremman kokoluokan energiayhteisöihin, joissa ylijäämä sähköä on paljon. Tulevaisuudessa vetytalon yleistyessä ja vaadittavien laitteistojen hintatason laskiessa on vedyn hyödyntäminen skaalattavissa pienempäänkin kokoluokkaan.

## ENERGIAYHTEISÖ KOTKAN KANTASATAMAAN

Hankkeessa energiayhteisön ideaa sovelletaan Kotkan Kantasataman alueelle. Alueella energiayhteisön muodostaisivat Xamkin uusi kampus, Tapahtumakeskus ja merimuseo Velamo. Tarkoituksena on selvittää ja ratkaista energiayhteisöön liittyviä haasteita käytännön kohteen avulla. Kohteessa tehdään alustavia suunnitelmia sähkön tuotannolle, jakelulle ja varastoinnille ja perehdytään muun muassa lakitekniisiin asioihin ja verotukseen.

## YHTEENVETO

Energiayhteisöissä on suuri potentiaali lisätä hajautettua uusiutuvien energianlähteiden käyttöä sähkön tuotannossa vaarantamatta sähköverkon toimintavarmuutta. Aurinko- ja tuulivoiman kehittyessä niiden yleistymisen myötä kasvaa myös koko energiayhteisön taloudellinen kannattavuus. Sähkövarastojen kehittyminen ja niiden älykäs hyödyntäminen lisäävät entisestään energiayhteisöjen kannattavuutta, joustavuutta ja monipuolisuutta.

Haasteina energiayhteisöillä on, että idea on niin uusi, että esimerkkikohteita on vielä vasta muutamia ja sähkömarkkinalaissa on monia energiayhteisöihin liittyviä tulkinnanvaraisia pykäläiä. Sähkömarkkinalain muutos, sen tulkinnat ja mahdollisuudet selkeytyvät hankkeen aikana.

## LÄHTEET

Hu, Q., Lin, J., Zeng, Q., Fu, C. & Li, J. 2019. Optimal control of a hydrogen microgrid based on an experiment validated P2HH model. *IET Renewable Energy Generation*, Vol 14, 3. painos, s. 364–371. ISSN: 1752–1416.

Huckaba, A., Sun, D., Sutanto, A., Albertus, A., Mensi, M., Zhang, Y., Queen, W. & Nazeeruddin, M. 2020. *Energy technology* (Weinheim, Germany), Vol 8, 7. painos, s. 200-239. ISSN: 2194–4288.

Kymenlaakson Sähkö. Sähkön henkilökohtainen kulutuksen seurantapalvelu.

Motiva. 2020. Sähkön pientuotanto. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/sahkon\\_pientuotanto](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/sahkon_pientuotanto) [viitattu 25.7.2021].

Sähkömarkkinalaki 2013/588. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588>

Taner T. 2021. The novel and innovative design with using H2 fuel of PEM fuel cell: Efficiency of thermodynamic analyze. *Fuel* (Guildford), Vol 302, s 121109. ISSN: 0016-2361.

Tilastokeskus. 2020. Energian kokonaiskulutus väheni ja uusiutuvan energian kulutus kasvoi prosentoin vuonna 2019. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://www.stat.fi/til/ehk/2019/ehk\\_2019\\_2020-12-21\\_tie\\_001\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/ehk/2019/ehk_2019_2020-12-21_tie_001_fi.html) [viitattu 20.8.2021].

VortexBladeless. 2020. First wind turbine without blades nor gears. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://vortexbladeless.com/technology-design/> [viitattu 1.9.2021].

Wang, L., Rao, M., Diethelm, S., Li, T.-E., Zhang, H., Hagen, A., Maréchal, F. & Van Herle, J. 2019. Power-to-methane via co-electrolysis of H2O and CO2: The effects of pressurized operation and internal methanation. *Applied energy*, Vol 250, s. 1432–1445. ISSN: 0306-2619.

# KYMENLAAKSOLAISEN SYMBIOOSIN JÄLJILLÄ

Kirsi Tallinen & Satu Huurtomaa

Kymenlaaksossa on useita toimijoita, jotka hyötyisivät yhteistyöstä. Samoin on tiloja, jotka tarjoavat toiminnalle hyvät, valmiit puitteet. Maaseutualueiden kasvun ja kehittymisen näkökulmasta jaettiin tietoa yhteistyön mahdollisuuksista ja etsittiin potentiaalisia toimijoita niin maaseudulta kuin muista yrityksistä maaseudun olemassaoloa turvaavaan ja kehittävään yhteistyöhön. Toiminnan keskeisenä hyötynä haettiin yrityksen ympäristöystävällisyyden ja taloudellisen tehokkuuden kasvattamista hyödyntämällä muiden lähialueen yritysten toimintaa. Biokaasun tuotantoon nousi esiin vahvaa kiinnostusta.

Xamkin Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusalan toteuttamassa Kymenlaakson agroekologinen symbioosi -hankkeessa tavoitteena oli tunnistaa ja löytää potentiaaliset symbioositoiminnasta kiinnostuneet maaseudun toimijat sekä lisätä tietoa symbioositoiminnan tarjoamista hyödyistä Kymenlaaksossa. Tavoitteena oli myös edistää Kymenlaakson alueen maatalouden ja elintarviketuotannon materiaalivirtojen hyödyntämistä tehokkaasti ja vähemmän ympäristöä kuormittavasti sekä edistää uusiutuvan energian käyttöä maataloudessa ja elintarviketuotannossa. Vuosien 2020–2021 aikana toteutetulle hankkeelle oli rahoituksen myöntänyt Kaakkois-Suomen ELY-keskus Manner-Suomen maaseudun kehittämisohjelmasta 2014–2020.

## JOHDANTO

Kymenlaakson agroekologinen symbioosi -hankkeessa kartoitettiin maaseudulla toimivien yritysten kiinnostusta ja mahdollisuuksia muodostaa symbiooseja. Agroekologisella symbioosilla tarkoitetaan kiertotalouden mukaista ruokajärjestelmää, jossa lähellä toisiaan sijaitsevat alku- ja elintarviketuotannon yritykset toimivat yhdessä. Onnistunut symbioositoiminta mahdollistaa uusien liiketoimintamallien luomista sekä edesauttaa toimijoiden päästöjen vähentämistä sivuvirtojen hyötykäytön ja uusiutuvan energian yhdistämisen kautta. Samalla oman yrityksen toiminnan kannattavuus voi parantua merkittävästikin. Agroekologisen symbioosin lisäksi hankkeessa tarkasteltiin myös muita mahdollisia symbiooseja, kuten matkailuun ja majoitukseen liittyvää yhteistyötä sekä tyhjillään olevien tilojen hyötykäyttöä Kymenlaaksossa.

Hankkeessa toteutettiin syksyllä 2020 verkkokysely maatalousyrittäjille ja kevään 2021 aikana tarkennettiin tuloksia ottamalla yhteyttä kyselyyn vastanneisiin tahoihin puhe-

limitse. Merkittävimpanä esiin nousi usealta taholta kiinnostus biokaasuun (Huurtomaa ym. 2021). Biokaasun potentiaali ei yllättänyt, sillä maatalojen toiminnassa muodostuu monia biokaasulaitoksen syötteenksi kelpaavia raaka-aineita suuria määriä, ja eläinten lanta sekä maatalojen vihermassat muodostavatkin erinomaisen syötepohjan biokaasulaitokselle. Biokaasuntuotanto tarjoaa myös monia hyötyjä tiloille. Biokaasuntuotannossa syntyvä mädätejäännös voidaan levittää pelloille ravinteeksi ja itse biokaasu voidaan käyttää raakakaasuna tilojen lämmön- ja sähköntuotantoon tai vaihtoehtoisesti jalostaa vaikkapa liikennepolttoaineeksi eteenpäin myytäväksi. Paljon riippuu siitä, kuinka paljon syötettä on lähialueella tarjolla, sekä tietenkin siitä, mitkä ovat alueen maatalojen mielenkiinnonkohteet ja mahdollisuudet investointeihin.

## SYMBIOOSITOIMINNAN KÄYNNISTÄMISEEN LIITTYVIÄ HAASTEITA

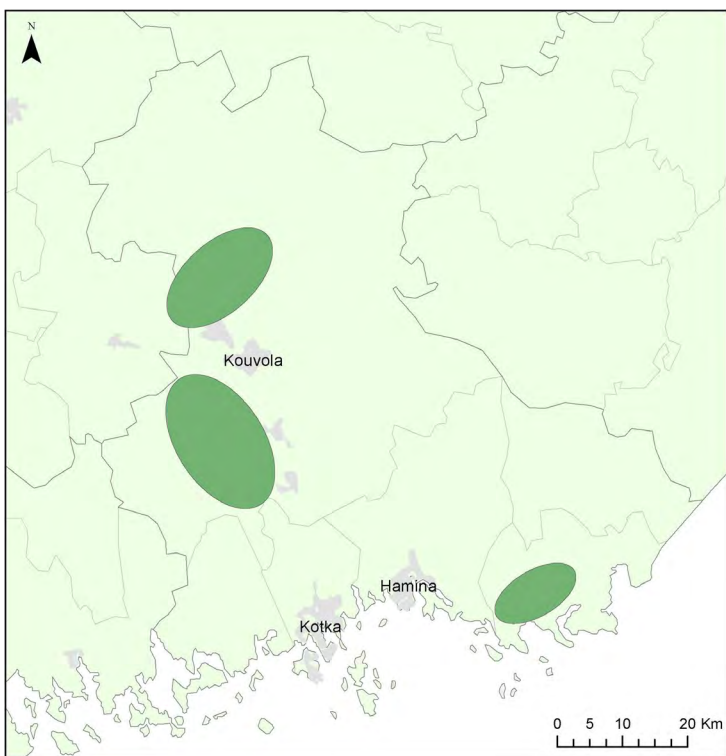
Symbioositoiminnassa toimijoiden välinen maantieteellinen etäisyys on keskiössä, ja toimijoiden läheinen sijainti on yksi edellytys kannattavalle symbioositoiminnalle. Myös muita edellytyksiä kannattavalle symbioositoiminnalle on tunnistettu. Toimijoiden kiinnostus työskennellä yhdessä ja halu kehittää omaa toimintaansa ovat lähes yhtä tärkeitä kuin fyysinen läheisyys. Ehkäpä vieläkin tärkeämmäksi tekijäksi hankkeen aikana nousi veturiyrityksen löytyminen. Symbioositoiminnan käynnistymisen kannalta on oleellista, että löydetään aktiivinen toimija, joka sitoutuu viemään toimintaa eteenpäin. Erilaiset ennakoasenteet vaikuttavat myös toimijoiden kehittämisintoon.

### ENNAKKOASENTEET

Ennakoasenteiden vaikutuksesta esimerkkeinä ovat Kymenlaaksossa Virolahdella sijainnut biokaasulaitos sekä Kouvolan Myllykoskelle vajaa kymmenen vuotta sitten suunniteltu bioetanolitehdas. Haminan Energian rakennuttaman biokaasulaitoksen toiminta jouduttiin ajamaan alas laitostoimittajan ongelmien takia. Bioetanolitehtaan perustaminen puolestaan kariutui aikoinaan muun muassa rahoittajien perääntymisen ja raaka-aineen saatavuuden takia. Kiinteistön käyttöön liittyi silloin myös epävarmuuksia vielä siinä vaiheessa, kun investointipäätöksiä olisi jo pitänyt tehdä (Yle uutiset 2017).

Vaikka moni asia tehtäisiin uusien yrittäjien toimesta toisin, ihmisten mieliin jää helposti aiempi epäonnistuminen ja kynnyksen lähtöä mukaan on toisella kerralla korkeampi. Kymenlaakson agroekologinen symbioosi -hankkeen aikana tehdyssä kyselyssä yksi biokaasusta kiinnostuneiden keskittymä sijaitsi Virolahdella (kuva 1), mutta avoimissa vastauksissa nousi esiin epäonnistunut yritys saada biokaasulaitos kannattavaksi alueella. Vaikka Myllykosken ongelmat ovat osin ratkottu, tulee alueen uuden kehittämisen kanssa panostaa vahvasti vanhojen kokemusten hälventämiseen, jotta maaseutuyrittäjät kiinnostuvat toiminnasta.





**KUVA 1.** Hankkeessa lähetetyn, maatalousyrittäjille suunnatun kyselyn perusteella yksi biokaasusta kiinnostuneiden keskittymä löytyi Virolahdelta. (Kartta: Maanmittauslaitos ja Ek 2021)

## VETURIYRITYKSEN SUURI MERKITYS

Oli kyse millaisesta symbioositoiminnasta tahansa, veturiyrityksen merkitystä ei voi korostaa liikaa. Tarvitaan toimija, jonka ympärille symbioosia voidaan alkaa rakentaa. Mukaan tarvitaan toki myös muita kiinnostuneita, mutta aktiivisen toimijan löytäminen on symbioositoiminnan aloituksen kannalta keskiössä. Mikäli kaikilla yhteistyöstä kiinnostuneilla toimijoilla on oletus, että joku muu vie toimintaa eteenpäin ja on itse vain mukana, eikä selkeää veturia toiminnalle löydy, kannattavaa ja pitkäkestoista symbioositoimintaa on haasteellista saada aikaan. Veturiyrityksen löytyttyä voidaan lähialueelta alkaa etsiä muita kiinnostuneita ja saada aikaan symbioositoimintaa, jossa eri osapuolet hyötyvät toistensa toimista ja parhaassa tapauksessa saavat oman yrityksensä taloudellista kannattavuutta nostettua.

Alueellisten esimerkkien puuttuminen vaikuttaa monesti uusien asioiden yleisyyteen ja halukkuuteen lähteä toimintaan mukaan ja kokeilemaan. Mikäli lähialueelta löytyy esimerkiksi tilallisten omistama, toimiva ja kannattava biokaasulaitos, innostaa se eri tavalla

kuin kauempana sijaitseva. Vaikka eri puolilta Suomea löytyy jo tänä päivänä esimerkkejä toimivista tilallisten omistamista biokaasulaitoksista, ei vastaavanlaisia Kymenlaaksossa vielä ole. Kun omasta maakunnasta ei löydy yhtäkään, voi olla hankalaa ja hieman arveluttavaakin olla ensimmäisten joukossa omalla alueellaan.

Kyselytuloksista ilmeni, että monesti viljelijät myös mieltävät itsensä raaka-aineen tuottajiksi eivätkä niinkään osakkaasi biokaasulaitoksessa. Hankkeen aikana tehdyissä puhelinhaastatteluissa ilmeni, että suurimmalla osalla biokaasulaitoksesta kiinnostuneista tilallisista ei ollut ajatusta biokaasun jatkojalostuksesta (Huurtomaa ym. 2021). Ajatus raaka-aineen tuottajasta biokaasulaitoksen osakkaaksi voikin vaatia kypsytelyä ja aikaa, vaikka kannattavuuslaskelmat näyttäisivätkin siltä, että tilallisten omistama yhteisbiokaasulaitos kannattaa perustaa. Lisäksi tilalliset ovat usein itsenäisiä yrittäjiä, ja työskenneltäessä on saatettu tottua tietynlaiseen omavaraisuuteen. Joillekin ajatus yhteisen yrityksen perustamisesta muiden kanssa voi tuntua vieraalta ajatukselta, eikä asiaa välttämättä ole sen koommin edes ajateltu.

Symbioositoiminnan tiedetään tuovan yrityksille monia hyötyjä ja mahdollisuuksia, mutta toiminnan käynnistämiseen liittyy kuitenkin paljon epävarmuutta ja epäilyksiä. Monet yritykset, etenkin maatilat, saattavat tänä päivänä joutua kamppailemaan yrityksensä kannattavuuden kanssa, eikä suuria investointeja välttämättä pystytä tekemään, vaikka tahtoa riittäisi. Joillain yrityksillä saattaa myös olla epävarmuutta tulevasta – löytyykö omalle toiminnalle ollenkaan jatkajaa –, joten on luonnollistakin, ettei toiminnan kehittämiseen välttämättä ole intoa eikä investointeja lähdetä tekemään. Toiminnan jatkuvuuden ollessa epävarmaa on hankalaa investoida tulevaan, ja parhaat mahdolliset tuotot halutaan mahdollisimman pian eikä vasta kymmenen vuoden päästä. Toisaalta symbioositoimintaa kartoittaessa esiin tulee usein tietojen saannin hankaluus. Kaikki osalliset eivät välttämättä halua jakaa avoimesti tietoa, tai tarkkaa tietoa ei yksinkertaisesti ole. Tarkkaa arvioita muodostuvista lanta- tai vihernurmimääristä voi olla hankalaa arvioida, eikä alustavissa kyselyissä välttämättä koeta täysin paikkansapitävien arvioiden antamista niin tärkeänä. Vasta kun konkreettisia suunnitelmia esimerkiksi biokaasulaitoksen perustamisesta alkaa olla, syötemäärätkin tarkentuvat, määrien arviointiin käytetään enemmän aikaa ja ne vastaavat paremmin todellisia määriä.

Paikallisten toimijoiden tueksi, veturiyritykseksi, voi olla tarpeen etsiä kansallisesti merkittäviä toimijoita, jolloin biokaasutoiminta kokonaisuudessaan tulisi osaksi arkipäivää, vaikka kaasuntuotannosta ei itse merkittävää lisätuloa saisikaan. Ollakseen osana biokaasun tuotantoketjua toimijalle riittäisi raaka-aineen tuottaminen ja mädätteen käyttäminen, jolloin toisessa aallossa voisi sitten olla jo kiinnostusta oman laitoksen perustamiseen lähialueelle.

## UUSIA MAHDOLLISUUKSIA NOSTETTAVA ESIIN

Tukirahoituksen mahdolliset muutokset vaikuttavat viljelijöiden kuten muidenkin intoon investoida. Toukokuun alusta 2021 maatilojen biokaasuinvestointien tuki nousi 40 prosentista 50 prosenttiin, ja korotuksen arvioidaan lisäävän maatilojen biokaasuinvestointien määrää (Maa- ja metsätalousministeriö 2021). Tukien kannalta pohditaan joskus tarkastikin, milloin kannattaa investoida. Jos muutaman vuoden päästä voisi saada enemmän tukia, investointeja saatetaan lykätä aikaan, jolloin se on kannattavampaa, mikä on täysin loogista missä tahansa yritystoiminnassa. Tämän takia ennakoitava ja mahdollisimman selkeä ja jatkuva tukipolitiikka olisi toivottavaa. Mikäli tulevaisuuden tukipolitiikasta ei ole varmuutta, pitkän tähtäimen suunnitelmia ei välttämättä uskalleta tehdä. Toisaalta parantunut teknologia sekä sen saatavuus ja yleisesti kiinnostus uusiutuvan energian positiivisiin talous- ja ympäristövaikutuksiin on lisännyt maatilojen kiinnostusta biokaasun tuotantoon.

Virolahdelle ei toistaiseksi ole suunniteltu uutta biokaasulaitosta, mutta Myllykoskelle vanhan paperitehtaan tiloihin suunnitellaan parhaillaan uutta biojalostamo. Eroja aiempaan hankkeeseen on useita: nykyisillä toimijoilla on jo omistajuus tehdaskiinteistöön ja raaka-aineiden kartoituksessa otetaan huomioon oljen lisäksi myös muut mahdolliset vaihtoehdot. Lisäksi Euroopan unionin RED II -direktiivi pyrkii lisäämään nestemäisten liikennepolttoaineiden bioperäistä osuutta unionin alueella vuoteen 2030 mennessä, mikä nostaa kysyntää toisen sukupolven biopolttoaineille. Sijoittajilla on myös vahva usko julkisen rahoituksen mahdollisuuteen, sillä jo aiemmalle hankkeelle myönnettiin työ- ja elinkeinoministeriöstä 30 miljoonan euron tuki vuonna 2014 (Yle uutiset 2017).

Kymenlaakson alueen biokaasun tuotantoon on alustavissa selvityksissä noussut esille kiinnostusta sekä tarvetta. Raaka-aineita alueella on, samoin tarvetta sekä monivuotisille nurmikasveille että eloperäisille kierrätyslannoitteille. Nämä tarpeet johtuvat yleisesti siitä, että koko Kaakkois-Suomessa kotieläintalous on melko vähäistä, mutta viljatuotanto on muuta Suomea keskimääräistä runsaampaa: viljakasvien osuus tuotantoalasta on seitsemän prosenttiyksikköä suurempi kuin koko maan keskiarvo, kun taas tuotantonurmien osuus on kahdeksan prosenttiyksikköä alhaisempi maan keskiarvoon nähden (Luonnonvarakeskus, 2021). Runsas viljanviljely merkitsee, varsinkin yksittäisten tilojen kohdalla, yksipuolistan viljelyä ja maan orgaanisen aineksen kulumista ajan saatossa. Tämä puolestaan vaarantaa ravinnetalouden tasapainoa, tuottavuutta ja toimivaa vesitaloutta. (Hiitelä & Kari 2021)

## YHTEENVETO

Kymenlaaksossa on potentiaalia biokaasun tuotannon kasvattamiselle pääosin maatalousperäisillä syötteillä. Kun saadaan potentiaalisin sijoituspaikka kiinnostuksen ja raaka-ainevarantojen perusteella määritettyä, voidaan koota alueen ympäristöstä toimijoita, jotka biokaasun tuotantoon voivat liittyä. Konkreettisten laskelmien ja kannattavuuden arvioinnin kautta löytynee yrittäjiä viemään maakuntaa kohti vihreämpää tulevaisuutta.

## LÄHTEET

Hiitelä, Juha. ProAgria Etelä-Suomi & Kari, Maarit. ProAgria Keskusten Liitto. Raportti: Kiertotalouden esiselvitys Kymenlaaksossa. 2021. ProAgria Etelä-Suomi. Ei julkinen.

Huurtomaa, S., Tallinen, K., Kari, M. & Hiitelä, J. 2021. Kymenlaakson agroekologinen symbioosi. Hankkeen loppujulkaisu. Xamk kehittää 166. Saatavissa: <http://www.urn.fi/URN:ISBN:978-952-344-373-0> [viitattu 31.8.2021]

Luonnonvarakeskus. Maatalouslaskenta 2020: Maa- ja puutarhatalouden energiankulutus 2020 (ennakko). 18.5.2021. Wwww. Saatavissa: [https://stat.luke.fi/maatalouslaskenta-2020-maa-ja-puutarhatalouden-energiankulutus-2020-ennakko\\_fi](https://stat.luke.fi/maatalouslaskenta-2020-maa-ja-puutarhatalouden-energiankulutus-2020-ennakko_fi) [viitattu 2.7.2021]

Maa- ja metsätalousministeriö. 2021. Maatilojen biokaasuinvestointien tuki nousee. Uutinen. Saatavissa: <https://mmm.fi/-/maatilojen-biokaasuinvestointien-tuki-nousee> [viitattu 31.5.2021].

Maanmittauslaitos & Ek, K. 2021. Hallintorajat, teemakartoille, ei merialueita, 1:1 000 000. CSC – Tieteen tietotekniikan keskus Oy. Saatavissa: <https://etsin.fairdata.fi/dataset/218d5c60-ab60-4d5c-80ab-2fa15f54fa96/data> [viitattu 27.5.2021].

Yle uutiset. 2017. Aate Laukkanen Myllykosken bioetanolitehtaan toteutumisesta kiinalaisrahalla: ”On se todennäköisempää kuin 50 prosenttia.” Ville Pisto 3.2.2017. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-9441062> [viitattu 28.6.2021]

# SOVELTAVA TUTKIMUS KIERTO- TALouden KESKIÖSSÄ: KIERTOTALouden OSAAMIS- KESKUSKONSEPTI HYÖTYVIRTA- ALUEELLE

Melina Maunula & Juha Solio & Ari Haapanen

Alueellisen kiertotalouden innovaatioekosysteemin edistämiseksi suunnitellaan Kymenlaak-  
sossa edistysellistä kiertotalouden osaamiskeskusta Hyötyvirta-yritysalueelle. Se paran-  
taisi kiertotalouden soveltavan tutkimuksen ja koulutuksen puitteita Kaakkois-Suomessa  
sekä tarjoaisi liiketoimintaa tukevia tiloja ja palveluita kiertotaloustoimijoille. Artikkelissa  
esitetään alueen vahvuuksiin nojautuva kiertotalouden osaamiskeskuskonsepti erityisesti  
keskittyen sen tutkimus-, kehitys- ja innovaatiopalveluiden (TKI) sekä palvelu- ja bio-  
tuotemuotoilun osuuteen, jonka painopisteiksi ovat valikoituneet kiertotalousmateriaalit,  
energiaprosessit ja hiilensidonta.

## JOHDANTO

Kiertotalouden ratkaisut edistävät kestävästä kehitystä ja vastaavat resurssiniukkuuden ja yli-  
kulutuksen mukanaan tuomiin haasteisiin. Kiertotalous on luonteeltaan toimialarajapinnat  
ylittävää, ja näin ollen sen periaatteisiin nojautuvan yhteiskunnan edistäminen edellyttää toi-  
mia kaikilla yhteiskunnan ja liiketoiminnan sektoreilla. Vaikka lähtökohtaisesti talouskasvu  
on ristiriidassa kiertotalouden tavoitteiden kanssa (George ym. 2015), on kiertotaloudella  
kuitenkin havaittu olevan myönteinen vaikutus EU-valtioiden kansantalouteen (Busu 2019).

Kiertotalouden edistämiseksi on sekä alueellisia (Kymenlaakson liitto 2021 2019), kansallisia  
(Järvinen ym. 2019, Sitra 2016, Valtioneuvosto 2021) että kansainvälisiä (mm. OECD 2021,  
Euroopan komissio 2020) strategioita ja toimenpideohjelmia. Kiertotalouden edistämislähtö-  
odotetaan merkittävää roolia rakennemuutoksessa ympäristöllisesti ja sosiaalisesti kestävään  
talousjärjestelmään. Kiertotalousstrategioiden kansallinen ja alueellinen toimeenpano vaatii  
resurssien kohdentamista kiertotalouden toimintaedellytysten parantamiseen.

Kiertotalouden edistyminen luo merkittäviä mahdollisuuksia yrityksille, jotka kykenevät  
tarttumaan avautuviin liiketoimintamahdollisuuksiin (Sorasahi & Sinervo 2019). Kierto-

talousteknologioiden ja -liiketoiminnan kehittyminen edellyttää kuitenkin yrityksissä ja yhteiskunnassa alan osaamisen lisäämistä (Sitra 2021, Burger ym. 2019). Koulutusorganisaatiot ovat merkittävässä osassa osaavan työvoiman saatavuuden turvaajina sekä tutkinto- että täydennys-, lisä- ja muuntokoulutuksen tarjoajina. Lisäksi tarvitaan alan tutkimus- ja kehitystoimintaa aina laboratoriomittakaavasta pilottimittakaavaan.

Kymenlaaksossa on valmisteltu pitkäjänteisesti toimia alueellisen kiertotalouden innovaatioekosysteemin tukemiseksi. Innovointi vaatii luottamusta, minkä rakentuminen puolestaan vaatii aikaa ja yhteistyöllä saavutettavissa olevien hyötyjen ja yhteisten tavoitteiden määrittelyä. Kiertotalouden innovaatioekosysteemi yhdistää toimijoita eri toimialoilta tukeutuen Kaakkois-Suomen alueellisiin vahvuuksiin bionaloudessa, ympäristöliiketoiminnassa ja logistiikassa.

## **HYÖTYVIRTA-ALUEEN KEHITTÄMINEN JA KOSKES-HANKE**

Aluekehitysyhtiö Kouvola Innovationin koordinoiman KOSKES – kiertotalouden osaamiskeskus -hankkeen tavoitteena on luoda yhteinen visio alueellisen kiertotalouden kehittämistarpeista. Sidosryhmien tarvekartoituksen pohjalta hahmotellaan Kouvolan Keltakankaalle sijoittuvalle ympäristöliiketoimintaan painottuvalle Hyötyvirta-yritysalueelle kiertotalouden osaamiskeskuksen tilat ja toimintamalli vahvistaen kiertotalouden kehitystä ja yhteistyötä sekä luoden edellytykset alueellisen kiertotalouden innovaatioekosysteemin hermokeskukseksi muodostuvan osaamiskeskuksen rakentumiselle. Hankkeen päärahoituslähde on Euroopan aluekehitysrahasto ja myöntäjänä Kymenlaakson liitto.

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun (Xamk) osuus hankkeessa painottuu TKI-ympäristön sekä palvelu- ja biotuotemuotoilun alustan konseptointiin sekä yhteistyössä Kouvolan seudun ammattiopiston kanssa kiertotalouden oppimisympäristön ideointiin. Kumppanuukia kiertotalouden eri osa-alueilla sekä parhaita käytänteitä ja kehittämisen mahdollisia sudenkuoppia on tunnistettu kansainvälisen ja kansallisen benchmarkingin kautta.

Hyötyvirta-alueelle sijoittuva osaamiskeskus loisi alueelle merkittävää kilpailuetua. Erotuksena useimpiin kiertotalousalueisiin keskus ei painottuisi yksinomaan tuotteiden linkkaaren loppuun eikä nojautuisi yksinomaan tiettyyn toimialaan. Kiertotalouden innovaatioekosysteemin kehittymisen näkökulmasta tämä on tärkeää, sillä innovaatiopotentiaali on suurimmillaan juuri toimialojen yhdyspinnoilla. Soveltavan tutkimuksen vahva läsnäolo eli BioSammon linkittyneisyys osaamiskeskuksen toimintaan edesauttaisi yritysten tuotekehitystä, verkostojen muodostumista sekä referenssikohteiden syntymistä.

TKI-konseptia kehitetään vastaamaan Kymenlaakson yritysten tarpeisiin. Tämä tarkoittaa paitsi nykyisellään biokierrotaloudessa toimivien yritysten tarpeiden huomioimista, myös

osaamisen ja palveluiden tarjoamista yrityksille, jotka ottavat ensiaskeliaan kiertotalouden suuntaan. Pilottimittakaavan testausympäristö mahdollistaa kiertotalouden kehittymisen ja parantaa siihen liittyviä toimintaedellytyksiä Kymenlaaksossa.

Yritysten sekä tutkimus- ja kehittämisorganisaatioiden lisäksi osaamiskeskus palvelisi kiertotalouskehitystä alueella tarjoten tiloja ja palveluita esimerkiksi varhaiskasvatuksen, koulutuksen ja kulttuurin toimijoille. Tilojen ja laitteiden hyödyntäminen kiertotalouden ja vihreän energiantuotannon oppimisympäristönä tukee osaamisen kehittymistä sekä alueen koulutusorganisaatioiden vetovoimaisuutta ja yhteistyötä.

## INNOVAATIOEKOSYSTEEMI

Anjalankoskella Valtatie 15:n varressa sijaitseva Hyötyvirta-alue on ympäristöliiketoimintaan painottuva, kehittyvä yritysalue. Nykyisellään siellä sijaitsee kymmenkunta yritystä, joista suurimpina Fortum ja Kymenlaakson Jäte, mutta tilaa riittää reilusti myös uusille sijoittujille. Vaikka alue ei ehkä nykyisellään juuri erotu vastaavista yritysalueista Suomessa, ovat sen varalle tehdyt suunnitelmat paljon kunnianhimoisempia: Hyötyvirta-alueesta rakennetaan yhteistyössä uuden ajan kiertotalouden innovaatioalustaa, joka tuo toimijoiden saataville yrityspalveluita, modernit osaamiskeskustilat sekä monipuolisesti soveltavaa tutkimusta. (Penttilä 2021)

Yrityksissä resurssit kohdennetaan tyyppillisesti ja ymmärrettävästi lähinnä oman organisaation vahvuuksien, olemassa olevien kumppanuuksien ja jo kannattavaksi todettujen ratkaisujen kehittämiseen. Aluekehittämis- tai TKI-vetoiseen kehittämiseen osallistumalla yritykset voivat laajentaa kiertotalousratkaisujen ja -verkostojen tuntemustaan sekä saada vahvistusta kauempana kiertotalouskehityksen horisontissa siintävistä mahdollisuuksista.

Innovaatioiden syntymisen kannalta hedelmällisessä, toimialojen rajapinnoilla tapahtuvassa yhteistyössä tarvitaan kykyä muotoilla ongelman asettelu yhteisesti ratkaistavaksi sekä tuoda yhteen eri alojen osaajia. Tarvittavan osaamisen tunnistamisella sekä verkostoilla on suuri merkitys. Toki tarvitaan myös TKI-toiminnan tila- ja laiteresurseja.

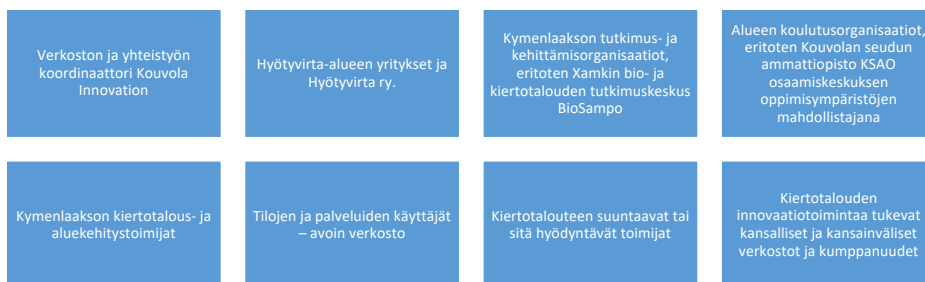
Kiertotalouden osaamiskeskuksen TKI-konseptia suunnitellaan vahvasti Xamkin bio- ja kiertotalouden tutkimuskeskus BioSammon osaamiseen ja laitekantaan tukeutuen. BioSammon TKI-toiminta on vahvasti kehittymässä teollisten bio- ja kiertotalousratkaisujen innovaatioympäristöksi. Samalla energiaprosessien kehitys suuntautuu tulevaisuudessa yhä vahvemmin hajautetun energiantuotannon ratkaisujen sijasta älykkäisiin ratkaisuihin, sähkön varastointiin ja vetytalouden energiaratkaisuihin.

Viime vuosina BioSammon toiminta on vahvistunut erityisesti kierrätysmateriaalien käsittelyn suhteen. Prosessoidut kierrätysraaka-aineet pyritään tuotteistamaan uusiksi tavaroiksi

ja tarvikkeiksi sekä eri tuotantoprosesseihin sopiviksi tiiviissä ja luottamuksellisessa yhteistyössä yrityskumppaneiden kanssa. BioSammon laitekantaa on lisätty monilla murskaukseen ja jauhatukseen liittyvillä menetelmillä ja kehitetty prosesseja, joilla tehokkaan materiaalien prosessoinnin kautta luodaan kierrätysmateriaaleja, joilla on mahdollista korvata neitseellisiä raaka-aineita erilaisissa lopputuotteissa. Analytiikan menetelmiä on vahvistettu partikkelianalyysiaattorin hankinnalla sekä seulontaan liittyvillä seulapakalla ja seulakoneella. Myös hajautetun energiantuotannon menetelmiä on uusittu ja niistä on toteutettu enemmän AMK:n soveltavan tutkimuksen tarpeisiin sopivia järjestelmiä. Biohiili on merkittävässä roolissa, ja sen tuottamiseen sekä aktivointiin on BioSammassa panostettu ja tullaan vielä panostamaan lisää. BioSammon TKI-toiminnan vahvistaminen luo merkittävää synergiaetua suhteessa Hyötyvirta-alueen kiertotalouden osaamiskeskuksen edistämiseen tarjoten edellytykset kansallisesti ja kansainvälisesti linkittyneen osaamiskeskittymän syntyemiselle.

Osaamiskeskuksen suunnittelussa on ensiarvoisen tärkeää varmistaa, että sen toiminta vastaa alueen kiertotalouden kehittymisen tarpeisiin. Läheinen yhteistyö yritysten kanssa sekä tutkimus- ja kehityshankkeiden välisen tiedonvaihdon täysimittainen hyödyntäminen tukevat tätä tavoitetta.

Innovaatioekosysteemin osapuolten ja niiden roolien tunnistaminen mahdollistaa sen, että keskus palvelee kiertotalouskehitystä laaja-alaisesti, mutta ilman päällekkäisyyksiä muihin palveluihin. Kuvassa 1 on esitetty ydintoimijat.



**KUVA 1.** Ydintoimijat alueellisessa kiertotalouden innovaatioekosysteemissä



## KIERTOTALOUDEN OSAAMISKESKUKSEN TKI-KONSEPTI

Kiertotalouden osaamiskeskuskonseptia on suunniteltu Kouvola Innovationin koordinoinnissa vastaamaan alueen yritysten tarpeisiin, mutta myös palvelemaan kiertotalouden kehittymistä eri sidosryhmät sekä TKI-toiminnan mahdollisuudet huomioiden. Osaamiskeskukseen ideoidut kiertotaloutta tukevat toiminnot ja palvelut on esitetty alla taulukon 1 vasemmanpuoleisessa sarakkeessa.

Konsepti nojautuu ajatukselle kiertotalouteen innostamisesta – koko tila toimisi esittelypaikkana kiertotalousratkaisuille. Osaamiskeskus toisi yhteen kuntalaiset eri ikäryhmistä, päättäjät, opiskelijat, tutkijat, yritykset ja kansainväliset vieraat. Sen oheen suunniteltava digitaalinen alusta tukisi paikkariippumattoman yhteistyön mahdollisuuksia ja lisäisi osaltaan toiminnan vaikuttavuutta.

Oppimista voidaan tukea osaamiskeskuskonseptin puitteissa käytännönläheisillä ja uusinta teknologiaa hyödyntävillä oppimisympäristöillä sekä eri alojen opiskelijoista koostuvien tiimien toimintaa mahdollistaen. Työllistyvien opiskelijoiden myötä kiertotalousosaaminen siirtyy yrityksiin. Myös yrittäjyyden tukitoimet edistävät kiertotalousinnovaatioihin perustuvan liiketoiminnan syntyä.

Osaamiskeskuksen tilaratkaisujen tulisi tukea yhteistyötä ja tuoda kiertotalouskehitystä näkyväksi kuitenkin huomioiden yritysten innovaatiotoimintojen edellyttämä salassapito. Osaamiskeskus toimisi porttina Hyötyvirta-alueelle.

Kokonaiskonseptin hahmottelun lisäksi on tuotettu konsepti kiertotalouden osaamiskeskuksen TKI-ympäristölle (ks. taulukko 1, 2. sarake). TKI-ympäristöä ja siihen liittyviä tilatarpeita on kartoitettu BioSammon toimijoiden työpajoissa keväällä 2021, osana ohjausryhmätyöskentelyä sekä huomioiden betonitestausta-, päästömittausta- ja CE-merkintäpalveluita tuottavan Kymilabs-tutkimusyksikön ja Kouvolan kampuksen kehittyvän biotuotemuotoilun koulutus- ja tutkimusympäristön tarpeet. Toiminnalla pyritään tulevaisuudessa tukemaan monipuolisesti eri kiertotalouden osa-alueisiin sekä erityyppisten materiaalien hyödyntämiseen liittyvää innovaatiopotentiaalia.

**TAULUKKO 1.** Kiertotalouden osaamiskeskuskonsepti

Kiertotalouden osaamiskeskuskonsepti	
Kiertotaloustoiminta ja -palvelut	TKI-ympäristö
Hyötyvirta-alueen yritystoiminta ja Hyötyvirta ry.	Pilottimittakaavan soveltava tutkimus
Lyhytaikaisesti vuokrattavissa olevat työpisteet sekä toimisto- ja neuvottelutilat	Vuokrattavat laboratorio-, tutkimus-, paja- ja työtilat tuotekehitykseen
Esittely- ja tapahtumatilat	Laboratorio- ja tutkimuspalvelut
Yhteiskäyttö- ja jakamistalouden palvelut	Tuotteistus-, muotoilu- ja palvelumuu- toilupalvelut
Kierrätystavaran kauppa	Kiertotalouden oppimisympäristö mm. ammattiopisto- ja ammattikorkeakouluopiskelijoille
Kahvila ja lounasravintola	Kiertotalouden TKI-hanketoiminta
Tankkauspiste	Kehittyvä laitekanta kiertotalouden TKI:hin
Kiertotalousratkaisujen pilottiympäristö ja esittely-/referenssikohde	Yleishyödyllisen ja alueellisen TKI-työn tulosten esittely
Virtuaalinen kiertotalousalusta kierto- taloustiedon jakamisen, markkinoinnin sekä yritysten välisen, kansallisen ja kansainvälisen yhteistyön tueksi	Virtuaalinen kiertotalousalusta paik- kariippumattoman TKI-yhteistyön ja koulutuksen mahdollistajana sekä tutkimuskeskusten linkittäjänä

Osaamiskeskuskonsepti nojautuu soveltavan tutkimuksen vahvalle läsnäololle. Konseptin vahvuus piileekin nimenomaan siihen sisältyvässä käytännönläheisessä ja alueen yrityksiä hyödyttävässä tutkimus- ja kehitystyössä. Avoin kehittämisympäristö palvelee myös uuden yritystoiminnan syntymistä sekä mahdollistaa modernit ja monialaiset oppimisympäristöt, joita voivat yhtä lailla hyödyntää eri alojen ja opintoasteiden opiskelijat.

Konseptoinnin aikana valikoituneet soveltavan tutkimuksen painopisteet on esitetty kuvassa 1. Kyseessä on pilottimittakaavaan yltävä teollisen kiertotalouden tutkimusympäristö, jonka painopisteet nojautuvat Hyötyvirta-alueen vahvuuksille sekä Kaakkois-Suomen koulutus- ja tutkimusorganisaatioiden osaamiselle. Valitut painopisteet sisältävät paitsi vahvaa keskinäistä synergiaa, ne myös linkittyvät erinomaisesti muihin Kymenlaaksossa ja Kaakkois-Suomessa olemassa oleviin kehittämisen ja yritystoiminnan ympäristöihin.

## TAULUKKO 2. TKI-konseptin painopisteet

### Kiertotalousmateriaalit

- Materiaalin raaka-aineprosessointi (hienonnuks, uutto, pyrolyysi...)
- Tuotekehitys ja ominaisuudet
- Laboratoriosta pilottimittakaavaan
- Biotuotemuotoilu (ja edelleen tuotteistuspolutu)

### Energiaprosessit

- Älykkäät ratkaisut ja sähköön varastointi, vetytalouden energiaratkaisut
- Laaja yritysysteistyö ml. testausympäristö ja demot teknologian kaupallistamisen tueksi
- Hyötyvirta-alueen energiaratkaisujen kehittäminen

### Hiilensidonta

- Biohiileen liittyvien sovellusten kehittäminen
- Rakentamisen ja infran hiilensidontan ratkaisut
- LCA, hiilijalanjälki- ja kädenjälkitarkastelut

Laboratoriomittakaavasta pilottimittakaavaan yltävän kiertotalousmateriaalien tutkimusympäristön muodostaminen tukee vahvasti kiertotalouden innovaatiotoimintaa. Löytämällä Hyötyvirta-alueella olemassa oleville materiaali-jakeille parempia prosessointimenetelmiä ja uusia käyttökohteita tuetaan alueellisen kiertotalousekosysteemin kehittymistä sekä olennaisesti parannetaan tuoteinnovaatioiden ja uuden yritystoiminnan syntyminen edellytyksiä.

Kestävän kehityksen tavoitteiden saavuttamiseksi on merkittävää paitsi lisätä materiaalitehokkuutta ja saavuttaa suljettuja materiaalikiertoja, myös alentaa tuotannon päästöjä. Tässä energiantuotannon menetelmillä on tärkeä rooli. Energiaprosessien kehitys painottuisi osaamiskeskuksessa älykkäiden ratkaisujen ja sähköön varastoinnin kehittämiseen sekä vetytalouden ratkaisuihin. Ratkaisut hyödyttäisivät koko yritysalueutta ja tukisivat ympäristöystävällisten energiaratkaisujen kehittämistä ja kaupallistamista.

Kolmanneksi TKI-painopisteeksi on konseptoinnissa valittu hiilensidonta, jonka menetelmät ja teknologiat tulevat mahdollisesti olemaan ratkaisevassa osassa ilmastonmuutoksen hillinnässä. Käytännössä soveltava tutkimus nojautuisi biohiileen liittyvien sovellusten kehittämiseen, hiilensidontan ratkaisuihin muun muassa rakentamisen tuotteiden osalta sekä elinkaarimallintamisen osaamisen kehittämiseen ja palvelutarjontaan.

## JOHTOPÄÄTÖKSET

Kiertotalouden osaamiskeskus edistäisi kiertotaloutta luoden entistä paremmat edellytykset soveltavalle tutkimukselle ja tuotekehitykselle aina kiertotalousmateriaalien käsittelystä valmiisiin kaupallistettavissa oleviin tuotteisiin. Alueen toimijoille keskus tarjoaisi vuokrattavia toimisto-, paja-, laboratorio-, neuvottelu- ja tapahtumatiloja sekä kattavia kiertotalouden palveluita, kuten kierrätystavaran kauppa, laboratoriopalvelut, kuten koostumusmääritykset, materiaalikäsittely, tuoteominaisuuksien määrittäminen ja analyysipalvelut sekä kiertotalousneuvontaa, yrityspalveluita sekä muotoilun ja palvelumuotoilun osaamista.

Hyötyvirta-konsepti on uutuusarvoinen yhdistäessään jo suunnitteluvaiheesta alkaen kiertotalouden fyysisen kehittämisen ja yritystoiminnan ympäristön ja virtuaalisen kehittämisalustan. Digitaalisuus tarjoaa välineet yhdistää alueellinen läsnäolo sekä kansallinen ja kansainvälinen vaikuttavuus. Digitaalinen alusta mahdollistaa osaamisen ja resurssien laajemman hyödyntämisen, esimerkiksi tutkimuskeskusten välisen yhteistyön. Näin lisätään osaamisen saatavuutta sekä nostetaan ympäristön tunnettuutta ja vaikuttavuutta. Kansainvälisyyden edistäminen hyödyttää alueen yritysten verkostojen luontia ja tukee kansainvälisillä markkinoilla toimimista. Digitaalisten välineiden ja verkostojen omaksumisen lisäksi osaamiskeskuskonseptissa on vahvasti huomioitu rajapinta luovaan talouteen.

Hyötyvirta-alueelle sijoittuvan kiertotalouden osaamiskeskuksen toteutuessa BioSammon toiminnot toisivat sen piiriin biokiertotalouden soveltavaa tutkimusta liittyen kiertotalousmateriaalien, energiaprosessien ja hiilensidonnallisten ratkaisujen kehittämiseen. Xamkin TKI-hanketoiminnalla tuotettavissa oleva osaaminen ja tuki innovaatioekosysteemin kehitykselle mahdollistaa kiertotalouden tuotekehitystä ja kiertotalouden edellyttämän yhteistoiminnan muodostumista. TKI-, palvelu- ja biotuotemuotoilun konseptiin sisältyvät osa-alueet tukevat kiertotalouden innovaatioprosessia aina tuotteistukseen saakka. Keskukseen toiminnot edistävät tuotekehitystä ja kaupallistamista innostavan yhteistoiminnan, yrityspalveluiden sekä saatavilla olevan vahvan palvelu- ja biotuotemuotoiluosaamisen kautta.

Yritysten tiivis yhteistyö koulutusorganisaatioiden kanssa mahdollistaa opiskelijoiden ideoiden ja tuoreen näkemyksen hyödyntämistä esimerkiksi harjoittelujen ja opinnäytetöiden kautta sekä edistää valmistuvien opiskelijoiden sijoittumista alueen yrityksiin. Ammattiopisto- ja ammattikorkeakouluyhteistyö mahdollistaa alueen yritysten tarpeisiin räätälöityvässä olevan koulutuksen sekä osaamisen kehittämistä. TKI-hankkeiden avulla opiskelijat voivat saada ainutlaatuista biokiertotalouden osaamista sekä päästä luomaan urakehityksen kannalta tärkeitä verkostoja.

Xamk profiloituu vastuullisen hyvinvoinnin, teknologian ja luovan talouden korkeakouluksi, jossa on laajaa TKI-toimintaa. BioSampo tuottaa soveltavan tutkimuksen tuloksia alueen yrityksille ja mahdollistaa laaja-alaista kiertotalouden TKI-toimintaa eri toimialoille hyö-

dyntäen tiivistä yhteistyötä Xamkin eri tutkimuskeskusten ja laboratorioiden sekä laajempien yhteishankkeiden ja kumppanuuksien tarjoamien verkostojen kautta. TKI-hankkeiden ja koulutusyhteistyön kautta voidaan merkittävästi tukea innovaatioekosysteemin kehitystä. Soveltavan tutkimuksen osalta BioSampo tarjoaa Hyötyvirta-alueen toimijoille tutkimus- ja kehittämispalveluja liittyen muun muassa kierrätysmateriaalien hyödyntämiseen ja uusiin käyttökohteisiin sekä biohiilen tuotantoon soveltuvien kierrätysbiomassojen käyttöön.

## LÄHTEET

Burger, M., Stavropoulos, S., Ramkumar, S., Dufourmont, J. & van Oort, F. 2019. The heterogeneous skill-base of circular economy employment. *Research Policy*, Vol. 48, Iss. 1, pp. 248–261.

Busu, M. 2019. Adopting Circular Economy at the European Union Level and Its Impact on Economic Growth. *Social Sciences*, Vol. 8, No. 159.

Euroopan komissio. 2020. Uusi kiertotalouden toimintasuunnitelma: Puhtaamman ja kilpailukykyisemmän Euroopan puolesta. Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle. Bryssel 11.3.2020. PDF-dokumentti. Saatavilla: [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0021.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0021.02/DOC_1&format=PDF)

George, D. A.R., Chi-ang Lin, B. & Chen, Y. 2015. A circular economy model of economic growth. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 73, pp. 60–63.

Järvinen, L., Sinervo, R., Laita, S. & Määttä, M. (toim.) 2019. Kriittinen siirto – kiertotalouden tiekartta 2.0. Sitran julkaisuja. PDF-dokumentti. Saatavilla: <https://www.sitra.fi/hankkeet/kriittinen-siirto-kiertotalouden-tiekartta-2/>

Kymenlaakson liitto. 2019. Hiilineutraali Kymenlaakso 2040 -tiekartta. PDF-dokumentti. Saatavilla: [https://www.kymenlaakso.fi/images/Liitteet/ALUEKEHITYS/Hiilineutraali2040/Hiilineutraali\\_Kymenlaakso\\_2040\\_Tiekartta\\_mkvalt\\_joulu\\_2019.pdf](https://www.kymenlaakso.fi/images/Liitteet/ALUEKEHITYS/Hiilineutraali2040/Hiilineutraali_Kymenlaakso_2040_Tiekartta_mkvalt_joulu_2019.pdf)

Kymenlaakson liitto. 2021. Kymenlaakson älykkään erikoistumisen strategia 2.0. PDF-dokumentti. Saatavilla: [https://www.kymenlaakso.fi/images/ris3\\_strategia.pdf](https://www.kymenlaakso.fi/images/ris3_strategia.pdf)

OECD. 2021. Towards a more resource-efficient and circular economy: The role of the G20. A background report prepared for the 2021 G20 Presidency of Italy. PDF-dokumentti. Saatavilla: <https://www.oecd.org/environment/waste/OECD-G20-Towards-a-more-Resource-Efficient-and-Circular-Economy.pdf>

Penttilä, M. 2021. Hyötyvirrasta halutaan kiertotalouden kovin innovaatioalusta. Blogi. Kouvola Innovation. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://kinno.fi/hyotyvirrasta-halu-taan-kiertotalouden-kovin-innovaatioalusta/>

Sitra. 2016. Kierrolla kärkeen: Suomen tiekartta kiertotalouteen 2016–2025. Sitran selvi-tyksiä, no. 117. Helsinki. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://www.sitra.fi/julkaisut/kierrolla-karkeen/>

Sitra. 2021. Kiertotalouden vaikutukset työhön ja osaamiseen: Osaamista kehittämällä kohti reilua siirtymä. Sitra työpaperi. PDF-dokumentti. Saatavilla: <https://media.sitra.fi/2021/03/27163845/sitra-kiertotalouden-vaikutukset-tyohon-ja-osaamiseen-v3.pdf>

Sorasahi, H. & Sinervo, R. 2019. Yritysten kassavirrat pulppuavat jatkossa kiertotaloudesta. WWW-dokumentti. Sitra. Saatavilla: <https://www.sitra.fi/artikkelit/yritysten-kassavirrat-pulppuavat-jatkossa-kiertotaloudesta/>

Valtioneuvosto. 2021. Kiertotalouden strateginen ohjelma. Valtioneuvoston julkaisu. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://ym.fi/kiertotalousohjelma>

# MEPTEK-HANKKEESSA TYÖSKENNELLÄÄN MONINAISILLA MENETELMILLÄ

Sirpa Rahiala & Elias Altarriba & Marko Piispa

MEPTEK-hankkeessa tavoitteena on tuottaa tietoa merialan sidosryhmille erilaisten päästövähennystekniikoiden ominaisuuksista ja kustannuksista. Tietoa on tarkoitus koostaa ja analysoida, jotta varustamojen ja satamien päätöksentekijät ja viranomaiset voivat helpommin arvioida vähäpäästöisen merenkulun vaihtoehtoja. Hankkeen käytössä on monta menetelmää, jotta päästään mahdollisimman vaikuttavaan lopputulokseen. Pääasiallisina menetelminä käytetään laivoilla tehtäviä päästömittauksia, elinkaarianalyysiä sekä päästömittauksista saadun datan Bayes-analyysiä. Näiden tukena voidaan kuitenkin hyödyntää muitakin menetelmiä, kuten työpajatyöskentelyä, sekä teettää opinnäytetöitä.

Hanke toteutetaan Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun (Xamk) Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusalan ja Logistiikka ja merenkulku -vahvuusalan yhteistyönä. Hankkeen päärahoittajana toimii Kymenlaakson liiton hallinnoima Euroopan aluekehitysrahasto (EAKR).

## JOHDANTO

Meriliikenteen päästövähennystekniikoiden vertailu -hankkeessa päätavoitteena on saada mittausdataa käytössä olevien päästövähennystekniikoiden todellisesta tehokkuudesta. Asia on ajankohtainen, sillä Euroopan komission heinäkuussa 2021 julkaistu ”Fit for 55” -toimenpideohjelma on toteutuessaan merkittävä ja kunnianhimoinen unionitason ympäristönsuojelupaketti sisältäen muun muassa päästökaupan laajentamisen meriliikenteeseen (European Commission 2021). Tällä hetkellä paketin monet yksityiskohdat ovat vielä avoimia, mutta selvää on, että toteutuessaan paketti vaikuttaa monien muiden toimialojen lisäksi myös meriliikenteen toimintaympäristöön monella tavoin. Tuotettujen päästöjen rahallistuksessa niiden koostumuksen tunteminen saa uuden merkityksen.

Tällä hetkellä laivaliikenteessä on käytössä lukuisia teknisiä menetelmiä päästöjen vähentämiseksi. Niiden tekninen ikä vaihtelee merkittävästi samoin kuin tavoiteltavat päästövähennykset. Osana hanketta onkin tavoitteena luoda kokonaiskuva meriliikenteen tämänhetkisten päästövähennystekniikoiden tehokkuudesta sisältäen polttoaineratkaisut nyt ja tulevaisuudessa. Lisäksi halutaan selvittää meriliikenteen päästöjen kehityksen suuntaa



alueellisesti sekä globaalisti ja Itämerellä. Vuoden 2021 aikana hankkeessa on tehty kahta opinnäytetyötä, jotka edesauttavat näiden tavoitteiden saavuttamisessa. Ensimmäisessä työssä on koottu tietoa lähialueiden satamien päästöjen kehityksestä ja toisessa on kerätty tietoa erilaisista polttoainevaihtoehdoista kirjallisuuden ja haastattelututkimuksen perusteella.

Syksyllä 2021 toteutettiin työpaja sidosryhmille meriliikenteen päästöjen kehitykseen vaikuttavien tekijöiden kartoittamiseksi. Aihe on noussut erityisen ajankohtaiseksi, mikäli EU:n suunnittelema päästökauppa meriliikenteessä toteutuu lähivuosina.

## BAYES-ANALYYSIN HYÖDYNTÄMINEN

Päästövähennystekniikoiden vertailu on haastava prosessi. Näkökulmia asiaan voidaan ottaa useita, eri päästökomponeentteja voidaan arvottaa haitallisuusnäkökulmasta usealla eri tavalla ja järjestelmien kustannusrakennetta voidaan tarkastella suppeasti tai laajasti. Esimerkiksi hiilidioksidi voimakkaana kasvihuonekaasuna ja ilmastonmuutoksen kiihdyttäjänä on noussut nopeasti haitallisuusasteikolla ylöspäin siinä missä aiemmin myrkkypäästöt (muun muassa typen oksidit) koettiin suuremmaksi ongelmaksi. Myös merenkulun rikkipäästöjen rajoituksiin on tullut merkittäviä tiukennuksia Itämerellä vuodesta 2015 alkaen ja maailmanlaajuisesti vuonna 2020. Verrattuna moniin muihin päästöjä tuottaviin sektoreihin rikkirajoitukset ovat astuneet voimaan merenkulussa sangen myöhään.

Perustellusti voidaan siis olettaa, että käsitys päästökomponeenttien haitallisuusasteesta tulee muuttumaan myös tulevaisuudessa. Laivojen elinkaari on kuitenkin usein 30–40 vuotta. Päästönkäsittelyjärjestelmiä voidaan päivittää aluksen elinkaaren aikana ja usein näin tehdäänkin. Investointina järjestelmät ovat kuitenkin kalliita, ja toivottavaa olisi, että tehty investointi täyttäisi mahdollisimman tehokkaasti sille asetetut vaatimukset myös muuttuvassa toimintaympäristössä. Miten tämä käytännössä tapahtuu, onkin usein sitten toinen asiakokonaisuus.

Päästövähennystekniikoiden tehokkuudesta puhuttaessa voidaan asiakokonaisuutta lähestyä apriorisesti vertailemalla teknologioita tai muita menetelmiä niille luvattujen ominaisuuksien ja teknologioiden tuottamien kustannusten perusteella. Käytännössä varustamojen tekemät investointipäätökset perustuvatkin yleensä aprioriseen lähestymistapaan huomioiden toimintaympäristön ympäristösäädökset ja muut tekijät. Eri menetelmillä voi kuitenkin olla merkittäviäkin eroja käytännön tehokkuudessa ja toimivuudessa, sillä jokainen teknologia toimii parhaiten optimiolosuhteissa, joiden saavuttaminen merellä ei kuitenkaan aina ole suoraviivaista. Suomen olosuhteissa meren jäätyminen talvisaikaan ja sen aiheuttamat muutokset aluksen operointiin ovat tällaisia asioita.

Puhuttaessa päästövähennystekniikoiden tehokkuudesta ollaan siis väistämättä tilastollisen ongelman äärellä. Voidaan kysyä, millä todennäköisyydellä ja kuinka todennäköisissä olo-

suhteissa jokin teknologia toimii odotetulla tavalla. Tilastollisista työkaluista laskennallisesti tehokkaan menetelmäkokonaisuuden tarjoaa Bayes-verkkoteknologia, ja muun muassa Naiivi Bayes -menetelmää on käytetty laajasti sekä diskretisoidulla että jatkuviin jakaumiin perustuvilla aineistoilla muun muassa tekoälyratkaisuisissa mutta myös teknisissä ongelmissa. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoululla vastaavaa menetelmää on käytetty muun muassa COMPLETE-hankkeessa, jossa kehitetyllä menetelmällä on arvioitu tehokkaasti laivojen pohjien likaantumisen vaikutusta kulkuvastukseen.

Bayes-menetelmän soveltaminen päästöjen vähennystekniikoiden vertailuun tuo asiaan aposteriorisen näkökulman: Tutkimalla aluksien tuottamia päästöjä olemassa olevilla päästövähennysteknologioilla niiden operoidessa todellisissa olosuhteissa saadaan arvokasta, mitausdataan perustuvaa tietoa eri menetelmien kyvystä vaikuttaa päästöjen muodostumiseen käytännössä. Aposteriorinen lähestymistapa tarkoittaa nimenomaan tällaista mitattavaan, kokemusperäiseen tietoon perustuvaa lähestymistapaa.

Laivat ovat kuitenkin teknisesti erilaisia ja meriolosuhteet vaihtelevat, minkä vuoksi liian suoraviivaisia analyysejä ei tallentuneesta datasta voi tehdä. Bayes-menetelmä perustuu ehdolliseen todennäköisyyteen, ja sen avulla voidaan havainnoida posterioritodennäköisyyden tiheysfunktioita eri lähtöarvoilla. Näin voidaan usein tehdä tilastollisesti luotettavia johtopäätöksiä myös tilanteissa, joissa suorien johtopäätösten tekeminen datasta ei välttämättä onnistuisi tai se aiheuttaisi vinoumaa lopputuloksiin.

## **OPINNÄYTETYÖT: SATAMIEN PÄÄSTÖJEN KEHITYS JA LAIVOJEN POLTTOAINEET**

Hanketoimijan ollessa ammattikorkeakoulu myös opinnäytetöiden teettäminen hankkeen puitteissa on usein toivottavaa. Näin voidaan tarjota opiskelijoille mielenkiintoisia aiheita lopputöihinsä, ja samalla hanke saa usein tärkeää lisäinformaatiota, jota voidaan hyödyntää hankkeen toteutuksessa. MEPTTEK-hankkeessa opinnäytetöiden aiheita on tarjottu sekä merenkulun että energiatekniikan opiskelijoille, sillä aiheet liittyvät tiivistä molempiin opintoaloihin.

Ensimmäisessä valmistuneessa opinnäytetyössä opiskelija on käynyt läpi kahden sataman päästöjen määrien ja laatuojen kehitystä viimeisen vuosikymmenen aikana muun muassa ympäristöraporttien pohjalta. Raporttien ilmapäästöt perustuvat laskennallisiin tietoihin, joihin on käytetty VTT:n Lipasto-mallin päästökertoimia, eivätkä ne perustu todellisiin mittauksiin. Kohteena olivat kaksi lähintä suurta kaupallista satamaa: Helsingin Satama Oy sekä HaminaKotka Satama Oy. Näiden ympäristöraportointidataa oli saatavilla vuosien 2012 ja 2019 väliltä. (Untolahti 2021)

Selvityksen perusteella satamien päästöt ovat vähentyneet etenkin rikkidioksidin ja hiukasten osalta, mikä on myös havaittavissa Itämeren kokonaispäästöjen kehityksessä rikkidi-

rektiivin astuttua voimaan. Samaan aikaan aluskäynnit ovat kuitenkin lisääntyneet HaminaKotkan satamissa. Sekä HaminaKotkan satamassa että Itämerellä hiilimonoksidipäästöt ovat olleet kasvussa tarkastellulla aikavälillä. Typenoksidien ja hiilidioksidin päästömäärät eivät kaikilta osin seuranneet aluskäyntien määrää. (Untolahti 2021) Euroopan tasolla on alettu keräämään tarkkaa dataa alusten polttoaineen kulutuksesta, mikä voisi tarjota jatkossa mahdollisuuden tarkentaa laskentaa tarvittaessa. Globaalisti on myös huomattu, että kasvihuonekaasupäästöt ja liikenteen kysynnän kasvu eivät enää täysin korreloi keskenään, joten voidaan olettaa, että laivojen energiatehokkuus on parantunut. (Fourth IMO GHG Study 2020, Liite 1, 1)

Toisessa työssä haastateltiin laivapolttoaineiden ympäriltä erilaisia toimijoita, kuten polttoaineen tuottajia/jakelijoita sekä varustamoiden näkökulman edustajaa. Näiden avulla pyrittiin muodostamaan kokonaiskuvaa laivapolttoaineiden valintaan liittyvistä tekijöistä ja tulevaisuuden kehityssuunnista. Opinnäytetyössä nousi monia mielenkiintoisia havaintoja tulevaisuuden haasteista.

Haastattelussa tuli esiin esimerkiksi, että LNG:n kasvu on ollut oletettua hitaampaa osuuden ollessa Itämerellä alle prosentin luokkaa. Varustamoiden strategiat myös poikkeavat suuresti LNG:n suhteen. Vanhojen laivojen konvertointia LNG:n käyttöön ei nähdä kannattavana, ja esimerkiksi raskaasta polttoöljystä kevyisiin siirtyminen on paljon helpompaa. Polttoaineiden hinnat ja merikuljetusten hinnat eivät myöskään ole kasvaneet odotetusti, vaikka rikkirajoitus tuli voimaan. Haastateltavat tuovat myös esiin, että pesureiden haitat ovat tällä hetkellä tutkimuksen alla, ja joitakin tuloksia niiden haitallisuudesta meriympäristölle on jo olemassa. (Koivuniemi 2021) Tuoreessa ruotsalais-norjalaisessa tutkimuksessa havaittiinkin pesurien pesuvesien sisältämien haitallisten yhdisteiden aiheuttavan vakavia haittavaikutuksia eläinplanktonille, kun tutkittiin Pohjanmerellä operoivien alusten pesuvesiä vuosina 2018–2020 (Keränen 2021).

Tulevaisuuden polttoaineista kysyttäessä opinnäytetyössä nousevat esiin ammoniakki, LNG, metanoli ja sähkö-LNG-hybridilaiivat sekä pienydinvoima (Koivuniemi 2021). Samansuuntaisia odotuksia ovat esittäneet myös muut asiantuntijat haastattelussa. Vuonna 2030 biopolttoaineiden ja akkujen odotetaan olevan todennäköisimmin käytössä, kun taas vuonna 2050 odotukset keskittyvät muihin hiilettömiin vetyperäisiin polttoaineisiin (mukaan lukien ammoniakki) ja hiilettömään vetyyn (mukaan lukien polttokennot). (FuelEU Maritime 2021, 183) Opinnäytetyön haastateltavat pitävät myös päästökauppaa meriliikenteessä askeleena oikeaan suuntaan. Muutosta voi tapahtua myös vapaaehtoisesti tai asiakkaiden pyynnöstä, mutta poliittinen ohjaus nähdään kuitenkin tarpeellisena, jotta muutosten mittakaava olisi riittävä. Polttoaineen tuotannon päästöt tulee myös ottaa mukaan, kun vertaillaan tulevaisuuden polttoaineita. (Koivuniemi 2021)

## TYÖPAJATYÖSKENTELY MERILIIKENTEEEN PÄÄSTÖVÄHENNYKSISTÄ

Viime kuukausina meriliikenteen kasvihuonekaasujen sääntely on noussut erittäin ajankoh-  
taiseksi teemaksi. Aiheesta neuvotellaan sekä EU-tasolla että IMO:ssa, ja kesällä 2021 EU  
antoi ehdotuksena esityksen päästökaupan laajentamisesta meriliikenteeseen. Kasvihuone-  
kaasujen leikkaukseen voidaan päästä erilaisin keinoin meriliikenteessä, ja esimerkiksi  
energian säästäminen, sen tehokas käyttäminen sekä vähähiilisen polttoaineen valinta  
vähentävät kasvihuonekaasupäästöjä.

Euroopan komissiossa ehdotettiin kesällä 2021 päästökaupan laajentamista meriliiken-  
teeseen sekä kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä 75 prosenttia vuoteen 2050 niin,  
että 2025 vähenemän tulee olla kaksi prosenttia ja 2030 kuusi prosenttia. Meriliikenteen  
päästökauppajärjestelmälle on ollut esillä erilaisia vaihtoehtoja. Merkittävä ratkaisu on se,  
minkä maantieteellisen alueen päästökauppa kattaa. Nyt esitetyssä mallissa otetaan mukaan  
koko energia, joka käytetään matkoilla jäsenvaltion satamasta toisen jäsenvaltion satamaan,  
ja puolet energiasta, joka käytetään matkoilla, jotka lähtevät jonkun jäsenvaltion satamasta  
tai saapuvat sinne, mutta viimeinen tai seuraava satama on kolmannessa maassa. Lisäksi  
laivoille tulee velvollisuus käyttää maasähköä tai päästöttömiä tekniikoita jäsenvaltion  
satamissa. (FuelEU Maritime 2021)

Toinen viimeaikainen neuvottelun tulos koskee kansainvälisen merenkulkujärjestön IMO:n  
meriympäristön suojelukomitean kokouksessa kesäkuussa 2021 hyväksytyjä indekse-  
jä (EEXI ja parannettu SEEMP/CII), jotka ovat osana kokonaisuutta, kun tavoitellaan  
hiili-intensiteetin pienentämistä 40 prosentilla vuoteen 2030 mennessä. Energy Efficiency  
Existing Ship Index (EEXI) on tekninen indeksi, joka lasketaan laivoille kerran, jos teknisiä  
muutoksia ei tapahdu, ja Carbon Intensity Indicator (CII) on käyttöön perustuva indeksi,  
joka tulee raportoida vuosittain. EEXI vastaa hyvin pitkälti aiemmin uusille laivoille  
hyväksytyä energiatehokkuusindeksiä (EEDI, Energy Efficiency Design Index), mutta  
se lasketaan siis jo käytössä oleville laivoille. Molemmat uudet indeksit tulevat käyttöön  
vuonna 2023. (Longva & Nyhus 2021)

Sidosryhmätyöskentelyä pidetään usein tärkeänä työkaluna erilaisissa kehityshankkeissa.  
Esimerkiksi Hansson ym. (2019) hyödynsivät ruotsalaisen merialan sidosryhmiä tutkimuk-  
sessaan. He arvioivat, mitkä ovat tärkeitä kriteerejä, kun valitaan tulevaisuuden polttoaine-  
vaihtoehtoja. Osallistujina olivat varustamot, polttoaineiden tuottajat, moottorivalmistajat,  
Ruotsin valtion viranomaisten edustajat ja tutkijat. Tutkimuksessa tulee hyvin esille paino-  
tukset ja eroavaisuudet eri sidosryhmissä, ja artikkelissa onkin todettu, että sidosryhmien  
preferenssien parempi ymmärtäminen voi parantaa politiikan suunnittelua ja toteutusta.  
(Hansson ym. 2019, 168)

MEPTEK-hankkeessa järjestään syksyn 2021 aikana työpaja meriliikenteen päästöistä aiheen ympärillä toimiville sidosryhmäläisille. MEPTEK-hankkeen ohjausryhmä koostuu myös laajasta meriliikenteen sidosryhmästä, johon kuuluvat edustajat seuraavilta tahoilta: Ilmatieteen laitos, Suomen ympäristökeskus, Suomen varustamot Ry, Helsingin yliopiston Merikotkan tutkimusyksikkö, HaminaKotka-satama, Traficom ja Väylävirasto.

Syksyn 2021 työpajan teemoiksi pienryhmätyöskentelyyn valikoituivat seuraavat aihekokonaisuudet:

- Meriliikenteen päästöjen ympäristövaikutukset
- Päästösäädökset ja meriliikenteen päästökauppa
- Säädösten vaikutukset merenkulkualan näkökulmasta

Alustusluentoja työpajassa pitävät:

- Jukka-Pekka Jalkanen (Ilmatieteen laitos) – aiheena meriliikenteen ilmapäästöjen vaikutukset
- Ville-Veikko Intovuori (Traficom) – aiheena päästösäädökset
- Niina Honkasalo (Liikenne- ja viestintäministeriö) – aiheena päästökauppa
- Mats Björkendahl (Suomen Varustamot Ry) – aiheen päästösääntely varustamojen näkökulmasta
- Jarkko Toivola (Väylävirasto) – aiheena sääntelyn vaikutus talvimerenkulun näkökulmasta.

Tähän julkaisuun työpajan tuloksia ei voitu vielä hyödyntää, mutta tulokset kootaan hankkeen loppuraporttiin. Marraskuussa 2021 Glasgow'ssa pidetään YK:n COP26-huip-pukokous, joka tuo osapuolet yhteen nopeuttamaan toimia Pariisin sopimuksen ja YK:n ilmastonmuutosta koskevan yleissopimuksen tavoitteiden saavuttamiseksi. Tätä artikkelia kirjoitettaessa kyseinen kokous oli vielä tulossa. Kokouksesta voidaan myös saada tulevia indikaattoreita IMO:n tuleviin rajoituksiin. Nähtäväksi jää, asetetaanko rajoituksia esimerkiksi alusten nopeuksille ja ovatko IMO:n tulevat rajoitukset yhtä kunnianhimoisia kuin mitä EU-tasolla on ehdotettu. IMO:ssa ei ole esimerkiksi keskustelu polttoaineiden elinkaaripäästöistä eikä ole vielä päässyt samalle tasolle, mitä EU:n kriteerit ovat.

## YHTEENVETO

Vahvuusalojen yhteisessä MEPTEK-hankkeessa hyödynnetään useita työkaluja ja menetelmiä hankkeen eri toimenpiteissä, ja käytössä ovat niin elinkaarianalyysi, Bayes-analyysi ja käytännön mittaukset. Näiden lisäksi hyödynnetään myös opinnäytetyöskentelyä sekä sidosryhmien työpajatyöskentelyä. Useita menetelmiä hyödyntämällä sekä ottamalla mukaan laaja sidosryhmä saadaan usein vaikuttavampia tuloksia aikaan. Opinnäytetöiden aikana MEPTEK-hanke on saanut tietoa päästöjen kehityksestä lähialueen suurissa satamissa sekä Itämeren laivapolttoaineiden kehitysnäkymistä. Tulevassa työpajassa pureudutaan ajankohtaisiin meriliikenteen päästövähennyksiin erityisesti tulevien kasvihuonekaasuvähennystavoitteiden näkökulmasta.

## LÄHTEET

European Commission 2021: European green deal: Commission proposes transformation of EU economy and society to meet climate ambitions. *EU economy and society to meet climate ambitions* (europa.eu) [viitattu 9.8.2021].

Fourth IMO GHG Study 2020 – Final report. 2020. International Maritime Organisation.

FuelEU Maritime. 2021. Proposal for a regulation of the European parliament and of the council on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport and amending Directive 2009/16/EC. PDF-dokumentti. Päivitetty 14.7.2021. Saatavissa: [https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/fueleu\\_maritime\\_-\\_green\\_european\\_maritime\\_space.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/fueleu_maritime_-_green_european_maritime_space.pdf) [viitattu 4.8.2021].

Hansson, J., Månsson, S., Brynolf, S. & Grahn, M. 2019. Alternative marine fuels: Prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders. *Biomass and Bioenergy* 126, 159–173.

Involve. 2021. World Café. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.involve.org.uk/resources/methods/world-cafe> [viitattu 4.8.2021].

Keränen, M. 2021. Uusi tutkimus lyttää jälleen laivojen rikkipesurit – plankton kuolee, kun rikkiä poistetaan pakokaasuista. WWW-dokumentti. Päivitetty 18.5.2021. Saatavissa: <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/uusi-tutkimus-lyttaa-jalleen-laivojen-rikkipesurit-plankton-kuolee-kun-rikkia-poistetaan-pakokaasuista/a2b669f3-8df8-4502-915c-f5ba08585855> [viitattu 22.6.2021].

Koivuniemi, J. 2021. Itämerellä käytettävien laivapolttoaineiden vertailu. Opinnäytetyö (ei vielä valmistunut).

Longva, T. & Nyhus, E. 2021. MEPC 76 in focus – CO2 emissions regulations adopted. DNV webinaari 23.6.2021.

Untolahti, M. 2021. Haminan, Kotkan ja Helsingin satamien päästömäärien ja -laatuojen kehittyminen. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202105178902>.





XAMK  
KEHITTÄÄ