

# METSÄ, YMPÄRISTÖ JA ENERGIA

Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä  
Vuosijulkaisu 2016

HANNE SOININEN & KATI KONTINEN & KARI DUFVA (TOIM.)



**MAMK**  
University of Applied Sciences

# METSÄ, YMPÄRISTÖ JA ENERGIA

Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä  
Vuosijulkaisu 2016

HANNE SOININEN & KATI KONTINEN & KARI DUFVA (TOIM.)



ETELÄ-SAVON  
MAAKUNTALIITTO

Vipuvoimaa  
EU:lta  
2014–2020



MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU  
MIKKELI 2016

D: VAPAAMUOTOISIA JULKAISUJA – FREE-FORM PUBLICATIONS 82

© TEKIJÄT JA MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU

KANNEN KUVA: MANU ELOAHO

TAITTO JA PAINO: GRANO OY

ISBN: 978-951-588-573-9 (NID.)

ISBN: 978-951-588-574-6 (PDF)

ISSN: 1458-7629 (NID.)

JULKAISUT(A)XAMK.FI

# LUKIJALLE

Mikkelin ammattikorkeakoulu tarjoaa monipuolisen koulutuksen lisäksi soveltavaa työelämän ja julkisen sektorin kanssa verkostoitunutta tutkimus-, kehitys- ja innovaatiotoimintaa sekä monipuolisia palveluja. Mikkelin ammattikorkeakoulun tutkimus-, kehittämis- ja innovaatiotoiminnan (TKI) tavoitteena on alueen osaamisen, kilpailukyvyyn ja yritystoiminnan vahvistaminen. TKI-toiminta tuottaa tutkimusta, uusia menetelmiä, tuotteita ja palveluita. Alueellinen kehittäminen ja työelämän vaatiman osaamisen tuottaminen kuuluvat ammattikorkeakoulujen perustehtäviin. Uusi Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu – Xamk – aloittaa 1.1.2017, kun Kymenlaakson ja Mikkelin ammattikorkeakoulut yhdistyvät. Kivijalkoina toimivat Kotka, Kouvola, Mikkelä ja Savonlinna.

Vuoden 2016 Metsä, ympäristö ja energia – soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä -julkaisuun on koottu Mikkelin ammattikorkeakoulun Metsä, ympäristö ja energia -painoalan tutkimus- ja kehittämistoiminnasta kertovia artikkeleita. Painoalan monialainen yhteistyö tukee Etelä-Savon aluekehitystä sen keskeisillä toimialoilla.

Artikkeliteoksessa esitellään TKI-toiminnan vuoden 2016 tuloksia, joita on saavutettu niin hanketoiminnassa kuin koulutuksessakin. Artikkeleissa käsitellään muun muassa ympäristöturvallisuutta ja yritystoimintaa edistäviä ja uusien teknologisten ratkaisujen käyttöönottoon liittyviä teemoja. Uusia biopohjaisia materiaaleja hyödyntävät tuotteet ja prosessit sekä ympäristöturvallisuutta parantavat ratkaisut ovat tärkeä osa painoalalla toteutettavaa tutkimus- ja kehitystoimintaa.

Tämän artikkeliteoksen toimittajat työskentelevät ”Materiaalit ja ympäristöturvallisuus – strateginen kehittäminen” -hankkeessa. Hanketta rahoittaa Etelä-Savon maakuntaliitto Euroopan aluekehitysrahastosta. Tekijät kiittävät hankkeiden ja opinäytetöiden rahoittajia ja yhteistyökumppaneita yhteisen TKI-toiminnan mahdollistamisesta.

Mikkelissä 1.12.2016

Tekijät





# KIRJOITTAJAT

**Johanna Arola**, ins. (ylempi AMK), lehtori  
Mikkelin ammattikorkeakoulu, Sähkö-, talo- ja materiaalitekniikan koulutusyksikkö

**Kari Dufva**, TkT, tutkimuspäällikkö  
Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -painoala

**Jarno Föhr**, DI, projektipäällikkö  
Lappeenrannan teknillinen yliopisto, LUT Savo, Bioenergiateknologia

**Bertalan Galambosi**, yliagronomi  
Luonnonvarakeskus, Mikkelä

**Jonne Gråsten**, FM, kehityspäällikkö  
Metsäsairila Oy

**Kimmo Haapea**, kehityspäällikkö  
Mikkelin Kehitysyhtiö Miksei Oy

**Justiina Halonen**, merikapteeni (AMK), tutkimuspäällikkö  
Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, Logistiikka ja merenkulku -painoala

**Esa Hannus**, ins. (AMK), TKI-asiantuntija  
Mikkelin ammattikorkeakoulu, Informaatioteknologian koulutusyksikkö

**Yrjö Hiltunen**, FT, tutkimusjohtaja  
Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -painoala

**Sami Hirvonen**, ins. (ylempi AMK), toimitusjohtaja  
Metsäsairila Oy

**Mikko Hokkanen**, DI, projektipäällikkö  
Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -painoala

**Sari Iivonen**, MMT, tutkimuskoordinaattori  
Helsingin yliopisto, Ruralia-instituutti

**Shirin Jafari**, harjoittelija

Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -painoala

**Panu Jouhkimo**, DI, projektipäällikkö

Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -painoala

**Johanna Kainulainen**, ympäristötekniikan insinööriopiskelija (AMK)

**Ville Kakkonen**, DI, projektipäällikkö

Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -painoala

**Saska Kangassalo**, ympäristötekniikan insinööriopiskelija (AMK)

**Kalle Karosto**, MMM, projektipäällikkö

Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -painoala

**Tero Karttunen** DI, tutkimusinsinööri

Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -painoala

**Kati Kontinen**, MML, tutkimuspäällikkö

Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -painoala

**Jyri Koivisto**, eMBA, toimitusjohtaja

Aquazone Oy

**Juha Korpijärvi**, yliopettaja, TkT

Mikkelin ammattikorkeakoulu, Sähkö-, talo- ja materiaalitekniikan koulutusyksikkö

**Rauno Kousa**, mti (AMK), projektipäällikkö

Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -painoala

**Pauliina Kuukka**, ympäristötekniikan insinööriopiskelija (AMK)

**Niina Laurila**, ins. (AMK), projektipäällikkö

Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -painoala

**Marjatta Lehesvaara**, FM, lehtori

Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsätalouden ja ympäristötekniikan koulutusyksikkö

**Juha-Pekka Lemponen**, DI, TKI-asiantuntija

Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -painoala

**Mika Letonsaari**, DI, TKI-asiantuntija

Mikkelin ammattikorkeakoulu, Informaatiotekniikan koulutusyksikkö

**Mika Liukkonen**, FT, tutkijatohtori  
Itä-Suomen yliopisto

**Netta-Leena Maljanen**, FM, MMM, agronomi  
Luonnonvarakeskus, Mikkeli

**Vuokko Malk**, FM, projektipäällikkö  
Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -painoala

**Ekaterina Nikolskaya**, projektitutkija  
Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -painoala

**Jake Nylund**, insinööri (AMK)

**Olli Paajanen**, DI, projektipäällikkö  
Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -painoala

**Juho Peura**, ins. (AMK), tutkimusinsinööri  
Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -painoala

**Hannu Poutiainen**, FT, lehtori  
Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsätalouden ja ympäristötekniikan koulutus-  
yksikkö

**Tapio Ranta**, TkT, professori  
Lappeenrannan teknillinen yliopisto, LUT Savo, Bioenergiateknologia

**Tuija Ranta-Korhonen**, FM, ins. (AMK), projektipäällikkö  
Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -painoala

**Risto Repo**, laitosmies, ympäristötekniikan insinööriopiskelija (AMK)  
Mikkelin Vesilaitos/Mikkelin ammattikorkeakoulu

**Mika Ruponen**, koulutusjohtaja, TkT  
Mikkelin ammattikorkeakoulu, Sähkö-, talo- ja materiaalitekniikan koulutusyksikkö

**Jukka Selin**, FT, Liiketoimintakehittäjä  
Lahden Seudun Kehitys LADEC Oy

**Sari Seppäläinen**, ins. (AMK), laboratorioinsinööri  
Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsätalouden ja ympäristötekniikan koulutus-  
yksikkö

**Mika Sillanpää**, TkT, professori  
Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Vihreän kemian laboratorio

**Hanne Soininen**, DI, tutkimuspäällikkö  
Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -painoala

**Arto Sormunen**, FT, yliopettaja  
Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsätalouden ja ympäristötekniikan koulutusyksikkö

**Heikki Särkkä**, TkT, tutkimusinsinööri  
Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -painoala

**Riikka Tanskanen**, DI, projektipäällikkö  
Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -painoala

**Erja Tuliniemi**, ins. (AMK), projekti-insinööri  
Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, Energia- ja ympäristötekniikan tiimi

**Anne-Marie Tuomala**, FM, MBA, Associate of IIB, lehtori, koulutus­päällikkö  
Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsätalouden ja ympäristötekniikan koulutus­yksikkö

**Riina Tuominen**, ins. (ylempi AMK), projektipäällikkö  
Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -painoala

**Hannu Turunen**, DI, Tutkimusinsinööri  
Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -painoala

**Viktoria Petrova**, Bachelor of Engineering (BEng) in Environmental Engineering

**Hanna-Maija Väisänen**, KTM, projektipäällikkö  
Helsingin yliopisto, Ruralia-instituutti

**Timo Ålander**, FT, Lehtori  
Mikkelin ammattikorkeakoulu, Metsätalouden ja ympäristötekniikan koulutus­yksikkö

# SISÄLTÖ

**LUKIJALLE** ..... 3

**KIRJOITTAJAT** ..... 5

**TULOKSELLISTA MAAKUNNALLISTA TUTKIMUS- JA  
KEHITYSTOIMINTAA ELINKEINOELÄMÄLLE – TUTKIMUSTA  
YLI RAJOJEN** ..... 13

Hanne Soininen & Kati Kontinen & Kari Dufva

**METSÄ, YMPÄRISTÖ JA ENERGIA – KOHTI TULEVAA XAMKIA**..... 19

Kati Kontinen & Hanne Soininen

## **YMPÄRISTÖTURVALLISUUS**

**HEVOSWOIMA-HANKKEELLA UUSIUTUVAA ENERGIAA  
HEVOSENLANASTA** ..... 27

Riikka Tanskanen & Hanne Soininen & Jarno Föhr & Tapio Ranta

**VIUOTOVESIEN VAIKUTUS VIEMÄRIJÄRJESTELMIEN  
ENERGIATEHOKKUUTEEN ETELÄ-SAVON ALUEELLA**..... 33

Tuija Ranta-Korhonen

**VIUOTOVESIEN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET**..... 39

Jukka Selin & Tuija Ranta-Korhonen

**TORREFIOITUJEN BIOHIILIPELLETTIEN PIENPOLTTOKOKKEET** ..... 47

Juha-Pekka Lemponen & Hanne Soininen & Jarno Föhr & Tapio Ranta

**TORREFIOITUJEN BIOHIILIPELLETTIEN  
DEMONSTRAATIOPOLTTOKOKKEET** ..... 59

Juha-Pekka Lemponen & Hanne Soininen & Jarno Föhr & Tapio Ranta

**TORREFIOITUJEN BIOHIILIPELLETTIEN TYÖTERVEYSVAIKUTUKSET** ..... 67

Juha-Pekka Lemponen & Saska Kangassalo & Sari Seppäläinen & Hanne Soininen



<b>HIUKKASPITOISUUDET TAAJAMAN PIENTALOALUEELLA.....</b>	<b>75</b>
Johanna Kainulainen & Niina Laurila & Timo Ålander	
<b>YMPÄRISTÖVAHINKOIHIN VARAUTUMISTA SAIMAALLA.....</b>	<b>89</b>
Vuokko Malk & Justiina Halonen & Arto Sormunen	
<b>MAMK, LUT JA YRITYKSET KEHITTÄVÄT KANSAINVÄLISIÄ RATKAISUJA JÄTEVEDENKÄSITTELYYN .....</b>	<b>101</b>
Yrjö Hiltunen & Hanne Soininen & Heikki Särkkä & Mika Sillanpää & Jyri Koivisto	
<b>ERILAISTEN JÄTEVEDENPUHDISTUSMENETELMIEN ARVIOINTI JA VERTAILU.....</b>	<b>105</b>
Heikki Särkkä	
<b>ESIKÄSITTELYMENETELMÄT BIOKAASUPROSESSEISSA METAANINTUOTANNON OPTIMOIMISEKSI.....</b>	<b>115</b>
Heikki Särkkä	
<b>LÄÄKEAINEIDEN ANALYSOINTI SMART EFFLUENTS -HANKKEESSA....</b>	<b>123</b>
Marjatta Lehesvaara	
<b>UTILIZATION OF AGRICULTURAL AND FOOD-INDUSTRY-BASED MATERIALS IN BIOGAS PRODUCTION PROCESSES .....</b>	<b>131</b>
Shirin Jafari & Heikki Särkkä	
<b>CHARACTERIZATION OF MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILL FOR SECONDARY RAW MATERIALS.....</b>	<b>141</b>
Heikki Särkkä & Sami Hirvonen & Jonne Gråsten	
<b>YMPÄRISTÖARKISTO – MAARAKENNUKSEN UUSIOMATERIAALIEN KÄYTÖN ESTEET .....</b>	<b>151</b>
Riina Tuominen & Pauliina Kuukka	
<b>YMPÄRISTÖARKISTON EDELLYTYKSET .....</b>	<b>159</b>
Esa Hannus & Mika Letonsaari & Riina Tuominen	
<b>KASVISTEN TUOTETURVALLISUUS JA TILAKOHTAINEN RISKINARVIOINTI.....</b>	<b>167</b>
Riina Tuominen & Sari Iivonen	
<b>KASVISTUOTANNON KESTÄVYYS JA VASTUULLISUUS.....</b>	<b>175</b>
Hanna-Maija Väisänen & Riina Tuominen & Sari Iivonen	

<b>MEMBRAANIBIOREAKTORIT MIKROPOLLUTANTTIEN (MP) POISTAMISESSA KUNNALLISISTA JÄTEVESISTÄ .....</b>	183
Hannu Poutiainen & Risto Repo	
<b>ANALYYSIMITTAUSTEN MERKITYS JÄTEVEDENPUHDISTUSPROSESSIN SÄÄDÖSSÄ .....</b>	189
Jake Nylund & Hannu Poutiainen	
<b>SUOMYRTTI – LUONNON OMA HYTTYSKARKOTE – VILJELYKOKEITA JA ANALYSOINTIA .....</b>	195
Bertalan Galambosi & Marjatta Lehesvaara & Netta-Leena Maljanen	
<b>THE BALTIC RINGED SEAL POPULATION – A BIO-INDICATOR OF CLIMATE CHANGE.....</b>	207
Tuomala Anne-Marie & Petrova Viktoria	
<b>CHANGES IN AVIAN BIOLOGY AND BIRD DISTRIBUTION IN THE BALTIC SEA REGION.....</b>	215
Tuomala Anne-Marie & Petrova Viktoria	
<b>DETERMINATION OF MOISTURE IN ACTIVATED SLUDGE BASED ON NMR RELAXATION DATA AND INDEPENDENT COMPONENT ANALYSIS.....</b>	223
Ekaterina Nikolskaya & Mika Liukkonen & Jukka Selin & Yrjö Hiltunen	
<b>METSÄTALOUS JA PUUTUTKIMUS</b>	
<b>TIEKUNTIEN TOIMINTA YKSITYISTEILLÄ.....</b>	231
Kalle Karosto & Kati Kontinen	
<b>METSÄ BIG DATAN MAHDOLLISUUDET METSÄNHOITOHISTORIKKENTÄSSÄ .....</b>	237
Kati Kontinen	
<b>TURVEMAIEN KESÄAIKAINEN PUUNKORJUU.....</b>	241
Rauno Kousa & Kati Kontinen	
<b>TULEVAISUUDEN MONIMUOTOINEN METSÄ .....</b>	247
Rauno Kousa & Kati Kontinen	
<b>VAHAKÄSITELLYN MÄNNYN BIOLOGINEN KESTÄVYYS SINISTÄJÄ- JA HOMESIENIÄ VASTAAN .....</b>	255
Juho Peura & Olli Paajanen & Kati Kontinen	

**LÄMPÖPUUN VALMISTUKSEN KEHITTÄMINEN** ..... 263  
Olli Paajanen & Juho Peura & Hannu Turunen

**VIILUN MODIFIOINTI** ..... 271  
Olli Paajanen & Hannu Turunen & Kati Kontinen

## **ÄLYKKÄÄT MATERIAALIT JA ENERGIARATKAISUT**

**HACKATHON PK-YRITYSTEN KEHITYSTYÖKALUNA** ..... 281  
Mikko Hokkanen & Kimmo Haapea

**PURE SHEAR -KOEKAPPALEEN OPTISET  
VENYMÄMITTAUSANALYYSIT DIC-TEKNIIKALLA** ..... 289  
Tero Karttunen

**CFD SIMULATIONS WITH THE AIR AND TRACER GAS CO<sub>2</sub>** ..... 305  
Srujal Shah & Kari Dufva

**SIMULOINNIN HYÖDYNTÄMINEN VAATIVIEN KOHTEIDEN  
ENERGIATEHOKKUUDEN KEHITTÄMISESSÄ** ..... 317  
Ville Kakkonen & Erja Tuliniemi

**MAMKIN JA ESEDUN OPISKELIJAT MUKANA LVI-LABORATORION  
KEHITTÄMISHANKKEESSA** ..... 329  
Johanna Arola & Panu Jouhkimo

**THERMAL COMFORT AND VENTILATION EFFECTIVENESS  
EVALUATION IN AUDITORIUM USING COMPUTATIONAL FLUID  
DYNAMICS (CFD)** ..... 339  
Ignas Sokolnikas & Heikki Salomaa & Mika Ruponen

**KESKIJÄNNITEVERKON MYRSKYSIMULAATIOMALLI** ..... 349  
Juha Korpijärvi

# TULOKSELLISTA MAAKUNNALLISTA TUTKIMUS- JA KEHITYSTOIMINTAA ELINKEINOELÄMÄLLE – TUTKIMUSTA YLI RAJOJEN

*Hanne Soininen & Kati Kontinen & Kari Dufva*

Mikkelin ammattikorkeakoulun Metsä, ympäristö ja energia -painoalan tutkimus- ja kehittämistoiminta edistää maakunnan elinkeinon menestyksen ja kasvun kannalta tärkeitä toimialoja, kehittää alueen luonnonvarojen kestäväää käyttöä, parantaa energia- ja materiaalitehokkuutta sekä antaa ratkaisuja ympäristökysymyksiin ja turvaa puhdasta elinympäristöä.

Metsä, ympäristö ja energia -painoalan tutkimusympäristön muodostavat ympäristö-tekniikan, puutekniikan, LVI-tekniikan, materiaalitekniikan ja sähkötekniikan laboratoriot ja Savonlinnan Kuitulaboratorio sekä Elektroniikan 3K-tehdas. TKI-työtä tehdään hankerahoituksella, jossa korostetaan yrityslähtöisyyttä ja tuloksellisuutta. Lisäksi laboratoriot tekevät yritysten tarpeiden mukaista tutkimusta erillisenä palveluliiketoimintana.

”Materiaalit ja ympäristöturvallisuus - strateginen kehittäminen” -hankkeella on vahvistettu Mamkin tutkimus-, kehittämis- ja innovaatiotoimintaa. Hanke on kehittänyt alueen metsävarojen hyödyntämistä ja maaseutuelinkeinoja, alueen puutuoteteollisuutta ja teknologiateollisuutta sekä ympäristö- ja biomassaliiketoimintaa. Hanke on tuonut välillisesti lisäarvoa kehittämällä alueen luonnonvarojen kestäväää käyttöä, parantamalla energia- ja materiaalitehokkuutta, edistämällä materiaalikierrätystä ja jätteen hyötykäyttöä, lisäämällä uusiutuvien energialähteiden käyttöä ja vähentämällä kasvihuonekaasupäästöjä sekä turvaamalla puhdasta elinympäristöä.

Hanke on mahdollistanut vuorovaikutteisuuden lisäämisen eri sidosryhmien kanssa. Hankkeella on syvennetty kansallisia ja kansainvälisiä verkostoja sekä hyödynnetty niitä rahoituslähteiden hankinnassa (muun muassa Interreg- ja CBC-ohjelmat sekä EU Horizon 2020 -rahoitukset).

Tuomalla uutta kansainvälistä tutkimustietoa ja teknologiaa kansallisista ja kansainvälisistä verkostoista Etelä-Savon maakuntaan on kehitetty myös alueen elinkeinoelämää. Tämän artikkeliteoksen toimittajat työskentelevät ”Materiaalit ja ympäristöturvallisuus – strateginen kehittäminen” -hankkeessa. Tässä artikkeliteoksessa esitellään Metsä, ympäristö ja energia -painoalan TKI-toimintaa, jota on vuonna 2016 tehty

muun muassa Mamkin Metsätalouden ja ympäristötekniikan ja Sähkö-, talo- ja materiaalitekniikan koulutusyksiköissä.

## Ympäristöturvallisuus

Mamkin tutkimustoiminnassa ympäristöturvallisuudella tarkoitetaan luonnonvarojen kestävästä käytöstä, yritystoiminnan kehittämistä ympäristöystävällisemmäksi ja puhtaan elinympäristön turvaamista. Ympäristöturvallisuuden TKI-toimintaa tehdään yhdessä yritysten, tutkimuslaitosten ja viranomaisten kanssa. Kaikilla toimijoilla on yhteinen halu vaikuttaa alueen elinvoimaisuuteen ja puhtaan ympäristön turvaamiseen.

Mamkin ympäristöturvallisuuden tutkimus-, kehittämis- ja innovaatiotoiminnan tavoitteena on edistää alueen vesiosaamista, luonnonvarojen ja vesistöjen kestävästä käytöstä ja hallintaa ja Etelä-Savon maakunnan alueen elinkeinotoiminnan kestävästä kehityksestä sekä turvata alueen puhdas elinympäristö. Ympäristöturvallisuudessa kehitetään alueen palveluja ja prosesseja huomioiden niiden elinkaaren aikaiset ympäristö- ja terveysvaikutukset, mahdolliset ympäristöriskit sekä uuden ympäristötekniikan tuomat mahdollisuudet vähähiilisyden edistämiseksi.

Ympäristöturvallisuuteen liittyvä TKI-toiminta keskittyi vuonna 2016 öljyn ja vaarallisten aineiden varastoinnin ja kuljetusten ympäristöriskien minimointiin, veden, ilman ja vuotovesien monitorointiin, bioenergian tuotantoon ja uusiutuviin energiaratkaisuihin liittyvien teknologioiden kehittämiseen ja ekotehokkaisiin ratkaisuihin vesienkäsittelyn ja sivuainevirtojen käsittelyn tiimoilta. TKI-toimintaa tehtiin myös ympäristöriskien hallinnan ja mittaus-, mallinnus- ja monitorointitekniikoiden osalta niin kansallisesti kuin kansainvälisesti.

Ympäristöturvallisuuden TKI-toiminnasta on teokseen kirjoitettu artikkeleita Teke-sin Green Growth – Tie kestäväan talouteen -ohjelman rahoittamasta ”Smart Effluents – Uuden sukupolven jätevedenkäsittelyn ratkaisut vastaamaan vuoden 2050 vaatimuksia” -hankkeesta ja Etelä-Savon maakuntaliiton Euroopan aluekehitysrahaston rahoittamista ”VIM – Veden ja ilman monitorointi ympäristön tilan turvaamiseksi Etelä-Savossa” - ja ”Hajautettu energiantuotanto biohiilipelleteillä” -hankkeista. Lisäksi teoksessa on artikkeleita Etelä-Savon ELY-keskuksen Euroopan aluekehitysrahaston rahoittamista hankkeista ja niiden tuloksista: ”Hevosvoima – Esiselvitys Etelä-Savon hevostalouden materiaalivirtojen hyödyntämisestä uusiutuvana energiana”, ”VEVO – Esiselvitys eteläsavolaisten vesihuoltolaitosten vuotovesistä – vähähiilisyden edistämiseksi”, ”YMPÄRISTÖARKISTO – Ympäristötiedon sähköisen arkistoinnin ja digitaalisen palvelutoiminnan kehittäminen ympäristöturvallisuuden ja vähähiilisyden edistämiseksi” ja ”ÄLYKÖ – Itä-Suomen maa-alueiden ja Saimaan vesistöalueen öljyn ja vaarallisten aineiden varastoinnin ja kuljetusten ympäristöriskien älykäs minimointi ja torjunta”. Teoksessa on myös artikkeleita Etelä-Savon ELY-keskuksen Euroopan maaseudun kehittämisen maatalousrahaston rahoittamasta ”Kasvirketjun

tuoteturvallisuuden ja vähähiilisyden parantaminen koulutuksen keinoin – Kastu”-hankkeesta.

Mamk sai viime vuonna kansainvälisestäikin merkittävän uuden hankeavauksen “Smart Ground - SMART data collection and inteGRation platform to enhance availability and accessibility of data and infOrmation in the EU territory on SecoN-Dary Raw Materials” Euroopan Unionin Horisontti 2020 -tutkimus- ja innovaatio-ohjelmasta. Teokseen on kirjoitettu yhteisartikkeli Metsäsairila Oy:n kanssa Smart Ground -hankkeen alustavista tuloksista.

Ympäristötekniikan hankkeita on yhdistänyt vahva TKI:n ja opetuksen integrointi sekä ympäristölaboratorioiden osallistuminen hanketoimintaan. Artikkeliteoksessa onkin esillä insinööriopinnytöenä (AMK) muun muassa analyysimittausten merkitys jätevedenpuhdistusprosessin säädössä. Lisäksi julkaisussa on aiheeltaan yleisempiä artikkeleita suomyrteistä luonnon omana hyttyskarkotteena ja ilmastonmuutoksen vaikutuksesta Itämeren alueen norppa- ja lintukantaan.

## Metsätalous ja puututkimus

Metsätalouden ja puututkimuksen päätavoitteina on edistää alueen metsävarojen täysimääräistä hyödyntämistä sosiaalisesti, taloudellisesti ja ekologisesti. Metsien taloudellinen merkitys on Etelä-Savossa maakunnista suurin. Alueella on vuosi vuoden jälkeen ollut maan suurimmat kantorahatulot. Puutuoteteollisuuden osuus Etelä-Savon aluetaloudesta on merkittävä. Alueella yli 30 % teollisuuden liikevaihdosta tulee puutuoteteollisuudesta. Etelä-Savon alueella on paljon käyttämättömiä mahdollisuuksia puun käytön lisäämisessä ja monipuolistamisessa sekä jalostusasteen nostamisessa.

Suomi on biotalouden edelläkävijä. Hallitusohjelmassa linjataan, että metsätilakokoa kasvatetaan tavoitteena yrittäjämäinen metsätalous ja metsien hyvä hoito. Samanaikaisesti puretaan rakentamismääräyksiä, jotka estävät puun käyttöä. Lisäksi metsävaratietoja ja sähköisiä palveluja kehitetään ja hyödynnetään tehokkaammin ja suunnataan julkisia investointeja tieverkoston kunnossapitoon.

Metsätalouden artikkeleissa käsitellään ympärivuotisen puunkorjuun onnistumista, yksityistietön merkitystä puunhankinnassa sekä uuden metsälain mahdollistamien uusien metsänkäsittelymenetelmien käyttöä. Kaikilla näillä toimilla pyritään lisäämään metsien ympärivuotista puunkorjuuta ja puun saatavuutta. Lisäksi käsitellään uuden nousevan trendin, digitaalisuuden, näkökulmasta Metsä Big datan käytön mahdollisuuksia metsäalalla.

Suomella on runsaat metsävarat, joiden kasvu on vuosikymmenten ajan ylittänyt poistuman. Myös Etelä-Savon kestävät hakkuumahdollisuudet ylittävät selkeästi toteutuneet hakkuut metsien suhteellisen korkeasta käyttöasteesta huolimatta; näin biotaloudelle on runsaita kasvumahdollisuuksia. Jo nykyisen tasoinen puustojen kas-



vattaminen ja käyttö kaikkineen on pitkään hiotun toimintakokonaisuuden ansiota. Etelä-Savo on metsäteollisuuden keskeistä puunhankinta-aluetta, ja lähialueilla tehtävät investoinnit lisäävät puun kysyntää tuntuvasti. Julkaisun puututkimuksen artikkelit käsittelevät puun modifiointia eri menetelmillä, joita ovat erilaiset luon-toyöstävälliset vahakäsittelyt sekä lämpökäsittely. Lisäksi artikkelissa käsitellään viilua raaka-aineena ja sen ominaisuuksien vaikutusta vanerin valmistuksessa. Puututkimus tukee alueen vahvaa puutuoteteollisuutta.

## **Materiaali- ja energiatekniikan tutkimus**

Materiaalitekniikan tutkimustoiminnassa on kehitetty menetelmiä erityisesti elasteerien ja erilaisten materiaalirajapintojen pitkäaikaiskestävyyden tutkimukseen. Toiminnan tavoitteena on uusien materiaalien ja menetelmien käyttöönoton edistäminen eri teollisuudenaloilla. Tuotantoon ja valmistukseen liittyvissä teknologioissa erityisen suuri painoarvo on digitaalisuuden tuomissa mahdollisuuksissa ja niiden tehokkaassa hyödyntämisessä uudentyypisten toimintatapojen kehityksessä. Teknologiakehityksen tavoitteena on saavuttaa kilpailuetua automaatiotason nostolla sekä tehostaa jo käytössä olevia valmistusmenetelmiä ja tekniikoita.

Digitaalisen tiedonvälityksen ja tiedonkäsittelymenetelmien kehityksen myötä koneista ja laitteista kerättävää tietoa voidaan entistä tehokkaammin hyödyntää niiden ohjaukseen ja seurantaan. Tiedon kerääminen, tallentaminen, analysointi sekä graafinen esittäminen ja esille tuominen ovat tulleet tärkeäksi osaksi toimintaa myös tuotannollisessa teollisuudessa. Pienten ja keskisuurten yritysten digitaalisuutta edistävänä kehitysmuotona on toteutettu niin kutsuttuja Industrial Hack -tapahtumia. Uusien ja osallistavien kehitysmenetelmien tavoitteena on liittää yhteen eri toimialoja ja innostaa nuoria ja yrityksiä uusiin innovaatioihin.

Materiaalien fysikaalisten ominaisuuksien tunteminen on eräs materiaalitekniikan keskeisistä teemoista, ja siihen liittyvä testaustoiminta muodostaa merkittävän osan alan kehitystyöstä. Testaustoiminnan tehostamiseksi ja automatisoimiseksi tutkimusryhmässä on hyödynnetty automaattista kuvankäsittelyä koekappaletason venymätilojen selvittämiseksi.

Mamkissa on vuoden 2015 aikana merkittävästi panostettu taloteknisten energiaratkaisujen tutkimukseen, ja koulun laboratorioon on rakentumassa uudet laboratoriotilat ja demonstraatioympäristöt, joiden avulla erilaisia taloteknisiä energiaratkaisuja voidaan testata hyvin käytännönläheisesti. Ilmanvaihtoon ja energian hallintaan liittyvät tutkimusympäristöt soveltuvat niin opetuksen, tutkimuksen kuin yritysten tuotekehityksen tarpeisiin. Artikkelisarjassa esitellään laboratorioon valmistuva tila ja siihen liittyviä toimintoja.

Mallinnus- ja simulointimenetelmien käyttö teollisuudessa on lisääntynyt merkittävästi. Osaamisen ja ohjelmistotarjonnan lisääntyminen on johtanut monimutkaisten numeeristen mallien arkipäiväisempään käyttöön myös taloteknisessä suunnittelussa ja mitoituksessa. Eri järjestelmävariaatioiden ja mahdollisuuksien monipuolinen hyödyntäminen edellyttää aikaa vievää laskentaa, ja tietokonesimulaatioiden avulla eri mahdollisuuksia voidaan tarkastella kustannustehokkaasti. Talotekniikan tutkimuksessa on kehitetty menetelmiä sisäilman kaasujen virtaustekniseen mallinnukseen ja laboratoriomittauksiin sekä tutkittu vaativien rakennuskohteiden energiatehokkuuden mallinnusta.



# METSÄ, YMPÄRISTÖ JA ENERGIA – KOHTI TULEVAA XAMKIA

*Kati Kontinen & Hanne Soininen*

Metsä, ympäristö ja energia -painoala on tulevan Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun tutkimus- ja kehittämistyön vahvuusalue (kuva 1). Tutkimuksen kehittämisen keihäänkärkinä ovat kuituprosessit, ympäristöturvallisuus, uusiutuvat energialähteet ja energiatehokkuus, metsätalous ja puurakentaminen ja materiaaliteknologia. ([www.xamk.fi](http://www.xamk.fi))

Tutkimusta ja kehittämistä tehdään vuoden 2016 loppuun saakka Kymenlaakson ja Mikkelin ammattikorkeakouluissa. Vuoden 2017 alussa Kyamk ja Mamk yhdistyvät ja toimintansa aloittaa Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Xamk. Uusi ammattikorkeakoulu toimii neljällä paikkakunnalla: Kotkassa, Kouvossa, Mikkelissä ja Savonlinnassa. Xamk on tutkimus-, kehittämis- ja innovaatiotoiminnassa (TKI) Suomen suurin ammattikorkeakoulu. ([www.xamk.fi](http://www.xamk.fi))

Mikkelin ammattikorkeakoululla on yli 100 vuoden kokemus metsäopetuksessa. Metsätalouden yksikkö toimii aktiivisesti eri eteläsavolaisten toimijoiden kanssa hanke- ja kehittämistoiminnassa. Mamkin metsätalouden tutkimus- ja kehittämistoiminnan tavoitteena on kehittää Etelä-Savon metsävarojen hyödyntämistä sekä alueen puun arvoketjuun liittyvää liiketoimintaa.

Mikkelin ammattikorkeakoululla on yli 20 vuoden kokemus ympäristöturvallisuuden liittyvästä tutkimustoiminnasta, jota tukee yli 40 vuotta jatkunut ympäristötekniikan kansallinen ja kansainvälinen koulutustoiminta. Mamkin ympäristöturvallisuuden tutkimus- ja kehittämistoiminnalla on vahva halu vaikuttaa alueen elinvoimaisuuteen sekä puhtaan ympäristön ja vesistöjen turvaamiseen.



**KUVA 1. Metsä, ympäristö ja energia -painoalan TKI-toiminnalla turvataan puhdas tulevaisuus (kuva Manu Eloaho)**

## Metsätalouden merkitys maakunnalle

Metsien taloudellinen merkitys on Etelä-Savossa maakunnista suurin. Alueella on vuosi toisensa jälkeen ollut maan suurimmat kantorahatulot. Puutuoteteollisuuden osuus Etelä-Savon aluetaloudessa on merkittävä. Alueella yli 30 % teollisuuden liikevaihdosta tulee puutuoteteollisuudesta. Etelä-Savon alueella on paljon käyttämättömiä mahdollisuuksia puun käytön lisäämisessä ja monipuolistamisessa sekä jalostusasteen nostamisessa. Etelä-Savon alueen ominaispiirteitä on myös mittava uusiutuvan energian tuotantopotentiaali. Yhteiskunnan vähähiilisyys edistämiseksi tulee lisätä paikallisten uusiutuvien energialähteiden hyödyntämistä ja alueen energiaomavaraisuutta sekä edistää energia- ja materiaalitehokkuutta. Hallituksen kärkihjelman ”Puu liikkeelle ja uusia tuotteita metsästä” mukaan tavoitteena on monipuolistaa ja lisätä puun käyttöä ja kasvattaa sen jalostusarvoa. Suomessa luodaan kilpailukykyisiä ja kestäviä biotalouden ratkaisuja ja synnytetään uutta liiketoimintaa, työpaikkoja ja vientiä. Suomen biotalousstrategian lähtökohtana on, että Suomi on matkalla kohti vähähiilistä yhteiskuntaa.

Tuoreimmassa hallitusohjelmassa linjataan, että Suomi on biotalouden edelläkävijä. Ohjelmassa linjataan edelleen muun muassa, että metsätalokkoa kasvatetaan tavoitteena yrittäjämäinen metsätalous ja metsien hyvä hoito. Samanaikaisesti puretaan rakentamismääräyksiä, jotka estävät puun käyttöä. Lisäksi metsävaratietoja ja sähköi-

siäpalveluja kehitetään ja hyödynnetään tehokkaammin ja suunnataan julkisia investointeja tieverkoston kunnossapitoon. Hallitusohjelmassa edellytetään, että metsien suojelua jatketaan vapaaehtoisin keinoin. Biotalousstrategiassa todetaan rohkaisevasti, että Suomella on runsaat metsävarat, joiden kasvu on vuosikymmenten ajan ylittänyt poistuman. Myös Etelä-Savon kestävät hakkuumahdollisuudet ylittävät selkeästi toteutuneet hakkuut metsien suhteellisen korkeasta käyttöasteesta huolimatta. Näin biotaloudelle on runsaita kasvumahdollisuuksia. Jo nykyisen tasoinen puustojen kasvattaminen ja käyttö kaikkineen on pitkään hiotun toimintakokonaisuuden ansiota. Etelä-Savo on metsäteollisuuden keskeistä puunhankinta-alueetta, ja lähialueilla tehtävät investoinnit lisäävät puun kysyntää tuntuvasti.

## Kiertotaloudesta elinvoimaa Etelä-Savoon

Sitran tekemän selvityksen ”Kierrolla kärkeen – Suomen tiekartta kiertotalouteen 2016–2025” mukaan kiertotalous pyrkii maksimoimaan tuotteiden, komponenttien ja materiaalien sekä niihin sitoutuneen arvon kiertoa taloudessa mahdollisimman pitkään. Kiertotaloudessa tuotanto ja kulutus synnyttävät mahdollisimman vähän hukkaa ja jätettä. Tästä seuraa ympäristöhyötyjä, joita ylikulutuksesta eroon pyrkivä maailma tarvitsee kestäväen kasvun takaamiseksi. Suomella on tunnistettu olevan aito mahdollisuus luoda seuraavien 5–10 vuoden aikana kestävää hyvinvointia ja menestystä hiilineutraalista kiertotaloudesta. Maailma tarvitsee edelläkävijöiden ratkaisuja siihen, miten talouden ja hyvinvoinnin kasvu eivät enää perustu luonnonvarojen tuhlaavaan käyttöön. Kiertotaloudessa tuotteiden tuputtamisen sijaan ansainnan perustaksi nousevat palvelut sekä digitaalisiin ratkaisuihin perustuva älykkyys.

Mikkelin ammattikorkeakoulu pyrkii vastaamaan Etelä-Savossa Sitran esittämään haasteeseen edistämällä alueen kestävää hyvinvointia ja menestystä hiilineutraalista kiertotaloudesta. Vesistöjen laadulla ja niiden puhtaana säilymisellä on tärkeä rooli Etelä-Savossa. Vuonna 2010 Suomen hallitus antoi Itämeri-sitoumuksen, jonka mukaan Suomi pyrkii ravinteiden kierrättämisen esimerkkialueeksi ja saamaan tehotoimilla Saaristomeren hyvään tilaan vuoteen 2020 mennessä.

Hallituksen strategisen ”Biotalous ja puhtaat ratkaisut” -tavoitteen kärkihankkeen ”Kiertotalouden läpimurto, vesistöt kuntoon” yhtenä toimenpiteenä on ravinteiden kierrätys ja Itämeren ja muiden vesien tehostettu suojelu. Tavoitteena on muun muassa vähentää rehevöitymistä ja edesauttaa Itämeren ja vesien hyvän tilan saavuttamista vuoteen 2020 mennessä, säästää ravinteita kierrättämällä mineraalifosforivaroja sekä edistää bio- ja kiertotaloutta. Lisäksi tavoitteena on tehdä ravinnekierrätys yleisesti tunnetuksi ja hyväksytyksi.

Mikkelin ammattikorkeakoulu pyrkii edistämään pääministeri Sipilän hallitusohjelman sekä ravinteiden kierrätyksen vision 2030 tavoitteiden toteuttamista alueellisesti Etelä-Savossa, kansallisesti ja kansainvälisesti Itämeren alueella. Tämä edistää vesistöjen puhtautta, ravinteiden suljettua kiertoa ja kasvattaa osaltaan alueen vesiosaamisen



ta liiketoimintaa. Kiristynvä ympäristölainsäädäntö ja kansalaisten kasvava tietoisuus ympäristövaikutuksista lisäävät ympäristömittausten ja -monitoroinnin merkitystä. Toisaalta digitalisaatio, datan hyödyntäminen sekä älykkäät tietojärjestelmät ja sovellukset ja uudet puhtaat teknologiat luovat mahdollisuuksia ympäristön tilan seurantaan ja ympäristöliiketoiminnalle.

## Alueen metsätalous- ja puututkimus

Mamkin metsätalouden tutkimus- ja kehittämistoiminnan tavoitteena on edistää alueen metsävarojen täysimääräistä hyödyntämistä sosiaalisesti, taloudellisesti ja ekologisesti. Lisäksi kehitetään puun jalostusta ja puun arvoketjuun liittyvää liiketoimintaa. Metsätaloustoimintalinjan tutkimus- ja kehitystoiminnan painopistealueet ovat seuraavat:

1. **Metsäteknologinen tutkimus**, jolla kehitetään erityisesti ympärivuotista puunkorjuuta, puunhankinnan logistiikkaa ja operatiivisia toimintoja sekä kehitetään metsänhoitoa ja metsänhoidon tuottavuutta.
2. **Yksityismetsätalouden kehittäminen**, jolla lisätään yleistä metsätalouden osaamista, liiketoimintaosaamista metsätaloudessa sekä lisätään digitaalisuuden tuomia uusia mahdollisuuksia metsätaloudessa.
3. **Puututkimuksella** edistetään uusien puutuotteiden tutkimista ja puun modifointia eri keinoin sekä edistetään puutuoteteollisuuden yritysten liiketoimintaa.

## Alueen ympäristötutkimus

Mamkin ympäristöturvallisuuden tutkimus-, kehittämis- ja innovaatiotoiminnan tavoitteena on edistää alueen vesiosaamista, luonnonvarojen ja vesistöjen kestävää käyttöä ja hallintaa, Etelä-Savon maakunnan alueen elinkeinotoiminnan kestävää kehitystä sekä turvata alueen puhdas elinympäristö. Ympäristöturvallisuudessa kehitetään alueen palveluja ja prosesseja huomioiden elinkaaren aikaiset ympäristö- ja terveysvaikutukset, mahdolliset ympäristöriskit sekä uuden ympäristöteknologian tuomat mahdollisuudet vähähiilisyden edistämiseksi. Ympäristöturvallisuustoimintalinjan tutkimus- ja kehitystoiminnan painopistealueet ovat seuraavat:

1. **Puhtaat teknologiset ratkaisut bio-, kierto- ja vesitaloudessa**, jolla edistetään teollisuus- ja maaseutuyritysten materiaalivirtojen suljettua kiertoa, kestävää vesienkäsittelyä ja cleantechiin liittyvän liiketoiminnan kannattavuutta.

2. **Ympäristöturvallisuuden ja -terveyteen liittyvien riskien hallinta**, jolla edistetään yritysten ja maa- ja metsätalouden ympäristöturvallisuutta, kiinteistöjen ja yhdyskuntien ympäristöterveyttä ja kehitetään niihin liittyviä älykkäitä kokonaisratkaisuja. Lisäksi edistetään alkutuotannon ja elintarvikkeiden tuoteturvallisuutta ja vähähiilisyyttä.
3. **Yhdyskuntien ja teollisuuden ympäristön tilan monitorointi**, jossa kehitetään vesihuollon, päästöjen sekä ympäristön tilan ja ympäristöterveyteen liittyviä mittaus-, mallinnus- ja monitorointitoimintoja. Lisäksi kehitetään ympäristön tilan ja ympäristöterveyden monitorointia mallintamisella ja älykkäillä ICT-järjestelmillä, jotka lisäävät muun muassa ympäristötiedon jäljitettävyyttä ja edistävät ympäristöön kohdistuvien riskien ennakoimista.

## Johtopäätökset

Mamkin ja tulevan Xamkin tutkimustoiminta vahvistaa Etelä-Savon tutkimus-, kehitys- ja innovaatiotoiminnan laajuutta ja vaikuttavuutta maakuntaohjelmassa määritellyillä kärkialueilla, joita ovat metsä ja vesi. Ammattikorkeakoulu lisää alueen elinkeinoelämän kasvua, puhtaiden vesistöjen säilymistä sekä ympäristötekniikan ja metsätalouden kehittämistä hyödyntäen digitaalisuutta ja luoden maakuntaan uusia innovaatiota ja älykkäitä ratkaisuja.



# YMPÄRISTÖTURVALLISUUS





# HEVOSWOIMA-HANKKEELLA UUSIUTUVAA ENERGIAA HEVOSENLANNASTA

*Riikka Tanskanen & Hanne Soininen & Jarno Föhr & Tapio Ranta*

Esiselvitys Etelä-Savon hevostalouden materiaalivirtojen hyödyntämisestä uusiutuvana energiana -hankkeessa (HevosWoima, 1.3.2016–28.2.2017) edistetään alueellisesta hevostaloudesta muodostuvien sivuainevirtojen hyödyntämistä kustannustehokkaasti ja vähän ympäristöä kuormittavasti. Hankkeen painopiste on erityisesti tutkia ja edistää hevosenlannan energiahyödyntämistä Etelä-Savossa. Hanke tuottaa tietoa alueen mahdollisista hevosenlannan polttopaikoista sekä materiaalin käyttäytymisestä eri kokoluokan biopolttoainekattiloissa. Hankkeen toteuttavat Mikkelin ammattikorkeakoulu sekä Lappeenrannan teknillinen yliopisto ja sitä rahoittavat Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan aluekehitysrahastosta, Suur-Savon Energiasäätiö sr sekä Vapo Oy.



**KUVA 1.** HevosWoima-hankkeessa testataan hevosenlantaa energiantuotannossa (kuva Manu Eloaho)

## Johdanto

Hevoslannan energiahyödyntäminen nousi julkisesti kiinnostavaksi aiheeksi vuoden 2015 hallitusohjelman myötä, kun uusiutuvien energianlähteiden tavoitteeksi 2020 mennessä asetettiin 50 % käyttöaste. Biotalousnäkökulmasta hevoslanta on uusiutuva ja päästötön energianlähde, jonka käyttöpotentiaalia ei ole vielä valjastettu. Nykyisellään hevoslannan pääasiallinen hyödyntäminen keskittyy perinteisesti sen sisältämien ravinteiden hyödyntämiseen kompostoinnin jälkeen maanviljelyksessä. Enemmistöllä nykypäivän hevosyrittäjistä ei ole itsellään Etelä-Savossa soveltuvaa peltomaata, jossa hevosten ylläpidosta syntyvää lantaa pystyisi hyödyntämään. Vuoden 2016 alusta voimaan astunut nk. nitraattiasetus on hankaloittanut lannan peltovetystä entuudestaan, sillä lantaa ei sen nojalla saa enää levittää kalteville pelloille (VNA 1250/2014). Tämän lisäksi hevoslantaa ei biohajoavana materiaalina ole enää vuoden 2016 alusta lähtien voinut toimittaa kaatopaikoille (VNA 331/2013). Näin ollen osalle Etelä-Savon hevosyrittäjistä on hevoslannan loppusijoituksesta muodostunut ongelma ja ylimääräisiä kustannuksia aiheuttava jäte-erä.

## Hevoslannan saatavuus ja ominaisuudet bioenergianlähteenä

HevosWoima-hankkeessa haastateltiin touko–kesäkuun 2016 aikana pieni otos Etelä-Savon hevosyrittäjiä, jotka edustavat kattavasti alueen ravitalleja, ratsastustalleja, hevosvalmennus- ja -kuntoutustoimintaa sekä siittoloita. Otokseen valituilta hevosyrittäjiltä selvitettiin paitsi syntyvän hevoslannan määrää, myös heidän nykyisiä käytäntöjään hevoslannan käyttöön ja sijoitukseen liittyen. Haastattelussa selvitettiin myös hevosyrittäjien toiveita potentiaalista hevoslannan energiahyödyntämistä koskien.

Hevoslannan energiahyödyntämistä koskien HevosWoima-hankkeen haastatelussa selvisi, että enemmistö haastatelluista hevosyrittäjistä olisi valmis luovuttamaan hevoslantaa alueelliseen energiantuotantoon. Hevoslantaa olivat erityisesti valmiita luovuttamaan ne hevosyrittäjät, joilla oli nykytilanteessa haasteita hevoslannan hyödyntämisessä tai lannan logistiikasta aiheutui heille merkittäviä kustannuksia.

Haastattelujen lisäksi otokseen valituilta hevosyrittäjiltä saatiin analysoitavaksi 30 hevoslantanäytettä, joiden perusteella selvitetään hevoslannan alkukoostumusta sekä pystytään vertailemaan eri karsinakuivikkeiden vaikutusta energiahyödyntämisen näkökulmasta. Kuvassa 2 on nähtävissä yhden näyte-erän kutteripohjainen hevoslanta näytteenottohetkellä. Tutkittavista näytteistä määritettiin irtotiheys, kosteus-, kuiva-aine- ja tuhkapitoisuus, pH, sähkönjohtavuus, kloridipitoisuus, palakokojakauma sekä kalorimetrinen lämpöarvo. Lisäksi hevoslannan alkukoostumusta tarkasteltaessa hyödynnetään muiden tahojen aiemmin toteuttamien tarkastelujen tuloksia erityisesti ravinnepitoisuuksien osalta. Seuraavassa on kerrottu joitakin selvityksessä valmistuneita tuloksia.





**KUVA 2. Kutteripohjainen alle 2 päivää vanha hevoselantaerä HevosWoima-hankkeen näytteenottohetkellä (kuva Riikka Tanskanen 2016)**

Hevoselantanäytteiden kosteuspitoisuudet vaihtelivat 31,3–81,4 % välillä. Vaihteluun vaikuttivat suuresti lantamateriaalin ikä sekä lantalan rakenne. Kosteuspitoisuukseltaan suurimmat näytteet saatiin lantalasta, jonka pohjalle oli kerääntynyt sadevettä. Myös eri kuivikkeiden välillä oli havaittavissa selkeitä eroja, jotka johtuvat kuivikkeiden luontaisista eroista. Hyvin vähän tai ei lainkaan maatuneiden hevoselantanäytteiden osalta turvekuivikepohjaisten näytteiden kosteus oli yli 60 %, kutteripohjaisten näytteiden yli 50 % ja täyspitkien olkinäytteiden keskimäärin alle 40 %.





**KUVA 3. Kalorimetrinen lämpöarvon määrittämisen työvaiheita. Kuivatusta ja jauhetusta näytteestä valmistetaan tabletteja (vasemmalla), joita käytetään pommikalorimetrissä materiaalin lämpöarvoa analysoitaessa (oikealla) (kuvat Riikka Tanskanen)**

Kalorimetrinen lämpöarvon analysointi toteutettiin Mikkelin ammattikorkeakoulun ympäristölaboratoriossa Parr 6200 -pommikalorimetrillä (kuva 3). Kalorimetrinen lämpöarvojen tulokset eri kuivikkeita edustaville lantanäytteille ovat nähtävissä taulukossa 1. Esitetyissä tuloksissa on huomioitu ainoastaan yhtä kuiviketta käyttävien tallien analyysitulokset. Havaittavaa tuloksissa on hevosenlannan kalorimetrinen lämpöarvon heikkeneminen maatumisprosessin myötä.

**TAULUKKO 1. Kalorimetrinen lämpöarvon analyysituloksia hevosenlantanäytteille**

Käytetty tallikuivike	Kalorimetrinen lämpöarvo (MJ/kg) Lantanäyte alle 3 kk vanhat	Kalorimetrinen lämpöarvo (MJ/kg) Lantanäyte yli 3 kk vanhat
Kutteri	18,02 MJ/kg	17,16 MJ/kg
Olki	17,67 MJ/kg	ei näytettä
Turve	16,25 MJ/kg	10,46 MJ/kg

Hevosennannan analysoinnin haasteena on yleisesti materiaalin erittäin suuri heterogeisuus. Jopa jauhetuista näytteistä saatavien rinnakkaismääritysten välillä saattaa olla suuria eroja. Kaikki HevosWoima-hankkeen analyysitulokset valmistuvat vuoden 2016 loppuun mennessä.

## Pilot-polttokokeet hevosennannalla

HevosWoima-hankkeessa vertaillaan eri energiantuotantovaihtoehtojen luomia mahdollisuuksia hevosennantaa hyödynnettäessä. Vertailussa keskitytään erityisesti polton ja biokaasutuksen vertailuun, jossa näiden energiantuotantotapojen tuottavuutta ja ympäristövaikutuksia vertaillaan keskenään. Hankkeessa toteutetaan myös omia pilot-mittakaavan polttokokeita, joilla pyritään selvittämään lantamateriaalin käyttäytyminen eri mittakaavan biopolttoainekattiloissa. Pilot-mittakaavan polttokokeet toteutetaan Mikkelin ammattikorkeakoulun 20 W pellettipolttimella sekä voimalaitosympäristön leijupetikattilatekniikkaa käyttävässä energiantuotantoyksikössä. Polttokokeet mahdollistavat kokeissa muodostuvien savukaasupäästöjen mittaamisen sekä syntyvien tuhkien tarkastelun. Myös lannan poltossa potentiaalisesti syntyvien hajupäästöjen syntyä tarkkaillaan polttokokeiden aikana. Polttokokeissa käytettävät kuivikemateriaalit valikoidaan aiempien tutkimustulosten perusteella, ja polttokokeissa käytettävät hevosennantaerät saadaan alueellisilta hevossyrittäjiltä.



**KUVA 4.** Kutteripohjaista hevosennantaa kolmessa eri muodossa (vasemmalta oikealle): kuivattua hevosennantaa, jauhettua hevosennantaa ja kutteripohjaisia hevosennantapellettejä (kuvat Riikka Tanskanen)

Nykylaisäädännön perusteella hevosenlanta rinnastetaan jätedirektiivin nojalla jätteeksi. Näin ollen sen polttamiseen tarvitaan ympäristöluvun lisäksi myös jatkuva toiminen päästömittausjärjestelmä. HevosWoima-hankkeessa toteutettavien polttokokeiden avulla pyritään selvittämään poltosta syntyvien savukaasujen laatua, ja savukaasupäästöjä vertaillaan perinteisillä polttoaineilla tuotettuun vastaavaan päästöön. Näin hankkeessa pystytään tuottamaan myös tietoa hevosenlannan energiahöydyntämisen ympäristövaikutuksista sekä mahdollistamaan vertailu perinteisten polttoaineiden kanssa (kuva 4).

## Tulevaisuuden bioenergianlähde

HevosWoima-hankkeessa selvitetään, minkälaiset energiantuotannon vähähiiliset ratkaisumallit palvelisivat kustannustehokkaasti Etelä-Savossa sekä alueen hevosyrittäjiä että energiantuotantoa. Hevosenlannan bioenergiatuotannon suunnittelussa otetaan huomioon ympäristönäkökulmien ja kustannustehokkuuden lisäksi myös hevosyrittäjien erilaiset tarpeet. Luotavissa ratkaisumalleissa huomioidaan materiaalien saataavuus, varastointi, logistiikka sekä energianhöydyntämispaikat.

Tavoitteena on luoda Etelä-Savon hevosyrittäjien toimintaa tukevia ratkaisumalleja, joilla hevosenlantaa voidaan tuotteistaa vähähiilisenä bioenergian lähteenä. Parhaimmillaan muodostettavilla ratkaisumalleilla pystytään luomaan alueen hevosyrittäjille säästöjä nykyisiin käytäntöihin verrattuna sekä edesauttamaan alueellista vähähiilistä energiantuotantoa.

Hankkeen aikana tehdyistä havainnoista tehdään alueen hevosyrittäjille suunnattu opas, jonka avulla hankkeessa tuotettua tietoa voidaan jakaa tehokkaasti Etelä-Savon hevosyrittäjille.

HevosWoima-hanke jatkuu vuoden 2017 helmikuun loppuun saakka. Näin ollen hankkeen toteutus on vielä tämän artikkelin julkaisuhetkellä kesken, eivätkä hankkeen lopulliset tulokset ole vielä esitettävissä.

## Lähteet

VNA 1250/2014. Valtioneuvoston asetus eräiden maa- ja puutarhataloudesta peräisin olevien päästöjen rajoittamisesta 1250/2014.

VNA 331/2013. Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 331/2013.

# VUOTOVESIEN VAIKUTUS VIEMÄRIJÄRJESTELMIEN ENERGIATEHOKKUUTEEN ETELÄ- SAVON ALUEELLA

*Tuija Ranta-Korhonen*

Mikkelin ammattikorkeakoulun toteuttamassa VEVO-hankkeessa ”Esiselvitys etelä-savolaisten vesihuoltolaitosten vuotovesistä – vähähiilisyiden edistämiseksi” -selvitetään Mikkelin, Pieksämäen ja Savonlinnan vesilaitosten viemärijärjestelmien vuotovesien määriä ja niiden alkuperää. Vuotovesien vaikutus jätevedenkäsittelyprosessiin on merkittävä, sillä vuotovesien määrä saattaa olla 30–40 % tai jopa 50 % koko käsitellystä jätevesimäärästä. Vuotovedet muodostuvat sekä hulevesistä että pohjavedestä. Hulevedet voivat päästä jätevesiverkkoon muun muassa viemäriverkoston tarkastuskaivojen kansien tai vuotavien putkiliitosten kautta lähinnä lumien sulamisen ja rankkasateiden aikaan. Pohjavesien osalta merkittävä tekijä on pohjaveden korkeus sekä jätevesiputken kunto ja maaperän laatu putkikaivannossa. Monella vesilaitoksella vuotovesien määrä on ollut kasvussa, mikä johtuu esimerkiksi lisääntyneistä talviaikaisista vesisateista. VEVO-hanketta rahoittavat Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan aluekehitysrahastosta sekä Mikkelin Vesilaitos, Savonlinnan Vesi, Pieksämäen Vesi Oy ja Mikkelin Ammattikorkeakoulu Oy.

## Johdanto

Ilmastonmuutoksen myötä erilaiset sään ääri-ilmiöt, kuten voimakkaat vesisateet tai lämpötilan vaihtelut, lisääntyvät. Esimerkiksi lisääntyvän sadannan odotetaan yhdes- sä kaupunkien keskustojen vettä läpäisemättömien pintojen ja päällysteiden kanssa kasvattavan kaupunkitulvien määrää. Runsaat sade- ja sulamisvedet voivat vaurioittaa infrastruktuuria ja aiheuttaa monenlaisia ongelmia esimerkiksi jätevesijärjestelmissä. Lisääntyvä sadanta ja etenkin talviaikaiset vesisateet kasvattavat myös vuotovesien määrää jätevesiviemärisissä.

Vanhoilla asuinalueilla sekä jätevedet että hulevedet saatetaan johtaa jätevedenpuhdistamolle samassa järjestelmässä, mikä rankka-sateiden tai voimakkaan lumensulamisen aikaan kuormittaa jäteveden käsittelyjärjestelmää sekä lisää huomattavasti jäteveden käsittelyssä kuluvan energian määrää. Tämä puolestaan lisää jätevedenkäsittelyn tuottamia kasvihuonekaasuja ja kasvattaa hiilijalanjälkeä. Vuotovesien määrä jätevesijärjestelmässä pitäisikin pystyä vähentämään huomattavasti. Tämä vaatisi

jätevesiverkoston saneerausten lisäämistä, mikä voi olla vaikeaa nykyisenä kireän kuntatalouden aikakautena. Vuotovesitutkimusten avulla voidaan kuitenkin selvittää jätevesijärjestelmien kohdat, joihin suunnatut saneeraustoimenpiteet tuottavat taloudellisesti parhaan tuloksen.



**KUVA 1. Vuotovedet aiheuttavat ongelmia vesihuollossa (kuva Manu Eloaho)**

## **Vuotovesien määrä Etelä-Savon vesilaitosten viemäriverkostoissa**

VEVO-hankkeessa vuotovesien määrää Etelä-Savon vesilaitosten viemäriverkostoissa selvitettiin kyselytutkimuksen avulla. Kyselyn avulla kartoitettiin vesilaitosten eri verkostojen pituuksia ja käytettyjä putkimateriaaleja, sekä verkostojen ikää ja kuntoa. Lisäksi vesilaitoksilta kysyttiin niiden vuosittain myymän talousveden määrää sekä käsiteltyjä jätevesimääriä ja pumppaamoilla ja puhdistamoilla jäteveden käsittelyyn käytettyä energiaa. Koska hulevesillä on suuri rooli vuotovesien syntymisessä, kartoitettiin myös hulevesien määriä ja käsittelyä. Jokaiselta vesilaitokselta kysyttiin lisäksi niiden omia arvioita vuotovesien lähteistä. Vesilaitosten verkostojen pituudet sekä pumppaamojen määrät on esitetty taulukossa 1.

**TAULUKKO 1. Etelä-Savon kaupunkien vesilaitokset vuonna 2015**

	<b>Asukkaat (hlöä)</b>	<b>Talousvesiverkosto (km)</b>	<b>Viemäriverkosto (km)</b>	<b>Sekaviemäri (km)</b>	<b>Hule- ja sadevesiviemäri (km)</b>	<b>Pumppaamot (kpl)</b>
<b>Savonlinnan Vesi</b>	22 568	287	301	10	88	142
<b>Pieksämäen Vesi Oy</b>	18 000	360	216	-	65	92
<b>Mikkelin Vesilaitos</b>	55 000	451	540	1	240	128

Savonlinnan Veden mukaan vuotovedet vesilaitoksen toiminta-alueella ovat peräisin sekä hulevesistä että maaperän vesistä. Myös Saimaan vedenkorkeus vaikuttaa vuotovesien määrään. Kun Saimaan vedenpinta on korkealla, lisääntyvät myös vuotovedet selvästi. (Savonlinnan vesi 2016.)

Pieksämäen Vesi Oy:n toiminta-alueella viemäri- ja sadevedet on alusta asti eroteltu omiin verkostoihinsa. Vuotovesien pääasiallisena lähteenä on maaperän vesi. Tosin esimerkiksi Vaalijalan alueilla suurimpana vuotovesilähteenä ovat hulevedet. Lisäksi vuotovesiä syntyy kiinteistöjen hule- ja kuivatusvesistä, mikäli kiinteistöjen liittymät on virheellisesti kytketty jätevesiviemäriin. (Pieksämäen Vesi Oy 2016a.)

Mikkelin Vesilaitoksen alueella kantakaupungin (keskusta, Rantakylä ja Otava) viemäriverkostot ovat suhteellisen hyvässä kunnossa, mutta esimerkiksi Anttolan ja Ristiinan alueilla viemäriverkosto on melko huonokuntoinen, mikä näkyy suhteellisen suurina vuotovesimäärinä. Vuonna 2015 vuotovesimäärä oli kantakaupungin alueella 3 670 m<sup>3</sup>/vrk, kun taas Ramboll Finland Oy:n vuonna 2014 tekemän tutkimuksen mukaan vuotovesiä syntyy Anttolassa 200–300 m<sup>3</sup>/vrk ja Ristiinassa 300–400 m<sup>3</sup>/vrk. (Mikkelin Vesilaitos 2016, Ramboll 2014.)

VEVO-hankkeessa on alustavasti tarkasteltu vuotovesien määriä vertaamalla vesilaitosten myymiä talousvesimääriä jätevedenpuhdistamolla käsiteltyihin jätevesimääriin. Tarkastelun tulokset on esitetty taulukossa 2. Tarkastelun perusteella voidaan sanoa vuotovesimäärien Etelä-Savon kaupunkien vesilaitosten toiminta-alueilla olevan hyvin tyypillisiä.

## TAULUKKO 2. Vuotovesimäärät Etelä-Savon kaupunkien vesilaitosten toiminta-alueilla

	Myyty talous- vesi/laskutettu jätevesi vuodessa (m <sup>3</sup> )	Käsitelty jäte- vesi vuodessa (m <sup>3</sup> )	Vuotovesien määrä (%)
Savonlinnan Vesi	1 675 522	2 823 237	41
Pieksämäen Vesi Oy	1 079 140	2 054 954	47
Mikkelin Vesilaitos	2 860 000	4 200 000	32

## Vuotovesien aiheuttama energiankulutus

Vuotovedet aiheuttavat turhaa energiankulutusta jätevesijärjestelmissä, sillä niiden käsittely kuormittaa pumppaamoja ja jätevedenpuhdistamoja. Vuonna 2016 tehdyn diplomityön mukaan esimerkiksi Joensuussa vuotovesien pumppaus kuluttaa noin 43 % jätevesien pumppaukseen käytettävästä kokonaisenergiämäärästä, mikä on yhteensä noin 480 MWh vuodessa (Ronkainen 2016, 87). Tampereen Vedelle vuonna 2012 tehdystä diplomityöstä on laskettu, että jäteveden käsittelyyn Tampereen Veden jätevesijärjestelmässä kuluu energiaa noin 0,46 kWh/m<sup>3</sup> (Rautio 2012, 37). Tästä määrästä jopa 50 % voi siis kuluu vuotovesien käsittelyyn.

VEVO-hankkeessa on kartoitettu laskettujen vuotovesimäärien aiheuttamaa turhaa energiankulutusta Etelä-Savon kaupunkien viemäriverkostoissa. Laskennassa on käytetty hyväksi arvioituja vuotovesimääriä sekä pumppaamojen ja jätevedenpuhdistamojen vuotuista energiankulutusta. Kaavamaisesti laskemalla esimerkiksi Savonlinnan Veden alueella vuotovesien pumppaamiseen kului vuonna 2015 energiaa noin 210 MWh ja Pieksämäen Vesi Oy:n toiminta-alueella noin 350 MWh. Puhdistamoilla vuotovesien käsittelyyn kulunut energia vuonna 2015 on esitetty taulukossa 3.

## TAULUKKO 3. Jäteveden puhdistamoilla vuotovesien käsittelyyn kulunut energiamäärä vuonna 2015

	Vuotovesien aiheuttama energiankulutus (MWh) puhdistamolla
Savonlinnan Vesi	614
Pieksämäen Vesi Oy	496
Mikkelin Vesilaitos	714



Vuotovesien käsittelyyn kuuluva energiamäärä on Etelä-Savon kaupunkienkin vesilaitoksissa melko suuri. Selkeän kuvan käytetyn energian määrästä saa, kun vertaas sitä sähkölämmitteisessä omakotitalossa vuosittain kuluvaan sähkön määrään. Sähköä pinta-alaltaan noin 120 m<sup>2</sup>:n suuruudessa talossa kuluu lämmitykseen ja muuhun käyttöön vuositasona noin 19 500 kWh (Sähkönkulutus 2016).

## Vuotovesien vähentäminen

Vuotovesien määrän vähentämiseen on useita keinoja. Luonnollisesti putkistojen, kaivojen, pumppaamojen ja muiden jätevesijärjestelmän osien kuntoa pitää jatkuvasti tarkkailla ja järjestelmää pitää saneerata. Vanhoilla asuinalueilla olevista sekaviemäreistä pitäisi pyrkiä pääsemään eroon. Lisäksi kiinteistöjen virheelliset kuivatus- ja hulevesien johtamiseen käytettävät liittymät jätevesiviemäriin pitäisi pystyä löytämään ja poistamaan. Esimerkiksi Pieksämäen Vesi Oy on käynnistänyt toiminta-alueellaan projektin, jonka tavoitteena on saada hulevedet pois viemäreistä. Projektin aikana pyritään aluksi neuvonnan ja tiedottamisen avulla saamaan kiinteistöjen omistajia korjaamaan virheelliset kuivatus- ja hulevesien liittymät. Projektin edetessä keinovalikoimaan tulevat mukaan myös sanktiot virheellisistä liittymistä. (Pieksämäen Vesi 2016b.)

Toinen merkittävä keino vaikuttaa vuotovesien määriin on hulevesien käsittelyn kehittäminen. Lainsäädännössä hulevesiä ja rakennusten perustusten kuivatusvesiä käsitellään yhtenä kokonaisuutena. Hulevesiä ja kuivatusvesiä koskevaa lainsäädäntöä uudistettiin vuonna 2014 tekemällä muutoksia ja lisäyksiä maankäyttö- ja rakennuslakiin (MRL 132/1999) sekä vesihuoltolakiin (VHL 119/2001). Suurin syy hulevesiä koskevien muutosten lisäämiselle maankäyttö- ja rakennuslakiin oli se, että hulevesien hallinnan tärkeimpänä keinona voidaan pitää kaavoitusta (Rontu 2014). Päävastuu hulevesien käsittelystä on kunnilla.

Hulevesien luonnonmukainen käsittely tarkoittaa vesien viivyttämistä ja imeyttämistä maanpäällisissä painanteissa, altaissa ja kosteikoissa tai tulvaniityillä. Lisäksi voidaan käyttää maanalaisia kennostoja tai karkealla soralla täytettyjä kaivantoja. Uusilla asuinalueilla luonnonmukaisen käsittelyjärjestelmän suunnittelu ja rakentaminen voidaan ottaa huomioon jo alueen kaavoitusvaiheessa.

Jätevesijärjestelmiä ei luultavasti koskaan pystytä rakentamaan täysin tiiviiksi, vaan niihin pääsee aina vuotamaan myös järjestelmään kuulumattomia vesiä. Määriä voidaan kuitenkin vähentää ja samalla pienentää jätevedenkäsittelyn prosesseihin kuluvaa energiamäärää. Energiamäärän väheneminen pienentää jätevedenkäsittelyn hiilijalanjälkeä. Vuotovesien määrien vähentäminen auttaa siis osaltaan yhteiskuntaa saavuttamaan sille asetetut ilmastotavoitteet.



## Lähteet

Mikkelin Vesilaitos 2016. Neuvottelu Mikkelissä 14.4.2016.

Pieksämäen Vesi Oy 2016a. Neuvottelu Pieksämäellä 28.4.2016.

Pieksämäen Vesi Oy 2016b. Hulevesiä viemärissä – korotettu jätevesimaksu?  
<http://www.pieksamaenvesi.fi/category/ajankohtaista/>

Ramboll 2014. Mikkelin kaupungin vesihuollon kehittämissuunnitelma, 21.4.2014.

Rautio, Kirsi 2012. Vesihuollon energiatehokkuuden kehittämismahdollisuudet tuotannonohjausjärjestelmää hyödyntäen. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Ronkainen, Juha 2016. Vuotovesien merkitys jätevesihuollossa. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Rontu, Kirsi 2014. Hulevedet ja vesihuoltolaki. Esitysmateriaali. Kuntamarkkinat 10.9.2014.

Savonlinnan Vesi 2016. Neuvottelu Savonlinnassa 17.3.2016.

Sähkönkulutus 2016. Kodin sähkönkulutus. <http://www.sahkonkulutus.fi/?id=814>

# VUOTOVESIEN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

*Jukka Selin & Tuija Ranta-Korhonen*

Mikkelin ammattikorkeakoulun toteuttamassa VEVO-hankkeessa ”Esiselvitys Etelä-Savon vesihuoltolaitosten vuotovesistä – vähähiilisyden edistämiseksi” selvitetään Mikkelin, Pieksämäen ja Savonlinnan vesilaitosten viemärijärjestelmien vuotovesien määriä ja niiden alkuperää. Vuotovedet muodostuvat sekä hulevesistä että pohjavedestä. Hulevedet pääsevät jätevesiverkkoon muun muassa viemäriin kansiin ja kaivojen kautta lähinnä lumien sulamisen ja rankkasateiden aikaan. Pohjavesien osalta merkittävä tekijä on pohjaveden korkeus sekä jätevesiputken kunto ja maaperän laatu putkikaivannossa. Vuotovesien vaikutus jätevedenkäsittelyprosessiin on merkittävä, sillä vuotovesien määrä saattaa olla 30–40 % koko jätevesimäärästä. Hanketta rahoittavat Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan aluekehitysrahastosta sekä Mikkelin Vesilaitos, Savonlinnan Vesi, Pieksämäen Vesi Oy ja Mikkelin Ammattikorkeakoulu Oy.

## Johdanto

Vuotovesien ympäristövaikutukset muodostuvat lähinnä jätevesimäärien kasvun seurauksena. Ensimmäiseksi suuri vuotovesikuorma näkyy jätevesiverkoston virtausten kasvuna ja putkiston täyttymisenä. Putkiston täytyessä pumppaamojen yliajoriski kasvaa huomattavasti. Vastaavasti kuormitus aiheuttaa ongelmia jätevesipuhdistamolla, jossa vesiä saatetaan joutua ajamaan ohi puhdistamon. Yli- tai ohiajossa ympäristöön pääsee puhdistamattomia jätevesiä yhdessä hulevesien kanssa. Myös pohjavedet voivat saastua vuotovesistä tilanteessa, jossa pohjaveden pinta on viemäriputkea alempana tai putki on paineistettu. Tällöin jätevettä saattaa vuotaa pohjaveteen.

Suurin ympäristövaikutus vuotovesistä aiheutuu, kun ylivuotojen seurauksena jätevesiä virtaa puhdistamattomana ympäristöön. Jätevesissä on muun muassa hiekkaa, mineraaliöljyä, patogeenejä, ravinteita sekä erilaisia kuluttajien käyttämiä kemikaaleja.

Vuotovesien määrän vähentämisessä ovat olennaisia viemäriverkoston korjaukset ja huoltotoimet, mutta myös ennen kaikkea hulevesien paikallinen käsittely. Hulevesien käsittelyn tavoitteena on, että ensisijaisesti hulevedet imeytetään maahan tai viivytetään tulvahuippujen aikana. Maahan imeyttämällä voidaan ehkäistä ja vähentää myös pohjaveden pinnan laskua ja sitä kautta maan painumista.

## Vuotovesien syntyminen

Vuotovedet muodostuvat vesistä, jotka ovat jätevesiputkea ympäröivässä maaperässä, kaivannon täytteessä tai pääsevät jätevesiputkeen maan pinnalta. Käytännössä vuotovedet koostuvat joko pohja- tai hulevesistä. Maaperästä vedet pääsevät jätevesiputkeen rikkoutuneiden tai huokoisten putkien ja putkenseinämien, vuotavien putkiliitosten, vuotavien ja vaurioituneiden tarkastuskaivojen tai tarkastusputkien kautta. Pohjavesien pääseminen verkkoon edellyttää, että jätevesiputki on pohjaveden pinnan alapuolella. Jos jätevesiputki on paineistettu tai putki on pohjaveden pinnan yläpuolella, saattaa jätevettä vuotaa putkesta pohjaveteen. Toinen vuotovesikuormituksen aiheuttajista on hulevedet, jotka pääsevät jätevesiverkkoon viemärin kansien ja kaivojen kautta sekä laittomien liitäntöjen myötä. Yksittäisen tarkastuskaivon kannen kautta kaivoon voi päästä vettä jopa 1,7–5 l/s. Vesimäärä riippuu kannen tiiviyydestä ja mahdollisten aukkojen lukumäärästä. (Karttunen 1999, Forss 2005.)

## Hulevedet

Hulevesien merkitys ympäristölle muodostuu kolmella tavalla. Hulevedet imeytyvät maan läpi pohjaveteen, virtaavat pintavesien mukana vesistöön tai kulkeutuvat yhdessä jätevesien kanssa ympäristöön. Rankkasateiden ja äkillisten sulamisten aikana suuret hulevesivirtaamat nostavat vuotovesivirtaamia jätevesiverkossa. Tämä taas johtaa pumppaamoiden yliajoihin sekä ohijuoksutukseen puhdistamolla. Näin hulevedet kulkeutuvat suoraan vesistöön ja pahimmassa tapauksessa myös puhdistamon likaisia jätevesiä ”karkaa” mukana.

Nykyään hulevesiä imeytetään enemmän maahan, jotta likaisten hulevesien sisältämät jakeet sitoutuisivat maaperään, eivätkä näin ollen likaisi pohja- tai pintavesiä. Likaisten hulevesien päästessä jätevesiverkoston niiden sisältämät ravinteet, metallit (kromi, nikkeli, lyijy, kupari, sinkki ja kadmium), arseeni, sulfaatti, natrium ja kloridi, öljyt, rasvat, liuottimet, orgaaniset yhdisteet, torjunta-aineet sekä suolistoperäiset bakteerit kulkeutuvat osittain jätevesipuhdistamon ohiajon myötä suoraan vesistöön. (Malin 2012.)

Erityisesti maanteiden hulevesien mukana huuhtoutuu huomattavia määriä kiintoainetta, metalleja, klorideja ja hiilivetyjä. Vuotovesien kannalta oleellista on teiltä tulevien hulevesien vaikutus pidemmän kuivan kauden jälkeen. Ilmeisesti kuivan kauden aikana tielle kertyy haitta-aineita, jotka sateen alussa huuhtoutuvat pois eli myös teiden hulevesissä on todettavissa First flush -ilmiö. (Liikenteen suunta 2012.)

## Jätevesien viemärointi

Suomessa 85 prosenttia väestöstä on keskitetyn viemäroinnin sekä jätevedenkäsittelyn piirissä. 4,2 miljoonaa asukasta on yleisesti viemäriverkoston piirissä (Veh-

maskoski 2011). Tästä syystä keskitetty kunnallinen jätevedenkäsittely on merkittävä tekijä vesistöjen suojelussa. Jätevettä muodostuu vuosittain noin 500 miljoonaa kuutiometriä, mikä tekee asukasta kohti noin 250 litraa vuorokaudessa. Tämän lisäksi jäteveden joukkoon kertyy vuotovesiä noin 90 litraa vuorokaudessa. On arvioitu, että 80–90 % käytetystä vesijohtovedestä päätyy viemäriin. (Karttunen 1999, Suomen ympäristökeskus 2012.)

Jätevesien keräystä ja puhdistamolle johtamista varten Suomessa on käytössä lähes 40 000 km viemäriputkea (Suomen ympäristökeskus 2011). Viemärointijärjestelmät on toteutettu seka- tai erillisviemärointinä. Sekaviemäröinnissä hule-, jäte- ja kuivatusvedet johdetaan jätevedenpuhdistamolle samassa viemärissä toisiinsa sekoittuneina. Tämä on edelleen yleinen tapa vanhoilla asutusalueilla, joille ei vielä ole rakennettu erillisviemärointiä sekä kaupunkien keskusta-alueilla, joilla viemäriin päätyvässä hulevedessä on esimerkiksi liikenteestä johtuen epäpuhtauksia. Sekaviemärointialueilla on yleensä olemassa tulvariski. (Karttunen 1999, Aaltonen et al. 2008.)

Erillisviemäröinnissä jätevedet johdetaan jätevedenpuhdistamolle omassa putkessaan ja hule- sekä kuivatusvedet omaan käsittelypaikkaansa toisessa putkessa. Jos kuivatusvedet johdetaan hulevesiviemäriin, putken on oltava riittävän syvällä, jotta virtaus salaojissa tapahtuu rakennuksesta pois päin. Nykyään suositeltava hulevesien käsittelytapa on imeyttäminen niiden muodostumispaikan läheisyydessä tai johtaminen omalle imeytysalueelle. Erillisviemäröinnillä pyritään estämään hule- ja kuivatusvesien sekoittuminen jätevesiin ja edelleen tätä kautta vähentämään jätevesiverkoston ja pumppaamoiden kuormitusta sekä varmistamaan jäteveden tasainen virtaus ja orgaanisen jakeen kuormitus puhdistamolle. (Karttunen 1999, Aaltonen et al. 2008.)

## **Vuotovesien vaikutus jätevesien viemärointiin**

Suurimmat haitat vuotovesistä aiheutuvat viemärilaitokselle. Lisääntyvien puhdistuskustannusten lisäksi suuri vuotovesimäärä kasvattaa pumppaamojen sähkönkulutusta sekä pumppujen huoltotarvetta. Erityisesti vuotovesien aiheuttamat haittavaikutukset näkyvät jätevesien viemäröinnissä ja käsittelyssä toisaalta vesien suurena määränä ja toisaalta vesimäärän suurena vaihteluna. Määrään vaikuttavat putken ja putkiliihosten materiaalit ja kunto, asennusten laatu, maaperän ominaisuudet, pohjaveden pinnan korkeus, erilaiset maanpäälliset rakennusmateriaalit ja hulevesien yleinen käsittely. Määrän lisäksi erityisesti virtaamien vaihteluun vaikuttavat sademäärät ja lumiolosuhteet. Pohjavesien pinnan korkeuteen vaikuttaa myös vuodenaika. Sateisina kuukausina ja lumien sulaessa pohjaveden taso on korkealla, minkä seurauksena pohjavesien aiheuttama vuotoveden määrä on myös korkeimmillaan. Maan ollessa jäässä virtaukset ovat pienimmillään. (Karttunen 1999, 2004.)

Erityisesti taajama-alueiden rankkasateet aiheuttavat tulvimista, koska hulevesirakenteita ei aina ole suunniteltu käsittelemään hyvin suuria hetkellisiä vesimääriä. Tämä puolestaan aiheuttaa sen, että vesi pääsee jätevesiverkostoon ja aiheuttaa sen ylikuor-

mittumisen. Tämä on nähtävissä selvimmin tiheään rakennetuilla kaupunkialueilla. Jätevesi purkautuu viemäreiden ja pumppaamojen kautta ulos, mikä aiheuttaa vahinkoa sekä kiinteistöille että ympäristölle. Jos jätevesiverkko vuotaa, joudutaan usein ylimitoittamaan verkosto ja pumppaamo ja tekemään erillisiä ratkaisuja. Tämä puolestaan aiheuttaa ylimääräisiä investointi- sekä käyttökustannuksia. (Karttunen 1999, 2004.)

Maaperän ominaisuuksista tärkein tekijä vuotovesien suhteen on putkea ympäröivän materiaalin vedenläpäisevyys. Jos maa-aines on hyvin vettäläpäisevää, vesi valuu helposti vuotokohdan kautta putkeen. Myös kaivannon täyttämistapa vaikuttaa veden kulkeutumiseen. Huolimattomasti tehty täyttö saattaa muodostaa vedelle helpon kulureitin. (Karttunen 2004.)

## Vuotovesien vaikutus jätevesipuhdistamolla

Tavallisesti kunnallisten jätevesipuhdistamojen jätevesi on suurimmaksi osaksi peräisin kotitalouksista ja eri laitosten sosiaali-tiloista. Ainoastaan joissakin kaupungeissa käsitellään kunnallisten vesien joukossa myös teollisuudesta peräisin olevia jätevesiä. Kaikki nämä vedet sopivat erittäin hyvin puhdistettavaksi aktiivilieteprosessissa. Puhdistusprosessin optimaalisen toiminnan kannalta jäteveden konsentraation pitäisi olla suhteellisen tasainen. Tärkeintä on orgaanisen aineen ja kiintoaineen sekä typen ja fosforin määrät. Vaihtelua aiheuttavat lähinnä vuotovedet, joiden määrään vaikuttaa oleellisesti se, miten jätevesiviemärointi on järjestetty ja mikä on erillisviiemäroinnin ja sekaviiemäroinnin osuus.

Erillisviiemäroinnissä puhdistamolle tuleva puhdistettava jätevesi on tasalaatuisempaa, vesien määrä on pienempi ja sen sisältämä orgaaninen kuormitus (konsentraatio) on suurempi kuin sekaviiemärivedessä. Puhdistamoprosessin toimintaa on tällöin helpompi hallita. Tämä taas johtaa tasaisempaan ja parempaan puhdistustulokseen, eikä näin ollen kuormita ympäristöä niin paljon kuin sekaviiemärointi. Sekaviiemäroinnissä erityisesti tulvahuippujen aikana saatetaan joutua johtamaan jätevesiä suoraan vesistöön, mikä taas kuormittaa ympäristöä. Prosessin toiminnan heikentyessä puhdistustulos huononee ja kustannukset kasvavat. Toisaalta, jos erillisviiemäroinnin yhteydessä ei ole järjestetty hulevesien käsittelyä, pintavaluntaveden mukana kulkeutuu vesistöön monia epäpuhtauksia. (Anttonen & Hytönen 1988, Karttunen 1999, 2004.)

Jätevedenpuhdistamot on mitoitettu tietyille jätevesivirtaamille sekä kiintoaine- ja ravinne-konsentraatioille. Vuotovesimäärän kasvu aiheuttaa virtauksen kasvun myös puhdistamolla. Virtauksen kasvaessa voimakkaasti kiinteät partikkelit eivät ehdi laskeutua vaan kulkeutuvat virtauksen mukana. Hyvin suuri osa näistä partikkeleista on epäorgaanista materiaalia, jota bakteerit eivät pysty hyödyntämään. Jos partikkeleita kulkeutuu ilmastusaltaaseen, alkaa niitä ilmastuksen lietekuorman kasvaessa kulkeutua ylitteen mukana vesistöön. Toisaalta ne kuormittavat puhdistamoa kumuloitumalla kiertoon. Tämä näkyy ilmastusaltaan tuhkapitoisuuden kasvuna.

Myös rasvamaiset ja öljymäiset jakeet kulkeutuvat voimakkaan virtauksen myötä prosessissa eteenpäin ja ilmastuksen ylitteen mukana mahdollisesti vesistöön asti. Koagulanttien käyttö on täysin riippuvaista tulevasta kiintoainemäärästä. Virtausmäärien kasvaessa kiintoainemäärä ei välttämättä kasva. Käytännössä yleensä tämä tarkoittaa koagulantin annostuksen pysymistä entisellä tasolla. Ilmastusaltaassa voimakas virtaus aiheuttaa kiintoaineen virtauksen ylitteen mukana jälkiselkeytykseen, jossa pintakuorman ylittyessä kiintoaine virtaa edelleen ylitteen mukana vesistöön. Kiintoaineen ”karkaaminen” ilmastuksesta aiheuttaa kiintoainepitoisuuden laskemisen, mikä taas johtaa puhdistamon puhdistustehon alenemiseen.

Vuotovedet vaikuttavat virtausmäärien lisäksi myös käsiteltävän jäteveden lämpötilaan. Tällä on suuri merkitys jätevedenpuhdistamon toimintaan ja nitrifikaatio-denitrifikaatioprosessiin. Aktiivilietelaitoksessa tarvittavat allastilavuudet määräytyvät osittain nitrifikaatio- ja denitrifikaationopeuksien perusteella. Näiden reaktionopeudet ovat lämpötilariippuvaisia. Nitrifikaation optimilämpötila liikkuu välillä 28–32 °C. Lämpötilan laskiessa 16 °C:seen nitrifikaationopeus puolittuu ja alle 10 °C:ssa nopeus on enää viidennes alkuperäisestä. Nopeus riippuu myös bakteerilajeista sekä etenkin kuparin, nikkelin ja kromin pitoisuuksista jätevedessä. Erityisen haitallista on sinkki jo 1 mg/l pitoisuudessa. Denitrifikaatio ei ole niin lämpötilariippuvainen ja sen optimilämpötila-alue onkin 5–30 °C. (Gerardi 2002, Karttunen 2004.)

## Vuotovesien vaikutus pohjavesiin

Vuotovesien vaikutus pohjaveteen on riippuvainen pohjaveden pinnan korkeudesta. Jos jätevesiputki kulkee pohjaveden tason alapuolella, vuotaa pohjavettä jätevesiverkkoon, koska paine putken ulkopuolella on korkeampi. Tämä taas saattaa aiheuttaa maan painumista tiiviisti peitetyillä kaupunkialueilla, joissa hule- ja erityisesti sadevedet johdetaan muualle imeytettäväksi. On myös mahdollista, että paineistettu vuotava putkilinja vuotaa ympärilleen ja aiheuttaa pohjaveden pilaantumisen vuotokohdan välittömässä läheisyydessä. Erityisesti tätä voi tapahtua, jos pohjaveden pinta on putken alapuolella. (Karttunen 1999.)

Pohjavesien pinnan laskemista voidaan estää imeyttämällä hulevesiä maahan. Tiiviisti rakennetuilla kaupunkialueilla tämä on haasteellisempaa, koska tiet ja piha-alueet on päällystetty vettä läpäisemättömillä pinnoilla, esimerkiksi asfaltilla. Viime aikoina on markkinoille tullut erilaisia maan alle upotettavia kasetteja, joihin voidaan varastoida tulvahuippujen vesiä. Sieltä ne imeytyvät vähitellen maahan, mikä osaltaan estää pohjaveden pinnan laskua. Näitä voidaan sijoittaa parkkipaikkojen ja pihojen alle. Esimerkiksi Tampereen Rantaväylän suunnittelussa (Anon 2016) pohjavesien haitalliseen alenemiseen on varauduttu rakentamalla mm. imeytyskaivoja, joiden avulla pohjaveden pinnat pidetään sopivalla tasolla ja haitallisia painumisia ei pääse tapahtumaan.

## Vuotovesien ympäristövaikutusten vähentäminen

Helpoin tapa vähentää vuotovesien määrää on hulevesien käsittelyn parantaminen. Tavoitteena on estää kokonaan hulevesien syntyminen. Ensisijaisesti hulevedet käsitellään ja hyödynnetään syntypaikallaan. Käytännössä tämä tarkoittaa hulevesien käyttämistä eri tarkoituksiin tai maahan imeyttämistä. Hulevesien suuri määrä korostuu tiiviisti rakennetuilla kaupunkialueilla. Tällöin tärkeässä roolissa ovat vettä läpäisevät päällysteet, jotta vesi saadaan imeytymään maahan tasaisesti. Jos imeyttäminen ei ole riittävä ratkaisu, voidaan hulevesiä johtaa pois syntypaikaltaan suodattavalla ja viivytävällä järjestelmällä. Tämä voidaan toteuttaa mm. kasvillisuuspainanteiden, biosuodatusrakenteen ja reunakivikatkosten avulla. Myös imeytysrakenteita, mm. kasetteja, voidaan hyödyntää vesien imeyttämisessä ja viivytämisessä.

Erityisesti uusilla asutusalueilla hulevedet johdetaan pois syntypaikaltaan hulevesiviemärisissä yleisillä alueilla sijaitseville hidastus- ja viivytysalueille, ennen kuin ne johdetaan vesistöön. Usein tätä varten on rakennettu hulevesilampia tai kosteikkoja. Jos hulevesien käsittely ei ole mahdollista, viimeisenä vaihtoehtona on niiden johtaminen suoraan vesistöön. Hulevesien suoraa vesistöön johtamista on harkittava tarkoin tilanteissa, joissa vesi sisältää huomattavia määriä epäpuhtauksia. (Malin 2012.)

Erityisesti asutuksen laajentuessa ja jätevesimäärän kasvaessa joudutaan entistä enemmän kiinnittämään huomiota vuotovesiin ja niiden määrään, jotta jätevesien puhdistus onnistuu nykyisellä puhdistuskapasiteetilla. Jatkossa vuotovesien määrää pitää pystyä vähentämään nykyiseen tilanteeseen verrattuna. Vuotovesimäärien vähentämiseksi tärkeimpänä tavoitteena on kauttaaltaan vuotamaton jätevesiverkosto. Tämä vaatii viemärijärjestelmän jatkuvaa ennakoivaa huoltoa sekä tarvittaessa saneerausta.

## Lähteet

Aaltonen, J., Hohti, H., Jylhä, K., Karvonen, T., Kilpeläinen, T., Koistinen, J., Kotro, J., Kuitunen, T., Ollila, M., Parvio, A., Pulkkinen, S., Silander, J., Tiihonen, T., Tuomenvirta, H. & Vадja, A. 2008. Rankkasateet ja taajamatulvat (RATU). Suomen ympäristö 31/2008. Luonnonvarat. Suomen ympäristökeskus. Vammala.

Anon 2016. [www.tampere.fi/liikenne-ja-kadut/liikenne-ja-katusuunnittelu/rantatunneli/useinkysytya.html](http://www.tampere.fi/liikenne-ja-kadut/liikenne-ja-katusuunnittelu/rantatunneli/useinkysytya.html)

Anttonen, A. & Hytönen, L. 1988. Yhdyskuntatekniikka. Rakennustieto Oy. Saarijärvi.

Gerardi, M.H. 2002. Nitrification and denitrification in the activated sludge process. Environmental protection magazine series. Canada.

Karttunen, E. 1999. Vesihuoltotekniikan perusteet. Hakapaino Oy, Helsinki.

Karttunen, E. 2004. Vesihuolto 2. Suomen Rakennusinsinöörien liitto ry, Helsinki.

Liikenteen suunta. 2012. Liikenneviraston T&K-lehti 3/2012.

Malin, I. 2012. Lahden kaupungin hulevesiohjelma. Viheralan Hulevesipäivä. Lahden seudun ympäristöpalvelut. Lahti.

Suomen ympäristökeskus. 2012. Yhdyskuntien jätevedet. <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=562&lan=fi>

Suomen ympäristökeskus. 2011. Puhdistamoliete. <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=6568&lan=fi>

Vehmaskoski, T. 2011. Rakennetun omaisuuden tila. 42 s. Helsinki. <http://www.roti.fi/fin/yhdyskuntateknikka/>





# TORREFIOITUJEN BIOHIILIPELLETTIEN PIENPOLTTOKOKKEET

*Juha-Pekka Lemponen & Hanne Soininen & Jarno Föhr & Tapio Ranta*

Hajautettu energiantuotanto biohiilipelleteillä -hanke on toteutettu yhteistyössä Mikkelin ammattikorkeakoulun Metsä, ympäristö ja energia -painoalan ja Lappeenrannan teknillisen yliopiston bioenergiateknologian tutkimusryhmän kanssa. Hankkeen tavoitteena oli tutkia biohiilipelletin energiakäytön mahdollisuuksia pienessä kokoluokassa lämmön- ja sähköntuotannossa. Biohiilipelletti on uusi polttoaine pienkäytön kokoluokassa, eikä käyttökokemuksia ole saatavilla. Tämä artikkeli on lyhennelmä biohiilihankkeen osakokonaisuudesta, jossa biohiilipellettien polttoa pienessä kokoluokassa kokeiltiin laboratoriolaitteistolla. Laboratoriomittauksin selvitettiin poltosta aiheutuvia päästöjä ja verrattiin niitä tavanomaiseen pellettiin. Lappeenrannan teknillisen yliopiston ja Mikkelin ammattikorkeakoulun yhteishanketta rahoittivat Etelä-Savon Maakuntaliitto Euroopan unionin aluekehitysrahastosta ja Suur-Savon Energiasäätiö.



**KUVA 1. Torrefioituja biohiilipellettejä (kuva Manu Eloaho)**

## Biomassan torrefointi

Euroopan unionin tavoitteena on lisätä bioenergian osuutta kaikesta energiantuotannosta 27 %:iin vuoteen 2030 mennessä. Euroopassa käytetystä energiasta suuri osa tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla, kuten kivihieillä. Nykyisten kivihieiltä käyttävien voimalaitosten haasteena on korvaavan polttoaineen löytäminen. Polttoaineen tulee vastata ominaisuuksiltaan mahdollisimman hyvin kivihieiltä. Tällaisia ominaisuuksia ovat mekaaninen kestävyys kuljetuksen ja varastoinnin aikana, käyttäytyminen jauhatuslaitteissa ja palamisominaisuudet. Biomassan torrefoinnilla ja pelletoinnilla saadaan monia vaadittavia ominaisuuksia. Lämpöarvo, jauhamisen vaatima energia, partikkelikokojakauma, jauhinmyllyjen kapasiteetin riittävyys ja soveltuvuus pneumaattiseen kuljetukseen ovat myös kaikki ominaisuuksia, joihin voidaan vaikuttaa biomassan torrefoinnilla.

Torrefoinnilla tarkoitetaan biomassan paahattamista hapettomissa olosuhteissa. Torrefointiprosessissa biomateriaali kuumennetaan hapettomassa tilassa 250–300 °C lämpötilaan. Tuloksena on helposti jauhautuva ja kosteutta hylkivä lopputuote. Samalla itsesyttymisen ja biologisen hajoamisen riski pienenee. Jos torrefioitu materiaali myös pelletoidaan, paranee alkuperäisen materiaalin energiatiheys, jolloin kuljetus- ja varastointikustannukset pienenevät.

Torrefointikäsitteilyn aikana raaka-aineen kosteus poistuu ja biomassan sitkeys vähenee, jolloin sen jauhamisominaisuudet paranevat. Biomassan tyypilliset ominaisuudet, kuten alhainen tiheys, korkea kosteuspitoisuus ja biologinen hajoaminen, ovat myös ominaisuuksia, joita voidaan parantaa torrefointiprosessin avulla. Biologinen hajoaminen hidastuu ja *pölyn muodostuminen vähenee*, ja biomassa kestää paremmin pitkäaikaista varastointia.

Kun torrefioitu biomassa pelletoidaan, saadaan hyvän energiatheyden omaavaa polttoainetta, joka soveltuu kestävyytensä ansiosta pitkiinkin kuljetuksiin ja joka kestää käsitteilyä ja varastointia tavallista puupellettiä paremmin. Torrefioitu biomassapelletti vastaa jauhautumisominaisuuksiltaan kivihieiltä, kun taas polttoteknisesti ominaisuudet ovat lähellä puubiomassaa. Torrefioidun biomassapelletin potentiaalisin käyttökohde on rinnakkaispoltto suuren kokoluokan kivihieilivoimaloissa ja sementtiuuneissa. Muita potentiaalisia käyttökohteita ovat erilaiset kaasutusprosessit ja tavanomainen pellettipoltto eri kokoluokan kattiloissa. (Biedermann et al. 2014.)

## Torrefioidun biomassan käyttö pienkattiloissa

Torrefioidusta biomassasta valmistettujen pellettien käyttöä pienkattiloissa on tutkittu erittäin vähän. Tutkimustoiminta on keskittynyt pääasiassa torrefioitujen pellettien käyttöön suurissa kivihieilikattiloissa kivihieiltä korvaavana rinnakkaispolttoaineena. EU:n rahoittamassa Sector-hankkeessa on tutkittu laajasti torrefioidun polttoaineen hyödyntämismahdollisuuksia. Tutkimushankkeen aikana torrefioiduilla pelleteillä

tehtiin polttokokeita erityyppisissä pienkattiloissa. Kokeiden johtopäätöksiä olivat mm. se, että torrefioitujen pellettien palamisaika on selvästi pitempi kuin tavanomaisten pellettien. Tähän vaikuttaa torrefioitujen pellettien suurempi hiilipitoisuus. Rakenteelliset muutokset kattilan arinaan ja tulipesään voivat olla tarpeen. (Biedermann et al. 2014.)

Torrefioitua biomassaa poltettaessa palamisprosessi on erilainen, jolloin palamisilman määrää ja vaiheistusta voi olla tarpeen säätää. Pienimmän kokoluokan kattiloissa palamisilman säätömahdollisuudet ovat suhteellisen rajoitetut, mikä voi osaltaan rajoittaa torrefioitujen pellettien käyttöä kyseisissä kattiloissa. (Biedermann et al. 2014.)

## Polttokokeiden tavoitteet ja toteutus

Hankkeen yhtenä tavoitteena oli selvittää polttokokeiden avulla torrefioitujen puupellettien soveltuvuutta pienen mittakaavan energiantuotantoon. Polttokokeiden tuloksia arvioitiin vertaamalla torrefioitujen pellettien poltossa syntyviä päästöjä tavallisen valkoisen puupelletin poltosta aiheutuviin päästöihin. Tulosten vertailukelpoisuuden varmistamiseksi kattilan säätöarvot pidettiin kokeiden aikana vakiona. Lisäksi tutkittiin pohjatuhkan muodostumista kattilaan ja arvioitiin tuhkan sulamisesta mahdollisesti aiheutuvia ongelmia. Lyhyitä, yhden tunnin mittaisia, polttokokeita tehtiin kuudella eri torrefioidulla pellettilaadulla sekä tavallisella valkoisella pelletillä. Pitempiä kuuden tunnin kokeita tehtiin ainoastaan torrefioiduilla koivupelleteillä.

## Pellettikattila

Polttokokeet toteutettiin Mikkelin ammattikorkeakoulun LVI-laboratoriossa sijaitsevalla pellettikattilalla. Kattila on Arterm Oy:n valmistama Biomatic+ 20 -pellettikattila. Kattilan nimellisteho on 20 kW ja pellettien syöttö palopäähän tapahtuu ruuvilla alakautta. Palamisilma tuodaan palopään reunassa olevien ilmarakojen kautta kattilaan. Kattilaan kuuluu erillinen pellettisiilo, johon mahtuu noin 300 l pellettejä. Pellettisiilosta pelletit tuodaan kattilalle ruuvikuljettimella. Kattilan tehoa säädetään pellettien syöttönopeutta ja palamisilman määrää muuttamalla. Kattilan poltin ja siihen kuuluva syöttöjärjestelmä on automatisoitu. Polttimen toiminta ohjautuu kattilan lämpötila-anturin avulla. Palamisilmapuhaltimen kierrosnopeutta voidaan säätää portaattomasti, mutta sekä ensiö- että toisioilmalle on yksi yhteinen puhallin, joten palamisilman vaiheistusta ei ole mahdollista säätää (kuva 2).



**KUVA 2. Mikkelin ammattikorkeakoulun LVI -laboratorion Ariterm Biotic+ 20 -pellettikattila (kuva Juha-Pekka Lemponen)**

## Lyhyet polttokokeet

Polttokokeiden tavoitteena oli selvittää eri pellettilaatuojen savukaasupäästöjä lyhytkestoisesta testijaksosta aikana. Mittausjakson pituudeksi valittiin yksi tunti, koska käytävissä olevat pellettiet olivat kooltaan hyvin pieniä. Pellettien määrä oli keskimäärin vain noin 20 kg. Polttokoe toteutettiin siten, että jokaisella pellettietillä pyrittiin ajamaan tunnin pituinen koeajajakso, jonka aikana palamisolosuhteet olisivat tasaiset ja kattila vakioiteholla. Kattilan tasainen toiminta on mahdollista vasta, kun kattila on kunnolla lämmennyt. Polttokokeet aloitettiin polttamalla kattilassa valkoisia pellettejä, jolloin kattila saatiin lämmitettyä lähelle normaalia toimintalämpötilaa, jolloin kattilaveden lämpötila on noin 70 °C ja savukaasujen lämpötila on noin 110 °C. Kun kattila oli lämmentynyt, vaihdettiin polttoainesiihloön tutkittava pellettietä. Vaihto suoritettiin tyhjentämällä siilo ja syöttöruuvi imurilla. Vaihdon aikana kattila saattoi antaa hälytyksen polttoainevajeesta, jolloin kattilan käynnistysyksi jouduttiin ajamaan uudestaan. Kun polttoaineen vaihto oli suoritettu, varmistettiin, että valkoisia

pellettejä ei enää ollut polttoaineen syöttölaitteissa ajamalla kattilaa vielä noin puolen tunnin ajan ennen varsinaisen mittausjakson aloittamista.

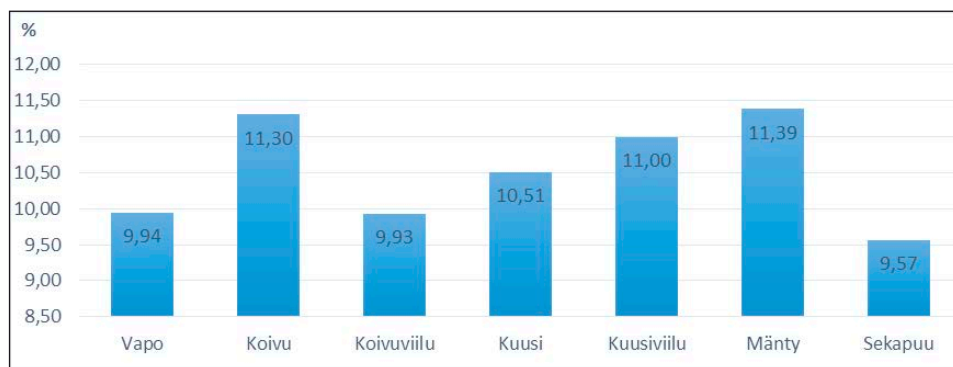
Kattilan teho laskettiin polttoaineen kulutuksen perusteella. Kattilan säätöarvot pidettiin kokeiden aikana vakiona. Polttoaineen kulutus vaihteli välillä 3,95 kg/h–4,9 kg/h. Kattilan hyötysuhde on valmistajan mukaan 0,91, mikä otettiin huomioon kattilan tehoa määrittäessä. Kattilan laskennallinen teho kokeiden aikana oli 17,9 kW:n ja 23 kW:n välillä.

Savukaasuista mitattiin jäännöshappi, häkä, typenoksidit ja lämpötila. Kattilan toimintaa seurattiin mittaamalla kattilan tehoa ja polttoaineen kulutusta. Tehon mittaus tapahtui kattilan meno- ja paluuveden lämpötilaa ja virtausta mittaavan energiamittarin avulla.

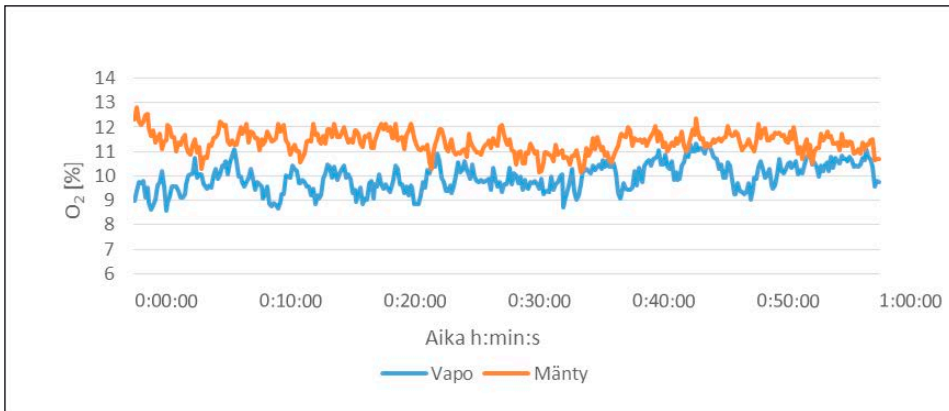
Kattilaa ajettiin kokeiden aikana vakioteholla ja kattilan säädöt pidettiin koko testi-ajan vakiona. Kattilan säätöarvoina käytettiin tyypillisiä valkoisen pelletin poltossa käytettäviä arvoja. Kattilan polttoaineen syötön toimintaa säätelee syöttöputken yläosassa sijaitseva pinnankorkeusanturi. Kokeen tarkoituksena oli nähdä, soveltuuko torrefioitu pelletti suoraan korvaamaan valkoisen pelletin ilman, että kattilan säätöarvoihin tarvitsisi tehdä muutoksia.

## Lyhyiden polttokokeiden tulokset

Savukaasun happimittausten tulokset on esitetty kuvissa 3 ja 4. Keskimääräinen savukaasun happipitoisuus vaihteli välillä 9,6–11,4 %. Alhaisimmat arvot saatiin valkoisen pelletin ja sekapuusta tehtyjen pellettien kokeista. Korkeimmat pitoisuudet mitattiin koivu- ja mäntypellettien savukaasuista. Savukaasujen happipitoisuudet pysyivät koko koejakson ajan suhteellisen tasaisina. Hajonnat olivat tyypillisesti 0,4–0,7 % välillä; suurin hajonta oli kuusiviilulla (0,7 %) ja pienin mänyllä (0,44 %).

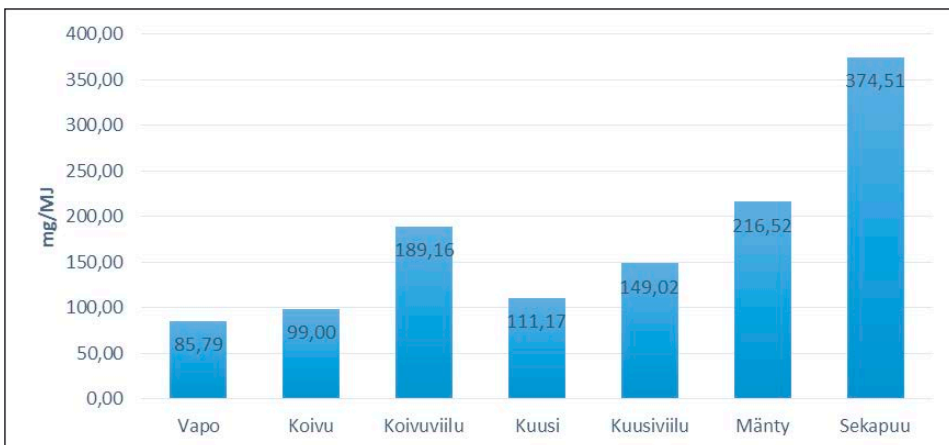


**KUVA 3. Savukaasun keskimääräinen happipitoisuus (jäännöshappi) tunnin mittausjakson aikana**

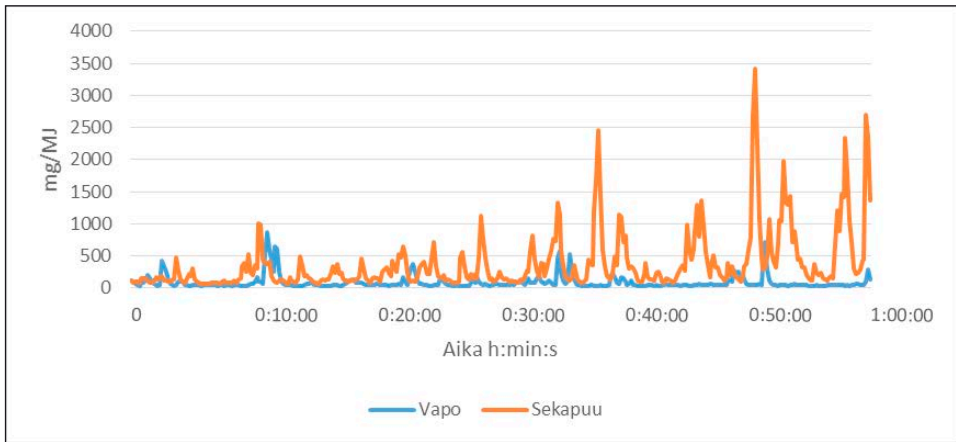


**KUVA 4. Valkoisen standardipelletin ja torrefioidun mäntypelletin polton savukaasun happipitoisuus (jäännöshappi) tunnin mittausjakson aikana. Mäntypelletin savukaasun happipitoisuus oli korkein tutkituista näytteistä**

Savukaasun CO-mittausten tulokset on esitetty kuvassa 5. Savukaasun keskimääräinen CO-pitoisuus vaihteli välillä 85,79–374,51 mg/MJ. Pienimmät CO-pitoisuudet olivat valkoisen pelletin ja torrefioidun koivupelletin kokeissa. Korkein pitoisuus oli torrefioidun sekapuupelletin savukaasuissa. CO-pitoisuuksissa oli ajallista hajontaa, joka näkyy kuvassa 6. Suurin hetkellinen CO-pitoisuuden arvo sekapuulla oli noin 3 400 mg/MJ. Valkoisen pelletin suurin arvo oli noin 870 mg/MJ. CO-pitoisuuden hetkelliset korkeat arvot ovat tyypillisiä kiinteän biopolttoaineen poltossa.

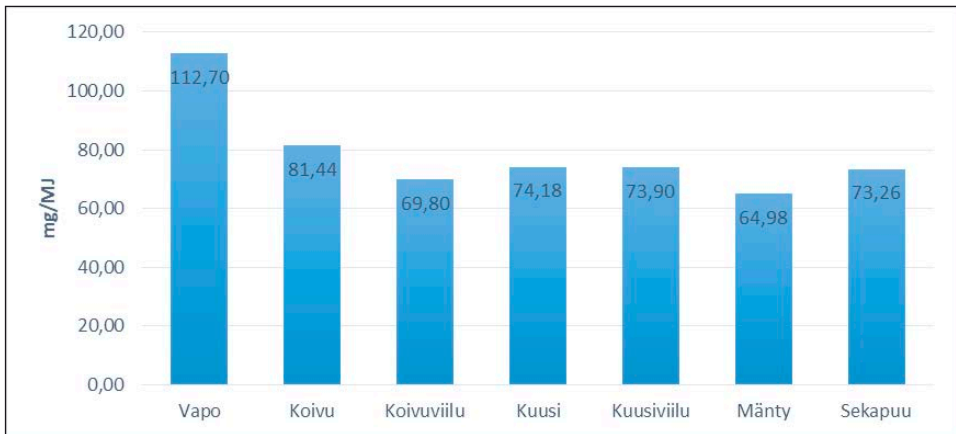


**KUVA 5. Savukaasun keskimääräinen CO-ominaispäästö (mg/MJ) tunnin mittausjakson aikana**



**KUVA 6. Standardipelletin ja torrefioidun sekapuupelletin polton savukaasun CO-ominaispäästö tunnin mittausjakson aikana**

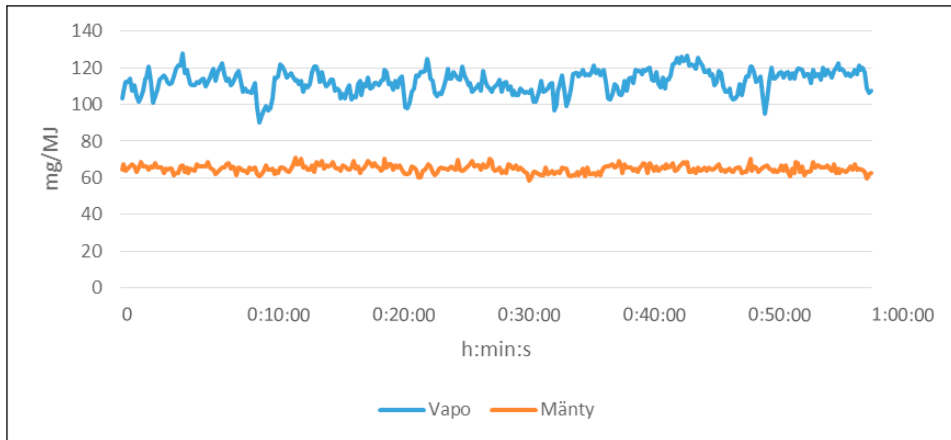
Savukaasun NO<sub>x</sub>-pitoisuudet on esitetty kuvassa 7. Savukaasun keskimääräinen NO<sub>x</sub>-pitoisuus mittausjakson aikana vaihteli välillä 64,98–112,70 mg/MJ. Pienimmät NO<sub>x</sub>-pitoisuudet olivat torrefioidun mäntypelletin ja torrefioidun koivuviilupelletin savukaasuissa. Suurin NO<sub>x</sub>-pitoisuus oli valkoisen pelletin savukaasuissa.



**KUVA 7. Savukaasun keskimääräinen NO<sub>x</sub>-ominaispäästö tunnin koejakson aikana**

Kuvassa 8 on vertailtu valkoisen pelletin ja torrefioidun mäntypelletin NO<sub>x</sub>-ominaispäästöjä. Valkoisen pelletin ominaispäästö on suurempi, ja myös NO<sub>x</sub>-päästön hetkellinen vaihtelu on selvästi voimakkaampaa kuin torrefioidulla mäntypelletillä.



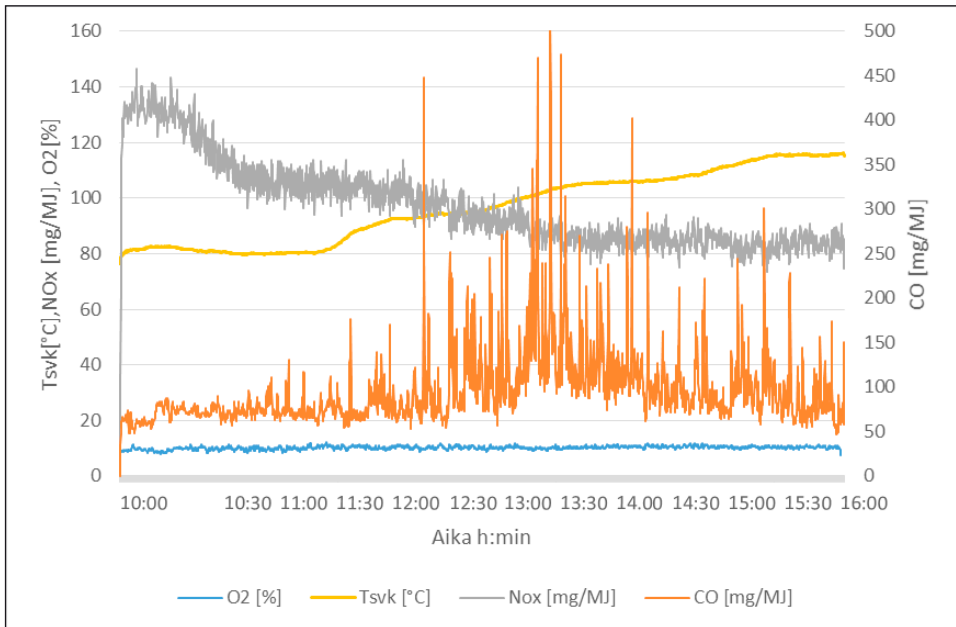


**KUVA 8. Savukaasun keskimääräinen NO<sub>x</sub>-ominaispäästö, valkoinen pelletti ja torrefioitu mäntypelletti**

## Pitkä polttokoe

Yhtenä osana hankkeen toteutusta tehtiin Mamkin LVI-laboratorion kattilalla polttokoe, jonka tarkoituksena oli selvittää kattilan käyttäytymistä ja tuhkan muodostumista usean tunnin mittaisen kokeen aikana. Koejaksoksi valittiin kuusi tuntia, koska aiempaan kokemukseen perustuen tätä pitempi ajo tuottaisi vaikeuksia kattilan vesikierron ylikuumenemisen vuoksi. Lisäksi käytettävissä olevien pellettien rajallinen määrä rajoitti kokeen pituutta. Koemateriaaliksi valittiin torrefioitu koivupelletti, jota oli saatavilla riittävästi kokeen suorittamiseksi.

Polttokokeet tehtiin ajamalla kattilaa täydellä teholla sekä osateholla. Kattilan teho täydellä teholla oli noin 18,2 kW ja osateholla noin 12,2 kW. Teho määritettiin polttoaineen kulutuksen ja kattilan hyötysuhteen avulla. Polttoaineen kulutus täydellä teholla oli n. 4 kg/h ja osateholla 2,7 kg/h.



**KUVA 9. Savukaasumittauksen tulokset täydellä teholla (TOP-koivu, täysteho 18,2 kW) suoritettun kuuden tunnin koejakson aikana**

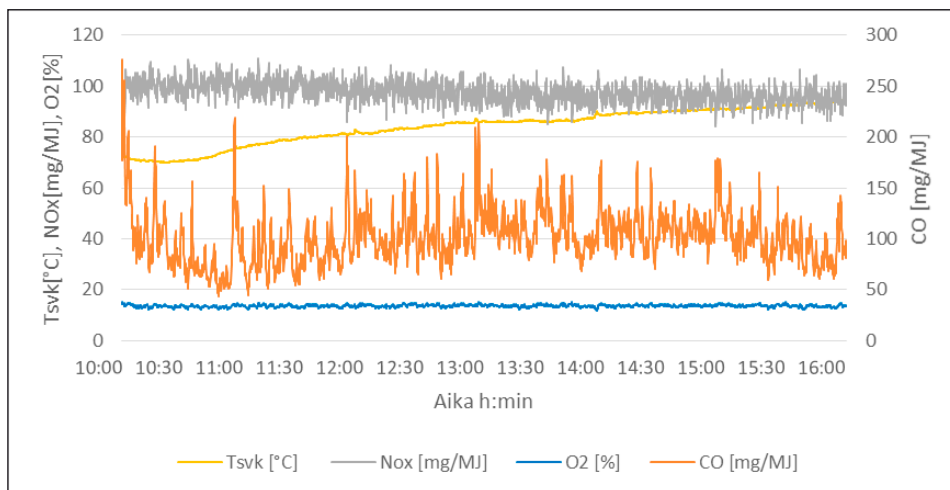
Kokeen jälkeen havaittiin, että palopäähän oli muodostunut sintraantunut tuhkakappale kooltaan noin 70 mm x 80 mm. Sintraantunut tuhkakappale oli palopään etureunassa, jolloin se tukkii osittain ensiöilmareiät (kuva 10).



**KUVA 10. Palopäähän kuuden tunnin kokeen aikana muodostunut tuhkakappale, joka on kooltaan noin 70 x 80 mm (kuvat Juha-Pekka Lemponen)**

**Pitkä polttokoe, osateho ja kokeen tulokset**

Osateholla tehty koe suoritettiin ajamalla kattilaa teholla, joka oli noin 70 % aiem-  
masta koejärjestelystä. Savukaasuista mitattiin jäännöshappi, CO- ja NO<sub>x</sub>-pitoisuu-  
det sekä savukaasun lämpötila. Mittaustulokset on esitetty kuvassa 11.



**KUVA 11. Savukaasumittauksen tulokset osateholla (TOP-koivu, osateho 12,2 kW) suoritetun kuuden tunnin koejakson aikana**

Kattilan tehoa säädettiin pienentämällä polttoaineen syöttöä ja palamisilman puhal-  
lusta. Kokeen aikana savukaasun lämpötila nousi 70 °C:sta 95 °C:seen. Savukaasun  
CO-pitoisuus oli noin 20 % korkeampi kuin täyden tehon kokeessa. Pitoisuuden  
hetkellinen vaihtelu jatkui koko kokeen ajan. NO<sub>x</sub>-pitoisuus oli samansuuruinen  
kuin täyden tehon kokeessa. Eri kokeiden NO<sub>x</sub>- ja CO-pitoisuudet on esitetty ku-  
vassa 13. Myös tässä kokeessa palopäähän muodostui sintraantunut tuhkakappale,  
joka oli kooltaan noin 60 x 80 mm (kuva 12).



**KUVA 12. Palopäähän muodostunut tuhkakappale, joka on kooltaan noin 60 x 80 mm (kuva Juha-Pekka Lemponen)**



**KUVA 13. NO<sub>x</sub>- ja CO-pitoisuudet savukaasuissa eri tehoilla**

## Yhteenveto ja johtopäätökset

Hajautettu energiantuotanto biohiilipelleteillä -hankkeen aikana selvitettiin torrefioitujen biohiilipellettien käyttöä ja soveltuvuutta pienen kokoluokan pellettikattiloihin. Torrefioitujen pellettien polttokokeita tehtiin Mikkelin ammattikorkeakoulun LVI-laboratorion 20 kW:n pellettikattilalla.

Mikkelin ammattikorkeakoulun kattilalla tehdyissä polttokokeissa käytettiin kuutta erityyppistä torrefioitua pellettiä sekä verrokkina tavallista valkoista pellettiä. Polttokokeissa verrattiin eri pellettilaatujen aiheuttamia savukaasupäästöjä. Polttokokeet toteutettiin kattilan vakiosäädöillä, jolloin jo lyhyenkin koeajan puitteissa voitiin havaita eroja savukaasupäästöissä eri pellettilaatujen välillä. Pitempien kokeiden aikana havaittiin jonkin verran tuhkan sintraantumista ja siitä johtuvaa muutosta palamisessa. Käytettävissä olleet pellettierät olivat kuitenkin niin pieniä, että kullekin pellettityypille optimaalisten kattilan säätöarvojen hakemiseen ei ollut mahdollisuutta.

## Lähteet

Biederman F., Brunner T., Mandl C., Obernberger I., Kanzian W. 2014. Production of solid sustainable energy carriers from biomass by the means of torrefication. Executive summary of SECTOR project.

Wilén et al. 2014, Wood torrefication – market prospects and integration with the forest and energy industry, VTT Technology 163.

Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen, J. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia, VTT Technology 258, 229 s.+ liitteitä 35 s.



# TORREFIOITUJEN BIOHIILIPELLETTIEN DEMONSTRAATIOPOLTTOKOKKEET

*Juha-Pekka Lemponen & Hanne Soininen & Jarno Föhr & Tapio Ranta*

Hajautettu energiantuotanto biohiilipelleteillä -hanke on toteutettu yhteistyössä Mikkelin ammattikorkeakoulun Metsä, ympäristö ja energia -painoalan ja Lappeenrannan teknillisen yliopiston bioenergiateknologian tutkimusryhmän kanssa. Hankkeen tavoitteena oli tutkia biohiilipelletin energiakäytön mahdollisuuksia pienessä kokoluokassa lämmön- ja sähköntuotannossa. Biohiilipelletti on uusi polttoaine pienikäytön kokoluokassa, eikä käyttökokemuksia ole saatavilla. Tämä artikkeli on lyhennelmä biohiilihankkeen osakokonaisuudesta, jossa biohiilipellettien polttoa pienessä kokoluokassa kokeiltiin demonstraatiokoelaitteistolla. Savukaasumittauksin selvitettiin poltosta aiheutuvia päästöjä. Lappeenrannan teknillisen yliopiston ja Mikkelin ammattikorkeakoulun yhteishanketta rahoittivat Etelä-Savon Maakuntaliitto Euroopan unionin aluekehitysrahastosta ja Suur-Savon Energiasäätiö.

## Torrefoidun biohiilipelletin käyttökohteet

Torrefoidun biohiilipelletin potentiaalisiin käyttökohde tällä hetkellä on seospoltto kivihiihivoimaloissa. Vanhojen kivihiihivoimaloiden polttoaineen käsittelylaitteita ei ole alun perin suunniteltu soveltumaan biopolttoaineiden käyttöön. Torrefoidun biohiilipelletin käytöllä voidaan välttää kalliiden muutosten tekeminen polttoaineen käsittelylaitteisiin, mm. jauhinmyllyihin ja pneumaattisiin kuljettimiin. Rakenteelliset muutokset polttoaineen käsittelyjärjestelmiin olisivat välttämättömiä, jos seospolttoaineena käytettäisi tavanomaista valkoista pellettiä. Torrefoidun pelletin käyttö suoraan jo olemassa olevissa jauhinmyllyissä on mahdollista. Lisäksi torrefoidun pelletin paremmat jauhautuvuusominaisuudet pienentävät jauhinmyllyjen energiankulutusta.

Monissa uusissa rakenteilla tai suunnitteilla olevissa kivihiihivoimaloissa on jo varauduttu biomassan käyttöön seospolttoaineena. Yleensä kyse on valkoisen pelletin seospoltosta pienellä suhteella <5 % tai biomassan kaasutuksesta ja kaasun poltosta katilassa Vaskiluodon Voiman tai Lahden Kymijärven tavoin. Seospoltossa torrefoidun polttoaineen osuus voi kuitenkin olla selvästi suurempi kuin muiden rinnakkaispolttoaineiden, mikä on selkeä etu hiilidioksidipohjaisen päästökaupan piiriin kuuluvissa laitoksissa.

Torrefioitujen biohiilipellettien laajamittainen käyttö kivihiilivoimaloiden seospolttoaineena vaatii kuitenkin toteutuakseen merkittäviä vihreän sähkön kannustimia tai huomattavasti korkeampaa hiilidioksidipäästöjen hintatasoa. Nykyisessä markkina-tilanteessa alhaisen CO<sub>2</sub>-päästöhinnan (noin 5 €/tCO<sub>2</sub>) ja hiilen hinnan (noin 8 €/MWh) johdosta torrefioitujen pellettien tuotantokustannusta (noin 35 €/MWh) olisi kompensoitava sähkön syöttötariffilla tai muilla vastaavilla tukimuodoilla. (Wilén et al. 2014.) Biopolttoaineen kaasutukseen perustuvissa prosesseissa polttoaineen laatuvaatimukset mm. kosteuden ja kokojakauman osalta ovat kireät, joten torrefioidun biomassan tasalaatuisuus on selkeä etu.

Pienten ja keskikokoisten kattilalaitosten polttotekniikka perustuu pääsääntöisesti arina- tai leijupolttoon, jolloin polttoaineen laatuvaihtelu ei vaikuta palamisprosessiin niin selvästi kuin vastaavissa pölypolttotekniikkaan perustuvissa laitoksissa. Torrefioidun polttoaineen käytön etuna on lähinnä paremmasta lämpöarvosta johtuva vähäisempi polttoaineen kulutus ja sitä kautta pienemmät kuljetus- ja varastointikustannukset.

Tyypillisiä pienten ja keskikokoisten kattilalaitosten käyttökohteita ovat pienet kunnalliset kaukolämpöverkot, pienet teollisuuskiinteistöt sekä omakoti- ja rivitalokiinteistöt. Tällaisissa kohteissa käytetään tyypillisesti tehdasvalmisteisia standardikattiloita. Näiden pienten kattiloiden palamisprosessin säätö tapahtuu pääsääntöisesti polttoaineen syöttönopeutta ja palamisilman määrää muuttamalla. Yksinkertainen rakenne ei anna useinkaan mahdollisuuksia esimerkiksi palamisilman vaiheistukseen, koska tyypillisesti näissä kattiloissa on käytössä vain yksi palamisilmapuhallin. Pelkistetty rakenne vähentää laitteen huolto- ja korjaustarvetta. Toisaalta polttoaineena käytettävän puupelletin ominaisuudet ja laatuksiteerit on määritelty melko tarkoin, jolloin polttoaineen laatuvaihteluista johtuvaa kattilan säätämistarvetta ei juurikaan normaalikäytössä ole.

## **Demonstraatiokokeiden tarkoitus ja toteutus**

Demonstraatiokokeen tarkoituksena oli selvittää torrefioitujen pellettien soveltuvuutta n. 100 kW:n kokoluokan kattilan polttoaineeksi. Demonstraatiokoe toteutettiin Ariterm Oy:n kattilalaboratoriossa Saarijärvellä. Kokeessa tutkittiin torrefioidun pelletin palamista liikkuvalla arinalla varustetussa kattilassa eri kuormilla. Kokeessa käytettiin torrefioitua koivupellettiä.

## **Demonstraatiokoe Ariterm Oy:n pellettikattilalla**

Hankkeen yhtenä osana suoritettiin koepoltto/demonstraatiotesti Ariterm Oy:n tutkimuskeskuksessa Saarijärvellä. Testin tarkoituksena oli selvittää torrefioitujen pellettien soveltuvuutta isomman kokoluokan pellettikattilan polttoaineeksi. Kattilaksi valittiin nimellisteholtaan 120 kW:n Ariterm Bio Comp -kiinteän polttoaineen kattila,

jossa on liikkuva, porrastettu arina (kuva 1). Polttoaineen syöttö tapahtuu stokeriruuvin avulla suoraan arinan yläosaan. Palamisilman syöttö on vaiheistettu ja tapahtuu kahden palamisilmapuhaltimen avulla siten, että ensiöilma johdetaan arinan läpi ja toisioilma tuodaan arinan yläpuolella olevan kehyksen kautta. Palamisilmapuhaltimia voidaan säätää toisistaan riippumatta, jolloin palamistapahtuman hallittavuus paranee ja kattilan toimintaa voidaan optimoida.



**KUVA 1. Ariterm Oy:n testauslaboratoriossa Saarijärvellä oleva Biocomp 120-pellettikattila (kuva Jarno Föhr)**

## **Kokeen toteutustapa ja mitattavat asiat kokeen aikana**

Testattavaksi materiaaliksi valittiin torrefioitu koivupelletti, koska sitä oli saatavana riittävä määrä testin suorittamiseksi. Pellettierä oli valmistettu vuonna 2015, jonka jälkeen se oli ollut varastoituna kuivassa ja lämmittämättömässä Torrec Oy:n pilottilaitoksen hallissa.

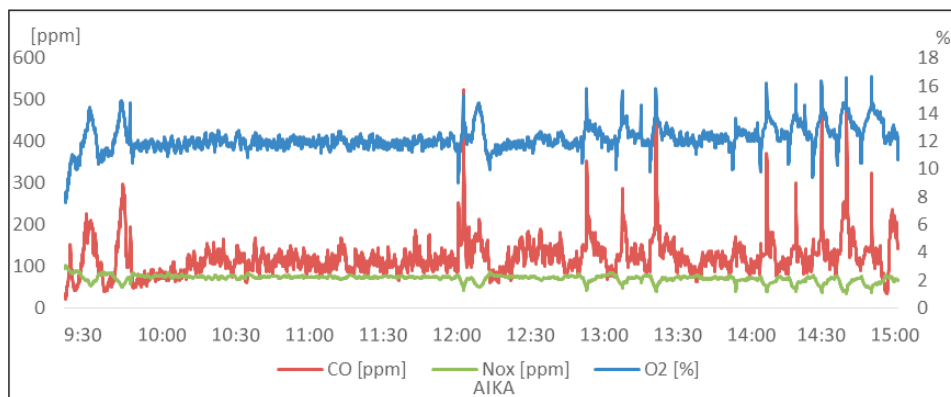
Koe suoritettiin 12.–13.5.2016. Yhden koejakson pituudeksi valittiin kuusi tuntia, jonka aikana seurattiin kattilan tehoa, polttoaineen kulutusta sekä savukaasujen happi-, CO- ja NO<sub>x</sub>-pitoisuuksia. Kokeen jälkeen kattila avattiin ja kattilaan muodostunut pohjatuuhka kerättiin talteen. Ensimmäisen kuuden tunnin koejakson aikana



kattilaa ajettiin noin 50 %:n osateholla. Toinen koejakso ajettiin täydellä 100 %:n teholla. Kokeiden aikana kattilan ajoparametreja ei muutettu.

## Koeajo osateholla

Ensimmäinen testi suoritettiin osateholla. Kattilan teho oli kokeen aikana keskimäärin 71,8 kW. Savukaasujen jäännöshappipitoisuus oli 12,2 % ja lämpötila 124,4 °C. CO-pitoisuus oli 94,7 mg/MJ ja NO<sub>x</sub>-pitoisuus 88,8 mg/MJ. Pellettien kulutus kokeen aikana oli keskimäärin 16,81 kg/h, ja pohjatuhkaa syntyi 9,13 g kulunutta polttoainekiloa kohden. Pellettejä kului kokeen aikana yhteensä 117,7 kg, ja tuhkaa syntyi yhteensä 1,075 kg. Tuhkalle tehtiin myöhemmin hehkutuskoe, jossa määritettiin tuhkan palamattomien osuudeksi 1,9 p %. Kuvassa 2 on esitetty kokeen aikana mitatut savukaasupäästöt. Kokeen kestänyt noin kolme tuntia alkoi savukaasujen mittausarvoissa näkyä selvemmin hetkellistä heilahtelua.

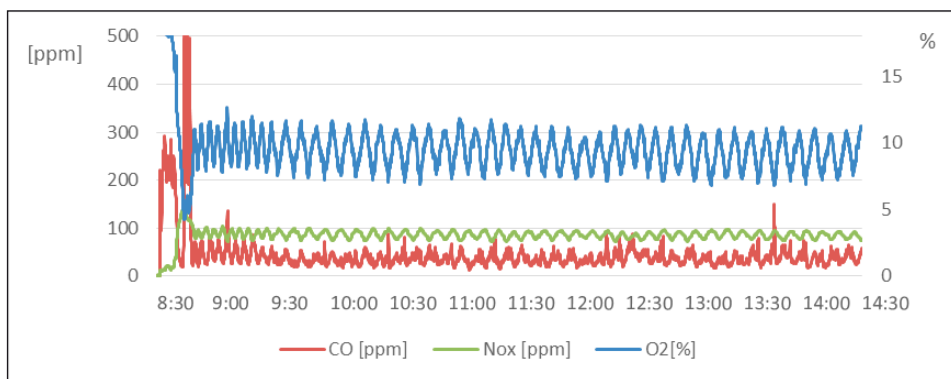


KUVA 2. CO-, NO<sub>x</sub>- ja jäännöshappipitoisuudet osateholla

## Koeajo täysteholla

Toinen testi suoritettiin ajamalla kattilaa täydellä teholla. Kattilan teho kokeen aikana oli keskimäärin 133,1 kW. Savukaasujen jäännöshappipitoisuus oli 9,64 % ja savukaasujen lämpötila oli 160 °C. CO-pitoisuus oli 38,8 mg/MJ ja NO<sub>x</sub>-pitoisuus 82,1 mg/MJ. Polttoainenkulutus kokeen aikana oli keskimäärin 25,63 kg/h, ja pohjatuhkaa syntyi 5,1 g kulunutta polttoainekiloa kohden. Polttoainetta kului kokeen aikana yhteensä 153,8 kg, ja tuhkaa syntyi yhteensä 0,758 kg. Tuhkanäytteelle tehtiin hehkutuskoe, jossa määritettiin palamattomien osuudeksi 0,91 p %.

Kuvassa 3 on esitetty täyden tehon kokeen aikana mitatut savukaasupäästöt. Mitatut päästöarvot olivat koko kokeen ajan suhteellisen tasaisia. Mittauskäyrässä näkyy selvästi arinan paluuliikkeen aiheuttama muutos mitatuissa arvoissa. Tuhkaa muodostui selvästi vähemmän kuin osateholla ajettaessa, eikä tuhkassa havaittu sintraantumia.



**KUVA 3. Torrefoitu koivupelletti, happi-, NO<sub>x</sub>- ja häkäpitoisuudet savukaasuisa täydesteholla. NO<sub>x</sub>- ja CO-pitoisuudet on ilmoitettu tilavuusosuuksina (ppm)**

## Tuhka

Polttokokeen aikana muodostuvan tuhkan määrä mitattiin ottamalla se talteen kattilan tulipesän pohjalta kokeen jälkeen. Tuhkasta määritettiin palamattomien osuus sekä tutkittiin mahdollisten sintraantumien esiintymistä (taulukko 1). Syntyneen tuhkan määrä oli täydellä teholla suoritetussa testissä selkeästi pienempi polttoaineki-  
loa kohden laskettuna. Toisaalta tuhkan palamattomien osuus oli osateholla suorite-  
tussa testissä suurempi. Osateholla tuhkan joukosta löytyi myös kuvassa 4 näkyvä n.  
6 cm pitkä sintraantunut tuhkakappale. Täydentehon kokeen jälkeen sintraantumia  
ei havaittu.

### TAULUKKO 1. Tuhkan muodostuminen eri tehoilla

	Teho	Polttoaineen- kulutus	Tuhka	Tuhkaa	Palamattomat tuhkassa
	[kW]	[kg]	[g]	[g/kg pa ]	[p%]
<b>Osateho</b>	71,8	117,7	1075	9,13	1,9
<b>Täysteho</b>	133,1	153,8	785	5,1	0,91

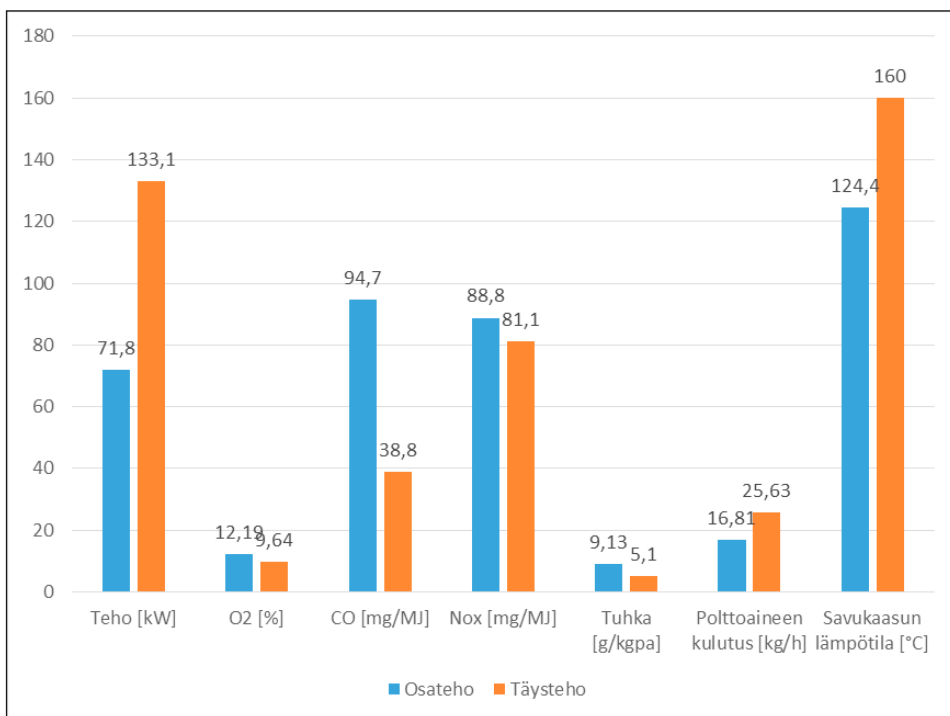
Kuvassa 5 on esitetty yhteenveto polttokokeiden tuloksista. Osateholla sekä NO<sub>x</sub>-että CO-päästöt olivat suurempia. Myös tuhkaa syntyi osateholla suhteellisesti enemmän. Lisäksi osateholla pohjatuhkan seasta löytyi sintraantunut kappale (kuva 4). Savukaasun lämpötila oli myös täydellä teholla ajettaessa suurempi.



**KUVA 4. Osateholla suoritetun kokeen jälkeen löytynyt n. 60 mm pitkä tuhka-kappale (kuva Juha-Pekka Lemponen)**

Täydellä teholla ajettaessa kattila toimi tasaisesti, eikä kokeen aikana havaittu ongelmia biohiilipellettien palamisessa tai polttoaineen syötössä. Päästöarvot säilyivät myös tasaisina koko kokeen ajan.

Torrefioitu koivupelletti sopii tehtyjen kokeiden perusteella poltettavaksi liikkuvalla arinalla varustetussa kattilassa täydellä teholla ajettaessa. Osateholla ajettaessa torrefioitu koivupelletti saattaa aiheuttaa sintraantumia pohjatuhkaan. Sintraantumista voitaisi todennäköisesti vähentää kattilan ajoparametrien optimoinnilla.



**KUVA 5. Yhteenveto 120 kW:n Ariterm BioComp 120 -kattilalla tehdyistä polttokokeista**

## Yhteenveto ja johtopäätökset

Hajautettu energiantuotanto biohiilipelleteillä -hankkeen aikana selvitettiin torrefioitujen biohiilipellettien käyttöä ja soveltuvuutta pienen kokoluokan pellettikattiloihin.

Polttokokeita suoritettiin torrefioidulla koivupelletillä Ariterm Oy:n tutkimuskeskuksen 120 kW:n kattilalla. Kattilaa ajettiin sekä osateholla että täydellä teholla. Kattilaa säädettiin Ariterm Oy:n toimesta. Täydellä teholla ajettaessa kattila toimi vakaasti, savukaasupäästöt pysyivät tasaisina ja tuhkan muodostus oli vähäistä. Tuhkassa ei myöskään havaittu sintraantumia. Osateholla suoritettussa kokeessa kattila toimi vakaasti, päästöarvoissa oli jonkin verran enemmän vaihtelua kuin täyden tehon kokeessa, ja pohjatuhkaan muodostui sintraantunut tuhkakappale.

Suoritettujen kokeiden perusteella näyttäisi siltä, että torrefioitu biohiilipelletti soveltuu hyvin käytettäväksi liikkuvalla arinalla varustetussa kattilassa, jos kattilaa ajetaan pääsääntöisesti täydellä teholla. Osateholla ajettaessa kattilan oikeiden säätöarvojen löytäminen on tärkeää täydellisen palamisen varmistamiseksi ja tuhkan sintraantumisen vähentämiseksi.

## Lähteet

Biederman F., Brunner T., Mandl C., Obernberger I., Kanzian W. 2014. Production of solid sustainable energy carriers from biomass by the means of torrefication. Executive summary of SECTOR project.

Wilén et al. 2014, Wood torrefication – market prospects and integration with the forest and energy industry, VTT Technology 163.

Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen, J. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia, VTT Technology 258, 229 s.+ liitteitä 35 s.

# TORREFIOITUJEN BIOHIILIPELLETTIEN TYÖTERVEYSVAIKUTUKSET

*Juha-Pekka Lemponen & Saska Kangassalo & Sari Seppäläinen & Hanne Soininen*

Hajautettu energiantuotanto biohiilipelleillä -hanke on toteutettu yhteistyössä Mikkelin ammattikorkeakoulun Metsä, ympäristö ja energia -painoalan ja Lappeenrannan teknillisen yliopiston bioenergiateknologian tutkimusryhmän kanssa. Hankkeen tavoitteena oli tutkia biohiilipelletin energiakäytön mahdollisuuksia pienessä kokoluokassa lämmön- ja sähköntuotannossa. Biohiilipelletti on uusi polttoaine pienikäytön kokoluokassa, eikä käyttökokemuksia ole saatavilla. Tämä artikkeli on lyhennelmä biohiilihankkeen osakokonaisuudesta, jossa selvitettiin torrefioitujen pellettien mekaanisesta käsittelystä mahdollisesti aiheutuvia terveysvaikutuksia. Lappeenrannan teknillisen yliopiston ja Mikkelin ammattikorkeakoulun yhteishanketta rahoittivat Etelä-Savon Maakuntaliitto Euroopan unionin aluekehitysrahastosta ja Suur-Savon Energiasäätiö.

## Terveysvaikutukset

Hengittäessään työssään pölyistä ilmaa ihminen voi sairastua työperäiseen sairauteen. Pölyille altistuminen on synnän monen työntekijän joko väliaikaiseen tai pysyvään työkyvyttömyyteen tai jopa kuolemaan. Pöly voi myös pilata tai heikentää tuotteiden laatua, aiheuttaa tulipaloja tai pölyräjähdymiä sekä vahingoittaa ympäristöä. (Vainio ym. 2005.)

Hiukkaset jaetaan kolmeen ryhmään niiden hengitysteihin kulkeutumisen ja kertymisen mukaan. Hengittyvä pöly koostuu jakeesta, jota hengitetään suun ja nenän kautta. Keuhkojake koostuu hiukkasista, jotka kulkeutuvat keuhkoputkistoon, ja alveolijake kulkeutuu syvimmälle keuhkoihin, keuhkorakkuloihin asti. Hiukkasten haitallisuus riippuu niiden fysikaalisista ominaisuuksista, kuten koosta ja muodosta sekä kemiallisesta koostumuksesta. Haitallisimpia ovat pienihiukkaset, jotka voivat tunkeutua keuhkorakkuloihin saakka. Hengitysteialtistuminen puupölylle saattaa aiheuttaa hengenahdistusta, yskää ja keuhkoärsytystä. Henkilöillä, jotka ovat altistuneet kotimaisista puulajeista syntyvälle pölylle, on havaittu pitkittynyttä nuhaa ja yskää sekä nenän toiminnan muutoksia. Homehtuneen puun pöly saattaa aiheuttaa allergisen alveoliitin. Puupöly aiheuttaa myös ihon ja silmien ärsytystä sekä sidekalvotulehduksia. (Työterveyslaitos 2014.)

Mikrobeille altistutaan hengitysteitse, ruuansulatuskanavan kautta tai ihon välityksellä saadun kosketuksen kautta. Valtaosa työpaikoilla tapahtuvista altistumisista tapahtuu hengitysilmassa olevien kiinteiden tai nestemäisten hiukkasten kautta. Altistumisen merkkeinä ovat ärsytys- ja yleisoireet, allergiat ja infektiot. Oireita ovat tavallisesti nenän, silmien ja ihon ärsyyntyminen sekä kuume ja pahoinvointi. Oireet loppuvat normaalisti altistumisen päätyttyä, mutta pitkäaikainen altistuminen voi johtaa myös krooniseen keuhkoputkentulehdukseen. Usein toistuvan tai liian suuren altistumisen johdosta kuka tahansa voi sairastua allergiseen alveoliittiin eli keuhkokudoksen allergiseen sairauteen. (Säämänen ym. 2004.)

## Laboratoriomittakaavan pöyhintäkoee

Hankkeen aikana suoritettiin laboratoriomittakaavan pöyhintäkoee, jossa selvitettiin torrefioitujen pellettien mekaanisesta käsittelystä mahdollisesti aiheutuvia terveysvaikutuksia. Kokeen kohteena olivat erityisesti ilmaan pääsevä hengittyvä pöly ja hiiwojen, homeiden sekä bakteerien määrä ilmassa. Tutkittava materiaali oli torrefioitu koivupelletti. Vertailumittaus tehtiin tavallisilla valkoisilla puupelletillä. Kuvassa 1 näkyvät pöyhintäkokeessa käytetyt pelletit sekä pöyhintään käytetyt saavit ja kauha.



**KUVA 1. Vasemalla pöyhintäkokeessa käytettyä torrefioitua koivupellettiä ja oikealla verrokkimateriaalina ollut valkoinen puupelletti (kuvat Juha-Pekka Lemponen)**

## Mittausympäristö

Mittaus suoritettiin Mikkelin ammattikorkeakoulun puutekniikan laboratoriossa sijaitsevassa vakio-olosuhdehuoneessa. Huoneen tilavuus on noin 6 m<sup>3</sup> ja lattiapinta-ala noin 2,6 m<sup>2</sup>. Mittalaitteet sijoitettiin huoneessa oleville hyllyille, ja pöyhintä tapahtui huoneen lattialla olevista saaveista. Kokeen aikana huonetilan ovi oli suljettuna ja tilassa oleva ilmastointiyksikkö sammutettuna. Kuvassa 2 on olosuhdehuoneen mittausjärjestely ja käytettävät laitteet.



**KUVA 2.** Pöyhintäkokeessa käytetyt mittalaitteet sijoitettuna olosuhdetilaan (kuva Saska Kangassalo)

## Mittalaitteet

Ilmassa olevien pienhiukkasten määrää ja kokojakaumaa mitattiin DustTrak DRX Aerosol Monitor -laitteella. Laitteen hiukkaskoon mittausalue on  $0,1\text{--}15\ \mu\text{m}$ . Mittalaitteen näytteenottosondi oli asetettu mittaustilaan n. 1,5 metrin korkeudelle. Pienten hiukkasten määrää ja kokojakaumaa mitattiin myös P-Track Ultrafine Particle Counter -laitteella. Laitteen hiukkaskoon mittausalue on  $0,02\text{--}1\ \mu\text{m}$ . Hiukkasten kokonaismäärä ilmassa määritettiin IOM-keräimillä. Laitteita oli käytössä kaksi kappaletta, joista toinen oli sijoitettu mittaustilan hyllylle n. 1,5 metrin korkeudelle ja toinen oli kiinnitetty mittaajan rintapieleen.



Pölynäytteet kerättiin ilmasta pumpun avulla IOM-keräimessä olevalle esipunnitulle suodattimelle. Keräimen läpi imetyn ilman tilavuus laskettiin kalibroidun pumpun kalibrointikertoimen ja käytetyn ajan perusteella. Pumpun virtausnopeutena käytettiin 2,0 l/min. Kiinteässä mittauspisteessä pumppu ja siihen liitetty IOM-keräin sijoitettiin mittaustilaan statiiviin n. 1,5 metrin korkeudelle (kuva 2). Hengitysvyöhykemittauksessa pumppu kiinnitettiin henkilön vyölle, ja keräin, joka oli liitetty muoviletulla näytteenkeräyspumppuun, asetettiin lähelle työntekijän hengitysvyöhykettä pystyasentoon.

Kokeen aikana selvitettiin myös mittaustilan hiivojen, homeiden ja bakteerien pitoisuudet käyttämällä Andersen-keräintä. Laite sijoitettiin mittaustilan hyllylle n. 1,5 metrin korkeudelle. Laitteen avulla saadaan sekä hiivojen, homeiden että bakteerien pitoisuuden määrittystä varten tarvittavat näytteet otettua samanaikaisesti. Lisäksi seurattiin koetilan ilman lämpötilaa ja suhteellista ilmankosteutta.

## Koemenetelmät

Pelletit sijoitettiin 60 litran muovisaaveihin, joissa niitä pöyhittiin, eli käytännössä siirrettiin kauhan avulla vieressä olevaan toiseen saaviin 15 sekunnin välein yhteensä 60 minuutin ajan. Koe aloitettiin ottamalla nollanäytteet huonetilasta. Sen jälkeen pellettejä pöyhittiin aluksi 5 minuutin ajan, jonka jälkeen aloitettiin hiukkasmittaus kytkemällä DustTrack- ja P-Trak-mittaukset päälle. 10 minuutin kohdalla aloitettiin Andersen-keräimen mittaus, jonka kesto oli yhteensä 10 minuuttia. Pöyhintäkoetta suoritettiin olosuhdehuoneessa 20.5.2016.

## Mittaustulokset

Bakteerit, hiivat ja homeet määritettiin Andersen-keräimellä. Tulokset on esitetty taulukossa 1. Bakteereita esiintyi molempien pellettien näytteissä. Torrefoitujen pellettien bakteerien määrä oli noin kolminkertainen tavalliseen pellettiin verrattuna. Hiivoja ja homeita ei kokeen aikana havaittu, lukuun ottamatta yhtä hiivapesäkettä tavallisen pelletin näytteessä.

Yksilöiden herkkyyseroista johtuen erilaisia mikrobikohtaisia terveysperusteisia raja-arvoja ei voida asettaa samalla tavalla kuin esimerkiksi fysikaalisille ja kemiallisille tekijöille. Alankomaissa on ehdotettu ilman työympäristön sieni-itiö- ja bakteeripitoisuuksien raja-arvoksi 10 000 cfu/m<sup>3</sup>, jonka ylittävillä pitoisuuksilla on esitetty olevan haitallisia vaikutuksia työntekijöiden terveydelle ja jolloin mikrobialtistumisen vähentämiseen tulisi aina ryhtyä. Terveyshaittoja voi kuitenkin esiintyä jo pienemmissäkin sieni-itiöpitoisuuksissa. Gram-negatiivisille bakteereille on esitetty raja-arvoksi 1 000 cfu / m<sup>3</sup>. (Metsäteollisuus 2010, 9.)

**TAULUKKO 1. Andersen keräimellä ilmasta mitattujen bakteerien sekä hiivojen ja homeiden pitoisuudet torrefioidun pelletin ja tavallisen pelletin pöyhintäkokeen aikana. Nollanäyte on otettu ennen kokeen aloittamista.**

Näyte	Torrefioitu pelletti [cfu/m <sup>3</sup> ]	Tavallinen pelletti [cfu/m <sup>3</sup> ]	Nollanäyte [cfu/m <sup>3</sup> ]
Bakteerit	16 000	5 600	130
Hiivat/homeet	Ei havaittu	1 pesäke	Ei havaittu

Mikrobipitoisuus laskettiin seuraavalla yhtälöllä:

$$\text{Mikrobipitoisuus} = \frac{\text{vaiheiden pesäkemäärien summa}}{\text{ilmanäytteen tilavuus}}$$

Ilmanäytteen tilavuus = näytteenottoaika (min) \* 28,3 (l/min)/1000 (m<sup>3</sup>) (Asumisterveysopas 2009, 165).

Hiukkasten kokonaismäärää mitattiin kahdella IOM-keräimellä, joista toinen oli huonetilassa jalustalla noin metrin korkeudella ja toinen oli kiinnitetty tutkijan rintapieleen. Tulokset on esitetty taulukossa 2. Hiukkasten kokonaismäärä oli torrefioiduilla pelleteillä hieman korkeampi, mutta suuruusluokaltaan molemmat tutkitut näytteet olivat lähellä toisiaan. Puupölyn työhygieniseksi raja-arvoksi (HTP8h) on määritelty 2 mg/m<sup>3</sup>, mutta uusien tai uudistettavien tuotantolaitoksien tulee soveltaa 1 mg/m<sup>3</sup> (HTP8h) arvoa (HTP-arvot 2014). Kovapuupölyn raja-arvo on 5 mg/m<sup>3</sup> (8 h).

**TAULUKKO 2. Kokonaishiukkasmäärä IOM-keräimellä mitattuna. Keräin 2 oli ripustettuna mittaajan rintapieleen**

Näyte	Torrefioitu pelletti [mg/m <sup>3</sup> ]	Tavallinen pelletti [mg/m <sup>3</sup> ]
Keräin 1	7,7	5,2
Keräin 2	5,0	4,8

Pienten hiukkasten (partikkelikokojakauma 0,1–15 µm) esiintymistä mitattiin Dust-Track-mittalaitteella. Tulokset on esitetty taulukossa 3. Molempien tutkittujen näytteiden osalta pienten hiukkasten kokonaismäärät olivat lähellä toisiaan. Torrefioitujen pellettien tulos oli hieman korkeampi kuin tavallisten pellettien tulos.

### TAULUKKO 3. Pienten hiukkasten kokonaismäärä mitattuna DustTrack-keräimellä

Näyte	Torrefioitu pelletti [mg/m <sup>3</sup> ]	Tavallinen pelletti [mg/m <sup>3</sup> ]	Nollanäyte [mg/m <sup>3</sup> ]
Hiukkasten kokonaismäärä	0,8	0,6	<0,05

Ultrapienten hiukkasten (partikkelikokojakauma 0,02–1 µm) esiintymistä mitattiin P-Track-mittalaitteella. Laite ilmoittaa suoraan hiukkasten kokonaismäärän kuutiometrinä (cfu/cm<sup>3</sup>). Tulokset on esitetty taulukossa 4. Molempien testattujen pellettien arvot ovat lähellä toisiaan.

### TAULUKKO 4. Ultrapienten hiukkasten määrä mitattuna P-Track-analysaattorilla

Näyte	Torrefioitu pelletti [cfu/cm <sup>3</sup> ]	Tavallinen pelletti [cfu/cm <sup>3</sup> ]
Hiukkasten määrä	542	560

## Johtopäätökset

Hajautettu energiantuotanto biohiilipelleteillä -hankkeen aikana selvitettiin torrefioitujen biohiilipellettien käyttöä ja soveltuvuutta pienen kokoluokan pellettikattiloihin. Biohiilipellettien työterveysvaikutuksia selvitettiin pöyhintäkokeen avulla. Mittauksissa ei havaittu merkittäviä eroja, kun tuloksia verrataan valkoisella pelletillä tehtyihin kokeisiin. Kummankaan pelletin hengittävän pölyn tulokset eivät ylittäneet puupölylle annettua HTP8h-arvoa 2 mg/m<sup>3</sup>. Ainoastaan bakteerien määrä oli torrefioiduissa pelleteissä selkeästi suurempi.

## Lähteet

Asumisterveysopas 2009. Sosiaali- ja terveysministeriön Asumisterveysohjeen (STM:n oppaita 2003:1) soveltamisopas. Ympäristö ja Terveys-lehti, Pori.

Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen, J. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia, VTT Technology 258, 229 s.+ liitteitä 35 s.

HTP-arvot. 2014. Sosiaali- ja terveysministeriö Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet [http https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/.../URN\\_ISBN\\_978-952-00-3479-5.pdf?](https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/.../URN_ISBN_978-952-00-3479-5.pdf?)

Husgafvel-Pursiainen, Kirsti, Liukkonen Tuula, Welling, Irma. 2014. TTL Altistuminen puupölylle työssä: terveystriskit ja hallinta

Metsäteollisuus, Työympäristön mikrobiologisten riskien hallinta massan ja paperin valmistuksessa 2010.

Säämänen, Arto, Riipinen, Hannu, Kulmala, Ilpo, Welling, Irma. 2004. Pölyntorjunta.

Vainio, H. ym. 2005. Kemikaalit ja työ. Selvitys työympäristön kemikaaliriskeistä. TTL 2005.



# HIUKKASPITOISUUDET TAAJAMAN PIENTALOALUEELLA

*Johanna Kainulainen & Niina Laurila & Timo Ålander*

Mitattu tieto ympäristöstä on avain päästöjen ennaltaehkäisyyn ja vähentämiseen. Veden ja ilman monitorointi ympäristön tilan turvaamiseksi Etelä-Savossa (VIM)-hanke tuottaa tietoa vesi- ja ilmapäästöjen määrästä, koostumuksesta ja vaikutuksista. Ympäristöstä mitattu tieto analysoidaan ja jalostetaan maakunnan ympäristötilan parantamiseksi ja kaupallisten sovellusten luomiseksi yrityksille. Mikkelin ammattikorkeakoulun hanketta rahoittavat Etelä-Savon maakuntaliitto Euroopan aluekehitysrahastosta, Etelä-Savon Energia Oy, Metsäsairila Oy ja Mikkelin Vesilaitos. Hanke on alkanut 1.1.2015 ja päättyy 31.12.2016.

VIM-hankkeessa mitataan ja analysoidaan muun muassa liikenteen ja energiantuotannon ilmapäästöjen vaikutuksia taajama-alueen ympäristöterveyteen. VIM-hankkeen tilaamana tehtiin opinnäytetyö, jonka aiheena oli liikenteen ja puun pienpolton aiheuttamat hiukkaspäästöt Mikkelin taajama-alueella. Tässä artikkelissa kerrotaan opinnäytetyönä tehdyistä hiukkaspitoisuusmittauksista ja niiden tuloksista Mikkelin taajaman pientaloalueella.

## Ilmassa leijuvat hiukkaset

Ilman hiukkaset voidaan jakaa kokonsa puolesta eri ryhmiin:  $PM_{10}$ -hiukkasilla tarkoitetaan hengitettäviä hiukkasia,  $PM_4$ -hiukkaset kuuluvat karkeisiin hiukkasiin,  $PM_{2,5}$ -hiukkasilla tarkoitetaan pienhiukkasia ja  $PM_{1,0}$ -hiukkasilla ultrapieniä hiukkasia.  $PM_{15}$ -hiukkasilla tarkoitetaan puolestaan ilmassa leijuvaa kokonaisu-pölyä.

Suomessa ilmansaastepitoisuuksiin vaikuttavat sekä kotimaiset päästölähteet että ulkomailta peräisin oleva kaukokulkeuma. Kotimaisista päästölähteistä eniten ilman hiukkaspitoisuuksiin vaikuttavat liikenteestä johtuva tiepöly ja pakokaasupäästöt, puun pienpolto taajama-alueilla sekä energiantuotannon  $SO_2$ - ja  $NO_x$ -päästöt. Pienhiukkasten altistuksesta noin puolet tulee Suomen rajojen ulkopuolelta kaukokulkeumana. (Hänninen ym. 2016, 15–17.)

Liikenne on yksi hiukkasten merkittävimmistä lähteistä, ja siitä muodostuvilla päästöillä on usein suuri vaikutus kaupunkien ilmanlaatuun johtuen liikenteen matalasta päästökorkeudesta. Pakokaasujen lisäksi liikenne nostattaa tien pinnasta myös katupölyhiukkasia, jotka muodostuvat mm. renkaiden ja tien päällysteen kulumisesta sekä hiekoitusshiekasta. Erityisesti hiukkasia on ilmassa tilanteissa, joissa tien pinta

on sula ja kuiva ja liikenteestä johtuva ajoviima sekä tuuli ovat voimakkaita. Myös meteorologiset tekijät, kuten esimerkiksi tuulen suunta, nopeus ja turbulentsisuus, lämpötila, ilman suhteellinen kosteus, pilvisuus sekä sadanta, vaikuttavat hiukkasten pitoisuuksiin ilmassa. (Niemi 2002, 3–12.) Puun pienpolton aiheuttamat hiukkaspitoisuudet ovat yleensä korkeimmillaan saunapäivinä viikonloppuisin sekä ilta-aikaan, jolloin saunoja ja tulisijoja käytetään eniten (Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla vuonna 2015, 42).

Yksi merkittävimpiä ilmansaasteiden aiheuttamia haittoja on pienhiukkasten aiheuttamat haitat ihmisen terveydelle. Terveystaitoista reilu 60 % aiheutuu pienhiukkasista ( $PM_{2,5}$ ) ja reilu 10 % hengitettävistä hiukkasista ( $PM_{10}$ ). EU:n asettamat hiukkaspitoisuuksien raja-arvot ylittyvät suuressa osassa Eurooppaa, mutta Suomessa niiden ylittyminen on harvinaisempaa. Kuitenkin myös raja-arvoja alhaisemmilla pitoisuuksilla on todettu olevan vaikutusta ihmisen terveyteen. Hiukkaset kulkeutuvat ilman mukana ihmisen hengitysteihin ja aiheuttavat erilaisia terveystaitoita ihmisen kehossa. Ilman pienhiukkaset liittyvät esimerkiksi ennen aikaiseen kuolleisuuteen, sydän- ja verisuonisairauksiin sekä hengityselinsairauksiin, kuten astmaan, keuhkoastma- ja keuhkosyöpään. (Hänninen ym. 2016, 10–22.)

Valtioneuvoston ilmanlaadusta antaman asetuksen 4 § määrää raja-arvot ilman epäpuhtauksille terveystaittojen ehkäisemiseksi ja vähentämiseksi. Hiukkasten pitoisuudet ulkoilmassa eivät saa ylittää niille asetettuja raja-arvoja. (Valtioneuvoston asetus ilmanlaadusta 38/2011.) Myös Maailman terveystaittojärjestö (WHO) on määrittänyt vuonna 2005 hiukkasille ohje-arvot. Ohje-arvojen tarkoituksena on toimia maailmanlaajuisina raja-arvoina tärkeimmille terveystaitto- ja aiheuttaville ilmansaasteille. (Ambient (outdoor) air quality and health, 2016.) Sekä hengitettävien että pienhiukkasten raja-arvot ja ohje-arvot on koottu alle (taulukko 1).

**TAULUKKO 1. Hengitettävien hiukkasten ja pienhiukkasten raja- ja ohjearvot**

Hengitettävät hiukkaset (PM <sub>10</sub> )	Keskiarvon laskenta-aika	Raja-arvo / Ohjearvo (µm/m <sup>3</sup> )	Sallittujen ylitysten määrä kalenterivuodessa
Valtioneuvoston asetus ilmanlaadusta 38/2011	24 tuntia	50	35
Valtioneuvoston asetus ilmanlaadusta 38/2011	Kalenterivuosi	40	-
WHO:n ohjearvot	24 tuntia	50	-
WHO:n ohjearvot	Vuosi	20	

Pienhiukkaset (PM <sub>2,5</sub> )	Keskiarvon laskenta-aika	Raja-arvo / Ohjearvo (µm/m <sup>3</sup> )	Sallittujen ylitysten määrä kalenterivuodessa
Valtioneuvoston asetus ilmanlaadusta 38/2011	Kalenterivuosi	25	-
WHO:n ohjearvot	24 tuntia	25	-
WHO:n ohjearvot	Vuosi	10	

VIM-hankkeen tilaaman opinnäytetyön aiheena oli selvittää liikenteen ja puun pienpolton aiheuttamien hiukaspäästöjen vaikutusta taajama-alueen ympäristöterveyteen. Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää liikenteen ja puun pienpolton hiukaspäästöjen suuruutta ja hiukkasten pitoisuutta ilmassa Mikkelin taajama-alueella suoritettujen hiukaspitoisuusmittausten pohjalta. Saatuja mittaustuloksia verrattiin kyseisenä aikana vallinneisiin sääoloihin ja kaupungin keskimääräisiin liikennemääriin ja tarkasteltiin niiden välisiä yhteyksiä.

## Mittauspiste ja -menetelmät

Opinnäytetyön hiukaspitoisuusmittaus suoritettiin Mikkelin taajaman pientaloalueella Jääkärinkadulla. Mittaus suoritettiin 30.9.–14.10.2016 ja sen kesto oli yhteensä 14 vuorokautta. Mittarina käytettiin DustTrak™ DRX8533 -hiukaspitoisuusmittaria (kuva 1), jolla mitataan sekä kokonaispöly- (PM15) että hiukaspitoisuuksia (PM10, PM4, PM2.5, PM1.0).





**KUVA 1. DustTrak™ DRX8533 -hiukkaspitoisuusmittari (kuva Johanna Kainulainen)**

Mittari sijoitettiin Jääkärinkadulla sijaitsevan omakotitalon pihalla olevan autotallin katolle säänkestävässä suojasalkussa (kuva 2). Mittarin logging interval asetettiin kolmeen minuuttiin eli mittari tallensi dataa muistiinsa kolmen minuutin välein. Mittari myös nollattiin kuuden tunnin välein siihen asennetun auto zero -lisäosan avulla.



**KUVA 2. Mittari pientaloalueella omakotitalon autotallin katolla (kuva Johanna Kainulainen)**

Omakotitalo, jonka pihalla mittaukset tehtiin, sijaitsee aivan kadun varressa. Taloa ympäröivät toiset omakotitalot, joissa käytetään muun lämmityksen lisäksi puulämmitystä sekä puilla lämmitettäviä saunoja. Pientaloalueen välittömässä läheisyydessä sijaitsevat myös Mikkelin ammattikorkeakoulu sekä esimerkiksi toimistorakennuksia, joten alueen liikenne koostuu sekä alueen asukkaiden ajoneuvojen käytöstä että koulu- ja työpaikkaliikenteestä. Pientaloalueen mittauksella pyrittiin saamaan selville alueen liikenteen sekä alueella tapahtuvan puun pienpolton aiheuttamia hiukkasten pitoisuuksia sekä tietoa niiden mahdollisesta vaihtelusta esimerkiksi liikennemäärien ja sääolosuhteiden mukaan.

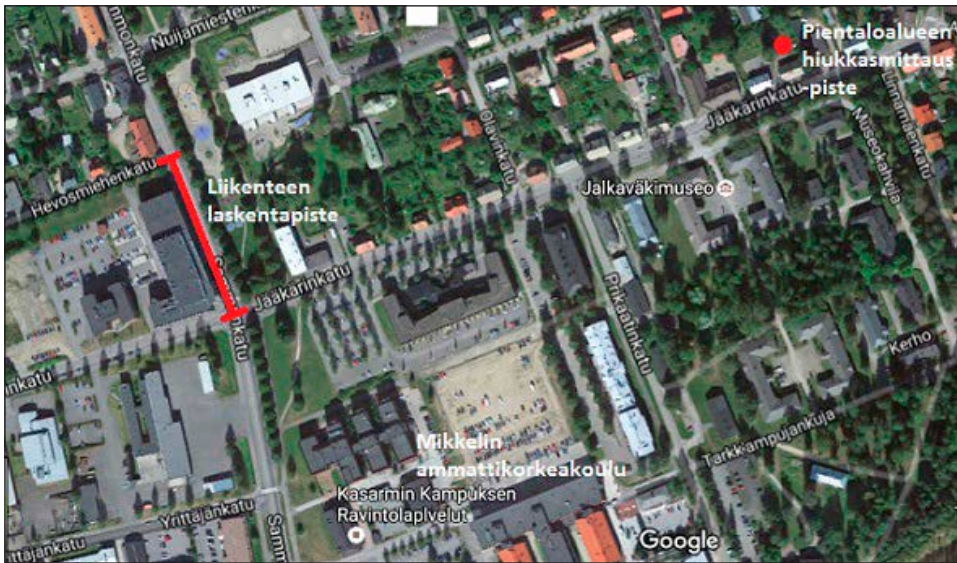
Valinnea sääolosuhteita selvitettiin Mikkelin ammattikorkeakoulun sääaseman tiedoista sekä Ilmatieteen laitoksen avoimesta datasta. Mikkelin ammattikorkeakoulun sääasema sijaitsee keskustassa kaupungin virastotalon katolla, josta on matkaa hiukkasmittauspisteeseen noin 0,5 km. Ilmatieteen laitoksen säähavaintoasema on Mikkelin lentoasemalla, joka on noin 3 km:n etäisyydellä hiukkasmittauspisteestä. Kaupungin keskimääräisiä liikennemääriä selvitettiin Mikkelin kaupungilta.

## Tuloksia hiukkaspitoisuusmittauksista

Mittauksissa saatua dataa käsiteltiin ja analysoitiin sekä DustTrak-mittarin mukana tulleen Trakpro-ohjelman että Excel-ohjelman avulla. Myös valinneiden sääolosuhteiden selvittämiseksi käytettyjä Mikkelin ammattikorkeakoulun sääaseman tietoja, Ilmatieteen laitoksen avointa säädatta sekä selvitettyjä liikennemäärätietoja käsiteltiin Excel-ohjelman avulla. Hiukkasten pitoisuuksia verrattiin myös valtioneuvoston ilmanlaadusta antaman asetuksen (38/2011) asettamiin raja-arvoihin niiltä osin, kun raja-arvoja on määritetty ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ ) sekä WHO:n asettamiin ohjearvoihin.

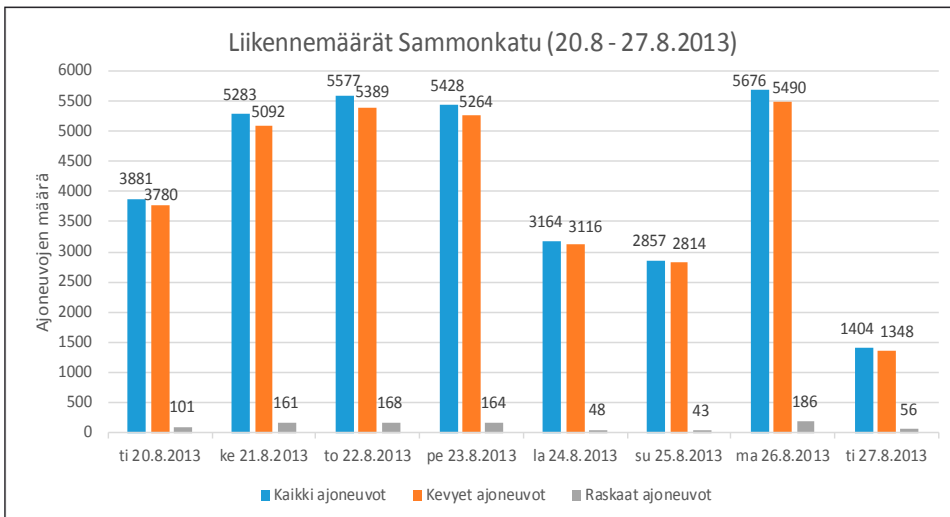
## Liikennemäärät

Kaupungin katuverkolla Jääkärinkadun pientaloaluetta lähin liikenteen laskentapiste on ollut Sammonkadulla välillä Jääkärinkatu ja Hevosmiehenkatu (kuva 3). Tässä laskentapisteessä liikennemääriä on laskettu 20.8.–27.8.2013. Liikennemäärän laskentaa ei ole suoritettu aivan pientaloalueen hiukkasmittauspisteen kohdalla eikä saman kadun varrella. Laskentapiste on kuitenkin ollut lähellä pientaloalueen hiukkasmittauspistettä. Liikennemäärien laskennasta ei myöskään ole kovin pitkä aika, vaan se on suoritettu hieman yli kolme vuotta sitten. Voitiin siis olettaa, että pientaloalueen hiukkasmittauspisteen kohdalla liikennemäärät ovat määriteltään samansuuntaisia kuin elokuussa 2013 tehdyt liikennemäärien laskennan tulokset.



**KUVA 3. Liikenteen laskentapiste ja pientaloalueen hiukkasmittauspiste kartalla (mukaillen Google Maps)**

Liikennelaskennan mittauspisteen keskimääräinen liikennemäärä oli 4 800 ajoneuvoa/vrk eli alueella oli liikennettä melko paljon. Liikennelaskennan mukaiset liikennemäärät vuorokautta kohti näkyvät alla olevasta kaaviosta (kuva 4). Liikennelaskennan tietojen perusteella alueella oli liikennettä selvästi enemmän arkipäivisin kuin viikonloppuna.



**KUVA 4. Liikennelaskennan mukaiset liikennemäärät Sammonkadulla elokuussa 2013**

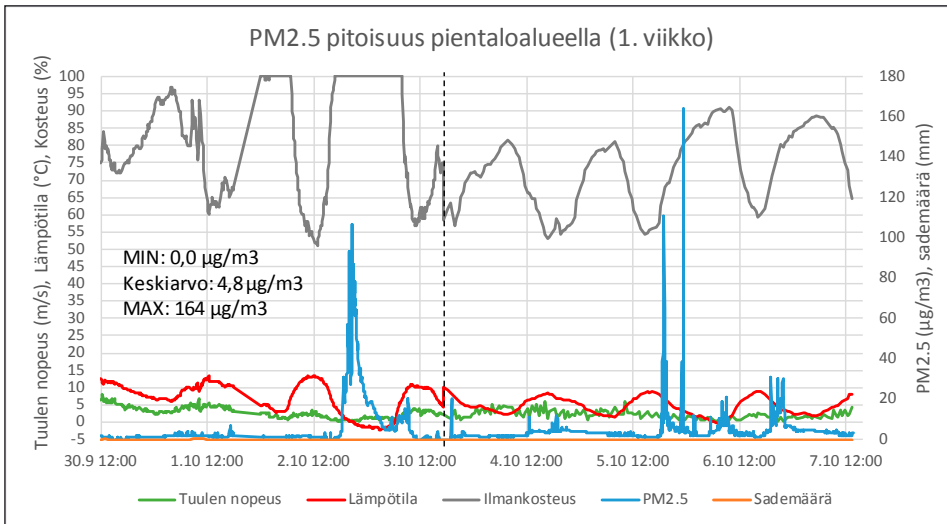
Liikennelaskennan tietojen mukaan eniten ajoneuvoja liikkui arkipäivisin klo 7–19 välisenä aikana, jolloin liikennemäärät olivat yli 100 ajoneuvoa/tunti. Liikennemäärät alkoivat kasvaa pääsääntöisesti klo 6–7 aikaan ja laskemaan klo 16–17 aikaan. Vähiten liikennettä oli klo 1–4 välisenä aikana, jolloin liikennemäärät olivat alle 10 ajoneuvoa/tunti.

Viikonloppuna eniten ajoneuvoja liikkui klo 10–18 välisenä aikana, jolloin liikennemäärät olivat yli 100 ajoneuvoa/tunti. Liikennemäärät alkoivat kasvaa pääsääntöisesti klo 9–10 aikaan ja laskemaan klo 17–19 aikaan. Liikennemäärät alkoivat lisääntyä viikonloppuisin siis myöhempään kuin arkipäivinä ja liikennemäärät olivat aamuisin huomattavasti pienemmät, joten viikonloppuisin ei ollut havaittavissa samanlaista aamuruuhka-aikaa kuin arkipäivinä. Vähiten liikennettä oli klo 1–4 välisenä aikana, jolloin liikennemäärät olivat alle 30 ajoneuvoa/tunti. Viikonloppuisin liikennemäärät olivat yöaikaan hieman korkeammat kuin arkipäivinä.

## Hiukkaspitoisuudet ja sääolosuhteet

Tulosten osalta kaikkien kokoluokkien hiukkasten ( $PM_{1.0}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_4$ ,  $PM_{10}$ ,  $PM_{15}$ ) pitoisuudet olivat lähes samat koko mittauksen ajan ja niissä oli vain hyvin pieniä eroja. Tässä artikkelissa kerrotaan esimerkkinä vain  $PM_{2.5}$ -hiukkasten tuloksista, sillä muiden kokoluokkien hiukkasten tulokset olivat siis lähes identtiset.

$PM_{2.5}$ -hiukkasten pitoisuudet sekä mittauksen aikana vallinneet sääolosuhteet mittauksen ensimmäisen viikon ajalta eli 30.9. klo 12.01–7.10.2016 klo 13.34 näkyvät alla olevasta kaaviosta (kuva 5). Ensimmäisen viikon mittauksen aikana  $PM_{2.5}$ -hiukkasten alhaisin mitattu pitoisuus oli  $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , keskiarvopitoisuus oli  $4,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja korkein mitattu pitoisuus oli  $164 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ensimmäisen mittausviikon aikana  $PM_{2.5}$ -hiukkasten keskimääräinen pitoisuus ilmassa oli siis alhainen. 1.10. hiukkaspitoisuuksien mittausdatan arvot aikavälillä 18.01–23.58 eivät kuitenkaan olleet luotettavia, sillä ne näyttivät negatiivisia arvoja, mikä ei ole käytännössä hiukkaspitoisuuksien osalta mahdollista. Kyseisen aikavälin data jätettiin siis kokonaan pois käsittelystä datasta sekä minimi- ja maksimiarvojen laskennasta.



**KUVA 5. PM<sub>2,5</sub>-pitoisuudet sekä mittauksen aikana vallinneet sääolosuhteet ensimmäisen mittausviikon aikana. Kaaviossa näkyvän mustan katkoviivan vasemmalla puolella olevat sääolosuhdekäyrät on saatu Ilmatieteen laitoksen avoimesta datasta, oikeanpuoleiset on saatu Mikkelin ammattikorkeakoulun sääaseman tiedoista.**

Ajoittain hiukkasten pitoisuudet nousivat kuitenkin korkeammiksi. Korkeimmat hiukkaspitoisuudet mitattiin 5.10. klo 18.37–19.31, jolloin pitoisuudet olivat 12–111 µg/m<sup>3</sup> sekä klo 22.52–23.16, jolloin pitoisuudet olivat 4–164 µg/m<sup>3</sup>. Korkeimmat pitoisuudet siis mitattiin keskiviikko-illan aikana. Näiden jaksojen välillä eli noin 3,5 tunnin ajan pitoisuudet olivat 3–13 µg/m<sup>3</sup>. Toiseksi korkeimmat pitoisuudet mitattiin 2.10. klo 18.34–23.46 eli sunnuntai-illan aikana, jolloin pitoisuudet olivat 18–107 µg/m<sup>3</sup>.

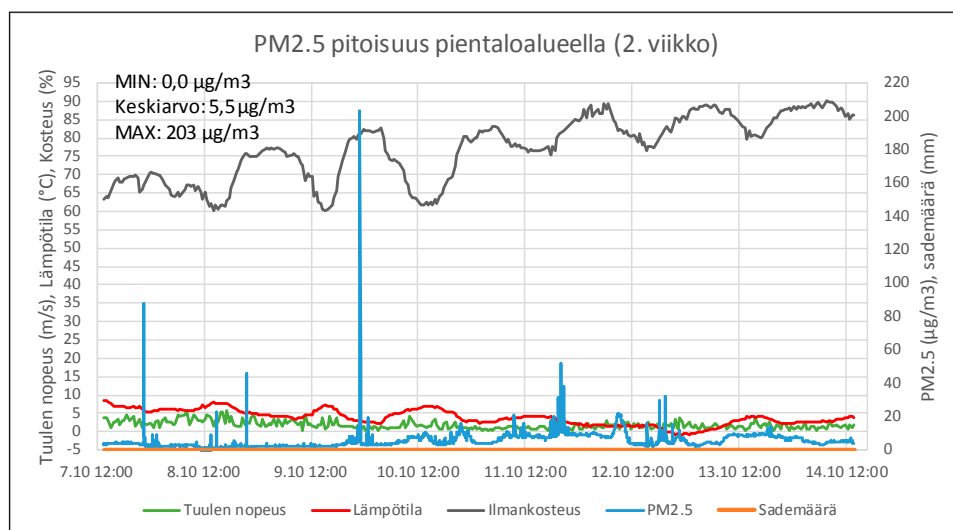
Ensimmäisen mittausviikon ajalta Mikkelin ammattikorkeakoulun sääaseman tiedot olivat käytettävissä vain 3.10. klo 17.12 jälkeiseltä ajalta. Mittausjakson alun säätiedot on otettu Ilmatieteen laitoksen avoimesta datasta. Mikkelin ammattikorkeakoulun sääaseman tiedot ovat luotettavampia ja vertailukelpoisempia verrattuna Ilmatieteen laitoksen avoimen datan säätietoihin, sillä se sijaitsee lähempänä hiukkasmittauspistettä. Tällöin sääaseman ja hiukkasmittauspisteen sääolosuhteet ovat todennäköisesti lähempänä toisiaan kuin kauempana sijaitsevan Ilmatieteen laitoksen havaintoaseman sääolosuhteet.

Sääolosuhdetietojen mukaan mittausjakson aikana ei satanut vettä, joten se ei vaikuttanut hiukkaspitoisuuksiin ilmassa. Lämpötilat olivat pääsääntöisesti 0–10 °C välillä. 2.10. klo 21–3.10. klo 6 oli hieman pakkasta, alimmillaan -2,2 °C. Myös 6.10. aamulla klo 6–8 välillä lämpötila kävi hieman pakkasen puolella lämpötilan ollessa alimmillaan -0,4 °C. Lämpötilat olivat siis mittausjaksolla sen verran matalia, että tulisijoja on todennäköisesti käytetty alueen omakotitalojen lämmitykseen. Erityisesti

tämä näkyi sunnuntai-illan 2.10. aikana, jolloin lämpötila oli pakkasen puolella ja myös hiukkaspitoisuudet ilmassa korkeita.

Kohonneita pitoisuuksia ilmassa mitattiin sekä sunnuntai- että keskiviikko-iltoina. Myös tämän arveltiin johtuvan siitä, että ilta-aikaan oli todennäköisesti poltettu puuta tulisijoissa tai lämmitetty saunaa. Ilta-aikaan liikenne tuskin oli syynä hiukkaspitoisuuksien nousuun. Sunnuntai-iltana 2.10. tuulen nopeus oli 0,0–1,7 m/s. Myös keskiviikko-iltana 5.10. hiukkaspitoisuuksien ollessa kohonneita tuulen nopeus oli 1,0–1,3 m/s eli tuuli puhalsi heikosti. Heikko tuuli on voinut vaikuttaa siihen, että pitoisuudet pysyivät kohonneina pidemmän aikaa eli reilusta puolesta tunnista useampaan tuntiin, eivätkä hiukkasten pitoisuudet laimentuneet ilmassa tuulen vaikutuksesta.

PM<sub>2.5</sub>-hiukkasten pitoisuudet sekä mittauksen aikana vallinneet sääolosuhteet mittauksen toisen viikon ajalta eli 7.10. klo 13.37–14.10.2016 klo 13.40 näkyvät alla olevasta kaaviosta (kuva 6). Toisen viikon mittauksen aikana PM<sub>2.5</sub>-hiukkasten alhaisin mitattu pitoisuus oli 0 µg/m<sup>3</sup>, keskiarvopitoisuus oli 5,5 µg/m<sup>3</sup> ja korkein mitattu pitoisuus oli 203 µg/m<sup>3</sup>. Toisen mittausviikon aikana keskimääräisesti PM<sub>2.5</sub>-hiukkasten pitoisuus ilmassa oli siis alhainen, mutta kuitenkin hieman korkeampi kuin ensimmäisellä mittausviikolla.



**KUVA 6. PM<sub>2.5</sub>-pitoisuudet sekä mittauksen aikana vallinneet sääolosuhteet toisen mittausviikon aikana**

Myös toisella viikolla hiukkasten pitoisuudet ilmassa nousivat ajoittain korkeiksi. Korkeimmat pitoisuudet mitattiin 9.10. klo 23.01–23.07 eli myöhään sunnuntai-iltana, jolloin pitoisuudet olivat 9–203 µg/m<sup>3</sup>. Toiseksi korkeimmat pitoisuudet mitattiin 7.10. klo 22.37–22.43 eli myöhään perjantai-iltana, jolloin pitoisuudet olivat



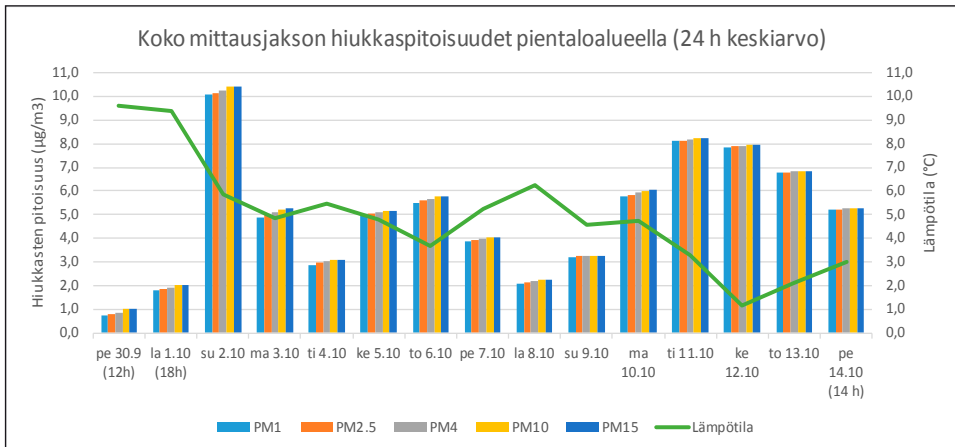
7–88 µg/m<sup>3</sup>. Toisella viikolla mitattiin siis koko mittausjakson korkein hiukkaspitoisuus. Kahden korkeimman piikin osalta pitoisuudet olivat koholla kuitenkin vain alle 10 minuutin ajan, joten kohonneiden pitoisuuksien kesto oli huomattavasti lyhyempi verrattuna ensimmäisen viikon kohonneisiin pitoisuuksiin.

Käytettävissä olleiden sääolosuhdetietojen mukaan toisen viikon mittausjakson aikana ei satanut vettä, joten se ei vaikuttanut ilman hiukkaspitoisuuksiin. Lämpötilat olivat pääsääntöisesti 0–10 °C välillä; 12.10. klo 19 ja 13.10. klo 3 välillä lämpötila kävi hieman pakkasen puolella lämpötilan ollessa alimmillaan -0,8 °C. Lämpötilat olivat mittausjaksolla sen verran matalia, että tulisijojen käyttö omakotitalojen lämmitykseen oli mahdollista. Kohonneita pitoisuuksia ilmassa mitattiin sekä myöhään sunnuntai- että perjantai-iltoina. Myös toisen viikon kohonneiden hiukkaspitoisuuksien arveltiin johtuvan siitä, että ilta-aikaan oli todennäköisesti poltettu puuta tulisijoissa tai lämmitetty saunaa, sillä myöhäisilta-aikaan liikenne tuskin oli synnä hiukkaspitoisuuksien nousuun.

Pitoisuudet olivat kohonneina kuitenkin lyhyen aikaa eli alle 10 minuutin ajan. Sääolosuhdetietoja oli saatavilla 0,5–1 tunnin väliajoin, joten oli vaikea arvioida, kuinka esimerkiksi tuuli ja sen nopeus ovat vaikuttaneet lyhytkestoisiin hiukkaspitoisuuksien nousuihin. Esimerkiksi voimakkaammat tuulenpuuskat ovat kuitenkin voineet vaikuttaa siihen, että kohonneet pitoisuudet ovat laskeneet nopeammin.

## 24 tunnin keskiarvot

Jokaiselle mittausvuorokaudelle laskettiin myös 24 tunnin keskiarvot erikokoisten hiukkasten pitoisuuksista sekä lämpötilan vuorokausikeskiarvot (kuva 7). Mittaukset aloitettiin kesken vuorokauden perjantaina 30.9. klo 12.01, joten tältä päivältä keskiarvo laskettiin saadusta 12 tunnin datasta. Lauantaina 1.10. mittausdatan arvot aikavälillä 18.01–23.58 eivät ole luotettavia, joten kyseisen aikavälin data jätettiin pois keskiarvon laskennasta ja keskiarvo laskettiin 18 tunnin datatietoista. Mittaukset puolestaan lopetettiin kesken vuorokauden perjantaina 14.10. klo 13.40, joten tältä päivältä keskiarvo laskettiin 14 tunnin datasta.



**KUVA 7. Koko mittausjakson hiukkaspitoisuuksien 24 tunnin keskiarvot sekä lämpötilojen vuorokausikeskiarvot pientaloalueella**

Erikokoisten hiukkasten 24 tunnin keskiarvopitoisuudet olivat hyvin samanlaiset ja niissä oli vain pieniä eroja keskenään. Kokonaisuudessaan 24 tunnin keskiarvopitoisuudet olivat varsin matalat, korkeimmilleen pitoisuudet nousivat sunnuntaina 2.10., jolloin keskiarvopitoisuus oli noin  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Muuten keskiarvopitoisuudet olivat alle  $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Keskiarvopitoisuudet olivat arkipäivinä (maanantai–perjantai) korkeammat kuin viikonloppuna (lauantai–sunnuntai). Arkipäivinä keskiarvopitoisuudet olivat  $2,9$ – $8,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , kun taas viikonloppuna keskiarvopitoisuudet olivat  $1,8$ – $3,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Korkeammat keskiarvopitoisuudet arkipäivinä johtuivat todennäköisesti suuremmasta liikennemäärästä alueella, erityisesti arkipäivien aamu- ja iltapäiväliikennemäärästä. Tätä tukevat myös saadut tiedot liikennemäärästä alueella.

Tästä poikkeuksena oli sunnuntai 2.10., jolloin 24 tunnin keskiarvopitoisuus oli koko mittausjakson korkein. Keskiarvopitoisuutta nostivat sunnuntai-illan aikana mitatut korkeat hiukkaspitoisuudet. Syyksi tähän epäiltiin sitä, että alueella oli tapahtunut puun pienpoltto tavallista enemmän. Asukkaat olivat mahdollisesti olleet viikonloppun poissa kotoaan ja sunnuntaina kotiin palatessaan olivat alkaneet lämmitellä taloaan polttamalla puuta tulisijoissa tai alkaneet lämmitellä saunojaan. Liikenteen lisääntyminen ja sitä kautta hiukkaspitoisuuksien kasvu ei ollut kovin todennäköinen vaihtoehto sunnuntaina, etenkin ilta-aikaan.

2.10. illan aikana oli myös hieman pakkasta, mikä on voinut vaikuttaa tulisijojen käyttöön lisäten sitä. Koko mittausjakson 24 tunnin keskiarvoista voitiinkin havaita, että ulkoilman lämpötilalla oli vaikutusta ilman hiukkaspitoisuuksiin. Ulkoilman lämpötilan lähtiessä laskuun hiukkaspitoisuudet kasvoivat, kun taas lämpötilojen ollessa korkeammat hiukkaspitoisuudet olivat pienemmät. Tämän arveltiin johtuvan puulämmityksen lisääntyneestä käytöstä omakotitaloissa silloin, kun ulkoilman lämpötilat ovat alhaisemmat.



Perjantaina 30.9. keskiarvopitoisuus oli poikkeuksellisen matala verrattuna muihin arkipäivien keskiarvopitoisuuksiin. Tähän on voinut vaikuttaa se, että keskiarvopitoisuus laskettiin 12 tunnin mittausdatasta 24 tunnin datan sijaan. Myös tiistaina 4.10. keskiarvopitoisuus oli jonkin verran matalampi verrattuna muihin arkipäiviin, mutta muiden arkipäivien tapaan kuitenkin hieman korkeampi verrattuna viikonlopun keskiarvopitoisuuksiin. Tähän on voinut vaikuttaa esimerkiksi se, että kyseisen vuorokauden aikana tuulen nopeus vaihteli välillä 1,1–5,8 m/s. Ajoittain tuuli oli siis kohtalaisen voimakasta ja se on voinut vähentää hiukkasten pitoisuutta ilmassa. Hiukkasten keskiarvopitoisuuksien ollessa matalimmillaan ilman lämpötila on ollut korkeampi, joten myöskään taloja ei ole tarvinnut lämmittää puulla ainakaan niin paljon kuin kylmempinä päivinä. Tästä johtuen myös ilman hiukkaspitoisuudet ovat pysyneet matalampina.

## Johtopäätökset

Koko 14 vuorokauden mittausjakson ajan kaikkien kokoluokkien hiukkasten ( $PM_{1,0}$ ,  $PM_{2,5}$ ,  $PM_4$ ,  $PM_{10}$ ,  $PM_{15}$ ) pitoisuudet olivat lähes samat ja niissä oli vain hyvin pieniä eroja keskenään. Ensimmäisen mittausviikon aikana hiukkasten keskiarvopitoisuudet olivat 4,7–5,0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  eli keskimääräisesti hiukkasten pitoisuus ilmassa oli alhainen. Ajoittain pitoisuudet nousivat kuitenkin korkeammiksi ja ensimmäisen viikon korkein mitattu pitoisuus oli 164  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Pitoisuudet pysyivät kohonneina pidemmän aikaa eli reilusta puolesta tunnista useampaan tuntiin.

Toisen viikon mittauksen aikana hiukkasten keskiarvopitoisuudet olivat 5,5–5,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  eli keskimääräisesti hiukkasten pitoisuus ilmassa oli alhainen mutta kuitenkin hieman korkeampi kuin ensimmäisellä mittausviikolla. Myös toisella viikolla hiukkasten pitoisuudet ilmassa nousivat ajoittain korkeiksi, ja korkein mitattu pitoisuus oli 203  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Toisella viikolla mitattiin siis koko mittausjakson korkein pitoisuus. Korkeimpien pitoisuuspiikkien osalta hiukkasten pitoisuudet olivat koholla kuitenkin vain alle 10 minuutin ajan, joten kohonneiden pitoisuuksien kesto oli huomattavasti lyhyempi verrattuna ensimmäisen viikon kohonneisiin pitoisuuksiin.

24 tunnin keskiarvopitoisuudet olivat kokonaisuudessaan varsin matalat. Korkeimmilleen pitoisuudet nousivat sunnuntaina 2.10., jolloin keskiarvopitoisuus oli noin 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Muuten keskiarvopitoisuudet olivat alle 8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .  $PM_{10}$ -hiukkasten osalta 24 tunnin keskiarvopitoisuudet olivat 1,0–10,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ja  $PM_{2,5}$ -hiukkasten osalta 0,8–10,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .  $PM_{10}$ -hiukkasten keskiarvopitoisuudet alittivat siis valtioneuvoston ilmanlaadusta antaman asetuksen raja-arvon (50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) sekä WHO:n ohjearvon (50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) selvästi.  $PM_{2,5}$ -hiukkasten pitoisuudet alittivat myös WHO:n ohjearvon (25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Keskiarvopitoisuudet olivat arkipäivinä korkeammat kuin viikonloppuna. Arkipäivinä keskiarvopitoisuudet olivat 2,9–8,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , kun taas viikonloppuna keskiarvopitoisuudet olivat 1,8–3,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Korkeampien arkipäivien keskiarvopitoisuuksien arvioitiin johtuvan todennäköisesti suuremmista liikennemääristä alueella.

Sääolosuhdetietojen mukaan koko mittausjakson aikana ei satanut vettä, joten se ei vaikuttanut hiukkaspitoisuuksiin ilmassa. Lämpötilat olivat pääsääntöisesti 0–10 asteen välillä - muutamaan otteeseen lämpötila kävi hieman pakkasen puolella. Lämpötilat olivat siis mittausjakson aikana sen verran matalia, että tulisijojen käyttö omakotitalojen lämmitykseen on ollut mahdollista. Ulkoilman lämpötilan lähtiesä laskuun hiukkaspitoisuudet kasvoivat, kun taas lämpötilojen ollessa korkeammat hiukkaspitoisuudet olivat pienemmät. Tämän arveltiin johtuvan puulämmityksen lisääntyneestä käytöstä ulkoilman lämpötilan laskiessa. Hiukkaspitoisuuksien ollessa kohonneita tuulen nopeus oli pääsääntöisesti heikkoa, kun taas hiukkaspitoisuuksien ollessa pienempiä tuuli puhalsi ainakin ajoittain voimakkaammin. Tuulen nopeudella oli siis tulosten mukaan mahdollisesti vaikutusta hiukkasten pitoisuuksiin ilmassa.

Kohonneita hiukkaspitoisuuksia ilmassa mitattiin erityisesti ilta-aikaan. Tämän arvioitiin johtuvan siitä, että ilta-aikaan on todennäköisesti poltettu puuta tulisijoissa tai lämmitetty saunaa. Ilta-aikaan liikenne on tuskin ollut synnä hiukkaspitoisuuksien nousuun, sillä liikenteestä saatujen tietojen perusteella ilta-aikaan liikenne alueella oli vähäisempää. Pientaloalueen mittauksissa hiukkaspitoisuuksien korkeimpien nousujen arvioitiin siis johtuvan pääasiassa puun pienpoltosta, eikä liikenteellä ollut kovin suurta osuutta pitoisuuksien nousuun.

## Lähteet

- Ambient (outdoor) air quality and health, 2016. World Health Organisation. WWW-dokumentti. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/>. Ei päivytystietoja. Luettu 13.10.2016.
- Hänninen, Otto ym. 2016. Ilmansaasteiden terveysvaikutukset. Ympäristöministeriön raportteja 16/2016. PDF-dokumentti. [http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/74861/YMra\\_16\\_2016.pdf?sequence=1](http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/74861/YMra_16_2016.pdf?sequence=1). Ei päivytystietoja. Luettu 28.10.2016.
- Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla vuonna 2015. Helsingin seudun ympäristöpalvelut-kuntayhtymä. PDF-dokumentti. <https://www.hsy.fi/sites/Esitteet/EsitteetKatalogi/Julkaisusarja/6-2016-Ilmanlaatu-pks-2015.pdf>. Päivitetty 17.6.2016. Luettu 28.10.2016.
- Niemi, Jarkko 2002. Kasvillisuuden vaikutus tienvarsin ilmanlaatuun. Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja C 2002:2. Helsinki: YTV:n monistamo.
- Valtioneuvoston asetus ilmanlaadusta (38/2011). PDF-dokumentti. <http://www.finlex.fi/data/sdliite/liite/5916.pdf>. Ei päivytystietoja. Luettu 11.9.2016.



# YMPÄRISTÖVAHINKOIHIN VARAUTUMISTA SAIMAALLA

*Vuokko Malk & Justiina Halonen & Arto Sormunen*

Vaarallisten aineiden kuljetukset ja varastointi aiheuttavat Saimaalla ympäristövahingon riskin, joka voi pahimmillaan aiheuttaa vakavia haittoja alueen herkälle luonnolle, virkistyskäytölle, matkailulle sekä myös laivaliikenteelle ja vesihuollolle. Öljyvahingon ei tarvitse olla iso alusöljyvahinko merellä aiheuttaakseen merkittäviä haittoja ja kustannuksia. Saimaalla rannat ovat lähellä, joten pienikin vuoto voi nopeasti liata laajoja ranta-alueita. Lisäksi virtaavat vedet aiheuttavat erityishaasteen öljyntorjunnan kannalta.

Älykö (Itä-Suomen maa-alueiden ja Saimaan vesistöalueen öljyn- ja vaarallisten aineiden varastoinnin ja kuljetusten ympäristöriskien älykäs minimointi ja torjunta) -hanke syntyi tarpeesta kehittää uusia keinoja vahinkoihin varautumiseen sekä niiden jälkihoitoon. Hankkeessa on mm. kartoitettu riskikohteet, tehty öljyn leviämismallinnuksia sekä selvitetty öljyvahinkojätteen käsittelymahdollisuuksia ja logistiikkaa. Lisäksi on kartoitettu ja testattu mittalaitteita ympäristön monitorointiin sekä tutkittu bioöljyjen ympäristökäyttämistä ja torjuntaa. Mikkelin ja Kymenlaakson ammattikorkeakoulujen yhteishanketta (1.1.2015–28.2.2017) rahoittavat Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan aluekehitysrahastosta, Öljysuojarahasto, Etelä-Savon ja Pohjois-Karjalan pelastuslaitokset, Metsäsairila Oy ja Meritaito Oy.

## **Vaarallisten aineiden kuljetusten ja varastoinnin riskikartoitus**

Öljyvahinkoja sattuu vuosittain pelkästään Itä-Suomessa parisataa Pelastusopiston Pronto-järjestelmän mukaan. Suuri osa näistä on pieniä, alle 100 litran vuotoja. Isompia, vähintään 1 000 litran vuotojakin sattuu kuitenkin vuosittain. Esimerkiksi helmikuussa 2016 pääsi ympäristöön valumaan 20 000 litraa biodieseliä säiliöauto-onnettomuuden seurauksena Luumäellä (Etelä-Saimaa 15.2.2016). Joutsenossa arviolta tuhat litraa hydrauliikkaöljyä valui Saimaaseen tehtaalta toukokuussa 2016 liaten mökkirantoja (Etelä-Saimaa 29.5.2016). Lieksassa 12 kuutiota öljyä pääsi meijerirakennuksesta Lieksanjokeen kesäkuussa 2016 (Pohjois-Karjalan pelastuslaitos 26.6.2016).

Vahinkoihin on Suomessa varauduttu lainsäädännön keinoin. Öljyvahinkojen torjuntalaki (1673/2009) velvoittaa niin viranomaisia kuin öljyä varastoivia laitoksia ja satamia laatimaan öljyntorjuntasuunnitelmia. Öljyntorjuntatilanteita varten järjestetään harjoituksia ja torjunnan tehostamiseksi on perustettu alueellisia yhteistyöryh-

miä myös Itä-Suomen alueelle. Öljyntorjuntasuunnitelmien osana on tehty riskikartoituksia, mutta Saimaan alueelle haluttiin aiempaa laajempi riskiselvitys.

Hankkeessa tehtiin laaja riskikartoitus öljyn ja muiden vaarallisten aineiden varastointiin ja kuljetuksiin liittyvistä ympäristöriskeistä. Riskejä kartoitettiin kokoamalla tietoa sattuneista onnettomuuksista sekä kuljetus- ja varastointimääristä eri viranomaisilta ja muista lähteistä. Haasteena oli, että vaarallisten aineiden kuljetusten ja varastoinnin aineistot ovat hajallaan, eivätkä tiedot aina ole ajan tasalla. Lisäksi esimerkiksi tiedot vaarallisten aineiden maantiekuljetusreiteistä perustuvat suurelta osin mallinnukseen.

Saimaan syväväylällä ei kuljeteta öljyä säiliöaluksissa, mutta laivojen polttoainesäiliöissä on kymmeniä tonneja polttoainetta, jonka vuotaminen vesistöön voi aiheuttaa tuhoa. Riskipaikat ovat tyypillisesti kapeikkoja ja virtauspaikkoja sekä kanavia. Myös syväväylän ylittävät sillat ja lossit kohottavat onnettomuusriskiä. Riskipaikoista vaarallisin on sekä arvioiden että onnettomuusmäärien perusteella Kyrönsalmen väylänkohta Savonlinnassa. Vaikeita paikkoja ovat myös Vekaransalmi Sulkavalla sekä Varkauden kaupungin lähellä olevat väyläalueet. (Häkkinen & Malk 2015)

Laivaliikenteen lisäksi merkittävä ympäristövahingon riski Saimaalla on maalta veteen tapahtuva vuoto. Vuoto voi tapahtua rannalla sijaitsevista säiliöistä tai vaarallisten aineiden maantie- tai rautatiekuljetusonnettomuuden seurauksena, kuten säiliöauton kaatuessa sillalla tai vesistön läheisyydessä. Saimaan rannan läheisyydessä sijaitsee öljysäiliöitä, joissa varastointikapasiteetti on suurimmillaan jopa kymmeniä–satojatuhsia tonneja. Säiliöautossa voi olla 50 tonnia öljyä tai kemikaalia.

Itä-Suomen alueella vaarallisia aineita kuljetetaan eniten 5-tiellä Heinolan ja Kuopion välillä sekä tiellä 15 Kouvolan ja Mikkelin välillä (200 000–400 000 tonnia/vuosi) (Kumpulainen 2013, Rönkkö & Salanne). Rautateitse vaarallisia aineita kuljetetaan eniten Jyväskylä–Pieksämäki–Kuopio–Siilinjärvi-rataosuudella (yli 500 tuhatta tonnia vuodessa vuonna 2014). Tällä reitillä kuljetetaan erityisesti luokan 8 syövyttäviä nesteitä (Liikennevirasto 2015). Vesistö- ja pohjavesiriskikohteet poimittiin kootusta aineistosta paikkatietoanalyysillä. Pisteytyksellä tunnistettiin merkittävimmät riskikohteet. Merkittävimmäksi vesistöriskikohteeksi niin maanteitse kuin rautateitse suoritettavien VAK-kuljetusten osalta nousi Kuopion Kallansillat erityisesti suurten kuljetusmäärien vuoksi. Kuopion alueella sijaitsee myös suuria öljyvarastoja rannan läheisyydessä.

## Öljyn leviämismallinnukset onnettomuusskenaarioissa

Viiteen riskikohteeseen tehtiin öljyn leviämismallinnukset kuvitteellisissa onnettomuusskenaariotilanteissa GNOME-mallinnusohjelmalla (NOAA 2014). Skenaarioissa mallinnettiin sekä kevyen että raskaan polttoöljyn vuotoa. Vuotomääräksi valittiin laivaonnettomuuksissa 10 tonnia öljyä ja maalta veteen tapahtuvissa vuodoissa 20 tonnia öljy-vesiseosta. Ajankohdaksi valittiin useimmiten kevät, jolloin virtaukset ovat suurimmillaan. Kuuden tunnin aikana öljy leviäisi ilman tuulen vaikutusta eri skenaari-

oissa noin 2,1–3,8 km etäisyydelle päästölähteestä (Häkkinen 2016). Mallinuksissa kokeiltiin myös eri tuulensuuntia ja -nopeuksia. Tuuli voi hidastaa tai nopeuttaa kulkeutumista, ja tuulella on myös merkittävä vaikutus alavirtauksen suunnassa, minne öljy rantautuu. Rantaviivaa altistuu skenaarioissa keskimäärin noin 30 km.

Kuudentena onnettomuusskenaariona mallinnettiin pyrolyysiöljyvuoto (27 m<sup>3</sup>) maaperään pohjavesialueella. Kulkeutuminen arvioitiin HMTECM-mallilla (Yoon ym. 2009, Marruffo 2012) sekä Halmemiehen ym. (2003) esittämien laskukaavojen mukaan. Hiekassa pyrolyysiöljy saavuttaisi 5 metrin syvyydessä olevan pohjaveden 24–48 tunnissa, kun dieselillä pohjaveteen kulkeutuminen kestäisi 18–33 tuntia. Karkeassa hiekassa tai sorassa kulkeutuminen on huomattavasti nopeampaa. Pyrolyysiöljy (bioöljy) on kuitenkin monimutkainen seos, ja sen ympäristökäyttäytymistä on kuvattu tarkemmin biopolttoaineiden öljyntorjuntaa käsittelevässä kappaleessa.

## **Haitta-aineiden ja maaperän ominaisuuksien vaikutus ympäristöriskiin**

Riskinarvioinnin kannalta oleellista on pystyä tunnistamaan pitoisuudet tai osuudet, jotka ovat esimerkiksi vaarantamassa pohjavesien tilaa. Toisin sanoen kokonaispitoisuus tai perinteinen raja-arvovertailu (ohjearvo) ei kerro todellisesta kulkeutumis- tai altistumisriskistä kovinkaan paljoa. Yhdisteen pidättyminen maa-ainekseen vähentää sen liikkuvuutta, vapautumista ja kertymistä eliöihin eli ekologista riskiä. Mikäli luotettavaa riskinarviointia ei pystytä toteuttamaan, voidaan ympäristöriskien hallintakeinot mitoittaa ja kohdistaa väärin.

Öljyt ovat useista erilaisista yhdisteistä koostuvia seoksia. Sekä yhdisteiden ominaisuudet (esim. rasvaliukoisuus) että maaperän ominaisuudet (esim. orgaanisen aineen määrä ja raekoko) vaikuttavat kulkeutumisriskiin. Malliaineiden (bentso(a)pyreeni, fenantreeni ja naftaleeni) käyttäytymistä kahdessa erilaisessa suomalaisessa maalajissa tutkittiin laboratoriossa. Tutkimusmenetelmänä käytettiin Tenax–hartsuuttomenetelmää. Yhdisteiden kulkeutuvuutta maa-aineksesta nestefaasiin seurattiin tietyllä ajanjaksolla. Kolmesta tutkitusta PAH-yhdisteestä bentso(a)pyreeni oli sitoutunut tiukemmin maa-ainekseen, kun taas helpoiten kulkeutuvin oli naftaleeni. Tulosten avulla voidaan paremmin ennustaa riskejä, jotka perustuvat nopeiden fraktioiden vapautumiseen maa-aineksesta. (Tanskanen 2016)

## **Biopolttoaineet öljyntorjunnan näkökulmasta**

Biopolttoaineiden käyttö liikenteen polttoaineissa, lämmityksessä ja kemianteollisuudessa on kasvanut ja erilaisia tuotteita on tullut markkinoille viime vuosina runsaasti. Samalla myös biopolttoainevahingon riski kasvaa. Biopolttoaineiden käyttäytymistä ympäristössä sekä torjuntaa vahinkotilanteessa selvitettiin kirjallisuusselvityksen ja demonstraatiokokeiden avulla.

Bioöljyjen ja -polttoaineiden käyttäytymistä ympäristössä ja torjuntaa vahinkotilanteessa on toistaiseksi tutkittu vielä vähän. Uusiutuvista raaka-aineista valmistetaan mm. biodieseliä, uusiutuvaa dieseliä ja pyrolyysiöljyä. Eri tuotteiden välillä on suurta vaihtelua sekä raaka-aineissa, valmistustavassa että ominaisuuksissa. Osa tuotteista, kuten uusiutuva diesel, on kemialliselta koostumukseltaan ja fysikaalisilta ominaisuuksiltaan lähes fossiilisen dieselin kaltaista. Demonstraatiokokeissa havaittiin vain pieniä eroja käyttäytymisessä fossiiliseen dieseliin verrattuna.

Bioöljy eli pyrolyysiöljy taas poikkeaa ominaisuuksiltaan huomattavasti perinteisistä öljytuotteista. Se on vettä tiheämpää eli painuu vedessä pohjaan (kuva 1). Pyrolyysiöljy myös sisältää merkittävän osan vettä ja vesiliukoisia yhdisteitä, jotka jakautuvat vahinkotilanteessa veteen. Maaperädemonstraatiokokeessa veteen liukenematon osuus pidiä pintaamaan, mutta vesiliukoinen osuus kulkeutui veden mukana helposti maapatsaan läpi, jolloin se voi aiheuttaa pohjavesiriskin (Zhaurova 2016). Pyrolyysiöljyn pH on alhainen, eli se laskee myös ympäristön pH-arvoa laimennussuhteesta riippuen. Pyrolyysiöljy haihtuu alussa esimerkiksi dieseliä voimakkaammin, mutta laboratoriokokeissa vain noin 30 % siitä haihtui normaalilämpötilassa. Pyrolyysiöljy on kirjallisuuden mukaan suhteellisen helposti biohajoavaa, mutta eri faasien biohajoamisesta erilaisissa ympäristön olosuhteissa, kuten pohjavedessä, ja vaikutuksista ympäristössä ei vielä ole juurikaan tutkimustietoa olemassa.

Biopolttoaineista myös bioetanoli on täysin veteen liukeneva, eikä se kellu veden pinnalla kuten perinteiset öljytuotteet. Kirjallisuuden mukaan etanolin nopea biohajoaminen voi aiheuttaa ympäristössä hapettomuutta. Lisäksi etanoli-bensiiniseoksissa etanoli voi joissain tapauksissa lisätä bensiinihiilivetyjen kulketumista esimerkiksi pohjavedessä. (ITRC 2011)



**KUVA 1. Bioöljyvuodon vaikutuksia ympäristössä demonstroitiin laboratoriossa. Esimerkiksi pyrolyysiöljy osittain liukeni ja osittain painui pohjaan järvivedessä (kuva Vuokko Malk).**

Uusi tieto bioöljyn käyttäytymisestä ja torjunnasta vahinkotilanteessa koettiin tärkeäksi erityisesti Itä-Suomen näkökulmasta alueella olemassa olevan ja suunnitteilla olevien bioöljyjalostamoiden vuoksi. Hankkeessa tehdään vielä demonstraatiokokeita öljyntorjuntavälineiden ja materiaalien soveltuvuudesta bioöljyn ja -polttoaineiden torjuntaan.

## Öljyvahinkojätteen käsittely Itä-Suomessa

Öljyvahingon torjunnassa ja ympäristön kunnostamisessa syntyy huomattava määrä öljyvahinkojätettä. Öljyvahinkojäte voi olla öljy-vesiseosta, pilaantuneita maa-aineksia tai kiinteää öljyjätettä, kuten öljypuomeja ja suojarusteita. Jättemäärä on moninkertainen vuotaneeseen öljymäärään verrattuna. ELSU-työryhmän (Etelä- ja Länsi-Suomen jätesuunnittelu ja jätehuolto poikkeuksellisissa tilanteissa) arvion mukaan merellä tapahtuva 30 000 tonnin öljyvuoto rantaan ajautuessaan tuottaisi jätettä noin 540 000 tonnia (Asikainen 2009, 94). Myös sisävesialueilla öljyvahingosta seuraava jättemäärä voi olla merkittävä. ELSU-työryhmän kertoimia käyttäen 30–300 tonnin öljyvuodosta voi seurata noin 550–6 000 tonnin vahinkojättemäärä. Tämä voi tarkoittaa satoja kuorma-autolasteja jätettä, jolloin eduksi on, mitä lähempänä jäte voidaan käsitellä.

Öljyvahinkojätteen käsittelymahdollisuudet Itä-Suomessa ja lähialueilla kartoitettiin haastattelemalla jätekeskusten edustajia puhelimitse. Itä-Suomen alueella öljyllä pilaantuneita maita ottaa tällä hetkellä vastaan kymmenen jätekeskusta/toimijaa. Lievästi pilaantuneet maat (öljypitoisuus <2 500 mg/kg) loppusijoitetaan yleensä suoraan tavanomaisen jätteen kaatopaikoille tai hyötykäytetään kaatopaikan rakenteissa. Voimakkaammin pilaantuneet maat käsitellään pääosin kompostoimalla tai loppusijoitetaan vaarallisen jätteen kaatopaikalle. Käsittelykapasiteetit vaihtelevat kymmenistä tonneista kymmeniintuhansiin tonneihin.

Öljyisen veden käsittelymahdollisuuksia on Itä-Suomessa selvästi vähemmän kuin pilaantuneiden maiden vastaanottopaikkoja. Melko monet jätekeskukset ottavat vastaan nestemäistä jätettä, kuten öljynerotuskaivolietteitä, mutta öljyisiä vesiä ottaa vastaan ja käsittelee vain muutama toimija. Öljy-vesiseoksia käsitellään alueella ultra-suodattamalla, kemiallisesti sakkauttamalla ja mekaanisesti erottamalla. Vastaanotto-kapasiteetti vaihtelee kymmenistä kuutioista muutamiin satoihin kuutioihin.

Kiinteä öljyjäte on vaarallista jätettä, joka voidaan käsitellä vain polttamalla vaarallisen jätteen käsittelylaitoksessa. Itä-Suomessa ei ole käsittelymahdollisuutta kiinteälle öljyjätteelle.

Erityisesti kiinteää öljyjätettä ja öljy-vesiseoksia joudutaan siis usein kuljettamaan Itä-Suomen ulkopuolelle käsiteltäväksi. Myös hyvin voimakkaasti pilaantuneita maita on kuljetettu vaarallisen jätteen käsittelylaitokseen polttoon. Hankkeessa tehtyjen kustannusarvioiden mukaan esimerkiksi 2 000 tonnin voimakkaasti pilaantuneen maan



käsittely Itä-Suomen alueella maksaa vastaanotto paikasta riippuen noin 160 000–490 000 euroa. Jättemäärän kuljettaminen 400 km päähän maksaa karkeiden laskelmien mukaan yli 100 000 euroa. Kustannustiedot ovat viitteellisiä. Jätekeskusten käsittelykapasiteetti ja kannattavin käsittelytapa vahinkohetkellä ratkaisevat kustannukset ja kuljetusten tarpeen.

## Vaihtoehtoja öljyvahinkojätteen käsittelyyn

Hankkeessa arvioitiin kolmen käsittelymenetelmän (geotuubi, poltto alueellisessa voimalaitoksessa ja siirrettävä polttolaitteisto) toimivuutta vahinkojätteen paikallisessa käsittelyssä verrattuna vaihtoehtoon, jossa jäte kuljetetaan muualle käsiteltäväksi. Tarkoituksena oli selvittää, voisiko näillä menetelmillä lisätä öljyvahinkojätteen alueellista käsittelykapasiteettia ja olisiko se teknisesti ja taloudellisesti kannattavaa.

Geotuubi on lietteiden käsittelyyn kehitetty menetelmä, jolla lietteitä voidaan kuivata ja kiintoaine saadaan erotettua vedestä. Liette pumpataan geotekstiilisäkkiin. Kiintoaine pidättyy säkin sisälle ja vesi suotautuu säkistä ulos. Kiintoaineen erottumista voidaan edistää polymeerien avulla. Geotuubia on Suomessa hyödynnetty öljyisten teollisuuslietteiden käsittelyssä. Lisäksi esimerkiksi Metsäsairilan jäteasemalla Mikkelissä geotuubia käytetään muiden nestemäisten jätteiden ohella öljynerotuslietteiden käsittelyssä.

Geotuubiin pumpattavan lietteen ja läpisuotautuneen veden öljypitoisuuksia tutkittiin Metsäsairilan jäteasemalla (kuva 2), sillä pitoisuustietoja öljyn pidättymisestä geotuubiin on vain vähän saatavilla. Näytteistä analysoitiin öljyhiilivetyypitoisuudet kaasukromatografisesti akkreditoidussa laboratoriossa (ALS Finland). Mikkelin ammattikorkeakoulun ympäristölaboratoriossa näytteistä määritettiin mm. kiintoaine. Kiintoainepitoisuus laski geotuubikäsitelyssä noin 92 %, mutta geotuubin läpi suotautuneessa vedessä oli edelleen havaittavissa öljyfaasi. Öljypitoisuus (>C10–C40) oli 17–21 mg/l. Lietenäytteestä öljyhiilivetyanalyysiä ei pystytty suuren öljypitoisuuden vuoksi suorittamaan.



**KUVA 2. Näytteen keräys geotuubin läpi suotautuvasta vedestä Metsäsairilan jäteasemalla (kuva Vuokko Malk)**

Tutkimukset osoittivat, että vaikka geotuubi pystyy pidättämään merkittävän osan kiintoaineesta ja myös öljyistä, pitoisuudet läpisuotautuneessa vedessä olivat edelleen korkeat. Geotuubi voi siis olla edullinen ja toimiva menetelmä lietteiden käsittelyssä, mutta öljyisten lietteiden tapauksessa läpisuotautunut vesi tarvitsee jatkokäsittelyn esimerkiksi jäteaseman vesienkäsittelyssä. Polymeerin valinnalla voi olla merkittävä rooli läpisuotautuneen veden laadussa. Geotuubin toimittaja testaa ja valitsee sopivan polymeerin käyttökohteen mukaan (Isokauppila 2016).

Siirrettävä polttolaitteisto (termodesorptiolaitteisto) on pilaantuneiden maa-ainesten käsittelyyn tarkoitettu laitteisto, joka voidaan kuljettaa paikan päälle pilaantuneeseen kohteeseen. Siirrettävä polttolaitteisto soveltuu erityisesti isojen jätemäärien käsittelyyn. Pilaantunutta maata on oltava 25 000–30 000 tonnia, jotta laitteisto kannattaa siirtää puhdistettavaan kohteeseen (Uotila 2015). Näin suuri jätemäärä ei ole Saimaalla tapahtuvassa öljyvahingossa kovinkaan todennäköinen.

Joissain tapauksissa kiinteää öljyvahinkojätettä, esim. imeytysmateriaaleja tai vedestä kerättyä öljyä, voisi teknisesti käyttää polttoaineena alueellisessa voimalaitoksessa. Jätteen polttaminen vaatii kuitenkin ympäristöluvan ja luvassa on eriteltävä jäteluokat, joita laitoksessa saa polttaa. Itä-Suomessa Riikinvoiman uudella ekovoimalaitoksella olisi luvan mukaan mahdollisuus polttaa pieniä määriä öljyllä nuhraantuneita jätteitä. Käytännössä öljy voi kuitenkin aiheuttaa ongelman jätteen esikäsittelyssä ja hihnakuljettimissa (Vepsäläinen 2016).

Käytännössä tehokkainta öljyvahinkojätteen kustannusten ja ympäristövaikutusten minimoinnissa on pyrkiä minimoimaan jätteen määrä. Öljy-vesiseoksessa ylimääräinen vesi lisää nopeasti jätteen määrää ja käsittelykustannuksia. Öljyä voidaan kerätä

vedestä harjakeräimillä sekä siirrettävillä öljynerottimilla tai imeyttämällä imetysmattoihin tai -puomeihin. Pilaantuneet maa-ainekset kannattaa lajitella pilaantuneisuuden mukaan. Lievästi pilaantuneet maat voidaan hyödyntää esimerkiksi kaatopaikkojen rakenteissa.

## Ympäristön monitorointi

Vahinkotilanteessa tarvitaan tietoa haitta-aineiden pitoisuuksista ympäristössä, jotta vahingon laajuutta ja ympäristö- ja terveysriskejä voidaan arvioida. Ympäristön monitorointia tarvitaan myös tarvittavien torjunta- ja kunnostustoimenpiteiden arviointiin.

Öljihiilivedyt analysoidaan perinteisesti laboratorioissa kaasukromatografisesti. Laboratorioanalyysit ovat kohtuullisen kalliita ja aikaa vieviä. Erilaisilla pikamittaus- ja online-mittareilla pitoisuustietoja voidaan saada nopeammin ja laajemmalta alueelta.

Öljypitoisuuden monitorointiin soveltuvia pikamittausmenetelmiä kartoitettiin keräämällä tietoa laitteiden valmistajilta ja jälleenmyyjiltä. Lisäksi Metsäsairilan jäteasemalla seurattiin öljyllä pilaantuneiden maiden kompostointia vertaamalla pikamittareilla saatuja tuloksia ulkopuolisessa akkreditoitussa laboratorioissa teetettyihin analyyseihin. Käytössä olivat PetroFLAG-testi maaperänäytteille, PhoCheck Tiger PiD -mittari haihtuville orgaanisille yhdisteille (VOC) sekä InfraCal 2 ATR-SP -analyyssaattori, jolla öljypitoisuus voidaan määrittää sekä maasta että vedestä.

Sekä PetroFLAG-testin että InfraCal-analyyssaattorin tulokset erosivat osassa näytteistä huomattavasti laboratorioanalyysien tuloksista. Vaihtelu voi johtua sekä maatyypistä että öljyn laadusta. Myös näytteiden käsittely ja laitteiden kalibrointialueet voivat vaikuttaa tuloksiin. Pikatestit antavat kuitenkin melko luotettavan arvion siitä, onko maa esimerkiksi lievästi vai voimakkaasti öljyllä pilaantunut. Vain kahdessa–kolmessa näytteessä 30:stä PetroFLAG- tai InfraCal-mittarilla saatu arvio olisi ollut väärä, jos pitoisuusrajana käytetään 2 000:ta mg/kg.

PiD-mittarilla mitatut VOC-pitoisuudet olivat suurimpia näytteissä, joissa laboratorioanalyysien mukaan oli suurimmat >C10–C40-pitoisuudet. Laboratorioanalyysissä haihtuvien C5–C10-öljihiilivetyjen pitoisuus oli kaikissa näytteissä alle määrittämissä rajoissa.

InfraCal-analyyssaattorin etuna on, että sillä voidaan helposti analysoida öljypitoisuus maanäytteiden lisäksi vesinäytteistä. Tällaisia analyyssaattoreita ei vielä ole Suomessa juuri käytössä. Geotuubin läpi suotautuneesta vedestä tehdyissä analyyseissä InfraCal-analyyssaattorilla määritetyt pitoisuudet (17–27 mg/l) olivat hyvin lähellä laboratorioissa määritettyjä >C10–C40-pitoisuuksia (17–21 mg/l). InfraCal-analyyssaattorin määrittämissä rajoissa vesinäytteille on 1 mg/l.

Öljypitoisuuksien analysoimiseen ympäristöstä on kehitetty myös erilaisia online-antureita (esim. EHP-OIL), jotka voidaan kiinnittää esimerkiksi poijuun ja jotka lähettävät pitoisuustietoja jatkuvatoimisesti pilvipalveluun. Lisäksi on olemassa myös käsikäyttöisiä mittareita (esim. Advanced Sensors HD1000), jotka antavat pitoisuustiedon, kun anturi kastetaan veteen. Tällaiset anturit voisivat toimia hyvin ympäristövahingon jälkimonitoroinnissa, mutta laitteet ovat kohtuullisen kalliita, eikä näitä laitteita päästy käytännössä hankkeessa testaamaan.

Öljypitoisuuden lisäksi vahinkotilanteessa voidaan hyödyntää online-virtausmittareita ja sääasemia, jotka auttavat öljyn leviämisen ennustamisessa. Online-antureita voidaan käyttää myös esimerkiksi veden happipitoisuuden seurannassa. Kirjallisuuden perusteella esimerkiksi bioetanoli on hyvin nopeasti biohajoavaa ja tämän seurauksena biopolttoainevahingossa riskinä voi olla nopea hapenkulutus ja happikato. Happipitoisuutta voidaan seurata esim. YSI-anturilla.

## Toimintamalleja ja äly-sovelluksia

Suurissa öljyvahingoissa jätteen kuljetusten ja välivarastoinnin seuranta voi olla haasteellista. Välivarastointipaikkoja voi olla useita etäällä toisistaan ja eri jäte-erät käsitellään eri paikoissa. Logistinen ketju voi olla moniportainen. Vahinkojätteen keräämisen, kuljetusten, varastoinnin ja käsittelyyn toimittamisen seurantaan tulisi olla käytettävissä sähköinen dokumentointi- ja seurantajärjestelmä, joka olisi nopeasti käyttöönotettavissa. Hankkeessa selvitetään, minkälainen sähköinen järjestelmä öljyvahinkojätteen seurantaan olisi mahdollista kehittää eri toimijoiden tarpeet sekä tekniikan mahdollisuudet huomioiden.

Edellä kuvattujen selvitysten lisäksi hankkeessa kehitetään alusten miehistön ensi-toimenpiteitä onnettomuustilanteessa mm. selvittämällä keinoja öljyvudon havaitsemisen nopeuttamiseksi sekä vudon rajoittamiseksi haverialukselta käsin. Lisäksi luodaan toimintamalli teollisuuden vesilaitoksen toimintaan öljyonnettomuustilanteessa.

## Lähteet

Asikainen, Asta 2009. Merialueilla tapahtuva öljyalusonnettomuus. ELSU-raportin luonnos. Kaakkois-Suomen ympäristökeskuksen raportteja 2009. Saatavissa osoitteessa [www.ymparisto.fi/elsu](http://www.ymparisto.fi/elsu)

Etelä-Saimaa 15.2.2016. Säiliörekka kaatui valtatie 26:lla Luumäen ja Kouvolan rajalla — tie suljettu liikenteeltä, henkilöautoille kiertotie.

Etelä-Saimaa 29.5.2016. Mahdoton tapahtui Joutsenon Kolarinlahdella — ”Isoilta vahingoilta vältyttiin nopeiden toimien ansiosta”.

- Halmemies S, Gröndahl S, Nenonen K, Tuhkanen T 2003. Estimation of the Time Periods and Processes for Penetration of Selected Spilled Oils and Fuels in Different Soils in the Laboratory. *Spill Science & Technology Bulletin* 8(5–6): 451–465.
- Häkkinen, Anu 2015. Puhelinkeskustelu 22.6.2015. Johtava asiantuntija. Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi.
- Häkkinen, Jouni-Juhani 2016. Älykö-hankkeessa tehdyt Saimaan alueen öljyn leviämismallinnukset. Tutkimusraportti 28.4.2016. Ei vielä julkaistu.
- Häkkinen, Jouni-Juhani & Malk, Vuokko 2015. Vaarallisten aineiden kuljetusten ja varastoinnin riskikohteet Saimaalla ja Itä-Suomessa. Teoksessa Soininen, H. & Dufva, K. & Kontinen, K. (toim.) *Materiaalit ja ympäristöturvallisuus; Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä*. Vuosijulkaisu 2015. Mikkelin ammattikorkeakoulu. ISBN: 978-951-588-533-3
- Isokauppila, Vesa 2016. Sähköpostikeskustelu 13.–30.6.2016. Projektipäällikkö/Työpäällikkö. Sito Rakennuttajat Oy.
- ITRC (The Interstate Technology & Regulatory Council) 2011. *Biofuels: Release Prevention, Environmental Behavior and Remediation*. BIOFUELS-1. The Interstate Technology & Regulatory Council, Biofuels Team. Washington D.C.
- Kumpulainen, A., Rynänen, E., Oja, L., Sorasahi, H., Raivio, T ja Gilbert, Y. 2013. Vaarallisten aineiden kuljetukset 2012. *Trafin julkaisuja 20/2013*. ISSN 1799-0157.
- Liikennevirasto 2015. Vaarallisten aineiden kuljetukset Suomen rataverkolla vuonna 2014.
- Marruffo A, Yoon H, Schaeffer DJ, Barkan CPL, Saat MR, Werth CJ 2011. NAPL Source zone Depletion Model and Its Application to Railroad-Tank-Car Spills. *Ground Water* 1-6.
- NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration 2014. GNOME 1.3.9 (General NOAA Operational Modeling Environment)-mallinnusohjelma. Saatavissa: <http://response.restoration.noaa.gov/gnome>. Viitattu 29.3.2016.
- Pohjois-Karjalan pelastuslaitos. Tiedote 26.6.2016.
- Rönkkö, S. & Salanne, I. (ei vuosilukua). Vaarallisten aineiden tiekuljetusreitit välillä Heinola-Kuopio. Sito Oy. Pohjois-Savon ELY-keskuksen teettämä selvitys (ei julkinen).
- Tanskanen, Maija 2016: PAH-yhdisteiden käyttäytyminen maaperässä. Opinnäytetyö, Ympäristöteknologia. Mikkelin ammattikorkeakoulu.
- Uotila, Jussi 2015. Puhelinkeskustelu 21.10.2015. Tekninen johtaja. Savaterra Oy.

Vepsäläinen, Jarmo 2016. Sähköpostikeskustelu 30.6.2016. Toimitusjohtaja. Keski-Savon Jätehuolto liikelaitoskuntayhtymä.

Yoon H, Werth CJ, Barkan CPL, Schaeffer DJ, Anand P 2009. An environmental screening model to assess the consequences to soil and groundwater from railroad-tank-car spills of light non-aqueous phase liquids. *Journal of Hazardous Materials* 165: 332–344.

Zhaurova, Mariia 2016: Biofuels behavior in soil. Bachelor's thesis, Environmental engineering. Mikkelin University of Applied Sciences.



# MAMK, LUT JA YRITYKSET KEHITTÄVÄT KANSAINVÄLISIÄ RATKAISUJA JÄTEVEDENKÄSITTELYYN

*Yrjö Hiltunen & Hanne Soininen & Heikki Särkkä & Mika Sillanpää & Jyri Koivisto*

Uuden sukupolven jätevedenkäsittelyn ratkaisut vastaamaan vuoden 2050 vaatimuksia (Smart Effluents) -projektin tavoitteena on kehittää ratkaisu, jolla pystytään tulevaisuudessa vastaamaan jäteveden käsittelyn vaatimuksiin. Tarkoituksena on, että kehitystyön tulokset on otettavissa laajalti käyttöön niin kotimaassa kuin ulkomailla.

Tulevaisuudessa jätevesilaitosten tulee ratkaista lainsäädännön asettamat kasvavat vaatimukset muun muassa vesistöön kulkeutuvien lääkeainejäämien ja ravinteiden osalta. Hankkeessa tutkitaan kokonaisvaltaista jätevedenpuhdistusta kalvobioreaktorilla ja lietteiden käsittelyä kuivamädätykseen pohjautuvalla biokaasuteknologialla.

Hankkeen toteuttajia ovat Mikkelin ammattikorkeakoulu ja Lappeenrannan teknillisen yliopiston Vihreän kemian laboratorio. Hankekokonaisuuden yritysryhmän muodostavat Aquazone Oy, BioGTS Oy, Metsäsairila Oy, Mikkelin vesilaitos ja Mipro Oy. Hanke saa rahoitusta Tekesin ohjelmasta *Green Growth – Tie kestävään talouteen 2011–2015*.

## **Tutkimusta, uusia laitteita ja digitalisaation hyödyntämistä**

Mikkelin ammattikorkeakoulu (Mamk) vastaa tutkimuksessa mallintamisesta. Tarkoituksena on tuottaa jätevedenkäsittelyprosessia kuvaavaa dataa, jonka perusteella prosessia voidaan vertailla ja kehittää analyyttisesti. Toisena tärkeänä tutkimusaiheena on lietteenkäsittely ja prosessiin syötettävien orgaanisten sivuainevirtojen optimointi biokaasuprosessissa. Lisäksi tehdään laboratorio- ja pilot-mittakaavan kokeita (kuva 1).





**KUVA 1. Mamkissa tehdään laboratoriomittakaavan biokaasukokeita (kuva Manu Eloaho)**

Lappeenrannan teknillisen yliopiston (LUT) Vihreän kemian laboratorion tutkimusosiossa tutkitaan pilottimittakaavan kalvobioreaktorin käyttöä jäteveden ja lietteen käsittelyssä. Puhdistustuloksia verrataan perinteisillä tekniikoilla saatuihin tuloksiin. Käsittelyn aikana syntyneen lietteen kemialliset ja mikrobiologiset ominaisuudet tutkitaan, jotta voidaan selvittää lietteen hyödyntämisen mahdollisuudet esimerkiksi lannoitteena.

## **Yhteistyössä yritysten kanssa**

Smart Effluents -hankekokonaisuus on lähtenyt liikkeelle yrityskentän tarpeista kehittämään jätevedenpuhdistusta uudelle kestävästä kehityksen mukaiselle tasolle, ja ne muodostavat hankkeen potentiaalisen hyödyntäjäjoukon. Hankekokonaisuus edistää yritysten osaamisen kasvua cleantechiin liittyen ja lisää yhteistyötä yritysten ja tutkimusorganisaatioiden kesken kehittämällä uuden sukupolven jätevedenkäsittelyn ratkaisuja. Lisäksi yritysten tutkimushankkeet edistävät kansainvälisen kilpailukyyn kasvua.

Yrityshankkeiden osioissa kehitetään uusia laitteistoja, menettelytapoja, toimintakonsepteja ja teollisen internetin ratkaisuja kansainvälisille markkinoille. Projektista hyötyvät myös jätevedenpuhdistustekniikkaa kehittävät ja käyttävät yritykset.

## **Case - Aquazone Oy**

Smart effluents -hankkeessa yrityspartnerina mukana oleva Aquazone Oy on rakentamassa Mikkelin Kenkäveronniemeen kalvobioreaktoritekniikkaa (MBR) hyödyntävää koelaitosta, joka simuloi Mikkelin Metsäsairilaan tulevaa uutta jätevedenpuhdistamoa ennen sen valmistumista. Tavoitteena on samankaltainen jätevedenkäsittelyprosessi, jossa ajotapoja sekä prosessien optimointeja voidaan harjoitella jo ennen puhdistamon käyttöönottoa. Aquazone Oy:n MBR-pilottia voidaan käyttää laitoshenkilökunnan ennakkokoulutuksen lisäksi myös opiskelijoiden koulutukseen.

(vrt. Tukholman Hammarby Sjöstadverket, <http://sjostad.ivl.se/> ja Saksassa Seelscheidin MBR-tutkimuskeskus, <http://www.simas.de/>), ja se toimii Metsäsairilan pääpuhdistamoon rakennettavan Green Line -tutkimuskeskuksen esiasteena.

Aquazonen MBR-pilottilaitos sisältää kaikki puhdistamon prosessivaiheet esikäsittelystä lietteen kuivaukseen ja haitta-aineiden poistamiseen sekä juomaveden valmistukseen. Tietojemme mukaan vastaavaa koelaitosta ei ole rakennettu missään aiemmin. Se pystyy käsittelemään maksimissaan 200 m<sup>3</sup> jätevettä päivässä. Ympäristö on autenttinen ja kokoluokka niin suuri (AVL 1200), että MBR-prosessi ja mikrobiotominta on samanlaista kuin pääprosessissakin, jolloin puhdistustulosten oletetaan olevan mahdollisimman vertailukelpoisia. Nykyiselle Kenkäveronniemen laitokselle parhaillaan valmistuva MBR-koelaitos valmistuu ja se otetaan käyttöön syksyn 2016 aikana. Laitoksen rakentaminen on työllistänyt merkittävän määrän paikkakunnan yrityksiä. Laitoksella valmistetaan jätevedestä kastelu-, prosessi- ja juomavettä kotimaisia ja kansainvälisiä markkinoita ajatellen. Pilotointi kestää niin pitkään kuin Kenkäveronniemen imuautohalli on pystyssä, eli arviolta noin seitsemän vuoden ajan, minkä jälkeen laitteisto on siirrettävissä Green Line -tutkimuskeskukseen.

Hyvin harvoilla yrityksillä on minkäänlaista tutkimusympäristöä, jossa ne pääsisivät testaamaan laitteistojaan. Hankkeeseen osallistuvat yritykset toimittavat tutkimuskeskukseen esittelylaitteistoja ja osaamistaan markkinointi- sekä tutkimusmielessä. Esimerkiksi monissa MBR-tutkimushankkeissa mukana ollut Alfa Laval ei ole päässyt testaamaan viimeisimpiä optimointiratkaisujaan, koska vaikutuksia koko prosessiin ei ole voitu osoittaa. Nyt voidaan, ja siksi he ovatkin toimittaneet kalliita laitteistojaan Tanskasta ja voivat mainostaa Mikkelin MBR-tutkimuskeskusta ikään kuin omana testiympäristönään. Hankkeeseen pyritään saamaan vain yksi kunkin toimialansa laiteoimittaja, jotta keskinäinen kilpailu ei häiritsisi hanketta. Yritykset ja julkinen sektori saavat käyttöönsä hankkeessa tehtyjen julkisten sekä yksityisten tutkimusten tuloksia ja niiden tuomaa näkyvyyttä.

Yritysvetoisen hankkeen eteneminen on ripeää ja kustannustehokasta, ja sillä on selkeä päämäärä. Aquazone Oy näkee MBR-prosessin yhtenä potentiaalisimmista jätevedenpuhdistamoiden kehittämismahdollisuuksista, ja tavoitteena on rakentaa tutkimuskehitystä ja markkinointia varten referenssilaitos, jossa suomalaisten vesialan yritysten osaaminen pääsee esille. Hankkeen aikana syntyneiden yhteistyökuvioiden toivotaan parantavan mahdollisuuksia suomalaisten kuntien ja yritysten yhteistyöhön sekä vesiosaamisen vientiin ulkomaille, jotta päästäisi yrityskonsortioilla mukaan hankkeisiin, joihin Suomesta ei ole toistaiseksi löytynyt riittäviä resursseja.



# ERILAISTEN JÄTEVEDENPUHDISTUS- MENETELMIEN ARVIOINTI JA VERTAILU

*Heikki Särkkä*

Mikkelin ammattikorkeakoulu toteuttaa Tekesin rahoittamaa Smart Effluents -hanketta, jossa on tavoitteena kehittää uusi kokonaisvaltainen jätevedenkäsittelyn prosessi tulevan sukupolven tarpeisiin. Tämä artikkeli liittyy hankkeen työpakettiin, jossa vertaillaan erilaisia käytössä olevia puhdistustekniikoita. Hankkeen muita toteuttajia ovat Lappeenrannan teknillisen yliopiston Vihreän kemian laboratorio, ja hankekokonaisuuden yritysryhmän muodostavat Aquazone Oy, BioGTS Oy, Metsäsairila Oy, Mikkelin vesilaitos ja Mipro Oy. Hanke saa rahoitusta Tekesin ohjelmasta *Green Growth – Tie kestävään talouteen 2011–2015*.

## Johdanto

Jätevesien käsittely on yksi tärkeimmistä prosesseista vesien- ja ympäristönsuojelussa. Nykyään vaatimukset tiukentuvat koko ajan esimerkiksi EU:n asettamien uusien direktiivien myötä. Tavoitteena jätevesien puhdistuksessa pidetään yleensä sitä, että käsitellyn veden laatu vastaisi luonnossa olevan veden laatua. Erityisesti jäteveden sisältämän typen vähentäminen on tulevaisuuden suurimpia haasteita, vaikka sen poistoteho onkin viime vuosina keskimääräisesti parantunut.

Nykyiset vedenpuhdistusmenetelmät ovat olleet käytössä jo vuosikymmenien ajan. Ne ovat olleet tehokkaita ja täyttäneet puhdistustuloksille asetetut vaatimukset tähän päivään saakka. Viime vuosina on kuitenkin kiinnitetty enemmän huomiota eräiden vaikeasti hajoavien orgaanisten yhdisteiden kohtaloon puhdistusketjussa. Nämä yhdisteet ovat päätyneet vielä suoraan vesistöihin, mutta nyt niiden pääsyä niihin ollaan rajoittamassa ja raja-arvoja tiukentamassa. Erityisesti on tärkeää selvittää yhdyskuntajätevesien käsittelyn tehostamisen varteenotettavimpia menetelmiä ja niiden soveltuvuutta suomalaisiin jätevedenpuhdistamoihin.

Ennen kehittyneiden jätevedenkäsittelytekniikoiden soveltamista laajasti ja laitosmittakaavassa tarvitaan lisää suuren mittakaavan tutkimuksia, mallinnusta ja kokemuksia sekä eri tekniikoiden kustannustehokkuuden, puhdistustehon ja taloudellisuuden vertailua. Riittäväällä taustatutkimuksella uudet tekniikat ovat otettavissa laajempaan käyttöön ja ne voivat edustaa parasta käyttökelpoista tekniikkaa, mikäli niillä osoitetaan saavutettavan vaadittavat puhdistustulokset.

## Mekaaniset menetelmät

Mekaanisella jäteveden käsittelyllä tarkoitetaan kiintoaineen ja nesteen erottamista toisistaan joko siivilöimällä, selkeyttämällä tai suodattamalla (Kinnunen 2013). Välipäys on usein jäteveden puhdistuksen ensimmäinen mekaaninen yksikköprosessi. Siinä jätevedestä erotetaan kaikkein karkein kiintoaine eräänlaisella siivilällä. Seuraava mekaaninen puhdistusprosessi on yleensä rasvan ja hiekan erotus, jonka tehtävänä on ehkäistä kyseisten aineiden pääsy puhdistusprosessiin. Hiekan ja muun kiintoaineen poistaminen prosessin alussa on tärkeää laiterikkojen estämiseksi. Prosessin seuraavassa vaiheessa erotetaan jäteveden sisältämä kiintoaine ja neste toisistaan (selkeytys). Yleensä selkeytys toteutetaan laskeuttamalla. Laskeutus perustuu painovoimaan, jolloin vettä raskaammat partikkelit laskeutuvat altaan pohjalle. Altaan pohjalta ne voidaan poistaa pumppaamalla. Flotaatio on päinvastainen toimenpide laskeutukselle. Flotaatiossa partikkelit nousevat kantoaineen avulla veden pinnalle, josta ne poistetaan esimerkiksi kuorimalla. Selkeyttimen läpi mennyt vesi on yleensä tarpeeksi puhdasta laskettavaksi takaisin vesistöön sellaisenaan. Yhtenä fysikaalisena keinona käytetään myös esi-ilmastusta, joka vaikuttaa myös laajalti kemiallisiin ja biologisiin prosesseihin. Esi-ilmastuksessa joko lisätään kaasua veteen (absorptio) tai poistetaan kaasua vedestä (strippaus) (Karttunen 2004).

## Kemialliset menetelmät

Kemiallisessa käsittelyssä eli saostuksessa jätevetteen lisätään kemikaaleja pääasiassa fosforin ja vedessä kelluvien hienojakoisten hiukkasten poistamiseksi. Fosfori päätyy jätevesiin yleensä ravinnon sekä pesuaineiden kautta. Tavallisimmin käytettyjä kemikaaleja ovat alumiinisulfaatti, rautasulfaatti ja rautakloridi, jotka reagoivat jäteveden eloperäisen aineen sekä fosfaatin kanssa. Saostuskemikaalit lisätään jätevetteen voimakkaasti sekoittaen sekoitusaltaassa. Seuraavassa vaiheessa syntyneet hiutaleet kiinnittyvät sekoituksen vaikutuksesta jäteveden hiukkasiin. Hiutalekasautumat laskeutuvat selkeytysaltaan pohjalle ja erotetaan vedestä.

Suomessa kemialliseen saostukseen käytetään ferrosulfaattia, joka on hinnaltaan edullista ja jota syntyy kemianteollisuuden jätteineistä. Ferrosulfaatti hapetetaan prosessin aikana ferrisulfaatiksi (Karttunen 2004).

Nykyisissä jätevedenpuhdistamoissa 10–80 % fosforista poistuu esiselkeytyksessä raakalietteeseen riippuen käytetystä saostuskemikaalin määrästä (Vesilaitosyhdistys 2016). Kokonaisuudessaan nykyisellä käsittelyllä 90–98 % jäteveden fosforista poistetaan vedestä lietteeseen, mitä voidaan pitää hyvänä tasona. Ravinteiden poiston osalta ei ole kestävää kiristää puhdistustehoa loputtomiin.

## Biologiset menetelmät

Biologisilla prosesseilla vähennetään jäteveden sisältämien ravinteiden ja orgaanisen aineen määrää mikrobiotominnan avulla. Yleisin nykyään käytössä oleva biologinen puhdistustekniikka on aktiivilietemenetelmä, jossa veteen puhalletaan happea, jolloin pieneliöt alkavat kasvaa ja lisääntyä. Siinä mikro-organismit hajottavat jäteveden orgaanista ainesta ja ravinteita sekä käyttävät niitä ravinteenaan sopivalta osin. Heterotrofiset eli toisenvaraiset bakteerit hajottavat orgaanista ainesta happea kuluttaen hiilidioksidiksi ja vedeksi. Nitrifikaatiossa jäteveden sisältämä ammoniumtyppi hapettuu bakteerien vaikutuksesta kahdessa vaiheessa ensin nitriitti-ioneiksi ja sitten nitraatti-ioneiksi. Denitrifikaatiossa nitraatti muuttuu ilman happea denitrifikaatiobakteerien vaikutuksesta typpikaasuksi eli typpi siirtyy vedestä ilmakehään.

Aktiivilieteprosessissa syntyy ns. biolietettä, joka voidaan kerätä jälkiselkeytyksessä talteen jatkojalostusta varten. Tavallisimmin liete joko kompostoidaan, käsitellään hapettomissa olosuhteissa biokaasuksi (mädätyks) tai kuivataan. Lisäksi osa lietteestä palautetaan takaisin kiertoon, jotta se ylläpitää prosessille sopivaa bakteerikantaa. Prosessissa syntynyt biokaasu voidaan hyödyntää energiantuotannossa ja kuivattu liete mm. lannoitteena pelloilla. Lietteen käsittelyssä täytyy kuitenkin huomioida raskasmetallien ja mikrobien poisto ennen sen käyttämistä maanparannusaineena.

Muita biologisia puhdistusmenetelmiä ovat biokalvoprosessit eli biosuodattimien ja bioroottorien käyttö (Vesilaitosyhdistys 201, Pley et al. 1991). Biosuodattimen muodostaa suuripintaista aineella (esim. muovi) täytetty lieriö. Bioroottorin muodostavat akselille kiinnitetyt muovipakkaukset, joita moottori pyörittää jätevesialtaassa. Orgaaninen aines hajoaa tehokkaasti ja kulkeutuu pois kalvon vähitellen irrotessa.

## Anaerobinen-aerobinen käsittelyprosessi

Aerobista biologista prosessia käytetään orgaanisten jätevesien tehokkaaseen puhdistukseen (Chan et al. 2009). Anaerobisessa prosessissa puolestaan pystytään hyödyntämään paremmin jätevesien sisältämät aineet (biokaasun tuottaminen). Aerobinen systeemi soveltuu paremmin sellaisille jätevesille, joiden COD-pitoisuudet ovat alle 1 000 mg/l, ja anaerobinen prosessi niille jätevesille, joiden COD-pitoisuudet ovat yli 4 000 mg/l. Menetelmien yhdistämisellä voidaan parantaa puhdistustuloksia huomattavasti. Tällöin voidaan hyödyntää molempien puhdistusmenetelmien hyviä puolia. Tekniikoita on vertailtu tarkemmin taulukossa 1.

**TAULUKKO 1. Aerobisen ja anaerobisen käsittelyn vertailua (Chan et al. 2009)**

Ominaisuus	Aerobinen	Anaerobinen
Orgaanisen aineksen poisto	Korkea	Korkea
Puhdistetun veden laatu	Erinomainen	Kohtuullinen/heikko
Orgaanisen aineksen määrä	Kohtuullinen	Matala
Lietteen tuotanto	Korkea	Matala
Ravinnetarve	Korkea	Matala
Alkaliniteettitarve	Matala	Korkea joillekin teollisuusjätevesille
Energiatarve	Korkea	Matalasta kohtuulliseen
Lämpötilaherkkyys	Matala	Korkea
Käynnistysaika	2-4 vk	2-4 kk
Haju	Vähän	Hajuhaittoja
Bioenergian ja ravinteiden talteenotto	Ei	Kyllä
Käsittelytapa	Koko prosessi	Esikäsittely

Anaerobinen käsittely yhdistettynä aerobiseen on ollut tähän saakka vallitseva menetelmä puhdistamoissa johtuen alhaisesta energian- ja kemikaalien kulutuksesta sekä operatiivisesta yksinkertaisuudesta. Tekniikan haittapuolia ovat taas tilantarve ja biokaasun talteenottomahdollisuudet. Edellä mainittuja molempia menetelmiä hyödyntävät bioreaktorit ovat saavuttaneet viime vuosina suosiota jätevedenpuhdistusprosesseissa. Niissä jätevettä puhdistetaan kustannustehokkaasti suhteellisen yksinkertaisissa reaktoreissa. On selvää, että tulevaisuuden puhdistusprosesseja pitää tehostaa käyttämällä erilaisia bioreaktoreita, joissa vesistöihin joutuvia haitta-aineita (muun muassa lääkeaineita) voidaan poistaa entistäkin tehokkaammin.

Aerobisessa käsittelyssä murskattuun ja seulottuun biojätteeseen lisätään vettä. Näin saatu liete siirretään aerobiseen käsittelyyn, joka koostuu kolmesta erillisestä peräkkäisestä reaktorista. Jokaisessa reaktorissa jäteaines viipyy n. 24 h ja reaktorista toiseen siirtymisen välillä siitä irrotetaan puristimella kiintoainesta, joka siirretään seuraavaan. Vain kiintoaines siirtyy aerobisesta käsittelystä toiseen ja nestemäinen liete johdetaan anaerobiseen käsittelyyn.

Suomessa vaadittavien lupamääräysten täyttämiseksi biologisessa osassa tapahtuvaa fosforin sitoutumista täydennetään kemiallisella saostuksella. Fosforin saostuskemikaalina käytetään useimmiten rauta- tai alumiinisuoloja, jotka syötetään yleensä prosessin alkuun esikäsittelyvaiheeseen tai kaksipisteannosteluna prosessin alkuun ja loppuvaiheeseen ennen jälkiselkeytystä.

## Biologinen jälkisuodatin

Yli 70 prosentin kokonaistypenpoistoon on olemassa useita erilaisia prosessivaihtoehtoja. Tehokkain menetelmä on biologinen jälkisuodatin, jossa bakteerit eivät kasva vapaasti, vaan ovat kiinnittyneet johonkin sopivaan kasvualustaan. Biologisessa suodattimessa denitrifikaatio toteutuu kantoaineen pinnalla kasvavan biomassan ja annosteltavan ulkoisen hiilen avulla. Ulkoisena hiililähteenä käytetään yleensä metanolia, jota annostellaan noin kolminkertainen määrä poistettavaan nitraattityyppeen verrattuna. Suomeen on rakennettu useita jälkidenitrifikaatioon perustuvia biologisia suodatinlaitoksia. Laitoksia sijaitsee muun muassa Paraisilla, Uudessakaupungissa, Helsingissä, Kauhajoella, Salossa ja Oulussa (Kinnunen 2013). Lisäämällä biologinen suodatin jälkikäsittely-yksiköksi voidaan päästä 85–95 %:n kokonaistypenpoistoon.

Ns. anammox-bakteerit pystyvät hapettamaan ammoniumin anaerobisesti typeksi. Jotta ammoniumtyppi saadaan reagoimaan molekulaariseksi typeksi, tulee puolet ammoniumtypestä ensin hapettaa nitriitiksi. Mitään ulkoista orgaanisen hiilen lähdettä ei tällöin tarvita, sillä elektroni tulee nitriitiltä. Liukoista happea tarvitaan vain prosessin alussa, jotta saadaan muodostettua nitriittiä. Anammox on kustannustehokas ja vähän tilaa tarvitseva typenpoiston erikoissovellus, ja maailmalla tekniikka on laajalti käytössä rejektivesien puhdistuksessa (Vesilaitosyhdistys 2016).

## Tertiäriset käsittelymenetelmät

Perinteisen biologisen puhdistusprosessin jälkeen jäteveden mukana pääsee edelleen vesistöön liikaa haitallisia orgaanisia yhdisteitä, kuten esimerkiksi lääkeainejäämiä tai siloksaaneja. Myös haitallisten mikrobien määrä voi olla liian korkea lähtevässä jätevedessä. Biologinen käsittely ei yksin pysty poistamaan näitä. Siksi on tärkeää useimmiten käyttää vielä tertiäristä käsittelyä ennen puhdistetun veden päästämistä luonnonvesistöön tai johtamista uudelleen esimerkiksi teollisuuden prosesseihin. Tertiärisiä tekniikoita ovat mm. hiekka- ja kiekkosuodatus, otsonointi, kehittyneet hapetustekniikat (mm. UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, valokatalyytit yhdessä vetyperoksidin kanssa (kuten TiO<sub>2</sub>), Fenton-käsittely ja sähkökemiallinen hapetus), klooraus, adsorptio ja erilaiset kalvotekniikat (esim. nano- ja ultrasuodatus).

Puhdistettua jätevettä voidaan käyttää esim. kasteluun, kunhan se ei aiheuta minikäänlaista hygienistä riskiä vastaanottavassa vesistössä. Tähän tarkoitukseen vaihtoehtoisia menetelmiä ovat UV-käsittely, kemiallinen menetelmä (peretikka- tai permuurahaihappo), hapetus (otsonointi) ja kalvosuodatus (nanosuodatus tai käänteisosmoosi). UV- ja kemiallinen käsittely peretikka- tai permuurahaihappoa käyttäen ovat nykyään pääosin käytössä ja ne ovat kustannustasoltaan samalla tasolla.

UV-desinfiointi on toimintaperiaatteeltaan yksinkertainen eikä vaadi kemikaaleja. Veden kemiallinen koostumus ei muutu käsittelyssä, eikä UV-hygienisoinnin seurauksena muodostu haitallisia yhdisteitä. UV-desinfiointi on laajalti käytössä jäte-



vedenpuhdistamoissa ympäri maailmaa. Tuotekehittelyn myötä markkinoilla on vähemmän energiaa kuluttavia lampuja, mikä on lisännyt UV-desinfiointin suosiota. Suomessa se on yleisin ei-kemiallinen desinfiointimenetelmä. Suomen jätevedenpuhdistamoissa peretikkahappodesinfiointi on kemiallisista menetelmistä yleisin, kun taas klooraus on maailmanlaajuisesti yleisin jäteveden desinfiointimenetelmä.

Hiekkasuodatus on yleisesti käytössä jätevedenpuhdistamoissa tertiäärivaiheena fosforinpoistoa varten (Vesilaitosyhdistys 2016). Siinä vesi johdetaan kanavien tai putkien kautta suodatusaltaisiin, joissa veden annetaan suodattua painovoimaisesti hiekkakerroksen läpi. Hiekkasuodatusta käyttämällä voidaan päästä jäteveden kokonaisfosforipitoisuudessa alle 0,3:een mg/l. Kiekkosuodatus on ollut vuosikymmeniä käytössä jätevedenpuhdistuksessa, mutta viime vuosina sitä on tutkittu ja otettu käyttöön tertiäärikäsittelyssä ja yhdistettynä kantoaineprosesseihin. Kiekkosuodatus on lisännyt viime vuosina suosiotaan tertiäärisenä käsittelynä, ja mm. Ruotsiin ja Suomeen on rakenteilla tekniikkaa käyttäviä laitoksia.

Otsonointi on saavuttanut suosiota tertiäärisenä jätevedenpuhdistustekniikkana, koska se on tehokas hapettaja useimmille orgaanisille yhdisteille sekä käyttökelpoinen desinfiointiaine. Käsiteltävän veden ominaisuudet vaikuttavat voimakkaasti otsonoinnin puhdistustehokkuuteen. Erityisesti pH:lla on suuri merkitys puhdistuksen onnistumisessa. Otsonointi ei useinkaan hajota täysin hapetettavia aineita, vaan pilkkoo ne lyhytketjuisimmiksi yhdisteiksi. Otsonoinnissa voi myös syntyä hajoamistuotteita, jotka ovat haitallisempia kuin alkuperäiset haitta-aineet, ja näin ollen esimerkiksi hiekka- tai aktiivihiiლისuodatus voi olla tarpeen jälkikäsittelynä. Tämän vuoksi otsonoinnin käyttö maailmalla on vielä suhteellisen vähäistä.

Kehittyneiden hapetustekniikoiden käyttö jätevedenpuhdistuksessa lisääntynee tulevaisuudessa. Toistaiseksi tekniikoita on tutkittu lähinnä vain laboratorio- ja pilottimittakaavassa. Tekniikassa hapettimena toimivat hydroksyyli-radikaalit, jotka ovat voimakkaimpia tunnettuja hapettimia. UV-LED-tekniikan käyttöönotto tulevaisuudessa tarjoaa uusia mahdollisuuksia tämän tekniikan hyödyntämiseen vedenpuhdistuksessa ja juomaveden desinfiointissa.

Klooraus on yleisesti jätevedenpuhdistamoissa käytettävä tekniikka. Se soveltuu kuitenkin paremmin veden desinfiointiin, ei niinkään orgaanisten yhdisteiden hajottamiseen. Kloorauksen etuna on se, että reaktiiviset klooriyhdisteet (kuten vapaa kloori) ovat stabiilimpia kuin esimerkiksi otsoni ja näin ollen reagoivat hitaammin orgaanisten haitta-aineiden kanssa. Menetelmä on myös yksinkertainen ja suhteellisen halpa verrattuna muihin desinfiointitekniikoihin. Haittapuolena on kuitenkin käsittelyn aikana orgaanisten yhdisteiden kanssa syntyvät sivutuotteet (ns. AOX-yhdisteet).

Aktiivihiihi on maailmalla jo yleisesti käytössä oleva adsorbentti jätevedenpuhdistuksessa. Sillä on korkea kapasiteetti useimpien haitta-aineiden sitomiseen, koska sen ominaispinta-ala voi olla jopa 2 000 m<sup>2</sup>/g. Aktiivihiihen avulla voidaan poistaa tehokkaasti polaarittomia lääkeaineita jätevesistä. Menetelmä on suhteellisen halpa, mutta

sen haittapuolena on mm. hitaus. Etuna moniin muihin tekniikoihin on myös se, että haitallisia sivutuotteita ei synny niin paljon. Aktiivihiihlikäsittely voidaan tehdä myös suodattimilla, jolloin käytössä on rakeinen aktiivihiihi. Toteutustapa on sama kuin talousveden aktiivihiihli-suodattimissa. Aktiivihiihli-suodattimukseen on näissä tapauksissa yleensä syötetty jälkiselkeytyksestä lähtevää vettä. Tällaisia prosesseja on toteutettu täydessä mittakaavassa sekä tutkimustarkoituksissa mm. Saksassa ja Hollannissa.

Kalvotekniikat soveltuvat myös hyvin jätevesien puhdistukseen. Yleisimmin käytössä ovat mikro-suodatus, ultrasuodatus, nanosuodatus ja käänteisosmoosi. Nanosuodatus on käytössä jo maailmalla useissa täydenmittakaavan laitoksissa (Vesilaitosyhdistys 2016). Näissä tekniikoissa ei synny haitallisia sivutuotteita. Ongelmana on kuitenkin useimmiten kalvojen likaantuminen ja niiden puhdistuksessa syntyvät toksiset yhdisteet. Käänteisosmoosisissa myös konsentraatin jatkokäsittely asettaa oman haasteensa.

Flotaatiossa saostetut hiutaleet nostetaan ilmakuplilla veden pinnalle (Vesilaitosyhdistys 2016). Erottunut kiintoainne poistetaan veden pinnalta esim. kaapimilla. Flotaatiolla saadaan poistettua jätevedestä hienojakoista ainesta, joka ei laskeudu selkeyttimessä. Lisäksi flotaatio poistaa tehokkaasti myös rasva- tai öljypartikkeleita. Flotaation etuja ovat hyvä puhdistustulos, lyhyt viipymäaika ja melko suurten pintakuormien käyttö. Tekniikka on yleinen yhdyskuntajätevesien käsittelyssä ja nykyisin myös teollisuuden jätevesien puhdistuksessa.

Jätevedenpuhdistuksen yhteydessä syntyvän lietteen määrää on pystytty vähentämään kalvobioreaktoreiden (MBR) käytön avulla, jolloin painovoimainen lietteenerotus on korvattu kokonaan tai osin kalvosuodatuksella. (Kamali and Khodaparast 2015, De Jager et al. 2014, Neoh et al. 2016). MBR-tekniikalla on myös muita etuja verrattuna perinteisiin puhdistustekniikoihin, kuten parempi puhdistetun veden laatu, pienempi jalanjälki ja menetelmän käytön joustavuus. Tämänkin tekniikan haasteena on kalvojen likaantuminen, mikä lisää käyttö- ja ylläpitokustannuksia. Lisäksi kalvomenetelmä soveltuu parhaiten matalakuormitteisiin laitoksiin, sillä tukkeutumisriski on sitä suurempi, mitä enemmän kalvoja kuormitetaan. Yhdistettynä muihin käsittelymenetelmiin puhdistustehokkuutta voidaan kuitenkin parantaa ja samalla energian ja ravinteiden talteenottoa tehostaa (Neoh et al. 2016).

MBR-prosessissa yhdistetään aktiivilietemenetelmään perustuva orgaanisen aineen biologinen hajottaminen ja kalvosuodattimukseen perustuva mekaaninen lietteen erottaminen. Useista eri bakteerilajeista koostuva aktiiviliete tekee varsinaisen puhdistustyön käyttämällä ravinteet bakteerimassan elintoimintojen ylläpitoon ja lisääntymiseen. Perinteisesti aktiivilieteprosessi on puhdistamoissa erillään lietteen erottamisesta, joka tapahtuu jälkiselkeytysaltaissa. MBR-prosessissa kaksi prosessia on yhdistetty siten, että liete poistetaan erityisillä kalvoilla. Liette jää kalvojen huokosiin ja puhdistettu vesi voidaan johtaa sellaisenaan pois puhdistettuna jätevetenä. Tällöin mm. laskeutusaltaita ei tarvita. MBR-menetelmässä tavoitteena on työssä 95 prosentin puhdistusteho ja haitallisten mikrobin osalta jopa 100 %:n teho.

Maailmalla on jo satoja MBR-tekniikkaa hyödyntäviä täydenmittakaavan jäteveden-puhdistuslaitoksia. Ensimmäiset MBR-tekniikkaa hyödyntävät puhdistamot ovat rakenteilla myös Suomeen ja Ruotsiin (Vesilaitosyhdistys 2016).

Anaerobinen MBR-käsittely on myös saavuttanut runsaasti kiinnostusta viime vuosina (Lin et al. 2013, Pretel et al. 2016). Tämän käsittelyn etuna ovat MBR-tekniikan tuomat hyödyt yhdistettynä biokaasuntuotantoon. Taulukossa 2 on vertailtu tarkemmin perinteistä aktiivilieteprosessia ja MBR-prosesseja toisiinsa. Taulukon pohjalta on nähtävissä, että anaerobisen MBR-käsittelyn edut ovat huomattavat muihin tekniikoihin verrattuna. Suurin ongelma tekniikassa on kuitenkin kalvojen likaantuminen.

**TAULUKKO 2. Eri puhdistustekniikoiden vertailua keskenään (Lin et al. 2013)**

Ominaisuus	Perinteinen aerobinen käsittely	Perinteinen anaerobinen käsittely	Aerobinen MBR	Anaerobinen MBR
Orgaanisen aineksen poisto	Korkea	Korkea	Korkea	Korkea
Puhdistetun veden laatu	Korkea	Kohtuullinen/heikko	Erinomainen	Korkea
Orgaanisen aineksen määrä	Kohtuullinen	Korkea	Korkea/koh-tuullinen	Korkea
Lietteen tuotto	Korkea	Matala	Korkea/koh-tuullinen	Matala
Jalanjälki	Korkea	Korkea/koh-tuullinen	Matala	Matala
Biomassan retentio	Matala/koh-tuullinen	Matala	Täydellinen	Täydellinen
Ravinnerarve	Korkea	Matala	Korkea	Matala
Alkaliniteetti-tarve	Matala	Korkea joille-kin teollisille virroille	Matala	Korkea/koh-tuullinen
Energiatarve	Korkea	Matala	Korkea	Matala/koh-tuullinen
Lämpötilaherkkyys	Matala	Matala/koh-tuullinen	Matala	Matala/koh-tuullinen
Käynnistysaika	2-4 viikkoa	2-4 kuukautta	< 1 viikko	< 2 viikkoa
Bioenergian talteenotto	Ei	Kyllä	Ei	Kyllä
Käsittelyvaihe	Täydellinen	Erityisesti esikäsitteily	Täydellinen	Täydellinen tai esikäsitteily

Yuan ja He (2015) tarkastelivat katsausartikkelissaan biosähkökemiallisten systeemien käyttöä yhdessä kalvosuodatuksen kanssa. Tässä käsittelyssä sähkökemiallisesti aktiiviset mikro-organismit hajottavat orgaanista ainetta. Kun käsittely yhdistetään vielä MBR-kalvosuodatuksen, saadaan jätevesi puhdistettua energiatehokkaasti ja ympäristöystävällisesti.

Kantoaineprosessi (MBBR) on jo pitkään tunnettu maailmalla ja sitä on hyödynnetty yleisesti Keski-Euroopassa ja muissa Pohjoismaissa (Vesilaitosyhdistys 2016). Kantoaineprosessissa vettä puhdistava biokasvusto on kiinnittynyt kantoaineseen, perinteisissä ratkaisussa biomassa kelluu vapaana vedessä. Kantoaineena toimivat muoviset täytepartikkelit ilmastetussa reaktorialtaassa. Alustaan kiinnittynyt vettä puhdistavan biokasvuston ansiosta puhdistusprosessi sietää virtaaman vaihteluita ja toimii kylmillä jätevesillä. Kantoaineprosessista lähtevän veden kiintoainepitoisuus on pienempi kuin aktiivilieteprosessissa, ja kiintoaineen erotus voidaan tehdä esim. flotaatioaltaassa. Lisäksi kantoaineprosessissa ei tarvita palautuslietteen takaisinkierätyttä.

## Lähteet

Vesilaitosyhdistys, Teknis-taloudellinen tarkastelu jätevesien käsittelyn tehostamisesta Suomessa, Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 42, ISBN: 978-952-6697-17-8, Helsinki, 2016.

Kinnunen, J., Jätevedenpuhdistus rinnakkaissaostuslaitoksella – esimerkkinä Kinnulan jätevedenpuhdistamo, opinnäytetyö, Oulun seudun ammattikorkeakoulu, 2013.

Karttunen, E., RIL 124-2 Vesihuolto II. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2004.

Pleym, H. ym., Ympäristötekniikka, s. 324, 1991.

Chan, Y.J., Chong, M.F., Law, C.L., Hassell, D.G., A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater, *Chemical Engineering Journal* 155 (2009) 1-18.

Kamali, M., Khodaparast, Z., Review on recent developments on pulp and paper mill wastewater treatment, *Ecotoxicology and Environmental Safety* 114 (2015) 326-342.

De Jager, D., Sheldon, M.S., Edwards, W., Colour removal from textile wastewater using a pilot-scale dual-stage MBR and subsequent RO system, *Separation and Purification Technology* 135 (2014) 135-144.

Neoh, C.H., Noor, Z.Z., Mutamim, N.S.A., Lim, C.K., Green technology in wastewater treatment technologies: Integration of membrane bioreactor with various wastewater treatment systems, *Chemical Engineering Journal* 283 (2016) 582-594.

- Lin, H., Peng, W., Zhang, M., Chen, J., Hong, H., Zhang, Y., A review on anaerobic membrane bioreactors: Applications, membrane fouling and future perspectives, *Desalination* 314 (2013) 169-188.
- Pretel, R., Robles, A., Ruano, M.V., Seco, A., Ferrer, J., Economic and environmental sustainability of submerged anaerobic MBR-based (AnMBR-based) technology as compared to aerobic-based technologies for moderate-/high-loaded urban wastewater treatment, *Journal of Environmental Management* 166 (2016) 45-54.
- Yuan, H., He, Z., Integrating membrane filtration into bioelectrochemical systems as next generation energy-efficient wastewater treatment technologies for water reclamation: A review, *Bioresource Technology* 195 (2015) 202-209.

# ESIKÄSITTELYMENETELMÄT BIOKAASUPROSESSEISSA METAANINTUOTANNON OPTIMOIMISEKSI

*Heikki Särkkä*

Biokaasuntuotannossa käytettävien syötteiden esikäsittelyä tarvitaan prosessin häiriöttömyyden ja tehokkuuden varmistamiseksi. Monista eri materiaaleista koostuvan syötteen käytön edellytyksenä on, että biokaasulaitoksilla käytetään useita eri esikäsittelymenetelmiä. Biokaasuprosesseja ja niiden optimointia tutkitaan Mikkelin ammattikorkeakoulun käynnissä olevassa Smart Effluents -hankkeessa. Tämä artikkeli liittyy hankkeen lietteenkäsittelyosioon, jossa tutkitaan lietteen kuivausmenetelmiä, energiahöyrykäyttömahdollisuuksia, esikäsittelymenetelmiä ja ravinnevirtojen faasi-jakautumista. Hankkeen muita toteuttajia ovat Lappeenrannan teknillisen yliopiston Vihreän kemian laboratorio, Aquazone Oy, BioGTS Oy, Metsäsairila Oy, Mikkelin vesilaitos ja Mipro Oy. Hanke saa rahoitusta Tekesin ohjelmasta *Green Growth – Tie kestäväään talouteen 2011–2015*.

## **Yleistä esikäsittelystä**

Esikäsittelyn tarkoitus on saattaa syöte paremmin käsiteltävään muotoon ja/tai poistaa siitä epäpuhtaudet. Laitoksen esikäsittelytekniikat on valittava käytettävän syöteseoksen ja prosessin vaatimusten perusteella (Latvala 2009). Tällöin huomioidaan erityisesti syötteiden ominaisuudet, kaasuntuoton tavoitteet sekä käsittelyjäännöksen hyödynnettävyys. Esikäsittelyssä mahdollisesti syntyvien ylimääräisten jakeiden (esim. metalli, kivi ja muovi) sijoittaminen on myös otettava huomioon. Ylimääräiset jakeet voidaan koota sekajäteastiaan tai lavalle ja puristaa tilavuuden pienentämiseksi ennen loppusijoitusta.

Hygienisointia tai sterilointia vaativia syötteitä ei ole hyvä sekoittaa muihin syötteisiin ennen esikäsittelyä, koska tällöin koko syöteseoksen käsittelyvaatimus syntyy vaativimman jakeen mukaan. Hygienisointiin käytetään monia erilaisia menetelmiä, ja näihin menetelmiin lukeutuvat monet kemialliset menetelmät, joissa käytetään mm. peretikkahappoa, permuurahaishappoa sekä hypokloriittia (kloorausta). Lisäksi hygienisointia voidaan suorittaa myös UV-valon avulla, otsonoinnilla sekä kalvosuodatuksella. Koska hygienisointi lisää käyttökustannuksia ja energiankulutusta, hygienisointiin tulee käyttää ensisijaisesti laitoksen biokaasulla tuotettua energiaa. Hygie-

nisointia suoritetaan myös monien tautia aiheuttavien bakteereiden, kuten *E. Colin* ja *Salmonella spp*:n, vuoksi. (Ferrer et al. 2010).

Esikäsittelyvaiheessa säädetään syöteseoksen kuiva-ainepitoisuus ja orgaaninen kuorma prosessin käynnistymisen ja toiminnan edellyttämälle tasolle (Latvala 2009). Taulukossa 1 on esitelty yleisimmät esikäsittelymenetelmät ja niiden tyyppilliset käyttötarkoitukset suomalaisissa biokaasulaitoksissa.

**TAULUKKO 1. Prosessin hallinnan kannalta oleelliset esikäsittelytekniikat (mukaillen Latvala 2009)**

Esikäsittely	Kuvaus	Tyyppillinen käyttötarkoitus
Murskaus	Murskauslaitteisto, joka murskaa syötteen pienempään palakokoon.	Tavoitteena on hygienisoituminen sekä parempi käsittelyteho ja sekoitettavuus.
Homogenisointi	Syöte jauhetaan tasalaatuiseksi massaksi ja sekoitetaan muihin syötteisiin.	Syötteen saattaminen tasalaatuiseksi.
Repijä ja ylimääräinen materiaalien erottelu	Esimerkiksi muovipussien hajottaminen.	Käytetään yleensä erilliskerätylle biojätteelle.
Sakeutus	Lietteen kuiva-ainepitoisuus pyritään nostamaan 2–3-kertaiseksi, esimerkiksi lingolla, suotonauhalla tai rumpusiivilällä.	Paljon nestettä sisältävien syötteiden kuiva-ainepitoisuuden nostaminen.
Välppäys	Välppämällä kiinteät epäpuhtaudet saadaan erotetuksi. Välpejäte voidaan toimittaa esimerkiksi kaatopaikalle.	Puhdistamolietteelle tai muulle lietteelle, joka sisältää kiinteitä epäpuhtauksia.

Biokaasuprosessin toimivuuden kannalta on tärkeää valita syöttömateriaalit niin, ettei prosessin mikrobien toiminta esty eli inhiboidu (Luostarinen et al. 2011). Mikrobeja inhiboivat esimerkiksi korkeat typpi- ja rasvapitoisuudet. Inhibioteja voivat aiheuttaa myös mm. syöttömateriaalin sisältämät desinfioivat yhdisteet, antibiootit ja raskasmetallit.

## Fysikaaliset menetelmät

Fysikaaliset menetelmät eivät käytä mitään kemiallisia tai mikrobiologisia apukeinoja vaan sisältävät monia mekaanisesti tapahtuvia esikäsittelykeinoja. Näitä voivat olla hienonnuks, kuumalla vedellä käsittely sekä höyryllä, paineella tai säteilyllä käsittely.

Yhtenä fysikaalisena esikäsittelyprosessina on käytetty homogenisointia korkeassa paineessa (Jin et al. 2015). Menetelmää vertailtiin yhdessä alkalisissa olosuhteissa tapahtuvan lämmityksen kanssa. Molemmat tekniikat paransivat biokaasun tuottoa 2,5-kertaiseksi kontrollinäytteeseen verrattuna painekäsittelyn tuottaessa biokaasua vielä nopeammin. Lisäksi painekäsittely voidaan tehdä huoneen lämpötilassa, eikä sen yhteydessä tarvitse käyttää kemikaaleja.

Patil et al. (2016) käyttivät hydrodynaamista kavitaatiota vehnän olkien esikäsittelyssä. Esikäsittely kaksinkertaisti metaanintuoton. Lisäksi havaittiin, että käytettäessä kemiallista käsittelyä (kaliumhydroksidia, KOH) apuna yhdessä kavitaation kanssa metaanintuotto pystyttiin yli viisinkertaistamaan.

Luste et al. (2009) vertailivat mm. lämpökäsittelyn ja ultraäänen käyttöä lihanjalostusteollisuuden sivutuotteiden hydrolyysissä ja metaanintuotannossa. Esikäsittelyillä oli erilainen vaikutus metaanintuottopotentiaaleihin riippuen käsittelystä raaka-aineesta. Toisessa tutkimuksessaan Luste et al. (2011) havaitsivat, että biologinen esikäsittely kaupallisella Liquid Certizyme 5<sup>TM</sup> -bakteeriseoksella hajotti paremmin pienempiä selluloosapartikkeleita, kun taas ultraäänikäsittely sopi paremmin rasvaa sisältävien solujen hajottamiseen.

Ultraääni sopii myös biokaasuprosessin esikäsittelymenetelmäksi (Luostarinen et al. 2011). Käsiteltävä aine saadaan tällöin nopeammin hajoavaksi, jolloin metaanin tuotto lisääntyy. Ultraäänikäsittelyllä pystytään rikkomaan soluseiniä sekä hajottamaan bakteeriflokkeja ja orgaanisia yhdisteitä muodostuvilla hydroksyyli- ja radikaaleilla. Tehokas orgaanisen aineen hyväksikäyttö parantaa biokaasun tuotantoa ja vähentää käsittelyjäännöksen tai ainakin sen kuiva-aineen määrää. Käsittelyn etuna on myös sen nopeus. Ultraäänikäsittelyn käyttö lietemäisille raaka-aineille on myös osoittautunut tutkimuskäytössä toiminnaltaan varsin luotettavaksi (Neis et al. 2000).

Säteilytysmenetelmiä on ultraäänikäsittelyn lisäksi myös muita. Menetelmät voivat perustua myös gammasäteilyyn, mikroaaltoihin sekä elektronisuihkutukseen. Jackowiak et al. (2011) tutkivat vehnän korsien esikäsittelyä mikroaaltosäteilytyksen avulla. Tutkimuksessa raportoitiin 30 %:n parannus metaanin tuottoon verrattuna käsittelemättömiin vehnän korsisiin.

Passos et al. (2015) vertailivat lämpökäsittelyä (95 °C, 10 h), kuumavesikäsittelyä (130 °C, 15 min), mikroaaltosäteilytystä (900 W, 3 min, 34.3 MJ/kg TS) ja ultraäänikäsittelyä (70 W, 30 min, 26.7 MJ/kg TS) metaanintuoton kannalta. Orgaanisen aineen liukoisuus lisääntyi kaikilla esikäsittelyillä. Metaanintuotto lisääntyi lämpökäsittelyllä



72 %, kuumavesikäsitteilyllä 28 % ja mikroaalto säteilytyksellä 21 %. Ultraäänikäsitteily ei puolestaan parantanut metaanintuottoa kontrollinäytteeseen verrattuna.

Li et al. (2015) vertailivat jatkuvatoimista, kaksivaiheista termofilistä mädätysprosessia ilman esikäsitteilyä ja lämpökemiallisen käsittelyn kanssa. Esikäsitteily paransi biokaasuntuottoa n. 25 %. Lämpökemiallisen käsittelyn todettiin parantaneen aineksen hydrolyysia mm. orgaanisen aineksen liukoisuuden kasvun vuoksi.

## Kemialliset menetelmät

Kemiallinen esikäsitteily viittaa erilaisten kemikaalien käyttöön esikäsitteilyssä. Yleisimmin käytettävät kemikaalit ovat erilaisia happoja, emäksiä sekä ionisoituja nesteitä. Kemikaalien käyttö ei kuitenkaan ole kestävä kehityksen mukaista, ja niistä siirrytään vähitellen vähemmän kuormittaviin vaihtoehtoihin.

Hesami et al. (2015) paransivat metaanintuottoa 45–124 % käyttämällä rikkihappoa biokaasuprosessin (syötteenä auringonkukan varret) esikäsitteilyä. Myös orgaanisten liuottimien käyttö lisäsi biokaasuntuottoa. Analyysien perusteella ligniinin poistuminen biomassasta ja sen rakenteen muuttuminen olivat syynä parantuneeseen metaanintuottoon. Chandra et al. (2012) huomasivat vastaavan vaikutuksen omassa tutkimuksessaan. Orgaanisilla liuottimilla (alkoholit, ketonit, fenolit ja eetterit) voidaan myös tehokkaasti liuottaa kasvubiomassan sisältämää ligniiniä. Li et al. (2015) taas huomasivat tutkimuksessaan, että esikäsitteilylämpötilan ollessa yli 120 °C biokaasuntuotto ei enää noussut vaan alkoi jopa laskea käsittelyajan pidentessä. Kahden päivän esikäsitteily 70 °C:ssa ennen termofilistä biokaasuprosessia nosti taas puolestaan jätevedenpuhdistamon raakalietteen metaanintuottoa 42 % ja biolietteen jopa 475 % (Skiadas et al. 2004).

Lämpökäsittelyyn voidaan yhdistää edelleen kemiallinen käsittely tai painekäsittely. Kemiallisen käsittelyn tavoitteena on tehostaa hydrolyysia edelleen (Neyens and Baeyens 2003). Lämpö- ja kemiallisen käsittelyn yhdistelmän on todettu nostavan puhdistamolietteen metaanintuoton jopa 2,2-kertaiseksi (Neyens and Baeyens 2003). Esikäsitteilyä voidaan käyttää myös paineistettua lämpökäsittelyä eli nk. termistä hydrolyysia, jossa käsiteltävän massan lämpötila nostetaan >130 °C:seen usean baarin paineessa. Tästä esimerkkinä on Cambi®-prosessi, jota käytetään erityisesti jätevesilietteiden esikäsitteilyssä eri puolilla maailmaa. Prosessissa lämpötila nostetaan yleensä höyryllä 165 °C:seen paineen ollessa 6 bar 20 minuutin ajaksi. Prosessin on todettu metaanintuotannon lisäksi parantavan veden erotusta jopa 60–80 % (Neyens and Baeyens 2003).

Michalska et al. (2015) käyttivät alkalista esikäsitteilyä yhdessä entsymaattisen käsittelyn kanssa lignoselluloosan anaerobisessa mädätyksessä. Käsittely hajotti tehokkaasti biomassan sisältämää hemiselluloosaa, jolloin biokaasuntuotto lisääntyi. Oli selvästi huomattavissa, että entsyymien käyttö tehosti prosessia. Vetyperoksidin käyttö alkalisisä olosuhteissa lisäsi myös metaanikaasun muodostusta (Siciliano et al. 2016).

Xu et al. (2014) tutkivat sähkökemiallisen esikäsittelyn vaikutusta aktiivilietteen mädätykseen muiden menetelmien ohella. Sähkökemiallinen esikäsittely antoi parhaan tuloksen biokaasun tuotannossa, vaikkakin kemiallinen käsittely saavutti parhaan päiväkohtaisen tuloksen.

## Biologiset menetelmät

Myös biologiset menetelmät parantavat biokaasun tuotantoa. Näitä keinoja ovat erilaisten homeiden käyttö, mikrobit sekä entsyymit. Biologinen lähestymistapa on kestävä ja ympäristöystävällinen vaihtoehto, mutta myös suhteellisen hidas ja kallis menetelmä, erityisesti entsyymien kohdalla.

Mutschlechner et al. (2015) kolminkertaistivat biokaasun tuoton käyttämällä *Trichoderma viride* -homeetta ennen mädätysprosessia. Home vapautti ravinteita, mikä nopeutti mädätysvaiheen mikrobiokenoosivaihetta. Menetelmä ei tarvitse erillistä energianlähdettä, eikä siinä synny ei-toivottuja sivutuotteita. Entsyymit, kuten hiilihydraasi ja proteaasi, pilkkovat myös tehokkaasti biomassaa, jolloin biokaasuntuotanto lisääntyy (Mahdy et al. 2016). Karray et al. (2015) tutkivat, kuinka levien avulla voidaan valmistaa biokaasua. He vertailivat eri esikäsittelytekniikoiden tehokkuutta, ja entsyymaattinen hydrolyysi todettiin tehokkaimmaksi menetelmäksi.

Biomassan tai lietteen esikäsittelyt hajottavat lietteen flokkeja, vapauttavat orgaanista ainesta, kiihdyttävät lietteen hydrolyysiä ja parantavat näin ollen mädätysprosessin tehokkuutta. Erityisesti lietteiden erilainen koostumus asettaa kuitenkin haasteita oikeiden esikäsittelymenetelmien valinnalle, ja niiden valinta täytyykin tehdä aina tapauskohtaisesti.

## Lähteet

Chandra, R., Takeuchi, H., Hasegawa, T. (2012) Hydrothermal pretreatment of rice straw biomass: a potential and promising method for enhanced methane production. *Applied Energy* 94: 129–140.

Ferrer, I., Vázquez, F., Font, X. (2010) Long term operation of a thermophilic anaerobic reactor: Process stability and efficiency at decreasing sludge retention time. *Bioresource Technology* 101: 2972–2980.

Hesami, S.M., Zilouei, H., Karimi, K., Asadinezhad, A. (2015) Enhanced biogas production from sunflower stalks using hydrothermal and organosolv pretreatment. *Industrial Crops and Products* 76: 449–455.

Jackowiak, D., Bassard, D., Pauss, A., Ribeiro, T. (2011) Optimisation of a microwave pretreatment of wheat straw for methane production. *Bioresource Technology* 102: 6750–6756.

- Jin, S., Zhang, G., Zhang, P., Jin, L., Fan, S., Li, F. (2015) Comparative study of high-pressure homogenization and alkaline-heat pretreatments for enhancing enzymatic hydrolysis and biogas production of grass clipping. *International Biodeterioration & Biodegradation* 104: 477–481.
- Karray, R., Hamza, M., Sayadi, S. (2015) Evaluation of ultrasonic, acid, thermo-alkaline and enzymatic pre-treatments on anaerobic digestion of *Ulva rigida* for biogas production. *Bioresource Technology* 187: 205–213.
- Latvala, M. (2009) Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä, Suomen ympäristökeskuksen raportteja 24/2009.
- Li, C., Champagne, P., Anderson, B.C. (2015) Enhanced biogas production from anaerobic co-digestion of municipal wastewater treatment sludge and fat, oil and grease (FOG) by a modified two-stage thermophilic digester system with selected thermo-chemical pre-treatment, *Renewable Energy* 83: 474–482.
- Luostarinen, S., Paavola, T., Ervasti, S., Sipilä, I., Rintala, J. (2011) Lannan ja muun eloperäisen materiaalin käsittelyteknologiat, MTT raportti 27.
- Luste, S., Luostarinen, S., Sillanpää, M. (2009) Effect of pre-treatments on hydrolysis and methane production potentials of by-products from meat-processing industry. *Journal of Hazardous Materials* 164: 247–255.
- Luste, S., Vilhunen, S., Luostarinen, S. (2011) Effect of ultrasound and addition of bacterial product on hydrolysis of by-products from the meat-processing industry. *International Biodeterioration & Biodegradation* 65: 318–325.
- Mahdy, A., Ballesteros, M., González-Fernández, C. (2016) Enzymatic pretreatment of *Chlorella vulgaris* for biogas production: Influence of urban wastewater as a sole nutrient source on macromolecular profile and biocatalyst efficiency. *Bioresource Technology* 199: 319–325.
- Michalska, K., Bizukojc, M., Ledakowicz, S. (2015) Pretreatment of energy crops with sodium hydroxide and cellulolytic enzymes to increase biogas production. *Biomass and Bioenergy* 80: 213–221.
- Mutschlechner, M., Illmer, P., Wagner, A.O. (2015) Biological pre-treatment: Enhancing biogas production using the highly cellulolytic fungus *Trichoderma viride*. *Waste Management* 43: 98–107.
- Neis, U., Nickel, K., Tiehm, A. (2000) Enhancement of anaerobic sludge digestion by ultrasonic disintegration. *Water Science and Technology* 42: 73–80.
- Neyens, E., Baeyens, J. (2003) A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability. *Journal of Hazardous Materials* B98: 51–67.

- Passos, F., Carretero, J., Ferrer, I. (2015) Comparing pretreatment methods for improving microalgae anaerobic digestion: Thermal, hydrothermal, microwave and ultrasound. *Chemical Engineering Journal* 279: 667–672.
- Patil, P.N., Gogate, P.R., Csoka, L., Dregelyi-Kiss, A., Horvath, M. (2016) Intensification of biogas production using pretreatment based on hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry* 30: 79–86.
- Siciliano, A., Stillitano, M.A., De Rosa, S. (2016) Biogas production from wet olive mill wastes pretreated with hydrogen peroxide in alkaline conditions. *Renewable Energy* 85: 903–916.
- Skiadas, I., Gavala, H., Lu, J., Ahring, B. (2004) Thermal pre-treatment of primary and secondary sludge at 70 °C prior to anaerobic digestion. *Proceedings of the 10<sup>th</sup> World Congress, Anaerobic Digestion 2004. Anaerobic bioconversion. Answer for sustainability, vol. 2, 1121–1124, Montreal, Kanada.*
- Xu, J., Yuan, H., Lin, J., Yuan, W. (2014) Evaluation of thermal, thermal-alkaline, alkaline and electrochemical pretreatments on sludge to enhance anaerobic biogas production, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 45: 2531–2536.



# LÄÄKEAINEIDEN ANALYSOINTI SMART EFFLUENTS -HANKKEESSA

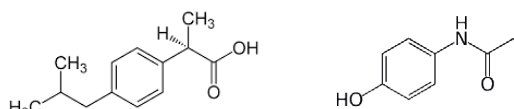
*Marjatta Lehesvaara*

Jätevesiin päätyy paljon erilaisia haitallisia aineita kotitalouksista, laitoksista, teollisuudesta ja maataloudesta. Haitta-aineisiin kuuluu mm. tekstiilien pintakäsittelyaineita, palontorjunta-aineita, pesu- ja puhdistusaineita, kosmetiikkaa ja lääkkeitä. Pelkästään yksittäisen lääkeaineen kuorma jätevesipuhdistamolle voi vuositasolla olla useita tonneja. Mikkelin ammattikorkeakoulu on mukana Smart Effluents -hankkeessa (Uuden sukupolven vedenkäsittelyn ratkaisut vastaamaan vuoden 2050 vaatimuksia). Smart Effluents -projektin tavoitteena on kehittää uusi kokonaisvaltainen jätevedenkäsittelyn puhdistusjärjestelmä tulevan sukupolven tarpeisiin. Hanke saa rahoitusta Tekesin ohjelmasta *Green Growth – Tie kestävään talouteen 2011–2015*. Mikkelin ammattikorkeakoulussa tutkitaan mm. menetelmiä, joilla lääkeainejäämiä pystytään poistamaan MBR-kalvopuhdistuksessa syntyvästä jätevesilietteestä.

## Lääkeaineiden ominaisuuksia

Vesilaitosyhdistyksen vv. 2013–14 tekemässä kartoituksessa jätevedenpuhdistamoilta löytyi 41:tä vesipuitedirektiivin listaamaa haitallista ainetta, joista yli puolet oli erilaisia lääkkeitä (Syke.fi). Erilaisten lääkeaineiden kirjo on valtava. EU:n alueella on käytössä n. 3 000 erilaista lääkettä (<http://oske.ketek.fi>). Lääkealan turvallisuus- ja kehittämiskeskuksen mukaan Suomessa myyntiluvan saaneita lääkkeitä on markkinoilla n. 900 (Vieno 2015, 61). Lääkkeet sisältävät kemialliselta rakenteeltaan, ominaisuuksiltaan ja käyttötarkoituksiltaan erilaisia yhdisteitä. Lääkkeet voivat poistua elimistöstä suurelta osin muuttumattomina tai erilaisina hajoamistuotteina. Aineiden vesiliukoisuudessa on eroa, ja osa lääkkeistä voi sitoutua tehokkaasti orgaaniseen aineeseen ja osa taas heikosti. Jätevedestä lääkkeet voivat tarttua puhdistamoilla lietteeseen, ne voivat hajota tai pysyä muuttumattomina. Useat käytetyistä lääkkeistä päätyvät vielä nykyisin jätevesienpuhdistamoiden kautta vesistöihin. Ympäristössä jotkut lääkkeet voivat toimia hormonihäiritsijöinä tai edistää esimerkiksi antibioottiresistenssin yleistymistä.

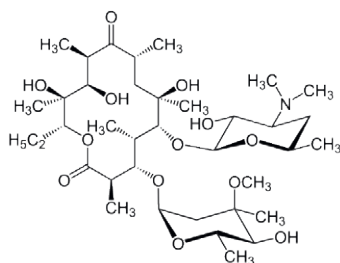
Yleinen tulehduskipulääke ibuprofeeni, kauppanimeltään esim. Ibumax tai Burana, sisältää happoryhmän ja on siten luonteeltaan heikko happo. Asetaminofeenissa (parasetamoli), kauppanimeltään esim. Paramax tai Panadol, on tyyppeä sisältävä aminoryhmä (-NH<sub>2</sub>), joka voi toimia sekä haponäköisesti että emäksisenä. Ibuprofeenin ja asetaminofeenin molekyyliarakenteet on esitetty kuvassa 1.



**KUVA 1. Ibuprofeeni (vasemmalla) ja asetaminofeeni (oikealla) (<https://commons.wikimedia.org>)**

Kummallakin yhdisteellä on aromaattinen rengas. Parasetamolilla renkaaseen on kiinnittynyt fenolinen OH-ryhmä. Fenoleilla on myös lievä happoluonne, ja mitä useampia fenolisia ryhmiä molekyyli sisältää, sitä enemmän sillä on happoluonnetta.

Antibiootit sisältävät usein rikki- tai typpi-atomeja tai molempia. Osa antibiooteista on myös molekyylikooltaan varsin suuria. Esimerkiksi erytromysiinin (kuva 2) moolimassa on 734 g/mol, kun se ibuprofeenilla on 206 g/mol ja parasetamolilla 151 g/mol.

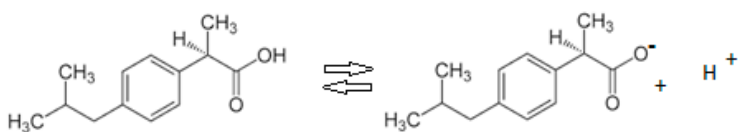


**KUVA 2. Erytromysiini (<https://commons.wikimedia.org>)**

Lääkeaineiden ominaisuudet vaihtelevat niiden molekyylikoosta ja yhdisteen sisältämien kemiallisten ryhmien laadusta riippuen. Yhdisteen sisältämät funktionaaliset ryhmät vaikuttavat sekä aineiden liukoisuusominaisuuksiin että siihen, miten aineet reagoivat muiden aineiden kanssa. Nämä ominaisuudet vaikuttavat jäteveden puhdistusprosessissa lääkeaineen mahdollisesti joutuessa prosessin jälkeen vesiympäristöön. Niillä on myös merkitystä aineiden analysoinnin kannalta.

Orgaanisten aineiden vesiliukoisuutta edistävät aineiden sisältämät pooliset ryhmät (esim. -OH, -COOH). Jos yhdiste on hyvin pienimolekyylinen ja poolinen, se on täysin vesiliukoinen. Tällaisia aineita ovat mm. lyhytketjuiset alkoholit ja hapot. Kun hiiliatomien määrä kasvaa, molekyylin pooliton osuus kasvaa ja vesiliukoisuus pienee. Tällainen yhdiste liukenee paremmin orgaanisiin liuottimiin kuin veteen. Sanoetaan, että yhdiste on rasvaliukoinen.

Happo määritellään aineeksi, joka voi luovuttaa vetyionin eli protonin. Happoryhmän sisältävät yhdisteet esiintyvät vesiympäristössä pH:sta riippuen joko neutraalissa muodossa tai ionisoituneena (kuva 3.). pH:n kohotessa ionisoituneen muodon osuus kasvaa, mikä tarkoittaa myös yhdisteen vesiliukoisuuden kasvua.



**KUVA 3. Ibuprofeeni vesiliuoksessa (mukailien <https://commons.wikimedia.org>)**

Se, esiintyykö yhdiste neutraalissa muodossa vai ionisoituneena, vaikuttaa mm. yhdisteen toksisuuteen ja siihen, miten vesieliöt ottavat vastaan yhdistettä vesiympäristöstä. Yleisesti voi todeta, että pH:n kohoaminen pienentää happoluonteisten yhdisteiden toksisuutta. pH:n lasku puolestaan pienentää emäsluonteisten aineiden toksisuutta ja niiden kerääntymistäipumusta. (Brozinski 2013, 4.)

## Lääkeaineiden eristämisestä ja analysoinnista

Lääkeaineet esiintyvät jätevedessä, lietteessä ja ympäristössä yleensä varsin pienissä pitoisuuksissa ( $\mu\text{g/l}$  tai  $\text{ng/l}$ ). Analysointia varten yhdisteet on eristettävä matriisistaan ja näytettä on usein konsentroitava, jotta haluttujen yhdisteiden pitoisuudet saadaan detektoitavalle tasolle. Orgaanisten aineiden eristämiseen käytetään ns. neste-nesteuuttoa tai nykyisin enimmäkseen kiinteäfaasiuuttoa (SPE, Solid Phase Extraction) (Brozinski 2013,13). Eristämisen jälkeen aineet ovat vielä seoksena, ja niiden erottaminen toisistaan tapahtuu joko nestekromatografilla (HPLC) tai kaasukromatografilla (GC). Näissä detektorina on useimmiten massaspektrometri (MS), mutta muitakin detektoreita on käytössä. (Ternes 2001, 419.)

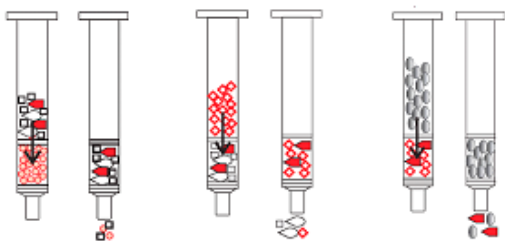
Neste-nesteuutossa vesiliuosta tai veden ja kiinteän aineen seosta ja veteen liukenevat orgaaniset aineet liuotinta ravistellaan erotussuppilossa. Tällöin orgaaniset aineet siirtyvät vesifaasista orgaaniseen liuottimeen edellyttäen, että ne liukenevat paremmin tähän liuottimeen kuin veteen. Ravistelu suoritetaan mieluummin usealla pienemmällä liuotinerällä kuin käyttäen yhtä suurempaa erää. Tämän on todettu parantavan aineiden saantoa. Neste-nesteuutto eristysmenetelmänä ei sovi hyvin vesiliukoisille orgaanisille aineille, esim. lyhytketjuisille alkoholeille ja hapoille, koska ne ovat täydellisesti vesiliukoisia eivätkä siirry riittävästi orgaaniseen liuokseen.

Kiinteäfaasiuutto on erotusmenetelmä, jolla voidaan erottaa seoksen komponentit toisistaan tai haluttu komponentti epäpuhtauksista. SPE:ssä erotettavaa ainetta sitova faasi on kiinteä, ja nestemäinen näyte johdetaan sen läpi paineen tai vakuumin avulla.



SPE-uuton onnistumiseksi kiinteän faasin ja käytettävien liuottimen tulee olla sopivia eristettäville aineille. Aineiden tulee pidäytyä kiinteän faasin pintaan, eivätkä ne saa vielä pesuvaiheessa irrota. Hyvin usein käytetään ns. käänteisfaasimenetelmää, eli kiinteä faasi on pooliton tai melko pooliton ja eluuttina käytetään poolisia liuottimia. Eluutin poolisuutta muuttamalla voidaan vaikuttaa yhdisteiden irtoamiseen kiinteän faasin pinnalta.

Ensimmäisessä vaiheessa näytteen yhdisteet adsorboituvat selektiivisesti kiinteään faasiin. Pesuvaiheessa poistetaan ei-toivottuja komponentteja ja viimeisessä vaiheessa yhdisteet irrotetaan eli eluoidaan sopivalla liuottimella jatkokäsittelyä tai analyysia varten (kuva 4).



**KUVA 4. SPE-uuton vaiheet (kuva mukailten Sigma Aldrich)**

Orgaaniset analyysit, kuten lääkeaineanalyysit, sisältävät useita työvaiheita, minkä vuoksi on vaarana, että analysoitavaa yhdistettä menetetään analyysiketjussa. Sisäisen standardin menetelmällä voidaan korjata esimerkiksi näytteen käsittelyn, matriisihäiriöiden tai laitehäiriöiden aiheuttamaa vääristymää tuloksessa, koska virheet vaikuttavat samalla tavoin sekä sisäiseen standardiin että tutkittavaan komponenttiin. Menetelmässä näytteeseen ja standardinäytteisiin lisätään tietty määrä yhdistettä (sisäistä standardia), joka on luonteeltaan samanlainen analysoitavan aineen kanssa, mutta jota ei esiinny analysoitavassa näytematriisissa.

Kromatografiset menetelmät perustuvat analysoitavien yhdisteiden erottamiseen näytteestä ennen niiden detektointia. Erottuminen perustuu analysoitavien yhdisteiden erilaiseen vuorovaikutukseen kiinteän faasin eli stationääriifaasin ja liikkuvan faasin (neste tai kaasu) kanssa. Sisäisen standardin menetelmässä analysoitavan aineen pitoisuus määritetään vertaamalla sisäisen standardin antamaa vastetta näytteen vasteeseen. Kromatografiassa pitoisuuden määrittäminen perustuu kromatogrammissa esiintyvien sisäisen standardin ja analysoitavan yhdisteen aiheuttamien piikkien pinta-alojen suhteeseen.

Nestekromatografiassa analysoitavat aineet kulkevat nestemäisinä ajoliuoksen eli eluutin mukana kromatografisen systeemin läpi. Kaasukromatografiassa näyte täytyy

höyrystää eli saattaa kaasumaiseen muotoon ennen analysointia. Liikkuvana faasina kaasukromatografisessa systeemissä on kaasu, esim. helium. Nestekromatografiassa analyysi tapahtuu hyvin usein huoneenlämpötilassa tai varsin maltillisesti korotetussa lämpötilassa, kun taas kaasukromatografiassa analysointilämpötila voi kolonnissa kohota jopa 300 °C:seen. Kaikki yhdisteet eivät välttämättä kestä näin korkeita lämpötiloja, vaan hajoavat kromatografisen ajon aikana. Tämä asettaa haasteita varsinkin korkealla kiehuvia yhdisteitä analysoitaessa. Orgaaniset yhdisteet eivät aina sellaisinaan sovellu analysoitaviksi, vaan joudutaan valmistamaan johdannaisia. Johdannaisen valmistuksella voidaan saada aikaa alempana kiehuvia yhdisteitä tai yhdisteitä, joilla ei ole ei-toivottuja vuorovaikutuksia kiinteän faasin kanssa. Esimerkiksi karboksyylihapoista valmistetaan usein metyyliestereitä, ja aminoryhmiä sisältävistä aineista valmistetaan silyliettereitä (Regis Technologies Inc. 2000).

## Lääkeaineiden analysoinnista Smart Effluents -hankkeessa

Smart Effluents -hankkeen käytössä on lääkeaineiden analysointia varten Mamkin ympäristölaboratorion kaasukromatografi-massaspektrometriyhdistelmä (GC/MS). Koska hankkeessa tutkitaan lääkeaineiden vähentämistä MBR-lietteestä, aineiden tulee olla eristettävissä lietteestä ja niiden tai niistä valmistettavien johdannaisten tulee kestää hajoamatta GC/MS-analyysiolosuhteita. Esikokeiden perusteella tässä hankkeessa käsiteltäviksi lääkeaineiksi valikoituivat ibuprofeeni ja asetaminofeeni, jotka molemmat ovat yleisesti käytettyjä särkylääkkeitä.

Ibuprofeeni on happo ja se täytyy muuttaa metyyliesteriksi, jotta se saadaan haihtuvaan muotoon GC/MS-analyysiä varten. Asetaminofeeni voidaan analysoida sellaisenaan. Jotta lääkeaineiden pitoisuuksien muutoksia lietteessä voidaan määrittää, tarvitaan vielä aineita, joiden määrään lääkeaineiden pitoisuuksia verrataan (sisäinen standardi). Näiksi aineiksi valittiin kofeiini ja asetyyლისისyylihapo.

Lääkeaineiden eristämisessä lietteestä käytettiin parasetamolille neste-nesteuuttoa. Parasetamolilla ja kofeiinilla (sis. standardi) ympäröityä happamaksi tehtyä lietettä uutettiin ravistelemalla erotussuppilossa etyyliasetaatilla. Orgaaninen faasi pestiin ravistelemalla 10-prosenttisella  $\text{NaHCO}_3$ :lla ja vedellä, minkä jälkeen se suodatettiin imussa suodatinpaperin läpi. Kuivauksen jälkeen liuotin haihdutettiin pyöröhaihduttimella ja jäännös liuotettiin etyyliasetaattiin ja ajettiin GC/MS:llä. Kromatogrammista identifioitiin asetaminofeenin piikki (RT n. 20,8 min) ja kofeiinin piikki (sisäinen standardi, RT n. 24,2 min).

Ibuprofeenia eristettiin SPE-uutolla (kuva 5). Kuiva Empore-käänteisfaasiuuttopatruuna elvytettiin metanolilla ja pestiin vedellä. Happamaksi tehtyä, ibuprofeenilla ja asetyyლისისyylihapolla (sis. standardi) ympäröityä, suodatettua lietettä imettiin SPE-patruunan läpi alipaineella 400–600 mbar. Patruunaa pestiin vedellä ja 10-prosenttisellä metanoli-vesiseoksella. Kuivauksen jälkeen lääkeaineet eluoiitiin puhtaalla metanolilla.



**KUVA 5. SPE-uuttolaitteisto (kuva Marjatta Lehesvaara)**

Johdannaisen eli metyyliesterin valmistusta varten liuos konsentroitiin typpivirrassa ja hapot esteröitiin GC/MS-ajoa varten  $\text{BF}_3$ -metanolilla  $85\text{ }^\circ\text{C}$ :ssa kahden tunnin ajan. Seokseen lisättiin  $\text{K}_2\text{CO}_3$ -liuosta ja se uutettiin petrolietterillä. Pesun ja konsentroidin jälkeen jäännös ajettiin GC/MS:llä. Kromatogrammista identifioitiin ibuprofeenin metyyliesterin piikki retentioajan (RT n. 22 min) perusteella.

## Yhteenveto

Lääkeaineiden eristämisessä matriisistaan on otettava huomioon yhdisteiden fyysikaalis-kemialliset ominaisuudet. Aineista riippuen voidaan tarvita useita eristysmenetelmiä ja jatkokäsittelytapoja ennen varsinaista analyysiä. Aineiden ominaisuudet vaikuttavat myös analyysimenetelmien valintaan. Smart Effluents -hanke jatkuu edelleen, ja jatkossa perehdytään mm. antibioottimalliaineen eristämisen ja analyysimenetelmiin.

## Lähteet

Brozinski, J.-M. 2013, Identification and application of bile metabolites to assess the exposure of fish to pharmaceuticals in the environment. Väitöskirja. Åbo Akademi.

<http://oske.ketek.fi/Analytiikkapaivat> 2011. Seminaariesitelmä. Pdf-dokumentti. Luonnonaineiden karakterisointi sekä lääkkeet ja hygienia tuotteet. Luettu 27.10.2016

[http://www.syke.fi/fi/FI/Julkaisut/Ymparistolehti/2015/Laakkeemme\\_paatyvat\\_Itamereen\(33650\)](http://www.syke.fi/fi/FI/Julkaisut/Ymparistolehti/2015/Laakkeemme_paatyvat_Itamereen(33650))  
Luettu 27.10.2016

Regis Technologies Inc.2000. GC Derivatization reagent procedures

Sigma Aldrich. 1998. Bulletin 910. Guide to solid phase extraction

Ternes T. 2001. Trends in Analytical Chemistry, vol 20, no 8

Vieno, N. 2015. Haitta-aineet puhdistamo- ja hajalietteissä, Vantaanjoen ja Helsingin seudun vesien-  
suojeluyhdistys ry



# UTILIZATION OF AGRICULTURAL AND FOOD-INDUSTRY-BASED MATERIALS IN BIOGAS PRODUCTION PROCESSES

*Shirin Jafari & Heikki Särkkä*

Biogas is produced by processing residual waste from livestock (dung, manure, and uneaten food), food production (fruit and vegetable waste, residues from meat, fish, and dairy processing, brewery waste, food waste and much more) and effluents from industrial as well as municipal wastewater treatment plants. Biogas can be produced by anaerobic digestion with anaerobic organisms, which digest material inside a closed system. Biogas is primarily methane and carbon dioxide, and may have small amounts of other gases. Many workers have used a variety of bio-wastes to produce biogas through different techniques all over the world. Through the construction of biogas power plants, agriculture assumes an important contribution to supplying energy from renewable resources, as well as to the disposal of organic wastes. Biogas is used globally in energy plants, and is increasingly being converted to natural gas for injection into pipelines or use in vehicles. In this article, different techniques using various sources of organic materials applied for biogas production are discussed.

## Introduction

Biogas production, or anaerobic digestion, is an expanding waste management and renewable energy production method, which also has relevance for nutrient recycling (Lubaek et al. 2012). In general, biogas production is an environmentally beneficial way of producing energy and managing organic wastes. Production of biogas by digestion of organic wastes and other feedstock is one of the important technical solutions contributing to transformation of the energy system from being fossil fuel dependent to renewable energy originated (Thorin et al. 2012). The rise in oil prices triggered exploration and enhancement of various renewable energy sources. Producing biogas from organic waste not only provides a clean and sustainable indigenous fuel to the number of on-farm digesters, but also reduces ecological and environmental deterioration (Rafique et al. 2010).

Landfill gas is created during the anaerobic decomposition of organic substances found in municipal solid waste landfill. The municipal solid waste produces a biogas, which contains methane, a powerful greenhouse gas that causes global warming if it

is allowed to escape to the atmosphere. However, the number of landfill gas projects which collect and utilize this valuable renewable energy is minimal, because the economics of such operation are not adequately attractive. The landfill gas is not widely used, although municipal solid waste landfills are a major source of greenhouse gas emission, particularly in the developing world (Yechiel and Shevah 2016).

Anaerobic digestion is the most common method for organic waste stabilization and results in biogas production at the same time (Athanasoulia et al. 2012). Biowaste is known to contain bacteria such as Salmonella and other microorganisms. Anaerobic digestion produces both biogas (consisting of methane, CH<sub>4</sub>, at 45–70% and carbon dioxide, CO<sub>2</sub>, at 25–50%) and digestate, the process residue. Biogas can be used for combined heat and electricity production or upgraded to biomethane to be injected into the gas grid or used as biofuel in transportation (Rodriguez et al. 2016). Within the different possible treatment routes, anaerobic digestion is a proven and effective solution for food waste treatment and valorization (Zhang et al. 2014).

In the biogas production process the organic material – mainly built up of carbohydrates, proteins and fats – is degraded in several steps to simpler compounds by microorganisms. The process can be divided into four main steps: hydrolysis, acidogenic phase, acetogenic phase, and methanogenic phase. In the first step, the non-water soluble carbohydrates, proteins, and fats are broken down to simple sugars, fatty acids, and amino acids. The products from the first step are then taken up by the microorganisms and are further degraded into short-chain organic alcohols, hydrogen, and carbon dioxide. In the third step acetate is formed. In the last step, methanogenic microorganisms form methane mainly from acetate, carbon dioxide and hydrogen gas (Gerardi 2003; Deublein and Steinhauser 2008). The efficiency of the process is influenced by the availability of the microorganisms to the substrate, which is dependent on the mixing in the biogas reactor and also by the type and structure of the feedstock as well as the operation conditions (Thorin et al. 2012).

Different types of biomass waste have different biogas production potential (Qiao et al. 2011). With the worldwide economic development and population growth, food waste is increasingly produced mainly by hotels, restaurants, families, canteens, and companies. The amount of food waste was nearly 90 million tons in China by 2010. Food waste accounts for a large proportion of the municipal solid wastes in both developed and developing countries (Zhang et al. 2014). The food waste composition will vary according to the different eating habits, with rice, vegetables, meat, eggs, and other main components. Interest in producing biogas from crops has also increased in recent years, because of available field areas and the higher methane yield of crops than manure, which is traditionally used for biogas production with sewage sludge (Weiland 2010). The number of biogas plants has increased rapidly; for example, in Germany there are 7 500 biogas plants. Almost all biogas plants in Germany use energy crops as substrates and over 90% of German biogas plants used maize (*Zea mays* L.) as a substrate in 2006 (Weiland 2010). The biogas plants utilized approximately 962 000 ha of agricultural land area (8.2% of the field area) in 2012 in Germany.

The field area of the energy crops was 2 124 500 ha, including rapeseed for biodiesel production (913 000 ha) and sugar and starch crops for bioethanol production in Germany in 2012 (243 000 ha). In 2011, the amount of biogas plants in Austria was 600 in total, of which 350 were agriculturally orientated (Drosg 2012). In Finland, there are ten biogas plants on farms and 14 biogas plants were in the planning stages in 2011 (Huttunen and Kuittinen 2012).

The energy crops can be divided into two groups: sugar and starch crops, and lignocellulosic crops. Sugar and starch crops – like wheat, barley, and rapeseed – can also be used for food and feed production. Using lignocellulosic crops (miscanthus, switchgrass, giant reed, and poplar), agricultural wastes and residues (straws, leaves and forestry feedstock for bio-energy production) increases the efficiency of sustainable renewable energy production. Lignocellulosic materials consist mainly of three different types of polymers – cellulose, hemicellulose, and lignin – which are associated with each other (Huttunen and Kuittinen 2012).

The two other sources of organic wastes used for the biogas production are the sewage sludge and manures. A large number of studies on conversion technology of sewage sludge as fuel have been investigated. The sludge consists of protein, organisms, and fibrous substances, and it is difficult to dehydrate mechanically. A large part of manure consists of bio-fibers, which are made from lignocellulosic matter. The hydrolysis of such matter is a slow and difficult process, due to complex chemical and physical structure. For example, only 30–50% of the ultimate biogas potential is exploited when pig manure is used as a substrate. Pre-treatments are used to facilitate the methane production by overcoming the limitation of hydrolysis, which includes the solubilization and biodegradation of hemicellulosic and lignin parts of the substrates. Thermal, chemical, and thermo-chemical pre-treatments are mainly used for lignocellulosic substrates (Rafique et al. 2010).

A unique characteristic of anaerobic digestion is the possibility to produce organic fertilizers from a wide variety of organic waste sources (Holm-Nielsen et al. 2009). Many studies have used a variety of bio-wastes to produce biogas through different techniques all over the world, especially in Europe. To review some of the approaches, the studies could be categorized in different strategies and resources as explained below.

## **Plant material and food wastes**

A variety of plant material wastes, including fruits and vegetables as well as field crops, have been used widely to assess their potential for the production of bio-fuels. Some studies have used semi-solid orthofruit waste available from the orthofruit shops and mixed with digested sludge available from the reactors to produce methane through the anaerobic digestion system (Kumar Sharma et al. 2002). The main purpose of anaerobic treatment of semi-solid organic waste available from the orthofruit market



is to lower their pollution potential, as well as recover a gaseous mixture, which can be used as an energy source. As a possible means to improve the biogas production, as well as reduce their pollution potential, the idea of using recycled digested sludge from the reactor, along with the orthofruit waste, while operating the reactor at the maximum retention period has been applied. Purification of the biogas produced has been done by means of CO<sub>2</sub> adsorption, resulting in a higher CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> ratio, and thus improving its use as a fuel for power generation (Kumar Sharma et al. 2002). Kumar Sharma et al. (2002) concluded that anaerobic digestion of semi-solid orthofruit waste, when mixed with the digested sludge available from the reactor, provides a global optimization for an anaerobic digestion process, and it enhances biogas production and minimizes the pollution potential of output sludge.

In another study, the optimization of a microwave pretreatment for wheat straw solubilization and anaerobic biodegradability has been assessed. The maximum yield of methane production was obtained at 150° C with an improvement of 28% compared to an untreated sample. In addition, at this temperature the time to reach 80% of the methane volume obtained from untreated straw was about 35% (Jackowiak et al. 2011). The evaluation of the methane potential from whole steam-exploded wheat straw and the estimation of the energy potential from a combination of ethanol and biogas production on the basis of steam-exploded wheat straw has also been studied. Pretreatment of wheat straw by steam explosion significantly increased the methane yield from anaerobic digestion by up to 20% compared to untreated wheat straw (Bauer et al. 2009).

A similar investigation has been carried out to enhance paddy straw digestibility and biogas production through sodium hydroxide (NaOH) pretreatment. The paddy straw was pretreated with NaOH by soaking (24 h) in different concentrations of NaOH and supplementing with microwave irradiations. 4% NaOH and a 30-min microwave was found to be the best pretreatment, which resulted in a 65.0% decrease in lignin content and 88.7% reduction in silica content. This increased digestibility due to reduced lignin and silica content, which resulted in a 54.7% increase in biogas production. Scanning Electron Microscopy of pretreated paddy straw revealed a breakdown of lignocellulose structure resulting from the tearing of different layers of the cell wall of paddy straw (Kaur & Phutela, 2016). The application of hydrodynamic cavitation for the pre-treatment of wheat straw with the objective of enhancing biogas production has also been investigated. It was observed that the shorter amounts of methane yield were obtained with untreated wheat straw, whereas the highest amount was obtained with hydrodynamic cavitation of pre-treated wheat straw, confirming the favourable changes during the pre-treatment. The combined pre-treatment using KOH and hydrodynamic cavitation gave the maximum yield of biogas. Overall, it has been established that significant enhancement in the biogas production can be obtained due to the pretreatment using hydrodynamic cavitation, which can also be further intensified by combination with chemical treatment (Patil et al. 2016).

Studies have also implemented a full-scale co-digestion plant using the plant organic wastes from households and restaurants which were mixed and digested with crops from pastureland. The results indicate the potential to increase biogas yield from the process up to over 30% with pre-treatment of the feed and including membrane filtration in the process. Neural networks have the potential to be used for prediction of biogas production. Further, it was shown that the residues from biogas production can be used as fertilizers, but that the emission of  $N_2O$  from the fertilized soil is dependent on the soil type and spreading technology (Thorin et al. 2012).

The methane production potential of traditional crops including grasses, maize, and knapweed, and novel energy crops consisting of Jerusalem artichoke, sunflower, brown knapweed, sorghum, Japanese millet, giant knotweed, giant goldenrod, hemp-agrimony, and amaranth has been evaluated in boreal conditions. The highest methane yield per hectare was achieved with maize and the second highest with brown knapweed (Seppälä 2013). Grass has been considered as a potential feedstock for biogas production, due to its low water consumption compared to other crops, and the fact that it can be cultivated in non-arable lands, avoiding the direct competition with food crops. However, biogas production is limited by the characteristics of the feedstock, particularly its complex lignocellulosic structure. Hence, different pretreatment methods were investigated for grass structure disruption before undergoing the anaerobic digestion process. Pretreatment techniques were categorized into mechanical, microwave, thermal, chemical, and biological groups. Most pre-treatment techniques could improve biogas production from grass in different percentages around 50%. In cases of mechanical methods, the improvement increases to around 60%. Mechanical pre-treatments led to a reduction of the particle size of the feedstock, which was the best way to improve the availability of the substrate in the case of lignocellulosic materials. Despite mechanical methods normally being related to high energy requirements, they are still considered very promising, and more research is believed to improve the energy balance for such methods (Rodriguez et al. 2016).

Conventional biogas processes have focused on methane production; however, hydrogen has been widely recognized as a clean energy carrier. A two-stage anaerobic process producing both hydrogen and methane has already been proposed. One study focused on the mesophilic anaerobic hydrogen production from pulp and paper sludge and food waste pretreated by  $NaOH$  or  $H_2SO_4$ , and the subsequent thermophilic anaerobic methane production with the effluent in a two-stage process. The maximum hydrogen yield ( $78.35 \text{ mL g}^{-1} \text{ VS}_{\text{fed}}$ ), which was 50.21% higher than that of the control, was achieved when  $10 \text{ g NaOH}/100 \text{ g TS}_{\text{substrate}}$  was used. However, the maximum methane yield ( $383.8 \text{ mL g}^{-1} \text{ VS}_{\text{fed}}$ ) was obtained in the control and 64% soluble chemical oxygen demand removal efficiency was achieved. In conclusion,  $NaOH/H_2SO_4$  pretreatment was suitable for enhancing hydrogen production (Lin et al. 2013).

## Manures and poultry droppings

One study focused on investigation of the effect of pre-treatments: thermal, thermo-chemical, and chemical pre-treatments on the biogas and methane potential of dewatered pig manure. A laboratory scale batch digester was used for these pre-treatments at different temperature ranges. Results showed that thermo-chemical pretreatment has a high effect on biogas and methane potential in the temperature range (25–100° C). Maximum enhancement was observed at 70° C with an increase of 78% biogas and 60% methane production. Thermal pretreatment also showed enhancement in the temperature range (50–100° C), with maximum enhancement at 100° C showing a 28% biogas and 25% methane increase (Rafique et al. 2010).

Energy balances were analyzed from a life-cycle perspective for biogas systems based on eight different raw materials, including cow manure, pig manure, grease separator Ley crops, municipal organic waste, slaughterhouse waste and tops and leaves of sugar beet straw. Results showed that the energy input into biogas systems (i.e. large-scale biogas plants) overall corresponded to 20–40% (on average, approximately 30%) of the energy content in the biogas produced. The net energy output turned negative when transport distances exceeded approximately 200 km (manure), or up to 700 km (slaughterhouse waste). Large variations existed in energy efficiency among the biogas systems studied (Berglund and Börjesson 2006).

Comparative analysis of the rates of production of biogas from various organic wastes and weeds which enabled the determination of optimal ratio of poultry droppings to domestic wastes was conducted. The total gas produced within the 22 days of experimentation was 1771 cm<sup>3</sup>. The maximum volume of gas amounting to 809 cm<sup>3</sup> was produced by the sample containing 50% poultry dropping and 50% weeds (Okonkwo et al. 2016).

In addition to the earlier mentioned individual wastes, different manures together with foods and vegetable wastes, as well as municipal sewage sludge, have been used as sources of materials for biogas production. For example, cow manure, pig manure, municipal sewage sludge, fruit/vegetable waste, and food waste have been chosen in many studies as typical municipal biomass wastes. In addition, hydrothermal pre-treatment was used to accelerate digestion and increase biogas production. Biochemical methane potential test was used to evaluate biogas production for raw biomass and hydrothermal treated waste. Raw materials of fruit/vegetable and food waste show higher methane production than that of cow manure, pig manure, and municipal sewage sludge. After hydrothermal pretreatment at typical conditions (170° C at 1 h), the biogas production of pig manure, cow manure, fruit/vegetable waste, and municipal sewage sludge increased by 7.8, 13.3, 18.5, and 67.8%, respectively. As for treated food waste, the biogas decreased by 3.4%. The methane yield of pig manure, fruit/vegetable waste, and municipal sewage sludge increased by 14.6, 16.1, and 65.8%, respectively. Meanwhile, for treated cow manure and food waste, the methane production decreased by 6.9% and 7.5% (Qiao et al. 2011).

## Environmental life cycle assessment

Biogas presents an increasing energy production form in municipalities and rural locations, and it is a feasible waste management option. In terms of environmental life cycle assessments, biogas production seems to offer a unique opportunity to combine nutrient recycling with energy production using various under-utilized resources such as municipal bio-wastes or manure. Life cycle assessments of biogas production suggest benefits related to CO<sub>2</sub> emission savings and the replacement of chemical fertilizers, for example. Huttunen et al. (2014) identified and explored critical points related to biogas production by reviewing life cycle assessment studies and comparing them to actual choices made at Finnish biogas plants based on stakeholder interviews. The interviews demonstrated different approaches to biogas production. Conventional waste management companies view biogas production mainly as an evolvement of the waste management system. The relatively new actors in the organic waste treatment sector, such as small private biowaste companies with an initial interest in energy production, or energy-related companies and researchers, have a more holistic vision on the waste energy nutrient cycle. They view biogas production as a new way of combining energy production, waste management and nutrient recycling, a step towards closed loops and holistic thinking. The different approaches prompted different visions related to the importance and wider societal effects of biogas production. They finally concluded that the key phases influencing the environmental impacts of biogas production are the selection of the raw material, the biogas production process, the end use of the biogas, and the end use of the digestate. The existing biogas plants have therefore varying practices related to biogas production and actualization of the life cycle benefits, which is influenced by policies, local contexts, and the purposes of the biogas production activity (Huttunen et al. 2014).

A life-cycle energy and environmental assessment was also performed for a biogas–digestate utilization system in China (Chen et al. 2012). The results suggest that biogas utilization (heating, illumination, and fuel) and comprehensive digestate reuse are of equal importance in the total energy production of the system, and they also play an important role in systemic greenhouse gas mitigation. Improvement can be achieved in both energy production and emissions mitigation when the ratio of the current three biogas utilization pathways is adjusted. Regarding digestate reuse, a tradeoff between energy and environmental performance can be obtained by focusing on the substitution for top-dressing, base fertilizers, and the application to seed soaking (Chen et al. 2012).

Poeschl et al. (2012) conducted an attributional life cycle assessment of multiple biogas production and utilization pathways against specific base scenarios. The objective was to rate the environmental performance of the individual systems and to identify areas where further mitigation of potential environmental impacts could be realized to enhance environmental sustainability of biogas deployment. Results indicated that for the small-scale plants the most promising pathway for sustainable biogas utilization would be in tri-generation. Tri-generation could reduce the overall environmental impact by almost 200% (Poeschl et al. 2012).

## Conclusions

Biogas is attracting significant attention as an increasingly interesting renewable and sustainable energy technology. Although biogas technology seems relatively mature, it is not considered fully economically viable and usually requires significant financial incentives to successfully compete with commercial fossil-fuel-based energy technologies. Three major factors limit expanded adoption of biogas energy technologies: (i) high cost of digestible feedstocks, (ii) limited local availability of such feedstocks, and (iii) limited availability of innovations that could make biogas energy more economically attractive (Budzianowski 2016). In some highly developed countries such as Germany biogas production receives significant financial support which has led to rapid expansion of this renewable energy technology over recent years. Additionally, some other European countries such as Denmark, Austria, Italy, or Sweden have legislation and financial incentives beneficial for investments facilitating expanded use of biogas energy. Unfortunately, most other countries offer insufficient or no financial support for the production, conditioning, and utilization of biogas. Importantly, these countries usually cannot adopt most of the existing biogas technologies directly from highly developed countries (e.g. technologies utilizing expensive energy crops) because such biogas plants would make a loss. Consequently, for a large number of those countries, especially if they have limited access to cheap digestible biomass, availability of innovations that could facilitate cost-effective production, conditioning, and utilization of biogas is of particular importance (Budzianowski 2016).

## References

- Athanasoulia, E., Melidis, P., Aivasidis, A. (2012). Optimization of biogas production from waste activated sludge through serial digestion. *Renewable Energy*, 47, 147-151.
- Bauer, A., Bosch, P., Friedl, A., Amon, T. (2009). Analysis of methane potentials of steam-exploded wheat straw and estimation of energy yields of combined ethanol and methane production. *J Biotechnol*, 142(1), 50-55.
- Berglund, M., Börjesson, P. (2006). Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production. *Biomass and Bioenergy*, 30(3), 254-266.
- Budzianowski, W. M. (2016). A review of potential innovations for production, conditioning and utilization of biogas with multiple-criteria assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1148-1171.
- Chen, S., Chen, B., Song, D. (2012). Life-cycle energy production and emissions mitigation by comprehensive biogas-digestate utilization. *Bioresour Technol*, 114, 357-364.
- Deublein, D., Steinhauser, A. (2008). *Biogas from waste and renewable resources. An introduction*, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

- Drosg, B. (2012). Austrian country report. IEA Bioenergy Task 37. [http://www.iea-biogas.net/\\_content/publications/member-country-reports.html](http://www.iea-biogas.net/_content/publications/member-country-reports.html)
- Gerardi, H. (2003). *The microbiology of anaerobic digesters*. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey.
- Holm-Nielsen, J.B., Al Seadi, T., Oleskowicz-Popiel, P. (2009). The futures of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology* 100: 5478-5484.
- Huttunen, M.J., Kuittinen, V. (2012). Suomen biokaasulaitosrekisteri no: 15, tiedot vuodelta 2011. Publications of the University of Eastern Finland. Reports and Studies in Forestry and Natural Sciences, no 8.
- Huttunen, S., Manninen, K., Leskinen, P. (2014). Combining biogas LCA reviews with stakeholder interviews to analyse life cycle impacts at a practical level. *Journal of Cleaner Production*, 80, 5-16.
- Jackowiak, D., Bassard, D., Pauss, A., Ribeiro, T. (2011). Optimisation of a microwave pretreatment of wheat straw for methane production. *Bioresour Technol*, 102(12), 6750-6756.
- Kaur, K., Phutela, U. G. (2016). Enhancement of paddy straw digestibility and biogas production by sodium hydroxide-microwave pretreatment. *Renewable Energy*, 92, 178-184.
- Kumar Sharma, V., Lastella, G., Testa, C., Cornacchia, G., Notornicola, M., Voltasio, F. (2002). Anaerobic digestion of semi-solid organic waste: production and its purification. *Energy conversion and management*, 43, 63-75.
- Lin, Y., Liang, J., Wu, S., Wang, B. (2013). Was pretreatment beneficial for more biogas in any process? Chemical pretreatment effect on hydrogen–methane co-production in a two-stage process. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19(1), 316-321.
- Lubaek, R., Christensen, T.B., Kjaer, T. (2012). Governing innovation for the sustainable sector – a historical overview and analysis of innovation. *Sustainable Development*, 21: 171-182.
- Okonkwo, U. C., Onokpite, E., Onokwai, A. O. (2016). Comparative study of the optimal ratio of biogas production from various organic wastes and weeds for digester/restarted digester. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*.
- Patil, P. N., Gogate, P. R., Csoka, L., Dregelyi-Kiss, A., Horvath, M. (2016). Intensification of biogas production using pretreatment based on hydrodynamic cavitation. *Ultrason Sonochem*, 30, 79-86.
- Poeschl, M., Ward, S., Owende, P. (2012). Environmental impacts of biogas deployment – Part II: life cycle assessment of multiple production and utilization pathways. *Journal of Cleaner Production*, 24, 184-201.

- Qiao, W., Yan, X., Ye, J., Sun, Y., Wang, W., Zhang, Z. (2011). Evaluation of biogas production from different biomass wastes with/without hydrothermal pretreatment. *Renewable Energy*, 36(12), 3313-3318.
- Rafique, R., Poulsen, T. G., Nizami, A.-S., Asam, Z.-u.-Z., Murphy, J. D., Kiely, G. (2010). Effect of thermal, chemical and thermo-chemical pre-treatments to enhance methane production. *Energy*, 35(12), 4556-4561.
- Rodriguez, C., Alaswad, A., Benyounis, K. Y., Olabi, A. G. (2016). Pretreatment techniques used in biogas production from grass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Seppälä, M. (2013). Biogas Production from High-Yielding Energy Crops in Boreal Conditions. *Jyväskylä Studies in Biological and Environmental Science*. Thesis 266.
- Thorin, E., Lindmark, J., Nordlander, E., Odlare, M., Dahlquist, E., Kastensson, J., Pettersson, C.M. (2012). Performance optimization of the Växtkraft biogas production plant. *Applied Energy*, 97, 503-508.
- Thorin, E., Nordlander, E., Lindmark, J., Dahlquist, E., Yan, J., Fdhila, R.B. (2012). Modeling of the biogas production process. A review. *International Conference on Applied Energy*, 1-9.
- Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85: 849–860.
- Yechiel, A., Shevah, Y. (2016). Optimization of energy generation using landfill biogas. *Journal of Energy Storage*, 7, 93-98.
- Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., Tan, T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 383-392.

# CHARACTERIZATION OF MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILL FOR SECONDARY RAW MATERIALS

*Heikki Särkkä & Sami Hirvonen & Jonne Gråsten*

Landfill mining for secondary raw material recovery has received growing interest in recent years. Metsäsairila municipal solid waste (MSW) landfill was investigated as part of the Smart ground project to find out its material content (e.g. metals, plastics, wood, paper, and cardboard) as well as composition of fine fraction (<20 mm). Sampling wells were core drilled by a hydraulic piling rig and samples collected by excavator and sorted to different waste fractions manually. Results showed that the amount of critical raw materials was not high enough from an economical point of view to recover these metals from MSW landfill. However, the economic viability of landfill mining could be increased by utilizing additional materials fraction (e.g. plastics, paper and wood) and biogas collected from the landfill for energy production.

## Introduction

Landfill mining is a rather new area of science connecting all the essential elements of the effective implementation of circular economy; however, there are between 150,000 and 500,000 historic and still active landfills in the EU (Hogland et al. 2011), which can deliver a significant stream of secondary materials and energy. The number of landfills has decreased in the early 2000s from the numbers of the late 1970s. Similarly, the average size of the landfills has increased notably. The smaller landfills have been closed or removed and integrated to larger landfill entities.

Municipal landfills consist of about 50–60 per cent by weight of a soil-type material, 20–30 per cent by weight of material suitable for incineration (e.g. plastic, paper and wood), 10 per cent by weight of inorganic materials (e.g. concrete, stones, and glass) and a few weight per cent of metals (Kaartinen et al. 2013a). In old landfills, the particularly high proportions of mineral content but also the metallic components (e.g. aluminum and electronic equipment waste) could be recycled (Franke and Mocker 2013). From the energy point of view, the high calorific waste components such as wood, plastics, or paper/cardboard could act as substitute fuel. Estimations show that 178 million Mg of plastics, 83 million Mg of iron and 13 million Mg of nonferrous metals have been disposed of in landfills since 1975 (Franke and Mocker 2013). However, when the full potential in MSW landfills are included, the magnitude is notably higher. For example, in Germany alone the estimated total energy potential



stored within the landfills during the decades is around 7700 PJ (Franke and Mocker 2013). The annual global methane emission from landfills is estimated at between 14–40 Tg (Humer and Lechner 2003; Bogner and Matthews 2003) when world's annual total methane emission is around 550 Tg (Bogner and Matthews 2003).

Currently, the active Smart Ground project is receiving funding from European Union's Horizon 2020 research and innovation program. The project intends to foster resource recovery in landfills by improving the availability and accessibility of data and information on secondary raw materials (SRM) in the EU area, while creating synergies among the different stakeholders involved in the SRM value chain. One important part of the project is in-depth characterization of the target pilot landfills. It will take into account the type of the material dumped into the landfills (e.g. metals/ores in municipal and industry landfills and in mining landfills, aggregates, and industrial minerals from mining and industrial dumps or organic material and SRMs suitable for incineration). Each partner country involved in project has selected at least three target pilot landfills from two main categories: municipal (e.g. community and local industry wastes) and industry landfills (e.g. mining industry). The project team has used existing information sources, e.g. databanks with waste information, scientific publications, and information gathered from dedicated networks to identify the most potential pilot sites. This information was complemented, for example, with water analyses and/or spatial analysis using aerogeophysical and lidar data.

## Materials and methods

Metsäsairila was selected as a municipal solid waste (MSW) landfill under more detailed investigation in Finland. It is located in the south-eastern region in Finland, more precisely at the City of Mikkeli. It has both active and old closed parts and it has been operating since the beginning of 1970s. The surface area of the closed landfill area is around 8 ha and currently active area around 3 ha.



**FIGURE 1. Sampling wells in landfill area (Photo by Ramboll Finland Oy)**

The most promising sampling points were selected based on the geophysical measurements implemented in the landfill area by the Geological Survey of Finland (GTK). After this, five research (sampling) wells were drilled by hydraulic piling rig in the landfill area (Figure 1). Samples with codes DH1, DH2a, and DH3 were from the old, closed landfill area and samples with codes DH6 and DH7 were from the currently active area. Waste material collected from sampling well DH2a is shown in Figure 2.



**FIGURE 2. Waste material collected from the DH2a sampling well (surface part) (Photo by Ramboll Finland Oy)**

More detailed information on collected waste samples is presented in Table 1. Samples were moved to a sorting point, where they were manually sorted to different particle size categories (>100 mm, 20–100 mm and <20mm) and waste fractions (metal, energy fraction (wood, paper and cardboard, plastic and textile), soil, and others). Waste fraction separation was done to fraction sizes of 20–100 mm and >100 mm. Sorted samples from each research well were transferred to separate big plastic bags. Material size of <20 mm was packed in plastic buckets. After the weighing procedure, samples were transferred to laboratories for more detailed analysis. Analysis of samples for elements, total organic carbon (TOC), dissolved organic carbon (DOC), chloride, and fluoride was implemented in an external laboratory (ALS Finland Oy).

**TABLE 1. Amounts of collected samples at every sampling well**

Sample ID	Sample depth (m)	Total amount of collected waste material (kg)	Amount of sorted sample (kg)
DH1	3,5-17	10 220	406,0
DH2a	3-12	4 780	192,3
DH3	2,5-10	4 220	277,4
DH6	0,2-5	1 580	282,2
DH7	0,2-5	2 140	284,4

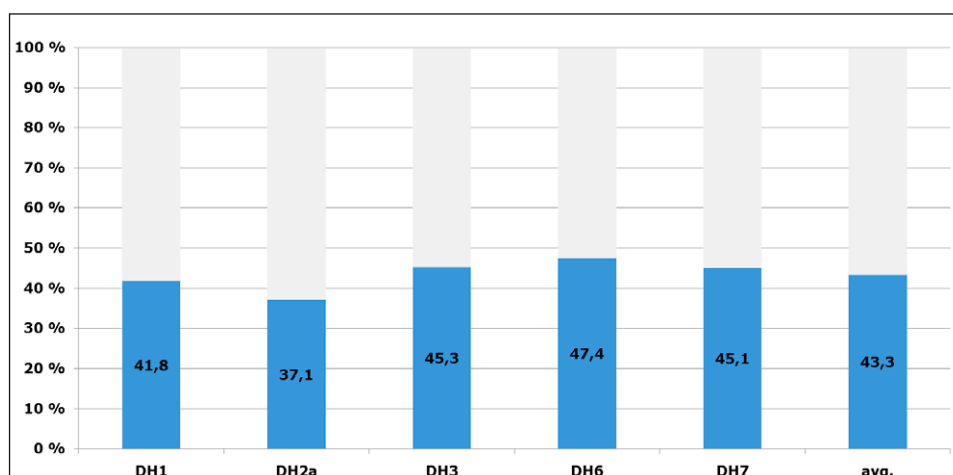
## Results and discussion

The distribution of sorted samples into different particle size categories is somewhat similar between the samples from different wells (Table 2). For example, the proportions of particle size distributions from wells DH3 and DH6 are quite similar; even DH3 was located in an old closed area and DH6 in the currently active area. Sorted fractions <100 mm and 20–100 mm, which were combined from all wells together consisted mainly of energy fraction (plastic, paper, wood, cardboard, 76%), metals (5%), soil (17%), and others 2%. Results follow a similar trend to research implemented by Kaartinen et al. (2013a) at the MSW landfill in Kuopio, Finland. They observed that the amount of fine material (<20 mm) was found to be ca. 50% (w/w), which also supports previous reports of the amount of the fines (Quaghebeur et al. 2013). Fine material consists mainly of landfilled wastes but also of the landfill cover materials (usually soil). In our study case, fine material fraction varied from 37% to 47% depending on the well (Figure 3). The fine fraction mainly included soil material but small particles of plastic, paper, and wood were also present.

**TABLE 2. Weight distribution of different waste fractions**

Sample ID	DH1	DH2a	DH3	DH6	DH7	Average
	kg	kg	kg	kg	kg	kg
<b>Weight of the aggregate</b>	406,02	192,33	277,39	282,21	284,38	288,5
<b>&gt;100 mm</b>	<b>111,51</b>	<b>68,23</b>	<b>50,03</b>	<b>69,57</b>	<b>81</b>	<b>76,1</b>
metal	6,54	9,3	3,75	2,45	1,7	4,7
wood	8,9	11	3,4	5,06	13,6	8,4
paper and cardboard	8,15	11,92	4,27	5,52	8,8	7,7
plastic	44,2	30,4	30,96	41,2	27,8	34,9
textiles	13,92	4,38	5,73	8,99	28	12,2
soil	29,8	1,23	1,92	6,35	1,1	8,1
others	0	0	0	0	0	0
<b>20–100 mm</b>	<b>124,71</b>	<b>52,7</b>	<b>101,76</b>	<b>78,84</b>	<b>75,18</b>	<b>86,6</b>
metals	2,82	3,19	6,76	2,22	1,54	2,8
wood	25,49	8,02	12,6	20,9	14,52	13,6
paper and cardboard	12,37	6,77	12,5	8,7	10,5	8,5
plastic	30,2	19,8	36,4	20,5	14,44	20,2
textiles	18,11	4,07	4,41	2,8	5,2	5,8
soil	34	10,12	25	19,9	26,18	23
others	1,72	0,73	4,09	3,82	2,8	2,6
<b>&lt;20 mm</b>	<b>169,8</b>	<b>71,4</b>	<b>125,6</b>	<b>133,8</b>	<b>128,2</b>	<b>125,8</b>

Chemical parameters measured from the waste fraction of <20 mm are presented in Table 3. According to analysis of metals, fine fractions of sorted samples contained primarily compounds of Ba, Cr, Cu, Zn, and Pb. Amounts of Ag, Au, and In were rather low, as expected. Concentrations of heavy metals are lower than in the study by Quaghebeur et al. (2013). This reveals a difference in the composition and the characteristics of the waste materials in different MSW landfills with regard to type, location, and the period during the waste was landfilled. The amount of organic content (TOC) was in the same range as similar studies done previously (Quaghebeur et al. 2013, Kaartinen et al. 2013a, Kaartinen et al. 2013b). Sampling points in the active landfill area (DH6 and DH7) showed higher TOC concentrations than samples from the old, closed area. This indicates that organic material has degraded with longer time.



**FIGURE 3. Percentage of <20 mm fraction in the wells investigated**

Gutiérrez-Gutiérrez et al. (2015) reported of the critical raw material (CRM) studies from the four British MSW-based landfills. Landfills were operating between the following periods and receiving MSW, commercial, and industrial waste: 1980–1999, 2007–2013, 1998–2005, and 1992–2011. The concentration of rare earth elements (REEs: Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) was  $220 \pm 11$  mg/kg, while that of platinum group metals (PGMs: Pt, Pd, Ru) was  $2,1 \pm 0,2$  mg/kg, and  $156 \pm 7$  mg/kg for the other critical metals (Li, Ln, Sb, Co). In our study concentrations were lower, and for REEs  $87 \pm 13$  mg/kg. Concentrations of Pt, Pd, and Ru were lower than  $0,5$  mg/kg for each metal. Similarly, Ce was the most abundant rare metal in our study and the study by Gutiérrez-Gutiérrez et al. (2015).

**TABLE 3. Chemical parameters measured from the waste fraction of < 20 mm**

		DH1	DH2A	DH3	DH6	DH7
Dry content 105° C	%	68,5	64,8	62,6	74,2	69,2
TOC	% k.a.	3,69	4,56	5,8	5,99	9,57
DOC	mg/l	24,7	6,24	74,7	27,6	27,9
As	mg/kg	5,64	17,2	11,1	3,1	2,9
Ag	mg/kg	0,62	1,41	<0,50	<0,50	<0,50
Ba	mg/kg	146	285	232	132	173
Cd	mg/kg	0,45	0,98	0,93	<0,40	<0,40
Cr	mg/kg	55,7	65,1	79,7	51	73,9
Cu	mg/kg	113	174	144	97,1	61,7
Mo	mg/kg	1,82	2,4	2,7	1,96	2,11
Ni	mg/kg	23	42,2	25	25,5	33,2
Pb	mg/kg	54,7	29,2	120	34,1	31,2
Sb	mg/kg	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
Zn	mg/kg	387	496	794	359	286
Hg	mg/kg	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20
Se	mg/kg	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0
Fluoride	% k.a.	0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Chloride	% k.a.	0,0334	0,0365	0,112	0,0348	0,105
Er	mg/kg	0,632	1,00	0,692	0,654	0,556
Eu	mg/kg	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500
Au	mg/kg	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500
Pd	mg/kg	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
La	mg/kg	16,9	19,2	21,2	13,8	15
Y	mg/kg	6,24	9,43	6,69	6,53	5,55
Pt	mg/kg	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500
Ce	mg/kg	33,8	38,6	42	28,7	31,2
Nd	mg/kg	13,1	15,7	18,5	11,8	10,9
Pr	mg/kg	3,57	4,13	3,52	3,15	2,93
Ru	mg/kg	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500
Sm	mg/kg	2,29	2,82	2,19	2,2	1,93
Gd	mg/kg	1,75	2,28	1,67	1,74	1,51
Tb	mg/kg	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500
Dy	mg/kg	1,28	1,89	1,87	1,34	1,16
Ho	mg/kg	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500	<0,500
Yb	mg/kg	0,543	0,898	0,579	0,546	<0,500
Sc	mg/kg	3,68	4,46	2,85	3,99	4,93
In	mg/kg	1,34	2,47	2,44	0,88	0,55



## Conclusions

Sorted size fractions <100 mm and 20–100 mm from every well followed similar waste distribution as MSW landfills previously investigated. Drilled well samples consisted mainly of energy fraction and the fine material (<20 mm). Amounts of critical raw materials were rather low. This was expectable for municipal solid waste landfill. Even though landfills have the potential for both energy and material valorization, the development of a treatment plant with high resource recovery remains one of the technological challenges for further development of enhanced landfill mining. It is most likely that recovery of critical raw materials from MSW landfills is not economically profitable. On the contrary, biogas (methane) produced during anaerobic degradation of organic material is worth collecting. The biggest recovery potential in MSW landfills is in energy fraction which could be used for energy production (incineration). However, this is not currently profitable in old landfills. All secondary raw material information collected from different landfills will be useful in the future when there will probably be a cost-efficient way to utilize these materials.

## References

- Bogner, J., Matthews, E., 2003. Global methane emissions from landfills: New methodology and annual estimates 1980-1996. *Global Biogeochemical Cycles*, doi:10.1029/2002GB001913.
- Franke, M., Mocker, M., 2013. Resource Potential of Landfill Mining – A National and Regional Evaluation. ATZ Entwicklungszentrum, Institute of Resource and Energy Technology, Technische Universität München, Germany.
- Gutiérrez-Gutiérrez, S.C., Coulon, F., Jiang, Y., Wagland, S., 2015. Rare earth elements and critical metal content of extracted landfilled material and potential recovery opportunities. *Waste Management*, 42, 128-136.
- Hogland, W., Hogland, M., Marques, M., 2011. Enhanced landfill mining: material recovery, energy utilization and economics in the EU (Directive) perspective. In: *Proceedings International Academic Symposium on Enhanced Landfill Mining*. Houthalen-Helchteren, Belgium, 233-247.
- Humer, M.H., Lechner, P., 2003. Effect of methane oxidation on the water balance of the landfill cover and the vegetation layer. In: T.H. Christensen et al. (eds.), *Proc. Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium*, Sardinia, Italy.
- Kaartinen, T., Sormunen, K., Rintala, J., 2013a. Case study on sampling, processing and characterization of landfilled municipal solid waste in the view of landfill mining. *Journal of Cleaner Production*, 55, 56-66.



- Kaartinen, T., Sormunen, K., Rintala, J., 2013b. Studies on material composition of closed Finnish landfills: Potential for landfill mining? In: ELM Consortium (Ed.), 2nd International Academic Symposium on Enhanced Landfill Mining, 14–16 October 2013, Houthalen-Helchteren, Belgium, 1–11.
- Quaghebeur, M., Laenen, B., Geysen, D., Nielsen, P., Pontikes, Y., Van Gerven, T., Spooren, J., 2013. Characterization of landfilled materials: screening of the enhanced landfill mining potential. *Journal of Cleaner Production*, 55, 72-83.

# YMPÄRISTÖARKISTO – MAARAKENNUKSEN UUSIOMATERIAALIEN KÄYTÖN ESTEET

*Riina Tuominen & Pauliina Kuukka*

Suomessa maarakentamisessa käytetään paljon luonnonkiviainesta, sillä sitä on vielä suhteellisen monipuolisesti ja edullisesti saatavissa. Luonnonkiviaineita voidaan kuitenkin korvata uusiomateriaaleilla, joita saadaan esimerkiksi ylijäämämaista, teollisuuden sivutuotteista ja lievästi pilaantuneista maista. Maarakentamisessa uusiomateriaaleja on mahdollista käyttää joko sellaisenaan tai komponentteina korvaamaan luonnon kiviaineita. Soveltuvia käyttökohteita ovat esimerkiksi erilaiset tierakenteet, varastokentät, meluvallit ja kaatopaikkarakenteet.

Maarakennuksen uusiomateriaalien käytön edellytyksiä ja lupakäytänteitä on selvitetty ympäristötiedon hyödynnettävyyden osalta hankkeessa ”Ympäristötiedon sähköisen arkistoinnin ja digitaalisen palvelutoiminnan kehittäminen ympäristöturvallisuuden ja vähähiilisuuden edistämiseksi – Ympäristöarkisto”. Mikkelin ammattikorkeakoulun hanketta rahoittavat Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan unionin Euroopan aluekehitysrahastosta ja Metsäsairila Oy.

## Maarakentaminen Suomessa

Maarakennus on hyvin laaja käsite, jolla tarkoitetaan kaikkea rakentamiseen liittyvää maansiirtämistä, louhintaa, aluskasvillisuuden poistamista ja viherrakentamista. Maarakennustyöt voidaan jakaa yleisesti ottaen raivaustöihin, leikkaustöihin (kaivutyöt), kuormaukseen ja kuljetukseen, pengerrykseen ja tiivistykseen. Rakentaminen tapahtuu pääasiassa erilaisilla ja erikokoisilla koneilla. (Jääskeläinen 2010.)

Suomessa maarakentamiseen käytetään kiviaineita vuosittain yli 100 miljoonaa tonnia, josta noin 70–80 miljoonaa tonnia on luonnon kiviaineita. Valtaosa näistä kiviaineksista käytetään liikenneverkkojen rakentamiseen ja ylläpitoon. 10 % jalostetusta kiviaineksista kuluu asfaltin valmistukseen ja 10 % betoninvalmistukseen. Noin 25 % käytetään talonrakentamiseen, ja kiviaineita käytetään myös muun muassa varastointialueiden, pysäköintialueiden, kenttien ja puistojen rakentamisessa. Suomessa neitseellisten kiviainesten tärkeimpiä lähteitä ovat jäätikköjokikerrostumat, harjut ja reunamuodostumat ja kalliot. (Motiva Oy 2013, Routa-Lindroos Satu ja Nenonen Nina 2014.)

## Maarakentamisessa käytetyt uusiomateriaalit

Luonnonkiviaineksen lisäksi tai sen sijaan maarakentamisessa voidaan käyttää erilaisia uusiomateriaaleja. Näitä ovat mm. kierrätyskiviainekset, eri teollisuuden alojen hyötykäyttöpotentiaalia omaavat materiaalit ja ylijäämämaa-ainekset.

Uusiomateriaalit voidaan luokitella erilaisilla perusteilla. Luokitukset perustuvat raaka-aineen lähteeseen, materiaalin teknisiin ominaisuuksiin tai hyötykäyttökohteeseen. Uusiomateriaalien käytössä on aina otettava huomioon se, että ne ovat teknisiltä ominaisuuksiltaan käyttötarkoitukseen sopivia, tasalaatuisia ja ympäristönsuojelumääräysten mukaisia. Uusiomateriaalien käyttö ei saa aiheuttaa maaperän tai pohjaveden pilaantumisen vaaraa tai muuten vaarantaa ympäristöä tai terveyttä (YSL 527/2014) ja koko käyttöketjun aikaiset ympäristövaikutukset tulee huomioida. (Motiva Oy 2013.)

Valtioneuvosto on antanut asetuksen eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa eli niin sanotun MARA-asetuksen. Tarkoituksena on edistää jätteiden hyödyntämistä määrittämällä edellytykset, joiden täyttyessä asetuksessa tarkoitettujen jätteiden käyttöön maarakentamisessa ei tarvita ympäristönsuojelulain (86/2000) mukaista ympäristölupaa. Soveltamisalaan kuuluvat muun muassa betonimurske sekä kivihiilen, turpeen ja puuperäisen aineksen polton lentotuhkat, pohjatuhkat ja leijupetihiekka. Asetuksessa on määritelty tietyt maarakentamiskohteet, joissa näiden jätteiden laitos- tai ammattimainen hyödyntäminen on mahdollista. (Valtioneuvoston asetus 591/2006.) Mikäli uusiomateriaalin hyödyntämiseen ei voida soveltaa MARA-asetusta, voidaan sen hyödyntäminen tehdä joko ympäristölupamenettelyn kautta tai pienimuotoisen toiminnan ollessa kyseessä ilmoituksenvaraisesti (Mikkola 2013).

Kaivetut maamassat ovat lainsäädännön mukaan lähtökohtaisesti jätettä ja katsotaan uusiomateriaaliksi. Ylijäämämaa-ainekset voidaan käyttää maarakentamisessa ilman erillistä lupamenettelyä, mikäli ne on kaivettu pois rakentamistoimien aikana ja käytetään kaivupaikalla sellaisenaan rakennustarkoituksiin. Mikäli maamassoja ei käytetä välittömästi tai ne ovat osittainkin pilaantuneita, katsotaan ne jätteeksi, joiden hyödyntäminen vaatii ympäristöluvan. (Ympäristöministeriö 2015.)

Purkubetonista voidaan tehdä MARA-asetuksen piiriin kuuluvaa betonimursketta (kuva 1). Siinä murske nähdään jätteenä, joka on valmistettu puretuista betonirakenteista tai uudisrakentamisen ja betoniteollisuuden betonijätteistä murskaamalla. Kappalekoko saa olla enintään 150 millimetriä. Asetuksessa tiiltä käsitellään epäpuhtautena, jota murskatun betonin seassa saa olla enintään 30 painoprosenttia. Betonimurskeen toimittajan on teetettävä sille tarvittavat tutkimukset ja määritettävä muun muassa rakeisuus, routivuus, maksimi-irtotiheys ja optimivesipitoisuus, puristuslujuus, materiaalin puhtaus sekä ympäristökelpoisuus. Betonimurske tarvitsee CE-merkinnän maarakennuskäyttöön käyttökohteen vaatimusten mukaisesti, jos käyttötarkoitukseen on olemassa harmonisoitu standardi. Betonimurskeen hyödyntäminen on mahdollista myös ympäristölupamenettelyllä, mikäli se ei täytä MARA-asetuksen vaatimuksia. (Betoni 2/2011, Vartiainen Johanna 2016.)



**KUVA 1. Purkubetonista voidaan tehdä maarakentamiseen soveltuvaa betonimursketta (kuva Riina Tuominen)**

Tiili valmistetaan savesta, joten se ei itsessään sisällä haitallisia aineita, mutta esimerkiksi muurauksessa käytetyssä laastissa niitä voi olla mukana. Tiilijäte pyritäänkin lajittelemaan muista purkujätteistä erilleen mahdollisimman puhtaasti. Tiilimurske ei kuulu MARA-asetuksen piiriin ja näin sen hyödyntäminen edellyttää ympäristöluvan. Tiilimurskeen käyttö maarakentamisessa on Suomessa vielä hyvin vähäistä. (Vartiainen Johanna 2016.)

Yksi suurimmista jätevirroista teollistuneissa maissa on rakennus- ja purkujäte. Sen osuuden arvellaan valtiosta riippuen olevan jopa 13–40 prosenttia kaikesta tuotetusta jätteestä. Tästä huolimatta rakennus- ja purkujätteen koostumus ja syntymäärät tunnetaan vielä huonosti. Suomen rakennus- ja purkujätteen kierrätysasteeksi ilman energiahyödyntämistä on arvioitu noin 26 prosenttia (vuonna 2013). Euroopan mittakaavassa rakennus- ja purkujätettä syntyy vuosittain noin 500 miljoonaa tonnia, josta kierrätetään karkeasti arvioiden 46 %. (Peuranen & Hakaste 2014, Lahden Seudun Kehitys LADEC Oy 2014.)

Asfalttirouhe ja asfalttimurske ovat materiaaleina verrattavissa luonnonkiviainekseen. Muita kiviainespohjaisia, ominaisuuksiltaan lähellä luonnonmateriaaleja olevia uusiomateriaaleja ovat kuonat ja betonimurske. Huokoisina materiaaleina ne toimivat myös lämmöneristeenä. (Tiehallinto 2007.) Asfalttirouheen, -murskeen ja kuonien hyödyntäminen vaatii ympäristöluvan.

Myös lentotuhkalla on luonnonmateriaaleja parempi lämmöneristyskyky, mutta hienorakeisena materiaalina tuhka voi imeä itseensä runsaasti kosteutta ja liettyä. Se voi olla myös routivaa. Kuiva lentotuhka omaa yleensä jonkin verran sitoutumiskykyä,

minkä vuoksi sitä on käytetty myös sideaineen osana. (Tiehallinto 2007.) Lento- ja pohjatuhkat kuuluvat MARA-asetuksen piiriin.

Rengasrouhe ja -paalit ovat käyttökelpoisia routimattomia kevennysmateriaaleja. Esimerkiksi kevytsoraan verrattuna niiden etuna on se, että veden noste ei vaikuta niihin. Rengasmateriaalien hyödyntäminen vaatii lupamenettelyn. (Tiehallinto 2007.)

Taulukossa 1 on esitetty esimerkkejä eri luonnonkiviaineksia korvaavista uusiomateriaaleista (Tiehallinto 2007).

### TAULUKKO 1. Luonnonmateriaaleja korvaavat uusiomateriaalit (Tiehallinto 2007)

<b>Pengermateriaaleiksi soveltuvat uusiomateriaalit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• rakennuskivilouhimoiden sivukivet</li> <li>• malmikaivosten sivukivet</li> <li>• kivihiilen lentotuhka (soveltuu käytettäväksi kuivissa penkereissä)</li> <li>• puupohjaisista tuhista ja turvetuhkista voidaan tehdä kuivia penkereitä, kun materiaaleilta ei edellytetä routimattomuutta</li> <li>• muut teknisesti korkealaatuisemmat materiaalit</li> </ul>
<b>Hiekkaa korvaavia uusiomateriaaleja</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kivihiilen polton pohjatuhka</li> <li>• leijupetihiekka</li> <li>• masuunihiekka</li> <li>• OKTO-eriste (lämpöeriste, valmistettu ferrokromikuonasta, Tornio)</li> <li>• OKTO-JT-murske (valmistettu teräskuonasta)</li> <li>• kaivosteollisuuden ympäristökelpoinen rikastushiekka</li> </ul>
<b>Mursketta korvaavia uusiomateriaaleja</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• betonimurske</li> <li>• masuunikuonamurske</li> <li>• kappalekuona</li> <li>• teräskuonamurske (tietyt teräskuonamurskeet myös päällystekiviaineksena)</li> <li>• OKTO-murske (valmistettu ferrokromikuonasta, myös päällystekiviaineksena)</li> <li>• OKTO-JT-murske (jakavassa kerroksessa)</li> <li>• masuunihiekka</li> <li>• asfalttimurske (ensisijaisesti pyritään hyödyntämään uusio-päällysteessä)</li> <li>• rakennuskiviteollisuuden sivukivet soveltuvat yleisesti samoihin käyttökohteisiin kuin alueiden normaalit kiviainekset</li> </ul>
<b>Stabiloitua kerrosta korvaavia uusiomateriaaleja</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• asfalttimurske ja -rouhe (sitoutumista lisätään bitumilla)</li> <li>• lentotuhka (tarvittava sementin tai kalkin lisäksi on tutkittava ennakkokokeilla)</li> </ul>

<b>Stabiloinnin sideaineena käytettäviä uusiomateriaaleja (sitoutuminen varmistetaan tarvittaessa sementillä tai kalkilla)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• masuunihiekka</li> <li>• OKTO-filleri (teräskuona)</li> <li>• lentotuhka</li> </ul>
<b>Päällystemassaa korvaavia uusiomateriaaleja</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• asfalttirouhe</li> <li>• tuhka täytejauheena</li> <li>• hematiittifilleri</li> <li>• OKTO-filleri</li> </ul>
<b>Kevennysrakenteet</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vaahtolasimurske</li> <li>• rengasrouhe, rengaspaalit</li> <li>• maisemointitäytöissä ja meluvalleissa myös kokonaiset renkaat</li> <li>• OKTO-kevytkivi (valmistettu teräskuonasta)</li> <li>• masuunihiekka</li> <li>• tuhkat</li> </ul>

## Uusiomateriaalin käytön esteet

Maarakennuksessa käytettyjen mahdollisten uusiomateriaalien käytön esteiden koetaan liittyvän yleisesti lainsäädäntöön, lupiin ja viranomaistoimintaan. Myös harjukiivainesten edullisuus ja muiden materiaalien käytön ja jalostuksen kustannukset sekä niihin vaikuttavat tekijät vähentävät uusiomateriaalien käyttöä. (Korhonen 2013.)

Korhosen (2013) tutkimuksen mukaan uusiomateriaalien käytön esteistä selkeästi merkittävämpänä pidettiin ympäristölupamenettelyä. Sekä itse lupa ja sen velvoitteet että lupamenettelyn ajallinen kesto ja sen ennakoimattomuus koettiin käytön esteeksi. Myös käytettävän uusiomateriaalin käyttökelpoisuuden todentamisen teknisiltä ja ympäristökelpoisuusominaisuuksiltaan koettiin estävän käyttöä.

Käytön esteeksi koettiin myös se, että kysyntä ja tarjonta eivät tunnu kohtaavan ja hyödyntämisestä puuttuu suunnitelmallisuus. Eli kun esimerkiksi ylijäämämaata olisi tarjolla, niin ei ole sopivaa kohdetta, johon sitä voisi käyttää. Vastaavasti ilmenee myös tilanteita, joissa uusiomateriaalia tarvitaan, mutta sitä ei olekaan varastoituna missään. Jotkin rakentamiskohteet taas tulevat niin nopeasti, ettei korvaavia materiaaleja lupa- ja ilmoitusmenettelyineen ole mahdollista saada käyttöön aikataulun puitteissa. (Routa-Lindroos & Nenonen 2014.)

Esteeksi nähdään myös se, että uusiomateriaaleilta puuttuvat kelvolliset välivarastointi- ja jatkojalostusalueet. Tämä aiheuttaa myös sen, että materiaalien hyödyntäminen saattaa edellyttää pitkiä kuljetusmatkoja varastointialueelta hyödynnyskohteeseen, ja sitä kautta myös kustannukset kasvavat. (Routa-Lindroos & Nenonen 2014.)

Maarakentamiseen käytettyjä luonnonmateriaaleja voidaan korvata monilla erilaisilla uusiomateriaaleilla. Joidenkin kohdalla, kuten betonimurskeen ja tuhkan kohdalla, lupakäytänteitä on jo sujuvoitettu. Uusiomateriaalien kyseessä ollessa niiden ympäristöturvallisuudesta on aina varmistauduttava tapauskohtaisesti.

Uusiomateriaalien käytön lisääminen maarakentamisessa kasvaa hitaasti. Syynä siihen pidetään mm. luonnon kiviainesten helppoa saatavuutta ja edullisuutta ja toisaalta lupaprosessien hitautta ja monimutkaisuutta. Tulevaisuudessa, luonnon kiviainesvarojen ehtyessä uusiomateriaalien käyttö lisääntyy vääjäämättä. Mikäli uusiomateriaalien käyttöä halutaan kasvattaa, on sen hyödyntämisen helpottamista ympäristöturvallisuutta vaarantamatta alettava työstää nyt. Käynnissä onkin jo monia uusiomateriaalien käytön edistämistä ja lisäämistä edesauttavia projekteja.

## Lähteet

Betoni 2/2011. Purkubetoni hyödynnetään, mutta vielä yksipuolisesti. PDF-tiedosto. [http://betoni.com/wp-content/uploads/2015/09/BET1102\\_s46-51.pdf](http://betoni.com/wp-content/uploads/2015/09/BET1102_s46-51.pdf).

Jääskeläinen R. 2010. Maarakennuksen ja louhinnan perusteet. ISBN 978-952-5491-61-6. 278 s.

Korhonen, T. 2013. Harjukiviaineisia korvaavien materiaalien käytön esteet. Esiselvitys Kanta- ja Päijät-Hämeestä. Uusiomateriaalien ja kalliokiviainesten käytön esteet -hanke. Hämeen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. HAMELY/341/07.00/2012. Raportti 22.9.2013 YSO/TK.

Lahden Seudun Kehitys LADEC Oy 2014. Kestävä asuminen ja ympäristö. PDF-tiedosto. [http://www.ladec.fi/filebank/2550-ladec\\_k-easy\\_loppujulkaisu2014.pdf](http://www.ladec.fi/filebank/2550-ladec_k-easy_loppujulkaisu2014.pdf).

Mikkola, A. 2013. Valtioneuvoston asetus (591/2006) eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa – ilmoitusmenettelyn toimivuus ja sen parantaminen. Aalto-yliopisto. Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos. Diplomityö.

Motiva Oy 2013. Tutkittua tietoa uusiomateriaalien käytöstä maarakentamisessa. WWW-dokumentti. <http://www.uuma2.fi/johdanto-0>. Päivitetty 11.9.2015.

Peuranen E., Hakaste, H. (toim.) 2014. Rakentamisen materiaalitehokkuuden edistämishjelma. Ramate-työryhmän loppuraportti. Ympäristöministeriön raportteja 17/2014. PDF-julkaisu. [http://www.motivanhankintapalvelu.fi/files/651/RAMATE-tyoryhman\\_loppuraportti\\_2014.pdf](http://www.motivanhankintapalvelu.fi/files/651/RAMATE-tyoryhman_loppuraportti_2014.pdf). ISBN 978-952-11-4342-7 (PDF).

Routa-Lindroos, S. & Nenonen, N. 2014. Luonnonkiviainesten ja niitä korvaavien uusiomateriaalien käyttö Pirkanmaalla. Pirkanmaan POSKI-hanke. PDF-julkaisu. [http://maakuntakava2040.pirkanmaa.fi/sites/default/files/Luonnonkiviainesten%20ja%20uusiomateriaalien%20k%C3%A4ytt%C3%B6\\_valmis\\_140915.pdf](http://maakuntakava2040.pirkanmaa.fi/sites/default/files/Luonnonkiviainesten%20ja%20uusiomateriaalien%20k%C3%A4ytt%C3%B6_valmis_140915.pdf).

Tiehallinto. 2007. Sivutuotteiden käyttö tierakenteissa. PDF-julkaisu. <http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100041-v-07-sivutuoteohje.pdf> ISBN 978-951-803-633-6.

Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 591/2006. WWW-dokumentti. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2006/20060591>.

Vartiainen, J. 2016. Betonin, tiilen, asfaltin ja biotuhkan uusiokäyttö maarakentamisessa. Savonia-ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.

Ympäristöministeriö. 2015. Kaivetut maa-ainekset - jäteluonne ja käsittely. Ympäristönsuojeluosasto. Muistio 3.7.2015. PDF-julkaisu. <http://www.ym.fi/download/noname/%7B5E488047-B25B-45E4-AAE2-6495FBB53B5B%7D/110447>.





# YMPÄRISTÖARKISTON EDELITYKSET

*Esa Hannus & Mika Letonsaari & Riina Tuominen*

Ympäristötiedon sähköisen arkistoinnin ja digitaalisen palvelutoiminnan kehittäminen ympäristöturvallisuuden ja vähähiilisuuden edistämiseksi – Ympäristöarkisto-hankkeen avulla pyritään lisäämään maarakennuskohteissa käytettävien materiaalien myöhempää jäljitettävyyttä. Hanketta rahoittavat Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan unionin Euroopan aluekehitysrahastosta ja Metsäsairila Oy. Hankkeen aikana on selvitetty, millaista ympäristödataa on käytettävissä sekä missä ja millaisessa muodossa data on. Myös arkiston mahdollistavia teknisiä ratkaisuja on testattu. Ympäristöarkistossa yhdistetään kohteiden ympäristötiedot ja paikkatietoon perustuva visualisointi. Arkistossa voidaan myös täydentää ympäristötietoja muulla datalla, kuten havainnollistamalla pohjavesialueet. Selvittämällä, millaisia ominaisuuksia sähköisellä arkistolla tulisi olla ja kuinka niitä voidaan käyttää, saadaan arkistosta käyttäjille toimiva työväline tietojen hyödyntämiseen.

## Ympäristöarkiston mahdolliset aineistot

Ympäristöarkistoon kerättävä ympäristödata koostuu mm. kohteiden sijainti- ja tilannetiedoista, lupapäätöksistä sekä toimenpide- ja tutkimusraporteista. Aineistoa on jakaantunut eri viranomaisille, eikä yhtä yhteistä aineistopankkia ole olemassa. Lupia myöntäviä ja päätöksiä tekeviä viranomaistahoja ovat ELY-keskukset, aluehallintovirastot ja kuntien ympäristönsuojeluviranomaiset. Tutkimus- ja toimenpideraportteja on yritysten, viranomaisten ja konsulttien käytössä. Joissain tapauksissa, kuten pilaantuneen maan kunnostamisen loppuraportin yhteydessä, raportit toimitetaan tiedoksi myös ELY-keskukseen.

Pilaantuneiden maiden osalta tiedot kohteista ovat koottuna valtakunnalliseen Maaperän tilan tietojärjestelmään (MATTI). Järjestelmässä on tietoja alueista, joiden maaperään on voinut päästä haitallisia aineita tai joiden tilaa on selvitetty tai jotka ovat jo puhdistettu. Järjestelmä muodostuu pääosin kuntien toimittamista tiedoista. Ylläpitovastuu järjestelmän tiedoista on ELY-keskuksilla. (Suomen ympäristökeskus 2016.)

Pääsääntöisesti kunnat vievät omat tietonsa pilaantuneista maa-alueista MATTI-järjestelmään. Kunnat pääsevät hyödyntämään maaperän tilan tietojärjestelmää sähköisesti KuntaVAHTI-palvelun kautta. Palvelua ei ole otettu käyttöön jokaisessa kunnassa, eikä sen aineisto taivu suoraan kuntien paikkatietojärjestelmiin. Ympäris-

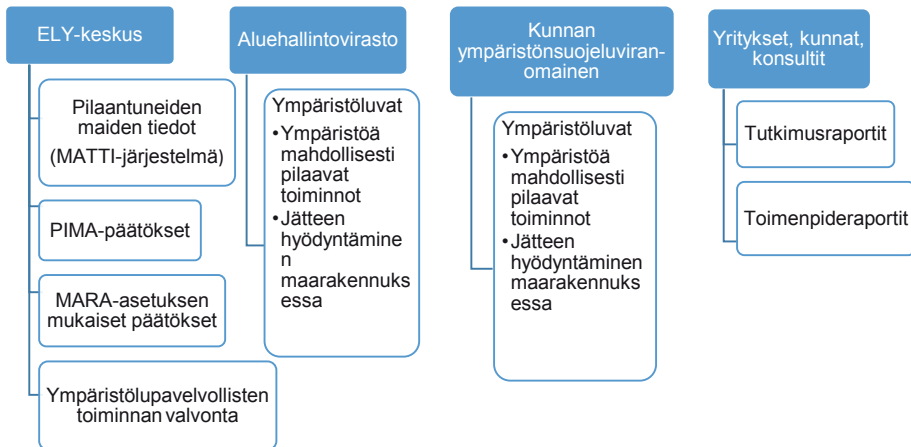
töhallinnon avoimessa Ympäristötietopalvelu KARPALOssa pilaantuneet maat näkyvät kartalla pistetietoina ilman ominaisuustietoja. (Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu 2013a, Isotalo 2013.)

Ympäristön pilaantumisen vaaran aiheuttaville toiminnoille tarvitaan ympäristönsuojelulain mukainen lupa. Ympäristölupia myöntävät aluehallintovirasto tai kunnan ympäristönsuojeluviranomainen. Ympäristönsuojeluasetuksessa (Valtioneuvoston asetus ympäristönsuojelusta 713/2014) on määrätty, mikä viranomainen myöntää luvan millekin toiminnolle. Pääpiirteissään jaottelu noudattaa toiminnan laajuutta ja riskiperusteisuutta; pienimuotoisesta ja/tai vähäriskisestä toiminnasta ympäristölupa haetaan kunnalta, toiminnaltaan suuremmissa ja/tai suurempiriskisissä tapauksissa aluehallintovirastolta. Tieto näistä välitetään myös ELY-keskuksiin, sillä ELY-keskukset valvovat ympäristölupavelvollisten toimintaa. (Ympäristöhallinnon yhteinen tietopalvelu 2013b.) Päätökset ovat julkisia ja uusimmat niistä ovat vapaasti nähtävissä internetissä.

ELY-keskukset käsittelevät pilaantuneen maa-alueen puhdistamista koskevat ilmoitukset ja tekevät niistä päätökset (PIMA-päätös). Jos puhdistaminen edellyttää ympäristölupaa, ympäristöluvat käsitellään aluehallintovirastossa. Päätökset pilaantuneiden maiden kunnostamisesta ovat tallennettuna ELY-keskuksen Valvonta- ja kuormitustietojärjestelmään (VAHTI). Internetissä vapaasti nähtävissä olevat päätökset ovat PDF-dokumentteja. (Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu 2013a.)

Mara-asetuksen mukaiset päätökset ovat tallennettuna ELY-keskuksen Valvonta- ja kuormitustietojärjestelmään (VAHTI). Mikäli maarakentamisessa hyödynnettäväksi aiottu materiaali ei täytä Mara-asetuksen vaatimuksia, lupaa sen käyttämiseksi haetaan joko aluehallintovirastolta tai kunnan ympäristönsuojeluviranomaiselta ympäristöluvan kautta. Päätökset ovat julkisia. (Mikkola 2013, Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu 2013c.)

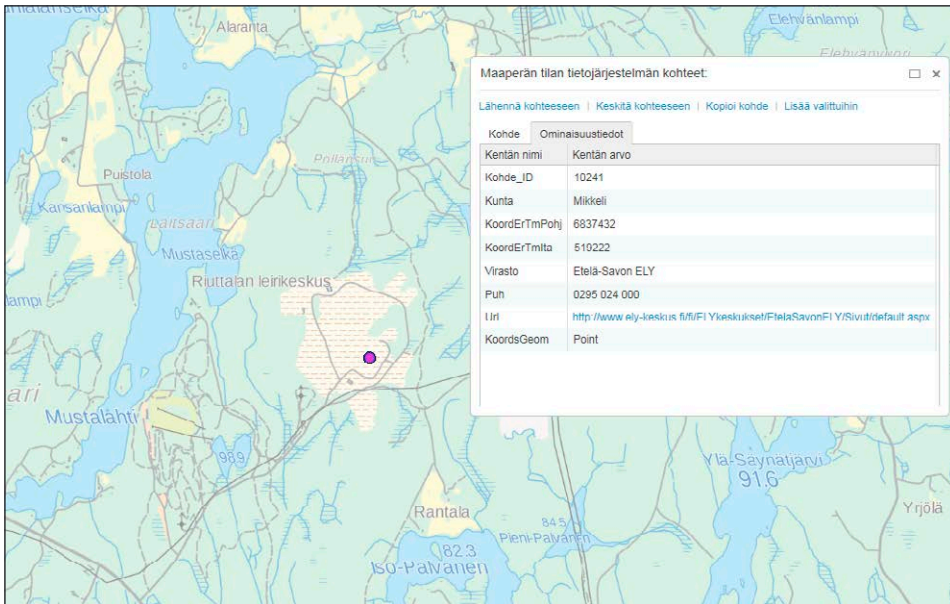
Erilaisia, usein pilaantuneeseen maahan liittyviä tutkimus- ja toimenpideraportteja on yrityksillä, kunnan viranomaisilla ja konsulteilla. Raportit ovat yleensä sähköisinä PDF-muodossa, mutta vanhemmat raportit ovat pelkästään paperitulosteina. Nykyisin raporttien kartat ovat yleensä saatavina myös dgn- tai dwg-pohjaisena. Tutkimus- ja toimenpideraportit eivät yleensä ole julkisia. Kuva 1 havainnollistaa datan nykyisjaintia.



KUVA 1. Ympäristödatan sijoittumisen nykytilanne

## Aineiston käyttö paikkatiedossa

MATTI-aineisto on paikkatietoista, pistemäistä rekisteriaineistoa, jonka käyttöön saamiseksi datana ei ole kätevää kanavaa. Mikäli aineiston hankkii (mahdollista vain viranomaisille) taulukkomuodossa, sen saa helposti paikkatietokäyttöön. Rekisteripisteluonteensa takia aineisto sopii sellaisenaan lähinnä vain ongelmapaikkojen kohdetietojen ja yleissijaintien visualisointeihin. Tietyin rajauksin aineistoa voi käyttää myös visualisoimaan sijaintipisteen suhdetta muihin kohteisiin, kuten rakennuksiin, vesistöihin ja teihin sekä myös esimerkiksi etäisyysanalyysiin. On kuitenkin huomattava, että pistemäinen sijainti ei aina kuvaa asiaa hyvin tai riittävän tarkasti (kuva 2).



**KUVA 2. Pistemäinen sijaintimerkintä ei aina kuvaa PIMA-kohdetta parhaalla tavalla esim. kun kyseessä on jätekeskusalue. (Kuva Suomen ympäristökeskuksen KARPALO-palvelusta. Sisältää Maanmittauslaitoksen ja Suomen ympäristökeskuksen avointa dataa.)**

Osassa kohteista vektorimuotoinen kohteen koon ja muodon osoittava tieto on saatavilla kohteen dokumenteissa olevista karttapiirroksista. Tietoa olisi siis saatavilla, mikäli käytössä olisi tallennusjärjestelmä, johon voitaisi merkitä kohteet myös viivamaisina ja aluemaisina kohteina pelkkien rekisteripisteiden sijasta. Tämä vaatisi kuitenkin kartta-aineiston manuaalista digitoimista. Ihanteellisessa tapauksessa esimerkiksi kohteen kirjaajalla olisi tarkka paikkatieto käytettävissään digitaalisessa muodossa (CAD- tai paikkatietoformaateissa, kuten dgn, dwg, shp), jolloin se saataisi vietyä helposti ja tarkasti ympäristöarkiston paikkatietosovellukseen.

Ongelmakohtaan ulottuvuuksien mukaan taltioitu paikkatieto olisi tarpeen paitsi alueiden visuaaliseen hahmottamiseen, myös paikkatiedon edistyneeseen käyttöön ja rikastamiseen muulla paikkatietodatalla. Pelkästä pistemäisestä tiedosta ei voida esimerkiksi laskea, leikkaako alue toisen alueen. Tätä ominaisuutta tarvitaan alueiden analysoinnissa. Myös pinta-alojen laskeminen tai tarkka etäisyyksien laskeminen vaatii ulottuvuuksien mukaan taltioitua paikkatiedon.

Tällä hetkellä aineiston käyttö paikkatietona vaatii huomattavasti manuaalista työtä, eikä data sovellu edistyneeksi paikkatiedoksi laajemmassa mittakaavassa tämän hankkeen puitteissa. Osa datasta voidaan kuitenkin jalostaa monipuolisemmaksi paikkatiedoksi pilotointia varten. Tulevaisuudessa tietojen käytettävyyttä parantaisi, jos kaikki data saataisi monipuoliseksi paikkatiedoksi. Sen osalta on syytä jatkossa miettiä, miten jo olemassa oleva ja uusi tieto saadaan digitaalisiin tietokantoihin käytettävässä muodossa.

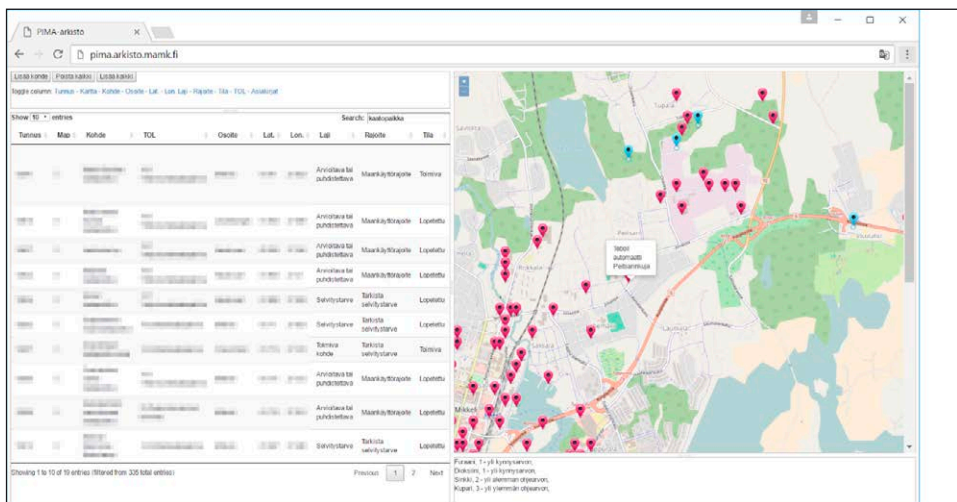
## Aineiston käyttö ympäristöarkistossa

Ympäristöarkistossa käytettävien aineistojen sisältämät tiedot määräytyvät suurelta osin ilmoituslomakkeiden perusteella. Eri käyttötarkoituksiin tehdyt lomakkeet eroavat toisistaan, eikä yhtenäistä kaavaa ole luotu. Ilmoituslomakkeet ovat pääosin edelleenkin joko paperisia tai internetistä ladattavia täytettäviä word- tai PDF-dokumentteja. Osassa, kuten ilmoituksessa pilaantuneen maaperän puhdistamisesta, vaaditut tiedot voidaan toimittaa viranomaiselle myös vapaamuotoisella ilmoituksella.

Ihanteellisessa tapauksessa tieto syötettäisiin tietojärjestelmiin sähköisesti käyttäen täsmällisiä luokituksia, sanastoja ja ontologioita, jolloin kirjoitusvirheiden ja epäselvästi tai väärin täytettyjen kenttien aiheuttamat tulkintaepäselvyydet voitaisi minimoida. Sähköinen asiointi helpottaisi myös tiedon kirjaajan tehtävää, koska osa kentistä voisi olla valmiiksi täytetty.

Eri tahojen ylläpitämät ympäristötiedot eivät ainakaan toistaiseksi ole yhteydessä keskenään. Niinpä manuaalista työtä vaaditaan päätösten ja raporttien yhdistämiseen oikeaan kohteeseen. Tietoa ei saada tällä hetkellä suoraan viranomaisten tietojärjestelmistä, vaan se pitää hakea sieltä esimerkiksi taulukkolaskentaohjelman kautta. Tällöin tieto ei ole reaaliaikaista eikä automaattisesti päivittyvää.

Ympäristöarkistossa kohteen sijainti ja siihen liittyvä ympäristödata voidaan yhdistää toisiinsa. Kuvassa 3 on nähtävissä ympäristöarkiston käyttäjänäkymä. Kohteet näkyvät kartalla ja niistä selviävät perustiedot sekä mahdolliset tarkemmat tiedot yksityiskohtaisemmista raporteista tai lupapäätöksistä poimittuna.



**KUVA 3.** Ympäristöarkiston käyttäjänäkymä (kuva sisältää Suomen ympäristökeskuksen dataa, taustakartta OpenStreetMap)

## Ympäristöarkiston edellytykset

Arkistoinnin edellytysten arviointia haittaa tällä hetkellä se, että viranomaisten tietojärjestelmiä ollaan uudistamassa ja uudistuksista on hyvin vähän tietoa saatavilla. Tulevassa uudistuksessa on tarkoitus parantaa järjestelmien yhteensopivuutta ja on mahdollista, että tässä hankkeessa selvitettyjä asioita tullaan huomioimaan myös viranomaisten tietojärjestelmä uudistuksessa. Rinnakkaisia tietojärjestelmiä pitäisikin välttää ja esimerkiksi tieto syötetään tietojärjestelmiin vain yhden kerran.

Moni olemassa oleva dokumentti on PDF-muotoinen, eikä sähköistä tiedonsiirtoa järjestelmien välillä ole päästy testaamaan. Tulevaisuudessa sähköisten järjestelmien yleistyessä suora tiedonvaihto on kuitenkin tarpeen huomioida. Näin varsinkin julkiset asiakirjat ovat suoraan siirrettävissä ja heti käytettävissä myös arkiston kautta.

Suuri osa ympäristön pilaantumiseen liittyvästä tiedosta ei ole julkista. Tämä rajoittaa ympäristöarkiston käyttöä niihin viranomaisiin, joilla on jo pääsy MATTI- ja VAHTI-tietojärjestelmiin. Arkistosta voisivat hyötyä myös suuret toimijat, joilla on monia omia kohteita arkistossa, jos niille voidaan myöntää pääsy näihin kohteisiin. Huolellisella suunnittelulla ja testaamalla arkistoa käytännössä saadaan ympäristöarkiston vaaditut ominaisuudet selvitettyä. Arkiston laajan hyödyntämisen kannalta olisi hyvä, jos ympäristöarkiston data olisi mahdollisimman avointa. Avoimemman jäljitettävän tiedon voidaan olettaa muodostavan myös uudenlaisia tarpeita ja kohteita tiedon hyödyntämiselle. Tämä luo uudenlaisia tehokkaampia toimintatapoja sekä uutta liiketoimintaa ja liiketoimintamahdollisuuksia.

## Lähteet

Isotalo, K. 2013. Pilaantuneet maa-alueet tulevat harvoin yllätyksenä. *Positio* 3/2013.

Mikkola, A. 2013. Valtioneuvoston asetus (591/2006) eräiden jätteen hyödyntämisestä maarakentamisessa – ilmoitusmenettelyn toimivuus ja sen parantaminen. Aalto-yliopisto. Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos. Diplomityö.

Suomen ympäristökeskus SYKE, 2016. Tietojärjestelmät ja -aineistot. WWW-dokumentti <http://www.ymparisto.fi/tietojarjestelmat>.

Valtioneuvoston asetus ympäristönsuojelusta 713/2014. Suomen sähköinen säädöskokoelma. WWW-dokumentti. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140713>.

Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu. 2013a. Pilaantuneet maa-alueet. WWW-dokumentti [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus\\_ ja\\_tuotanto/Pilaantuneet\\_maaalueet](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus_ ja_tuotanto/Pilaantuneet_maaalueet). Päivitetty 20.11.2014.

Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu 2013b. Ympäristölupa. WWW-dokumentti. [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi\\_luvat\\_ja\\_ymparistovaikutusten\\_arviointi/Luvat\\_ilmoitukset\\_ja\\_rekisterointi/Ymparistolupa](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi_luvat_ja_ymparistovaikutusten_arviointi/Luvat_ilmoitukset_ja_rekisterointi/Ymparistolupa).

Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu 2013c. Jätteiden hyödyntäminen maarakentamisessa. WWW-dokumentti. [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi\\_luvat\\_ja\\_ymparistovaikutusten\\_arviointi/Luvat\\_ilmoitukset\\_ja\\_rekisterointi/Ymparistonsuojelulain\\_mukaiset\\_ilmoitukset/Jatteiden\\_hyodyntaminen\\_maarakentamisessa](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi_luvat_ja_ymparistovaikutusten_arviointi/Luvat_ilmoitukset_ja_rekisterointi/Ymparistonsuojelulain_mukaiset_ilmoitukset/Jatteiden_hyodyntaminen_maarakentamisessa). Päivitetty 12.8.2015.





# KASVISTEN TUOTETURVALLISUUS JA TILAKOHTAINEN RISKINARVIOINTI

*Riina Tuominen & Sari Iivonen*

Kasvisten tuoteturvallisuuteen vaikuttavat niiden tuotantoympäristössä olevat tekijät. Näitä tekijöitä esiintyy esimerkiksi sadonkorjuuympäristössä pellolla sekä pakkaamo- ja varastotiloissa. Tuotteiden käsittelijät sekä käsittelyssä käytettävät astiat, koneet ja laitteet voivat aiheuttaa sekä mikrobiologisten, kemiallisten että fysikaalisten vaaratekijöiden esiintymistä kasviksissa. Vaarojen ehkäisemiseksi on tärkeää ymmärtää, mistä vaarat syntyvät, missä niitä esiintyy ja miten niitä voidaan ehkäistä. Tilakohtaisen riskinarvioinnin avulla voidaan tarkemmin kohdistaa voimavarat ja toimenpiteet kriittisiin tuotannonvaiheisiin.

Kasviketjun tuoteturvallisuuden ja vähähiilisuuden parantaminen koulutuksen keinoin – Kastu -hankkeessa on Helsingin yliopiston Ruralia-instituutissa ja Mikkelin ammattikorkeakoulussa järjestetty koulutuksia ja tuotettu aineistoa kasvisten tuoteturvallisuuteen liittyvistä kokonaisuuksista. Hanketta rahoittaa Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan maaseudun kehittämisen maatalousrahastosta.

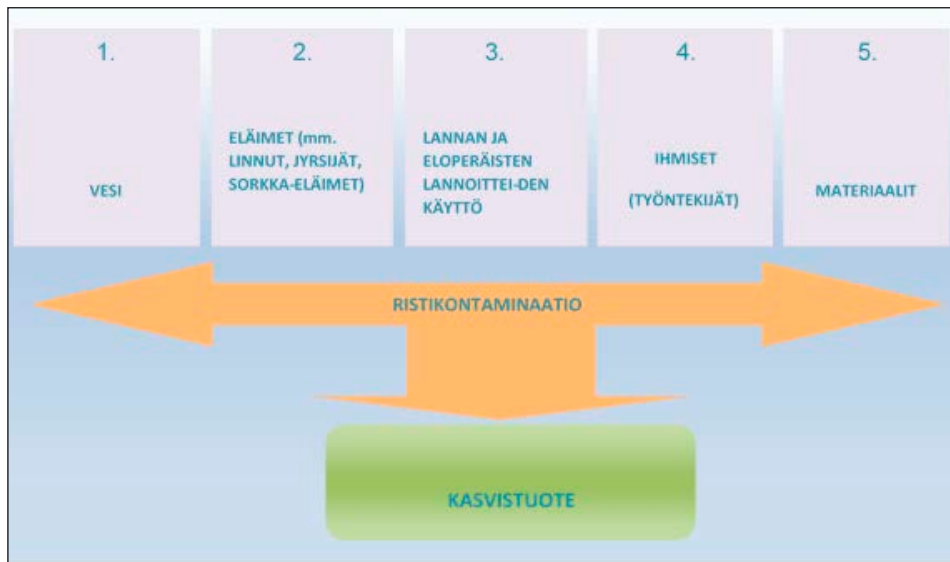
## Kasvisten tuoteturvallisuuden vaaratekijät

Kasvisten tuoteturvallisuutta uhkaavia tekijöitä voidaan kutsua vaaratekijöiksi. Vaaratekijät jaotellaan mikrobiologisiin, kemiallisiin ja fysikaalisiin tekijöihin niiden ominaisuuksien mukaisesti.

Kasvisten pinnalla on luonnostaan paljon mikrobeja, joista suurin osa on ihmiselle haitattomia. Mikrobeista pääosa on bakteereja, mutta myös viruksia, hiivoja ja homeita esiintyy. Pääosa kasvisten patogeenisista bakteereista on peräisin lannasta, saastuneesta kasteluvdestä tai kasvien käsittelystä epähygieenisesti. Pintakerroksessa mikrobit eivät kasva kovin hyvin, mutta mikäli suojaava pintakerros vaurioituu, pääsevät mikrobit pinnalta kasvisten solukkaan, jossa niiden on helpompi lisääntyä. (Leff & Fierer 2013.) Maaperässä eläviä ja sen kautta kasviksiin päätyviä mikrobeja ovat mm. *Clostridium botulium*, *Bacillus cereus*, *Listeria monocytogenes* ja *Yersinia pseudotuberculosis*. Ihmisen tai eläimen kautta leviäviä mikrobeja ovat mm. Salmonellat, Shigellat, *Escherichia coli* ja kamylobakteerit. (Beuchat 1998.)

Mikrobikontaminaation ennaltaehkäisy tuotannon jokaisessa vaiheessa on tärkeää. Jos tuote kontaminoituu, on patogeenien poistaminen erittäin vaikeaa. (United Nations 2007.)

Kasviksilla on tunnistettu viisi todennäköistä pääasiallista mikrobikontaminaation lähdettä (kuva 1). Ristikontaminaatio voi tapahtua missä tahansa tuotannon vaiheessa. (Piirainen 2011.)



**KUVA 1. Kasvien viisi mikrobikontaminaation lähdettä (Piirainen 2011)**

Erilaisia kemiallisia vaaratekijöitä kasviksissa ovat mm. raskasmetallit, ympäristömyrkyt, homemyrkyt, torjunta-ainejäämät sekä kasvien luontaiset haitalliset aineet. Kemiallisia vaaratekijöitä ovat myös tuotannossa käytettävät elintarvikkeille soveltumattomat pakkaus- tai säilytysmateriaalit tai puhdistusaineet. Välillisesti myös lannoitevalmisteet vaikuttavat elintarvikkeiden kemialliseen laatuun ja turvallisuuteen sekä ihmisten, eläinten ja kasvien terveyteen. Kasviksissa voi esiintyä myös haitallisia orgaanisia aineita. Näiden esiintymisestä ja riskeistä ei Suomessa toistaiseksi ole vielä riittävästi tutkimustietoa. (Valtioneuvoston selonteko elintarviketurvallisuudesta 2013.)

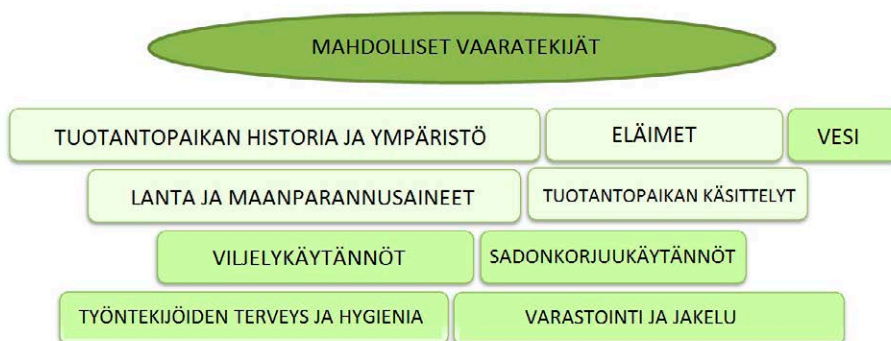
Kemiallisille vaaratekijöille on usein annettu raja-arvot. Enimmäismäärät eri kasvisuojeluaineiden jäämille (Maximum Residue Level, MRL-arvot) on vahvistettu yhteisesti koko Euroopan yhteismarkkina-alueella. Myös kasvien raskasmetalli- sekä nitraattipitoisuuksille on asetettu suurimmat sallitut enimmäispitoisuudet.

Fysikaalisilla vaaratekijöillä tarkoitetaan lähinnä vierasesineitä. Ne ovat yleensä peräisin joko tuotantotiloista ja -välineistä tai työntekijöistä. Kasvien kohdalla nämä vierasesineet voivat olla esimerkiksi kiviä, pölyä tai multaa. Vierasesineitä ovat myös korut, hiukset, laastarit, purukumi tai laitteista irronneet osat tai pakkausmateriaalin

palat. Tuotteiden sekaan voi päätyä myös eläimiä tai niiden jätöksiä tuotannon eri vaiheissa. Myös ilman mukana tulevat pienhiukkaset voivat päätyä elintarvikkeiden pintaan, mutta ne huuhtoutuvat yleensä puhdistuksen yhteydessä pois. (Kasvis- ja marjateollisuus 2006, Valtioneuvoston selonteko elintarviketurvallisuudesta 2013).

Vierasesineitä päätyy elintarvikkeisiin satunnaisesti ja niistä aiheutuu vuosittain joitakin takaisinveotoja (Valtioneuvoston selonteko elintarviketurvallisuudesta 2013). Vierasesineistä lasinsirut ovat terveydellisiltä vaikutuksiltaan vakavin fyysikaalinen vaaratekijä. Myös vieraskasvit ja kasvinosat voivat aiheuttaa vakavia seurauksia kuluttajalle.

Kuvassa 2 on esitetty kasvistuotannon mahdollisia vaaratekijöitä. Vaaratekijät voivat olla mikrobiologisia, kemiallisia tai fyysikaalisia.

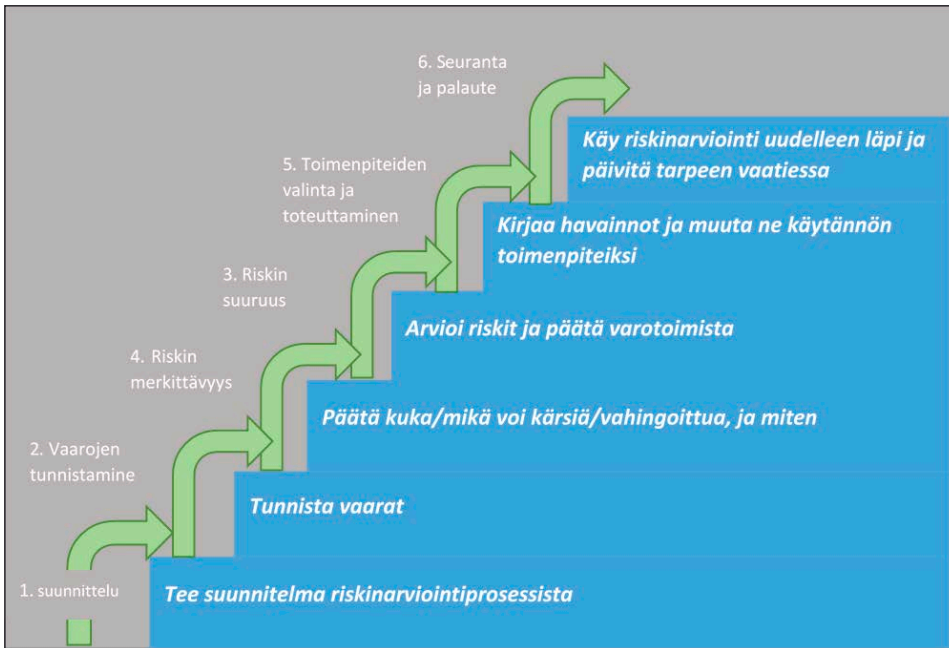


**KUVA 2. Kasvistuotannon mahdolliset vaaratekijät (mukaillen EFSA 2013).**

## Tilakohtainen riskinarviointi

Koska kasviksiin kohdistuvia vaaratekijöitä on mahdoton poistaa tuotantoketjusta, auttaa riskienarviointi niiden ymmärtämisessä ja hallitsemisessa. Riskienarvioinnin avulla saadaan tietoa siitä, mitkä ovat ne tuotannon vaiheet, joissa tuoteturvallisuuden on kiinnitettävä erityistä huomiota. Näin myös mahdolliset ennakoivat toimenpiteet voidaan tarkemmin kohdistaa kriittisiin vaiheisiin.

Riskienarvioinnilla tarkoitetaan esiintyvien vaaratekijöiden tunnistamista, vaarojen yleisyyden arviointia, vaarojen aiheuttamien seurausten suuruuden määrittämistä ja riskien merkityksen arviointia. Riskienarviointiin sisältyy myös havainnointien kirjaaminen ja niiden pohjalta tehtyjen uusien toimenpiteiden ja mahdollisten päivitysten tekeminen (kuva 3). (Piirainen 2011.)



**KUVA 3. Riskinarvioinnin vaiheet (Tuominen ym. 2015)**

Riski on vaaran tai haitan aiheuttamien seurausten vakavuuden ja niiden ilmene-  
misen todennäköisyyden yhdistelmä. Seurausten vakavuus tarkoittaa haitallisen ta-  
pahtuman ihmisille aiheuttamien terveys- ja turvallisuushaittojen vakavuutta. Riskin  
määrittämisessä käytetään yleisesti kolmiportaista riskitaulukkoa (taulukko 1). (Työ-  
suojeluhallinto 2015, Sosiaali- ja terveysministeriö 2015.)

**TAULUKKO 1. Kolmiportainen riskitaulukko riskin määrittämiseen (Työ-  
suojeluhallinto 2015)**

Vaaran todennäköisyys	Vaaran seuraukset		
	Vähäiset	Haitalliset	Vakavat
Epätodennäköinen	Merkityksetön riski	Vähäinen riski	Kohtalainen riski
Mahdollinen	Vähäinen riski	Kohtalainen riski	Merkittävä riski
Todennäköinen	Kohtalainen riski	Merkittävä riski	Sietämätön riski

Riskinarviointi suoritetaan taulukon mukaisesti:

- arvioimalla vaaran todennäköisyys: vaaran todennäköisyys epätodennäköinen, mahdollinen tai todennäköinen
- arvioimalla vaaran seuraus: vaaran seuraus vähäinen, haitallinen tai vakava
- riski saadaan näiden yhdistelmistä:
  - esim. vaara epätodennäköinen ja seuraukset haitallisia → riski =  $1 \cdot 2$  → riski vähäinen
  - esim. vaara todennäköinen ja seuraukset haitallisia → riski =  $3 \cdot 2$  → riski merkittävä

Arvioinnin perusteella jokaiselle tuoteturvallisuusvaaralle valitaan myös hallintakeinot, jolla vaarat saadaan ehkäistyä, poistettua tai vähennettyä hyväksyttävälle tasolle.

Riskienarviointia voidaan tehdä mm. tilan uusista tuotantopaikoista, kasteluvedestä sekä hygienia- ja tuoteturvallisuudesta. Hygienia- ja tuoteturvallisuusriskien kartoittamisessa otetaan huomioon kattavasti kaikki tuotteeseen ympäristöstä tai työntekeijöistä mahdollisesti aiheutuvat riskit. Tuotteen turvallisuuteen vaikuttaa myös kasteluvesi, jonka turvallisuus voidaan arvioida erillisessä riskinarvioinnissa ja määrittää samalla tarvittavat analyysit ja niiden toteutuksen tiheys. Arvioinnin jakaminen tuotantovaiheisiin helpottaa riskin arviointiprosessin hallitsemisessa. Valmiita riskinarviointikaavakkeita on saatavilla, ja niitä kannattaa käyttää aina, kun se on mahdollista.

Kasvisten osalta fysikaaliset vaarat ovat yleisimpiä, kemialliset vaarat aiheuttavat eniten huolta kuluttajissa ja mikrobiologiset vaarat ovat vakavimpia. Vaarojen esiintymisen todennäköisyyttä voidaan hahmottaa erilaisten asteikkojen tai luokittelujen avulla, kuten:

- vaara esiintyy kerran vuodessa (todennäköinen), harvemmin kuin kolmessa vuodessa (mahdollinen) tai harvemmin kuin 10 vuodessa (epätodennäköinen)
- vaara esiintyy kerran kuukaudessa (todennäköinen), kerran puolessa vuodessa (mahdollinen) tai kerran vuodessa (epätodennäköinen)
- vaaran todennäköisyys on yli 5 % (todennäköinen), 0,1–5 % (mahdollinen) tai alle 0,1 % (epätodennäköinen)

## Arvioinnista apua vaarojen hallintaan

Riskienhallinnalla tarkoitetaan haitallisten tapahtumien välttämistä, jolloin vaikutetaan esiintymisen todennäköisyyteen, tai tapahtumien seurausten pienentämistä, jolloin vaikutetaan seurauksen suuruuteen. Riskienhallinta on tilanteiden arviointia, suunnittelua ja käytännön tekoja. Riskienhallinnassa pohditaan, voidaanko kaikista vaaroista päästä eroon tai vähentää niitä. Jos tämä ei ole mahdollista, mietitään keinoja, kuinka riskejä voi hallita siten, että vaaran yleisyys olisi epätodennäköinen.

Vaarojen hallinnan ja omavalvonnan onnistumista voidaan todentaa näytteenoton avulla. Onnistuneen analyysin kannalta oikein suoritettu näytteenotto on avainasemassa, ja kaiken näytteenoton tavoitteena on saada tutkittavaksi mahdollisimman edustava näyte.



**KUVA 4. Ottamalla näytteitä riskinarvioinnin osoittamalla tiheydellä tarvittaviin analyysiin varmennetaan tuotteiden turvallisuutta (kuva Pauliina Kuukka)**

Kasvikset ovat merkittävä tekijä ruokavaliossamme, mutta myös viimeaikoina ruokamyrkytysten lähde. Kasviksiin kohdistuu jo pelkästään ympäristötekijöiden johdosta kontaminaatiovaaraa, jota ei pystytä poissulkemaan. Kasvikset voivat kontaminoitua myös ajattelemattoman viljelytoiminnan seurauksena.

Viljelijä arvioi tuotantoaan ja toimintojaan jatkuvasti, mutta yleensä tiedostamatta ja kirjaamatta arvioinnin tuloksia tai korjaavia toimenpiteitä. Riskinarvioinnin tuloksena saadaan arvokasta tietoa siitä, mitkä ovat ne tuotannon vaiheet, joissa tuoteturvallisuuden on kiinnitettävä erityistä huomiota. Riskinarvioinnin perusteella tilalle kyetään aiempaa paremmin laatimaan myös tilakohtaisia ohjeistuksia tuoteturvallisuuden varmentamiseksi.

## Lähteet

- Beuchat, L. 1998. Surface decontamination of fruits and vegetables eaten raw: a review. Food Safety Unit. World Health Organization. PDF-julkaisu. [http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/64435/1/WHO\\_FSF\\_FOS\\_98.2.pdf](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/64435/1/WHO_FSF_FOS_98.2.pdf).
- EFSA 2013. Scientific Opinion on the risk posed by pathogens in food of non-animal origin. Part 1 (outbreak data analysis and risk ranking of food/pathogen combinations). EFSA Panel on Biological Hazards (BIOHAZ). EFSA Journal 2013;11(1):3025. PDF-julkaisu. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2013.3025/epdf>.
- Kasvis- ja marjateollisuus 2006. Elintarviketeollisuuden HACCP-pohjainen omavalvontaohje. PDF-julkaisu. <http://www.etl.fi/media/aineistot/suosituks-et-ohjeet/haccp-kasvis1.pdf>.
- Leff, J. & Fierer, N. 2013. Bacterial Communities Associated with the Surfaces of Fresh Fruits and Vegetables. PLoS One. 2013; 8(3): e59310. WWW-artikkeli. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3609859/>. Julkaistu 27.3.2013.
- Piirainen, A. 2011. GLOBALGAP-liitteet. Lopullinen versio 4. Epävirallinen käännös. 30.6.2011.
- Sosiaali- ja terveystieteiden tutkimuskeskus. 2015. Riskien arviointi työpaikalla -työkirja. Työsuojeluosasto. Työturvallisuuskeskus. WWW-dokumentti. [http://ttk.fi/files/4178/Riskien\\_arviointi\\_tyopaikalla\\_tyokirja\\_22052015.doc](http://ttk.fi/files/4178/Riskien_arviointi_tyopaikalla_tyokirja_22052015.doc). Päivitetty 1.6.2015. Luettu 19.10.2016.
- Tuominen R., Lehesvaara M., Seppäläinen S., Piirainen A. & Taulavuori T. 2015. Turvallinen kasvistuote - Opa riskinarviointiin ja tuoteturvallisuuden hallintaan kasvien alkutuotannossa. Helsingin yliopisto, Ruralia-instituutti. Raportteja nro 152. PDF-julkaisu. <http://www.helsinki.fi/ruralia/julkaisut/pdf/Raportteja152.pdf>.
- Työsuojeluhallinto. 2015. Riskien hallinta. WWW-dokumentti. <http://www.tyosuojelu.fi/tyosuojelutyopaikalla/vaarojen-arviointi/riskien-hallinta>. Päivitetty 24.9.2015. Luettu 19.10.2016.
- United Nations 2007. Safety and quality of fresh fruits and vegetables: A training manual for trainers. PDF-julkaisu. [http://www.unctad.org/en/docs/ditcom200616\\_en.pdf](http://www.unctad.org/en/docs/ditcom200616_en.pdf).
- Valtioneuvoston selonteko elintarviketurvallisuudesta 2013–2017. 2013. PDF-julkaisu. VNS 5/2013 vp. [https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/Selonteko/Documents/vns\\_5+2013.pdf](https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/Selonteko/Documents/vns_5+2013.pdf).





# KASVISTUOTANNON KESTÄVYYS JA VASTUULLISUUS

*Hanna-Maija Väisänen & Riina Tuominen & Sari Iivonen*

Kuluttajat ovat yhä kiinnostuneempia siitä, miten ruoka on tuotettu. Globalisoitunut ruokatuotanto pitkine ketjuineen on johtanut vastuullisuuden merkityksen korostumiseen. Kasvistuotannossa tuotevastuukysymykset ja elintarvikkeiden turvallisuus ovat tärkeässä roolissa niin kaupankäynnissä kuin kuluttajien luottamuksen saavuttamisessa. Kasvistuotannon kestävyden ja vastuullisuuden määrittämiseen on olemassa erilaisia menetelmiä ja työkaluja. Tuotannon kestävydestä ja vastuullisuudesta voidaan viestiä kuluttajille erillisten yritysraporttien avulla, mutta myös teemmällä yrityksen toiminta läpinäkyväksi kertomalla siitä avoimesti. Kestävyttä voidaan kuvata mm. ympäristöjärjestelmien tai elinkaariarvioinnin avulla. Yksittäisille kasviksille voidaan määrittää myös hiili- tai vesijalanjälki. Tuotannon vastuullisuuden mittaaminen on sen sijaan toistaiseksi ollut haasteellista.

Kasvisketjun tuoteturvallisuuden ja vähähiilisyyden parantaminen koulutuksen keinoin – Kastu -hankkeessa on Helsingin yliopiston Ruralia-instituutissa ja Mikkelin ammattikorkeakoulussa järjestetty koulutus ja tuotettu aineistoa kasvistuotannon vastuullisuudesta. Hanketta rahoittaa Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan maaseudun kehittämisen maatalousrahastosta.

## Kestävyyden ja vastuullisuuden käsitteet

Kestävän kehityksen käsite nousi suuren yleisön tietoisuuteen viimeistään 1980-luvun lopulla YK:n ympäristön ja kehityksen maailmankomission julkaiseman raportin Yhteinen tulevaisuutemme (tunnetaan myös nimellä ”Brundtlandin raportti”) myötä. Brundtlandin komission raportin mukaan kehitys on kestävää, kun se täyttää ihmiskunnan tarpeet vaarantamatta tulevien sukupolvien mahdollisuutta tyydyttää omat tarpeensa. (United Nations 1987.)

Brundtlandin komission kestävyden ideologia käännettiin paremmin yrity maailman ymmärrettäväksi: näin syntyi käsite ja termi ”The Triple Bottom Line” eli kolmoistilinpäätös. Se viittaa tilanteeseen, jossa yritys harmonisoi toimintansa ollakseen samalla taloudellisesti elinkelpoinen, sosiaalisesti vastuullinen ja ympäristöstä huolehtiva. Kolmoistilinpäätökseen ja sen osa-alueisiin viitataan usein myös sanoilla ’People, Planet, Profit’ eli ihmiset, planeetta (maapallo) ja tuotto. (Elkington 1994.) Edellä mainituista käytetään myös termejä ekologisuus, sosiaalisuus ja taloudellisuus. Nämä muodostavat kestävä kehityksen yleisesti tunnistetut osa-alueet.

Kestävälle yritystoiminnalle ei ole yhtä yleisesti hyväksyttyä ja kaikille sopivaa määritelmää. Jokaisen yrityksen tulisikin määritellä se itse huomioiden liiketoiminnalliset ja kestävyuden tavoitteet, yrityksen strategia ja toimintaympäristö. (Marrewijk 2003.)

Yrityksmaailmassa käytetään usein termiä vastuullinen yritystoiminta (corporate responsibility, CR) tai yrityksen yhteiskuntavastuu (corporate social responsibility, CSR) silloin, kun tarkoitetaan kestävästä kehitystä liiketoimintakontekstissa. Termejä käytetään kirjallisuudessa jossain määrin toistensa synonyymeina. Vastuullinen yritystoiminta ilmenee yrityksen sitoutumisena kestävästä kehityksen periaatteisiin: se on liiketoiminnan taloudellista, sosiaalista ja ekologista vastuullisuutta yhteiskuntaa ja sidosryhmiä kohtaan. Yrityksen yhteiskuntavastuullisuuden käsitetään sisältävän vieläkin laajemman vastuullisuuden ymmärryksen: yritys ei tee pelkästään niitä asioita, mitä lain mukaan tai taloudellisesti pidetään hyväksyttävänä. Yhteiskuntavastuullinen yritys menee tästäkin pidemmälle: se sisäistää yhteiskunnalliset ja moraaliset arvot yritykseensä toimien eettisesti vastuullisesti (Sun ym. 2010).

Yrityksen yhteiskuntavastuu ja yritysvastuu kumpuavat näkemyksestä, että yritykset auttavat omalta osaltaan yhteiskunnan kehittymistä kestäväksi pyrkimällä itse kestävästä liiketoimintaan toteuttamalla hyvää liiketoiminnan vastuullisuutta eli yritysvastuuta (Marrewijk & Werre 2003). Toisin sanoin yritykset luovat yhteiskunnan taloudellista, ekologista ja sosiaalista kestävyyttä toimimalla vastuullisesti.

Yrityksen olemassaolo on riippuvainen siitä, pitääkö muu yhteiskunta yrityksen toimintaa hyväksyttävänä vai ei. Tämän hyväksynnän saavuttaminen edellyttää sitä, että yritys toimii vastuullisesti eli hoitaa liiketoimintansa yhteiskunnan sille määrittämässä laillisten ja moraalisten vastuiden puitteissa. (mm. Marrewijk 2003, Panapanaan ym. 2003.)

## **Miksi vastuullisuutta edellytetään kasvituotannolta ja -ketjulta?**

Vastuullinen toiminta edellyttää vastuullisia tekoja ja toimenpiteitä yrityksessä (mm. Marrewijk 2003, Panapanaan ym. 2003). Jokaisen toimialan ja yrityksen on luotava oma näkemyksensä kestävydestä ja vastuullisuudesta, sen tavoitteista sekä siitä, miten ja millä toimenpiteillä niihin päästään. Kestävyys ja vastuullisuus tarkoittavat eri yrityksille erilaisia asioita (Beloff & Chevallier 2012), joten sen vuoksi niin vastuullisuuden toteuttamisen kuin arvioinnin tapojakin on useita. Yritys valitsee sille tärkeät kestävyys-/vastuullisuusasiat yrityksen arvojen, toimintaperiaatteiden ja käytäntöjen perusteella. (Beloff & Chevallier 2012.)

Kasvituotannon ja -ketjun vastuullisuutta on haastava määritellä aukottomasti ja kaiken kattavasti. Kasvisten tuotantoa ja siihen liittyviä vastuita voidaan tarkastella useasta näkökulmasta. Karkeasti määriteltynä vastuullinen kasvituotanto ja -ketju ei

saastuta eikä tuhoa ekosysteemiä, käyttää luonnonvaroja niiden uusiutumisen rajoissa, on taloudellisesti kannattavaa kaikille ketjun osille/jäsenille, ei aiheuta terveysvaaraa ja on sosiaalisesti reilua.

Kasvisten tuotantoketju voi olla pitkä, ja vastuukysymykset näin ollen muuttuvat haasteellisiksi. Osittain sen vuoksi tuotevastuukysymykset ja elintarvikkeiden turvallisuus ovat saaneet yhä merkittävämmän roolin kaupankäynnissä. Suomessa kaupan edustajat ovat pitkään peränneet kasvisten alkutuotannon sertifiointia. Yritysvastuun ulottaminen myös alihankkijoiden toimintaan on lisääntymään päin. Taustalla voidaan nähdä olevan myös pyrkimys vähentää riskejä, saavuttaa kustannussäästöjä ja erottua markkinoilla (Siivonen 2013). Yleisesti ottaen vastuulliseen toimintaan yrityksiä ajavat sidosryhmien paine, eli jokin taho vaatii tai edellyttää toimimaan eettisesti, taloudelliset tekijät (esim. kustannussäästöt), tai muut tekijät, kuten lainsäädäntö. (mm. Epstein 2008, Gonzalez-Benito & Gonzalez-Benito 2005.) Yksi ajuri vastuullisuuteen lienee maineen hallinta; vastuuton toiminta tuo mukanaan usein maineen menettämisen riskin (Lewis 2003).

Vastuullisuutta voidaan tarkastella myös kasvisketjun osallisten – tuottajan, tukun, kaupan ja kuluttajan – näkökulmasta. Vastuullisella toiminnalla voidaan esimerkiksi taata, että kuluttaja saa turvallisia ja laadukkaita tuotteita, kaupan ja tukun hävikki pienenee ja kuluttajien luottamus säilyy, ja että tuottaja tuottaa huomioiden luonnonsojuelun sekä oman ja työntekijöidensä työturvallisuuden.

## **Kestävyyttä kohti – vastuullisuus kasvisten tuotannossa**

Välineiksi vastuullisuuden toteuttamiseen ja osoittamiseen nousevat erilaiset toimialakohtaiset ohjeistukset, tuotteille tai tuotantoprosesseille myönnettävät sertifikaatit ja yritysraportit.

Vastuullisuutta voidaan minimissään toteuttaa kasvisten tuotannossa noudattamalla viljelyyn, varastointiin, pakkaamiseen, kuljettamiseen ja myymiseen liittyvää lainsäädäntöä. Kasvisten tuotannossa on laadittu erityisesti toimialaan kohdentuvaa ohjeistoa, sertifikaatteja ja laatujärjestelmiä. Laatutarha-ohjeisto on suomalaisen puutarhatuotannon yhteinen ohjeisto, jonka tehtävänä on varmistaa puutarhatuotteiden turvallisuus, tuotannon mahdollisimman vähäinen ympäristökuormitus ja työntekijöiden hyvät työolot. Ohjeiston hyvien käytäntöjen kautta voidaan mm. varmistaa tuotteiden puhtaus ja turvallisuus.

Sertifiointi on yksi keino lisätä ja todentaa vastuullisuutta. IP Kasvikset -perussertifiointi on suunnattu alkutuotantoyrityksille, joiden asiakkaat edellyttävät puolueettonta, kolmannen osapuolen sertifioimaa tuotantoa. Perussertifiointissa keskitytään tuoteturvallisuuden varmentamiseen. ”IP Kasvikset Perussertifiointi – laadunvarmennus pohjosiin olosuhteisiin” muodostaa samalla perustason laajemmalle IP Sigill Frukt&Grönt -sertifiointille.

Yleisiä viitekehyksiä ruokaketjun kestävyys arvioimiseksi on kehitetty niin Suomessa kuin ulkomailla. Kotimaassa on tutkijoiden ja yritysten yhteistyönä määritelty, mitä vastuullisuus on ruokaketjussa, ja ehdotettu, miten sitä voidaan johtaa, mitata ja miten siitä voidaan viestiä. Ruokaketjun vastuullisuuden seitsemäksi ulottuvuudeksi on tunnistettu seuraavat: ympäristö, tuoteturvallisuus, ravitsemus, työhyvinvointi, eläinten hyvinvointi, paikallinen hyvinvointi ja talous. Koska vastuullisuudesta on useita tulkintoja ja se tarkoittaa eri asioita eri tahoille, voi olennaisten mittareiden valinta olla haasteellista. Mittaaminen on kuitenkin tärkeä osa vastuullisuuden onnistunutta johtamista, koska toimintaa arvioimalla voidaan seurata muun muassa vastuullisuuden toteutumista. Lisäksi mittaustuloksien avulla yritys voi viestiä vastuullisuudesta. (Heikkurinen ym. 2012.)

Yhdistyneiden kansakuntien elintarvike- ja maatalousjärjestö FAO on kehittänyt yleisen viitekehyksen ruokaketjun kestävyys arvioimiseksi. SAFA (Sustainability Assessment of Food and Agriculture systems) -ohjeisto (FAO, 2013) on tarkoitettu sekä yrityksen sisäisen kestävyys kokonaisvaltaiseen arviointiin ja kehittämiseen että ohjaamaan ruoantuotantoa, maataloutta ja koko kansainvälistä elintarvikeketjua sosiaalisesti, taloudellisesti ja ympäristön kannalta kestävyteen. (FAO 2013.)

SAFA käsittelee kestävä toimintaa neljän ulottuvuuden kautta: talous, ympäristö, sosiaalinen hyvinvointi ja hyvä hallinto. SAFA-viitekehys koostuu 21 teemasta, 58 ala-teemasta ja yhteensä 116 indikaattorista. Osa indikaattoreista on toimialakohtaisia. (FAO 2013.)

## **Kestävyys ja vastuullisuuden mittaaminen ja todentaminen**

Kasvituotannon kestävyttä ja vastuullisuutta voidaan ilmaista mm. ympäristövaikutuksia kuvaavien mittareiden avulla. Käyttökelpoisia mittareita ovat esimerkiksi elinkaariarviointi, hiilijalanjälki tai vesijalanjälki. Nämä kaikki kuuluvat ympäristöjärjestelmä ISO 14000 -sarjaan, joka kuvastaa ympäristövuusallisuutta. Sarjaan sisältyy kaksi ympäristöjärjestelmästandardia: ISO 14001 ja ISO 14004. Ne antavat ohjeet ja vaatimukset ympäristöasioiden hallintajärjestelmille. Standardien avulla voidaan parantaa yrityksen ympäristöasioiden hallintaa ja ympäristönsuojelutoimien tuloksellisuutta. (ISO 14001:2015, ISO 14004:2016.)

Elinkaariarvioinnin avulla voidaan analysoida ja arvioida tuotteen tai palvelun koko elinkaaren aikaiset ympäristövaikutukset. Elinkaariarvioinnin toteuttamisen avuksi on laadittu ISO 14040 -sarjan standardit. Yksityiskohtaisten elinkaariarviointien sijaan voidaan tehdä myös ns. yksinkertaistettuja elinkaariarvioiteja, joissa tarkastelu kohdistetaan johonkin tiettyyn päästöön. (ISO 14040:2006, ISO 14044:2006.)

Hiilijalanjälki kuvaa tuotteen koko elinkaaren aikana tuottamien kasvihuonekaasujen aiheuttamaa ilmastovaikutusta. Kasvihuonekaasupäästöt lasketaan ja ilmaistaan hiili-

dioksidiekvivalentteina. Hiilijalanjätkilaskentaan on olemassa erilaisia laskureita mm. internetissä sekä tekninen spesifikaatio (ISO/TS 14067:2013).

Vesijalanjälki kuvaa sitä, kuinka paljon henkilö tai valtio kuluttaa vesivaroja kaikkien kuluttamiensa hyödykkeiden myötä. Kulutettuihin vesivareihin lasketaan juoma- ja talousveden lisäksi kaikki vesi, joka on tarvittu viljelyyn sekä tuotteiden valmistukseen teollisuuden prosesseissa. (Hoekstra ym. 2011.) Vesijalanjäljelle on laadittu kansainvälinen standardi. Standardi määrittelee vesijalanjäljen veden käytön, tuotannon tai muun toiminnan vaikutuksina vesivareihin, ekosysteemeihin tai ihmisten terveyteen ja pyrkii huomioimaan paikalliset olosuhteet. (ISO 14046:2014.) Tuotannon ympäristövaikutusten mittareita ominaisuuksineen on kuvattu taulukossa 1 (Sojamo ym. 2012).

**TAULUKKO 1. Ympäristövaikutusten mittareita (Sojamo ym. 2012)**

Mittari	Mittauskohde	Tulos kertoo
<b>Elinkaari-arviointi</b>	Ympäristövaikutuksia määritellyissä vaikutusluokissa, tarkastelu useimmiten tuotekohtainen.	Tuotteen elinkaaren aikaiset vaikutukset ympäristöön määritellyissä vaikutusluokissa (esimerkiksi kasvihuonekaasut, rehevöityminen, happamoituminen, alailmakehän otsoni).
<b>Hiilijalanjälki</b>	Ilmastonmuutospotentiaali, tarkastelu tuote- tai organisaatiotasolla.	Ilmastonmuutospotentiaali on suora indikaatio tuotteen tai organisaation aiheuttamasta kasvihuonekaasujen määrästä ilmakehässä ja siten lisääntyneestä ilmastoalämmittävästä vaikutuksesta.
<b>Vesijalanjälki</b>	Vesivarojen kulutusta suhteutettuna niiden saatavuuteen, tarkastelu tuote- tai organisaatiotasolla.	Valuma-aluetason tarkastelu kertoo tarkasteltavan toiminnan vaikutuksista vesivarojen käytön kokonaistilanteeseen sekä ohjaa käyttöpaineen vähentämiseen.

Eri mittareita voidaan käyttää rinnakkain, jolloin voidaan painottaa eri painopisteitä arviointitilanteesta riippuen, ja mittarit myös tukevat toisiaan (Sojamo ym. 2012). Toisaalta yrityksissä on osattava tehdä valintoja, sillä monen eri mittarin ylläpito vie resursseja muulta toiminnalta.

Jos ympäristövastuullisuuteen halutaan lisätä myös sosiaalisen ja taloudellisen vastuun raportointi, yhteiskuntavastuuraportti on käyttökelpoinen. Yhteiskuntavastuuraportti on yrityksen arviointi- ja viestintätyökalu, jonka avulla se voi kertoa kaikille sidosryhmilleen, miten se on onnistunut yhteiskuntavastuutavoitteissaan. Kansainvälisesti käytetyin ja tunnetuin yritysvastuun raportointistandardi on GRI-ohjeisto – Global Reporting Initiative (GRI). Global Reporting Initiative (GRI) on riippumaton, ver-

kostopohjainen organisaatio, joka on kehittänyt kestävän kehityksen raportointiviitekehityksen. Viitekehityksessä määritellään periaatteet ja indikaattorit kestävään kehitykseen liittyvien saavutusten ja haasteiden mittaamiseen ja raportointiin. (GRI.)

Yrityksen tulee löytää sille sopiva ja sen tarpeita palveleva ratkaisu viestiessään yrityksen tuotannon kestävydestä ja vastuullisuudesta. Myös kasvituotannossa elintarvikkeiden turvallisuuden todentaminen on korostunut niin kaupankäynnissä kuin kuluttajien luottamuksen saavuttamisessa. Turvallisuuden takaaminen ja siitä viestiminen ovat osa tuotannon vastuullisuutta. Vaivattomin tapa viestiä yrityksen vastuullisuudesta on tehdä yrityksen toiminta läpinäkyväksi esimerkiksi kertomalla siitä avoimesti vaikkapa yrityksen internetsivuilla. Järjestelmällisempään, mutta myös enemmän työpanoksia vaativaan viestintään löytyvät yritysraportit sekä erilaiset yrityksen toiminnan kestävyyttä mittaavat indikaattorit. Mittareiden ja laatuajrjestelmien vaikeutena on usein se, että ne eivät aina kerro kuluttajalle yksiselitteisesti yrityksen toiminnasta.

## Lähteet

- Antikainen, R. & Seppälä, J. (toim.). 2012. Elinkaarimenetelmät yrityksen päätöksenteon tukena. Suomen ympäristökeskus. Suomen ympäristö 10/2012. ISBN 978-952-11-3990-1.
- Beloff, B. & Chevallier, A. 2012. The Case and Practice for Sustainability in Business. *Sustainability: Multi-Disciplinary Perspectives*, 310-339.
- FAO. 2013. Sustainability Assessment of Food and Agriculture Systems (SAFA), Guidelines. Version 3.0. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rooma. Saatavilla: <http://www.fao.org/nr/sustainability/sustainability-assessments-safa/en/>
- Epstein, M.J. 2008. *Making Sustainability Work: Best Practices in Managing and Measuring Corporate Social, Environmental and Economic Impacts*. 288 pp. Sheffield, UK: Greenleaf Publishing. ISBN-13: 9781576754863.
- Gonzalez-Benito, J. & Gonzalez-Benito, O. 2005. A Review of Determinant Factors of Environmental Proactivity. *Business Strategy and the Environment* 15, 87–102.
- GRI, Global Reporting Initiative. About Sustainability Reporting. WWW-dokumentti. <https://www.globalreporting.org/information/sustainability-reporting/Pages/default.aspx>. Ei päivitystietoja. Luettu 21.10.2016.
- Heikkurinen, P., Jalkanen, L., Järvelä, K., Järvinen, M., Katajajuuri, J.-M., Koistinen, L., Kotro, J., Mäkelä, J., Pesonen, H.-M., Riipi, I., Ulvila, K.-M., Forsman-Hugg, S. 2012. Vastuullisuus ruokaketjussa - Eväitä johtamiseen, mittaamiseen ja viestintään. MTT Jokioinen.
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Maite, M.A. & Mekonnen, M.M. 2011. *The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard*. ISBN 978-1-84971-279-8.

- ISO 14001:2015. Ympäristöjärjestelmät. Vaatimukset ja niiden soveltamisohjeita. Standardi SFS-EN ISO 14001. Suomen Standardoimisliitto SFS.
- ISO 14004:2016. Ympäristöjärjestelmät. Yleisiä toteuttamisohjeita. Standardi SFS-EN ISO 14004. Suomen Standardoimisliitto SFS.
- ISO 14040:2006. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet. Standardi SFS-EN ISO 14040. Suomen Standardoimisliitto SFS.
- ISO 14044:2006. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaatimukset ja suuntaviivoja. Standardi SFS-EN ISO 14044. Suomen Standardoimisliitto SFS.
- ISO 14046:2014. Ympäristöasioiden hallinta. Vesijalanjälki. Periaatteet, vaatimukset ja ohjeet. Standardi SFS-EN ISO 14046. Suomen Standardoimisliitto SFS.
- ISO/TS 14067:2013. Kasvihuonekaasut. Tuotteiden hiilijalanjälki. Hiilijalanjäljen laskemista ja viestimistä koskevat vaatimukset ja ohjeet. Tekninen spesifikaatio ISO/TS ISO 14046. Suomen Standardoimisliitto SFS.
- Lewis, S. 2003. Reputation and corporate responsibility. *Journal of Communication Management*, Vol. 7 Iss 4 pp.356–366.
- Marrewijk, M. 2003. Concepts and Definitions of CSR and Corporate Sustainability: Between Agency and Communion. *Journal of Business Ethics* 44: 95–105.
- Marrewijk, M. & Werre, M. 2003. Multiple Levels of Corporate Sustainability. *Journal of Business Ethics*, 44 (2–3), 107–119.
- Panapanaan, V. M., Linnanen, L., Karvonen, M. & Phan, V. T. 2003. Roadmapping corporate social responsibility in finnish companies. *Journal of Business Ethics*, 44 (2–3), 133–148.
- Siivonen, R (toim.). 2013. Strateginen vastuullisuus – 20 esimerkkiä keskisuurista yrityksistä. Sitra.
- Sojamo, S., Nikula, J., Wessman, H., Usva, K. 2012. Vesiriskeistä vesivastuullisuuteen. PDF-julkaisu. <https://wwf.fi/mediabank/2307.pdf>.
- Sun, W., Stewart, J., Pollard, D. 2010. Reframing Corporate Social Responsibility: Lessons from the Global Financial Crisis. *Critical Studies on Corporate Responsibility, Governance and Sustainability*, Volume 1. Emerald Group Publishing Ltd, UK.
- United Nations.1987. Our Common Future. Report of the World Commission on Environment and Development. Saatavilla: [http://www.sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/UN%20WCED%201987%20Brundtland%20Report.pdf](http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/UN%20WCED%201987%20Brundtland%20Report.pdf).



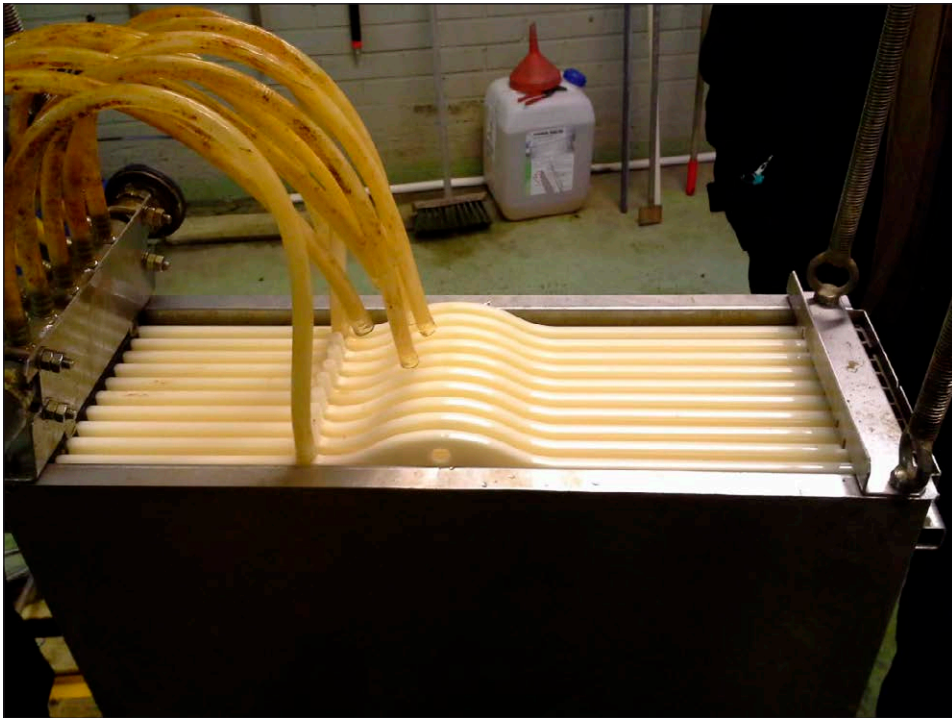


# MEMBRAANIBIOREAKTORIT MIKROPOLLUTANTTIEN (MP) POISTAMISESSA KUNNALLISISTA JÄTEVESISTÄ

*Hannu Poutiainen & Risto Repo*

Vaikka suomalaiset jätevedenpuhdistamot toimivat yleisesti hyvin ja poistavat lupaehdot täyttäen suurimman osan yhdyskuntien tuottamasta fosforista, typestä ja orgaanisesta kuormasta (jota mitataan biologisen hapenkulutuksen avulla), on viime aikoina syntynyt huolestuneisuutta siitä, saadaanko erilaiset kemialliset yhdisteet poistettua riittävässä määrin. Tällaisia aineita ovat mm. antibiootit, hormonaaliset haitta-aineet, mikromuovit, raskasmetallit sekä huumausaineet. Useimpia aineita ei prosessissa tutkita, eikä niiden reaktioista siis ole lainkaan tietoa.

Membraanibioreaktoritekniikka (MBR, kuva 1) on uusi teknologia, jota ollaan Suomessa ottamassa nyt ensimmäisen kerran käyttöön isossa mittakaavassa jätevedenpuhdistamoissa (Mikkeli, Metsäsairila). Menetelmässä liete poistetaan aktiivilieteprosessista laskeutusaltaiden sijasta membraanisuodatuksella. Koska menetelmät poikkeavat teknologisesti toisistaan, saatetaan MBR-tekniikalla saavuttaa etuja myös mikropollutanttien poistossa.



**KUVA 1. Membraanibioreaktoriyksikkö näkyvillä huollon yhteydessä (kuva Risto Repo)**

## **MBR-tekniikan yleiset hyödyt**

Aktiivilietelaitoksessa laskeutusaltaat ovat pinta-alaltaan useita satoja neliömetrejä. MBR-tekniikalla näiden rakentamiselta voidaan välttyä. Prosessissa puhdistetun veden laatu on yleensä MBR:llä korkeampi, ja jätekuorman vaihtelut vaikuttavat prosessiin vähemmän kuin perinteisessä laitoksessa. Mädätettävää, kompostoitavaa tai muuten loppuhyödynnettävää lietettä syntyy myös vähemmän. (Poutiainen ja de las Heras, 2014.)

## **Mikropollutanttien luokittelu**

Mikropollutantit luokitellaan yleensä taulukossa 1 esitettäviin neljään ryhmään. Jotkut aineet voivat kuulua samanaikaisesti useampaan ryhmään.

## TAULUKKO 1. Mikropollutanttien jaottelu (Degremont 2013)

A: Metallit ja metalloidit, radioaktiiviset aineet lyijy, kadmium, elohopea, arsenikki, antimoni, radon, uraani
B: Orgaaniset mikropollutantit pestisidit, hiilivedyt, liuottimet, pesu- ja puhdistusaineet, kosmetiikka
C: Hormonit luonnolliset tai synteettiset
D: Lääkeaineet ja hormonaaliset haitta-aineet betasalpaajat, masennuslääkkeet, hypolipidemiset aineet [alentavat kolesterolia ja triglyserideja, kipulääkkeet, antibiootit, hengitystä avaavat lääkkeet, kemoterapia-aineet]

Vaikka jotkut mikropollutantit osin poistuvat perinteisessä jätevedenpuhdistusprosessissa esim. haihtamalla tai sitoutumalla aktiivilietteeseen, useimmat aineet karkkaavat jätevedenpuhdistusprosessista suoraan vesistöihin (Luo ym. 2014), jolloin niiden poistamiseksi olisi otettava käyttöön edistynyttä tekniikkaa.

### Mikropollutanttien poistossa käytettävät tekniikat

Bui ym. (2016) ovat arvioineet, että otsonointi ja aktiivihiliabsorptio ovat parhaita tekniikoita mikropollutanttien poistamiseen jätevesistä. He näkevät kuitenkin mahdollisuuksia myös membraanisuodatus- ja MBR-tekniikassa. Muita mahdollisia tekniikoita ovat UV- ja vetyperoksidikäsitely.

### MBR-tekniikka mikropollutanttien poistossa

Kun puhutaan membraanisuoatuksesta, tarkoitetaan mikro-, ultra- tai nanosuoatusta tai käänteisosmoositekniikkaa. Näitä kaikkia tekniikoita voidaan käyttää menestyksekkäästi joidenkin mikropollutanttien poistossa, jos em. haitta-aineiden molekyylikoko on pienempi kuin kalvossa olevat reiät. Yleensä näin on nanaosuoatuksessa ja käänteisosmoosissa. Mikropollutantit suodattuvat kalvon sisäpuolelle ja absorboituvat myös kalvoon.

Varsinaisessa MBR-tekniikassa (membraanibioreaktori) mikropollutantit suodattuvat kalvon läpäisevyyden johdosta ja sen lisäksi absorboituvat kalvoon sekä tulevat kalvon rajoittaman lietemikrobiston ravintonaan hyödyntämäksi. MBR-prosessin pidempi lieteikä voi luoda mikropollutanttien hajoamiselle otollisemman mikrobiyhteisön kuin lyhyemmän lieteiän perinteisessä aktiivilieteprosessissa. (Bui ym. 2016.)

MBR-prosessin hyödyt on todettu myös tutkimuksin. Bernhard ym. mukaan (2006) MBR:t poistavat paremmin diklofenaakkia (kipulääke), mekopropia (rikkakasvien torjunta-aineiden aktiivinen osa) ja sulfofenyylikarboksylaatteja (pinta-aktiivisia aineita). Wever ym. (2007) saivat hyviä tuloksia NDSA:lla (naftaleenidisulfonaatilla) ja BTSA:lla (bentsotiatsooli-2-sulfonaatilla).

Espanjassa kokeiltiin pilot-mittakaavassa MBR-prosessin yhdistämistä nanosuodattukseen (NO) ja käänteisosmoosiin (RO), jolloin saatiin tuotettua uudelleenkäyttöön soveltuvaa vettä (matala suola-, TOC- ja nitraattitaso). Kymmenen tutkitun mikropollutanttien tasot (mm. ibuprofeeni, kofeiini, nikotiini ja bisfenoli-A) olivat myös hyvin matalia (reduktiot 73–99 %), paitsi karbamatsepiinin (yleinen epilepsialääke) osalta, joka oli pysyvä yhdiste myös tässä kokeilussa prosessissa. (Cartagena ym. 2013.)

## Uraani, arseeni ja fluori

Uraania, arseenia ja fluoria esiintyy maaperässä luontaisesti 2–5 000 µg/kg. Kaikki nämä aineet on todettu erittäin myrkyllisiksi ihmiselle, ja siksi niitä ei saa esiintyä juomavedessä. (Figoli ym. 2016.) Arseni on yleensä ensin hapatettava sitä poistettaessa As(III)-muodosta As(V)-muotoon, minkä jälkeen mahdollisia jatkokäsittelytekniikoita ovat kemiallinen saostus, absorptio (rautakloridiin) ja/tai membraanisuodatus (Sullivan 2008).

## MBR-tekniologialla myös huonoja ominaisuuksia

Vaikka MBR-tekniologialla saadaan useampien mikropollutanttien määrää puhdistetussa jätevedessä vähennettyä, on sillä myös omat haittansa. Suurin on kustannustekijä erityisesti MBR-tekniologiaa jälkiasennettaessa. Sveitsissä pyritään vähentämään MP-kuormitus vesistöissä puoleen vuoteen 2014 mennessä. Tämä nostaa kyseessä olevien 123 jätevedenpuhdistamon vuosittaisia käyttökustannuksia 5–35 %. (Bui ym. 2016, Logar ym. 2014.) Kyseessä on tasapainoilu yhteiskunnan tarpeiden (alhainen kustannus vedelle) ja luonnon hyvinvoinnin (ei mikropollutanteja) välillä. Sveitsissä tutkitaan hankkeen edetessä ekosysteemin vastetta laskeviin mikropollutanttitasoihin.



**KUVA 2. MBR-teknologian kokeilua Mikkelin jätevedenpuhdistamolla (kuva Risto Repo)**

Vaikka MBR-prosessi kestää hyvin orgaanisen ja hydrodynaamisen kuorman vaihteluita, suuret lämpötilavaihtelut aiheuttavat MBR-prosessille ongelmia. Korkeassa lämpötilassa mikrobien entsyymimetabolia estyy, ja matalassa lämpötilassa erityisesti hydrofiilisten MP-aineiden hajoaminen hidastuu (Luo ym. 2014). Myös Mikkelin Metsäsairilan jätevedenpuhdistamoinvestointia suunniteltaessa on tehty lukuisia eri koeajoja vaihtoehtoisilla prosessiratkaisuilla (kuva 2), jotta päästäisi parhaaseen mahdolliseen lopputulokseen.

## Lähteet

- Bernhard, M., Müller, J. ja Knepper, T.P. (2006) Biodegradation of persistent polar pollutants in wastewater: comparison of an optimised lab-scale membrane bioreactor and activated sludge treatment. *Water Res.* 40 (18), 3419–3428.
- Bui, X.T., Vo, T.P.T., Ngoa, H.H., Guob, W.S. ja Nguyena, T.T. (2016) Multicriteria assessment of advanced treatment technologies for micropollutants removal at large-scale applications. *Science of the Total Environment* 563–564, 1050–1067.
- Cartagena, P., El Kaddouri, M., Cases, V., Trapote, A. ja Prats, D. (2013) Reduction of emerging micro pollutants, organic matter, nutrients and salinity from real wastewater by combined MBR–NF/RO treatment. *Separation and Purification Technology* 110, 132–143.

- De Wever, H., Weiss, S., Reemtsma, T., Vereecken, J., Müller, J., Knepper, T., Hernando, M.D. (2007) Comparison of sulfonated and other micropollutants removal in membrane bioreactor and conventional wastewater treatment. *Water Res.* 41 (4), 935–945.
- Logar, I., Brouwer, R., Maurer, M. ja Ort, C. (2014) Cost-benefit analysis of the Swiss National Policy on reducing micropollutants in treated wastewater. *Environ. Sci. Technol.* 48 (21), 12500–12508.
- Luo, Y., Guo, W., Ngo, H.H., Hghiem, L.D., Hai, F.I., Zhang, J., Liang, S. ja Wang, X.C. (2014) A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment, *Science of The Total Environment* 473-474, 619-641.
- Poutiainen, H. ja de las Heras, I. (2015) MBR-teknologiaa hyödyntävä jätevedenpuhdistamo Mikkeliin? Tuloksellista opiskelijavaihtoa espanjalaisittain. *Ympäristö ja terveys -lehti* 4 (2015).
- Sikdar, S.K. (2016) osassa Johdanto, teoksessa *Membrane Technologies for Wastewater Treatment: Removal of Toxic Trace Elements with emphasis on Arsenic, Fluoride and Uranium* (toim. Figoli, A., Hoinkis, J. ja Bundschuh, J.), CRC Press, UK, 2016
- Sullivan, M.E. (2009) *Remediation of Arsenic and Persistent Organic Contaminants Using Enhanced In-situ Methods*. Väitöskirja, Coloradon yliopisto, 2008, sivu 9.

# ANALYYSIMITTAUSTEN MERKITYS JÄTEVEDENPUHDISTUSPROSESSIN SÄÄDÖSSÄ

*Jake Nylund & Hannu Poutiainen*

Suomalaisen jäteveden puhdistamisen tasoa voidaan pitää varsin korkeana. Itämeri halutaan pitää puhtaana ja tutkimustyötä tämän edistämiseksi tehdään jatkuvasti. Myös EU asettaa vaatimuksia ympäristöpäästöille vesistöihin – kiristyvät direktiivit ja suomalainen suojeleva asenne herkkiä vesistöjä kohtaan auttaa asiaa. Käynnissä on jatkuvasti sekä pieniä laitoskohtaisia tehostamishankkeita että yleisiä kehityshankkeita teknologian ja automaation parantamiseksi tai prosessin oheistuotteiden hyödyntämiseksi.

Prosessin kokonaisuuden hallitsemiseksi on tehty paljon työtä automaation, ohjausmenetelmien ja mittausten osalta. Tietokoneiden laskentatehon nopean kasvun myötä osassa laitoksia on tutkittu mahdollisuuksia kuormitusta ja prosessin dynamiikkaa ennustavien tai ihmisen ajattelua jäljittelevien ohjausmenetelmien hyödyistä. Kuitenkin vielä lähivuosina pääosa laitosten automaattisista ohjauksista toimii suoraan ohjaavien, ns. takaisinkytkettyjen, ohjaussilmukoiden varassa. Takaisinkytketty ohjaus mittaa yhtä parametria prosessista, johon voidaan vaikuttaa suoraan säädettävällä tai käynnistettävällä ja sammutettavalla toimilaitteella. Mittauksen perusteella tapahtuvan ohjauksen lähtötietona käytetään ohjauksen toimintaa vastaavaa mittausta, joka toimii nopeasti ja kykenee aistimaan herkästi prosessissa tapahtuvat muutokset (Haimi ym. 2009).

## **Puhdistusprosessi sisältää paljon kuormasta ja laitteistoista johtuvaa vaihtelua**

Yleisin tapa käsitellä jätevetä kunnallisissa puhdistamoissa on biologinen puhdistaminen, jota tehostetaan saostuskemikaalilla (Kangas 2004). Prosessi voidaan pääpiirteiltään esittää etenevänä ketjuna osaprosesseja, mutta typenpoistoon tähtäävät prosessimuutokset tai -lisäykset ovat muuttaneet kokonaisuuden hyvin monimutkaiseksi, erityisesti vanhojen laitosten saneerauskohteissa. Prosessin toiminnot ja ilmiöt vaikuttavat eri viiveillä toisiinsa, ja samaan aikaan prosessiin tuleva kuormitus voi vaihdella voimakkaasti, joten prosessinohjauksen toimivuus on ensiarvoisen tärkeää. Ohjauksen on oltava samaan aikaan herkkä reagoimaan prosessin muutoksiin nopeasti ja riittävän vakaa pitääkseen ohjauksen aiheuttamat muutokset prosessissa mahdollisimman pieninä. Ohjauksen päätehtävänä oli alun perin pitää prosessi hallinnas-



sa, mutta nykyisin tärkeänä tehtävänä nähdään myös energia- ja resurssitehokkuus sekä mahdollisesti etähallinta.

## Analyysimittauksiin perustuva prosessinohjaus

Laitoksen ohjaustavoista riippumatta automaattisen prosessinohjauksen ensimmäinen vaihe on mitata jotain pitoisuutta tai parametria prosessista. Mittaustulos välitetään säätimelle, joka antaa ohjauskäskyn toimilaitteelle omien asetustensa perusteella. Viime vuosikymmeninä kunnallisia jätevedenpuhdistamoita on varustettu kiihtyvällä tahdilla erilaisilla jatkuvatoimisilla analyysimittauksilla. Mittauksen tarkkuuden ja herkkyyden merkitys on suuri, sillä mahdolliset virheet ohjausketjun ensimmäisessä vaiheessa saattavat korostua myöhemmissä vaiheissa. Samoin mittausvirheen perusteella tehty tarpeeton ohjaustoiminto häiritsee prosessin toimintaa ja voi johtaa koko prosessin epätasapainoon. Vastaavasti laadukkaat mittaukset varmistavat tehokkaasti toimivan prosessinohjauksen ja mahdollistavat kehittyneiden prosessinohjausmenetelmien toiminnan.

Tällä hetkellä tärkein säädin prosessinohjauksessa on PID, joka toimii suoraan prosessista mitattavan suureen perusteella (Haimi ym. 2009). PID-säätimessä yhdistyy kolme säädintä, joilla on ohjausta herkistäviä ja tasapainottavia elementtejä. Ensimmäinen algoritmi, P, säätää herkästi mitatun arvon ja ohjauksessa asetetun tavoitearvon erotuksen perusteella. Toinen algoritmi, I, integroi samaa erotusta ajan funktiona ja tasapainottaa säädön toimintaa keskiarvottamalla erotusta. Kolmas harvemmin käytetty algoritmi, D, derivoi mittaustuloksen suunnan ja toimii siten trendiä ennustavana elementtinä ohjauksessa. Tyypillisiä PID-säätimellä toteutettuja ohjauksia ovat esimerkiksi saostuskemikaalin syöttö lähtevän veden fosforipitoisuuden perusteella tai palautuslietteen pumppaus ilmastukseen tulevan virtaaman perusteella.

PID-säädin on suosittu, koska siinä on monipuolisuutta, herkkyyttä ja siitä on paljon kokemuksia, mutta säätimen asetukset eivät aina riitä. PID-säädin soveltuu hyvin yhden parametrin perusteella tapahtuvaan säätöön, mutta jäteveden käsittelyn ohjauksessa tarvitaan myös suoraviivaista ohjausta kehittyneempiä menetelmiä. Osa prosessin ohjaustoimista vaikuttaa prosessiin nopeasti, osa hitaasti, ja toiset toimet vaikuttavat muihin prosessin osiin enemmän kuin toiset. PID-säädintä voidaan käyttää epäsuorassa ohjauksessa ketjuttamalla säätimiä, jolloin ohjausta kutsutaan kaskadiohjaukseksi. Yleisesti käytetty kaskadiohjaus jätevedenpuhdistamoissa on ilmastuksen ohjaus, jossa kaskadiohjauksen pääsäätimellä säädetään happipitoisuuden perusteella prosessiin syötettävää ilmamäärää. Ilmamäärän säätö toimii tässä alisteisena PID-säätönä, eikä ole suoraan riippuvainen happipitoisuudesta. Menettelyllä mahdollistetaan nopea ilmamääriin ja hidas happipitoisuuteen reagoiminen. Nopealla happipitoisuuteen perustuvalla ilmamäärän säätämällä prosessi värähtelisi yli tai ali tavoitearvon, sillä liuenneen hapen pitoisuus reagoi hitaasti syötettyyn ilmamäärään.

## Säädön lisäksi mittauksilla informointifunktio

Prosessin automaattisen ohjauksen lisäksi analyysimittauksia käytetään yleisesti prosessia operoivien henkilöiden reaaliaikaiseen informoimiseen prosessin tilasta harkinnan perusteella tapahtuvien ohjausten lähtötiedoiksi. Tällainen on esimerkiksi palautussuhteen muuttaminen tai koko prosessin ajotavan muutos. Ajotapaa muutetaan harvoin, olosuhteista riippuen joitakin kertoja vuodessa. Orgaanisen aineen ja fosforin puhdistamisessa prosessia ajetaan täysin ilmastettuna, jolloin ilmastuksesta mitataan liuennutta happea (kuva 1). Kuvassa näkyvät myös muut ilmastuslohkon ohjauksen kenttäkomponentit, ilmamäärämittaus (Weber) ennen ilmansäädön moottoriventtiiliä (Auma).



**KUVA 1. Liuenneen hapen mittaus, Hach LDO (kuva Jake Nylund)**

Kun prosessin tilaa seurataan edistyneesti (esim. SOM-kartat), on myös mahdollista reagoida tilan hälyttäviin muutoksiin lisäämällä dynaamisesti analyysimittauksen määrää. Tällöin normaaliajossa säästetään analyysikustannuksia, mutta ennustettavaan häiriöön ehditään kuitenkin reagoida ajoissa. (Dupuit ym. 2006.)

## Ohjauksessa mittauksien laadun merkitys on ratkaiseva

Tavoite pienten ja keskisuurten laitosten muuttamisesta myös kokonaistypenpoistoon soveltuviksi edellyttää jatkuvatoimisia typen eri muotojen analyysimittauksia prosessista. Kokonaistypenpoistossa ammoniumtyppi muuttuu ensin hapellisissa olosuhteissa nitraatiksi, joka puolestaan muuttuu typpikaasuksi anoksisissa tai ana-

erobisissa olosuhteissa. Samojen mittausten perusteella automaattisesti ohjattavissa olevia toimintoja ovat ilmastuksen happiprofilin säätö, hapettomien lohkojen säätö, sekoitus, nitraatin kierrätys, palautuslietteen määrä sekä mahdollinen lisähiililähteenä toimivan kemikaalin syöttö. Mittausten määrä lisääntyy, mutta vastaavasti prosessin hallinta siirtyy reaaliaikaiseksi ja tarvittavia säätöjä voidaan tehdä havaintojen mukaan. Käytettävyyttä voidaan parantaa sijoittamalla mittaukset mukaviin sisätiloihin järjestämällä pumppaus lähtevästä vedestä läpivirtausastiaan (kuva 2). Samasta pisteestä voidaan kerätä käyttötarkkailun kokoomanäytteet ja mitata ohjauksessa tarvittavia parametreja: nitraattia, ammoniumtyyppiä ja fosfaattifosforia.



**KUVA 2. Lähtevän veden ”mittauspatteri”. Hach&Lange Amtax, Nitratax ja Phosphax sc (kuva Jake Nylund)**

Nykyaikaisen jätevedenpuhdistamon ohjaaminen ilman nykyaikaisia analyysimittauksia olisi käytännössä mahdotonta. Tiedon tarve eri prosessiosien välillä ja jopa prosessiosien vaiheiden sisällä on suuri. Tehokkaasti toimivalla prosessinohjauksella voidaan hallita prosessia eri vuorokauden- ja vuodenaikoina muuttuvissa kuormitus-tilanteissa ja samaan aikaan muuttaa prosessin olosuhteita tavoitteiden mukaisesti.

## **Parhaat analyysimittarit ovat jatkuvatoimisia ja luotettavia**

Uudessa opinnäytetyössä ja jo aiemmissa tutkimuksissa on tutkittu eri analyysimittauksien eroja (Nylund 2016, Poutiainen ym. 2009). Tulosten mukaan erityisesti optisiin mittauksiin perustuvat laitteet toimivat hyvin. Esimerkkinä on (kuva 3) Valmetin aiemmin Metso TS- tai Kajaani TS -nimillä markkinoitu mikroaaltomittaukseen perustuva kiintoainemittari, jolla voidaan mitata esim. lietteen sakeutta puhdistamoprosessissa, ja säätää tulosten perusteella lietekiertoja.



**KUVA 3. Kajaani TS -mittari asennettuna DN50-putkeen (Poutiainen ym. 2009)**

Yleinen mittausten luotettavuutta heikentävä tekijä puhdistamoissa on mittausten likaantuminen jäteveden epäpuhtauksien, kemikaalien ja mittauspinnalle kasvavan biofilmin vaikutuksesta. Hyvin toimivissa mittauksissa oli juuri likaantumisen vaikutusta vähentäviä ratkaisuja. Optisissa liuennon hapen mittauksissa on sisäänrakennettu kompensointi ja fosforin analysaattoreissa automaattinen kalibrointi, jotka kasvattavat huoltojen välistä toiminta-aikaa merkittävästi. Samoja menetelmiä hyödynnetään myös sähkökemiallisissa laitteissa, mutta optisen mittauksen vahvuutena on mittausprosessin yksinkertaisuus. Optisissa laitteissa mittausulos syntyy suoraan mittaavan signaalin muutoksista, kun sähkökemiallisissa laitteissa mittaava signaali voi muodostua usean välivaiheen kautta. Sähkökemiallisilla laitteilla on kuitenkin laajempi mittausvalikoima, ja tarkkuus on samaa tasoa optisten mittausten kanssa. Heikkoutena näissä on työläämpi huollettavuus, joka voi vaikuttaa luotettavuuteen. Työssä tutkittiin kaikkia käytössä olevia tekniikoita, joista hyvin toimiviksi havaittiin myös automaattisilla puhdistuslaitteilla toimivat sähkökemialliset mittaukset. Mittauksen hankinnassakin voidaan vaikuttaa laitteen huollettavuuteen. Mittauksen digitaalisuus, jossa mittausalue ja kalibrointitiedot tallentuvat anturiin, parantaa mittauksen käytettävyyttä. Digitaalinen anturi on vaihdettavissa kentällä, ja huolto on mahdollista tehdä sisätiloissa.

## Lähteet

Dupuit, E., Pouet, M.F., Thomas, O. ja Bourgois, J. 2007. Decision support methodology using rule based reasoning coupled to non parametric measurement for industrial wastewater network management. *Environmental Modelling & Software* 22, 1151–1163.

Haimi, H., Mulas, M., Sahlstedt, K. ja Vahala, R. 2009. Advanced operation and control methods of municipal wastewater treatment processes in Finland. *Teknillinen korkeakoulu*.

Kangas, A. 2004. Jätevedenpuhdistamoiden toiminta ja toteutukset. Vesi- ja viemärlaitosyhdistyksen monistesarja numero 15. Copy-Set. Helsinki.

Nylund, J. 2016. Jätevedenpuhdistamoiden analyysimittausten käytettävyys, Opinnäytetyö. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Ympäristötekniikan koulutusohjelma.

Poutiainen, H., Laitinen, S., Juntunen, P. ja Heinonen-Tanski, H. (2009). On-line microwave total solids sensing in sewage characterization. *Water Science and Technology* 59(7), 1291–1297.

# SUOMYRTTI – LUONNON OMA HYTTYSKARKOTE – VILJELYKOKEITA JA ANALYSOINTIA

*Bertalan Galambosi & Marjatta Lehesvaara & Netta-Leena Maljanen*

Suomyrtti on Saimaan rannoilla kasvava, luonnonvarainen, 30–100 cm korkea aromikas pensas. Se on vanha kansanomainen maustekasvi. Lehdissä, silmuissa ja kukinnoissa on voimakasta haihtuvaa öljyä, jonka takia suomyrttiä on käytetty meillä esimerkiksi oluen maustamiseen. Kansanlääkinnässä sitä on käytetty rohtona, ja sen hyttysiä karkottavat ominaisuudet on tunnettu kansainvälisestikin. Kasvin hyttysiä karkottavat vaikutukset herättivät kiinnostusta myös Mikkeliissä. Karkotetestausta varten valmistettiin öljypohjainen koe-erä, joka sisälsi suomyrtin haihtuvaa öljyä. Maatalouden tutkimuskeskuksessa (MTT) Karilan (nykyisin Luonnonvarakeskus) koetilalla tehtiin suomyrtin viljelykokeita, ja Mikkelin ammattikorkeakoulun (Mamk) ympäristölaboratoriossa perehdyttiin kasvista saatavan haihtuvan öljyn eristämiseen ja analysointiin.

## Johdanto

Suomyrtin tunnetuin perinteinen käyttötapa on ollut hyttysten ja syöpäläisten karkottaminen (Alanko 1988, 57–62, Kalela-Väänänen 1958, 465–470, Piippo 1991, 143–150). Iholle hierottu tuore lehti piti hyttyses loitolla tietyn ajan. Vaikka suomyrtti juuriston tyyppä sitovan ominaisuutensa takia on ollut laajasti ekologisten tutkimusten kohteena (Schwintzer ym. 1982, 746–757, 1983, 489–501, Sprent ym. 1978, 657–668), kasvin aromiöljyn koostumustutkimuksia on tehty hyvin vähän. Ennen vuotta 1990 Suomessa ainoastaan Helsingin yliopiston farmasian laitoksella analysoitiin öljyn koostumusta (Schantz-Kapetanidis 1970, 649–656). Kansainvälisen tutkimuksen innoittamana tehtiin erillinen komponenttitutkimus Oulun yliopistossa (Tomperi ym. 1994, 86–87).

Varsinainen kiinnostus suomyrttiä kohti alkoi 1990-luvun alusta, kun lajin hyttyskarkotevaikutusta alettiin hyödyntää Skotlannissa. Useissa tutkimuksissa selvitettiin lajin biokemiallisia ominaisuuksia (Carlton ym. 1992, 55–59; Simpson ym. 1996, 122–129; Stuart, 1990, 463–466; 1998, 38) ja öljyn koostumusta. Tuloksista innostuivat myös englantilaiset ja kansainväliset yritykset. Suomessa suomyrttiin liittyvä tutkimustoiminta alkoi yhdessä skotlantilaisten kanssa. Tutkimuksia tehtiin aluksi Mikkelin Orijärvellä kasvavan suomyrttipopulaation biomassan määrästä ja sen aromiöljyn ominaisuuksista (Svoboda ym. 1998, 367–372). Tämän jälkeen Maatalou-



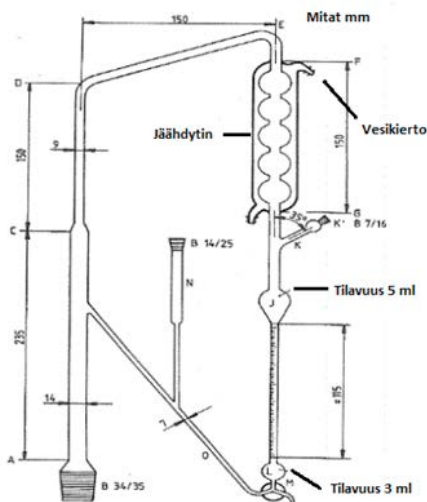
den tutkimuskeskuksessa aloitettiin useita viljelytekniisiä kokeita, mutta haihtuvan öljyn kotimaisen analyysimahdollisuuden puuttuessa analyysit suoritettiin Skotlannissa ja Unkarissa. (Galambosi ym. 2006, 415–421, 2008, 119–127.)

Laajentunut viljelytutkimus Mikkeliissä tarvitsi kotimaista öljyjen analyysiosaamista, ja vuodesta 2000 alkaen Mikkelin ammattikorkeakoulussa ruvettiin määrätietoisesti kehittämään aromikasviöljyjen analysoinnin edellytyksiä ja osaamista. Tässä artikkelissa esitellään Mamkin haihtuvien öljyjen tislauksen kehittämistä ja suomyrttiöljyyn liittyvän koe- ja tutkimustoiminnan tuloksia.

## Haihtuvien öljyjen tislaustoiminnan kehittäminen Mamkissa

Mikkelin ammattikorkeakoulun ympäristölaboratorio oli 2000-luvun alkupuolella mukana useissa yrteihin liittyvissä hankkeissa. Näiden hankkeiden myötä laboratorioon hankittiin tarvikkeita ja laitteita, kartutettiin osaamista ja pystytettiin menetelmät haihtuvien öljyjen eristämiseksi eri kasveista ja öljyjen sisältämien komponenttien tunnistamiseksi. Ammattikorkeakoulun ympäristölaboratorioon oli jo vuonna 1995 hankittu kaasukromatografi-massaspektrometrilaitteisto (GC/MS), mikä oli ehdoton edellytys haihtuvien öljyjen analytiikan käynnistämiseksi.

Haihtuvat öljyt eli eeteriset öljyt eristettiin kasveista käyttämällä vesitislausta. Sitä varten hankittiin kaksi standardin mukaista tisluslaitteistoa (ISO-6571). Vesitilauksessa kasvimateriaali kuumennetaan vedessä kiehuvaan ja muodostuva höyry johdetaan jäähdyttimeen, jossa eeterinen öljy ja vesi tiivistyvät nesteeksi.



**KUVA 1. Standardin ISO-6571 mukainen haihtuvan öljyn tisluslaitteisto (kuva ISO-6571)**

Tislausta varten kuivattua tai tuoretta kasvia punnittiin pyöreäpohjaiseen hiokseliseen lasikolviin, johon lisättiin tislattua vettä. Kolvi liitettiin tisluslaitteeseen ja sitä kuumennettiin sähköhauteella siten, että vesi kiehui. Vesihöyry ja sen mukana haihtuva öljy kulkeutui jäähdyttäjään, jossa tapahtui tiivistyminen takaisin nesteeksi. Tislausaika oli noin viisi tuntia. Tislauksessa eristetyn öljyn määrä luettiin mitta-asteikolta 0,01 ml:n tarkkuudella.

Tislausmenetelmää käytettiin alkuvaiheessa erityisesti kynteli-, oregano- ja minttuöljyjen sekä tilli- ja timjamiöljyjen tislaukseen. (Lampinen P. 2003, 66.) Myöhemmin tislattiin myös mm. kardemumma- ja suomyrttiöljyä.

## Haihtuvien öljyjen koostumuksen analysointi

GC/MS-analyysissä eli kaasukromatografi-massaspektrometrilaitteistolla tapahtuvassa analyysissä yhdisteiden tunnistaminen perustuu niiden retentioaika- ja massaspektritietoihin. Yhdisteen retentioaika tarkoittaa kromatografiassa sitä ajanhetkeä injektointihetkestä laskettuna, jolloin yhdiste saapuu detektorille. Analyysiolosuhteiden pysyessä vakiona sekä yhdisteiden retentiojärjestys että massaspektrit pysyvät muuttumattomina. Massaspektrometriassa yhdisteet ionisoidaan ja osa näytemolekyyleistä pilkkoutuu pienemmiksi fragmenteiksi. Syntyneet molekyylin osat kiihdytetään massa-analysaattoriin, jossa niiden erottelu tapahtuu ionien massan perusteella (Jaarinen 2002, 117). Yhdisteiden tunnistaminen tapahtuu tuotettujen massaspektrien avulla.

Haihtuvien öljyjen koostumus määritettiin Hewlett Packardin HP 6890 -kaasukromatografi-massaspektrometriyhdistelmällä. GC-kolonne oli HP-5MS (pituus 30 m, sisähalkaisija 250 µm, faasin paksuus 0,25 µm). Kolonnin faasimateriaali oli 95 %-dimetyyli-5 %-difenyylipolysiloksaania. Kaasukromatografian lämpötilaohjelma oli seuraava: alkulämpötila 40 °C, jossa 2 minuuttia, lämpötilan nosto 10 °C / min. 250 °C:een, jossa 5 minuuttia. Ajoaika n. 28 min. Injektoitu näytemäärä oli 1 µl.

Yhdisteitä tunnistettiin vertaamalla ajettuja massaspektrejä GC/MS-laitteen massaspektrikirjaston spektreihin (NIST). Lisäksi tunnistamisessa käytettiin apuna teosta Robert P. Adams, *Identification of Essential Oil Components by Gas Chromatography/Mass Spectrometry*. Tunnistamisen varmistamiseksi hankittiin kaupallisia puhtasaineita, joista koottiin oma massaspektrikirjasto. Olennaista tunnistamisessa on se, että tiedetään yhdisteiden retentiojärjestys. Tämän varmistamiseksi minttuöljyistä ajettiin vertailukromatogrammit Helsingin yliopiston farmakognosian laitoksella. Sieltä saatiin myös tukea ja arvokasta haihtuvien öljyjen analytiikan opastusta professori Raimo Hiltuselta ja dosentti Into Laaksolta.



## Suomyrttiöljyn tislauk ja analyysit vv. 2003–2004

Vuonna 2003 syys-lokakuun aikana kerättiin Mikkelin Pitkäjärven ja Orijärven ranalta luonnosta sekä myös tutkimusaseman koeruuduista useamman kerran tuore lehtisato, jota kuivattiin 40 °C lämpötilassa. MTT:n tutkimusaseman koeruudet perustettiin Orijärven populaatioista saadulla pistokkailla. Kasvimateriaalin alkuperä oli siis sama.

Suomyrttiöljyä tislattiin Mikkelin ammattikorkeakoulun ympäristölaboratoriossa syyskuun 2003 ja helmikuun 2004 välisenä aikana. Tislausta varten hankittiin kaksi neljän litran vetoista tislauskolvia. 1,7 kg suomyrtilin kuivia lehtiä tislattiin useassa erässä. Kuivattua (kosteus 8,4 %) suomyrttiä punnittiin 100–200 gramman tislauskolviin, johon lisättiin ionivaihdettua vettä 1–2 litraa käytetyn suomyrtilin määrästä riippuen. Saadun öljyn kokonaismäärä oli 13 ml. Kuivan puhtaan lehtisadon keskimääräinen öljyn saanto oli 0,41 %.

GC/MS-analyysiä varten analysoitavaa öljyä pipetoitiin kaasukromatografian näytteväliin 1 µl. Tähän lisättiin retentiostandardeiksi eli yhdisteiden retentioaikojen varmistamiseksi 100 µl oktaania (pitoisuus 10 µg/ml) ja 200 µl eikosaania (pitoisuus 1 mg/ml) ja etyyliasettaattia 699 µl. Laitteeseen injektoitu näytemäärä oli 1 µl. Suomyrttiöljystä tunnistettiin yhteensä 25 komponenttia (taulukko 1). Öljyn pääkomponentit olivat eukalyptoli (20,62 %), alfa-pineeni (16,89 %), alfa-fellandreeni (5,34 %), selina-3,7(11)dieni (5,04 %) ja delta-kadineeni (4,44 %).

**TAULUKKO 1. Suomyrttiöljyn koostumus v. 2003 Mikkelissä**

RT	Yhdiste	CAS-numero*	Area-%
6,84	Trisykleeni	508-32-7	0,19
6,93	alfa-Tujeeni	2867-05-2	0,29
7,06	alfa-Pineeni	80-56-8	16,89
7,3	Kamfeeni	79-92-5	0,97
7,76	beta-Pineeni	127-91-3	2,34
7,96	beta-Myrseeni	123-35-3	1,43
8,22	alfa-Fellandreeni	99-83-2	5,34
8,41	alfa-Terpineeni	99-86-5	1,2
8,55	p-Symeeni	99-87-6	2,66
8,69	Eukalyptoli	470-82-6	20,62
9,09	gamma-Terpineni	99-85-4	2,33
9,56	Terpinoleeni	586-62-9	0,66
9,7	dl-Linalooli	78-70-6	0,19
10,96	Terpinen-4-oli	562-74-3	1,94
11,15	Linalyylipropanoaatti	144-39-8	1,9
12,52	Bornyyliasettaatti	76-49-3,5655-61-8	0,7
13,37	alfa-Terpinyyliasettaatti	80-26-2	2,44
13,8	Kopaeni	3856-25-5	1,42
14,27	alfa-Gurjuneeni	489-40-7	0,14
14,4	beta-Karyofylleeni	87-44-5	1,13
14,52	Elikseeni	8.8.3242	2,81
15,26	allo-Aromadendreeni	25246-27-9	0,49
15,36	Viridifloreeni	21747-46-6	1,42
15,68	delta-Kadineeni	483-76-1	4,44
15,96	Selina-3,7(11)dieeni	3813-21-4	5,04
	<b>Yhteensä</b>		<b>79 %</b>

\*CAS numero on Chemical Abstract Service- järjestön tuottama kemikaalin rekisterinumero.

Kvalitatiivisten tulosten yhteydessä ilmoitettu piikin pinta-alan prosentuaalinen osuus (Area-%) kromatogrammin kokonaispinta-alasta (100 %) antaa suuntaa-antavan tuloksen ainemäärästä tutkittavassa näytteessä. Area-% yhteensä ilmoittaa kromatogram-

mista tunnistettujen piikkien pinta-alojen yhteenlasketun osuuden kromatogrammin kokonaispinta-alasta. Suomyrttiöljyn komponenteista tunnistettiin siis 79 %.

## Öljypohjaisten tuotteiden valmistus karkotetestausta varten

Vilkastunut kansainvälinen tutkimustoiminta johti siihen, että suuri kotimainen lääketehdaskin kiinnostui luonnosta peräisin olevasta hyttyskarkotevalmisteesta. Mamk-laboratorion koetislauksesta vuonna 2003 saatu 13 ml:n öljymäärä mahdollisti hyttyskarkotteen koe-erän valmistuksen. Koevalmisteita tehtiin Hankintatukku Oy:n laboratoriossa tuotantopäällikkö Matti Kaarlaksen johdolla. (Galambosi 2004.)

Valmisteiden käyttöidea oli se, että suomyrttiöljy sekoitettiin oliiviöljyyn ja sumutettiin iholle ennen ulkoilua. Suomyrtti haihtuu hitaasti iholta ja karkottaa hyttysiä. Valmisteseen lisättiin kaneliöljyä pelkästään miellyttävän tuoksun takia. Kaneliöljylle ei ilmoitettu mitään karkotusvaikutusta. Valmisteet pakattiin 10 ml:n muovipulloihin, joista öljy voitiin sumuttaa iholle. Valmisteiden koostumus oli seuraava:

Nimi	Tehoaineet
Hyttysvex 1	Oliiviöljy 97 % Suomyrttiöljy 2,5 % Kaneliöljy 0,5 %
Hyttysvex 2	Oliiviöljy 97,64 % Suomyrttiöljy 1,83 % Kaneliöljy 0,53 %

Valmisteiden testaus ihmisellä tapahtui vuoden 2004 kesällä MTT:n sasvinsuojelulaitoksen laboratoriossa. 2-2-pullon testauksen suoritti tarkastaja Bengt Lindqvist vuoden 2004 kesän aikana. Virallisen pöytäkirja mukaan ”*saatujen tulosten perustella voidaan todeta, että Hyttysvex-valmisteet karkottavat hyttysiä iholta tehokkaasti 2–4 tunnin ajan. Tämän jälkeen valmisteiden teho heikkenee ja hyttysiä alkaa vähitellen laskeutua jo käsitellyillekin alueille*”.

## Suomyrttiöljyn tislauksen ja analyysin lannoituskokeissa vv. 2005–2007

Myönteinen hyttyskarkotekoe inspiroi sekä yritystä että tutkijoita, ja MTT:n Karilan koetilalla suunniteltiin ja toteutettiin erilaisia viljelyteknillisiä kokeita (mm. lannoituskoe) suomyrtin peltoviljelyn edistämiseksi. Lannoituskokeen tarkoitus oli tutkia mahdollisessa suomyrtin peltoviljelyssä lannoitteiden määrän vaikutusta suomyrtin

biomassaan ja öljyn koostumukseen. Helsingin yliopiston kasvintuotannon biologian opiskelija Netta-Leena Maljanen tutki pro gradu -työssään suomyrтин peltoviljelyssä käytettävien lannoitteiden merkitystä ja lisäysmenetelmiä parhaan suomyrttisadon tuottamiseksi. Hän tutki lisäksi työssään vuoden 2007 kasvisadon avulla peltoviljelyyn domestikoitujen kasvien ja luonnonkannoista saatujen öljysatojen kemiallisten koostumusten eroja (Maljanen 2010). Kokeen haihtuvan öljyn tislauksen ja laatuanalyysi suoritettiin Mikkelin ammattikorkeakoulun ympäristölaboratoriossa.

## Lannoituskokeen aineisto ja menetelmät

Suomyrttiä ei aiemmin oltu viljelty pelto-olosuhteissa, joten tietoa aiemmista lannoitustasojen ei ollut käytettävissä. Koesuunnittelussa eroteltiin lannoitustasojen niin, että kasvavia fosforin (P) ja kaliumin (K) lannoitepitoisuuksia tutkittiin ilman typpeä (N) olevilla koeruuduilla (lannoitustasot = L2-L4-L6) ja myös typen kanssa (lannoitustasot = L3-L5-L7) olevilla koeruuduilla (taulukko 2). Osaruudut olivat ympättyjä ja ei-ympättyjä ruutuja. Ympäysaineina käytettiin Orijärven luonnon suomyrтин kasvupaikan mutaa.

**TAULUKKO 2. Suomyrтин lannoituskokeessa käytetyt lannoitustasot, Mikkelin**

Lannoitustasot	Taso	Ravinnemäärä kg/ha		
		N	P	K
Ei lannoitusta	L1	0	0	0
Perustaso ilman N	L2	0	150	300
Perustaso	L3	50	150	300
2-kertainen taso ilman N	L4	0	300	600
2-kertainen taso	L5	100	300	600
3-kertainen taso ilman N	L6	0	450	900
3-kertainen taso	L7	150	450	900

Koeruudut valmistettiin vuoden 2005 elokuussa. Lannoitusruutujen koko oli 3,75 m<sup>2</sup>. Siemenistä kasvatetut taimet istutettiin 50 x 50 cm:n tiheydellä. Kerranne oli 10. Ennen istutusta ruudut lannoitettiin P- ja K-lannoitteilla. Keväällä 2006 toukokuussa ja kesäkuussa annettiin typpilannoitetta. Typpilannoitetta annettiin myös vuoden 2007 toukokuussa.

Varsisato korjattiin kolmannen kasvukauden jälkeen, 1.9.2007. Kasvien pituus mitattiin ja leikatun versosadon tuorepaino punnittiin. Kasvit kuivatettiin kuivauskäppeissä yön yli 40 °C:n lämpötilassa. Kuivatuista kasveista eroteltiin käsin lehdet ja varret. Lannoituskokeista saatujen kasvien lehdet kerättiin talteen öljyjen tislauksen varten lannoitustasojen mukaisesti. Heikosta kasvusta johtuen ympättyjen ja ei-ympättyjen ruutujen lehtisatoja yhdistettiin tislauksen varten.

## Lannoituskokeiden tulokset

Lannoituskokeista saatua suomyrttiä tislattiin ammattikorkeakoulun ympäristölaboratoriossa 16.10.–31.10.2007. Tislauksella selvitettiin haihtuvan öljyn määrä suomyrtin kuiva-ainegrammaa kohti. Talteen otettu öljy säilytettiin jääkaappilämpötilassa analysointiin asti. Tislatus öljyn koostumus analysoitiin ympäristölaboratorion GC/MS-laitteistolla joulukuussa 2008. Koetulosten mukaan lannoituksella ei ollut merkitystä taimien pituuskasvuun. Taimien pituudet vaihtelivat 34,9–38,5 cm:n välillä. Lannoitustasojen välilläkään ei ollut merkitseviä eroja tuoreversosadon välillä. Kasvien kasvu ei ollut ongelmaton. Siemenistä lisätyt taimet kasvoivat osittain heikosti. Säännöllisen rikkaruohotorjunnan aikana maan muokkaus on häirinnyt juuriston kehitystä, eivätkä kasvit hyödyntäneet kasvavia lannoitemääriä. Myös taimien kuolleisuutta ja lehtitauteja esiintyi.

## Lannoituskokeiden kasvimateriaalin öljyn tislaustulokset

Suomyrtin kuivasta lehtiaineesta saadut öljymäärät olivat erittäin pienet ja vaihtelu oli suurta (taulukko 3). Lannoitettujen ruutujen kasvien keskimääräinen öljysato oli 0,12 ml/100 g, luonnonkannasta saatiin öljyä 0,18 ml/100 g kuivaa lehtiainesta, ja lannoittamattomista ruuduista öljyn saanto oli 0,17 ml/100 g.

**TAULUKKO 3. Kuivattujen suomyrtin lehtien tislattu öljysato lannoituskokeessa (1–7) sekä Pitkäjärven luonnonkannassa (0)**

Lannoitustaso	Lehtien paino (g)	Öljy (ml)	Saanto %
0	387,5	0,7	0,18
1	186,8	0,32	0,17
2	261,8	0,35	0,13
3	175,2	0,19	0,11
4	210,8	0,25	0,12
5	216,5	0,22	0,10
6	273,3	0,33	0,12
7	186,7	0,24	0,13

Tislauksessa saadun öljyn saantoon vaikuttaa suuresti kasviaineksen lisäksi tislauksen tekninen onnistuminen. Vuonna 2003 tehdyissä tislauksissa öljyn saanto oli keskimäärin 0,41 %. Tislaukseen otetun kasviaineksen määrä vaihteli tuolloin 40 g:n ja 200 g:n välillä / tislaukseen, kun se vuoden 2007 tislauksissa oli n. 175 g:n ja 388 g:n välillä. Saattaa olla, että suurempi kasviaineksen määrä tislaukskolvissa heikentää kasvin kostumista ja siten myös öljyn irtoamista kasvista pienentäen siten öljyn saantoa.

Öljyjen koostumukset eri lannoitustasoilta ja luonnonkannasta saaduista sadoista eivät vaihdelleet suuresti. Öljyistä tunnistettiin kaikkiaan 21 komponenttia. Suurimmat komponentit olivat alfa-pineeni ( $18,64 \pm 1,02$  %), eukalyptoli (eli 1,8-sineoli) ( $9,86 \pm 1,18$  %), limoneeni ( $6,99 \pm 0,70$  %) ja alfa-pineeni ( $7,27 \pm 1,07$  %). Yleisesti voidaan todeta, että lannoituksella ei ollut vaikutusta öljyn koostumukseen. Ainoastaan pieniä eroja voidaan havaita muutaman pitoisuudeltaan vähäisen komponentin, kuten kopaeenin ja  $\gamma$ -elemeneenin, osalta.

## Suomyrttiöljyjen koostumusvertailua

Verrattaessa Mikkelin Orijärven suomyrttiöljypopulaation öljyn sisältämiä komponentteja aikaisempiin suomalaisiin suomyrttitutkimuksiin voidaan todeta, että koostumus on melko samanlainen (taulukko 4). Haihtuvan öljyn pääkomponentti oli alfa-pineeni, jonka pitoisuus vaihteli 11–28 %:n välillä. Toinen pääkomponentti on 1,8-sineoli (5,9–20,61 %). Tätä korkeampia pitoisuuksia (35 % ja 40 %) on mitattu Suomessa vain Hailuodon populaatiossa (Tomperi et al. 1994), mutta on huomautettava, että tulokset on saatu eri menetelmiä käyttäen (Purge & Trap -tekniikka). Muita, suomalaisissa tutkimuksissakin määritettyjä, pienempiä komponentteja ovat  $\beta$ -pineeni,  $\alpha$ -terpineeni,  $\beta$ -myrseeni, limoneeni ja kadineeni.

**TAULUKKO 4. Suomyrttiöljyn pääkomponentit (%) suomalaisissa tutkimuksissa**

Julkaisu	Schantz & Kap. 1971	Tomperi ym. 1994	Svoboda ym. 1998	Galam-bosi ym. 2008*	Lehes-vaara ym. 2003	Mal-janen ym. 2007
Populaati-on paikka		Hai-luoto	Mikkeli, Orijärvi	Mikkeli, Orijärvi	Mik-keli**	Mik-keli**
$\alpha$ -pineeni	17,8	35	11.4 - 28.1	12.1 -19.7	16.89	18.64
kamfeeni	0,7				0.97	1.16
$\beta$ -pineeni	1,7		0.9 - 1.8	2.5- 4.7	2.34	1.54
$\gamma$ -terpineeni			3.0 - 9.7	1.4 - 2.1	2.3	
$\beta$ -myrseeni	6,4				1.43	0.54
p-symeeni	4,4				2.66	6.59
limoneeni	10		5.2 - 11.4	1.9 - 6.2		6.88
eukalyptoli (1,8-sineoli)	7,1	40	5.9 - 16.8	8.1 - 20.9	20.61	9.86
okimeeni			0.9 - 2.1			
trans-nero-dioli	5,9		1.1 - 2.4			1.65
kadineeni	12,9		8.4 - 21.0		4.44	
valenseeni				6.8-16.5		
gurjuneeni				7.7 -15.7	0.14	
$\beta$ -elemeneeni			1.5 - 3.0			3.1
$\alpha$ -terpineoli			0.2 - 4.7			1.64

\*analyysi Unkarissa

\*\* Orijärven ja Karilan viljelykokeet yhdessä

Yleisimmät Euroopassa suomyrtin luonnonkannoista tislatuista öljyistä peräisin olevat haihtuvat orgaaniset yhdisteet ovat  $\alpha$ -pineeni, 1,8-sineoli, germakreeni ja  $\gamma$ -elemenoni (Svoboda ym. 1998, 367 -372, Carlton ym.1992, 55 -59).

## Yhteenveto

Lannoituskokeiden perusteella voi päätellä, että rantakasvin siirto suoraan pelto-olosuhteisiin vaati vielä lisää tutkimusta lajin käyttäytymisen ja käytännön hyödyntämisen näkökulmasta. Haihtuvan öljyn koostumus voi yleisestikin vaihdella paljon

riippuen kesän säästä ja siitä, missä vaiheessa kesää sato korjataan. Toistaiseksi ei ole kuitenkaan tarkkoja tutkimustuloksia siitä, millainen orgaanisten aineiden sisältö öljyssä pitäisi olla, jotta se tehokkaimmin toimisi hyttysten torjunnassa.

Suomyrttitutkimusten myötä Mikkelin ammattikorkeakoulun ympäristölaboratoriossa kehitettiin määrätietoisesti haihtuvien öljyjen määrittämisen ja analysoinnin tekniikkaa ja osaamista. Suomyrttiöljytutkimukset tarjosivat hyvää materiaalia ja mielenkiintoisia haasteita ratkottavaksi. Voidaan todeta, että haihtuvien öljyjen analytiikassa saavutettiin yhteneviä tuloksia kansainvälisten tutkijaryhmien kanssa. Haihtuvien öljyjen tutkimuksissa kertynyt analytiikkaosaaminen on ollut suureksi hyödyksi yleisestikin ympäristölaboratorion analyysitoiminnassa.

## Lähteet

- Alanko, P. 1988. Näsiä (*Daphne mezereum*) ja suomyrtti (*Myrica gale*) puutarhakasveina. *Sorbifolia* 19 (2)
- Carlton, R.R., Waterman, P.G., Gray, A.I., Deans, S.G. 1992. The antifungal activity of the leaf gland volatile oil of sweet gale (*Myrica gale*) (Myricaceae), *Chemoecology* 3
- Galambosi, B. 2004. Suomyrttitutkimus v. 2004. Teoksessa: Aromaattisia rohdoskasveja kotimaisen teollisuuden käyttöön. Raportti v. 2004 suoritetuista kokeista.
- Galambosi, B., Galambosi, Zs., Hethelyi, B.E. 2006. Evaluation of biomass potential and oil yield of *Myrica gale* L. for possible field cultivation. In: Actual problems of creation of new *medicinal preparations of natural origin : the 10th international congress PHYTOPHARM* 2006, St.-Petersburg, June 27-30, 2006, proceedings of congress.
- Galambosi, B., Galambosi, Zs., Hethelyi, B. É. 2008. Biomassa potential and oil yield of *Myrica gale* L. in field conditions. *Olaj Szappan Kozmetika* 57, 4
- ISO 6571. Spices, condiments and herbs — Determination of volatile oil content (hydrodistillation method)
- Jaarinen, S., Niiranen, J. 2002. Laboratorion analyysitekniikka. Helsinki: Edita
- Kalela, A., Väänänen, H. 1958. *Myrica gale* L. Suomyrtti teoksessa Pohjolan luonnonkasvit I.
- Lampinen, P. (toim.), Galambosi, B., Janatuinen, H., Lehesvaara, M., Vestergaard J., Leskinen, M. 2003. Mikrobit yrttien ongelmana. Julkaisuja 79. Helsingin yliopisto. Maaseudun tutkimus- ja koulutuskeskus
- Maljanen N-L. 2010. Lisäysmenetelmän ja lannoituksen vaikutus domestikoitavan suomyrtin (*Myrica gale* L.) biomassan määrään ja laatuun pelto-olosuhteissa. Maisterintutkielma. Maataloustieteiden laitos, Helsingin yliopisto.



- Piippo, S. 1991. Puuvartisia rohdoskasveja. 2. Pähkinäpensas (*Corylus avellana*), jalavat (*Ulmus*), Suomyrtit (*Myrica*), Pajut (*Salix*), haavat ja poppelit (*Populus*) sekä lehmukset (*Tilia*). *Sorbifolia* 22(3)
- Robert P. Adams, Identification of Essential Oil Components by Gas Chromatography/ Mass Spectrometry, 1985, Allured Publishing Corporation, USA
- Schantz von M. and I. Kapetanidis. 1970. Qualitative und quantitative untersuchung des aetherischen ols von *Myrica gale* L. (Myricaceae). *Pharm. Acta helv.*, 46
- Schwintzer, C.R, Lancelle, S.A. Effect of water- table depth on shoot growth, root growth, and nodulation of *Myrica gale* seedlings. *Journal of Ecology* 1983. 71
- Schwintzer, C.R., Berry, A.M., Disney L.D. 1982. Seasonal patterns and root nodule growth, endophyte morphology, nitrogenase activity, and shoot development in *Myrica gale*. *Can. J. Bot.* 60
- Simpson, M.J.A., MacInthos, D.F., Cloughley, J.B., Stuart, A.E.. 1996 Past, Present and Future, Utilisation of *Myrica gale* (Myricaceae). *Economic Botany* 50 (1)
- Sprent, J.I., Scott, R., Perry, K.M., 1978. The nitrogen economy of *Myrica gale* in the field. *J of Ecology* 66
- Stuart, A.E. 1990. Paralysis of *Culicoides impunctatus* after exposure to the oil of *Myrica gale*. *Proceedings of the Royle College of Physicians of Edinburgh* 20(4)
- Stuart.A.E., 1998. The Anti-Fungal effect of Oil Distilled from the Leaves of *Myrica gale*. *Planta Medica* 64
- Svoboda KP, Inglis A, Hampson J, Galambosi B, Asakawa Y (1998) Biomass production, essential oil yield and composition of *Myrica gale* L. harvested from wild populations in Scotland and Finland. *Flavour and fragrance journal* 13
- Sylvestre M, Legault J, Dufour D, Pichette A. 2005, Chemical composition and anticancer activity of leaf essential oil of *Myrica gale* L. *Phytomedicine*. 2005 Apr;12(4)
- Tomperi, P.H., Joensuu, P.H., Jalonen, J.E. 1994. Isolation and identification of very volatile compounds of *Myrica gale*. In: Production of herbs, spices and medicinal plants in the Nordic countries: Mikkeli, Finland, 2-3 August 1994. Proceedings of NJF seminar no. 240. NJF utredningar/rapporter 91.

# THE BALTIC RINGED SEAL POPULATION – A BIO-INDICATOR OF CLIMATE CHANGE

*Tuomala Anne-Marie & Petrova Viktoria*

The Environmental Engineering study programme at Mamk has run a double degree programme with several universities from Russia, for example. During the past 2015–2016 academic year, Viktoria Petrova from Saint-Petersburg Electrotechnical University “LETT” participated in the program.

The requirement to complete 30 ECTS for practical training is challenging, especially for double degree students, as there is only one academic year to complete all other parts of the studies as well. Viktoria made a contract with the Baltic Fund for Nature (BFN) from St. Petersburg. The organization was established in 1995 and is supported by St. Petersburg State University. BFN works actively for the support of environmental networks in North-West Russia and promotes international cooperation in the sphere of biodiversity and ecosystem protection in the Baltic Sea region. Since 2000, BFN, as a part of SPNS, became the first regional member of IUCN (World Conservation Union).

We would like to thank Dr. Sergey P. Rezvyj and the director, Dr. Roustam A. Sagitov, for the co-operation. As a result of the traineeship, two articles were completed: “The Baltic ringed seal population – a bio-indicator of climate change” and “Climate change – changing avian biology in the Baltic Sea region”.

## Introduction

The consequences of climate change are crucial to animals and human beings. Wildlife needs the right temperatures, fresh water, food, and places to raise their young. Climate change is altering the key elements of the environment, which are crucial to the survival of wild animals and puts natural resources at risk.

Global warming’s effects on certain species of animals is already seen, as they are very sensitive to climate change. Such species as Baltic ringed seals can be a good bio-indicator of on-going climate changes in the Baltic Sea region, as they are pagophilic animals and dependent on the ice coverage of northern seas, which they need for breeding. Since the 1950s, the Baltic Sea region has been experiencing ever-increasing effects of climate change. According to the International Panel on Climate Change

(IPCC, 2013), by the end of this century an overall increase in the average temperature of 3 to 4° C is expected. The Baltic ringed seal (*Phoca hispida botnica*) is a subspecies of the ringed seal. It lives in the coldest regions of the Baltic Sea, particularly on the coasts of Sweden, Finland, Estonia, and Russia, occasionally reaching Germany.

This is the smallest among all seal species: an adult male is about 1.5 m in length. Ringed seals can be recognized by characteristic light grey ring marks on their adult pelt. Pups have pure white fur and an average size of 60 cm in length and 4.5 kg of weight. There are three isolated populations of ringed seals in the Baltic Sea: in the Botnian Bay, the Gulf of Finland, and the Gulf of Riga. Baltic ringed seals are landlocked within the Baltic basin and form a discrete population.

The estimated current abundance of the Baltic ringed seal is 10 000–13 000 animals. According to the different estimations, the population size was around 100 000–250 000 at the beginning of the 20<sup>th</sup> century. It should be noted that bounty statistics may contain errors, decreasing the reliability of the estimates. At any rate, the population was heavily exploited until the 1960s, after which the emerging organochlorine contamination began to cause reproductive failures. In 1970–80, the population was at its minimum: about 5000 individuals. Most alarming is the population of the Gulf of Finland (Russian territory): since 1978 to the present day it has decreased from 8200 to 300 individuals. The main danger to the seal population is warmer winters, when the ice cover is very thin or does not appear at all. The Baltic ringed seal is included in the Red Data Book of the Russian Federation as a subspecies with a population size reduction of category 2 (corresponds with the IUCN Red List category VU).

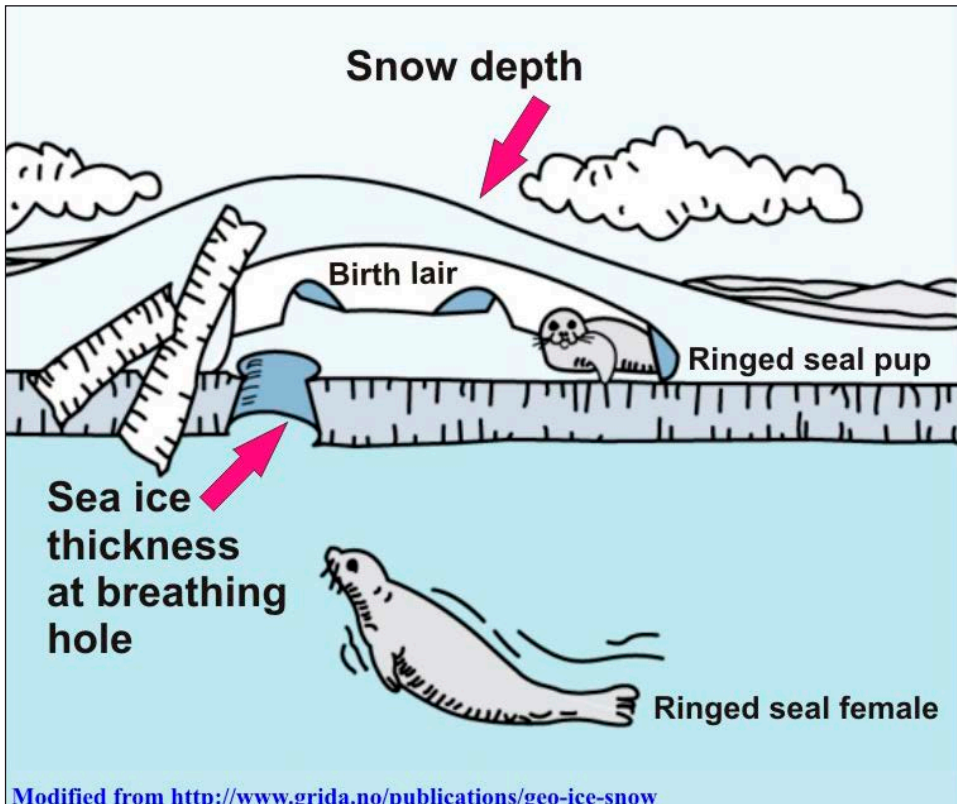
Current climate change trends in the Baltic Sea influencing the population of ringed seals are examined below, as well as how these topics are interrelated.

## The biology of ringed seals

Ringed seals are superbly adapted to life on stable ice, and almost all of them breed on fast ice (ice that is frozen along the coasts and extends out to the sea). Baltic ringed seals give birth to only a single pup once a year.

The females excavate lairs to give birth. The lairs fence from low temperatures and cold air, providing thermal protection and hide the young from predators. The pups are born in February or March. Mating takes place around one month after birthing, but the embryo does not implant in the womb until August or September. The gestation period lasts for around 240 days.

The distribution of ringed seals in winter is linked to the extent of ice fields suitable for building lairs. The highest concentrations of seals are seen in broken consolidated ice that trap snow heaps. Therefore, formation of this type of ice is critical for the breeding success of this species.



**PICTURE 1. Structure of the birth lair of the ringed seal (www.polarbearscience.com 2015)**

The pups do not stay in one lair for a long time. Mother constantly moves them between systems of 4–6 lairs to prevent the pup from being located by predators. Ringed seal pups learn to dive when they are very young and are soon able to move independently. The female lactates for about six weeks after birth, when both the mother and the pup are active, and spends considerable time making short feeding dives. The pups are weaned prior to the spring ice breakup – usually in April.

Female ringed seals reach sexual maturity at 3–7 years of age, while males reach sexual maturity at 5–7 years, although they probably do not participate in breeding before they are 8–10 years old. Male ringed seals are likely to be polygynous, meaning they mate with more than one female. They probably also establish underwater territories during the breeding season.

The ringed seal is an opportunistic predator, which eats fish and crustacean prey. Baltic ringed seals feed mainly on fish such as herring, smelt, whitefish, sculpin, and perch. They also feed on crustaceans, particularly isopods, during the winter. They also feed on krill and shrimp, which form a more important part of their diet, depending upon the location and season.

Ringed seals in the Baltic Sea also have natural enemies such as fishermen's stray dogs, foxes, wolves, and sea eagles. In addition, many seals are killed in fishing nets. Pups and immature seals are particularly vulnerable to predation.

Ringed seals are solitary animals. Unlike the Baltic gray seals, they do not live in large flocks, but they sometimes haul-out in herds on the ice, rocky ridges, separate rocks, and reefs in autumn and late spring. Adult ringed seals typically exhibit site-fidelity and long seasonal migrations are rarely encountered. Young animals can migrate quite far, but these movements have not been well researched. It is known that in the Arctic Ocean young seals can migrate for hundreds or thousands of kilometres. During the spring Baltic ringed seals move along with the ice floes, even long distances.

## Climate change endangers the living surroundings of the ringed seal

Since the 1950s, the Baltic Sea region is experiencing the ever-increasing effects of climate change. According to the International Panel on Climate Change (IPCC 2013), by the end of this century there is an expected overall increase in the average temperature of 3 to 4° C. The warming trend for the Baltic Sea basin is plus 0.08° C/decade. It is a very big number, because the global average is 0.05° C/decade.

The climate change affects the Baltic Sea ecosystem by warming the coastal seawater, changing runoff, and changing river-borne sediments and nutrient loads. The biodiversity is dependent on changes in salinity, which has an effect on food webs (food cycle) and interactions between aquatic and terrestrial ecosystems. A projected salinity change would cause a change in the distribution of species.

The reduced sea ice amount can result in a loss of habitat for ice-dwelling organisms. In addition, anthropogenic pressures, including overfishing and eutrophication, could undermine the stability of the ecosystem, making it more vulnerable to climate change impacts. The impact of climate change on the productivity and eutrophication of the Baltic Sea is not clear at the moment and is likely to vary in the different sea basins. Acidification due to the high level of CO<sub>2</sub> in the sea might have serious consequences for calcifying organisms.

There has been a significant reduction of the ice formation since the 1970s. Climatological simulations show that the situation is forecasted to lead to more reduction of the ice fields and shorter ice-covered seasons in the future. This will lead to extinction of the ringed seal stock in the Gulf of Riga and severely reduce the population growth rate in the Gulf of Finland and the Bothnian Bay.

As previously mentioned, the ringed seal is seriously dependent on ice and snow for reproduction and melting. This is the only species (except the Baikal seal '*Phoca sibirica*') in the Northern Hemisphere which is able live in fast-ice areas.

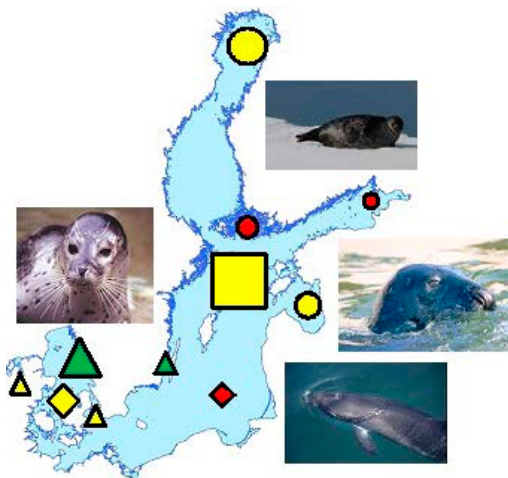
## Population dynamics of Baltic ringed seals – present and future

The number of ringed seals living in the Baltic Sea consists of 10 000–13 000 individuals. They inhabit mainly the northern and eastern parts of the Baltic Sea, where they have three distinct breeding sub-populations: one each in the Gulf of Finland, the Gulf of Riga, and the Bothnian Bay, and a small breeding population in the Archipelago Sea. The biggest part (75%) of the Baltic ringed seal population live in the Bothnian Bay, some live in the Gulf of Riga (15%), and the rest are in the eastern part of the Gulf of Finland (5% or less).

The population in the Gulf of Finland is about 300 animals, the Gulf of Riga 1 000–1 500, and the Bothnian Bay population 8 750–11 700 seals. In the Bothnian Bay the increasing rate is 4.5% per year since 1988, which is less than half the intrinsic capacity of 10%. There is, however, very high variability between 0 and 23%, probably reflecting the uncertainty of population censuses. In the southern breeding areas, the Gulf of Riga, the Gulf of Finland, and the Archipelago Sea, an increasing trend has not been observed. The population in the Gulf of Finland is decreasing and considered very alarming.

The estimated abundance of Baltic ringed seal is 10 000. The most recent estimates from 2011 suggest that there are about 6 500 ringed seals in the Gulf of Bothnia, whereas counted numbers in the Gulf of Finland and the Gulf of Riga were 50 and about 1 400–1 500, respectively. The census in 2011 found 104 ringed seals in the Archipelago Sea after two good ice winters, leading to an estimate of 140–300 individuals in the area.

In the Eastern Gulf of Finland, almost all individuals are on the Russian territory and in the 1990s the subpopulation was estimated to have 300 individuals. The Baltic ringed seal subspecies was classified as vulnerable by the IUCN in 2009.



**PICTURE 2. Baltic ringed seal populations' living areas indicated by red and yellow rings (HELCOM 2013)**

The color symbols of the picture above present the state of the populations: green indicates good environmental status (GES), yellow indicates less than good status, and red indicates a population that is declining or stable with low abundance. The square is for the grey seal in the entire Baltic, the circles for the four subpopulations of ringed seal, the triangles for the four harbor seal subpopulations, and the diamonds for the two harbor porpoise populations.

Ringed seals are pagophilic animals, which means that they need ice for breeding and reproduction. Almost the entire life cycle depends upon their ice habitats. Global warming may have tragic consequences for the ringed seal population in the Baltic Sea and cause a reduction or even extinction of the population.

For successful breeding, the ringed seal needs immobile ice with hammocks, where among the heaps of broken ice in the accumulated snow, the seals build under-snow covers. By linking a climatological model to a detailed population model it was shown that the area of breeding ice as such imposes a strong regulating factor for the Baltic ringed seals.

Reduced growth rates are predicted in all three isolated populations in the coming century, and the southernmost sub-population will be most severely affected. The sub-population located in the Gulf of Riga is on the verge of extinction, as the predicted amount is 75 seals at the end of the century. There are also particular concerns still being expressed regarding the viability of the Gulf of Finland population. Overall, climate change is certain to affect not only the ringed seal but all Arctic and Sub Arctic animal populations.

## References

- Climate Change in the Baltic Sea Area HELCOM Thematic Assessment, 2007 HELCOM core indicators Final report of the HELCOM CORESET project. Baltic Sea Environment Proceedings No. 136. Helsinki, 2013.
- Härkönen, T., O. Stenman, M. Jüssi, I. Jüssi, R. Sagitov, M. Verevkin. 1998. Population size and distribution of the Baltic ringed seal (*Phoca hispida botnica*). In: Ringed Seals (*Phoca hispida*) in the North Atlantic. Edited by C. Lydersen and M.P. Heide-Jørgensen. NAMMCO Scientific Publications, Vol. 1, 167-180.
- Härkönen, T. and Isakson, E. 2011. Historical and current status of harbour seals in the Baltic proper. NAMMCO Sci. Publ. 8: 71-76
- Härkönen, T., Galatius, A., Bräeger, S., Karlsson, O., Ahola, M. Population growth rate, abundance and distribution of marine mammals. HELCOM Core Indicator of Biodiversity. HELCOM, 2013.

IUCN (2009) Species and Climate Change: More than Just the Polar Bear. IUCN/Species Survival Commission. Cambridge, UK. Available at: <http://www.iucn.org/what/tpas/biodiversity/resources/publications/?4562/Species-and-Climate-Change>

IUCN Red List, February, 2011, available at <https://www.iucnredlist.org/>

IUCN, Ringed Seals and Climate Change Arctic ice loss seals the deal, 2011, available at: [https://cms-data.iucn.org/downloads/fact\\_sheet\\_red\\_list\\_ringed\\_seal.pdf](https://cms-data.iucn.org/downloads/fact_sheet_red_list_ringed_seal.pdf)

Jüssi, Mart. (2013). Living on an edge: land-locked seals in a changing climate. University of Tartu blog. 23.1.2013. <http://blog.ut.ee/living-on-the-edge-landlocked-seals-in-a-changing-climate/>

Reckermann, M., Anders Omstedt, A., Pawlak, P., von Storch, H. and the BACC II Author Team, Climate change in the Baltic Sea region – What do we know? Available at: <http://www.hvonstorch.de/klima/pdf/RADOST-BACC.pdf>

Sundqvist, L. & Härkönen, T. Linking Climate Trends to Population Dynamics in the Baltic Ringed Seal: Impacts of Historical and Future Winter Temperatures, 2011.

Wildscreen Arkive. Ringed seal, Available at <http://www.arkive.org/ringed-seal/pusa-hispida/>

<https://polarbearsience.com/2015/12/06/paris-climate-change-deal-will-not-stop-polar-bears-dying-due-to-thick-ice-in-spring/>





# CHANGES IN AVIAN BIOLOGY AND BIRD DISTRIBUTION IN THE BALTIC SEA REGION

*Tuomala Anne-Marie & Petrova Viktoria*

Birds can be used as indicators of environmental change, as they are more sensitive to climate fluctuations than many other physical parameters. Climate change greatly affects their habits, such as distribution and nesting sites. Sometimes birds also have to change their flight routes and even migration time.

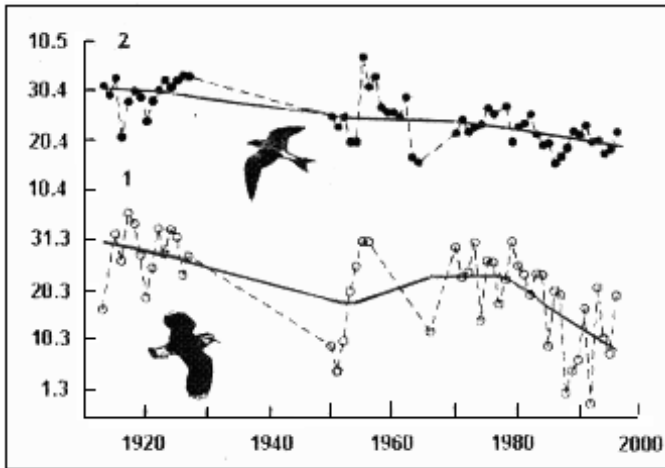
During the process of global warming the redistribution of species may occur: bird species which have never previously lived in some regions may change their location and arrive instead of the usual species.

In relation to the Baltic Sea region, the extension of areas of more southern species can be considered and, as a consequence, the emergence of new species or an increased number of previously rare species.

## **Birds and climate change**

Climate change, which has been observed since the 20th century, significantly affected both the timing of spring migration and timing of breeding for many species of birds in Europe, Asia, and North America. In the past three decades, birds migrating both within one continent and between continents began to arrive at breeding areas much earlier (15–30 days) than in the middle of the last century. This is because there is a strong connection between the timing of the arrival of birds and air temperatures in springtime.

During the last three decades in Europe and North America, researchers have recorded much earlier arrival of birds in nesting areas in comparison with previous decades. This trend is found in many species. Most researchers have come to the conclusion that the main reason for such a significant change in the timing of spring migration is climate warming in the Northern Hemisphere.



**PICTURE 1. The changing timing for arrival of short-distance (1) and long-distance (2) migrants in Poland in the twentieth century (the numbers on the vertical axis represent the date of the first record, according to P. Tryjanowski et al. 2002 in Sokolov, 2010)**

Accordingly, timing of breeding for many species shifted to earlier calendar dates. The assumption of researches is that earlier bird arrival and breeding in the past two or three decades is caused by climate warming. Furthermore, some researchers have also noticed that climatic factors have changed not only the arrival dates of birds nesting in the area, but also shifted the timing of their return migration from wintering areas. To a lesser extent, climate change has affected the timing for autumn migration of birds.

As a result, many migratory species began to remain in the nesting areas much longer than that observed in periods of climate cooling. Further changes in the timing of spring migration and nesting in the Northern Hemisphere will largely depend on the dynamics of the winter-spring air temperatures, both in the breeding and wintering areas of species' habitats.

## Changes in nesting time and distribution

Many researchers found a significant shift in terms of bird nesting to earlier calendar dates during the past three decades. According to the article by biologist Camille Parmesan in 2016, it is indicated that 78 of the 168 surveyed European species (including migratory and resident birds) were found to have earlier nesting timing than in the past decade.

Higher spring temperatures contribute not only to the earlier arrival of birds breeding in the area, but earlier onset of the laying of eggs and, consequently, the earlier timing of hatching.

In 1995 British researcher John Burton came to the conclusion that breeding areas for 71% of European species had undergone a significant change since 1900 and 44% was caused by climate change. Lithuanian researchers found a number of species that have historically bred in the eastern regions of the Baltic Sea and now the breeding ranges have shifted to the east and north-east directions – towards Scandinavia and Russia.

Researchers have found that the white storks from Central and Southern Europe have gradually been shifting their nesting areas to the north, probably due to increasing drought in these regions. The number of breeding pairs of storks decreased significantly in Turkey, Greece, Yugoslavia, and Bulgaria, and increased in Lithuania, Latvia, Estonia, and Russia.

Decreasing numbers of some wetland birds have been noted in Central and Western Europe, including the great reed warbler. Some experts debate whether it is the deterioration of conditions in the wintering grounds of these species in Africa, or the reason behind would be the changing conditions on the breeding grounds. However, in the more northern countries (Estonia, Latvia, Russia, Sweden) the number of breeding populations of this species has been growing. Thus, there are more favourable conditions for breeding at present in Northern Europe than in Central and Southern Europe.

## **Bird species dynamics in the Baltic Sea region**

Remarkably, in the 1980s and 1990s birds have arrived to the Baltic Sea much earlier than in the 1970s. The same trend for earlier arrival of birds was also found in other regions in Estonia, Finland, Lithuania, Russia, and Sweden. Tendencies for earlier arrival of birds are most pronounced in the Russian regions, where there is a significant increase in temperature in the spring period of monitoring.

The global (climatic cycles) and regional factors, such as refusal to use pesticides and improvement of measures for protection of birds in the countries of the Baltic region, have caused the movement of a large number of thermophilic species of birds. Cold-favouring species redistributed to the eastern part of the Gulf of Finland and their number in western parts decreased.

The second half of the 20th century marked the beginning of new species staying in the region. These species include the:

- Caspian tern (*Hydroprogne caspia*)
- Eider (*Somateria mollissima*), since 1970
- Mute swan (*Cygnus olor*)
- Shelduck (*Tadorna tadorna*), from the end of the 1980s
- Cormorant (*Phalacrocorax carbo*), since 1994
- Gadwall (*Anas strepera*), since 1994
- Sandwich tern (*Thalasseus sandvicensis*)
- Barnacle goose (*Branta leucopsis*), since 1996
- Canada goose (*Branta canadensis*), since 2005
- Scaup (*Aythya marila*) in 2007
- Guillemot (*Uria aalge*) since 2010.

Moreover, it seems that such species as the greylag goose (*Anser anser*), velvet scoter (*Melanitta fusca*), great black-backed gull (*Larus marinus*), turnstone (*Arenaria interpres*), black guillemot (*Cephus grille*), and razorbill (*Alca torda*) were first discovered nesting in the region in 1987–1988, but probably nested already some time before. Terms of autumn migration for the majority of species studied, in contrast to the spring migration, have not changed significantly.

During the last 5–10 years, population growth is seen in the greylag goose, barnacle goose, eider, ringed plover (*Charadrius hiaticula*), oystercatcher (*Haematopus ostralegus*), razorbills, and guillemots. An interesting detail is also the increase in the frequency of invasions of the great egret (*Casmerodius albus*) in recent years (up to 21 individuals in a single count on Kurgalsky Peninsula of the Gulf of Finland).

## Examples of bird habitat changes in the Baltic Sea region

Because of mass extermination at the beginning of the 20th century, only a few breeding pairs of great egrets (*Casmerodius albus* L.) were observed in Eastern Europe, in the most remote flooded areas in the deltas of large rivers flowing into the Black Sea and Caspian Sea. Nowadays, due to the strict and universal protection measures, as

well as the development of the warming temperature, the size and expansion of the great egret area began to increase in the western part of Eurasia. In the Baltic region, the most northeastern notification is currently in Latvia. Before the end of the 20th century, only two occasional records of this species in the territory of the Leningrad region were known.

According to Russian scientist Koshelev, there was a clear trend towards increase in the number of mute swans (*Cygnus olor*) breeding in countries such as Austria and Sweden in the late 1920s and early 1930s. The first case of mute swan nesting in the Baltic Sea region of Russia was recorded in 1987 and by 1994–1996 there were already 570–630 birds, with 85–90 breeding pairs in the eastern part of the Gulf of Finland. These rates were related to the growth of the mute swan population in this region. In recent decades, the state of the mute swan population has been stable, but with strong yearly fluctuations in the number (from 80 to 180 pairs) caused by the short-term climate conditions. In the Gulf of Finland, 90–95% of all mute swan nests are located at Kurgalsky Peninsula, in the Seskar Archipelago and in the island of Moshnyi, where the majority of the birds forms a colony consisting of 3–33 nests.

In the first half of the 20th century, in the Leningrad region and adjacent territories the number of greylag goose (*Anser anser* L.) declined steadily due to the increased human impact. By mid-century it remained only in West Estonia. Since the 1950s, a growing number of this species began to appear in the Baltic Sea region. Re-colonization of the Leningrad region was noted in 1988. Currently, the species breeds in several islands of the Gulf of Finland. Nowadays, the estimated number of birds in the Leningrad region has multiplied up to 20–35 pairs of greylag geese. In the majority of observed cases, the nesting took place in the southern sector of the Gulf of Finland. Thus, there are from 1 to 22 pairs of bird nests in the Kurgalsky Peninsula in recent years (usually 4–5), 1–10 pairs in the Seskar Archipelago, 5–6 pairs on Small Tyuters Island, and up to 5 pairs on the Virgin Islands Archipelago.

Currently, the breeding area of the black redstart (*Phoenicurus ochruros*) has expanded considerably to the north. This species began to fly to the Baltic states and Finland in the 1960s but started to nest in the 1970s. The date of the spring registrations during expansion shifted to a significantly earlier date, primarily due to the increase of spring air temperature during the past decades in the Baltic states and North-West Russia.

The black redstart has been found in the Leningrad region since 1984, mostly during the seasonal migrations. In 2008–2009 the first two nests were found in St. Petersburg (59° 49' N, 30° 04' E). This is the north-easternmost confirmed breeding place in north-western Russia. In the breeding season, the species favours overgrown areas with abandoned farms, factories, and other old or unfinished buildings. Lately, it has started to use the urbanized landscape. Until recently, St. Petersburg was considered the most north-eastern proven place of black redstart nests in the north-west of Russia. However, the latest evidence showed that this species may breed in the Lodeynoye Pole district in the Leningrad region.

Until the 1950s, the ringed plover (*Charadrius hiaticula*) was a common breeding species in the eastern Gulf of Finland. Later, due to increased recreational activities on the coast, it became extremely rare in the Leningrad region. The tendency for growth of a number of species began to appear in 2003, when five plover nests were found near the village Bronka near the Neva Bay. In 2012–2014, 12–13 pairs bred there. Since 2009, every year 1–3 pairs nest on the sandy islands of the northern coast of the Kurgalsky Peninsula. In a study of the islands in the Gulf of Finland in 2014, breeding plovers were found on the island of Small Tyuters (5 nests and broods), Hogland (1 brood), Seskar (1 brood), Moshnyi (1 brood), the Long Kamen Archipelago (2 nests), and Zubec Island (1 brood). It can be concluded that 35–40 pairs now breed in the eastern part of the Gulf of Finland

The current wave of gadwall (*Anas strepera*) expansion is definitely associated with an increased number of species in the neighbouring western countries, primarily in Estonia, where in the early 1990s the number of gadwalls reached 200–500 pairs. Now there is the largest breeding population in the Baltic region (2000–3000 pairs) and a steady positive population trend. Visual observations of the migration at the Kurgalsky Peninsula confirm this trend.

Penetration of the gadwall in the northern part of the region is also possible through Finland, where locate 150-300 nests. The sharp increase in the number of gadwalls in the Leningrad region and their invasion in the more northern and eastern parts of the North-West region have been observed, usually in years with early spring and / or a hot summer and in the next few years behind them

## Finally

There was a significant change in the distribution area boundaries for a number of species of birds in the twentieth century. For some species, the northern boundary of their area moved further to the north, while for others the southern border shifted in the same direction. Some birds settled far to the west, while the others to the east. The distance of migration for many species has decreased, so they have to hibernate much closer to the nesting area. Researchers associate many of these changes in the habitat of birds with the climate warming.

For more northern populations, warming does more good than harm, because it allows the birds not only to develop new, previously unsuitable living areas, but also significantly increase their numbers, which in most cases is beneficial for the survival of the species. On the other hand, the southern populations suffer from warming and their number looks to be decreasing. Birdlife offers an interesting indication of the influence of global warming.

## References

- BirdLife International (2016) IUCN Red List for Birds. Downloaded from <http://www.birdlife.org> on 23/05/2016
- Burton, J., 1995. Birds and Climate Change. Christopher Helm Publishers Ltd; First edition. Hardback.
- Iovchenko N.P., 2014. Prostranstvenno-vremennoe raspredelenie seroi utki *Anas strepera* na Severo-Zapade Rossii v konce XIX – nachale XXI vekov: osnovnie etapi I sposobi ekspansii ,sovremennoe sostoyanie i prognoz // Russkiy ornitologicheskii zhurnal. 2014. T 23.
- Iovchenko N.P., Zanin S.L. 2010. First breeding records of Black Redstart *Phoenicurus ochruros* (S.G. Gmelin, 1774) in St. Petersburg. // Povolzskii ekologicheskii zhurnal. № 3. S. 331 - 336
- Kouзов S.A., 2015. O haraktere prebivania Bolshoi beloï capli (*Cosmerodius albus* L.) na Kurgalskom polyostrove i sopredelennih uchastkah vostochnoi chasti Finskogo zaliva v poslednem desyatiletii// Vestnik Sainkt-Peterburgskogo universiteta, 2015.T3 S41-50
- Kouзов S.A., 2016. Osnovnii tendencii mnogoletnei dinamiki soobshestv gidrofilnih ptic ostrovnoi zoni vostochnoi chasti Finskogo zaliva// Russkiy ornitologicheskii zhurnal. 2016. T.25. Vyip. 349. S. 799-801
- Kouзов S.A, Kravchuk A.V., 2013. Greylag goose (*Anser anser* L.) in the Leningrad region: main tendencies of long-term dynamics, ecology, migrations and reintroduction prospects// Vestnik ohotovedeniya, 2013, T10, № 1, S. 5 - 16
- Kouзов S.A, Kravchuk A.V., 2016. Peculiarities of the spatial distribution and territorial structure of breeding group of the mute swan *Cygnus olor* in the Leningrad Oblast and their environment determinants// Russkiy ornitologicheskii zhurnal. 2016. T.25. S. 556-557
- Parmesan, C., 2006. Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, Vol. 37 (2006), pp. 637-669
- Sokolov L.V., Klimat v zhizni rastenii i zhivotnih, St. Petersburg, 2010, 344 p.





# DETERMINATION OF MOISTURE IN ACTIVATED SLUDGE BASED ON NMR RELAXATION DATA AND INDEPENDENT COMPONENT ANALYSIS

*Ekaterina Nikolskaya & Mika Liukkonen & Jukka Selin & Yrjö Hiltunen*

Dewatering of sludge is an important step in wastewater treatment, and it would be advantageous to be aware of the different water types present in the sludge in order to optimize the process. Usually the sludge contains three types of water bound by different mechanisms. All of these water types require a different amount of energy when being removed by drying. In this study, the Independent Component Analysis (ICA) method has been applied to an analysis of Nuclear Magnetic Resonance (NMR) relaxation data obtained from the measurement of wastewater sludge samples with a known total moisture content. The results suggest that the ICA method can be used for determining the amount of different water types within the wastewater sludge without a priori knowledge.

## Introduction

Sludge is a semi-solid by-product remaining after wastewater treatment or industrial or refining processes. It is a separated solid suspended in liquid, characteristically comprising large quantities of interstitial water between its solid particles (IWA WaterWiki 2016). This material can be dried to reduce its volume and to remove most of the moisture content of the solids within the sludge. In wastewater treatment, the dewatering of sludge is one of the most important steps, because it largely affects both the process economics and the costs of sludge disposal.

A classification of water types in sludge is to divide it in three groups, i.e. 1) free water, 2) mechanically bound water, and 3) physically or chemically bound water. The free water in sludge can be easily removed by mechanical means, whereas the bound water is held firmly within the floc, bound to the sludge or trapped between the sludge particles, and thus cannot be easily removed (Jin et al. 2004). The bound water can be further divided into chemically or physically bound water which is removable only by thermal drying, and mechanically bound water, which is bound by weaker capillary forces (Colin & Gazbar 1995).

Time domain nuclear magnetic resonance method (TD-NMR) is also becoming highly attractive for industrial applications, due to the relatively low price, mobility, easy operation, and simple sample preparation procedure. The most successful applications of TD-NMR confirmed by international standards are solid fat content determination in food and water (Vaxelaire & Cézac 2004) and oil content in oilseeds (ISO 8292, 2008, ISO 10565, 1998).

Independent component analysis (ICA) is a statistical method that has been successfully applied to a variety of problems in signal processing (Hyvärinen et al. 2001). For example, the method has been applied to a variety of problems in several fields, such as brain spectral imaging, vision research, telecommunications and financial research. ICA is a method for extracting underlying, fundamental factors or components from multivariate statistical data. It is designed so that it searches for components that are both statistically independent and non-Gaussian (Hyvärinen et al. 2001), which makes it a distinguished method among the other techniques.

In the present study, the ICA method has been applied to an analysis of NMR relaxation data obtained from the measurement of wastewater sludge samples with known total moisture content.

## Materials and Methods

The seven sludge samples (See Table 1) with known water content were obtained from an industrial wastewater treatment plant. The samples were gathered after the dewatering stage of the process.

**TABLE 1. Description of sludge samples**

Sample ID	Water content [%]
Sample 1	54
Sample 2	68
Sample 3	75
Sample 4	79
Sample 5	83
Sample 6	85
Sample 7	89

Relaxation time measurements were done using a mobile NMR device with a  $^1\text{H}$  resonance frequency of 25.7 MHz (Resonance Systems Ltd). The device has been modified for measurements in industrial conditions. The permanent magnet of 0.6 T has dimensions of 140×190×150 mm weighing 19 kg. The diameter of the sensor hole was 10 mm. CPMG (Carr-Parcell-Meiboom-Gill) pulse sequence for spin-spin relaxation time  $T_2$  measurements was used.

It is assumed here that there are  $n$  observed signals (i.e. the number of samples),  $WS_1, WS_2, \dots, WS_n$  in the data, which are linear combinations of  $m$  independent components (i.e. types of water),  $IC_1, IC_2, \dots, IC_m$ . The equation for  $IC_i$  can be written as:

$$WS_i = a_{i1}IC_1 + a_{i2}IC_2 + \dots + a_{im}IC_m = \sum_{j=1}^m a_{ij}IC_j, \quad (1)$$

where  $i = 1, 2, \dots, n$  and the  $a_{ij}$  are real coefficients (contributions of ICs). The independent components,  $IC_j$ , and also the corresponding coefficients,  $a_{ij}$ , are unknown.

The statistical model in Eq. (1) is called the independent component analysis model (Hyvärinen et al. 2001). The ICA model is a generative model that describes how the observed data are generated by a process of mixing the components  $IC_i$ . Both  $IC_i$  and  $a_{ij}$  need to be estimated using the observed data. The starting point for ICA is the assumption that the components  $IC_i$  are statistically independent, which can be concluded from non-gaussianity (Hyvärinen et al. 2001). Here, a fixed-point algorithm (Fast-ICA) was used as an implementation of ICA (Hyvärinen et al. 2001). The analysis was performed using the Fast-ICA toolbox under the Matlab software platform (Mathworks, Natick, MA, USA). After the analysis, the relative shares of each component can be calculated using the following equation:

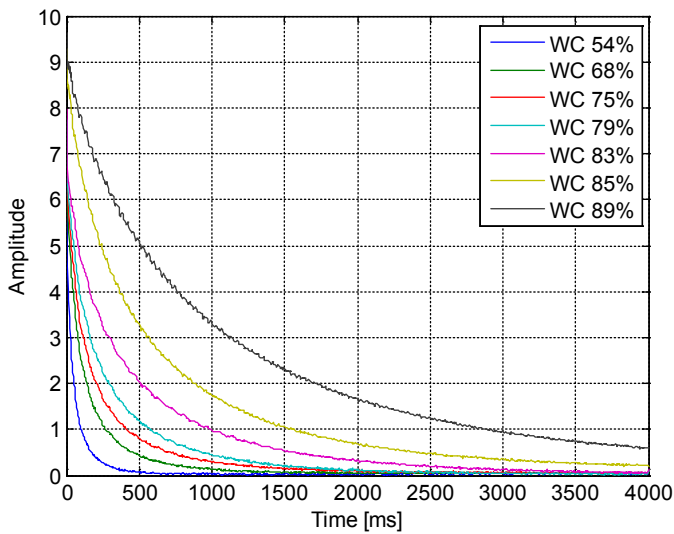
$$a_{ij,rel} = \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^m a_{ij}} \times 100 \quad (2)$$

## Results

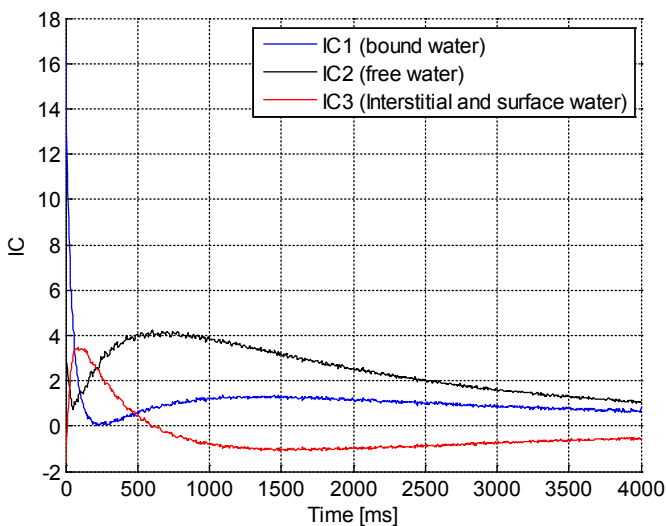
The original NMR measurement signals are seen in Fig. 1. It can be seen that there is a clear dependency between the signal and the moisture content of sludge samples.

The gained NMR relaxation data were analyzed by the ICA method. Several numbers of ICs were tested, and three ICs were eventually used, because this setting was found to yield the most consistent and stable results. The three independent components (IC) can be seen in Fig. 2. It can be seen that all three ICs have their own, independent behavior.

According to theory, the share of bound water from the total amount of water remains stable in the sludge when the water content is increased from 0 on to a certain point (See Fig. 3a above). After this point, other types of water start to accumulate. When moisture content is 100%, all water is considered to be in a free form, but when the sludge is dried, the share of free water decreases dramatically, and the share of bound water increases. The share of the so-called interstitial water (bound by weaker capillary forces) reaches its highest value at around 70–90% moisture content. In Fig. 3b, the relative shares of the coefficients of each IC can be seen. It can be seen that the measured and analyzed values roughly follow the theoretic values and thus support them.



**FIGURE 1. The original NMR measurement signals using the seven samples.**



**FIGURE 2. The three independent components using the NMR spectral data.**

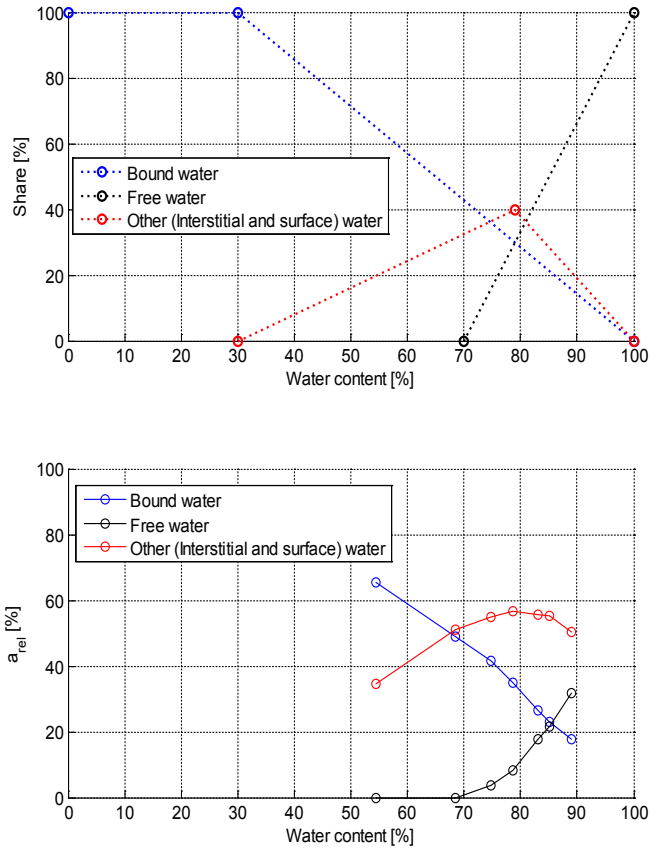


FIGURE 3. a) Theoretic and b) measured shares of different water types.

## Discussion

Measurement of the different water types in sludge is an exceptionally challenging problem, and to our knowledge this has not been tried before. In this respect, the results are extremely promising.

ICA is a universal statistical technique in which observed data are linearly transformed into components that are maximally independent from each other. A key issue in using the ICA method is to decide the number of ICs to be estimated. For the relaxation data set used, only the physically meaningful components were chosen. Our results support the use of three independent components in this case. This suggests that there are three types of signals in this data.

Based on the results, it seems that the combination of time-domain NMR and ICA can be used for determining the amount of different water types within the wastewater sludge. It is also beneficial that the ICA method does not require *a priori* knowled-

ge on the water types and their shares in the sludge. This makes it a very specific and promising approach to optimize the dewatering processes of sludge.

## Conclusions

Based on the results, it can be concluded that incorporating ICA into data analysis allows for decomposition of independent, systematically occurring patterns in spectral data. This new information can be used for guiding further study and may lead to a way of extracting the shares of different water types in wastewater sludge. This would help in making the sludge dewatering more economical and in reducing the costs of sludge disposal.

## Acknowledgments

This research is a part of the SMD (Savonlinna Smart Demonstrations) project, which is funded by the South Savo Regional Council and the European Regional Development Fund (ERDF). Furthermore, the InDiGO! (Intelligent Software and Service Concept of the Industrial Internet) project, funded by the Finnish Funding Agency for Technology and Innovation (TEKES), is also acknowledged.

## References

- Colin F., Gazbar S. (1995). Distribution of water in sludges in relation to their mechanical dewatering. *Water Research*, 29, 2000-2005.
- Hyvärinen, A., Karhunen, J., Oja, E. (2001). *Independent Component Analysis*. New York, John Wiley & Sons.
- ISO 10565. (1998). Oilseeds – Simultaneous determination of oil and water contents – Method using pulsed nuclear magnetic resonance spectrometry.
- ISO 8292. (2008). Animal and vegetable fats and oils – Determination of solid fat content by pulsed NMR.
- IWA WaterWiki. (2016). Accessed June 15, 2016. Available via: <http://www.iwawaterwiki.org/xwiki/bin/view/Articles>
- Jin B., Wilén, B.-M., Lant, P. (2004). Impacts of morphological, physical and chemical properties of sludge flocs on dewaterability of activated sludge. *Chemical Engineering Journal*, 98, 115-126.
- Vaxelaire, J., Cézac, P. (2004). Moisture distribution in activated sludges: a review. *Water Research*, 38, 2215-2230.

# METSÄTALOUS JA PUUTUTKIMUS







# TIEKUNTIEN TOIMINTA YKSITYISTEILLÄ

*Kalle Karosto & Kati Kontinen*

Yksityistiet ovat tärkeä osa Suomen tieverkkoa, sillä ne toimivat tieverkoston hius-suonistona. Yksityistiet välittävät liikennettä valtion ylläpitämiltä maanteiltä ja kuntien kaduilta yksittäisille kiinteistöille. Yksityisteiden käyttöoikeuden perusteena on yleensä kiinteistön hyväksi toisen kiinteistön alueelle perustettu tieoikeus. Tietä käyttävien kiinteistöjen omistajat ovat kyseisen yksityistien tieosakkaita. Tieosakkaat ovat velvollisia vastaamaan omalla kustannuksellaan yksityistien rakentamisesta ja kunnossapidosta eli tienpidosta ja tienpidon kustannusten kattamiseksi perittävistä tiemaksuista. Tiemaksut jaetaan tieosakkaiden kesken kiinteistöjen liikennetarpeiden perusteella tieyksiköiden mukaan. Tieyksiköinnin ylläpidosta vastaa tiekunnan toimielin, jolle muutokset tienkäytössä on jokaisen osakkaan ilmoitettava.

## Tienpidosta vastaaminen

Tieosakkaat vastaavat tienpidosta yhdessä. He voivat toimia joko järjestäytymättömänä tai järjestäytyä tiekunnaksi. Järjestäytymättömänä tieosakkaiden on oltava yksimielisiä ja sovittava tienpidosta keskenään. Tiekunta puolestaan on järjestäytynyt tapa hoitaa tienpitoa. Tiekunta valitsee asioiden valmistelua ja täytäntöönpanoa varten toimielimen, useimmiten kolmijäsenisen hoitokunnan tai toimitsijamiehen. Tiekunta päättää tienpitoa koskevista asioista vuosikokouksissaan. Tiekunta kannattaa perustaa, jos tieosakkaita on paljon ja tie vaatii säännöllistä kunnossapitoa. Tieosakkaat eivät voi perustaa tiekuntaa keskinäisellä sopimuksella. Tiekunta perustetaan yksityistietoimituksessa tai kunnan tielautakunnan toimituksessa (Hämäläinen, E. 2015).

## Laki ohjaa tiekunnan päätöksiä

Tiekunnan ja sen hoitokunnan toimintaa ohjaa yksityistielaki. Muun muassa tiekunnan kokousten koollekutsuminen ja kokousmenettely, uusien tieosakkaiden ottaminen ja tieyksiköiden määrääminen sekä tiemaksuista päättäminen on laissa säänneltyä. Tiekungalla on suhteellisen laaja harkintavalta siinä, minkä tasoiseksi tie rakennetaan ja miten sitä pidetään kunnossa. Tiekunta päättää myös rahoituksesta ja tienpitotoimien ajankohdista. Hoitokunta on vastuussa siitä, että tiekunnan toiminta on laissa säädetyn mukaista. Hoitokunnan on myös huolehdittava tiekunnan päätösten toimeenpanosta. Tiekungalla on hyvä rytmittää toimintansa tilikauden mukaan. Hoitokunnan lakisääteisiä tehtäviä ovat muun muassa tilinpito, tiemaksujen mak-

suunpanoluettelon laatiminen ja tiekunnan kokouksen koollekutsuminen. Toiminnan kannalta tärkeitä ovat tiekunnan kokouksessa esiteltävät edellisen toimintakauden toimintakertomus ja tilinpäätös sekä seuraavan vuoden toimintasuunnitelma ja talousarvio. Jos toimikausi noudattaa kalenterivuotta, on tiekunnan kokous pidettävä kesäkuun loppuun mennessä (Hämäläinen, E. 2015).



**KUVA 1. Metsätien rakentamista (kuva Kati Kontinen)**

## **Yksityistieiden merkitys haja-asutusalueilla**

Yksityistiet muodostavat huomattavan osan haja-asutusalueen tieverkosta. Haja-asutusalueella yhteiskunnan muutostarpeet ja vaatimukset ovat johtaneet siihen, että lähes kaikki kiinteät palvelut haetaan kuntakeskuksista. Tästä johtuen myös yksityistieiden tulisi täyttää tyydyttävästi liikenteelliset vaatimukset. Puuhuollon kuljetukset sekä loma-asutuksen lisääntyminen vaativat myös kunnossa olevan yksityistieverkoston. Maatalouden osalta Etelä-Savon alueen peltolohkot ovat pieniä ja sijaitsevat hajallaan talouskeskuksista. Tästä johtuen yksityistieiden riittävä rakenteellinen kunto on maataloustoiminnalle välttämätön.

Yksityistiet muodostavat Etelä-Savossa tiestöllisen hiussuoniverkoston, joka mahdollistaa toimivan puuhuollon. Metsätalouden merkitys Etelä-Savossa on merkittävä, sillä alueen metsistä tulevat suurimmat kantorahatulot Suomessa. Hakkuumäärien lisääntyessä sekä ajoneuvomassojen kasvaessa yksityisteiden oikeanlaiseen kunnossapitoon ja parantamiseen tulee kiinnittää entistä enemmän huomiota. Maaseudun väestön ikääntymisen ja haja-asutusalueiden väestön vähenemisen seurauksena yksityisteiden hallinnosta ja kunnossapidosta kiinnostuneita asuu maaseudulla yhä vähemmän. Useilla tiekunnilla on vaikeuksia löytää aktiivisia toimijoita toimitelmiin sekä teiden hoitoon. Toisaalta tiekuntien asioita hoidetaan hyvinkin leväperäisesti, koska ei ole tarkempaa tietoa yksityistielaista. Tämä voi herkästi johtaa erimielisyyksiin teosakkaiden välillä.

## Yksityisteiden ylläpito

Yhteiskunnan avustuksilla on ollut suuri merkitys yksityisteiden rakenteellisen kunnan säilymiseen. Valitettavasti yksityisteiden yhteiskunnalliset avustukset ovat vähentyneissä, mistä seuraa suuria haasteita tieverkon liikennöitävyyden turvaamisessa. Maaseudun yksityistieverkkoa pidetään jatkossakin yllä pääasiassa teosakkaiden toimesta. Kuntien ja valtion jatkuvasti niukkenevat avustukset pystyvät korvaamaan vain osan yksityisteiden tienpidon kustannuksista. Tärkeää olisikin välittää tiekunnille asiantuntevaa opastusta tien hoidosta ja perusparantamisesta. Tie kuntien toimielimiä kouluttamalla ja opastamalla voidaan niiden hallintoa selkeyttää. Tie kuntia järkevästi yhdistämällä voidaan hallintoa keventää ja tienpitoa järkeistää. Myös kuntien virka- ja luottamusmiesten kouluttaminen yksityisasioiden suhteen on tarpeen, koska tielautakunta (-jaosto) joutuu käsittelemään yksityistielain mukaisia asioita toimien alemman asteen oikeusviranomaisena mm. riitatapauksia käsitellessään. Kunnissa yksityistielain tuntemus on vähäistä johtuen ensisijaisesti henkilöresurssien rajallisuudesta.

## Yksityistiet – Hallinnon, kunnossapidon ja perusparantamisen tehostaminen -hanke

Mikkelin ammattikorkeakoulu on toteuttanut hanketta yhdessä Laatu Oy:n kanssa, ja sitä rahoittaa Euroopan maaseudun kehittämisen maatalousrahasto RaJuPuSu Leader -toimintaryhmän kautta. Hanke alkoi 1.1.2016 ja päättyi 31.12.2016.

Hankkeen toiminnan kohteena ovat olleet kaikki hankkeen piiriin kuuluvien kuntien (RaJuPuSu Leader ry:n toiminta-alue) yksityistiekunnat. Maanmittauslaitoksen rekisterissä RaJuPuSu Leader ry:n toiminta-alueella (Joroinen, Juva, Rantasalmi, Sulka) järjestäytyneitä yksityisteitä on yhteensä reilut 800 kpl ja noin 2 000 kilometriä. Hankkeen tarkoituksena on ollut kouluttaa tiekuntien toimihenkilöitä yksityisteiden hallintoon, kunnossapitoon ja perusparantamiseen liittyvissä asioissa. Hankkeessa on neuvottu ja opastettu tiekuntien osakkaita hoitamaan tiekuntiansa asioita siten, että he pystyisivät hoitamaan hallintonsa yksityistielain- ja -asetusten mukaisesti. Lisäksi

tiekuntia on neuvottu avustusten ja tukien hakemisessa ja niiden käytössä, sekä opastettu kohdistamaan varansa oikeanlaiseen tienpitoon. Hankkeen aikana on koulutettu kuntien virka- ja luottamusmiehiä yksityistieasioissa.

## Yksityistiepäivät

Hankkeen aikana järjestettiin neljä eri tiedonvälitystilaisuutta eli yksityistiepäivää, yksi kussakin Rajupusu Leader ry:n toiminta-alueen kunnassa. Yksityistiepäivistä laitettiin kutsu paikalliseen lehteen, ja tiekuntien toimielimille lähetettiin erillinen kutsukirje. Tilaisuudet olivat avoimia kaikille yksityistieasioista kiinnostuneille.

Ensimmäinen tilaisuus järjestettiin 4.3.2016 Joroisten kunnantalolla, jossa paikalla oli 29 osallistujaa. Seuraava tilaisuus oli Sulkavalla 11.3.2016. Sulkavan tilaisuudessa osallistujia oli 42 henkilöä. 18.3.2016 yksityistiepäivä pidettiin Juvan kunnantalolla; Juvan tilaisuuden osanottajamäärä oli 44 henkilöä. Hankkeen viimeinen yksityistiepäivä oli Rantasalmella, Järviluontokeskuksessa. Osanottajia Rantasalmelle saapui 42.

Tiepäivien ohjelma oli tiivis ja asiaa riitti pitkälle iltapäivään asti. Tiepäivien pääesiintyjänä ja hankkeen vetäjänä toimi Olli Miettinen Laatutie Oy:stä. Tilaisuuksissa puheenvuorot käsittelivät lähinnä yksityisteiden tienpidon tehostamista ja yksityisteiden hallintoa, kokousmenettelyä ja tiekunnan toimielinten tehtäviä. Lisäksi käytiin lävitse tieyksiköintiä ja teiden perusparantamista. Tilaisuuksissa oli paikalla myös Ely-keskuksen asiantuntija kertomassa yksityisteiden perusparannuksista ja niiden valtionavustuksista sekä Otso Oy:n asiantuntija puhumassa Kestävän metsätalouden rahoituksesta (Kamera-tuesta) ja sen hakemisesta metsäteille.

Tilaisuuksien osanottajamäärät olivat tienkuntien määriin verrattuna hyvät. Tilaisuudet herättivät kiinnostusta, ja iso osa kunkin kunnan tiekunnista oli edustettuna. Palautteet tilaisuuksista olivat erittäin positiivisia, ja niiden perusteella voi päätellä tilaisuuksien olleen tarpeellisia.

**TIEKUNTIEN YKSITYISTIEPÄIVÄ 8.4.2016**

Rantasalmi, Järviluontokeskus, Ohitustie 7

- 8.30 – 9.00 **Tervetulokahvit**
- 9.00 – 9.15 **Tiepäivän avaus, Harri Korhonen, Rantasalmen kunta**
- 9.15 – 9.30 **Yksityisteiden tienpidon tehostaminen - projektin esittely, Olli Miettinen, Laatutie Oy**
- 9.30 – 11.30 **Yksityisteiden hallinto, Olli Miettinen, Laatutie Oy  
Tiekunnan kokousmenettely  
Tiekunnan ja toimielimen tehtävät**
- 11.30 – 12.00 **Yksityisteiden perusparannukset ja valtionavustukset, Taina Seppänen, ELY – keskus**
- 12.00 – 12.30 **Kemera – tuet metsäautoteille, Sakari Hassinen, Otso - Metsäpalvelut**
- 12.30 – 12.45 **Tuote-esittelijän puheenvuoro, Mika Kajan, ViaCon Oy**
- 12.45 – 13.15 **Kahvitauko**
- 13.15 – 13.45 **Yksityistielain uudistaminen, Olli Miettinen, Laatutie Oy**
- 13.45 – 14.15 **Tieyksikköjaon perusteet, Olli Miettinen, Laatutie Oy**
- 14.15 – 14.45 **Yksityisteiden perusparantaminen, Olli Miettinen, Laatutie Oy**
- 14.45 – 15.00 **Loppukeskustelu, Olli Miettinen, Laatutie Oy**
- Tilaisuuden päättäminen, Jouko Lukkarinen, tiejaoston vpj.**



KUVA 2. Rantasalmen yksityistiepäivän ohjelma

## **Yksityistiet – Hallinnon, kunnossapidon ja perusparantamisen tehostaminen – Mikkelin kaupunki -hanke**

RaJuPuSu Leader -toimintaryhmän hankkeen lisäksi Mamk toteuttaa samanlaista yksityistiehanketta myös Mikkelin kaupungin kanssa. Yksityistiet – Hallinnon, kunnossapidon ja perusparantamisen tehostaminen – Mikkelin kaupunki -hanke toteutetaan yhdessä Laatumie Oy:n kanssa. Hanketta rahoittaa Mikkelin kaupungin maaseutu- ja tielautakunta. Hanke alkoi 1.1.2016 ja päättyy 31.12.2017.

Hankkeen toiminnan kohteena ovat kaikki Mikkelin alueella olevat yksityistiekunnat. Maanmittauslaitoksen rekisterissä on Mikkelin kaupungin alueella järjestäytyneitä yksityisteitä yhteensä 1 072 kpl, yhteispituudeltaan noin 2 680 km. Mikkelin kaupungin avustuksen piirissä on 773 tiekuntaa.

Lisäksi toiminnan kohteina ovat yksityistieasioista vastaavat kuntien luottamus- ja virkamiehet. Hankkeen aikana toimitaan yhteistyössä kuntien ja valtion yksityisteistä vastaavien tahojen kanssa.

Mikkelin tiekuntien yksityistiepäivä pidettiin konsertti- ja kongressitalo Mikaelissa 26.2.2016. Paikalla oli n. 250 tieasioista kiinnostunutta osallistujaa. Lisäksi hankkeen aikana toimivaan palvelupuhelimeen on tullut useita kymmeniä puheluita yksityisteiden osakkailta, ja Olli Miettinen on toiminut neuvonantajana myös tiekuntien vuosikokouksissa.

### **Lähteet**

Hämäläinen, E. 2015. Yksityisteiden hallinto - Tiekuunta ja tieosakas 2015. Suomen Tieyhdistys.

# METSÄ BIG DATAN MAHDOLLISUUDET METSÄNHOITOYHDISTYSKENTÄSSÄ

*Kati Kontinen*

## **Etelä-Savon metsäomaisuus ja sen vaikutukset alueella**

Etelä-Savon maapinta-alasta 88 % on metsätalousmaata, ja alueella syntyy lähes kymmenesosa koko maan vuotuisesta metsien kasvusta. Maakunnan kantorahatulot ovat vuosi toisensa jälkeen olleet maan suurimmat (Etelä-Savon Metsäohjelma). Etelä-Savo on maan alkutuotantovaltaisimpia maakuntia, jonka taloudessa ja työllisyydessä maa- ja metsätaloudella on edelleen merkittävä asema tulevinakin vuosina (Etelä-Savo-Ohjelma). Yksityismetsät kattavat yli 60 prosenttia maamme metsäalasta. Niistä suurin osa on perheiden omistuksessa ja vähäisempi osuus perikuntien sekä yhtymien hallinnassa. Yksityismetsänomistajien puun tarjonta on avainasemassa metsäteollisuuden puuhuollon turvaamisessa. Teollisuuden käyttämästä kotimaisesta raakapuusta yksityismetsien osuus on peräti 80–90 prosenttia. Tulevaisuudessa yksityismetsien merkitys lisääntyy myös metsien monimuotoisuuden turvaamisessa, kansalaisten virkistysympäristönä, bioenergian lähteenä ja mahdollisesti myös hiilen sitojana.

Metsänomistajakunnan rakennekehityksessä ovat olleet keskeisimpiä piirteitä maanviljelijäomistuksen väheneminen, metsänomistajakunnan ikääntyminen, koulutustason nousu, metsälökoon muutokset, kaupungistuminen ja tavoitteiden moniarvoistuminen. Yksityismetsänomistajakunnan rakennemuutos näyttäisi jatkuvan samansuuntaisena kuin aikaisemmin. Tulevaisuuden metsänomistajakunnassa on nykyistä enemmän iäkkäitä, eläkeläisiä ja naisia sekä entistä vähemmän maatalousyrittäjiä. Metsänomistajat ovat myös keskimäärin paremmin koulutettuja kuin nykyään. Uudet metsänomistajat ovat todennäköisesti korkeammin koulutettuja ja varakkaampia kuin nykyiset omistajat, joten he ovat taloudellisesti aiempaa vähemmän riippuvaisia metsätuloista.

## **Metsänhoitoyhdistykset palveluiden tuottajina**

Metsänhoitoyhdistyslain muutos muutti metsänhoitoyhdistyksen jäsenyyden vapaaehtoiseksi 1.1.2015. Tästä eteenpäin metsänhoitoyhdistykset saavat itse päättää vuosittain jäsenmaksunsa ja siihen kuuluvat palvelut. Metsänhoitoyhdistyksillä on



merkittävä asema metsäpalvelumarkkinoilla. Yhdistykset suunnittelevat ja toteuttavat arviolta noin 80 % yksityismetsien metsänhoitotöistä ja tekevät noin 70 % puunmyyntisuunnitelmista. Metsänhoitoyhdistykset toimivat aktiivisesti metsänomistajien apuna myös varsinaisessa puukaupassa. Metsänhoitoyhdistyksien tarjoaman neuvonnan merkitys yksityismetsänomistajien puukaupassa ja puun liikkeelle saannissa on merkittävä. Metsänhoitoyhdistykset ovat historiansa suurimpien muutosten edessä. Muutoksista tärkeimpiä ovat mm. teknologinen kehitys, metsänomistajien rakennemuutos ja arvomuutokset, maaseudun rakennemuutos (esim. infrastruktuurin heikkeneminen), yhteiskunnan tavoitteet julkisen hallinnon keventämiseksi sekä tuotantoparadigman muutos puuntuotantokeskeisestä kohti asiakaslähtöisiä malleja (Pakkala, P. 2014).

Metsänhoitoyhdistys on yritysmuotona varsin poikkeuksellinen, koska se tekee liiketoimintaa yhdistyspohjalta. Myös metsänhoitoyhdistyksen hallinto-organisaatio poikkeaa tavanomaisesta yhdistyksestä ja varsinkin tavanomaisista yritysmuodoista, koska siinä keskeisessä roolissa on luottamushenkilöstö. Luottamushenkilöt valitaan yhdistyksen jäsenistöstä eli asiakkaiden keskuudesta. Ylin päättävä elin on vaaleilla valittu valtuusto, joka valitsee hallituksen. Hallitus toimeenpantua valtuuston päätökset ja hoitaa juoksevaa hallintoa. Operatiivisesta johdosta vastaa toiminnanjohtaja. Jokainen metsänhoitoyhdistys toimii omalla maantieteellisellä alueellaan (Pakkala, P. 2014).

Metsänhoitoyhdistykset ovat toimintaperiaatteiltaan ja kehittymistavoitteiltaan samankaltaisia ja kasvu- ja kehityshakuisia. Toimintaympäristön ja asiakaskunnan muutokset edellyttävät, että yhdistykset kehittävät toimintaansa entistä enemmän liiketoimintaperiaatteiden pohjalta. Palveluja täytyy tuotteistaa ja hinnoitella kannattavasti, ja yhdistyksen resurssien on jatkossa riitettävä myös erikoispalvelujen tuottamiseen. Palvelujen tuottamiseen hajautetussa asiantuntijaorganisaatiossa lähellä asiakasta täytyy kehittää uusia johtamisjärjestelmiä, työskentelymalleja ja hyödyntää erilaisia sähköisiä palveluratkaisuja ja mobiiliin kenttätyöskentelyn välineitä (Pakkala, P. 2014).

## **Liiketoiminnan lisääminen metsä dataa hyödyntämällä**

Jäsenet eli asiakkaat ovat metsänhoitoyhdistyksen toiminnan kannalta tärkeimmässä asemassa. Tästä syystä metsänhoitoyhdistyksen jäsenyys ja sen tuomat palvelut sekä edut tulisi saada kiinnostaviksi, jotta mahdollisimman moni metsänomistaja pysyisi metsänhoitoyhdistyksen jäsenenä. Erityishuomiota tulee kiinnittää palveluiden laatuun ja palveluiden tuottavuuteen. Asiakaskohtaamisen maksimoimiseksi liiketoiminnallisessa näkökulmassa valmistautuminen on avainasemassa. Metsänomistajista, metsäomaisuudesta, kiinteistöstä ym. löytyy tietoa, joita yhdistelemällä voitaisiin valmistautua paremmin asiakaskohtaamisiin. Tietolähteiden monipuolisempi ja tehokkaampi käyttö on edellytys digitaalisuuden avulla tapahtuvalle kasvulle. Näin saavutetaan tehokkaampi ja suunnitellumpi myynti sekä myyntiä edeltävä työ. Palveluita voidaan kohdentaa, automatisoida ja räätälöidä entistä paremmin ja yksilöllisemmin. Samalla yhteydenpito metsänomistajiin paranee ja tehostuu (Pakkala, P. 2014).

Suomalaisista metsänomistajista yli puolet on yli 60-vuotiaita, ja jatkossa metsäomaisuuden siirtyminen perintönä nuoremmille sukupolville kasvaa merkittävästi. Metsänomistajakunta muuttuu entistä enemmän kaupunkilaisista etämetsänomistajiksi, joiden koulutus- ja tulotaso ovat nykymetsänomistajia korkeampia. Samalla heidän kokemusperäinen tietämyksensä metsänhoidosta on nykyomistajia alhaisempi, eikä metsätyötaitoja ole. Nämä muutokset lisäävät erilaisten metsänhoitopalveluiden kysyntää, ja samalla palveluja on uudistettava vastaamaan muuttuvan asiakaskunnan tarpeita ja osaamistasoa.

Asiakaskunnan muutokset tarkoittavat merkittäviä muutoksia myös metsäorganisaatioiden toiminnassa. Tulevaisuudessa menestyminen riippuu yhdistyksen kyvystä kehittää toimintaansa, aktiivisuuttaan palvelun tarjoajana sekä palvelu- ja tuotekehityksestä. Kuten muillakin aloilla, myös metsäpalveluiden tuottamisessa erilaisten sähköisten palvelukanavien käyttö lisääntyy jatkossa joka tapauksessa merkittävästi.

## **Toimintaympäristön muutos aiheuttaa liiketoiminnan kehitystarpeita**

Toimintaympäristön ja asiakaskunnan muutokset edellyttävät, että yhdistykset kehittävät toimintaansa entistä enemmän liiketoimintaperiaatteiden pohjalta. Tulevaisuuden metsäliiketoimintaan kuuluu myös kyky toimia erilaisissa verkostoissa. Työ siirtyy yhä enemmän yrittäjävetoiseksi, ja koneyrittäjät ja yrittäjämetsurit vastaavat yhä laajemmista kokonaisuuksista. Tällöin nousee esille mm. organisaation yrittäjyysosaaminen ja tietotekninen osaaminen (esim. mobiilit ohjausjärjestelmät). Myös big datan käyttö luo uusia mahdollisuuksia toimintatapojen kehittämiseen ja liiketoiminnan lisäämiseen. Malleja ja toimintoja kehitetään monella saralla, ja osa näistä mahdollisuuksista on vielä keksimättä.

Metsäalalla on saatavilla runsaasti dataa. Datalähteitä ovat mm. metsänhoitoyhdistysten asiakastietojärjestelmät, viranomaisten keräämät tietoaineistot, puuteollisuuden järjestelmät, metsäsuunnitteluaineisto sekä erilaiset mittaustiedot ja paikkatiedot. Osa tiedosta on rakenteellista, mutta nykyään kertyy yhä enemmän rakenteeltaan vaihtelevaa aineistoa. Osa datasta voi olla avointa ja osa taas kaupallisten toimijoiden tarjoamaa. Lähteitä pyritään yhdistelemään eri menetelmin ja tuottamaan hyödyllistä ja käytettävää dataa analytiikan tarpeisiin. Yhdistelyssä hyödynnetään rajapinta-ajattelua, joka edistää uudelleenkäyttöä ja liiketoimintamahdollisuuksia myös tulevaisuudessa. Lisäksi käytetään hyödyksi koneoppimista. Koneoppiminen on tekoälyn osa-alue, jonka tarkoituksena on saada ohjelmisto toimimaan entistä paremmin pohjatiedon ja mahdollisen käyttäjän toiminnan perusteella. Koneoppimisessa ohjelmistolle ei ole välttämättä määritetty toimintamenetelmää (algoritmia) jokaista tilannetta varten, vaan kone oppii itsenäisesti päätyään haluttuun lopputulokseen. Koneen oppiminen kehittyy itsestään sitä mukaa, kun tietoa lisätään tietokantaan.

## Muutos vaatii uutta osaamista ja työssäjaksamista

Toimintatapojen kehittämisellä on positiivisia vaikutuksia henkilöstön työhyvinvointiin. Toimihenkilöiden työnkuvien selkeytyminen ja uusien toimintatapojen mahdollistama parempi valmistautuminen asiakkaan kohtaamiseen lisäävät työn hallinnan tunnetta. Uusien toimintatapojen avulla on mahdollista tehostaa ja järkevöittää ajankäyttöä ja ”poistaa turhia tehtäviä tai tehtävänosia”, jolloin toimihenkilöt kykenevät keskittymään tuloksen kannalta merkittävien asioiden tekemiseen ja tätä kautta kokevat työnsä merkitykselliseksi (Työelämä 2020). Metsänomistajien palvelut- ja palvelutapahtumat paranevat ja niissä pystytään huomioimaan entistä enemmän yksilöllisiä tarpeita.

## Lähteet

Etelä-Savon metsäohjelma 2016–2020. <http://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/smk-alueellinen-metsaohjelma-etela-savo.pdf>

Kontinen, K., (2015). Digitaalisuus metsäopetuksessa: Digimetsä-hanke opetuksen kehittämisessä. Kati. (Ed.), Mikkelin ammattikorkeakoulu, In: D: Vapaamuotoisia julkaisuja – Free-form Publications 56.

Pakkala, P. 2014. Forest team - uudistumista metsäpalveluihin. Hankehakemus.

Työelämä 2020. <http://www.tyoelama2020.fi/>

# TURVEMAIDEN KESÄAIKAINEN PUUNKORJUU

*Rauno Kousa & Kati Kontinen*

Suomessa metsätalous on merkittävin turvemaiden käyttömuoto. Lisäksi turvemaita on maatalouskäytössä ja niiltä korjataan turvetta erilaisiin käyttötarkoituksiin. Turvemaat ovat tärkeitä marjamaita ja riistan elinympäristöjä. Laajamittaiseen metsäojitukseen ryhdyttiin tilanteessa, jossa metsäteollisuus oli kasvanut voimakkaasti ja metsiä hakattiin nopeammin kuin ne kasvoivat.

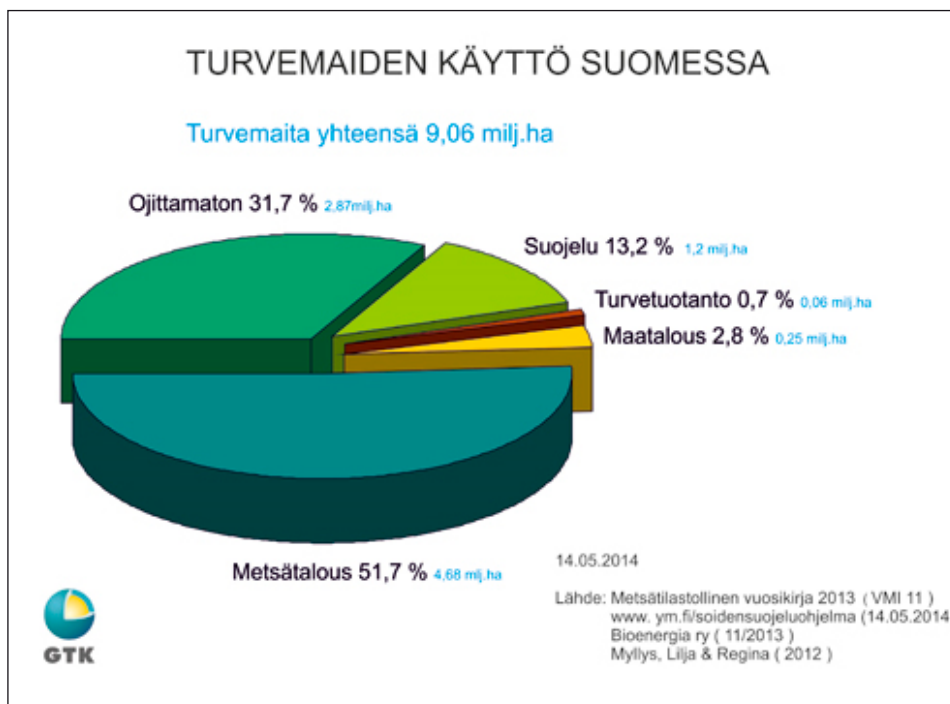
Suomen metsätalousmaasta on turvemaita 34 prosenttia. Laajan ojitustoiminnan seurauksena turvemaiilla on paljon hakattavaa puuta. Turvemaiden puuston kasvu ja kokonaistilavuus ovat 20 prosenttia Suomen metsien kokonaispuustosta (Metsätilastollinen vuosikirja 2013). Turvemaiilla on runsaasti harvennusrästejä ja on arvioitu, että turvemaiden puunkorjuuta voisi lisätä 15–20 miljoonaan kuutiometriin vuodessa.

Pyrittäessä lisäämään kotimaan hakkuita turvemaat muodostavat merkittävän lähteen. Turvemailta hakattavien puumäärien kasvaessa on varauduttava siihen, että yhä suurempi osa kohteista joudutaan korjaamaan sulan maan aikana. Samanaikaisesti lämpimien talvien vuoksi jäätyneen maan hyväksikäyttö puunkorjuussa on käynyt yhä vaikeammaksi. Turvemaiden puunkorjuussa on siis edessä melkoinen kehittämissaaste.

Puunhankinnan ympärivuotisuus aiheuttaa räsitusta maaperälle sekä puustolle, luonnonarvoja unohtamatta (Äijälä, O ym. 2014). Hankkeessa saatavan uuden tiedon avulla puunhankintaa pystytään kohdentamaan entistä paremmin oikeille alueille, mikä parantaa korjuujälkeä. Maaperään kohdistuvan räsituksen ja tätä kautta aiheutuneiden muutosten vähenemisen kautta pienenee maaperän huuhtoutumisriski. Lisäksi polttoaineen kulutus metsäkoneissa pienenee vastuksen vähenemisen kautta.

Turvemaiden sulan maan aikaisen puunkorjuun ongelmana on maaperän heikko kantavuus. Ratkaisua kantavuusongelmaan voidaan hakea joko turvautumalla erikoiskoneisiin tai parantamalla nykykaluston käyttömahdollisuuksia heikosti kantavilla mailla. Perinteisesti ajouraa on vahvistettu hakkuutähteellä ja puutavaralla. Kesäaikaisessa puunkorjuussa turvemaiilla tämäkään ei aina riitä, vaan ajourapainumia saattaa muodostua jo muutaman ajokerran jälkeen. Suolla suuria kantavuusongelmia esiintyy usein vain pienellä osalla ajouria. Kriittinen alue voi olla vetinen. Kriittinen alue voi olla myös lyhyt, esimerkiksi notko, ojan tai puron ylityspaikka tai varastolle johtava ura.

Kun etukäteen tiedetään, että kantavuus on heikko tai kuormat suuret, voidaan ajoalustaa vahvistaa. Ajoalustan vahvistustoimenpiteitä ovat havutus, kuitupuutelan rakentaminen, siirrettävien ajosiltojen tai kevytsillan käyttö. Maaperän mekaanisella vahvistamisella tarkoitetaan jonkin maaperän kantavuutta lisäävän elementin tai materiaalin käyttämistä ajouralla metsäkoneen renkaiden alla, jolloin ajoneuvon liikkumiskyky paranee ja maaperän vaurioituminen vähenee. Renkaan aiheuttama paine maan pintaan jakautuu suuremmalle alalle.



**KUVA 1. Metsätalouden osuus turvemaisista Suomessa (Geologian tutkimuslaitos)**

## Turvemaiden kesäaikainen puunkorjuu ja maaperän vahvistaminen -hanke

Mikkelin ammattikorkeakoululla toteutettavassa hankkeessa lisätään tiedonvälityksen keinoin metsänomistajien, metsäkoneenkuljettajien ja toimihenkilöiden tietoutta turvemaiden puunkorjuun erikoispiirteistä ja maaperän vahvistamisratkaisuksista. Hankkeen avulla kesäaikainen puunkorjuu osataan kohdistaa oikeille turvemaakohteille, ja kohteissa tunnistetaan vahvistamistarve sekä tunnetaan vahvistamisratkaisuiden käyttömahdollisuudet.

Lisäksi hankkeella pyritään tiedonvälityksen keinoin asennemuutokseen turvemaiden kesäaikaista puunkorjuuta kohtaan ja tätä kautta lisäämään puunkorjuun ympäri-vuotisuutta. Turvemaiden puunkorjuusta ja maaperän vahvistamisratkaisujen käytös-tä järjestetään tiedonvälitystilaisuuksia metsänomistajille, puunhankintayhtiöiden ja metsänhoitoyhdistysten toimihenkilöille sekä urakoitsijoille. Lisäksi asialle haetaan näkyvyyttä radion, lehdistön, sosiaalisen median ja television sekä erilaisten julkaisu-jen kautta. Hanketta rahoittaa Euroopan maaseudun kehittämisen maatalousrahasto.

## Turvemaiden korjuunäytökset kesällä 2016

Ensimmäinen tapahtuma oli turvemaan korjuunäytös Pieksämäellä 23.8.2016, ja se keräsi noin 91 kiinnostunutta metsänomistajaa sekä metsäalan toimijoita. Tilaisuuden järjestelyistä vastasi Mikkelin ammattikorkeakoulu ja Etelä-Savon ammattiopisto.

Paikalla olivat metsäkonealan toimijoista Ponsse Oyj, Metsä Multia, Komek Oy, Te-laCat Oy ja Metsä-Säämänen Oy. Tilaisuudessa tutustuttiin kesäaikaiseen turvemaan puunkorjuukohteeseen, korjuukalustoon ja maaperän vahvistamisratkaisuihin.

Yleisölle korjuutapahtumasta järjestäjien puolesta kertoi Esedun Ano Teittinen. Näy-töksessä mukana olleesta kalustosta ja sen soveltavuudesta turvemaiden korjuuseen kertoi Metsä Multian Kai Laaja sekä Ponssen Teemu Vidgren.



**KUVA 2. Turvemaan korjuunäytös, Pieksämäki (kuva Rauno Kousa)**

Seuraavana tapahtumana oli turvemaan korjuunäytös Haukivuorella 6.9.2016, ja se keräsi noin 85 kiinnostunutta metsänomistajaa sekä metsäalan toimijoita. Tilaisuuden järjestelyistä vastasi Mikkelin ammattikorkeakoulu ja Etelä-Savon ammattiopisto



yhteistyössä Metsä Groupin Mikkelin piirin kanssa. Paikalla olivat metsäkonealan toimijoista Ponsse Oyj ja Veljekset Hokkanen Oy. Korjuunäytös järjestettiin Metsä Groupin työmaalla Mikkelin kaupungin omistamalla metsätilalla. Korjuunäytöksessä tutustuttiin kesäaikaiseen turvemaan puunkorjuukohteeseen, korjuukalustoon ja maaperän vahvistamisratkaisuihin.

Yleisölle korjuutapahtumasta järjestäjien puolesta kertoi Esedun Ano Teittinen. Näytöksessä mukana olleesta kalustosta ja sen soveltuvuudesta turvemaiden korjuuseen kertoivat Veljekset Hokkanen Oy:n Anne Puikkonen sekä Ponssen Seppo Alanne.



**KUVA 3. Turvemaan korjuunäytös, Haukivuori (kuva Rauno Kousa)**

Kesän 2016 viimeisenä tapahtumana oli turvemaan korjuunäytös Mäntyharjulla 13.9.2016, ja se keräsi noin 56 kiinnostunutta metsänomistajaa sekä metsäalan toimijoita. Tilaisuuden järjestelyistä vastasi Mikkelin ammattikorkeakoulu ja Etelä-Savon ammattiopisto yhteistyössä Stora Enson Mäntyharjun toimipisteen kanssa. Paikalla olivat metsäkonealan toimijoista Ponsse Oyj, Komatsu Oy, Stora Enso ja Forest Vihavainen. Korjuunäytös järjestettiin Stora Enson työmaalla Mäntyharjun Vanosen kylässä yksityisen metsänomistajan omistamalla metsätilalla. Korjuunäytöksessä tutustuttiin kesäaikaiseen turvemaan puunkorjuukohteeseen, korjuukalustoon ja maaperän vahvistamisratkaisuihin.



**KUVA 4. Turvemaan korjuunäytös, Mäntyharju (kuva Rauno Kousa)**

Vahvistamisratkaisuihin olivat esillä ajosillat sekä hakattavan kohteen kuusen pinta-juuruisuudesta johtuen ajourien havutus. Yleisölle korjuutapahtumasta järjestäjien puolesta kertoi Esedun Ano Teittinen. Näytöksessä mukana olleesta kalustosta ja sen soveltuvuudesta turvemaiden korjuuseen kertoi Forest Vihavaisen Tapani Pekkola sekä Stora Enson Antti Rantanen.



**KUVA 5. Turvemaan korjuunäytös, Mäntyharju (kuvat Rauno Kousa)**



## Lähteet

Metsätilastollinen vuosikirja 2013

Äijälä, O., Koistinen, A., Sved, J., Vanhatalo, K. & Väisänen, P. (toim.) 2014. Metsänhoidon suositukset. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisuja

# TULEVAISUUDEN MONIMUOTOINEN METSÄ

*Rauno Kousa & Kati Kontinen*

Tulevaisuuden metsänkäytöllä on monia mahdollisuuksia. Nykyisessä metsien käytössä voidaan paremmin huomioida metsänomistajien toiveet ja tavoitteet. On perusteltua käsitellä metsiään monipuolisesti niin, että erilaisten valintojen mahdollisuus säilyy. Esimerkiksi metsän kasvatusta eri-ikäisrakenteisena tuo tasaikäisrakenteisena kasvattamisen rinnalle uusia mahdollisuuksia.

Eri-ikäisrakenteiseen metsän kasvatukseen suhtaudutaan hyvin myönteisesti. Lähes puolet metsänomistajista uskoo sen olevan mahdollista Suomen olosuhteissa, ja yhtä moni katsoo sen olevan mahdollista ainakin joissain kohteissa. Vaihtoehtoiset metsänkäsittelymenetelmät kiinnostavat erityisesti pienmetsänomistajia ja virkistyskäyttäjiä, joilla metsänkasvatuksen päämääränä on puuntuotannon sijaan usein luontoarvojen säilyttäminen. Kannattajia on myös niissä metsänomistajissa, jotka ovat tyytymättömiä nykyisiin metsänhoito- ja hakkuutapoihin. Vaihtoehtoisia metsänkäsittelymenetelmiä voidaan kuitenkin käyttää nykyisten menetelmien rinnalla ja toteuttaa metsänomistajien toiveet. Metsäntutkimuslaitoksen (Kumela Hanna & Hänninen Harri 2011) vuodenvaihteessa 2010–2011 tekemän postikyselyn mukaan metsänomistajista 59 prosenttia on tyytyväisiä nykyisiin metsänhoito- ja hakkuumenetelmiin. Tyytymättömiä on joka kuudes. Tyytymättömyyttä aiheuttavat erityisesti avohakkuut, menetelmien vaihtoehdottomuus, maan muokkaus ja liian raskaiden koneiden aiheuttamat korjuujäljet.

## Monimuotoiset metsät -hanke (Momet)

Mikkelin ammattikorkeakoulussa toteutettavassa hankkeessa Monimuotoiset metsät tavoitteena on tiedonvälityksen keinoin lisätä metsänomistajien tietoutta vaihtoehtoisista metsänkäsittelyistä ja saada näin useampi metsänomistaja hyödyntämään metsäomaisuuttaan. Tiedonvälitystilaisuuksissa käydään läpi uusia metsänkäsittelymenetelmiä metsäalan asiantuntijoiden johdolla. Maastoretkeilyillä tutustutaan uusien menetelmien käyttökohteisiin ja tehdään harjoituksia suunniteltaviin hakkuukohteisiin. Monimuotoiset metsät (MoMet) -hanketta rahoittaa Euroopan maaseudun kehittämisen maatalousrahasto.

## Tiedonvälitystilaisuuksia Etelä-Savossa

Monimuotoiset metsät hankkeen ensimmäinen tilaisuus oli Mikkeliissä 17.6.2016, ja se keräsi noin 23 kiinnostunutta metsänomistajaa. Tilaisuudessa luennoitsijoina toimivat Sauli Valkonen Luonnonvarakeskuksesta, Tarja Hämäläinen Suomen Metsäkeskuksesta ja Vesa Väänänen Etelä-Savon Metsänhoitoyhdistyksestä. Tilaisuudessa luennoitiin eri-ikäisen metsän kasvatuksesta sekä uudesta metsälaista ja sen vaikutuksesta metsien käsittelyyn. Metsänhoidon lisäksi perehdyttiin puukaupan hinnoitteluun eri-ikäisen metsän hakkuussa sekä käytiin läpi vallitseva puumarkkinatilanne. Maastokohteella Mikkelin Ihastjärvellä tutustuttiin eri-ikäisrakenteisen metsän koeloihin. Koealat oli käsitelty erilaisilla harvennusvoimakkuuksilla. Maastossa keskusteltiin poistettavien puiden valinnasta poimintahakkuussa sekä korjuun ajoittamisesta talveen korjuuvaurioiden välttämiseksi. Lisäksi keskusteltiin kuusentaimien elpymisestä hakkuun jälkeen ja lehtipuun merkityksestä luonnon monimuotoisuuden lisäämiseksi.



**KUVA 1. Mikkeli, Ihastjärvi (kuva Rauno Kousa)**

Hankkeen seuraava tilaisuus oli Ristiinassa Hotelli Heimarissa 8.7.2016. Tilaisuudessa oli 23 metsänomistajaa. Tilaisuudessa luennoitsivat Kari Mielikäinen Luonnonvarakeskuksesta, Reijo Särkkä Osuuspankista, Suvi Kokkola Mhy Mänty-Saimaasta, Tarja Hämäläinen Suomen Metsäkeskuksesta sekä Sami Koskimaa Arvometsä Oy:stä. Luennoilla käsiteltiin eri-ikäisen metsän kasvatusta ja uuden metsälain merkitystä metsien käsittelyssä. Osuuspankin edustaja kertoi metsätilojen sukupolvenvaihdoksiin liittyvää asiaa ja Arvometsä Oy:n edustaja metsien käsittelystä yläharvennuksella. Tilaisuudessa oli maastokohde, jossa perehdyttiin pienaukkohakkuiden sekä poimintahakkuiden vaatimuksiin ja menetelmiin. Maastossa oli myös mitattu koeala, jossa vertailtiin ylä- ja alaharvennuksen kannattavuuden merkitystä hakkuutavan valinnassa.

Elokuussa järjestettiin maastoretki Repoveden kansallispuistoon 18.8.2016. Retkeen osallistui metsäalan opiskelijoita ja opettajia sekä metsänomistajia. Retkellä oli mukana yhteensä 38 henkilöä. Maastossa perehdyttiin kansallispuiston perustamisen vaiheisiin ja historiaan. Tutustuimme retkellä puiston alueella ennen kansallispuiston perustamista tehtyihin metsänuudistamisen menetelmiin. Retkellä luennoi luonnon monimuotoisuudesta WWF:n Annukka Valkeapää. Monimuotoisuuden merkitys havaittiin käytännössä ranta-alueiden erilaisilla ja osin riittämättömillä suojavyöhykkeillä. Retken aikana perehdyttiin myös maanmuokkauksen vaikutuksesta mustikan vähentymiseen talousmetsissä, lahoppuun merkityksestä luonnonhoidossa sekä lehtipuun osuuden lisäämisen vaikutuksista metsätalouden toimenpiteissä. Puistossa tehtyjä luonnon ennallistamistoimenpiteitä esitteli Metsähallituksen Aarno Tervonen. Tutustuimme kulotusalueeseen, lahoppuiden lisäämiseen keinollisesti sekä soiden palauttamiseen luonnontilaan ojat tukkimalla. Retkellä perehdyimme myös puiston perustamiseen liittyvään retkeilyreittien suunnitteluun maastossa ja niiden vaatimuksiin.



**KUVA 2. Repoveden kansallispuisto (kuva Rauno Kousa)**

Syyskuussa pidettiin Pieksämäellä 8.9.2016 Monimuotoiset metsät -tiedonvälitystilaisuus. Osallistujia tilaisuudessa oli 26 henkilöä. Tilaisuudessa luennoivat Merja Nieminen ja Mika Wahlman UPM Metsästä sekä Tarja Hämäläinen Suomen Metsäkeskuksesta. Tilaisuuden luennoilla käytiin läpi lyhyesti vallitseva puumarkkinatilanne sekä kohteiden hinnoittelu poiminta- ja pienaukkohakkuissa. Tilaisuudessa perehdyttiin kattavasti eri sertifiointijärjestelmien eroihin sekä uuden vuonna 2014 voimaan tulleen metsälain merkittävimpiin muutoksiin. Luentojen jälkeen kierrettiin maastossa Hautosenlammen ympäri ja perehdyttiin FSC-sertifiointin vaatimuksiin rantojen suojavyöhykkeen leveydestä, säästöpuiden määrästä ja laadusta. Uuden metsälain merkitystä pohdittiin pienaukkohakkuuseen soveltuvissa kohteissa. Maastossa

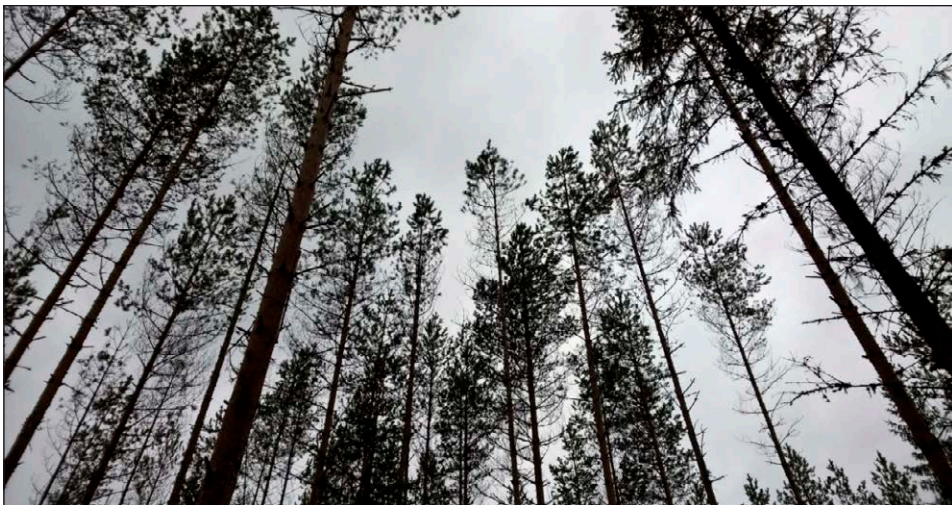


selvitettiin metsänhoidon erilaisia vaatimuksia taimikonhoidossa sertifiointijärjestelmien välillä. Palautteena tilaisuuden osallistujat toivoivat vaativampia metsän uudistamiskohteita tiedonvälitystilaisuuksiin.



**KUVA 3. Nikkarila, Hautosen lampi, Pieksämäki (kuva Johanna Jalkanen)**

Lisäksi tapahtumia järjestettiin Juvalla, Savonlinnassa ja Heinävedellä.



**KUVA 4. Yläharvennettu männikkö, Heinävesi (kuva Rauno Kousa)**

## Metsälain muutokset

Uusi vuoden 2014 alusta voimaan tullut metsälain (Metsälaki 2014) muutos mahdollistaa metsänomistajien käyttöön aikaisempaa monipuolisemman valikoiman metsänkäsittelemenetelmiä ja kasvatusvaihtoehtoja. Valinnanvapautta lisättiin metsälakiin, jotta metsänomistajien monipuolisia tavoitteita voitaisi aikaisempaa paremmin sovittaa yhteen. Metsälaki sallii nyt eri-ikäisrakenteisen metsänkasvatuksen, jota voidaan toteuttaa poimintahakkuilla, pienaukkohakkuilla tai yhdistelemällä näitä menetelmiä. Aikaisemmin nämä menetelmät ovat olleet sallittuja vain erityiskohteissa. Eri-ikäisrakenteinen metsänkasvatus on hyvä esimerkki menetelmästä, jolla voidaan sovittaa yhteen metsien käyttöä ja tiettyjen ominaispiirteiden säilymistä sekä edistää esimerkiksi metsien virkistyskäyttö- ja maisema-arvoja.

Eri-ikäisrakenteisena kasvatus perustuu yksittäisten puiden ja pienten puuryhmien poistoon ja luontaiseen uudistumiseen, jolloin metsän elinkaareen ei sisälly selkeää päätehakkuu- ja uudistamisvaihetta.

## Eri-ikäinen metsä

Eri-ikäisrakenteisessa metsikössä kasvaa jatkuvasti kaikkia puiden ikä- ja kokoluokkia. Metsää uudistetaan ja kasvatetaan samanaikaisesti, eikä sen kehityksessä ole eroteltavissa erityisiä vaiheita, kuten metsikkötaloudessa. Säännöllisin väliajoin (10–20 vuotta) tehtävissä hakkuissa poistetaan suurimpia puita ja harvennetaan tiheimpiä pienempien puiden ryhmiä. Uutta taimiainesta syntyy jatkuvasti. Taimet viettävät pitkiä aikoja alikasvosasemassa ja useimmat kuolevat jo pieninä. Osa eloonjääneistä taimista vapautuu vähitellen hakkuissa ja pääsee kasvamaan valtapuiksi.



**KUVA 6. Eri-ikäinen metsä Salonsaari, Mikkeli (kuva Rauno Kousa)**

Kuusivaltaiset metsät soveltuvat parhaiten eri-ikäiskasvatukseen, sillä kuusi sietää pääpuulajeistamme parhaiten varjoa ja menestyy alikasvoksena varsinkin, jos metsässä on sekapuustona lehtipuita tai mäntyjä. Kasvatuksessa päämenetelmänä on poimintahakkuu, joka on käsittelymenetelmä, jossa pidetään yllä puuston ikäluokkien vaihtelua poimimalla ja hakkaamalla määräjain yksittäisiä puita tai puuryhmiä. Hyväkuntoiset kuuset lähtevät yleensä hyvin kasvuun kasvutilan lisääntyttä puuston harvennuksen jälkeen. Kasvupaikan kosteus ja lievä soistuneisuus edistävät kuusen taimettumista kivennäismailla.

Mänty tarvitsee menestyäkseen ja taimettuakseen valoa ja kasvutilaa. Pienaukkohakkuu luo edellytykset taimiaineuksen synnylle ja taimien kasvulle valtaosalla männyn kasvupaikoista. Maanpinnan lievän rikkomisen on havaittu edistävän taimettumista pienaukoissa.

## Muutosvaihe eri-ikäiseksi

Tapio Oy:n laatimista (Äijälä, O ym. 2014) löytyy paljon tietoa eri-ikäismetsien hoitoon liittyen. Tasaikäisrakenteisen metsän muuttaminen eri-ikäisrakenteiseksi vaatii useimmiten pitkän siirtymävaiheen. Tavoitteena on puuston laaja ikä- ja kokojakauma, joka saadaan aikaan luontaista uudistumista ja alikasvosta hyödyntämällä. Parhaiten lähtökohdaksi sopii puusto, jossa on jo valmiiksi erirakenteisuutta.

Metsä, jossa on valmis alikasvos, on yleensä helpoin lähtökohta eri-ikäiskasvatukseen siirtymiselle etenkin, jos siinä on jo luonnostaan suuri kokovaihtelu. Rakenteen kehittämiseen vaikuttavat esimerkiksi puulajien ominaisuudet ja kasvunopeus. Ylispuustoa harvennetaan useammassa vaiheessa, jolloin metsän rakenne säilyy vaihtelevampana ja pienemmän puuston kehitys nopeutuu. Alikasvoksen kehitys on sitä hitaampaa mitä tiheämpänä ylispuusto pidetään. Kuusen taimet kasvavat varsin hyvin varjostavan lehtipuuston alla. Sen sijaan männyn ja koivun taimet sietävät huonosti varjostusta. Mahdollisessa alikasvospuuston harvennuksessa vältetään puiden kokoerojen tasoittamista ja tehdään tiheysvaihtelua.

Eri-ikäisrakenteisen metsän kehittämisen hyvänä lähtökohtana voi olla luontaisesti uudistunut taimikko, jossa on jo luonnostaan kokovaihtelua. Myös viljellen syntyneessä taimikossa puut ovat tavallisesti vaihtelevan kokoisia etenkin, jos on käytetty kylvöä. Viljelytaimikkoa täydentävät luontaisesti syntyneet taimet lisäävät kokovaihtelua. Ensisijaisesti poistetaan laadultaan huonoja puita, kuten tasaikäisrakenteisen metsän kasvatuksessa.

Varttunut tai uudistuskypsä tasaikäinen metsä voidaan muuttaa eri-ikäisrakenteiseksi luontaisesti uudistushakkuun tai pienaukkohakkuiden kautta. Tiheässä metsässä voidaan tehdä ensin väljennyshakkuu tämän tueksi.

## Lähteet

Äijälä, O., Koistinen, A., Sved, J., Vanhatalo, K. & Väisänen, P. (toim.) 2014. Metsänhoidon suositukset. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisuja

Hänninen, H., Kumela, H. 2011. Metsänomistajien näkemykset metsänkäsittelymenetelmien monipuolistamisesta. Metsäntutkimuslaitoksen työraportteja 203.

Metsälaki 12.12.1996/1093.





# VAHAKÄSITELLYN MÄNNYN BIOLOGINEN KESTÄVYYS SINISTÄJÄ- JA HOMESIENIÄ VASTAAN

*Juha Peura & Olli Paajanen & Kati Kontinen*

Puun suojaukseen on kehitetty monia modifiointimenetelmiä. Modifioinnin tavoitteena on usein pyrkiä parantamaan puun pitkäaikaiskestävyyttä erilaisissa lopputuotteissa. Mikkelin ammattikorkeakoululla alkoi vuoden 2015 alussa PUMOK-hankepari, jossa luodaan koevalmistus-, tutkimus- ja testausympäristö puun modifioinnille.

PUMOK-hankeparin ensimmäisessä vaiheessa on kehitetty Pohjoismaihin uudenlaista modifiointilaitteistoa, jolla pystytään tekemään puumateriaalille öljy- ja vahakäsittelyitä, lämpökäsittelyä sekä painekyllästystä aina 200 °C:n lämpötilaan asti. Laitteiston asennus ja takuuajot saatiin päätökseen maaliskuussa 2016. Toisessa vaiheessa tutkitaan kokeellisesti kuumakyllästyskäsittelyjen vaikutusta puumateriaaliin. Kokeita tehdään erilaisilla vahoilla sekä pienessä mittakaavassa että uudella koelaitteistolla.

PUMOK-hankkeita rahoittaa Euroopan Unionin aluekehitysrahasto EAKR Etelä-Savon maakuntaliiton kautta sekä kuusi yritystä: Hexion Oy, Karelia-Ikkuna Oy, Kurikka-Timber, Lieksan Saha Oy, Stora Enso Wood Products Oy ja Tehomet Oy.

## **Puumateriaalin biologinen kestävyys (sienet)**

Puu on erittäin hyvä rakennusmateriaali, mutta suojaamattomana se altistuu sopivissa olosuhteissa helposti erilaisten home-, sinistäjä- ja lahottajasienten hyökkäysten kohteeksi. Puutavaran varastoinnilla ja käsittelyllä voidaan ehkäistä sienien aiheuttamia vaurioita merkittävästi. Sieni-itiöt tarvitsevat kuitenkin kasvaakseen kasvualustan lisäksi suotuisat olosuhteet kosteuden ja lämpötilan suhteen. Itiöiden kasvamiseen on kehitetty muutamia laboratoriotestejä, joissa koemateriaalit altistetaan sieni-itiöille niille suotuisissa olosuhteissa.

Mikkelin ammattikorkeakoululla pystytään testaamaan kattavasti puumateriaalin biologista kestävyyttä. Seuraavassa esitetään PUMOK-hankkeessa vahakäsitteltyille koekappaleille tehdyt laboratoriotestit EN 152 -sinistäjäkoe ja ASTM D3273 -hometesti sekä niistä saadut tulokset.

## EN 152 -sinistäjäkoe

EN 152 -sinistäjäkokeen tarkoitus on seurata laboratorio-olosuhteissa koekappaleiden sinistymistä sekä verrata tuloksia käsittelemättömiin vertailukappaleisiin. Standardin mukaiseen testiin on valittu yleisimmät sinistäjä sienikannat, joita esiintyy yleisesti ulkoilmassa (*Aureobasidium pullulans* ja *Sclerophoma pithyophila*). Laboratoriokokeessa varsinainen altistus sieni-itiöille tapahtuu standardin EN 152 mukaisesti kannellisessa lasipurkissa, jonka pohjalla on vermikuliittia. Jokainen koekappale testataan omassa purkissaan. Ennen varsinaista altistamista sienille koekappaleelle tehdään ns. esitasaannutus ulkona (26 viikkoa) tai UV-säkäapissa (672 h), minkä jälkeen koemateriaalit steriloidaan joko 120 °C:lla höyryllä tai säteilyttämällä. Steriloinnin jälkeen koekappaleet kastetaan sienisuspensioon, joka on valmistettu standardin vaatimusten mukaisesti. Lasipurkkien pohjalla oleva vermikuliitti saastutetaan myös sienisuspensio-liuoksella. Altistamisen jälkeen testi jatkuu sienille suotuisissa vakio-olosuhteissa kuuden viikon ajan ( $T = 22 \pm 2 \text{ °C}$  /  $Rh = 70 \pm 5 \%$ ). Testin päätyttyä sienien kasvua kappaleiden pinnoilla arvioidaan asteikolla 0–3:

- 0 = ei sinistynyt, ei silmämääräisesti havaittavissa sinistymää.
- 1 = merkityksettömän vähän sinistynyt, silmämääräisesti havaittavissa pieniä sinistyneitä kohtia. Sinistyneet alueet eivät yli 1,5 x 4 mm ja alueita maksimissaan 5 kappaletta.
- 2 = sinistynyt, pinta tasaisesti sinistynyt maksimissaan 1/3 pinta-alasta tai osittain 1/2 pinta-alasta.
- 3 = vahvasti sinistynyt, yli 1/3 pinta-alasta sinistynyt.

Seuraavassa kuvassa 1 on esimerkki EN 152 -sinistäjätestistä kaksi päivää sienille altistamisen jälkeen.



KUVA 1. EN 152 -sinistäjäkoe (kuva Juho Peura)

## ASTM D3273 -hometesti

ASTM D3273:n mukainen hometesti on tarkoitettu erityisesti rakennusmateriaalien pintahomehtumisen tutkimiseen. Tutkimus toteutetaan laboratorio-olosuhteissa ns. pikamenetelmänä, jossa seurataan käsiteltyjen koekappaleiden pintojen homehtumista ja verrataan niiden tuloksia käsittelemättömiin vertailukappaleisiin. Tutkimus suoritetaan olosuhteissa, jotka ovat erityisesti homeiden kasvuille suotuisia (lämpötila ja kosteus).

Tutkimuksessa käytetään kolmea yleistä homesienikantaa:

- *Aureobasidium pullulan*
- *Aspergillus niger*
- *Penicillium*

Homekannoista tehdään sienisuspensio-liuos, jolla varsinaisessa testissä käytettävä maa-aines saastutetaan. Standardinmukaiseksi maa-ainekseksi käy tavallinen puutarhamulta. Ennen saastuttamista maa-aines kuitenkin asetetaan laatikkoon ja tasaannu-

tetaan vakio-olosuhteisiin ( $T = 32,5 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$  /  $\text{RH} = 95 \pm 3\%$ ). Tasaantunut maa-aines tulee saastuttaa kaksi viikkoa ennen koekappaleiden asettamista multalaatikkoon. Varsinainen altistaminen homesienille kestää neljä viikkoa vakio-olosuhteissa (kuva 2). Homeiden kasvua seurataan silmämääräisesti ja kasvu arvioidaan testin päätyttyä asteikolla 0–10 (ASTM D3274; 0 = kasvu 91–100% ja 10 = kasvu 0%).



**KUVA 2. ASTM D3273 -hometestausolosuhteita (Mamk).** Kuvassa vasemmalla on testikaappi ja oikealla koekappaleet aseteltuina testilaatikossa. Kappaleet roikkuvat sienisuspensiolla saastutetun maa-aineksen yläpuolella. (kuvat Juho Peura)

## Koemateriaali ja käsittelyt

Tässä tutkimuksessa koemateriaalina toimi männyn pintapuu (*Pinus sylvestris*). Ennen lopullista työstöä aihoiden pinta- ja sydänpuuosuudet varmistettiin sydänpuureagenssin avulla. Koekappaleet oli työstetty standardien mukaisesti ennen varsinaista vahakäsittelyä. Valmiiksi työstettyjen kappaleiden käsittely on yksi tärkeimpiä ajatuksia PUMOK-hankkeessa. Valmiiksi profiloitulle tuotteelle saadaan käsittelyssä paras suojaavuus, kun käsittelyn jälkeen ei tarvitse tehdä työstöjä, jolloin esimerkiksi puun päädyt ovat suojattuja.

Valmiit koekappaleet käsiteltiin  $125 \text{ } ^\circ\text{C}$ :lla montan-vahalla typen paineessa (8 bar). Käsittely tehtiin ns. Ruping-prosessilla, joka mahdollistaa korkeiden lämpötilojen käyttämisen prosessissa. Käsittelyn jälkeen kappaleille jouduttiin tekemään ns. loppuuunitus, koska koekappaleiden pintoihin jäi liikaa vahajäämiä. Tässä uunituksessa ylimääräinen vaha valutettiin koekappaleen pinnoilta vahan sulamispistettä korkeammassa lämpötilassa. Vahajäämät johtuivat montan-vahan käyttäytymisestä prosessin loppuvaiheessa. Vahaprosessia ei siis vielä täysin optimoitu tässä koekäytössä.

## Tulokset

Vahakäsittelyn jälkeen koekappaleille tehtiin standardin vaatimat esivalmistelut. EN 152:n mukaisessa sinistäjätestissä höyrysterilointi aiheutti käsitellyissä kappaleissa hieman vahan sulamista ja kuplimista, sillä käytetyn vahan sulamispiste oli 99–105 °C. Sinistäjille altistettiin kuusi (6) käsitelyä ja 12 vertailukoekappaletta (110 mm x 40 mm x 10 mm ± 0,5 mm). Seuraavassa kuvassa 3 on esitetty kaikki koekappaleet kuuden viikon altistamisen jälkeen. Taulukossa 1 on esitettyinä kappalekohtaiset tulokset. Taulukosta 1 on havaittavissa käsiteltyjen kappaleiden massamuutokset vahakäsittelyssä sekä visuaalinen arviointi pintojen sinistymästä.



**KUVA 3.** Ylimmäisenä vertailukappaleet, keskellä +UV-käsitellyt vertailukappaleet ja alimmaisena vahakäsitellyt koekappaleet (kuva Juho Peura)

**TAULUKKO 1. EN 152 -testin koemateriaali ja visuaalinen arviointi**

EN 152 Kappale	m1 g	Tiheys kg/m <sup>3</sup>	m2 g	Vahaa g	Vahaa kg/m <sup>3</sup>	Arvio 0-3
1	24,44	555,5	30,13	5,69	129,3	1
2	25,9	588,6	31,21	5,31	120,7	1
3	21,96	499,1	27,8	5,84	132,7	1
4	22,51	511,6	28,77	6,26	142,3	1
5	24,21	550,2	30,5	6,29	143,0	1
6	24,61	559,3	31,05	6,44	146,4	1
Keskiarvo		544,1		5,97	135,7	1

Tässä EN 152 -sinistäjätestissä vertailukappaleet olivat selvästi sinistyneet. Vertailukappaleissa kappaleiden taustapuoli oli lähes koko pinta-alaltaan sinistynyttä. Vertailukappaleet saivat keskimääräiseksi arvioiksi arvon 3. Näin ollen testin tulokset ovat myös hyväksyttäviä, ja sieni oli toiminut vaaditulla tavalla. Kaikissa vertailukappaleissa kappaleiden toinen pääty oli vahvasti sinistynyt (kuva 3). Myös vahakäsitellyissä koekappaleissa sinistyneitä kohtia havaittiin silmämääräisesti molemmilta puolilta vain kappaleen toisessa päädyssä.

ASTM D3273:n mukaisessa hometestissä kappaleet testataan ilman sterilointia sellaisenaan käsittelyn jälkeen. Seuraavassa kuvassa 4 on esitetty kaikki hometestikappaleet neljä viikkoa altistamisen jälkeen. Taulukossa 2 on esitettynä käsiteltyjen kappaleiden kappalekohtaiset tulokset.





KUVA 4. Ylimmäisenä vahakäsitellyt ja alimmaisena referenssi (kuva Juho Peura)

TAULUKKO 2. ASTM D3273 -koemateriaali ja visuaalinen arviointi

ASTM D3273 Kappale	m1 g	Tiheys kg/m <sup>3</sup>	m2 g	Vahaa g	Vahaa kg/m <sup>3</sup>	Arvio 0–10
1	67,88	502,8	78,23	10,35	76,7	0
2	65,67	486,4	77,1	11,43	84,7	0
3	67,76	501,9	78,84	11,08	82,1	0
Keskiarvo		497,1		11,0	81,1	0

Kuvasta 4 voidaan havaita, että pinnat ovat kauttaaltaan homehtuneet käsitellyissä sekä käsittelemättömissä vertailukappaleissa. Kaikki kappaleet saivat silmämääräisessä arvioinnissa arvioksi 0 (= 91–100% homehtunut).

## Johtopäätökset ja yhteenveto

Sinistäjä sienet pyrkivät kasvattamaan sienirihmastoja puumateriaalin sisään, kun taas homeet kasvavat puumateriaalin pinnalla. PUMOK-hankkeen biologisissa testeissä on selvästi havaittavissa nämä sienille tyypilliset kasvuominaisuudet. Tuloksista voidaan päätellä, että vahakäsittelyllä pystytään hidastamaan sinistäjä sienien kasvamista, kun puun pinta ja solukko on tukittu vahakäsittelyllä. Mutta koska homesienet kuitenkin kasvavat materiaalin pinnalla, tuloksista voidaan nähdä, että pelkkä vahakäsittely ei estä pinnan homehtumista, jos olosuhteet ovat homeelle suotuisat. Puuta



pitää siis käyttää rakenteissa järkevästi. Esimerkiksi rakenteellisella puunsuojauksella voidaan estää homeen kasvulle suotuisien olosuhteiden muodostuminen. Luonnolliset organismit toimivat tehokkaasti, jos olosuhteet ovat otolliset, ja ympäristöä vähän kuormittavien käsittelyaineiden käyttö edellyttää tämän ymmärtämistä. Tässä tutkimuksessa tutkittiin kuitenkin vain yhtä vahatyyppeä ja prosessia, joka ei ole optimoitu, joten vahakäsittelyjen suojauspotentiaalin kattavampi tarkastelu sinistäjä- ja homesieniä vastaan vaatii lisää kokeita sekä erityyppisillä vahoilla että erilaisilla prosesseilla.

## Lähteet

European Standard EN 152:2011 “Wood preservatives. Determination of the protective effectiveness of a preservative treatment against blue stain in wood in service. Laboratory method”.

ASTM D3273-12 Standard Test Method for Resistance to Growth of Mold on the Surface of Interior Coatings in an Environmental Chamber.

# LÄMPÖPUUN VALMISTUKSEN KEHITTÄMINEN

*Olli Paajanen & Juho Peura & Hannu Turunen*

Lämpöpuu on yksi parhaiten tunnettuja puutuotteiden modifointiprosesseja. Sen peruseriaate on yksinkertainen – muokataan puun ominaisuuksia paremmiksi lämmön avulla. Prosessilla saavutetaan etuja, mm. parantuneet lahonkesto-ominaisuudet, mittapysyvyys ja ulkonäkö.

Lämpöpuuta valmistetaan erilaisilla prosesseilla. Niistä tunnetuin on VTT:n kehittämä, patentoitu Thermowood®-prosessi. Lämpöpuuyhdistys on Thermowood-prosessilla tuotteita valmistavien yritysten muodostama järjestö, jonka tavoitteena on tuotteiden käytön edistäminen. Lämpöpuuyhdistys organisoii myös lämpöpuuhun liittyvää tutkimusta ja tuotekehitystä.

Mikkelin ammattikorkeakoulussa käynnistyi syksyllä 2015 tutkimushanke, jossa kehitetään lämpöpuun valmistusprosessia. Hankkeessa lämpöpuuprosessiin sovelletaan tuoretta tutkimustietoa puunjalostuksen eri osa-alueilta. Hanke toteutetaan Mikkelin ammattikorkeakoulun puulaboratorion, Aalto-yliopiston puunjalostustekniikan laitoksen sekä Lämpöpuuyhdistyksen yhteistyönä. Hanketta rahoittaa Etelä-Savon maakuntaliitto ja Euroopan Unionin Aluekehitysrahasto. Tässä julkaisussa esitellään lämpöpuuhankkeen tausta sekä tutkimustuloksia, jotka on saatu Mamkin uudella tutkimuslaitteistolla.

## Lämpöpuun valmistusprosessi

Puun kestävyden lisääminen tulen avulla on tunnettu tuhansia vuosia – esimerkiksi aidanseipäiden päitä on perinteisesti poltettu kestävyiden parantamiseksi, mutta teollinen prosessi on kehitetty vasta viime vuosikymmeninä. Puun ominaisuuksien muokkaaminen modifioimalla ei kuitenkaan ole yksinkertaista; yleensä yhtä ominaisuutta parantaessa jokin toinen ominaisuus kärsii. Lämpöpuun tapauksessa puun kestävyden parantuessa sen mekaaniset ominaisuudet heikkenevät. Valmistusprosessilla on siten suuri vaikutus lopputuotteen ominaisuuksiin – jos prosessi hallitaan hyvin, ominaisuuksia voidaan myös hallitusti muokata.

Lämpöpuun valmistaminen on sinänsä selkeä prosessi – altistetaan puu lämmölle, jonka seurauksena puumateriaalissa tapahtuu muutoksia. Puun fysikaalisten ja biologisten ominaisuuksien muuttuminen on monimutkainen prosessi, jonka lähtökohdat ovat puun rakenteessa ja biologiassa. Lämpökäsittelyllä on lukuisia vaikutuksia

puun ominaisuuksiin, kuten mm. parantunut dimensiopysyvyys, pienentynyt hygrooskooppisuus, parantunut kestävyys mikrobiologisia uhkia kohtaan, iskusitkeyden ja murtolujuuden heikkeneminen, kulutuskestävyyden heikkeneminen, lisääntynyt halkeilu ja värin muuttuminen tummemmaksi. Muutokset riippuvat kuitenkin hyvin paljon käytetyistä prosessiolosuhteista. Prosessimuuttujia ovat mm. käsittelyn lämpötila, kesto, käytetyt suojakaasut tai nesteet, puulajit, kosteus, kappaleiden mitat ja mahdolliset katalyytit. (Hill 2006, 100.)

Lämpöpuuprosessin vaikutuksesta puussa tapahtuvat kemialliset muutokset riippuvat käytetystä prosessista ja prosessimuuttujista. Thermowood-prosessin tapauksessa tärkeä muuttuja on prosessin lämpötila: korkeammat prosessilämpötilat aiheuttavat suuremman massahäviön, joka kertoo siitä, että materiaalissa on tapahtunut enemmän muutoksia. Massahäviö taas korreloi vahvasti lujuusominaisuuksien heikkene-  
misen kanssa. Toisaalta korkeammat prosessilämpötilat ja siitä seuraava kiihtyvä puun komponenttien hajoaminen parantavat puun dimensiostabiilisuutta ja biologista kestävyttä.

Lämpöpuun teollisen valmistamisen taustalla on noin vuosisadan ajan harjoitettu tieteellinen tutkimus. Viime vuosikymmeninä tutkimusta on tehty aktiivisesti mm. Suomessa (VTT), Ranskassa (Retification-prosessi) ja Alankomaissa (Plato-prosessi). Lämpökäsittelyä käytetään myös muiden modiointiprosessien osana, mm. stabiloimaan puun rakenne tiheysmodifoinnissa (Rautkari 2013/1). Thermowood-prosessi kehitettiin VTT:llä. Myös Mikkelissä nykyisen puulaboratorion edeltäjässä YTI-tutkimuskeskuksessa tehtiin noin 15 vuotta lämpöpuuhun liittyvää tutkimusta.

Thermowood-prosessi on tällä hetkellä teollisuudessa eniten käytetty lämpöpuuprosessi. Pääosa valmistajista on suomalaistaustaisia yrityksiä. Prosessissa puuta kuumentetaan 160–260 °C:n lämpötilassa hapettomassa tilassa, käytännössä vesihöyryssä. Prosessin tuloksena puumateriaalissa tapahtuu kemiallisia muutoksia, kun hemiseluloosat ja uuteaineet hajoavat. Prosessin tuloksena puun tasapainokosteus alenee ja veden imeytyminen vähenee, mikä parantaa mittapysyvyyttä ja lahonsietoa. Haittapuolena on kuitenkin mekaanisten ominaisuuksien heikkeneminen.

Thermowood-prosessi voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen, jotka kuvataan Thermowood-käsikirjassa seuraavasti: ensimmäisessä vaiheessa käsittelykamarin lämpötila nostetaan ensin nopeasti noin 100 °C:seen lämmön ja höyryn avulla. Tämän jälkeen alkaa kuuma kuivaus, jossa lämpötila nostetaan tasaisesti 130 °C:seen ja puun kosteuspitoisuus laskee lähelle nollaa. Toisessa vaiheessa alkaa varsinainen lämpökäsittely, jossa lämpötila nostetaan varsinaiseen käsittelylämpötilaan ja pidetään siinä käyttökohteesta ja lämpötilasta riippuen useiden tuntien ajan. Kolmannessa vaiheessa lämpötila lasketaan 80–90 °C:n tasolle, minkä jälkeen tehdään uudelleenkestutus noin 4–7 %:n kosteuteen. Lämpöpuuprosessit ovat siis kokonaisuutena melko pitkiä, useita kymmeniä tunteja. Lisäksi prosessissa on myös kohtia, joita voisi kehittää – esimerkiksi puun uudelleenkestutus lämpöpuuprosessin lopussa tarkoittaa, että puun kuivaamiseen on turhaan käytetty energiaa ja lisäksi se pidentää prosessia.

Lämpöpuuta valmistetaan myös muilla menetelmillä. Osa niistä on käytössä teollisina prosesseina, mutta Thermowood on näistä merkittävin Euroopassa tällä hetkellä. Lämpöpuuhankkeen näkökulmasta mielenkiintoisimpia ja myös suhteellisen uusia lämpökäsittelymenetelmiä ovat tanskalainen WTT Thermo ja hollantilainen Firmolin-prosessi. Molemmissa prosesseissa puu modifioidaan korkeassa höyrynpaineessa tarkasti säädetyissä olosuhteissa.

## Lämpöpuu-hanke

Lämpöpuun valmistusprosessin lopputulos ja tuotteen ominaisuudet ovat kompromissi. Lämpöpuuhanke perustuu ajatukseen, että valmistusprosessia voidaan kehittää uuteen suuntaan tavalla, jossa lopputuotteen ominaisuudet paranevat kokonaisuutena. Käytännössä siis voitaisi saavuttaa riittävä kestävyys ulkokäytössä ja silti riittävän hyvät lujuusominaisuudet. Tämä tapahtuu modifioimalla puuta siten, että vesi ei pysty kiinnittymään puumateriaaliin yhtä helposti, jolloin sen tasapainokosteus laskee. Tämä puolestaan parantaa mm. biologista kestävyyttä ja pienentää dimensioiden muutoksia (ts. turpoamista). Samanaikaisesti pyritään välttämään lujuusominaisuuksien huononemista, joka johtuu mm. hemiselluloosien hajoamisesta korkeissa lämpötiloissa.

Vesi kiinnittyy puussa mm. avoimena oleviin hydroksyyliiryhmiin. Jos näiden avoimien ryhmien määrää vähennetään, puuhun kiinnittyy vähemmän vettä. Veden määrä ja materiaalin tasapainokosteus puolestaan vaikuttavat sekä kestävyteen että dimensiopysyvyyteen puumateriaalissa. Lämpöpuuhankkeessa selvitetään sarveistumiseksi kutsutun ilmiön vaikutusta. Ilmiössä selluloosan hienorakenteessa tapahtuu palautumattomia muutoksia. Se on merkittävässä roolissa puumateriaalin ja veden vuorovaikutuksessa, koska se liittyy nimenomaan edellä mainittuun veden saavutettavuuteen puumateriaalissa. Sarveistumisen seurauksena puumateriaali ”sulkeutuu”, eli avoimien hydroksyyliiryhmien määrä vähenee. Avoimien OH-ryhmien määrää voidaan mitata Aalto-yliopistossa olevalla Dynamic Vapor Sorption (DVS) -laitteella. OH-ryhmien määrä selvitetään mittaamalla kappaleen massaa eri olosuhteissa. Mittauksessa käytetään kahta nestettä, vettä ja raskasta vettä, joiden massaeroa hyödyntämällä voidaan selvittää puun sorptiokäyttäytyminen. Menetelmän avulla voidaan siis selvittää, miten erilaiset lämpöpuuprosessit vaikuttavat puumateriaalin ja veden vuorovaikutukseen. (Rautkari 2013/2.) Lämpöpuuhankkeessa DVS-mittaustulokset ovat yksi tärkeä työkalu, jonka tulosten perusteella voidaan hakea optimaalisia prosessiolosuhteita.

Puunjalostuksen eri osa-alueilla puun ja veden vuorovaikutuksella on erilaisia vaikutuksia. Esimerkiksi sellun valmistuksessa on tavoiteltavaa, että vesi kiinnittyy puuhun helposti, ja toisaalta lämpöpuun tapauksessa se on vähemmän toivottavaa. Ylipäätään mekaanisen puunjalostuksen alueella on tehty suhteellisen rajallisesti sarveistumiseen liittyvää tai sen hyödyntämiseen tähtäävää tutkimusta. Puun modifointiin ja kuivaukseen liittyen mm. Borrega ja Kärenlämpi (2010) ovat esittäneet tuloksia, jotka

viittaavat siihen, että lämpöpuuprosessin aiheuttama hygroskooppisuuden lasku ei johdu pelkästään massahäviöstä eli pääosin hemiselluloosien hajoamisesta. Lämpöpuuhankkeessa on päädytty tutkimaan käsittelyprosessia korkeassa höyrynpaineessa, koska se tarjoaa mahdollisuuksia kehittää lopputuotteiden ominaisuuksia puun kemian avulla haluttuun suuntaan.

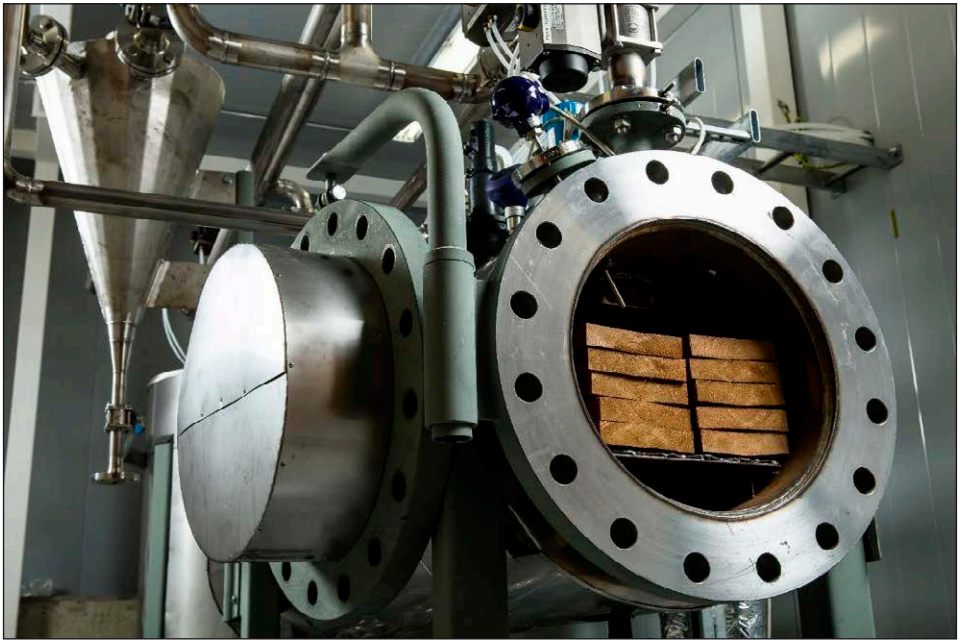
Lämpöpuun kehittäminen -hankkeessa kokeita tehdään kahdessa mittakaavassa. Tarjoilla mittalaitteilla tehtyjen kokeiden perusteella päätetään sopivat prosessiparametrit, joiden vaikutus pyritään toistamaan täysikokoisilla sahatavarakappaleilla.

## Tutkimusongelmana prosessin skaalattavuus

Lämpöpuuhankkeessa tehtävien kokeiden perusedellytys on, että hallitaan tarkasti prosessin olosuhteet, eli ilmankosteus, lämpötila ja paine. Kokeita tehdään kahden kokoluokan tutkimuslaitteistoilla: Aallossa koekappaleiden dimensiot ovat muutamia senttimetrejä, joten myös käytettävä käsittelylaitteisto tai reaktori on pienikokoinen. Mamkissa tehdään vastaavat käsittelyt täysimittaisilla sahatavarakappaleilla, jolloin koekappaleet ovat jopa kaksi metriä pitkiä. Kokeiden perusajatus on skaalata prosessi laboratoriomittakaavasta täysikokoisiin koekappaleisiin. Vaikka Mamkin laitteisto on edelleen laboratoriolaitteisto, koekappaleiden mittojen ansiosta ollaan jo hyvin lähellä teollisen prosessin toteutusta. On siis selvitettävä, ovatko pienillä koekappaleilla saatavat tutkimustulokset verrattavissa isoihin koekappaleisiin. Kuitenkin jo ennen tätä on selvitettävä, voidaanko erikokoisilla laitteistolla tehdä riittävän samankaltaisia prosesseja? Tähän vaikuttaa puun luontaisten ominaisuuksien ja esimerkiksi dimensioiden lisäksi prosessilaitteiden tekninen toteutus. Seuraavissa kappaleissa esitellään Mamkissa käytössä oleva laitteisto ja sillä saatuja mittaustuloksia lämpökäsittelyprosessista korkeassa höyrynpaineessa.

## Mamkin tutkimuslaitteisto

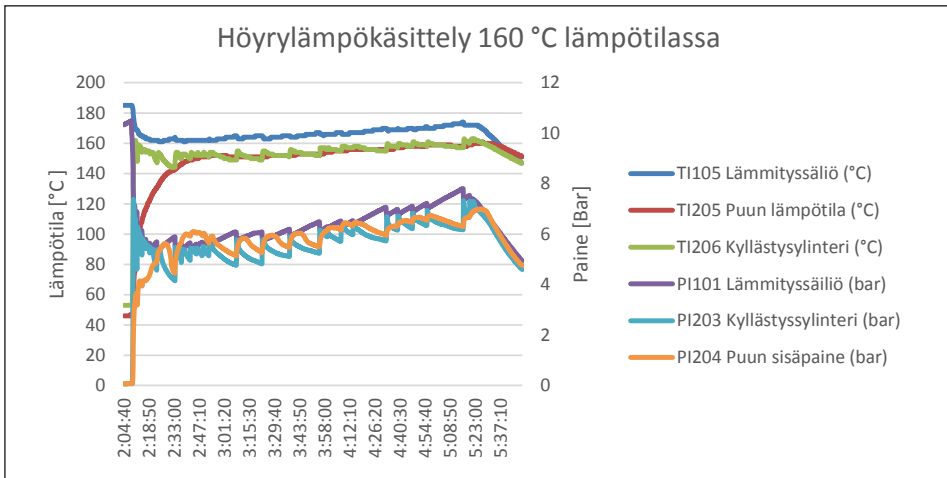
Mikkelin ammattikorkeakoulun puulaboratoriossa käytettävä laitteisto on periaatteessa kuumakyllästyslaitteisto, mutta sitä voidaan soveltaa useissa erilaisissa prosesseissa modifiointi- ja kyllästyskäsittelyistä kuumakuivaukseen. Laitteistossa on kaksi sylinterimäistä säiliötä, jotka on yhdistetty toisiinsa putkistoilla. Toisessa sylinterissä, tai lämmityssäiliössä, voidaan lämmittää erilaisia käsittelyaineita tai esimerkiksi höyrystä vettä. Kyllästys-/käsittelysylinteriin laitetaan puolestaan käsiteltävä puumateriaali. Lämmitettävän siirtoputken ja muiden putkistojen välityksellä säiliöstä toiseen voidaan siirtää nesteitä ja höyryä. Aineiden siirto perustuu paine-eroihin, joka saadaan aikaan paineistamalla laitteisto tyypellä. Myös alipainetta voidaan käyttää aineiden siirtoon matalammassa lämpötiloissa. Laitteiston maksimitoimintalämpötila on 200 °C ja maksimihöyrynpaine 15,5 bar, joten laitteistolla voidaan operoida kylläisellä höyrynpaineella 200 °C:n lämpötilassa.



**KUVA 1. Koelaitteisto, kyllästysylinterissä olevia koekappaleita (kuva Darcmedia)**

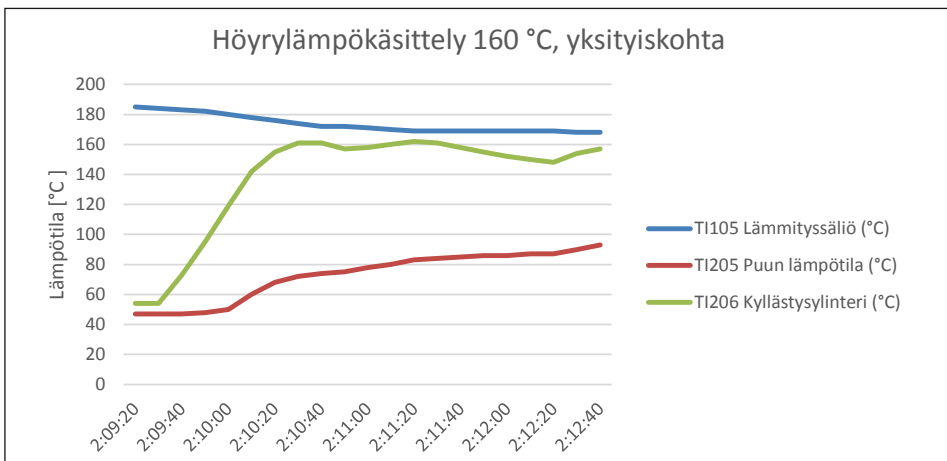
## Testituloksia

Teknisesti Mamkin koelaitteisto soveltuu siis hyvin käytettäväksi lämpökäsittelykokeissa, jotka tehdään korkeissa höyrynpaineissa. Toisaalta haasteena voi olla prosessin nopeus – pienen mittakaavan kokeissa puun lämpötila saadaan höyryn avulla nostettua nopeasti, mutta onko sama mahdollista tehdä myös täysikokoisella sahatavarakappaleella? Lisäksi uuden laitteiston toiminnasta ei voida olla käytännössä varmoja, ennen kuin prosesseja on testattu käytännössä. Kuvassa 2 on esimerkki laitteistolla tehdystä kokeesta. Kokeessa puutavara on käsittelysylinterissä, joka on lämmitetty noin 60 °C:n lämpötilaan. Kokeessa tavoitteena on lämmittää sylinteri höyryllä mahdollisimman nopeasti tavoitelämpötilaan ja tehdä kokeellinen lämpökäsittelyprosessi korkeassa höyrynpaineessa.



**KUVA 2. Höyrylämpökäsittelyprosessi**

Havaintojen perusteella lämmönnosto tapahtuu nopeasti ja suhteellisen hallitusti. Mittalaitteiden avulla prosessin olosuhteita, eli mm. sekä puun sisälämpötilaa että sisäpainetta, voidaan mitata tarkasti. Käsitteilyylinterin lämpötila kohoaa kokeessa hyvin nopeasti. Kuvasta 3 nähdään, että käsitteilyylinterin lämpötila nousee 50 °C:n lämpötilasta 160°C:n lämpötilaan noin minuutissa. Puun lämpötila reagoi nopeasti, mutta koska mittari on noin 50 mm:n syvyydessä, puun lämpötila nousee hitaammin. Höyrynpainetaulukon vertaamalla voidaan todeta, että olosuhteet ovat halutut, eli käsittely tapahtuu kylläisessä höyryssä. Tämän koekäsittelyn kesto oli noin kolme tuntia. Lämpökäsittelyprosessissa keskeinen tekijä on puun sisälämpötila, kuinka nopeasti se saavutetaan ja kuinka kauan puuta altistetaan korkealle prosessilämpötilalle. Tässä kokeessa puun sisälämpö nousi lähelle tavoitetta noin 45 minuutin kuluessa. Paineikäyrästä nähdään, että höyrynsyötön ohjausta ei ole optimoitu kovinkaan tarkasti tässä vaiheessa.



**KUVA 3. Höyrylämpökäsittelyprosessi, yksityiskohta lämmitysvaiheesta**

Havaintojen perusteella koelaitteisto toimii hyvin ja edellytykset jatkokokeiden tekemiselle ovat olemassa. Koesarjoja jatketaan testiajoilla erilaisissa olosuhteissa, jolloin saadaan koemateriaalia, josta tehtävien laatumittausten avulla voidaan arvioida prosessin toimivuutta tuotemittakaavassa. Lämpöpuun kehittäminen -hanke tarjoaa mielenkiintoisia mahdollisuuksia kehittää lämpöpuuprosessia. Puun kemian ja siinä tapahtuvien muutoksien ymmärtäminen mahdollistavat uusien prosessien kehittämisen. Toisaalta uusien prosessien kehittäminen edellyttää, että laboratoriokokeiden tulokset ovat sovellettavissa myös teollisessa mittakaavassa.

## Lähteet

- Borrega, M., & Kärenlampi, P. P. (2010). Hygroscopicity of heat-treated Norway spruce (*Picea abies*) wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 68(2), 233-235. DOI:10.1007/s00107-009-0371-8
- Hill, C.A.S. 2006. *Wood Modification – Chemical, Thermal and Other Processes*. Wiley Series in Renewable Resources. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, West Sussex. ISBN 0-470-02172-1
- Rautkari, L., Laine, K., Kutnar, A., Medved, S., & Hughes, M. (2013). Hardness and density profile of surface densified and thermally modified Scots pine in relation to degree of densification. *Journal of Materials Science*, 48(6), 2370-2375. DOI: 10.1007/s10853-012-7019-5
- Rautkari, L., Hill, C. A., Curling, S., Jalaludin, Z., & Ormondroyd, G. (2013). What is the role of the accessibility of wood hydroxyl groups in controlling moisture content?. *Journal of Materials Science*, 48(18), 6352-6356. DOI 10.1007/s10853-013-7434-2
- Lämpöpuuyhdistys 2004. *ThermoWood® -käsikirja*. Lämpöpuuyhdistys ry. [https://asiakas.kotisivukone.com/files/thermowood.kotisivukone.com/tiedostot/914711200401161255\\_twkasikirja.pdf](https://asiakas.kotisivukone.com/files/thermowood.kotisivukone.com/tiedostot/914711200401161255_twkasikirja.pdf)  
Päivitetty 13.01.2004 Ladattu 1.11.2016.





# VIILUN MODIFIOINTI

*Olli Paajanen & Hannu Turunen & Kati Kontinen*

Viilun käyttöön pohjautuva puutuoteteollisuus on hyvin merkittävä teollisuudenala Etelä-Savossa ja sen naapurimaakunnissa. Mikkelin ammattikorkeakoulun puulaboratoriossa on tehty puututkimusta jo yli kahdenkymmenen vuoden ajan pääasias-  
sa puun modifiointiin, kyllästyskäsitteilyihin ja kuivaukseen liittyen. Syksyllä 2016 puulaboratoriossa on käynnistetty tutkimushanke, jossa tutkitaan puuviilun modifi-  
ointia. Tuoreita puutieteen tutkimustuloksia soveltava tutkimusprojekti toteutetaan yhdessä Aalto-yliopiston kanssa. Hanketta rahoittavat Euroopan Aluekehitysrahas-  
to Etelä-Savon maakuntaliiton kautta sekä kolme yritystä: Metsä Wood (Metsäliitto  
Osuuskunta), Stora Enso Wood Products Oy Ltd sekä UPM-Kymmene Wood Oy. Projektissa hyödynnetään Mamkin ja Aallon kokemusta modifiointiprosesseista ja sovelletaan niitä viilupohjaisiin tuotteisiin. Viilun modifiointi -hankkeessa tutkitaan menetelmiä, joilla voidaan kehittää puutuotteille erittäin tärkeää ominaisuutta: pa-  
lonkestoa.

## **Puutuoteteollisuuden vaikutukset alueella**

Viilun käyttöön pohjautuva puutuoteteollisuus on hyvin merkittävä teollisuudenala Etelä-Savossa ja sen naapurimaakunnissa. Viilupohjaisten puutuotteiden valmistuk-  
sella on iso vaikutus myös alueen metsätalouteen, koska viilun sorvaukseen perus-  
tuvissa tuotantoprosesseissa käytetään hyvälaatuisia ja korkea-arvoista tukkipuuta. Mekaaninen metsäteollisuus on Etelä-Savon teollisen raakapuun pääkäyttäjä. Noin puolet puuraaka-aineesta käytetään vaneriteollisuudessa ja puolet kertopuu- ja saha-  
teollisuudessa. Etelä-Savon kuitupuu puolestaan viedään pääosin Kaakkois-Suomen tuotantolaitoksille jalostettavaksi. Kokonaisuutena metsätalouden merkitys maakun-  
nalle on suuri, koska myös kantorahatulot ja kuljetuksista syntyvät tulot ovat merkit-  
täviä. Metsätalouden piirissä työskenteli vuonna 2011 noin 1 365 henkilöä. Teolli-  
suuden ja metsätalouden työntekijöiden lisäksi maa- ja metsätalouden asiantuntijoita on laskettu Etelä-Savossa olevan 424, joten metsäteollisuuden tuotantoketju on mer-  
kittävä työllistäjä kaikilla koulutustasoilla (Suomen metsäkeskus 2013).

Viilu- ja vaneriteollisuuden merkitys korostuu valtakunnallisesti myös siksi, että ne ovat merkittäviä vientituotteita. Valtakunnallisesti viennin osuus valmistusmäärästä on noin 85 % ja arvo 559 miljoonaa euroa (Metsäteollisuus ry 2016).

## Viilupohjainen teollisuus Etelä-Savossa

Etelä-Savon metsäteollisuus muodostuu puutuoteteollisuudesta. Vaneriteollisuus puolestaan on maakunnan puutuoteteollisuuden tärkein sektori puun käytön, tuotannon arvon ja työllistämisen näkökulmista. Vuonna 2015 Suomessa valmistettiin vaneria 1,15 milj. m<sup>3</sup>. Etelä-Savon osuus koko maan tuotannosta on hyvin merkittävä. Euroopan suurin vaneritehdas on UPM Pellosniemi Ristiinassa, jonka kapasiteetti on 480 000 m<sup>3</sup> ja jossa on henkilöstöä noin 650 henkeä. Myös kapasiteetiltaan pienemmät vaneritehtaat ovat merkittäviä työllistäjiä; esimerkiksi UPM:n koivuvaneritehdas Savonlinnassa (100 000 m<sup>3</sup>) työllistää noin 270 henkilöä. Muita valtakunnallisesti tärkeitä viiluteollisuuden yksiköitä ovat Metsä Wood Punkaharjulla (Kertopuu- eli LVL-tehdas ja vaneritehdas). Vuonna 2013 koko puutuoteteollisuus työllisti Etelä-Savossa suoraan 2 053 henkeä, josta viilupohjaisen teollisuuden osuus on siten hyvin huomattava. Tilastokeskuksen mukaan puutuotealalla oli 26,7 % maakunnan teollisuustyöpaikoista, ja toisaalta koko Suomen puutuoteteollisuuden työpaikoista sijaitsee Etelä-Savossa 10,4 %. (Suomen Metsäkeskus 2013).

Vaikka metsäteollisuus on viime vuosina kärsinyt huonon taloustilanteen vaikutuksista, Savossa on tehty mittavia investointeja: Savonlinnaan avattiin uusi koivuvanerilinja vuonna 2012 ja Stora Enso investoi 43 milj. € Varkauden LVL-tehtaaseen. Tehdas käynnistyi kesällä 2016, ja siellä on tarkoitus valmistaa 110 000 m<sup>3</sup> viilupuu-ta/vuosi. Myös naapurimaakunnissa sijaitsee merkittäviä viiluteollisuuden tuotantolaitoksia. Puutuoteteollisuuden osuus alueen teollisuustuotannon liikevaihdosta oli vuonna 2010 noin kolmannes. Puutuoteteollisuuden kehittäminen ja uusien tuotteiden innovointi onkin alueen yritysten kilpailukyvyyn ja kehityksen kannalta tärkeää.

## Puun ominaisuuksista

Puumateriaalin ominaisuudet juontuvat sen geeneistä ja kasvuprosessista luonnossa; puu kasvaa tiettyyn muotoon perintö- ja ympäristötekijöiden asettamissa rajoissa. Se reagoi ympäristönsä rasituksiin esimerkiksi muodostamalla reaktiopuuta tiettyihin kohtiin vahvistamaan puuta ulkoisia rasituksia vastaan. Tämä kaikki vaikuttaa sekä puun kemiallisiin että fysikaalisiin ominaisuuksiin. Puun ja veden vuorovaikutus on hyvin keskeinen tekijä, joka vaikuttaa puun käyttöön. Elävä puu on organismi, joka tarvitsee mm. vettä yhteyttämisprosessiin ja ravinteiden kuljettamiseen. Puumateriaali on siten avoin vedelle, mikä on puumateriaalin käytön kannalta sekä hyvä että huono asia. Puumateriaali mukautuu ympäristönsä kosteuteen, joten sen mitat muuttuvat kosteuden vaikutuksesta. Toisaalta puun sitoma ja luovuttama kosteus parantaa rakennusten sisäilmaa. Puu on kosteuden kautta altis biologisille hajottajille, joten sen kestävyys on rajallinen. Toisaalta samojen hajottajien kautta puu myös hajoaa luonnossa. (Kärkkäinen 2003.)

Puun sitoma hiili voidaan hyödyntää energiantuotannossa. Tosin tämän vastapainona puun palaminen on ongelma puun rakenteellisessa käytössä. Vaikka puu on hyvä raken-

nusmateriaali, sen käyttöä rakennusmateriaalina rajoittavat palomääräykset. Siksi esteettiset puupinnat joudutaan monissa käyttökohteissa usein peittämään palamattomilla suojamateriaaleilla. Esimerkiksi puukerrostaloissa palomääräykset ovat hyvin tiukat.

## Puuviiluista valmistettavat tuotteet

Puuviiluja käytetään vanerissa ja muissa viilupohjaisissa tuotteissa, kuten LVL:ssä ja huonekaluissa. Lopputuotteiden valmistusprosessit vaihtelevat käyttökohteittain, mutta puuviilun valmistamisen pääperiaate on yksinkertainen: puun rungosta leikataan ohuita suikaleita, jotka ovat yleensä muodoltaan levymäisiä. Näitä liimataan toisiinsa tai muihin puulevyihin tai materiaaleihin. Tunnetuin ja yleisin viilutuote on vanerilevy. Nykyaikainen vaneri valmistetaan sorvatuista puuviiluista, jotka liimataan toisiinsa kerrosrakenteena. Viilut asetetaan kerrosrakenteessa toisiinsa nähden 90 asteen kulmaan, minkä ansiosta levyn ominaisuudet ovat tasaisempia eri suunnissa. Vaneria käytetään monenlaisissa loppukäyttökohteissa, mutta yleensä perustelut sen käytölle ovat joko ulkonäkö tai lujuusominaisuudet.

Viilua käytetään pintamateriaalina vanerin lisäksi monissa käyttökohteissa ja yhdistettyinä muihin materiaaleihin (esimerkiksi huonekalut, huonekalulevyt, parketit). Tällöin hyödynnetään puun visuaalisia ominaisuuksia. Toisaalta rakenteellisissa tai muissa lujuutta vaativissa käyttökohteissa voidaan hyödyntää puun luontaisesti korkeaa lujuutta ja sitkeyttä. Puumateriaalista todetaan usein, että se on lujaa ja erityisesti lujuus/paino-suhde on erittäin hyvä. Toisaalta puun ongelma on sen ominaisuuksien suuri hajonta. Vaikka eri puulajien materiaaliominaisuudet tunnetaan sinänsä tarkasti, materiaalin ominaisuudet vaihtelevat sekä yhden puuyksilön sisällä että kokonaisten puuyksilöiden välillä. Puun suurta lujuutta ei voi siis hyödyntää täysipainoisesti, jos tuotteet täytyy mitoittaa heikoimpien puuyksilöiden asettamisrajoissa. Puuviilun tapauksessa lujuuden hyödyntäminen voi tapahtua hallitusti. Koska puuviilut liimataan kerroksittain, voidaan valmistusprosessin avulla vaikuttaa merkittävästi syntyvän kerrosrakenteen ja sitä kautta lopputuotteen ominaisuuksiin. Valmistusprosessin lisäksi puuviilun ja lopputuotteen ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa erilaisilla jalostus- tai modifiointiprosesseilla. Tuotantoprosessien lisäksi puuviilun ominaisuudet riippuvat puuraaka-aineen ominaisuuksista. Puulajien lisäksi viilun ominaisuuksiin vaikuttavat mm. puulaji, puun perimä ja sen kasvun aikana vaikuttavat ympäristötekijät.

## Puuviilun ja vanerin valmistusprosessi

Puuviilun ominaisuudet syntyvät sen valmistusprosessin ja puun kasvuprosessin tuloksena. Erityisesti on huomioitava valmistusprosessi, jonka eri vaiheilla on vaikutuksia toisiinsa. Puuviilun valmistusprosessi on monivaiheinen. Tehtaalle toimitettu tukkipuu lajitellaan ja katkotaan lyhyemmiksi pölleiksi, joiden pituuden määrää käytettävä prosessilaitteisto. Puuviilua valmistetaan kahdella päämenetelmällä: leikkaamalla tai sor-

vaamalla. Leikkaamisella tarkoitetaan prosessia, jossa puukappaleen pinnasta irrotetaan kerroksittain kappaleita, joiden mitat määräytyvät leikattavan pinnan mittojen mukaan. Sorvauksessa puolestaan puun runkoa pyöritetään suurella nopeudella ja leikkaava terä painetaan puun pintaan, minkä ansiosta viilu leikkautuu yhtenäisenä mattona, joka myöhemmissä prosessivaiheissa leikataan viiluarkeiksi. Sorvauksessa puun läpimitalla on tärkeä merkitys: paksummasta puutavarasta saadaan enemmän viilua ja erityisesti pintaviilua, joka on yleensä parempilaatuista. Prosessi on myös tehokkaampi, koska saman viilumäärän sorvaamiseen tarvitaan vähemmän pölyä. Sorvatun ja leikatun viulun ulkonäkö on erilainen, koska leikattava pinta on eri. Leikattuja viiluja käytetään erityisesti huonekaluissa, mutta vaneri- ja LVL-teollisuudessa käytetään nopeasti sorvautuvaa viilua, koska tuotantokapasiteettia tarvitaan paljon. Viulun ominaisuuksiin ja laatuun vaikuttavat merkittävästi sorvauksessa syntyvät halkeamat (Rohumaa 2012).

Ennen sorvausta tai leikkausta puuta täytyy hautoa kuumassa tai lämpimässä vedessä viulun leikkautumisen helpottamiseksi. Haudontalämpötilalla on suuri vaikutus puun kemiaan ja sitä kautta viulun laatuun (Rohumaa 2016), mutta haudonnan tarjoamia mahdollisuuksia ei ole teollisuudessa vielä täysin hyödynnetty. Haudottu puu sorvataan viiluksi, joka katkotaan arkeiksi. Arkit voidaan lajitella tässä vaiheessa. Erityisesti tämä on järkevää puulajeilla, joiden pinta- ja sydänpuun kosteudet poikkeavat toisistaan paljon, esimerkiksi kuusella. Seuraava prosessivaihe onkin kuivaus. Viilu kuivataan suurikokoisissa kuivaajissa, jotka lämmitetään Suomessa pääasiassa prosessista syntyvällä puujätteellä. Kuivaajien hukkaenergiaa hyödynnetään myös haudonnassa. Kuivauksellakin on suuri vaikutus viulun laatuun, koska puun kemia muuttuu, kun se altistetaan lämmölle tai sen kosteus alenee.

Kuivauksen jälkeen viilut lajitellaan. Viilujen lajittelukriteereitä voivat olla esimerkiksi tiheys ja ulkonäkö. Lajittelu on merkittävä tekijä kaikkien puuviilukomposiittien valmistusprosesseissa, joissa on tärkeää hyödyntää mahdollisuus järjestää pienemmiksi kappaleiksi pilkottu puumateriaali uudelleen. Tämän seurauksena raaka-aine on homogeenisempää, jolloin sen luontainen vaihtelu pienenee. Ominaisuuksien vaihtelun pienentämisen lisäksi teollisen valmistusprosessin suuri etu on mahdollisuus valikoida tuotteiden raaka-aine, jolloin voidaan vaikuttaa valmistettavan tuotteen ominaisuuksiin. Lajittelukriteereitä ovat mm. kosteus, tiheys, ulkonäkö ja erilaiset viat (halkeamat jne.). Myös tuotteen lujuusominaisuuksiin voidaan vaikuttaa viilujen ominaisuuksilla.

Kuivauksen ja lajittelun jälkeen viilut ladotaan levyaihioiksi, ja samalla viilujen väliin tai käytännössä joka toisen viulun pinnoille levitetään liimaa. Liiman levityksen jälkeen levyaihiot kuumapuristetaan kaksivaiheisella prosessilla. Kuumapuristuksessa viilukasasta ja liimasta muodostuu lopullinen levymäinen tuote. Koska puun tiheys ja lujuus ovat yhteydessä toisiinsa, viilujen tiheydellä voidaan vaikuttaa tuotteen lujuuteen. Lujia viiluja käytetään vanerin pinnoissa, koska esimerkiksi näin voidaan parantaa taivutuslujuutta. Kuten jo aiemmin todettiin, levyjen ladontasuunnalla voidaan myös vaikuttaa kuormituskäyttämiseen, eli viiluja voidaan latoa erilaisissa kulmissa, jolloin vahvistetaan haluttuja ominaisuuksia.

## Puuviulun ominaisuuksien parantaminen modifioinnin avulla

Puuta modifioimalla pyritään parantamaan puun materiaaliominaisuuksia tai pienentämään puun huonojen ominaisuuksien vaikutusta (Hill 2006, 20). Käytännössä se voi tarkoittaa esimerkiksi turpoamisen vähentämistä, ts. dimensiopysyvyyden parantamista, tai säänkeston tai palo-ominaisuuksien parantamista. Koska puun ominaisuudet määräytyvät sen kemiallisten ominaisuuksien kautta, puun kemiaan pyritään vaikuttamaan erilaisilla kemiallisilla modifiointimenetelmillä. Toisaalta kaikki modifiointimenetelmät eivät vaikuta kemiaan, joten se ei ole yleispätevä määritelmä. Esimerkiksi puuviulun tiheysmodifiointi on yksi tapa vaikuttaa puun lujuusominaisuuksiin. Tiheysmodifioinnissa puristetaan viilua kokoon mekaanisesti. Lämpöpuun valmistusprosessissa puolestaan modifoidaan puun kemialla, mutta prosessissa ei käytetä ylimääräisiä aineita. Puuta voidaan prosessoida ja käsitellä monin tavoin, ja välillä modifioinnin ja muiden käsittelyiden välinen ero on vaikea määrittellä. Modifioinnille on esitetty seuraavanlainen, melko tiukasti rajaava määritelmä (Hill 2006, 21) vapaasti suomennettuna:

*Puun modifiointi tarkoittaa kemiallisen, biologisen tai fyysikaalisen toiminnon kohdistamista materiaaliin. Toiminnon tavoitteena on saavuttaa haluttu ominaisuuden parannus materiaalin koko käyttöiän ajaksi. Modifioidun puun tulisi olla itsessään myrkytöntä käyttöolosuhteissa, ja sen ei pitäisi vapauttaa myrkyllisiä yhdisteitä käytön, kierrätyksen tai hävityksen yhteydessä. Jos modifioinnin on tarkoitus parantaa biologista kestävyyttä, vaikutustapa ei saa olla biosidinen.*

Puun luontaisiin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa eri tavoin. Yleisesti prosessiteollisuuden näkökulmasta esimerkiksi metsänhoidolliset tai jalostukseen perustuvat ratkaisut ovat liian hitaita, koska ne voidaan hyödyntää vasta vuosikymmenien kuluttua. Prosessissa tapahtuva materiaalin homogenisointi ja laadullinen lajittelu tarjoavat kuitenkin mahdollisuuden vaikuttaa lopputuotteen ominaisuuksiin. Useisiin puuviulun ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa sen valmistusprosessilla. Esimerkiksi haudonta ja sorvaus vaikuttavat puun pinnan karheuteen, jolla on vaikutusta mm. liimauksessa ja pintäkäsittelyssä. Toisaalta haudonta ja kuivaus vaikuttavat puun kemiallisten muutosten kautta liimausprosessiin ja sitä kautta lujuuteen. Rajanveto modifioinnin ja prosessoinnin välillä voi olla vaikeaa, jos valmistusprosessin jonkin osa-alueen avulla voidaan vaikuttaa esimerkiksi kemiallisiin ominaisuuksiin. Viilussa ja viiluprosessissa on paljon hyödyntämätöntä potentiaalia, tosin sen hyödyntäminen vaatii tarkkaa tuntemusta viilumateriaalista sekä pitkälle kehitettyjä tutkimusmenetelmiä.

Valmistusprosessilla voidaan vaikuttaa myös puun ja veden vuorovaikutukseen materiaalissa. Puun ja veden vuorovaikutus on tärkeä ilmiö, koska veden lisäksi myös muut aineet voivat kiinnittyä puuhun samojen prosessien kautta, eli esimerkiksi puussa olevien hydroksyyliyhdyntämien välityksellä. Esimerkiksi puumateriaalin palo-ominaisuuksien parantaminen vaatii yleensä sellaisten kemiallisten aineiden käyttöä, jotka pitäisi saada kiinnittymään puusolukkaan.

Kemiallisten käsittelyjen ongelma on usein niiden pysyvyys – pysyvätkö käsittelyaineet viilussa tuotteen käyttöajan ajan? Esimerkiksi palo- ja lahonkesto-ominaisuuksien kannalta pysyvyys on tärkeä asia. Toisaalta tuotteen hävittäminen voi olla ongelma, jos käsittelyaineet ovat hyvin haitallisia ympäristölle. Edellä lainattu modifioinnin määritelmä käsittelyille asettaa joukon tiukkoja vaatimuksia, jotka ovat tärkeitä modifioidun puun käytölle ja turvallisuudelle myös käytännössä.

## Viilun modifiointi -hanke

Viilun modifiointi -hankkeessa tavoitteena on kehittää kemiallinen puun käsittelymenetelmä, joka parantaa viilun palo-ominaisuuksia pysyvästi. Puun palo-ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa erilaisilla aineilla, esimerkiksi piipohjaisilla yhdisteillä, suolojen seoksilla ja ureapohjaisilla aineilla. Hankkeessa kartoitetaan puulle soveltuvat palonestoaineet ja testataan niitä vanerituotteissa. Käytettävien aineiden on reagoitava puumateriaalin kanssa, jotta suojausvaikutus on pysyvä. Tutkimuksen tuloksena voidaan löytää sopivia palonestoaineita viilutuotteiden modifiointiin. Modifioituille viilutuotteille on mahdollista löytää uusia käyttökohteita erityisesti rakentamisesta. Tutkimustulokset muodostavat pohjan yritysten omalle tuotekehitykselle.

Käytännössä hanke toteutetaan kuutena työpakettina Mamkin ja Aallon yhteistyönä. Hankkeessa tutkitaan eri aineiden käyttäytymistä viilussa, sekä modifioitujen viilujen sekä viilusta valmistetun vanerin ominaisuuksia mm. palotestein. Hanke on alkanut syksyllä 2016, joten tutkimustuloksia odotetaan vuosien 2017 ja 2018 aikana.

## Yhteenveto

Puuviilun käyttöön perustuva teollisuus on hyvin tärkeää Etelä-Savon maakunnalle. Siksi on tärkeää, että Mikkelin ammattikorkeakoulu on aktiivisesti mukana alan tutkimuksessa. Yhteistyössä yliopiston kanssa toteutettuna tutkimus hyödyntää sekä yliopiston että ammattikorkeakoulun vahvuusalueita sekä perus- että soveltavan tutkimuksen alueilla. Viilun modifiointi -hanke on hyvä esimerkki tutkimuksesta, jonka toteutus vaatii tarkkoja mittalaitteita perusilmiöiden selvittämiseen ja toisaalta huolellista selvitystä tuotteen ominaisuuksista sen loppukäyttösovelluksessa. Puu on haastava materiaali, jonka ominaisuudet ovat syntyneet evoluution seurauksena. Puutuotteiden ominaisuuksien parantaminen modifioinnin avulla ei ole yksinkertaista. Viilun palosuojauksen parantaminen modifioinnin avulla voi luoda uusia tuotteita vaneri- ja LVL-teollisuudelle. Jos hankkeen tavoitteet saavutetaan, tulosten avulla voidaan vahvistaa paikallisesti tärkeää teollisuutta. Lisäksi hanke kehittää Mamkin puulaboratorion viiluosaamista.

## Lähteet

- Suomen Metsäkeskus. 2013. Etelä-Savon metsä- ja puuklusterin kehittämissuunnitelma, Toimittanut Ollikainen S, Vento, P.
- Hill, C.A.S. 2006. Wood Modification – Chemical, Thermal and Other Processes. Wiley Series in Renewable Resources. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, West Sussex. ISBN 0-470-02172-1
- Kärkkäinen, M. 2003. Puutieteen perusteet. Metsälehti Kustannus. Karisto. Hämeenlinna. ISBN 952-5118-51-7.
- Metsäteollisuus ry. 2016. Puulevyteollisuuden tilastot. <http://metsateollisuus.fi/tilastot/toimialat/25-Puulevyteollisuus/>. Ladattu 31.10.2016.
- Rohumaa, A., Hunt, C. G., Hughes, M., Frihart, C. R., & Logren, J. 2013. The influence of lathe check depth and orientation on the bond quality of phenol-formaldehyde-bonded birch plywood. *Holzforschung*, 67(7), 779–786., ISSN (Online) 1437-434X, ISSN (Print) 0018-3830
- Rohumaa, A., Antikainen, T., Hunt, C. G., Frihart, C. R., & Hughes, M. 2016. The influence of log soaking temperature on surface quality and integrity performance of birch (*Betula pendula* Roth) veneer. *Wood Science and Technology*, 50(3), 463–474. doi:10.1007/s00226-016-0805-5.





# ÄLYKKÄÄT MATERIAALIT JA ENERGIARATKAISUT





# HACKATHON PK-YRITYSTEN KEHITYSTYÖKALUNA

*Mikko Hokkanen & Kimmo Haapea*

Vanhojen tuotteiden kysynnän heikkeneminen on pakottanut myös perinteisten toimialojen yritykset etsimään korvaavia markkinoita uusilta toimialoilta. Uudet markkinat ja tuotteet ovat johtaneet kysynnän vaihtelun ja tuotannon aktiivisten nimikkeiden määrän kasvun myötä suureen muutokseen yritysten vanhaan toimintamalliin verrattuna. Näiden yritysten tuotantotoiminta on siirtynyt suurista muutamien nimikkeiden eristä ja pitkistä tuotantosarjoista kohti yksittäistuotantoa edellyttäen aiempaa nopeampaa reagointikykyä toiminnan ulkoisiin ja sisäisiin muutoksiin. Tuotannon nopeaa reagointikykyä, mukautuvuutta ja tehokkuutta kehitetään uusilla työkaluilla, jotka ovat suurelta osin ennestään vieraita perinteisen teollisuuden yrityksille. Kehitystyö on mahdollista aloittaa pienin askelin hackathon-työpajojen avulla.

## Hackathon

Hackathon sana juontaa juurensa kokeellisesta ohjelmoinnista (hacking) ja pitkän matkan juoksusta (marathon). Hackathon-tapahtumat ovat tyypillisesti intensiivisiä 1–7 päivää kestäviä tilaisuuksia, joissa etsitään ratkaisuja annettuihin haasteisiin. Haasteet voivat liittyä esim. yritysten tuotekehitykseen, tuotantoon, viestintään, markkinointiin ja tuotteiden jakeluun. Ratkaisuja voidaan etsiä kohdennetusti esim. tiettyjä ohjelmointiympäristöjä ja -kieliä hyödyntävistä menetelmistä tai avoimesti ilman rajoitteita mahdollisten ratkaisujen suhteen. Tapahtumat voidaan järjestää kilpailuna, mutta ratkaisuja voidaan etsiä myös eri osallistujien kesken vapaamuotoisessa kokoontumisessa. Osallistujat voidaan kutsua kohdennetusti tai avoimesti yrityksen sisä- tai ulkopuolelta. Avointa kutsua sovellettaessa voidaan hakijoiden joukosta tarvittaessa karsia osallistujia esim. runsaan osallistujamäärän vuoksi.

Tyypillisesti hackathon mielletään ohjelmistosuunnittelijoille ja ohjelmoijille suunnatuksi tapahtumaksi, mutta osallistujien monialaisuus antaa erilaisia näkökulmia ja käsittelytapoja ratkaisujen vaihtoehtoiksi. Hackathonia voidaan käyttää myös muunlaisten kuin pelkästään ohjelmointiin liittyvien haasteiden ratkaisumahdollisuuksien kartoittamiseen, mutta yleensä ratkaisuihin liittyy keskeisesti digitaalisten työkalujen hyödyntäminen.

Hackathonia on käytetty tuotekehitysprojekteissa myös yrityksen sisäisenä tapahtumana (esim. Netflix ja Facebook) (<http://bgr.com/2016/05/24/netflix-hackathon-desktop-experience-virtual-reality/>). Suomessa hackathoneja on järjestetty tuotannollisissa teollisuusyrityksissä, mm. Kone Oyj:ssä (<https://industryhack.com/hacks/kone/>), Konecranes Oy:ssä (<http://www.konecranes.com/hackathon>), Fastems Oy:ssä (<http://www.fastems.com/industryhack/>) ja Ponsse Oyj:ssä (<http://www.ponsse.com/fi/media-arkisto/tiedotteet/innovointitapahtuma-hack-the-harvester-ponssella>). Näissä tapahtumissa on etsitty ratkaisuja mm. loppukäyttäjän käyttökokemuksen parantamiseen, huoltotoimien kehittämiseen sekä tuotannon seurantaan ja operatiivisen toiminnan seurantaan.

## Hackathon Etelä-Savon Uudistuva teollisuus -hankkeessa

Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy:n ja Mikkelin Ammattikorkeakoulun toteuttamassa Etelä-Savon Uudistuva teollisuus -hankkeessa on järjestetty pk-yrityksille suunnattuja hackathon-työpajoja neljässä yrityksessä vuoden 2016 aikana. Ensimmäinen hackathon järjestettiin 15.–16.1.2016 Pertunmaan Kuortissa, jolloin kohdeyrityksinä olivat osavalmistusta ja alihankintaa tekevä Pelaser Oy sekä ruiskuvalutuotteita, osavalmistusta ja kokoonpanoa tekevä Plastep Oy. Annetut haasteet koskivat Pelaser Oy:llä sisäisen logistiikan tehokkuuden ja läpinäkyvyyden kehittämistä sekä automaation ja älykkyyden lisäystä tuotteiden hinnoittelussa. Plastep Oy haki ratkaisumalleja tuotannon tilannekuvan havainnollistamiseen operatiiviselle johdolle sekä tuotteiden laadun ja jäljitettävyyden kehittämiseen. Lisäksi tapahtumassa oli molempia yrityksiä koskevana vapaana haasteena työturvallisuuden kehittäminen digitaalisten työkalujen avulla. Lyhyt kuvaus haasteista ja tilaisuuden ohjelmasta esitettiin etukäteen sähköpostitse jaetussa hackathonin kutsussa ja tapahtuman verkkosivuilla ([www.industrial-hackathon.fi](http://www.industrial-hackathon.fi)). Tapahtuman fasilitoinnista vastasi Observis Oy ja tiimien sparrauksesta Hacklab Mikkelin ry.

Osallistujia tapahtumaan saapui oppilaitoksista (Mikkelin Ammattikorkeakoulu ja Tampereen teknillinen yliopisto) ja yrityksistä (Mipro Oy ja Software Production Oy) yhteensä 42, joista muodostui yhdeksän kilpailevaa tiimiä. Kilpailu alkoi perjantaina klo 16 haasteiden esittelyllä, jonka jälkeen osallistujilla oli mahdollisuus valita haaste, johon he kehittävät ratkaisun. Tämän jälkeen osallistujat saivat tarkempaa tietoa valitsemaansa haasteeseen liittyen ja heillä oli mahdollisuus esittää tarkentavia kysymyksiä yritysten edustajille. Tämän jälkeen ratkaisujen kehittäminen jatkui tiimeittäin intensiivisesti läpi yön. Suurin osa kilpailijoista ei malttanut nukkua koko tapahtuman aikana lainkaan.

Kilpailun kehittämisosuus päättyi lauantaina iltapäivällä, jonka jälkeen alkoi töiden esittely. Esittelyihin varattiin aikaa jokaiselle tiimille viisi minuuttia, joten esittelyyn tuli valmistautua huolellisesti ja pyrkiä saamaan kehitetyn ratkaisun avainkohdat selkeästi esille. Hackathonin tuomaristoon kuuluivat tj Kristiina Ketomäki (Plastep Oy), tj Pekka Larkala (Pelaser Oy), kansanedustaja Jari Leppä, liiketoimintajohtaja

Heikki Isotalus (Observis Oy), Ilmo Euro (Mikkeli Hacklab Ry) ja kehityspäällikkö Kimmo Haapea (Mikkelin kehitysyhtiö Miksei Oy). Plastep Oy:n haasteisiin parhaan ratkaisun kehitti Mikkelin Ammattikorkeakoulun opiskelijoiden Sara Nordlundin ja Mauri Hirvosen tiimi (kuva 1). Heidän ratkaisunaan oli digitaalinen kuittausjärjestelmä työmääräimien käsittelyyn, jossa lähtökohtana on työpöytäversion lisäksi kuittaus mobiililaitteilla. Voittajatiimin valinnan perusteina olivat esitetyn ratkaisun selkeys ja valmiusaste. Toteutus katsottiin olevan lähes valmis käyttöön otettavaksi sellaisenaan.



**KUVA 1. Etualalla Plastep Oy:n haasteisiin parhaan ratkaisun kehittänyt tiimi Sara Nordlund ja Mauri Hirvonen Mikkelin Ammattikorkeakoulusta (kuva Mikko Hokkanen)**

Pelaser Oy:n haasteisiin löydettiin kaksi ratkaisua, joiden välillä voitto jaettiin. Ilkka Nieminen ja Pekka Nykänen Mipro Oy:stä (kuva 2) kehittivät hinnoitteluun lähes valmiin, yrityksen ERP-järjestelmää hyödyntävän ohjelman käyttöliittymiseen. Nguyen The Sang (Mamk), Rajesh Raveendran (TTY) ja Carlos Alexander Sorto Gonzalez (Mamk) (kuva 3) kehittävät QR-koodia hyödyntävän mobiiliratkaisun osavalmisteiden jäljitettävyyteen. Ratkaisussa nähdään valmistettavan tuotteen valmistusvaihe ja fyysinen sijainti käyttäjän sijainnista riippumatta. Ratkaisu vaatii vielä jatkokehittelyä, mutta tuomariston mielestä se oli idealtaan hyvin toimiva.





KUVA 2. Pekka Nykänen ja Ilkka Nieminen (Mipro Oy) (kuva Kimmo Haafea)



KUVA 3. Alex Sorto (Mamk), Rajesh Raveendran (TTY) ja Nguyen The Sang (Mamk) (kuva Kimmo Haafea)

Toinen hackathon, hacktheconcrete24h, järjestettiin 18.–19.3.2016 rakennuselementtejä ja valmisbetonia valmistavassa Mikkelin Betoni Oy:ssä. Hackathonin haasteina oli kehittää sovellukset betonielementtien sijainnin varmistamiseksi ja tuotetiedon näyttämiseksi, saapuvan materiaalin tietojen viemiseksi ERP-järjestelmään, betonivalujen laadunhallintaan, mittaukseen ja dokumentointiin sekä kehittää uusia tapoja hyödyntää ylijäämäbetonia. Lisäksi kilpailussa oli avoin haaste yrityksen toiminnan kehittämiseksi. Ensimmäinen palkinto oli 500 €, toinen 250 € ja kolmas 150 €. Tapahtumaan saapui osallistujia oppilaitoksista (Mamk, TTY, Aalto) sekä yrityksistä ja yhteisöistä (Mikkelin Entrepreneurship Society, Rejlers Oy). Kilpailijoita oli 27, joista muodostui seitsemän tiimiä. Kilpailijoiden sparraajana toimi jälleen Hacklab Mikkeli ry ja tilaisuuden fasilitaattorina Observis Oy.

Kilpailun voitti tiimi, joka esitti ratkaisun betonielementtien laadunvarmistukseen 3D-skannauksen avulla. Ratkaisu sisälsi kuvauksen menetelmän perusideasta, metodin ja koodia jatkokehitystä varten. Kilpailun toisen ja kolmannen palkinnon voittivat tiimit, jotka kehittivät ratkaisuja logistiikkaan ja varastonhallintaan.

Kolmas hackathon järjestettiin 23.–24.9.2016 putkentaivutukseen erikoistuneessa, ajoneuvo- ja huonekaluteollisuuteen sekä teknisiin ja lääketieteellisiin laitteisiin tuotteita valmistavassa Joros Oy:ssä. Tässä hackathonissa haasteina oli kehittää ulkoa tulevien materiaalien ja valmisteiden logistiikkaa, lyhentää tuotannon läpimenoaika, parantaa materiaalien ja tuotteiden jäljitettävyyttä, pienentää keskeneräistä tuotantoa, parantaa tuotteiden ja tuotannon laatua, suunnitella uusi tuotekonsepti sekä kehittää ympäristöystävälliseen ja turvalliseen työskentelyyn opastava järjestelmä tai ohjelmisto monikulttuurisen työyhteisön tarpeisiin. Lisäksi oli mahdollisuus osallistua kilpailuun omalla Joros Oy:n liiketoimintaa kehittävällä ratkaisulla.

Kilpailuun osallistui seitsemän tiimiä oppilaitoksista (Kyamk ja Mamk). Voittajaksi valittiin Kyamkin monikansallinen tiimi (DE–PL–AT), joka kehitti NFC-tekniikkaa ja led-valoja hyödyntävän ratkaisun tuotannon vaiheiden havainnollistamiseksi ja tuotannon virtauksen parantamiseksi. Joros Oy:n toimitusjohtaja Toni Pesosen mukaan hyvän teknisen ratkaisun lisäksi esityksessä oli merkittävää ratkaisun kustannusten ja saavutettavien hyötyjen selkeä kuvaus.

Etelä-Savon Uudistuva teollisuus -hankkeen neljäs hackathon järjestettiin 18.–19.11.2016 jännittämättömiä betonielementtejä asuin-, liike- ja teollisuusrakentamisen tarpeisiin valmistavassa Lipa-Betoni Oy:ssä Pieksämäellä. Kilpailun avulla etsittiin uusia, tehokkaita ratkaisuja laadunhallintajärjestelmän uudistamiseksi, tuotannonohjausjärjestelmän käyttöliittymän kehittämiseksi, tuotannon tiedonkeräysjärjestelmän, tiedonsiirron ja visualisoinnin kehittämiseksi, materiaalihankintojen saattamiseksi ERP-järjestelmään sekä tuotannon bonusjärjestelmän kehittämiseksi. Lisäksi kilpailussa oli avoin haaste Lipa-Betoni Oy:n kilpailukyvyyn edistämiseksi.



Kilpailun osallistajat (kuvassa 9) olivat pääosin opiskelijoita (Kyamk, Mamk, LAMK ja Aalto), jotka muodostivat kolme kilpailevaa tiimiä. Yrityksenä mukana oli Production Software. Kehitetyt ratkaisut käsittelivät tilaus-toimitusketjun hallintaa, tuotannon seuranta ja tiedon visualisointia.



**KUVA 9. Uudistuva Teollisuus -hankkeen neljännen hackathonin osallistajat (kuva Mikko Hokkanen)**

Voittajaksi valittiin tiimi, joka esitti ratkaisun tiedon visualisointiin (kuva 10). Voittajan valinnassa korostui ratkaisun käyttökelpoisuuden ja hyödyllisyyden lisäksi soveluksen valmiusaste ja käyttöönoton helppous.



**KUVA 10. Voittajatiimiin kuuluivat Dmitry Golovin (Production Software), Volodymyr Lubenets (Mamk) ja Jari Kukkonen (Production Software, ei kuvassa). Palkintoshekkiä ovat luovuttamassa Satu ja Matti Lipsanen (kuva Mikko Hokkanen)**

## Johtopäätökset

Tuotannollisissa pk-yrityksissä pidettyjen hackathonien haasteet ovat olleet osittain yhteneväisiä yritysten toimialoista riippumatta, ja ne keskittyvät suurelta osin tilaus-toimitusketjun ja arvovirran tehokkuuden hallintaan. Kokemusten perusteella hackathon on toimiva konsepti, joka lähentää uuden teknologian osaajia ja perinteistä teollisuutta. Hackathonia ei tule mieltää valmiita ratkaisuja tuottavana tapahtumana, vaan esim. kehitystyön suuntaa hahmottavana ja mahdollisuuksia kartoittavana tilaisuutena, jonka käyttöön otettavat tulokset vaativat yleensä jatkokehityksen myötä lisäpanostuksia yrityksiltä.

Hackathon kiinnostaa ja innostaa kehittäjiä. Plastep Oy:n toimitusjohtaja Kristiina Ketomäen mukaan tiimien innokas ja taitava työskentely annettujen haasteiden parissa oli positiivinen yllätys, ja yritys sai tapahtumasta paljon uusia kehitysjatoksia myös muista kuin voittajatiimeiltä. Pelaser Oy:n toimitusjohtaja Pekka Larkalan mukaan oli yllättävää, miten toteuttamiskelpoisia varsinkin palkitut ratkaisut olivat. Joros Oy:n toimitusjohtaja Toni Pesonen totesi hackathonin osoittaneen konkreettisesti, miten tuotannollinen pk-yritys voi hyödyntää ketterästi uuden teknologian mahdollisuuksia toiminnassaan. Myös Mikkelin Betoni Oy:n toimitusjohtaja Markku Vähä-Mustajärvi, tehtaanjohtaja Eero Niskanen ja ATK-päällikkö Vesa Kaukorinne olivat erittäin tyytyväisiä hackathonin antiin. Niskasen mukaan kaikkien palkinnoille päässeiden tiimien kehittämät ohjelmistoidet ovat jatkokehityksen arvoisia ja yrityksellä on suunnitelmia esitettyjen ratkaisujen jalostamiseen ja käyttöönottoon.

Hackathon mahdollistaa yrityksen kehittämisen myös osaavan työvoiman rekrytoinnin myötä. Kilpailu on hyvä mahdollisuus yrityksille ja tiimien jäsenille aloittaa yhteistyö, joka voi jatkua tulevaisuudessa monin tavoin. Vesa Kaukorinteen mukaan kehittämisellä on mahdollista synnyttää uusia työpaikkoja. Mikkelin Betoni Oy tarjoaa kaikille palkituille tiimeille mahdollisuuden harjoittelupaikkaan. Myös tapahtumien fasilitaattorina toimineen Observis Oy:n liiketoimintajohtaja Heikki Isotaluksen mukaan hackathoneista on mahdollista löytää ratkaisukykyisiä ohjelmistokehittäjiä, joille Observis Oy tarjoaa harjoittelu- ja työmahdollisuuksia.

## Lähteet

Netflix hackathon, bgr.com, verkkosivusto, 24.3.2016 [viitattu 3.11.2016] <http://bgr.com/2016/05/24/netflix-hackathon-desktop-experience-virtual-reality/>

Kone hackathon 2016, Industryhack.com, verkkosivusto, [viitattu 3.11.2016] <https://industryhack.com/hacks/kone/>

Maritimehack – automated cargo handling, Konecranes.com, verkkosivusto, [viitattu 3.11.2016] <http://www.konecranes.com/hackathon>

#industryhack - Fastems, fastems.com, verkkosivusto, [viitattu 3.11.2016] <http://www.fastems.com/industryhack/>

Innovointitapahtuma ”Hack the Harvester” Ponsella, ponsella.com, verkkosivusto, [viitattu 3.11.2016] <http://www.ponsella.com/fi/media-arkisto/tiedotteet/innovointitapahtuma-hack-the-harvester-ponsella>

# PURE SHEAR -KOEKAPPALEEN OPTISET VENYMÄMITTAUSANALYYSIT DIC-TEKNIIKALLA

*Tero Karttunen*

Kumimateriaaleja käytetään usein niiden vaimentavien ominaisuuksien vuoksi sovelluksissa, joissa mm. värähtelyn, tärinän, melun, kitkan ja/tai pintapaineen hallinnalla on merkittävä rooli. Tällaisia kohteita ovat mm. koneiden ja laitteiden tuennat, telat, erilaiset pinnoitukset sekä renkaat. Edellä mainittujen ominaisuuksien lisäksi kumimateriaalilta voidaan vaatia esimerkiksi lämmönkestävyyttä, kulutuskestävyyttä, kemikaalikestävyyttä yms. Ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa kumilaadun ja sekoituksen lisäksi erilaisilla täyte- ja lisäaineilla. Korkeamman teknologian kohteissa kumisovellus joudutaan mitoittamaan myös väsyttävää kuormitusta silmällä pitäen, ja tällöin väsymiskestävyyteen vaikuttavat kuormitusten lisäksi kumimateriaalin koostumus ja väsymiskestävyys.

## Johdanto

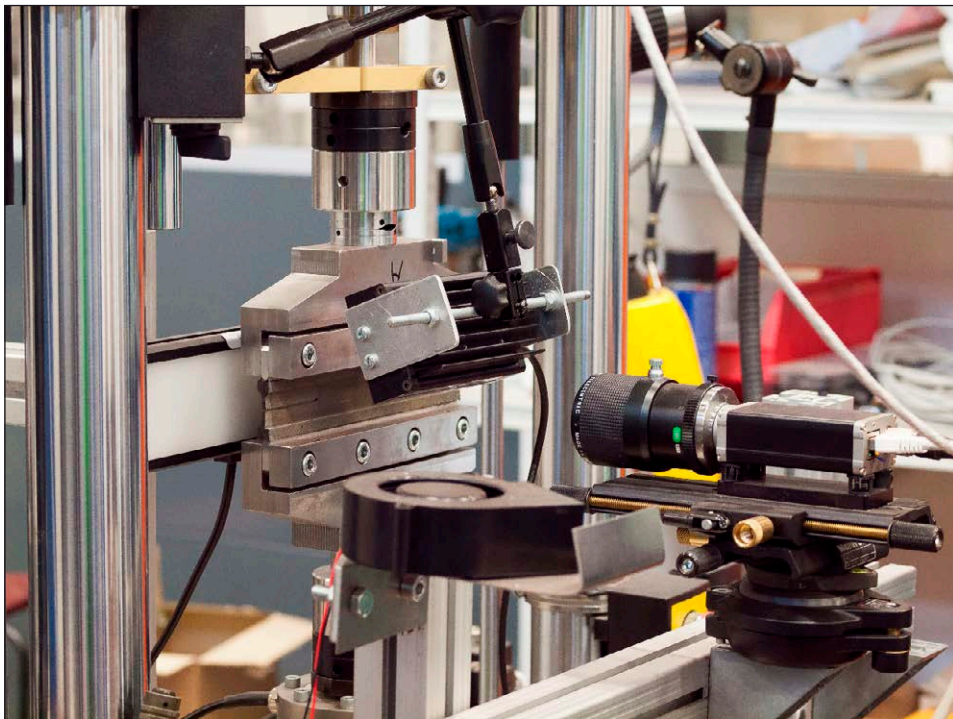
Repivän ja väsyttävän kuormituksen alaisen kumimateriaalin väsymiskäyttäytymistä voidaan tutkia särönkasvutestillä, jossa käytetään ns. ”pure shear” -koekappaletta. Tästä on kirjallisuudessa useita viitteitä (ks. mm. lähteet). Testissä on tarkoituksena määrittää särönkasvunopeus säröön syötetyn energian, tässä tapauksessa ns. repimisenergian (eng. tearing energy), suhteen. Yksinkertaistettuna tämä tapahtuu kuormittamalla säröllistä koekappaletta eri kuormitustasoilla samalla väsytystaajuudella ja seuraamalla samanaikaisesti säröpituutta. Kumi materiaalina asettaa kuitenkin erilaisia haasteita verrattuna lineaarielastisen materiaalin testaukseen. Yleensä kumimateriaalin Poissonin vakio on hyvin lähellä 0,5:ttä, eli materiaali on käytännössä kokoonpuristumatonta. Tämä asettaa huomioitavia seikkoja koekappaleen suunnittelussa ja kiinnityksessä testauslaitteeseen kuormitusta varten. Kumi ei myöskään ole lineaarielastinen vaan viskoelastinen materiaali, mikä aiheuttaa väsytystestissä hystereesikäyttäytymistä sekä lämpenemistä. Lämpeneminen vaikuttaa puolestaan kumin materiaaliominaisuuksiin, joten testissä käytetty veto/puristus-kuormitussuhde, ajotaajuus ja muut ajoon vaikuttavat parametrit ovat tuloksiin vaikuttavia tekijöitä.

Särönkasvutestissä voidaan määrittellä myös repimisenergian taso, jolla särö ei enää kasva. Tätä raja-arvoa voidaan käyttää hyödyksi arvioitaessa kumin pitkäaikaiskestävyyttä, jolloin kumin ei haluta väsyvän halutussa eliniässä. Kumin väsymiseen vaikuttaa tietysti sovelluksen käytännön olosuhteet, ja nämä olisi otettava myös huomioon

mitoituksessa ja testauksessa. Tämän tutkimuksen testit on tehty laboratorio-olosuhteissa testimenetelmkehityksen vuoksi. Testien tuloksena saatavaa materiaalitietoa voidaan käyttää mm. kumin FEM-mallin verifiointiin ja suunnitteluparametrien vertailuun.

## Pure shear -koekappale ja särönkasvutesti

Koekappale kiinnitetään testausjigiin kuvan 1 osoittamalla tavalla. Lisäksi koekappale pikselöidään optista venymämittausta varten selvemmän kontrastin muodostamiseksi.



**KUVA 1. Pure shear -koekappaleen testauskoonpano (kuva Kari Dufva)**

Pure shear -koekappaleessa koekappaleen mitoitus on tärkeää, koska koekappaleeseen halutaan saada aikaan ns. pure shear -tila. Koekappale muodostuu ohuesta ja leveästä elastomeerilevystä, jonka leveyden suhde korkeuteen on hyvä olla 10:1 tai suurempi. Testattavan materiaalin ollessa melkein kokoonpuristumatonta (Poissonin vakio 0,5) koekappaleeseen muodostuu puhdas leikkaus  $\pm 45$  asteen kulmissa vetosuuntaan nähden. Vedonalaisen koekappaleen kaikki hoikkenema pyritään saamaan aikaiseksi paksuussuunnassa. Tämä saadaan aikaiseksi estämällä vaakasuuntaiset venymät juuri koekappaleen leveys–korkeus-suhteen vaikutuksella. Koekappaleen reunojen ollessa vapaana vaakasuuntainen venymä ei ole estetty, joten siellä ei vallitse pure shear -tila. Tämän vuoksi koekappaleen alkusärö on leikkattava reunasta keskelle tarpeeksi pitkäl-

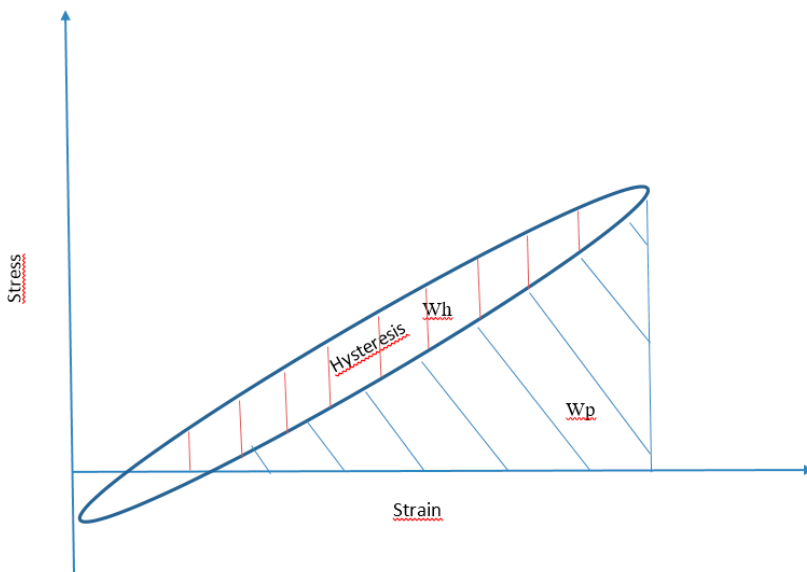
le, jotta koekappaleen reunan reunavaikutus ei vaikuta särönkärjen venymiin ja siten särönpituuden suhteen tuloksiin. Oikein suunnitellussa ja riittävällä alkusäröllä leikatussa pure shear -koekappaleessa särönpituudella ei ole vaikutusta repimisenergiaan muuten kuin nimellisjännityksen pinta-alan kautta. Tällöin repimisenergia voidaan laskea myös säröttömällä koekappaleella kaavalla (1). Tämä on tärkeä piirre testauksen kannalta, koska koekappaleen globaaleista testiparametreista (voima- ja siirtymäarvojen avulla) voidaan suoraan laskea särönkärkeen vaikuttava repimisenergia.

Säröttömällä koekappaleella määritetään ns. ”tearing energy” eli repeämisenergia  $T$  alla olevan kaavan mukaisesti.

$$T = W \cdot h_0, \quad (1)$$

missä  $W$  on koekappaleessa elastisesti varastoitunut energia tilavuusyksikköä kohden eli venymä-energiatiheys (”strain energy density”) määritettynä säröttömän koekappaleen jännitys–venymä-käyrän integraalista.  $h_0$  on koekappaleen nimelliskorkeus kuormittamattomana.

Testin aikana koekappaletta ajetaan siirtymäohjattuna eri nimellisvenymätasoilla. Venymä-energiatiheys (Strain Energy Density) määritetään väsytyskuormituksen nousu- tai paluusykleistä (kuva 2). ISO 27727 -standardin mukaan täytetyillä kumilla pitäisi käyttää paluusykleä. Stadlbauer et al. ja Feichterin mukaan venymäenergiatiheys on määritelty noususykleistä perustellen sen olevan säröä auki repivää työtä. Väsytyssykleistä käytetään laskennassa vain positiivinen eli vedonalainen osa ja puristusosa jätetään huomioimatta.



**KUVA 2. Venymäenergiatiheyden määrittäminen jännitys–venymä-käyrästä**

Venymäenergiatiheys  $W$  voidaan määrittää käyrän paluuosasta

$$W = W_p, \quad (2)$$

tai käyrän nousuosasta

$$W = W_n = W_p + W_h. \quad (3)$$

Venymä-energiatiheys venymärajoissa  $\varepsilon_0$  ja  $\varepsilon_{\max}$  on

$$W = \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_{\max}} \sigma \, d\varepsilon. \quad (4)$$

Venymä on

$$\varepsilon = \frac{ds}{s}, \quad (5)$$

ja siten venymä-energiatiheys voiman ja siirtymän kautta

$$W = \int_{s_0}^{s_{\max}} \frac{F}{A \cdot s} \, ds. \quad (6)$$

ISO 27727 -standardin mukainen koejärjestely vaatii useita säröttömiä ja säröllisiä koekappaleita eri kuormitustasoilla. Tämä on kallista ja aikaa vievää, joten kirjallisuudessa on käytetty myös robustimpia testimenetelmiä (Stadlbauer et al., Feichter). Ns. yhden koekappaleen menetelmässä särönkasvunopeus ja TE-arvot määritetään samasta koekappaleesta nousevin kuormitustasoin.

Jos merkitään  $s = h_0$  ja  $A = t \cdot (w - c)$ , tällöin repimisenergia voidaan laskea kaavasta (1)

$$T_{\max} = \frac{U}{t(w-c)}, \quad (7)$$

missä

U	koekappaleen mekaaninen kokonaisenergia
t	koekappaleen paksuus
w	koekappaleen leveys
c	särön pituus

Kokonaisenergia voidaan ilmaista

$$U = \int (F|F \geq 0) \, ds \quad (8)$$

## FE-mallinnus ja optinen venymämittaus DIC-tekniikalla

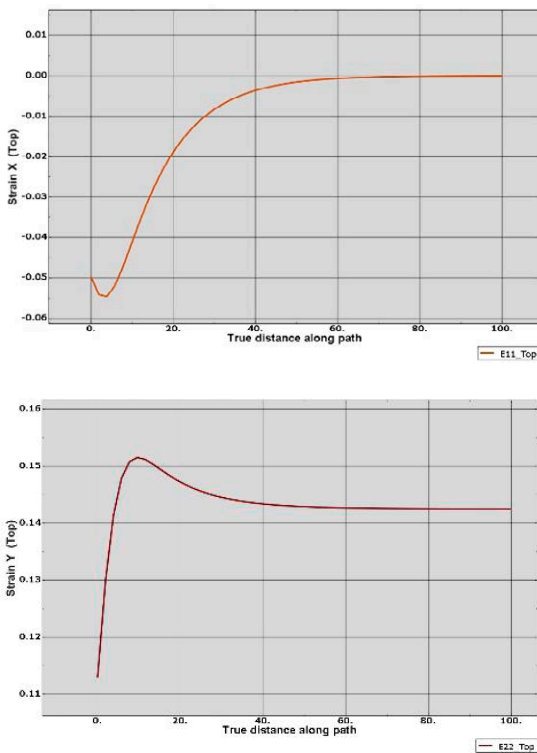
FE-mallinnuksen verifiointia varten teräslattakiinnitteisestä koekappaleesta tehtiin optisia venymämittausanalyyskejä staattisella ja väsyttävällä kuormituksella. Optisissa venymäanalyyseissä koekappaleen pintaa kuvataan kameralla levossa ("reference") sekä kuormituksen ("current") alaisena. Koekappaletta kuormitettaessa koekappaleen pin-



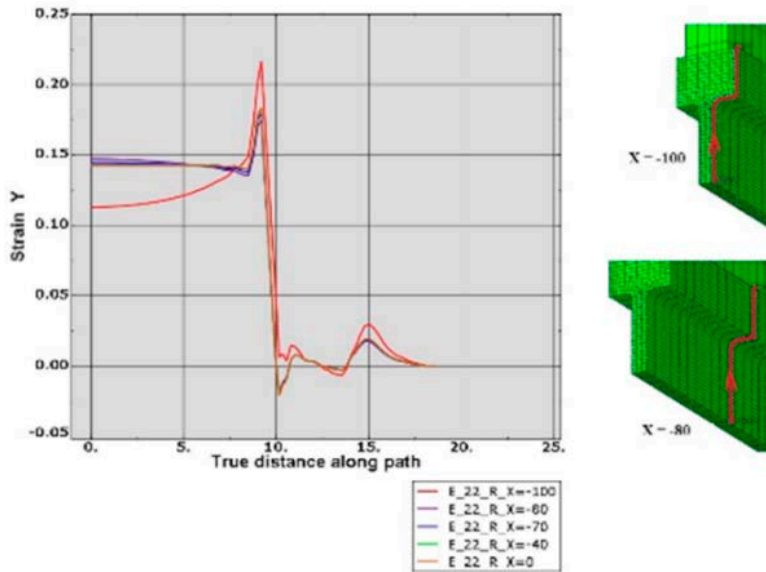




Särötöntä koekappaleita mallinnettiin FE-mallilla, jonka koekappaleita vastaavat materiaaliarvot on toimitettu asiakkaan toimesta. FE-mallinnuksella haluttiin selvittää yleisellä tasolla venymien jakautumista staattisesti vedonalaisessa koekappaleessa. Alla (kuva 4) on esitetty X- ja Y-suuntaiset (X = vetoa vastaan poikittainen, vaakasuunta; Y = vedon suunta, pystysuunta) venymät koekappaleen pinnasta keskilinjalta vedettäessä sitä 3 mm siirtymällä. Kuvassa 5 on esitetty Y-suunnan venymät pystysuuntaisia polkuja pitkin eri etäisyyksillä koekappaleen reunasta. Analyysissä on käytetty puolimallia, joten kuvaajassa on esitetty tulosvenymät keskilinjalta yläreunaan. Tulosten venymäkuvaajissa on nähtävissä reunahäiriön vaikutus, joka on suhteellisen pieni 30 mm:n päässä reunasta. Reunahäiriön vaikutus laskee edelleen siirryttäessä reunasta kesemmälle X-suunnan venymän lähestyessä nollaa ja Y-suunnan venymän ollessa 0,143. Koekappaleen korkeuden ollessa 20 mm Y-suunnan nimellinen venymä on 3 mm:n vetosiirtymällä tällöin 0,15. FE-analyysin tulosten mukaan Y-suunnan venymätaso reunahäiriön tasaannuttua on noin 0,143 ja ero nimelliseen venymään on siis noin 5 %.

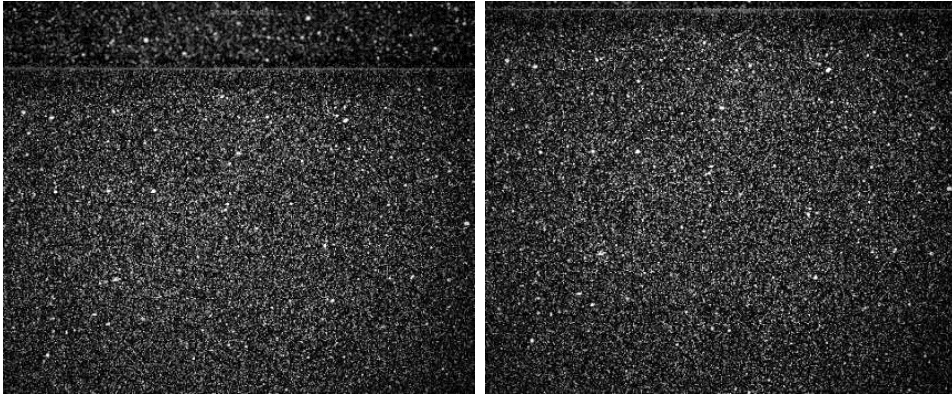


**KUVA 4. X- ja Y-suuntaiset venymät vaakasuuntaan särölinjaa pitkin koekappaleen keskikorkeudelta pintaa pitkin.**

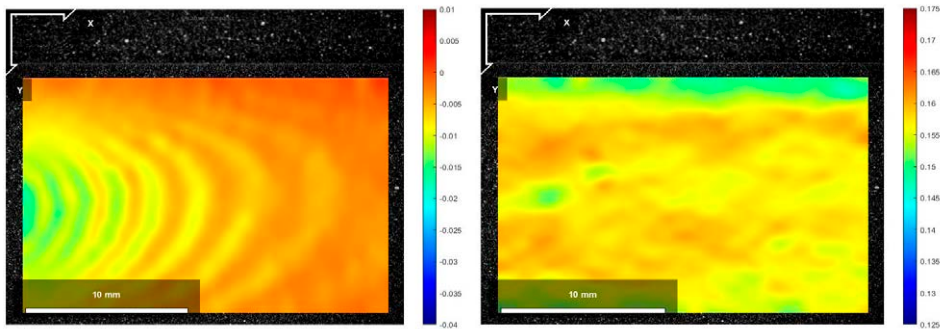


**KUVA 5.** FE-analyysin Y-suunnan venymät polkua pitkin koekappaleen reunassa ( $X = -100$ ), 20 mm reunasta ( $X = -80$ ), 30 mm reunasta ( $X = -70$ ), 60 mm reunasta ( $X = -40$ ) ja koekappaleen keskellä ( $X = 0$ ).

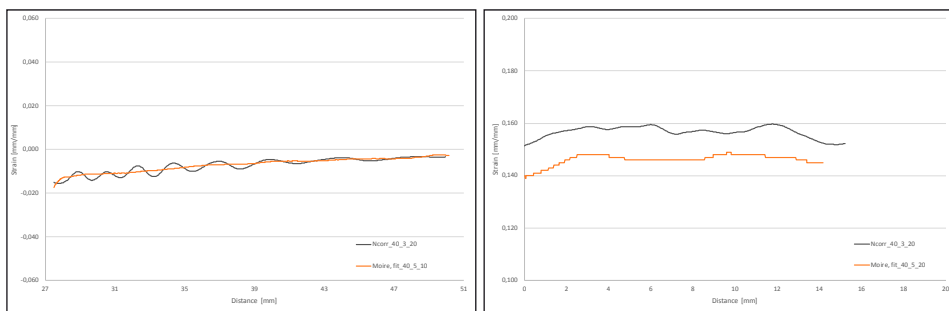
DIC-ohjelmilla tehtiin analyysi vastaavalla tavalla kuormitetusta koekappaleesta. DIC-analyysin analyysikuvat (kuva 6) ja venymätulokset on esitetty alla (kuva 7). Venymätulokset on esitetty alueelta 27 mm–51 mm koekappaleen vasemmasta reunasta. X-suunnan venymä koekappaleen keskikorkeudelta vasemmalta oikealle ja Y-suunnan venymä koekappaleen alareunasta yläreunaan noin 40 mm:n etäisyydeltä vasemmasta reunasta on esitetty venymän kuvaajissa (kuva 8) kuvassa 7 esitettyjä polkuja pitkin. X-suunnassa ohjelmat antoivat keskenään vastaavat tulokset, joskin Ncorr-ohjelmalla tuloksessa on huojuntaa. Y-suunnassa Ncorr-ohjelmalla saadaan noin 0,01 venymäyksikköä suuremmat venymäarvot kuin Moire-ohjelmalla (Ncorr 0,155–0,16 ja Moire 0,145–0,15). Tarkkaa syytä tähän ei tiedetä, mutta ero pysyy samana parametrisarvoista riippumatta. Eroavaisuuksien selvittämiseksi pitäisi syventyä ohjelmien laskennan teoriaan. Moire-ohjelmiston sivuilla ei ole kuitenkaan saatavilla tarkempaa tietoa laskennan teoriasta, joten ohjelmien laskenta-algoritmeja ei voida vertailla.



**KUVA 6. A1-analyysin pikselöidyt analysikuvat: vasemmalla ”reference” ja oikealla 3 mm:n vedolla ”current”**



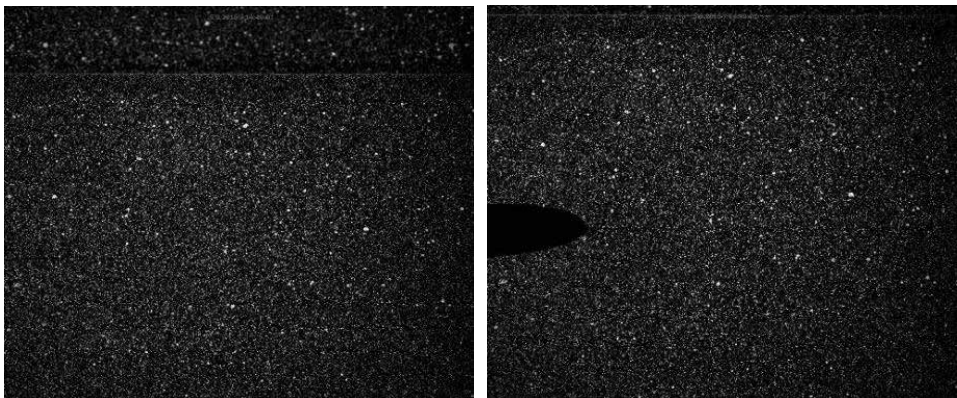
**KUVA 7. A1-analyysin X- ja Y-suunnan DIC-analyysin venymätulokset. Analyysialue vaakasuunnassa 27mm–51mm**



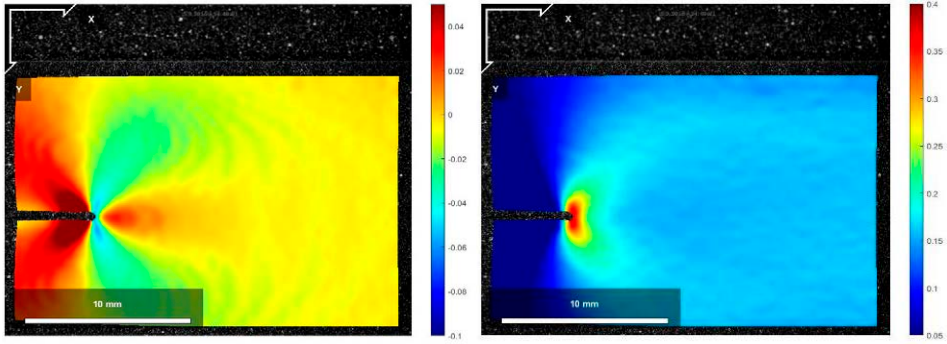
**KUVA 8. A1-analyysin X- ja Y-suunnan venymät. X-suunnan venymä koekappaleen reunan etäisyyden suhteen. Y-suunnan venymä koekappaleen alareunasta yläreunaan noin 40 mm reunasta.**

A4- ja A5-analyysit ajettiin molemmilla DIC-ohjelmilla samoilla pääparametriarvoilla. Analyysien muut parametrit eivät kaikki ole kuitenkaan vastaavia ohjelmien välillä, mutta tarkoituksena oli saada jokin käsitys ohjelmilla tehtyjen analyysien vastaavuudesta. Ohjelmien dokumentointi on Moiren osalta puutteellista ja senkin vuoksi on hankala vertailla ohjelmien laskentaa toisiinsa. Ncorr-ohjelman osalta laskennan teoriaa ja siitä tehtyjä julkaisuja on saatavilla nettisivustolla [www.ncorr.com](http://www.ncorr.com). Särönkärjen lähiympäristö suurine venymägradientteineen ja epäjatkuvuuskohtineen on jatkuvapintaista koekappaletta haasteellisempi tapaus DIC-analyysille. Ncorr-ohjelmassa on särönkärjen kaltaisille nopeille geometrisille epäjatkuvuuskohdille oma toimintonsa, jolla vältetään analyysiteknisii epälinearisuuksia aivan särönkärjessä. Moire-ohjelmassa vastaavaa toimintoa ei löydetty tai ei voitu paikallistaa puutteellisen dokumentaation vuoksi.

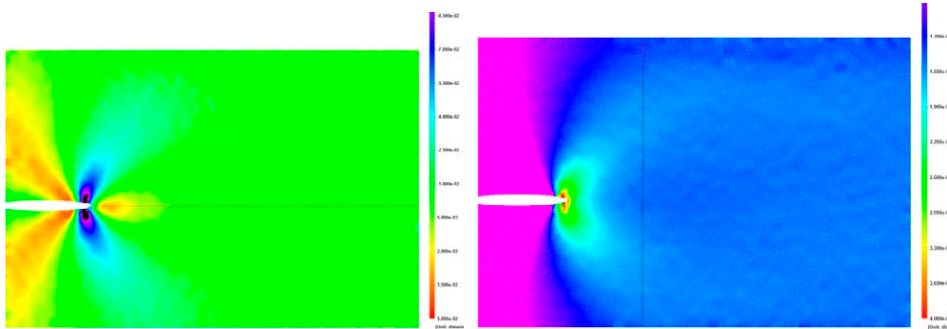
Alla on esitetty A4-analyysin analyysikuvat (kuva 9). A4-analyysissä on Ncorr-analyysin (kuva 10) lisäksi Moire-ohjelmalla lasketut X- ja Y-suunnan venymäkuvat (kuva 11), joissa on käytetty Ncorr-analyysien kanssa samoja subset-parametreja. Ncorr-tulokset ovat kuitenkin resoluutioiltaan tarkempia, koska Moire-ohjelmaan analyysikuvien resoluutio piti puolittaa, koska ohjelma ei hyväksynyt alkuperäistä kuvakokoa. A4-analyysien tulostuloksissa (kuva 12) on esitetty myös suuremmilla subset size- ja spacing-arvoilla, subset size 40 ja subset spacing 5, lasketut Moire-ohjelman tulokset. X-suunnan venymäkuvaajista nähdään, että tulokset täsmäävät keskenään erittäin hyvin. Y-suunnan venymissä puolestaan Ncorr-ohjelman tuloksissa on yleisesti ottaen noin 0,01 yksikön ero Moire-analyysihin verrattuna, kuten aikaisemmin on mainittu. Moire-ohjelman Y-suunnan venymäkuvaajasta voidaan nähdä myös epälinearisuuden vaikutus laskentaan, mikä näkyy särönkärjessä epämääräisenä hajontana.



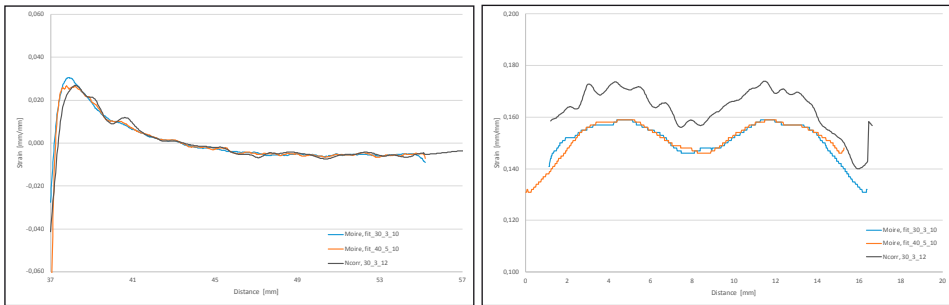
**KUVA 9. A4-analyysin pikselöidyt analyysikuvat: vasemmalla ”reference” ja oikealla 3 mm:n vedolla ”current”.**



**KUVA 10. A4-analyysin X- ja Y-suunnan venymät, Ncorr-analyysi: subset size 30; subset spacing 3; strain radius 12. Huomioi kuvien erilaiset väripaletit verrattuna Moire-analyysiin.**



**KUVA 11. A4-analyysin X- ja Y-suunnan venymät, Moire-analyysi: subset size 30; subset spacing 3; strain radius 10. Huomioi kuvien erilaiset väripaletit verrattuna Ncorr-analyysiin.**

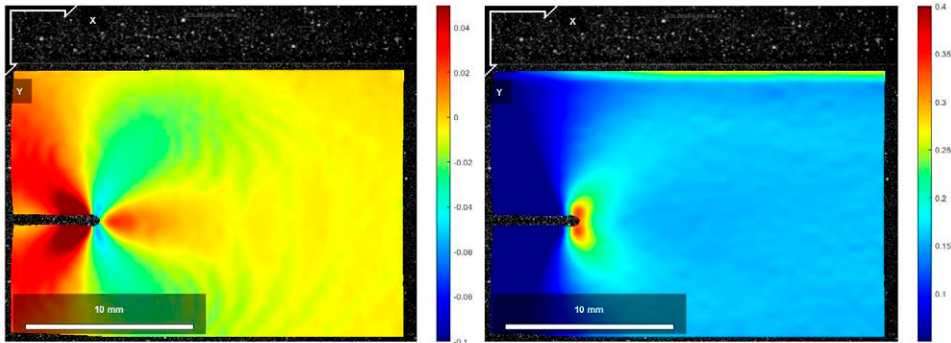


**KUVA 12. A4-analyysin X-suunnan venymät särönkärjestä oikealle ja Y-suunnan venymät alhaalta ylös noin 4 mm särön kärjestä oikealle, ks. kuva 11.**

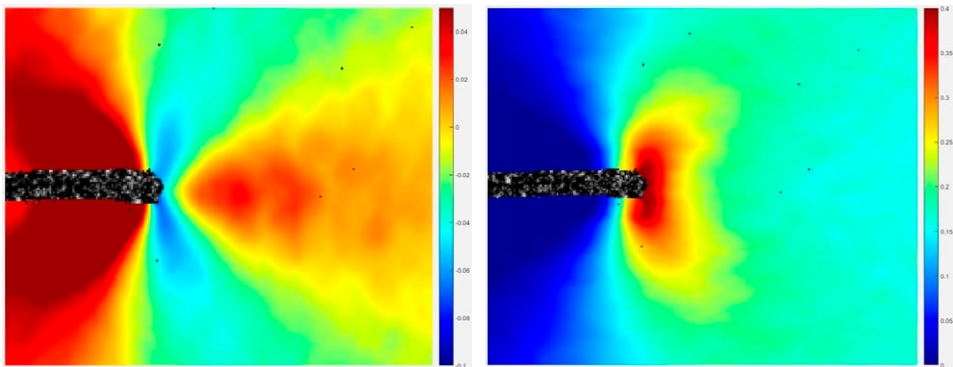
A5-analyysin tuloksissa on esitetty Ncorr-ohjelmalla lasketut X- ja Y-suunnan venymäkuvat (kuva 13), jotka on laskettu samoilla parametreilla kuin A4-analyysissä. Särönkärjestä laskettiin myös korkeampiresoluutioinen analyysi (kuva 14). Tästä näh-



dään, että Y-suunnassa särönkärjen päässä särölinjalla on suunnilleen yhtä suuri venymä kuin särönkärjen ylä- ja alapuolilla. Huonompireoluutioisen analyysin (kuva 13) mukaan särönkärjen ylä- ja alapuolilla näyttäisi olevan hieman korkeammat jännitykset. X-suunnan venymän minimiarvo on puristuksen puolella vinottain särönkärjen ylä- ja alapuolilla.

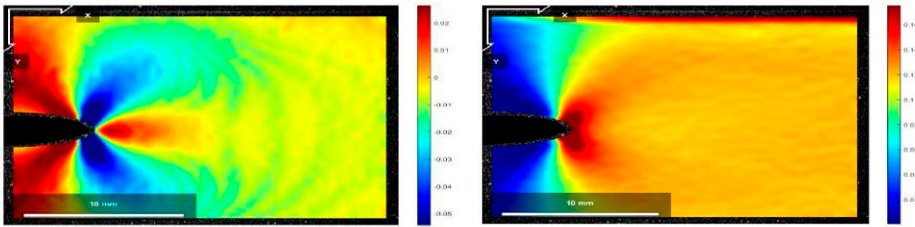


**KUVA 13. A5-analyysin X- ja Y-suunnan venymät, Ncorr-analyysi: subset size 30, subset spacing 3 strain radius 12**

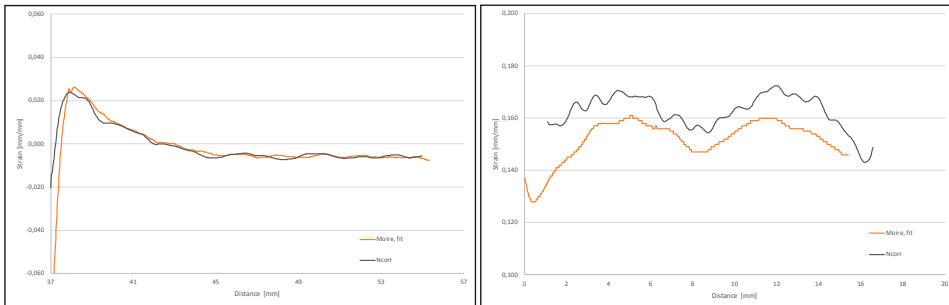


**KUVA 14. A5-analyysin X- ja Y-suunnan venymät, tarkempi Ncorr-analyysi särönkärjen läheisyydestä: subset size 12, subset spacing 2 strain radius 12**

A5-analyysin venymäkuviissa (kuva 15) on esitetty Eulerin venymät, joissa on mukana koekappaleen muodonmuutokset. Näin saadaan parempi kuva särönkärjen ympärille jakautuneista venymistä muodonmuutosten suhteen. Eulerin venymäarvot laskeaan kuormitetun koekappaleen muodonmuutosten suhteen, joten venymäarvot ovat alemmat kuin muissa tuloksissa esitettyissä Lagrangen venymissä. Lopuksi sekä Ncorr- että Moire-analyysien (venymäkuviia ei esitetty) venymäkuvaajista (kuva 16) nähdään venymien olevan samansuuruiset A4-analyysin väsytyksen alaisiin venymäarvoihin nähden.



**KUVA 15. A5-analyysin X- ja Y-suunnan Eulerin venymät, Ncorr-analyysi: subset size 30, subset spacing 3 strain radius 12**



**KUVA 16. A5-analyysin X-suunnan venymät särönkärjestä oikealle ja Y-suunnan venymät alhaalta ylös noin 4 mm särön kärjestä oikealle**

Väsytyksen A4-analyysin tulokset ovat analyysitarkkuuden puitteissa suunnilleen yhtenevät staattisen A5-analyysin tuloksiin nähden. Tämä ei ota kuitenkaan kantaa väsytyksen ja staattisen ”reference”-venymätasojen eroihin. Tutkimuksen aikana laajemmista analyyseissä saatujen tulosten mukaan väsytyksen ja staattisten testien ”reference”-tasot eivät kuitenkaan poikenneet toisistaan vedon suunnan venymässä kuin enintään 0,005 yksikön verran. Näin ollen kumin viskoelastinen materiaaliominaisuus ei näytä aiheuttavan merkittäviä poikkeamia X- ja Y-suunnan venymissä väsytyksen aikana. Viskoelastisuus näkyy toki hystereesikäyttäytymisenä sekä puristuksena jännitys–venymä-käyrässä (kuva 2).

Alla (taulukko 1) on koottu yhteen optisten venymäanalyysien tuloksia. Y-suunnan venymätuloksissa on erotettavissa keskellä hieman alempia venymäarvoja kuin ylä- ja alapuolilla. X-suunnan venymät laskevat nopeasti ja ovat nollassa noin 4 mm:n päässä särönkärjestä ja pysyvät melkein nollassa myös kauempana. Tällöin koekappaleessa vallitsee särön reunahäiriötä lukuun ottamatta tasovenymätila, jolloin kaikki koekappaleen ohennus tapahtuu paksuuden suunnassa. Koekappaleessa vallitsee reunahäiriötä lukuun ottamatta pure shear -tila, jossa on nimensä mukaisesti puhdas leikkaus  $\pm 45$  asteen kulmassa vetosuuntaan nähden. Tässä on etuna, että kaikilla särönpituuk-

silla venymätilat käyttäytyvät samalla tavalla, kunhan särönkärki on tarpeeksi kaukana koekappaleen reunasta. Säröllisissä analyyseissä Y-suunnan venymiä tarkasteltiin noin 4 mm:n etäisyydeltä särön kärjestä. Y-suunnan jännitysten jakautumisessa pystysuunnan venymälinjalla on havaittavissa korkeampia venymiä keskikohdan ylä- ja alapuolilla. Y-suunnan venymäkuvista nähdään, että särö aiheuttaa korkeammat venymävyöhykkeet särönkärjestä vinottain keskilinjan ylä- ja alapuolille. Nämä venymävyöhykkeet taittuvat kauempana säröstä vaakasuuntaan. Vastaavasti X-suunnan venymissä on samoilla alueilla alemmat venymäarvot ja särön lähellä jopa puristumaa. Ylä- ja alapuolien venymävyöhykkeiden erot voivat olla osasyynä myös särön taipumukselle haarautua. Tähän ei kuitenkaan saada näillä analyyseillä kattavaa vastausta, koska tehdyillä analyyseillä ei voida analysoida lokaaleja venymiä lähellä särön kärkeä. Kauempana särön kärjestä venymätasot ovat vastaavia säröttömän koekappaleen kanssa ja lähellä nimellisvenymätasoa.

**TAULUKKO 1. KSK003\_10-koekappaleen optisten venymämittaustestien tiedot**

Analyysi	Ajo Staat/ Dyn	Särö [mm]	Koekappaleen lämpötila*	Kuvanro. min/ max	Y-suunnan venymä* Moire	Y-suunnan venymä* Ncorr
A1	staattinen 3 mm	ei säröä	huoneenlämpöinen	3/4	0,146–0,149	0,156–0,158
A4	väsytys 3 mm	37	lämmin, noin 55 °C	879/878	0,146–0,159	0,157–0,173
A5	staattinen 3 mm, väsytyksen jälkeen	37	lämmin, alle 55 °C	881/882	0,147–0,161	0,155–0,172

\*) Säröllisissä tapauksissa venymä on otettu venymälinjalta noin 4 mm särön kärjestä

## Yhteenveto

Optisia venymämittauksia analysoitiin Moiren ja Ncorrin DIC-analyysiohjelmilla. Analyyseissä keskityttiin 3 mm:n vetosiirtymää vastaavan venymän (nimellisvenymä 0,15) analyyseihin, koska särönkasvutesteissä sillä venymätasolla alkaa selkeämpi ja nopeampi särönkasvu. Säröttömän koekappaleen venymiä analysoitiin DIC-analyysin lisäksi FE-mallinnuksella. Optisen venymäanalyysin tulokset ovat hyvin yhtenevät FE-analyysin tulosten kanssa. Säröllisestä tapauksesta ei tehty FE-analyysiä. Optisen venymäanalyysin mukaan särölinjalla koekappaleen keskikorkeudella vetosuuntaiset venymät ovat lähellä nimellistä arvoa lukuun ottamatta reunahäiriöiden ja särönkär-



jen vaikutusalueita. Säröttömässä koekappaleessa vetosuunnan suuntaisessa venymäjakaumassa (Y-suunta) keskikorkeuden ylä- ja alapuolella on erotettavissa hieman korkeammat venymävyöhykkeet, mutta ero on hyvin vähäinen. Sen sijaan säröllisessä koekappaleessa särö aiheuttaa särönkärkeen paikallisesti korkean vetosuunnan venymätason ja sen lisäksi keskilinjaa korkeammat venymätasot särölinjan ylä- ja alapuolelle. Väsytyksen aikaisista tuloksista nähdään, että väsytyksen aikana venymäamplituditaso on samansuuruinen kuin staattisen vedon aikana.

DIC-analyysien perusteella särön aiheuttama reunahäiriö X-suunnassa särölinjalla vaimenee 4 mm:n päässä särönkärjestä lähelle nollatasoa ja pysyy siinä edettäessä pois päin särönkärjestä keskemälle päin. Pure shear -venymätilassa X-suunnan venymän kuuluu olla nollatasossa, ja siten koekappaleessa täyttyy pure shear -tila. Y-suunnan venymät ovat reunahäiriöttömällä alueella kohtuullisen lähellä nimellisvenymää.

Molemmat analyysiohjelmat antoivat yhteneviä tuloksia X-suunnan venymissä, mutta Y-suunnassa ohjelmien antamien venymien välillä oli eroa noin 0,01 venymäyksikköä. Selkeää syytä tähän ei löydetty, ja ero pysyy suunnilleen samalla tasolla analyysiparametreista riippumatta. Tulosten venymäjakaumat ovat kuitenkin yhteneväiset ohjelmasta riippumatta. Näin ollen venymäeron syy viittaa laskenta-algoritmeihin.

## Lähteet

Feichter C. Ph.D. Thesis, University of Leoben; 2006

Flamm M., Spreckels J., Steinweger T., Weltin U., Effects of very high loads on fatigue life of NR elastomer materials, International Journal of Fatigue, Volume 33, Issue 9, September 2011, Pages 1189–1198, ISSN 0142-1123

Halladay J.R., Hedhund C.R., Impact of age stiffening on fatigue crack growth in natural rubber and polybutadiene, Rubber World, November 2014.

Halladay J.R., Krakowski F.J., Fatigue crack propagation testing in rubber. Rubber and Plastics News. August 10, 2009.

Mars W.V., Fatemi A, Fatigue crack nucleation and growth in filled natural rubber, J. Fatigue Frac. of Eng. Mat. Struct., Vol. 26, 2003, pp. 779–789

Stadlbauer F, Koch T., Planitzer F., Fidi W., Archodoulaki V., Setup for evaluation of fatigue crack growth in rubber: Pure shear sample geometries tested in tension-compression mode, Polymer Testing, Volume 32, Issue 6, September 2013, Pages 1045-1051, ISSN 0142-9418, <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2013.06.003>.

Radek Stoček, Gert Heinrich, Michael Gehde, Final Report of analysis of crack propagation in rubber. 2012.

Rublon, P., Huneau, B., Verron, E., Saintier, N., Beurrot, S., Leygue, A., Mocuta, C., Thiaudière, D., Berghezan, D., Multiaxial deformation and strain-induced crystallization around a fatigue crack in natural rubber, *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 123, June 2014, Pages 59–69.



# CFD SIMULATIONS WITH THE AIR AND TRACER GAS CO<sub>2</sub>

*Srujal Shah & Kari Dufva*

Computational fluid dynamics (CFD) is a powerful tool routinely used to predict the performance of ventilation systems by studying air flow, heat transfer, and contaminants transport. This work adopts CFD techniques to analyze the air flow in a ventilated test room where a kitchen hood is installed. CO<sub>2</sub> is used as a tracer gas and its mixing with the air is studied. Different air flow rates have been used to study the distribution of the tracer gas in the room. CFD results are compared with the experimental measurements of the CO<sub>2</sub> concentrations at different locations in the room. With higher air flow rates, the distribution of the tracer gas is not uniform and most of the CO<sub>2</sub> is concentrated near the hood. With the lower air flow rates, distribution of CO<sub>2</sub> is quite uniform throughout the room. These types of CFD simulations help to study the concentrations of different pollutant gases emitted cooking activities and the efficiency of the kitchen hood can be analyzed.

## Introduction

Energy consumption is increasing due to the rising population, expanding economy, and in the quest for improved quality of life. These factors tend to increase the energy demands, which leads to more greenhouse gas emissions resulting in serious impacts on the global environment (Harish and Kumar 2016). The building sector represents a large fraction of total energy consumption. In the US and Europe, more than 40% of the total energy is consumed by buildings (Cao et al. 2016). Thus, there is a need for reducing the energy consumption of buildings and improving energy efficiency, and, in fact, European regulations have already set rules for all new buildings by the end of 2020 to be nearly zero-energy buildings. This challenges building engineers to develop better designs, constructions, and operations, while maintaining thermal comfort and acceptable indoor air quality.

Among all the building services, heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems play an important role in the energy use of buildings. In HVAC, proper ventilation is very important because it helps in controlling the indoor air quality (IAQ) by replacing stale indoor air with fresh outdoor air. Chenari et al. (2016) discuss steps by which sustainable, energy-efficient, and healthy ventilation strategies can be applied. Proper design and optimization of indoor air flow systems is not only necessary from an engineering point of view, but also has an impact on health, as we tend to spend most of our time indoors. Several tools are used to predict ventilation perfor-

mance in buildings, such as analytical models, empirical models, small-scale experimental models, full-scale experimental models, multi-zone network models, zonal models, and CFD models, as described in the works (Chen 2009, Chen et al. 2010).

Due to advancements in high-performance computing facilities, computational simulations are gaining popularity. Nowadays, industries routinely use CFD as a tool in the design, development, analysis, and understanding of various systems, such as in ventilated spaces. The increase in computational resources and development of powerful software have led researchers and engineers to obtain accurate analysis of air movement, which is often not possible with expensive measurements. Indoor air flow modelling has been possible using CFD, which not only predicts fluid dynamics but also estimates its quality and thermal comfort. CFD is an important means in the studies of ventilation systems, and many such papers can be found in the literature (Chen 2009, Li and Nielsen 2011, Nielsen 2004 2015).

In this work, the air flow in a test room with CO<sub>2</sub> as a tracer gas has been studied with CFD techniques using ANSYS<sup>®</sup>, Release 16. Many CFD simulations were performed to analyze the effects of tracer gas distribution in the test room on the different air flow rates from the supply air inlets. The heat source was also kept to take temperature into account. The experimental measurements of CO<sub>2</sub> have been done at different locations to verify CFD results. Comparison between experimental and CFD results show that computer simulations have great potential in studying air flows in ventilated spaces.

## Theoretical background

Computational fluid dynamics refers to the analysis of systems involving fluid flow, heat transfer, and phenomena such as chemical reactions using computer-based simulation (Versteeg and Malalasekera 1995). A CFD simulation involves three major steps: pre-processing, solution of the flow equations, and post-processing. Pre-processing describes creation of the flow domain using geometry construction software, discretizing it into a number of grid points (mesh generation), and defining the model, fluid properties, and boundary conditions. The next step is solution of the flow equations. This step involves discretization of the differential equations around each grid point to obtain the algebraic equations of the flow variables, which is solved using the iterative procedure. Post-processing describes the visualization of the flow variables once the solution is converged.

CFD simulation generally consists of the solution of the flow equations for the conservation of mass, momentum (Navier-Stokes equations), energy, and turbulence quantities. The local turbulence is expressed as a variable called turbulent viscosity, which is often calculated from two additional transport equations. In situations where there is a need to analyze the concentrations of different components in a mixture, a separate equation of species transport is solved.

## Geometry for CFD simulations

The computational domain used in this work is based on the dimensions of the actual test room located at Mikkeli University of Applied Sciences. The length of the room is 6.2 m, height 2.8 m, and width 2.75 m. A kitchen hood designed and constructed by Jeven Oy is installed in the room. Figure 1 shows the test room with the hood installed. There are two supply air inlets and two air outlets installed in the hood. During the experimental measurements, a table of nearly the same dimensions as commonly available stoves was kept below the hood. An induction cooker was used as a heat source and was kept above the table, on which water was boiled in a stainless steel vessel. The source of the tracer gas  $\text{CO}_2$  was kept very near to the vessel. The room has one door and three windows which were kept closed during the measurements. The geometry of the test room was prepared using ANSYS® DesignModeler. The mesh for the geometry was prepared using ANSYS® Meshing, consisting of tetrahedral elements. The number of cell volumes were about 3.7 million.



**FIGURE 1.** The test room located in the A-building of Mikkeli University of Applied Sciences (figure: Srujal Shah)

## CFD model

The CFD model in this work is comprised of a three-dimensional, steady, incompressible Navier-Stokes equations with a two-equation turbulence model. The temperature distribution in the domain is computed simultaneously using the energy equation. Since we need to analyze the distribution of the tracer gas mixed in the air, the species transport equation is also solved. The governing equations used in this work are given below.

The air flow in a ventilated room is often turbulent. Turbulence in the flow is characterized by eddies of varying length and time scales. The direct numerical simulations to capture the smallest eddies are impossible due to the need for very large memory requirements. To remedy this problem, the Reynolds averaging is performed over the Navier-Stokes equations, which leads to the additional terms in the averaged equations which must be modelled. This is done by defining the flow variables of the instantaneous equations as the sum of mean and fluctuating components. For example, the velocity components,  $i = 1,2,3$  representing coordinate directions, can be written as  $u_i = \bar{u}_i + u'_i$ .

The fluctuations are defined in such a way that their time average equals zero. By substituting these values to the Navier-Stokes equations for an incompressible flow (and dropping the overbar for the mean components), we get the equations for the steady state as follows:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) + \rho g_i, \quad (2)$$

where  $\rho$  is the density,  $p$  is the pressure,  $\mu$  is the molecular viscosity, and  $g$  is the gravity. To close these equations, the Reynolds stresses,  $(-\rho \overline{u'_i u'_j})$ , must be modelled. One of the most common methods is the use of Boussinesq hypothesis as given by

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \kappa \delta_{ij}, \quad (3)$$

where  $\mu_t$  is the turbulent viscosity,  $\delta_{ij}$  is the Kronecker delta, and  $\kappa$  is the turbulent kinetic energy. There are several models available in the literature to model the turbulent viscosity, such as the one-equation Spalart-Allmaras model, and two-equations  $\kappa - \epsilon$  models and  $\kappa - \omega$  models. An alternative approach is to solve the transport equation for each of the terms in Reynolds stress as in the Reynolds stress model. A detailed description of these models can be found in the ANSYS® Fluent theory guide (ANSYS, 2014).

There are several works available in the literature which have used and compared different turbulence models in air flow simulations (Kuznik et al. 2007, Shen et al. 2012, Stamou and Katsiris 2006). Different works revealed that there is no one particular set of turbulence models which can generally be used. However, it is of great interest to test the effect of different turbulence models for the problem at hand. It should be noted that a comparison of different turbulence models for this study was not within the scope of this work. In this work we used the SST turbulence model, the details of which can be found in the ANSYS® Fluent theory guide (ANSYS 2014).

The energy equation is given by the following form

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} - \sum_i h_i \vec{j}_i \right), \quad (4)$$

where  $k_{eff}$  is the effective conductivity ( $k_{eff} = k + k_t$ , where  $k_t$  is the thermal conductivity and  $k_t$  is the turbulent thermal conductivity, given as  $\frac{c_p \mu_t}{Pr_t}$ , where  $Pr_t$  is the turbulent Prandtl number with value 0.85), and  $\vec{j}_i$  is the diffusion flux of species  $i$ . For incompressible flows,  $h = \sum_i Y_i h_i$ .  $Y_i$  is the mass fraction of species  $i$  and  $h_i = \int_{T_{ref}}^T c_{p,i} dT$ , where  $T_{ref}$  is a temperature of 298.15 K and  $c_{p,i}$  is the specific heat of species  $i$ .

## Modelling technique for gas components

The species transport equations are used when there is a need to model components in a mixture. In this study, CO<sub>2</sub> is a tracer gas which mixes with the air. The air used in this work consisted of four species: oxygen (O<sub>2</sub>), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), Nitrogen (N<sub>2</sub>), and water vapour (H<sub>2</sub>O). The conservation equation for the species transport is given as

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j Y_i) = - \frac{\partial}{\partial x_j} \vec{J}_i, \quad (5)$$

where the mass diffusion term is given by  $\vec{J}_i = - \left( \rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_i$ , and where  $Sc_t$  is the turbulent Schmidt number. Its value used in this work is 0.7. The  $D_{i,m}$  is the mass diffusion coefficient for the  $i^{th}$  species in the mixture, which is specified in this study as a constant value of 2.88e-05. An equation of this form is solved for  $N - 1$  species, where  $N$  is the total number of fluid phase chemical species. The  $N^{th}$  species mass fraction is determined as one minus the sum of the  $N - 1$  solved mass fractions.



## Modelling of the fluid properties

In the above sections, different equations contain terms which need to be modelled. The fluid properties are described here. The density is modelled as the incompressible ideal gas law, which is given as

$$\rho = \frac{p_{op}}{RT \sum_i \frac{Y_i}{M_{w,i}}}, \quad (6)$$

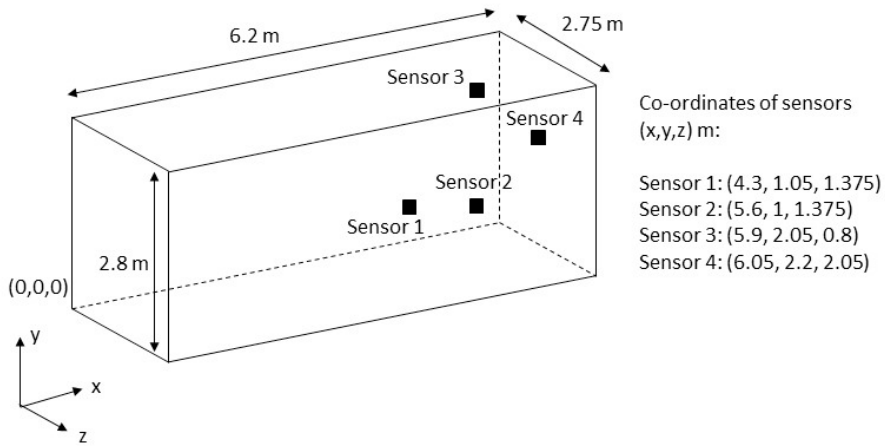
where  $R$  is the universal gas constant,  $M_{w,i}$  is the molecular weight of species  $i$ , and  $p_{op}$  is the operating pressure which is given as the value of 288.16 K. The value of the specific heat capacity is defined using the mixing-law, which is given as  $c_p = \sum_i Y_i c_{p,i}$ , where  $c_{p,i}$  is the specific heat capacity of each of the species components modelled by the piecewise-polynomial equation as a function of temperature.

The thermal conductivity is calculated using the mass-weighted-mixing-law, which is computed based on a simple mass fraction average of the pure species conductivities as  $k = \sum_i Y_i k_i$ , where  $k_i$  is the thermal conductivities of species  $i$ . In a similar way, the viscosity is calculated using the mass-weighted-mixing-law, which is computed based on a simple mass fraction average of the pure species viscosities as  $\mu = \sum_i Y_i \mu_i$ , where  $\mu_i$  is the viscosities of species  $i$ .

## Setup for laboratory measurements

Measurements with air flow and  $\text{CO}_2$  as a tracer gas were conducted. Water was boiled in a pan using a Jeven's inductor cooking device. The source of the  $\text{CO}_2$  was kept next to the water boiling vessel. The temperature of the inlet air flow was about 293 K. During the beginning of the measurements, the  $\text{CO}_2$  concentration inside the room was about 428 ppm. The flow rate of the inlet air was about 0.3  $\text{m}^3/\text{s}$  (300 l/s).

Four sensors were kept in the test room for measuring  $\text{CO}_2$  distributions at different places in the room. Two of the sensors were Rotronic CP11 and the other two sensors were IAQ-Calc. The locations of these sensors are shown in Figure 2. The values were recorded for about 30 min. of time.



**FIGURE 2. Locations of sensors for measuring CO<sub>2</sub> (in ppm) in the test room**

## Simulation case with the air and CO<sub>2</sub>

CFD simulations in this work were conducted using ANSYS® Fluent. After the mesh being imported to ANSYS® Fluent, and after selecting the CFD models as described above, the general solution methods were set. The phase coupled SIMPLE algorithm was used for pressure-velocity coupling. Standard for pressure and second order up-wind for momentum, turbulence equations, energy equation, and species variables equations were set as the discretization schemes. The limits for residuals for all the equations was set as 1e-03 and for the energy equation as 1e-06. The under-relaxation factors were set as the default. The boundary conditions for the CFD simulations were given as in Table 1.

**TABLE 1. Boundary conditions for the CFD model**

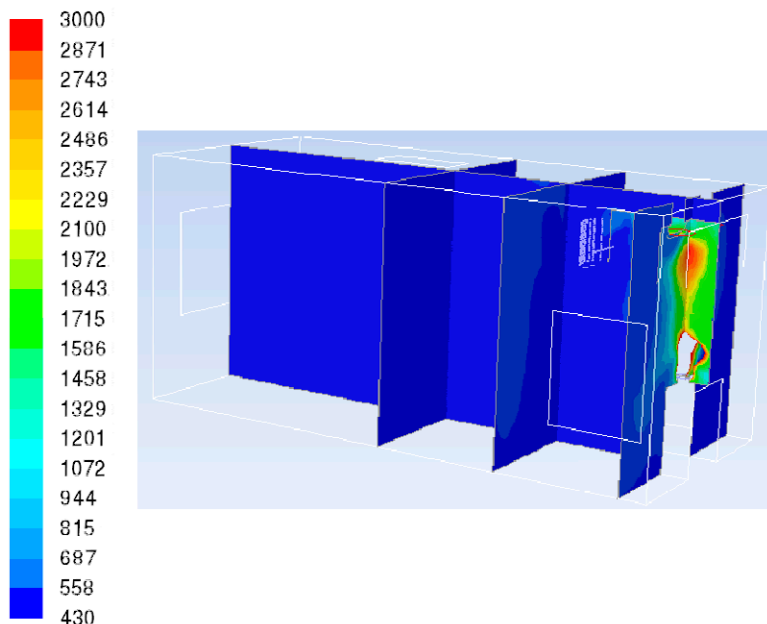
Parts of the domain	Boundary conditions
Supply air inlets located in the hood	velocity inlet
Supply air outlets located in the hood	pressure-outlet
Door and windows	wall
Walls of the test room, table and hood	wall
Heat source	velocity-inlet

The air enters the room through the two supply air inlets located in the hood. The volumetric air flow rate is 0.148 m<sup>3</sup>/s for the left side inlet and 0.152 m<sup>3</sup>/s for the right side inlet. This makes a total of 300 l/s. There are several air nozzles in each inlet through which the air enters. The air velocity can thus be calculated based on the area of the nozzles. The temperature of the heat source was kept as 373 K. As mentioned earlier, the air was modelled as a mixture of four species: oxygen, carbon dioxide, nitrogen, and water vapour. The boundary conditions of the species concentrations as used in the model are given in Table 2.

**TABLE 2. Mole fractions of the species components in the model [%]**

Source	O2	CO2	N2	H2O
Supply air inlets	20.9	0.043	79.057	0
Heat source	0	20	0	80

To predict the effect of the air flow rates, different air flow rates have been used in the CFD simulations, such as 150 l/s, 75 l/s, and 37.5 l/s, thus making a total of 4 cases. All the other settings as above remained the same. Only the amount of air flow rate has been changed. The experimental measurements with the lower air flow rates were not performed. The comparison of CFD-predicted values and experimental measurements of lower air flow rates results is within the scope of further research work.

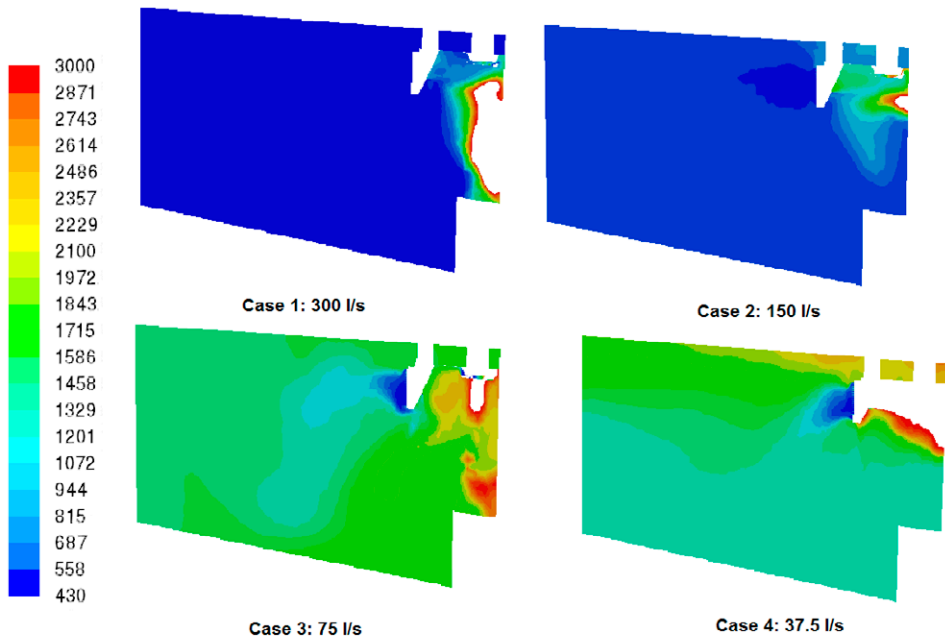


**FIGURE 3. Two-dimensional contours of carbon dioxide concentrations (ppm) for the case of 300 l/s**

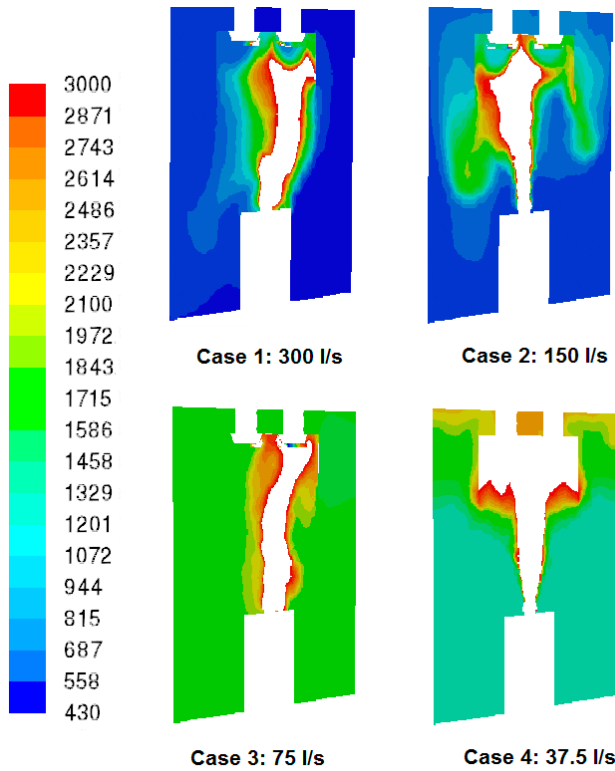
Figure 3 shows the cross-sectional contours of carbon dioxide concentrations (in ppm) for the case of 300 l/s. It can be clearly seen from Figure 3 that with the higher air flow rate as of 300 l/s, the distribution of the tracer gas is not uniform and most of the tracer gas is accumulated between the region of the stove and the hood. Its dissipation in the room is not significant. It is of interest to see the concentration of the carbon dioxide for different air flow rates.

Figure 4 shows the carbon dioxide concentrations for different cases of the air flow rates. It can be seen from Figure 4 that the air flow rate has great effect on the carbon dioxide concentrations. For higher air flow rates, the carbon dioxide gets accumulated at one place above the heat source and below the hood. With a slightly lower air flow rate, little dispersion of the tracer gas can be seen. For still lower air flow rate, the dispersion is maximal and throughout the room. For the lowest air flow rate, the maximum concentrations can be seen on the upper part of the hood and also in the upper part of the room.

In a similar manner, Figure 5 shows the cross-sectional contours of carbon dioxide concentrations for all four cases at a different plane. The contours are taken in the YZ-plane at a distance of  $x=5.9$  m. The same conclusions can be made when a different cross-sectional view is seen, as in Figure 4. The air flow rates have a great effect on the carbon dioxide concentrations in the room.



**FIGURE 4. Contours of carbon dioxide concentrations (ppm) in the XY-plane at the distance of  $z = 1.02$  m**



**FIGURE 5. Contours of carbon dioxide concentrations (ppm) in the YZ-plane at a distance of  $x = 5.9$  m**

## Comparison of CFD results with experimental measurements

It is always beneficial and interesting to compare the results predicted using the CFD models with the experimental measurements. In this study, four different sensors were used to measure the concentrations of carbon dioxide in the room. Table 3 compares the measured and CFD-predicted values of carbon dioxide. The measurement values match well with the CFD results. At one location, the measurements did not match very well with CFD results. This could be due to several reasons, such as error due to experimental measurements, as well as in the use of CFD models or in the solution of the flow equations.

**TABLE 3. Comparison of measured and CFD values of carbon dioxide**

	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
Measured value of CO <sub>2</sub>	438 ppm	440 ppm	371 ppm	536 ppm
CFD-predicted values of CO <sub>2</sub>	446 ppm	443 ppm	530 ppm	532 ppm

## Conclusions

This work presents the CFD calculations of air flow in a test room. A kitchen hood is installed in the test room. The main aim of the work was to study the mixing of the air coming from the supply inlets with the carbon dioxide which was used as the tracer gas. Different cases of three-dimensional, steady state, incompressible Navier-Stokes equations with SST turbulence model were simulated using ANSYS® Fluent. Energy transport and species transport equations were also solved.

Experimental measurements were performed using four sensors to compare the concentrations of carbon dioxide at different places in the test room. CFD results show good agreement with experimental values. At one sensor location, the predictions were not very good. This may be due to inaccuracy while performing the measurements. It should be noted that one set of measurement values are not enough, and there is a need to conduct more measurements to check the accuracy of the method.

Further research is needed in this field to conduct measurements with lower values of air flow rates and compare them with CFD results. It is also worth mentioning that CFD can be used further to improve the energy efficiency of the total system by using a correlation between the air flow rates and heat source to the outlet efficiency of the hood.

## References

ANSYS, Inc. (2014). *ANSYS® Fluent, Release 16.0, Theory Guide*, ANSYS, Inc.

Cao, X., Dai, X. and Liu, J. (2016). Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. *Energy and Buildings*, 128, pp. 198–213.

Chen, Q. (2009). Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. *Building and Environment*, 44, pp. 848–858.

Chen, Q., Lee, K., Mazumdar, S., Poussou, S., Wang, L., Wang, M. and Zhang, Z. (2010). Ventilation performance prediction for buildings: Model assessment. *Building and Environment*, 45, pp. 295–303.

Chenari, B., Carrilho, J.D. and da Silva, M.G. (2016). Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, pp. 1426–1447.

Harish, V.S.K.V. and Kumar, A. (2016). A review on modeling and simulation of building energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, pp. 1272–1292.

- Kuznik, F. Rusaouën, G. and Brau, J. (2007). Experimental and numerical study of a full scale ventilated enclosure: Comparison of four two equations closure turbulence models. *Building and Environment*, 42, pp. 1043–1053.
- Li, Y. and Nielsen, P.V. (2011). Commemorating 20 years of indoor air: CFD and ventilation research, *Indoor Air*, 21, pp. 442–453.
- Nielsen, P.V. (2004). Computational fluid dynamics and room air movement. *Indoor Air*, 14 (Supplement 7), pp. 134–143.
- Nielsen, P.V. (2015). Fifty years of CFD for room air distribution. *Building and Environment*, 91, pp. 78–90.
- Shen, X., Zhang, G. and Bjerg, B. (2012). Comparison of different methods for estimating ventilation rates through wind driven ventilated buildings. *Energy and Buildings*, 54, pp. 297–306.
- Stamou, A. and Katsiris, I. (2006). Verification of a CFD model for indoor airflow and heat transfer. *Building and Environment*, 41, pp. 1171–1181.
- Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. (1995). *An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Harlow: Longman.

# SIMULOINNIN HYÖDYNTÄMINEN VAATIVIEN KOHTEIDEN ENERGIATEHOKKUUDEN KEHITTÄMISESSÄ

*Ville Kakkonen & Erja Tuliniemi*

Kyamkissa käynnistyi vuoden 2015 lokakuussa kolmevuotinen Ecool-hanke, joka toteutetaan pääasiassa Kyamkin Ympäristöystävällinen energiantuotanto ja sen hyödyntäminen -painoalan alla. Mikkelin ammattikorkeakoulu toimii hankkeen osatoteuttajana. Ecool-hankkeessa luodaan toimintamalli ja -ohjeistus vaativien erityiskohteiden energiatehokkuuden kehittämiseksi ja uusiutuvan energian käytön edistämiseksi. Toimintamallin perustana ovat energiankäytön nykytilan selvitykset sekä niiden perusteella tehdyt toimenpiteet energiankäytön vähentämiseksi. Tuloksena saatava toimintamalli on hyödynnettävissä ja laajennettavissa muiden erityiskohteiden energiatehokkaiden ratkaisujen selvittämisessä.

Ecool-hankepari koostuu Ecool-kehittämishankkeesta ja Ecool-investointihankkeesta. Investointihankkeessa investoidaan mittalaitteisiin, joita tarvitaan Ecool-hankkeen toteutuksessa. Hankeparin päärahoittajana toimii Uudenmaan liitto ja Euroopan aluekehitysrahasto (EAKR). Lisäksi hanketta ovat rahoittamassa Kymijoen ravintopalvelut, Maretarium, Kotka-Kymin seurakuntayhtymä, VR-yhtymä, Virolahden kunta ja Mikkelin tuomiokirkkoseurakunta.

## Hankkeen tavoitteet

Hankkeessa on mukana yhteensä 13 kohdetta, joihin kaikkiin tehdään energiankäytön nykytilan selvitys. Energiankäytön nykytilan selvityksestä saadaan selville kohteen tärkeimmät energiankulutuksen aiheuttajat energialajeittain. Lisäksi selvitykset sisältävät energiankulutusjakauman kartoituksen sekä energiankäyttökohteiden mittaus- ja seurantasuunnitelman, jonka pohjalta suoritetaan mittaukset sekä analysoidaan mittaustulokset ja vertaillaan laitteiden nominaaliarvoihin. Energiankulutuksen seurantaan käytetään kohteiden omia mittaus- ja valvontajärjestelmiä. Lisäksi hankkeelle hankittavalla mittalaitteistolla voidaan tarvittaessa laajentaa mittausdatan kattavuutta.

Selvityksessä huomioidaan myös energiakatselmusohjeistuksen mukaiset säästöpotentiaalit sekä investointien takaisinmaksuajat. Valittujen muutosten teon jälkeen hankkeessa seurataan energiakatselmuksessa ehdotettujen toteutuneiden muutosten



vaikutusta. Energiakatselmuksissa havaittuja huomioita syvennetään tutkimalla mahdollisuuksia muun muassa koko kohteen säätö- ja parannusmahdollisuuksiin liittyen tai tehostetamalla yksittäisen laitteen käyttöä ja arvioimalla vaikutukset kokonaisuuteen. Hankkeen loppuvaiheessa kootaan erityiskohteiden toimintamallit sekä luodaan ohjeistukset energianseurantaan sekä vastaavissa erityiskohteissa huomioitaviin asioihin.

Mikkelin ammattikorkeakoulun osuudessa muodostetaan mallinnuksen ja simuloinnin avulla laskennallinen malli erityiskohteiden energiatehokkuudesta sekä kehitetään mallinnustekniikoita ja suunnittelumenetelmiä vastaamaan kohteiden erityisvaatimuksia. Mallinnettavat kohteet ovat alustavasti akvaariotalo Maretarium, Kymijoen Ravintolapalveluiden keskuskeittiö Kapyysi, Mikkelin tuomiokirkko ja Kotkan kirkko. Laskentamallien ja simuloinnin avulla voidaan arvioida investointien ja toimintatapojen muutosten merkitystä kohteiden energiakulutukseen. Konkreettisina tuloksina odotetaan energiankulutuksen alenemista tutkituissa kohteissa sekä selkeää toimintamallia ja -ohjeistusta erityiskohteiden energiankäyttöön ja -seurantaan. Simulointitulosten pohjalta tehdään myös esityksiä mahdollisista investointitarpeista, jotka edistävät energiatehokkuutta sekä uusiutuvan energian käyttöönottoa ja käytön laajentamista.

## Mallinnuksen lähtötietojen kerääminen

Hankkeessa pyritään selvittämään, kuinka talosimulointia voidaan hyödyntää arvioitaessa energiansäästöön tähtääviä muutoksia. Simulointia käytetään paljon uudisrakennuskohteiden energiatehokkuuden laskentaan erityisesti kohteissa, joissa on muuta kuin paikallista jäähdytystä. Olemassa olevien kohteiden tapauksessa ensisijaisena tavoitteena ei tavoitella energiankulutuksen nykytilan selvittämistä vaan muutosten vaikutusten arvioimista. Mallinnuksen lähtöarvoina toimivat rakennusten rakenne ja LVI-piirustukset sekä paikkakuntakohtaiset säätiedot. Käytettäviä säätietoja ovat mm. ilman lämpötila, tuulen nopeus ja suunta, auringon säteilyn voimakkuus ja suunta sekä meriveden lämpötila. Rakennukset asetetaan ilmansuuntiin nähden niin kuin ne on rakennettu ja malliin voidaan lisätä varjostavia komponentteja, kuten puita tai varjostavia rakennuksia. Auringonsäteilyn vaikutus on erityisesti tärkeä, jos tutkitaan kesäaikaista jäähdytystarvetta.

Hankkeen alussa tiedettiin, että ohjelmistot ovat kehittyneet ja niiden toiminta-alue on laajentunut tiettyihin erikoistapauksiin. Mikkelissä käytössä oleva IDA-ICE-ohjelmisto oli luonnollinen valinta mallinnustyökaluksi, koska siitä löytyi käyttökokemusta ja ohjelmiston toimittajalta saataisi apua tarvittaessa. Mallinnettaviksi kohteiksi valittiin Kotkassa sijaitsevat keskuskeittiö Kapyysi, akvaariotalo Maretarium, Kotkan Kirkko ja Mikkelin tuomiokirkko. Mallinnustyö aloitettiin kartoittamalla lähtöaineistoa kohteista. Kapyysin ja Maretariumin osalta materiaalit löydettiin kunnan arkistoista ja rakennusvalvonnasta ja osittain kohteiden omista arkistoista. Kirkkojen osalta materiaalia löydettiin pitkien etsintöjen jälkeen museovirastosta ja

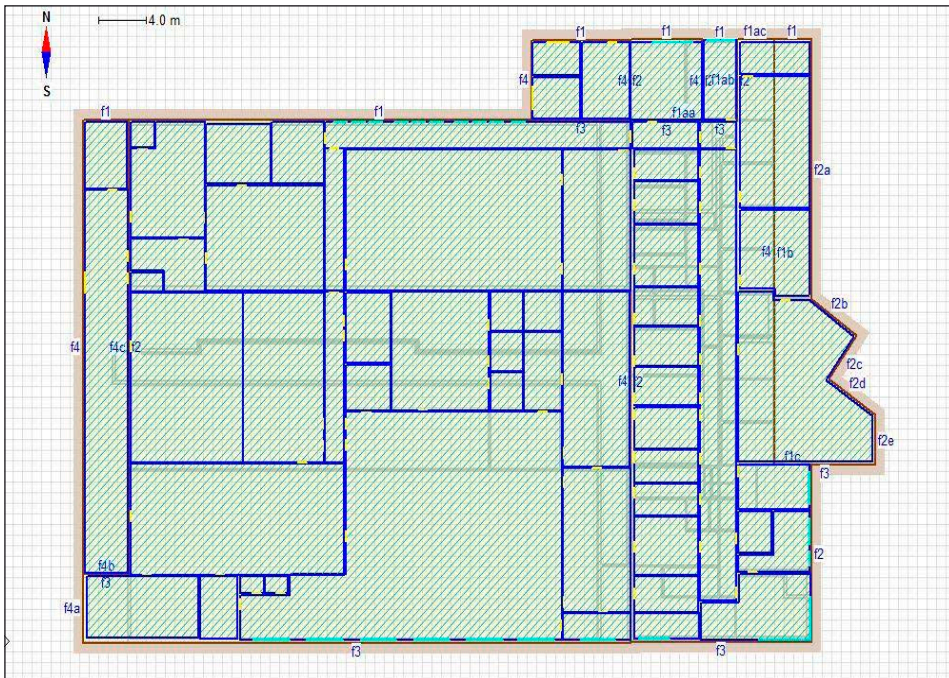
Mikkelin maakunta-arkistosta. Lähtötietojen kattavuuden perusteella voitiin arvioida, mitä kaikkea simuloinnilla pystyttäisi luotettavasti selvittämään. Kirkkojen osalta seinärakenteista ei saatu tarkkoja dokumentteja, joten rakenteita oli tutkittava itse. Porakoneen ja teleskooppikameran avulla kirkkojen seinärakenteisiin tehtiin reikiä, joiden avulla saatiin selville kirkkojen seinärakenne.

## Kotkalainen keskuskeittiö Kapyysi – kylmävalmistuksen pioneeri

Kapyysi on Kotkassa sijaitseva keskuskeittiö, jossa valmistuu päivittäin jopa yli 14 000 annosta. Kapyysin pinta-ala on yhteensä 4 500 m<sup>2</sup> ja rakennuksen tilavuus on noin 20 000 m<sup>3</sup>. Rakennuksen 1. kerroksessa sijaitsevat tuotantotilat, lastauslaiturit ja jätetilat, joiden yhteenlaskettu pinta-ala on 2 600 m<sup>2</sup>. Rakennuksen 2. kerroksessa sijaitsevat toimistotilat, henkilöstöravintola ja ilmastointikonehuone, joiden yhteenlaskettu pinta-ala on 1 200 m<sup>2</sup>. Rakennuksen kellarikerroksessa maanpinnan tason alapuolella sijaitsevat henkilökunnan sosiaalitilat, saunat, laitoshuollontilat, tekniset tilat ja väestönsuoja, joiden kerrosala on noin 700 m<sup>2</sup>. (Kymen ravintopalvelut 2016.)

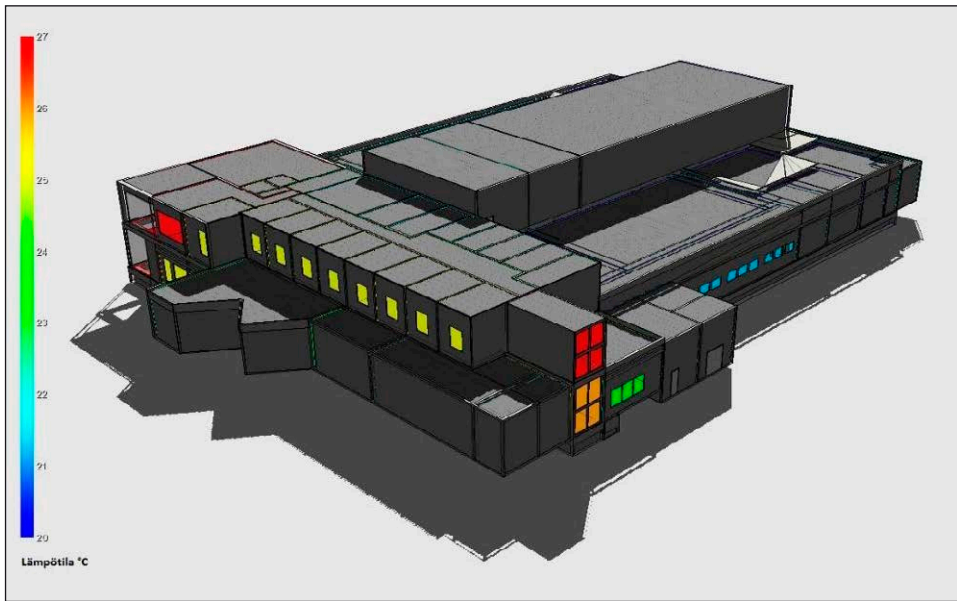
Keittiössä on käytössä kolme eri tuotantotapaa. Tuotantotavat ovat perinteinen lämminvalmistus, ”cook and chill” sekä kylmävalmistus. Lämminvalmistuksessa ruoka tehdään keittiössä valmiiksi ja toimitetaan asiakkaalle lämpimänä. Cook and chill-mallissa ruoka valmistetaan ja jäädytetään keittiössä ja toimitetaan asiakkaalle jäädytettynä. Kylmävalmistuksessa ruoka valmistetaan yhdistelemällä esikäsitellyt ruoka-aineet keskenään ja ruoka toimitetaan kylmänä vastaanottajan kypsennettäväksi. Toimintatavat vaativat erilaiset olosuhteet tuotantotiloissa, ja niiden vaikutus LVI-järjestelmien energiankulutukseen on erilainen. (Kymen ravintopalvelut 2016.)

Mallinnuksen aloitushetkellä ei ollut vielä täysin selvillä, mitä kohteista halutaan selvittää, koska energiankäytön nykytilan selvitykset eivät olleet vielä valmiita. Keskuskeittiön osalta päädyttiin rakentamaan ensin perusmalli ja samalla testattiin, kuinka hyvin ohjelman ratkaisija selviäisi rakennuksen suuresta 4 500 m<sup>2</sup>:n pinta-alasta ja yhdeksän ilmanvaihtokoneen muodostamasta ilmanvaihtoverkostosta. Mallinnus tehtiin tarkoituksella suurella tarkkuudella rakenteiden suhteen. Mallinnusta voitaisiin tarvittaessa yksinkertaistaa, jos laskennasta tulisi liian raskas. Näin ei kuitenkaan käynyt, ja mallin laskenta-aika vuoden ajanjaksolle asettui kohtuulliselle 3–4 tunnin tasolle. Huomion arvoista oli, että vaikka rakennuksen ikkunapinta-ala on pieni verrattuna rakennuksen kokoon, lisäsi ikkunoiden lisääminen laskenta-aikaa huomattavasti. Kuvassa 1 on esitetty Kapyysin 1. kerroksen pohjakuva, jossa tuotantotilat sijaitsevat.

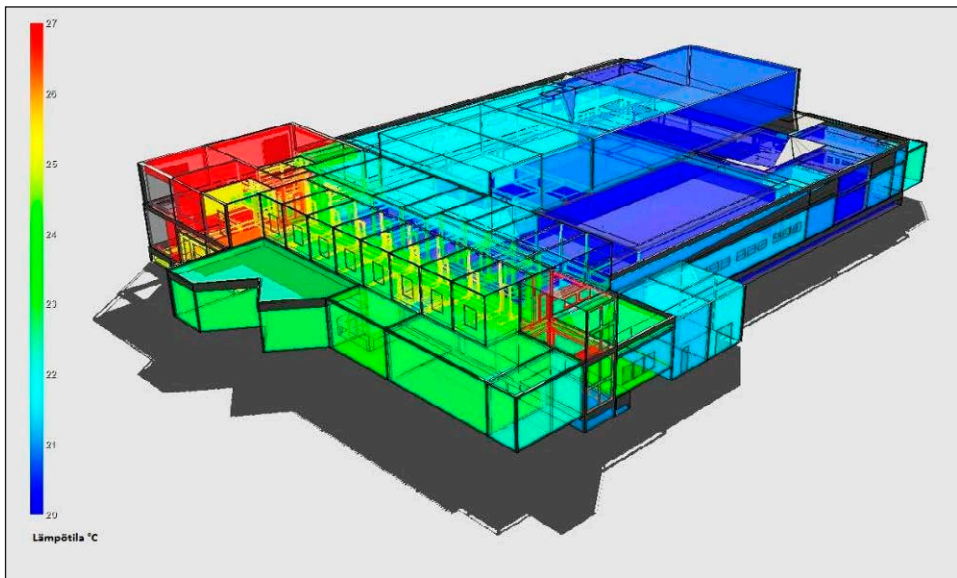


**KUVA 1. Kapyysin 1. kerroksen pohjakuva IDA-ICE-ohjelmistossa**

Malli saatiin siis toimimaan ongelmitta ja laskentatulokset olivat järkeviä. Kuvissa 2 ja 3 on havainnollistettu rakennuksen huonetilojen lämpötilajakaumaa heinäkuun 2015 lopussa hellepäivänä. Rakennetulla laskentamallilla pystytään laskemaan rakennuksen energiankulutus halutulta aikaväliltä. Laskentamallista on mahdollista kerätä kaikki laskennassa käytössä olevien muuttujien arvot ajan funktiona huoneiloittain. Laskentamallilla voidaan arvioida energiankulutuksen nykytilan selvityksessä ehdotettavien muutosten vaikutusta energiantehokkuuteen ja sisäilman laatuun. Alustavia muutoksia ovat mm. ilmanvaihtokoneiden sisäntulolämpötilojen muutokset ja ohjaustavan muuttaminen aikatauluperusteisesta mittausperusteiseksi. Simuloinnin avulla voidaan testata esimerkiksi, miten ilman suhteellinen kosteus tai hiilidioksidipitoisuus huoneilmassa muuttuu, jos ilmanvaihtokoneiden ohjausta ja asetusarvoja muutetaan.



**KUVA 2. Kapyysin laskentamallin animaatiokuva huonelämpötiloista 28.7.2015 klo 16.00**



**KUVA 3. Kapyysin laskentamallin animaatiokuva huonelämpötiloista 28.7.2015 klo 16.00, läpivalaisu**

## Suomalaisten kalojen luonnonmukainen akvaariotalo Maretarium

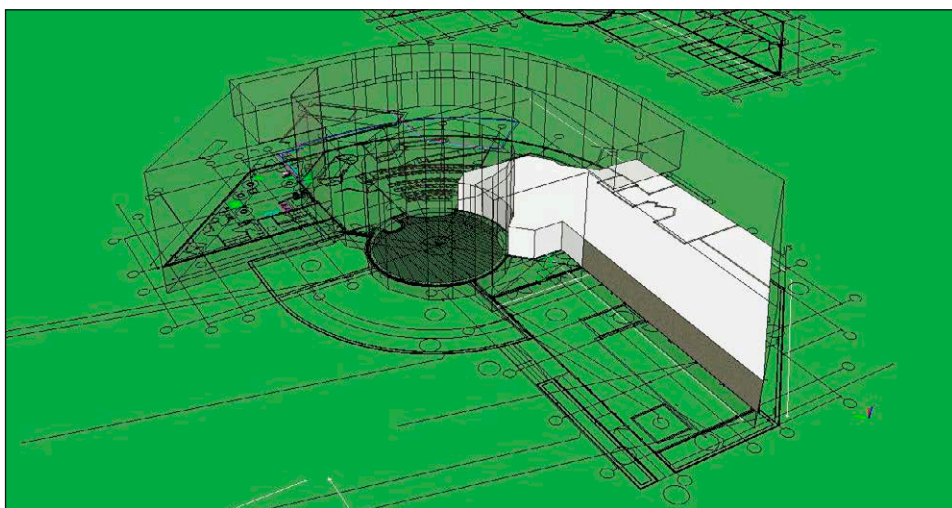
Maretarium on Kotkassa sijaitseva akvaariotalo, jossa asustaa noin 60 kalalajia ja yksilöitä on yhteensä noin 1 700. Kalalajit on hankittu eri puolelta Suomea ja mukana on sekä järvi-, joki- että murtovesilajeja. Kiinteästi asennettuja kalojen akvaarioaltaita Maretariumissa on 22 kappaletta ja vettä altaissa on yhteensä 700 000 litraa. Lisäksi kesäkautena on muutamia pieneläinten, kuten sammakoiden ja vesiliskojen, terraarioita ja altaita. Talvella pieneläimet horrostavat Maretariumin kellaritiloissa. (Maretarium 2016.)

Vesialtaista 21 kappaletta ovat avonaisia rakennuksen sisällä, ja suurin altaista eli sylinterimäinen Itämeri-allas on avonainen rakennuksen katolla. Altaiden yhteenlaskettu vesitilavuus on 700 m<sup>3</sup>. Käyttökokemusten mukaan altaiden vesimäärästä haihtuu noin 10 % viikossa. Haihtuvan veden tilalle pumpataan uutta vettä Suomenlahdesta Kotkan edustalta, jossa veden suolapitoisuus on niin alhainen (vain 0,2 ‰), että murtovesilajien lisäksi siinä menestyvät myös järvien ja jokien kalalajit. Vesi otetaan viiden metrin syvyydestä ja pumpataan kvartsihiekkapatjan läpi. Maretariumissa vedestä puhdistetaan hiekka- ja UV-valonsuodattimien avulla suuret ja pienet hiukkaset. Maretarium on luonnonmukainen akvaario eli veden lämpötila vaihtelee vuodenaikojen mukaan. (Maretarium 2016.)

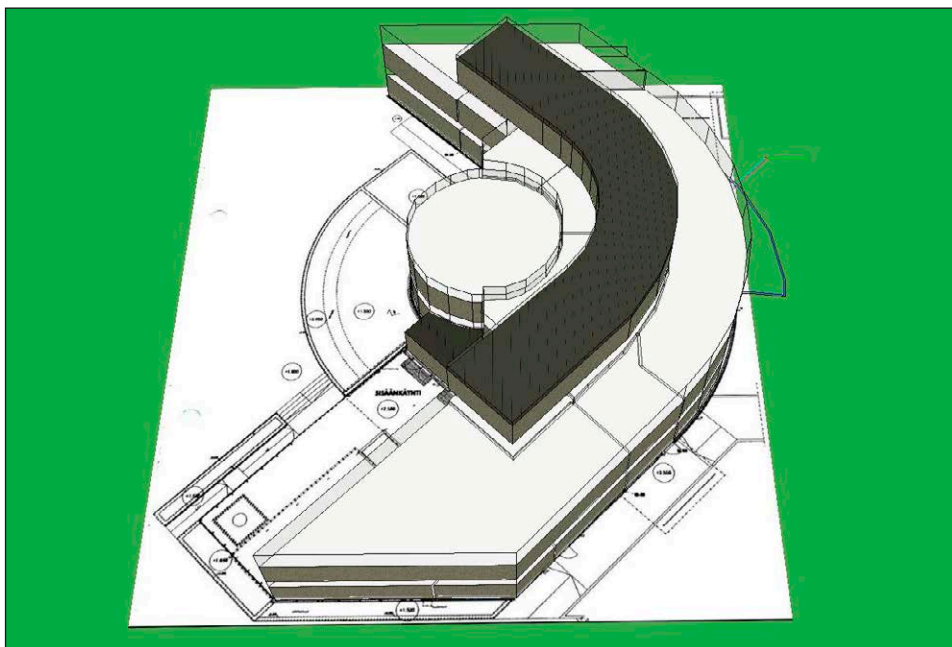
Itämeri-altaan tilavuus on noin puoli miljoonaa litraa, jolloin sisätiloissa olevien altaiden tilavuudeksi jää 200 000 litraa. Näin ollen rakennuksen sisäilmaan haihtuu 20 000 litraa viikossa eli noin 2 litraa minuutissa. Haihtuva vesi poistuu rakennuksesta koneellisen ilmanvaihdon avulla. Haihtumisen voimakkuuteen vaikuttavat oleellisesti meriveden ja Maretariumin sisäilman lämpötilat. Ilmankosteutta lisäävät myös rakennuksessa oleilevat ihmiset ja ravintolan ruuanlaitossa ilmaan siirtyvä kosteus.

Maretariumin mallinnus rakenteellisesti ja LVI-järjestelmien osalta vastaa Kapyysin mallinnusta lukuun ottamatta rakennuksen pyöreitä muotoja. Mallinnus suoritettiin IDA-ICE-versiolla, jossa ei ollut vielä käytössä allasmoduulia, jota on tarkoitus käyttää, kun kala-altaat lisätään rakennuksen sisälle. Kuvassa 4 on esitetty Maretariumin 3D-malli aivan rakenteiden mallinnuksen alkuvaiheessa ja kuvassa 5 vastaavasti mallinnuksen loppuvaiheessa. Ulkoilmaan avoinna oleva Itämeri-allas näkyy rakennuksen keskellä sylinterimäisenä rakenteena.





**KUVA 4. Maretariumin simulointimalli rakenteiden mallinnuksen alkuvaiheessa**



**KUVA 5. Maretariumin simulointimalli rakenteiden mallinnuksen loppuvaiheessa**

## Allasmoduuli

IDA-ICE-ohjelmistossa on lisäosa, joka on suunniteltu uimahallien mallintamista varten. Malli laskee vesialtaista haihtuvan veden massavirran sisäilmaan ja huomioi haihtumisessa tarvittavan energian. Projektin kohde Maretarium soveltuu erikoisuutensa vuoksi erinomaisesti allasmoduulin testaamiseen. Samalla saadaan höydyllistä tietoa Maretariumin sisäilman laadusta ja mahdollisten energiansäästöön tähtäävien muutosten vaikutuksesta sisäilman kosteuteen. Maretariumissa tehtävät mittaukset mahdollistavat allaskomponenttien lähtötietojen määrittämisen huomattavasti tarkemmin kuin mitä ilman mittaustuloksia voitaisi tehdä. Näin ollen mallia voidaan hyödyntää hyvällä tarkkuudella muutosten arvioinnissa.

Allasmoduulin laskenta perustuu kokemukseräiseen ratkaisuun, jota voidaan pitää pätevänä aktiivisessa käytössä oleville altaille, joissa haihtuminen on voimakasta.

Laskentayhtälö haihtumiselle voidaan esittää seuraavasti (ASHRAE 2007):

$$w_p = \frac{A}{V} (p_w - p_a) (0,089 + 0,0782V), \quad (1)$$

missä

$w_p$  = haihtuvan veden massavirta  $\frac{kg}{s}$

$A$  = vesialtaan pinta-ala  $m^2$

$Y$  = Tarvittava höyrystymislämpö altaan pinnan lämpötilassa  $\frac{kJ}{kg}$

$p_w$  = Kylläisen höyryn paine altaan pinnan lämpötilassa  $kPa$

$p_a$  = Kylläisen höyryn paine huoneilman kastepisteessä  $kPa$

$V$  = Ilman virtausnopeus altaan  $\frac{m}{s}$

Vakion 0,089 yksikkö on  $\frac{W}{m^2Pa}$

Vakion 0,0782 yksikkö on  $\frac{Ws}{m^3P}$

Laskentayhtälö (1) voidaan muuntaa kertomalla se aktiivisuusmuuttajalla  $F_a$ , jolloin haihtumisnopeudessa saadaan huomioitua altaan käytön aktiivisuus. Höyrystymislämmön ollessa noin  $2400 \frac{kJ}{kg}$  ja ilman virtausnopeuden ollessa 0,05–0,15  $\frac{m}{s}$  voidaan haihtumisen yhtälö kirjoittaa muotoon (ASHRAE 2007):

$$w_p = 4 * 10^{-5} A(p_w - p_a)F_a, \quad (2)$$

missä

$w_p$  = haihtuvan veden massavirta  $\frac{kg}{s}$

$A$  = vesialtaan pinta-ala  $m^2$

$p_w$  = Kylläisen höyryn paine altaan pinnan lämpötilassa  $kPa$

$p_a$  = Kylläisen höyryn paine huoneilman kastepisteessä  $kPa$

$F_a$  = Aktiivisuusmuuttuja

Taulukossa 1 on aktiivisuusmuuttujalle määriteltyjä yleispäteviä arvoja allastyypistä riippuen.

**TAULUKKO 1. Aktiivisuusmuuttujat allastyypeittäin (ASHRAE 2007)**

Allastyypit	Yleinen aktiivisuusmuuttuja ( $F_a$ )
Käyttämätön	0,5
Asuinrakennus	0,5
Asunto-osakeyhtiön yhteiskäyttö	0,65
Terapia	0,65
Hotelli	0,8
Yleinen, koulutus	1,0
Poreallas, kylpylä	1,0
Aalto, vesiliukumäki	1,5 (minimi)
Kala-altaat	Määritetään mittausten avulla

Maretariumin tapauksessa aktiivisuusmuuttujan arvo pystytään määrittämään kiinteistä saatavan mittausdatan perusteella. Ilmankosteusmittauksista voidaan arvioida haihtuvan veden määrä ja näin määrittää tunnetuissa olosuhteissa altaiden aktiivisuusmuuttuja, kun yhtälön muut muuttujat ovat tunnettuja. Kun aktiivisuusmuuttuja on määritelty ja laskentamalli toimii validoinnin jälkeen käyttötarkoitukseen nähden riittävän tarkasti, voidaan mallin avulla tutkia energiansäästöön liittyvien muutosten vaikutuksia sisäilman laatuun.

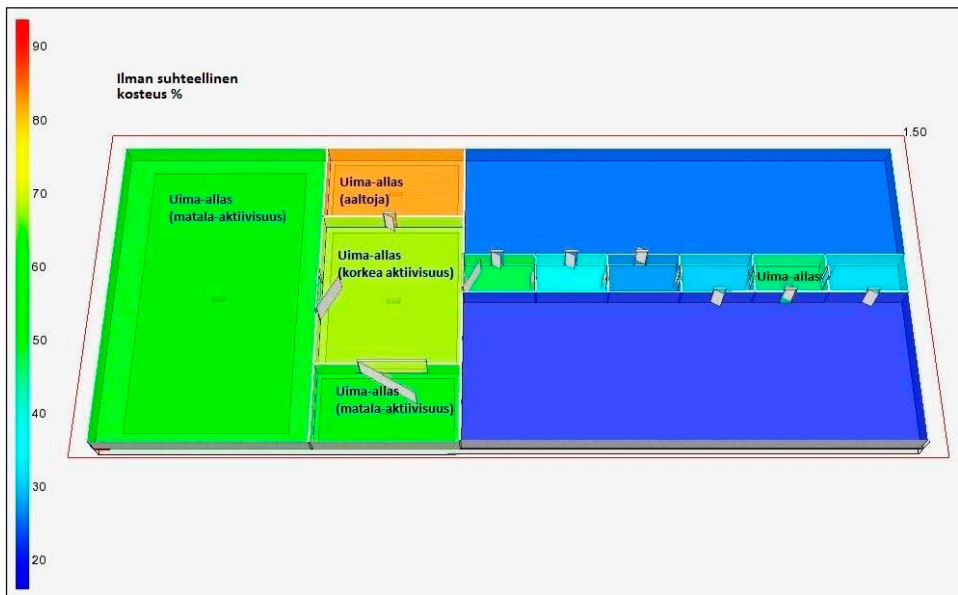


**TAULUKKO 2. Ilman ja veden lämpötilat ja ilman suhteellinen kosteus allas-tyypeittäin (ASHRAE 2007)**

Allastyyppe	Ilman lämpötila [°C]	Veden lämpötila [°C]	Ilman suhteellinen kosteus [%]
Virkistys	24–29	24–29	50–60
Terapia	27–29	29–35	50–60
Kilpailu	26–29	24–28	50–60
Sukellus	27–29	27–32	50–60
Vanhusten	29–32	29–32	50–60
Hotelli	28–29	28–30	50–60
Poreallas/kylpylä	27–29	36–40	50–60
Kala-altaat	20–25 (arvio, mit- tausten mukaan)	4–19 (arvio, mitta- usten mukaan)	30–90 (arvio, mit- tausten mukaan)

Uimahallien sisäilman suhteellinen kosteus pyritään pitämään 50–60 % välillä, jotta tilojen käyttäjät eivät tuntisi kylmyyden tunnetta (ASHRAE 2007). Rakennusten sisäilman ja altaiden veden lämpötiloja on esitetty taulukossa 2. Julkisissa uimahalleissa ilman lämpötila pyritään pitämään 1–2 °C veden lämpötilan yläpuolella ja alle 30 °C:ssa. Maretariumissa suhteellista kosteutta ei ole tarvetta säädellä yhtä tarkasti, joten ilmankosteus vaihtelee vuodenaikojen mukaan. Vuodenajat vaikuttavat myös meriveden lämpötilaan, joka pyritään pitämään 4–19 °C:n välillä. Allasvettä jäädytetään kesällä ja lämmitetään tarvittaessa talvella. Viime vuosien leutojen talvien aikana lisälämmitystä ei ole tarvittu. Sisälämpötilan voidaan olettaa talvella olevan jopa 15 astetta altaiden vedenlämpötilaa korkeampi. Näin ollen olosuhteet poikkeavat huomattavasti allasmoduulin ratkaisuun pohjautuvan kirjallisuuden arvoista. Allasmoduulista tehtiin testimalli ennen sen käyttöä varsinaisessa rakennuksessa.

Kuvassa 6 on esitetty allasmoduulin testimallin suhteellinen ilmankosteus. Kaikkien tilojen huoneilman lämpötila ja ilmanvaihdon tilavuusvirta huoneen pinta-ala kohden ovat yhtä suuria. Huonetilojen väliset ovet asetettiin olemaan jatkuvasti auki, jotta voitiin tutkia kosteuden siirtymistä huonetilasta toiseen. Kuvassa 6 nähdään, että matala-aktiivisille uima-altaille testaukseen valittu ilmanvaihtomäärä oli juuri sopiva, jotta suhteellinen ilmankosteus liikkuu uimahalleille halutulla 50–60 % tasolla. Korkea-aktiiviselle ja aaltoaltaalle ilmanvaihtomäärä ei ole riittävä ja kosteus nousee 70–80 % tasolle. Allasmoduulin käytettävyys testattiin myös Maretariumin talviolosuhteissa, jotka poikkeavat huomattavasti uimahallien olosuhteista, koska altaiden lämpötila muuttuu meriveden lämpötilan muuttuessa. Oletettavasti altaiden vedenlämpötila voi olla jopa 15 °C huoneilman lämpötilaa matalampi. Laskentayhtälön (2) määrittämissä on ratkaisun todettu olevan pätevä, kun ilman virtausnopeus altaan yläpuolella on välillä 0,05–0,15 . Näin ollen allasmoduulia ei voida soveltaa ulkoilmaan avonaisten altaiden haihtumisen arvioimiseen, koska ilman virtausnopeus on liian suuri. Hankkeen kannalta tällä rajoituksella ei ole merkitystä, koska ulkoaltaasta haihtuvan veden kosteudella ei voida nähdä olevan merkittävää vaikutusta rakennuksen sisäilman kosteuteen.



**KUVA 6. Allasmoduulin testimalli ilmanvaihdon vakioilmavirralla**

## Jatkotoimenpiteet

Mamkin osalta projekti jatkuu vuoden 2017 toukokuun loppuun saakka. Talven ja kevään aikana kaikissa kohteissa tehdään vielä lisäselvityksiä ja -mittauksia. Saatuja mittaustuloksia ja niiden pohjalta tehtyjä laskelmia verrataan simuloinnilla saatuihin tuloksiin. Mahdolliset eroavaisuudet pyritään selvittämään ja tarvittaessa laskentamalliin tehdään muutoksia tai lisäyksiä. Selvitysten ja mittausten perusteella tehdään muutosehdotuksia, joiden vaikutuksia simulointimallilla on tarkoitus arvioida. Mallinnettavista kohteista haastavin eli Kapyysi on perusrakenteeltaan valmis, mutta mallia voidaan tarkentaa tarvittaessa tarkentamalla mallissa tehtyjä yksinkertaistuksia ja lisäämällä datankeräämistä. Maretariumin mallia tarkennetaan vielä allaskomponenttien osalta ja kirkkojen mallit rakennetaan talven aikana. Mallinnusta on myös mahdollista hyödyntää, jos projektin muissa kohteissa ilmenee muutostarpeita.

## Lähteet

American Society of Heating, Refrigerating, and Air-conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE) 2007. ASHRAE handbook HVAC applications.

Kymijoen ravintopalvelut 2016. [http://www.esitteemme.fi/kymijoen\\_ravintopalvelut/MailView/](http://www.esitteemme.fi/kymijoen_ravintopalvelut/MailView/).  
Ladattu 31.10.2016

Maretarium 2016. <http://www.maretarium.fi/fi/kalat/>. Luettu 31.10.2016



# MAMKIN JA ESEDUN OPISKELIJAT MUKANA LVI-LABORATORION KEHITTÄMISHANKKEESSA

*Johanna Arola & Panu Joubkimo*

Mikkelin ammattikorkeakoulussa (Mamk) on vuoden 2015 alusta lähtien ollut käynnissä Talotek-hanke, jossa on suunniteltu ja rakennettu uusia oppimisympäristöjä talotekniikan opetukseen. Hanke on toiminut jo rakennusvaiheessa usean opiskelijan opintojen kohteena, sillä pelkästään Mamkin opiskelijat ovat tehneet rakennettaviin ympäristöihin liittyen opintoja noin 350 opintopisteen edestä. Lisäksi Etelä-Savon ammattiopiston (Esedu) opiskelijat ovat osallistuneet hankkeeseen todella laajalti. Talotek-hanke on myös edistänyt Mamkin ja Esedun oppilaitosten yhteistyötä. Talotek-hanke onkin yksi todella hyvä esimerkki TKI-toiminnan ja opetuksen yhteistyöstä. Hanketta rahoittavat Etelä-Savon maakuntaliitto Euroopan aluekehitysrahastosta sekä Marjatta ja Eino Kollin Säätiö, Fläkt Woods Oy, Geberit Oy, Jeven Oy, Pipe-Modul Oy, Rakennusliike U. Lipsanen Oy, Schneider Electric Buildings Finland Oy ja Suomen Talotekniikka Oy.

## Johdanto

Mikkelin ammattikorkeakoulussa (Mamk) on viimeisen kahden vuoden aikana ollut käynnissä Talotek-hanke, jonka aikana talotekniikan koulutuksen laboratorioihin on tehty suuria muutoksia. Laboratoriotiloihin on luotu kaksi uutta oppimisympäristöä, Testlab ja Demolab, ja lisäksi yksi oppimisympäristö, Modlab, on luotu liikuteltavan oppimisympäristön ajatuksella. Testlab on ilmanvaihdon testaukseen tarkoitettu ympäristö. Ympäristö sisältää IV-koneen, joka palvelee ilmanvaihdon testihuonetta ja jolla voidaan tutkia erilaisia ilmanvaihdon prosesseja. Tämän lisäksi koneella voidaan mm. tuottaa testihuoneeseen halutut sisäilmasto-olosuhteet ja tutkia erilaisia ilmanjakotapoja. Lisäksi testihuoneeseen rakennetuilla laitteistoilla voidaan tuottaa lämpö-, hiilidioksidi- ja kosteuskuormaa. Demolab on laboratorion sisällä oleva pientalo, joka sisältää useita erilaisia taloteknisiä järjestelmiä, ja siellä voidaan mm. tutkia erilaisia lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmiä. Liikuteltava oppimisympäristö Modlab mahdollistaa talotekniikkaan liittyvien aiheiden esittelyn laboratoriotilojen ulkopuolella. Modlab on esillä Mikkelissä vuonna 2017 pidettävillä asuntomessuilla, jolloin Modlabissa tuodaan esille mm. sisäilmastoon liittyviä asioita sekä esitellään yhden asuntomessukohteen energiaratkaisuja ja taloteknisiä järjestelmiä.

Talotek-hankkeen yhtenä tavoitteena on ollut lisätä Mamkin ja Etelä-Savon ammattiotiston (Esedu) välistä yhteistyötä. Hankkeessa on pyritty myös mahdollisimman tiiviiseen TKI-toiminnan ja opetuksen yhteistyöhön. Mamkin talotekniikan opiskelijat ovat osallistuneet hankkeen toimintaan opintojaksojen, opinnäytetöiden ja harjoittelun kautta yhteensä noin 350 opintopisteen edestä. Lisäksi hankkeessa on tehty yksi sähkötekniikan opinnäytetyö (15 op). Myös Esedun opiskelijat ovat suorittaneet hankkeessa opintojaan.

## **Esedun talonrakentajat oppimassa Demolabin ja Testlabin työmailla**

Talotek-hankkeeseen kuuluvat rakennusprojektit, ilmanvaihdon testihuoneen saneeraus ja demotalon rakentaminen, aloitettiin kevättalvella 2015 purkamalla ilmanvaihtolaboratoriosta vanha ilmanvaihtokone siihen liittyvine teräsrakenteineen. Ilmanvaihtokoneen ja teräsrakenteiden purkutöistä vastasivat Esedun kone- ja metallialan aikuisopiskelijat. He myös muokkasivat olemassa olevia metallirakenteita rakentaen portaita ja kaiteita.

Esedun talonrakentajat aloittivat urakkansa syksyllä kunnostamalla ilmanvaihdon testihuoneen uuteen käyttöön soveltuvaksi. Vanhat kipsilevyseinät purettiin, seinät eristettiin polyuretaanieristeellä ja sisäseinät levytettiin uudestaan filmivanerilla. Kaksi ylimääräistä ikkuna-aukkoa levytettiin umpeen ja huoneen ulkoseinät siistittiin ja pintakäsiteltiin. Lisäksi testihuoneen liikuteltava sisäkatto eristettiin ja levytettiin. Syksyllä päästiin tekemään viemäritöitä. Koska demotalo täytyi liittää olemassa olevaan viemärointiin, leikattiin lattian betonilaattaan railot viemäriasennusta varten. Esedun LVI-opiskelijoiden opinnoissa oli juuri tuolloin menossa teoriajakso, joten viemäriasennus tilattiin ulkopuoliselta urakoitsijalta. Talonrakennuspuolen opiskelijat työskentelivät tuolloin työmaalla kunnostamassa ilmanvaihdon testihuonetta, joten he avustivat viemäriasennuksissa ja suorittivat valutyöt. Varsinaiseen pääurakkaan, demotalon rakentamiseen, päästiin heti vuoden 2016 alusta. Työt alkoivat runkotöillä. Runkotöiden osalta työmaa oli hyvin soveltuva oppimiskohde, sillä demotalon rakennesuunnitelma sisälsi erityyppisiä rakenteita. Itse rakennuksen runko toteutettiin peltirangalla, ja äänimittaustila sekä kylpyhuone tehtiin puurunkoisena. Äänimittaustila rakennettiin ääntä eristäväksi. Lisäksi demotaloon tuli suuria ikkunapintoja, jolloin peltirankaista rakennetta vahvistettiin teräsrakentein. Oman erikoisuutensa rakentamiseen toi myös se, että teknisen tilan välipohjana hyödynnettiin laboratoriossa olemassa olevaa teräsrakennetta.

Runkotyöt valmistuivat kevään mittaan, ja nuoret talonrakennuksen opiskelijat pääsivät hyvin ansaitulle kesälomalle. Kesän aikana Esedun pintakäsittelyn aikuisopiskelijat aloittivat demotalon sisäpintojen tasoitus- ja maalaustyöt. Syksyn tullen talonrakentajat palasivat työmaalle. Työt alkoivat loppujen ovien ja ikkunoiden sekä ulkovuorauksen asennuksella. Ulkovuoraus toteutettiin valmiiksi pohja- ja pinta-maalatulla UTW 170 -vaakapaneelilla. Lisäksi syksyn työlistalle jäivät äänimitta-

huoneen laipion ja välipohjan viimeistely sekä kylpyhuoneen lattia- ja vesieristystyöt. Äänimittaustilan ja kylpyhuoneen väliseksi välipohjaksi rakennettiin puukerrostalon välipohjaratkaisun mukainen rakenne askeläänieristyksineen. Artikkelin kirjoitushetkellä välipohja on valmis, ja seuraavaksi kylpyhuoneen lattiaan asennetaan vesieristysmatto. Myös muilta osin demotalo alkaa rakennustöiden osalta olla valmis. Vielä viimeiset listat, ja viimeistelytyöt ja urakka Esedun talonrakentajien osalta on päätöksessään. Rakennustöiden aikana oli hienoa seurata, miten nuorten rakentajien taidot ja toiminta työmaalla kehittivät. Iso kiitos rakentajille!



**KUVA 1.** Etelä-Savon ammattioppilaitos Esedun talonrakennuksen opiskelijat toteuttivat Demolabin rakennustyöt (kuva Johanna Arola)



**KUVA 2. Esedun talonrakennuksen opiskelijat tekemässä Demolabin ulkovuorasta (kuva Johanna Arola)**

**Testlab-oppimisympäristössä opiskelijat olivat mukana suunnittelusta toteutukseen, testaukseen ja käyttöön**

Mamkin talotekniikan koulutuksessa on vuodesta 2014 saakka toiminut Talotekniikan projektitoimisto, jossa työskentelevät kolmannen vuoden talotekniikan opiskelijat. Projektitoimistossa toteutetaan erilaisia toimeksiantajien projekteja. Talotek-hanke on kahden viimeisen vuoden aikana toiminut toimeksiantajana neljässä projektissa.

Vuonna 2015 Talotek-hanke antoi projektitoimistolle toimeksiannon, jonka tavoitteena oli suunnitella Testlab-oppimisympäristön sisältöä. Projektin projektipäälliköksi valittiin Kimmo Laine ja projektiasiantuntijoiksi Henri Järvenpää ja Timo Kankaanpää. Projektissa suunniteltiin mm. minkälaisia ilmanjakotapoja testihuoneeseen tulee, kuinka testihuoneen sisäilmasto-olosuhteita (lämpötila, kosteus, hiilidioksidipitoisuus) voidaan muuttaa, millaisia testihuoneen pintamateriaalien tulee olla, jotta esimerkiksi savukokeissa käytettävä merkkisavu näkyy hyvin jne. Projektissa suunniteltiin myös Testlabin IV-koneen ja testihuoneen ilmanjaossa käytettävien pääte-laitteiden välinen kanavisto säätö- ja mittauslaitteineen. Projektin aikana opiskelijat myös selvittivät laitehankintoja varten laitteiden teknisiä ominaisuuksia sekä hankintakustannuksia. Opiskelijat tutustuivat projektin aikana laitevalmistajien tuotteisiin sekä kävivät hakemassa mallia toteutukseen myös muilta toimijoilta. Suunnittelussa oli mukana myös talotekniikan opetushenkilöstöä. Projektin tuloksena Talotek-hanke sai Testlabia koskevan suunnitelman, joka toteutettiin lähes sellaisenaan kevään 2016 aikana. Toteutuksesta vastasivat samat opiskelijat, jotka laativat suunnitelmat.





**KUVA 3.** Mamkin talotekniikan 3. vuoden opiskelija Kimmo Laine toteutti kahden luokkakaverinsa kanssa Testlab-oppimisympäristön IV-asennustyöt (kuva Johanna Arola)



**KUVA 4.** Mamkin 3. vuoden talotekniikan opiskelijat Henri Järvenpää, Kimmo Laine ja Timo Kankaanpää olivat mukana suunnittelemassa Testlab-oppimisympäristöä. Opiskelijat toteuttivat myös suunnitelmansa osana opintojaan. Taustalla valmis ympäristö (kuva Johanna Arola).



Testlab-ympäristö saatiin toimintakuntoiseksi vuoden 2016 keväällä, minkä jälkeen voitiin aloittaa ympäristön testaus. Talotek-hankkeessa toiminut harjoittelija Milla Sairanen osallistui ympäristön testaukseen kesän 2016 aikana tehden ympäristöllä alustavia koeajoja ja säätäen ympäristöä helpommin ja paremmin toimivaksi. Ympäristön testausta jatkettiin syksyn 2016 aikana osana Talotekniikan projektitoimistoa. Projekti keskittyi testihuoneen ominaisuuksien tarkempaan selvittelyyn. Opiskelijat testasivat mm. päätelaitteiden heittokuvioita savukokein ja testasivat testihuoneen kuormituksia (lämpötila, hiilidioksidi ja kosteus) erilaisilla ilmamäärillä. Projektin projektipäällikkönä toimi Janne Kiuru ja projektiasiantuntijoina Kalle Kontio ja Henri Hartikainen.

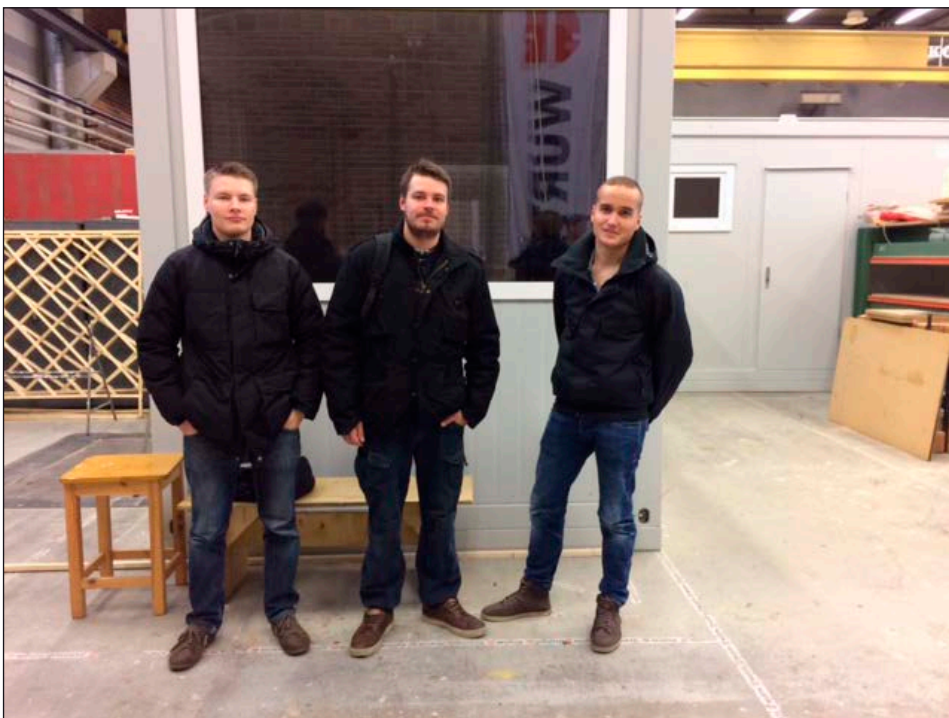
Testlab on kokonaisuus, jossa TKI-toiminnan ja opetuksen yhdistäminen on tullut esille todella monipuolisesti. Opiskelijat ovat yhdessä opetus- ja hankehenkilöstön kanssa olleet mukana suunnittelussa, toteutuksessa ja testauksessa eli ovat osallistuneet toimintaan laajalti alusta lähtien. Jatkossa Testlab-oppimisympäristö on osa jokaisen talotekniikan opiskelijan opintoja osana laboratoriossa suoritettavia opintojaksoja. Todennäköisesti ympäristössä tehdään tulevaisuudessa myös useita opinnäytetöitä ilmanvaihtotekniikkaan liittyen.

## **Modlab-oppimisympäristö yhdistää Mamkin ja Esedun opiskelijat**

Modlab on talotekniikan liikuteltava oppimisympäristö, jonka avulla talotekniikkaa voidaan viedä fyysisen laboratorioympäristön ulkopuolelle. Modlabin pääajatus on olla liikuteltava ja mahdollisimman helposti muokattavissa oleva ympäristö.

Modlabin suunnittelu aloitettiin vuoden 2015 syksyllä ja opiskelijat otettiin varsin tiivistä mukaan myös tämän oppimisympäristön suunnitteluun. Ensimmäisiä suunnitelmia tehtiin Talotekniikan projektitoimistossa, jossa opiskelijat ideoivat, mitä kaikkea tämän kaltaisella ympäristöllä olisi mahdollista tehdä. Ideoinnin jälkeen opiskelijat veivät yhden ajatuksen pidemmälle suunnitteluun. Projektin projektipäällikkönä toimi Jussi Viitanen ja projektiasiantuntijoina Jani Parkkinen ja Lassi Hirvonen.

Vuoden 2016 aikana Modlabin suunnittelua jatkettiin ja suunnittelun pohjalta hankittiin esittelykäyttöön modifioitu merikontti. Artikkelin kirjoitushetkellä konttia varustellaan aurinkosähköjärjestelmällä. Modlabin ensimmäiseksi käyttötarkoitukseksi hahmottui Mikkelissä vuonna 2017 järjestettävät asuntomessut. Etelä-Savon ammattiopisto Esedu rakentaa asuntomessualueelle konttitalon eli pientalon, ja Modlabin kontti sijoitetaan messujen ajaksi samalle tontille. Koska Modlab oli tässä vaiheessa vielä vain tyhjä merikontti, tuli sille suunnitella sisältöä messujen ajankohdaksi. Syksyllä 2016 Talotekniikan projektitoimiston haasteeksi annettiinkin suunnitella Modlabin sisältö asuntomessujen ajaksi. Haasteeseen vastasivat talotekniikan opiskelijoista Ville Hirvonen (projektipäällikkö) sekä projektiasiantuntijat Timo Kirvesoja ja Antti Akselin.



**KUVA 5. Mamkin talotekniikan 3. vuoden opiskelijat Timo Kirvesoja, Ville Hirvonen ja Antti Akselin loivat osana projektiopintojaan aineistoa asuntomessujen esittelyä varten (kuva Johanna Arola)**

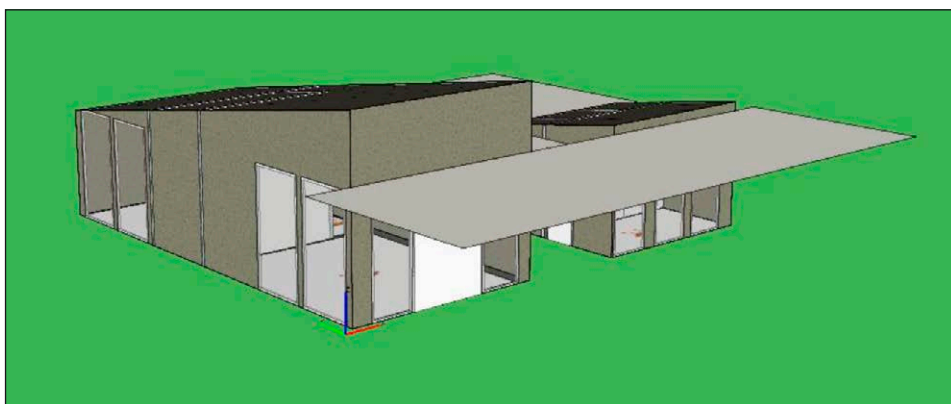
Artikkelin kirjoitushetkellä projektin toteutus on vielä kesken, mutta projektin tuloksena syntyy tietoisumaisia esityksiä rakennusten sisäilmastoon ja energiatehokkuuteen liittyen. Näitä esityksiä esitellään asuntomessuyleisölle messujen aikana. Lisäksi projektissa suunnitellaan, kuinka esitykset asuntomessuilla käytännössä hoidetaan, eli millainen miehitys Modlabiin tarvitaan. Asuntomessujen kanssa samanaikaisesti pidetään Mamkin talotekniikan laboratoriossa avoimet ovet, ja myös tätä sisältöä suunnitellaan samassa projektissa. Talotekniikan laboratoriossa esittelyn kohteena on laboratorion sisälle rakennettu pientalo, Demolab, jossa on esillä laajalti taloteknisiä järjestelmiä. Modlab myös tiivistää asuntomessujen kautta Mamkin ja Esedun yhteistyötä entisestään, sillä Modlabissa esitellään myös vieressä olevan Esedun rakentaman konttitalon energiatehokkuutta ja taloteknisiä järjestelmiä.



**KUVA 6. Esedun opiskelijat tekemässä asuntomessualueelle nousevan konttitalon perustuksia (kuva Johanna Arola)**

## **Talotek-hankkeen oppimisympäristöistä opinnäytetöitä**

Talotek-hankkeessa rakennettavien oppimisympäristöjen on tarkoitus tulevaisuudessa toimia opinnäytetöiden toteutuskohteina. Jo rakennusvaiheessa oppimisympäristöt ovat tarjonneet aiheen neljään opinnäytetyöhön. Opinnäytetöistä kaksi on valmistunut vuoden 2016 aikana ja kaksi on artikkelin kirjoitushetkellä vielä kesken. Opinnäytetöistä kaksi on liittynyt Demolab-ympäristöön. Toisessa Demolabiin liittyvässä opinnäytetyössä Janne Romo selvitti rakenteiden ja taloteknisten ratkaisujen vaikutusta pientalon E-lukuun. Kohteena käytettiin Demolabin pientaloa (kuva 7). Toisen työn teki Eetu Asikainen, ja siinä perehdyttiin pientalon lämmitys- ja viilennysjärjestelmiin ja niiden vaikutuksiin asumisviihtyvyyden näkökulmasta. Demolabiin asennetut Uponorin järjestelmät toimivat opinnäytetyön pohjana.



**KUVA 7. Demolab-pientalo mallinnettuna IdaIce-simulointiohjelmaan (kuva Janne Romo)**

Yksi tekeillä oleva opinnäytetyö liittyy Modlab-oppimisympäristöön. Milla Sairasen tekemässä työssä selvitetään simuloimalla Esedun asuntomessuille rakennettavan konttitalon energiatehokkuutta ja sisäilmasto-olosuhteita. Opinnäytetyöstä saatavia tuloksia esitellään Modlabin kontissa asuntomessujen ajan. Toista tekeillä olevaa opinnäytetyötä tekee sähkötekniikan opiskelija Erno Virta. Opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa Testlab-ympäristöön testihuoneen hiilidioksidipitoisuuden hälytys- ja turvajärjestelmä.

Kokonaisuutena Talotek-hankkeessa rakennetut oppimisympäristöt ovat jo rakennusvaiheessa mahdollistaneet monenlaisen oppimisen. Valmistuttuaan ne ovat vielä tiiviimpi osa sekä Mamkin että Esedun opiskelijoiden opintoja. Talotek-hanke on myös lisännyt Mamkin ja Esedun koulutusten yhteistyötä, ja tätä on tarkoitus jatkaa ja syventää yhä edelleen. Talotek-hanke on yksi loistava esimerkki siitä, kuinka TKI-toiminta saadaan jalkautettua opetukseen.



# THERMAL COMFORT AND VENTILATION EFFECTIVENESS EVALUATION IN AUDITORIUM USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)

*Ignas Sokolnikas & Heikki Salomaa & Mika Ruponen*

Thermal comfort is one of the most important factors that contribute to the person's satisfaction with indoor environment. Usually it is difficult to satisfy every person in the space because of large variations in physiology and psychology of different persons.

Heating, ventilation and air conditioning (HVAC) technologies are utilized to achieve desired thermal comfort. Heating and air conditioning usually play a main role in achieving the desired level of thermal comfort, while ventilation is also a significant factor. This work focus is on ventilation and air conditioning as provider of thermal comfort.

The main requirements for thermal comfort were taken into account. Those are operative temperature, vertical air temperature difference, mean air velocity, draught rate (DR), predicted mean vote (PMV) and predicted percentage dissatisfied (PPD).

The space under investigation was auditorium A132 in Mikkeli University of Applied Sciences (MAMK). The particular room was chosen because it is a challenge to keep good thermal comfort in such a space, as the ventilation system was originally designed for a higher number of occupants and computers that results in big air flow rates. A displacement type ventilation system is used in the auditorium, which poses a potential risk for discomfort due to draught and vertical air temperature difference exists.

## Aims

The first aim of this thesis was to test reliability of Autodesk Simulation CFD (Computational Fluid Dynamics) program.

The second aim was to evaluate perceived thermal comfort in auditorium with displacement ventilation. Evaluation of thermal comfort were made according to ISO (International Standard Organization) 7730:2005 regulations. To do this, simulation of auditorium A132 was performed using Autodesk Simulation CFD program.

One more aim was to evaluate effectiveness of ventilation and temperature stratification in auditorium using Autodesk Simulation CFD. The last aim was to find a better solution for ventilation in auditorium A132 if the current ventilation system was inadequate.

## Methods

The main work on this study was carried out on the computational model of the room. In order to create as realistic as possible computational model, a lot of work needed to be carried out. The work included such tasks as: obtaining relevant design information from drawings, measuring the dimensions which are not presented in the drawings, calculating thermal transmittance coefficient values, estimating heat gains and losses and setting the power of heat emitters.

Autodesk Revit software was used for creating the geometrical model of the auditorium A132 once all necessary data was collected in the previous phase. The generated geometry model was developed further in the Autodesk Simulation CFD package into computational flow domain. The CFD was then used to predict comfort conditions in the auditorium. Predicted values were compared against experimental data to validate computational model. Experimental work and set-up as well as validation exercise is separately reported and published in bachelor thesis by Sokolnikas (Sokolnikas 2015). Methods presented by Mundth et al 2004 used to evaluate ventilation effectiveness.

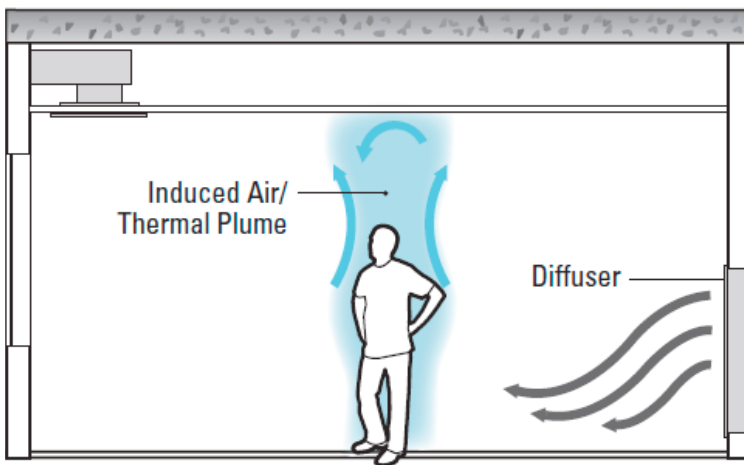
The validated computational model was deployed to further improve thermal comfort in the auditorium. The simulated results were used to identify problem areas and develop design ideas to improve thermal comfort in the auditorium. The computational model was then used to evaluate the effect of new designs.



## Displacement ventilation

There are two main principles to mechanically ventilate a room: mixing type ventilation and displacement ventilation. In mixing ventilation supply air is introduced into room at relatively high velocity to mix with room air. In fully mixed situation contaminant concentration is the same in the whole space. The supply air is usually delivered at high level into the room and at higher velocities than in displacement ventilation. As the air in the room is fully mixed, temperature and contaminant variations are quite small in vertical and horizontal directions.

In displacement ventilation, air is typically supplied at low level and at lower velocities, which results in minimal mixing between the room air and supply air. Figure 1 shows air movement in a room ventilated using displacement principle. The air movement is mainly caused by buoyancy forces, which are generated by heat sources such as humans, computers, lighting, other electrical equipment and heat transfer from the structures. The supply air delivered at lower temperature than room air moves along the floor until a contact with a heat source. Heat sources increase temperature of air and as a result density of air decreases and buoyant forces move the air upwards creating a thermal plume. Sources of contaminants and heat are commonly the same, such as humans. For this reason, the contaminants and heat are removed from lower part of room by the plumes to the upper part of the room. The lower part of a room is commonly referred as the occupied zone.

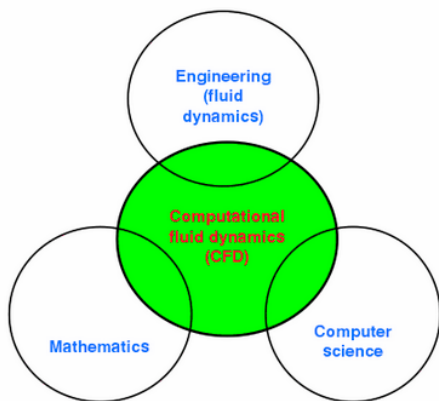


**FIGURE 1. Displacement ventilation (Price Industries. 2015)**



## Computational fluid dynamics

To analyse displacement ventilation systems Computational fluid dynamics can be applied. CFD integrates disciplines of fluid mechanics, mathematics and computer science. Fluid mechanics is a study about fluids either in motion or at rest. CFD is dedicated to the fluids in motion and how they influence heat transfer and chemical reactions. Also, physical characteristics of the moving fluids can be described in the mathematical equations. To solve these equations, computer scientists convert them into computer programs or software packages. So the part computational simply means the study of the fluid flow in numerical simulations using computer programs and software. Figure 2 clearly describes the meaning of CFD and interaction of different disciplines. (Nielsen et al 2007)



**FIGURE 2. Different disciplines of computational fluid dynamics (Nielsen et al 2007)**

Computational fluid dynamics is one of the three methods of solving problems in heat transfer and fluid dynamics. Each of these approaches are strongly connected with each other. Traditionally, for assisting engineers in designing of equipment or studying industrial processes of heat transfer and fluid dynamics analytical and experimental methods have been used.

With the progress of computers, computational method became another available approach. While analytical and experimental methods are still widely used, computational method is getting more and more credibility, especially when the fluid flows are very complex.

## Requirements for thermal comfort

It is impossible to create an ideal thermal environment as every individual has different preferences. One will be always dissatisfied because it is too warm for him and other will complain that the temperature in the room is too low. As a result, there will always be a percentage of occupants who are dissatisfied with the thermal environment. Therefore, it is only possible to create such a thermal environment which will be acceptable by a limited number of occupants. Allowable values for lowest thermal environment category set by ISO 7730 are provided in Table 1.

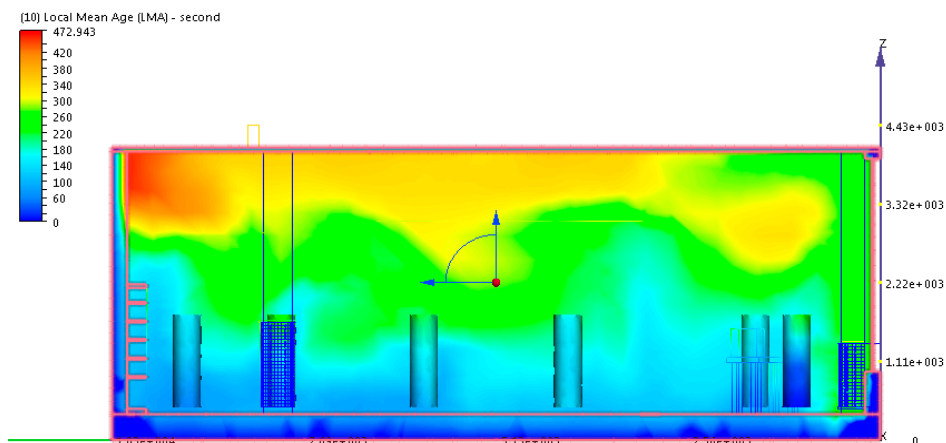
**TABLE 1. Allowable values for acceptable thermal comfort (ISO 2005)**

Thermal comfort factor	Allowable range (Category C)
Operative temperature range	$22 \pm 3$ °C
Predicted mean vote	$-0.7 < PMV < +0.7$
Predicted percentage dissatisfied	PPD < 15 %
Vertical air temperature difference	< 4 °C
Mean air velocity	< 0.21 m/s
Draught rate	DR < 30 %

## Results

### Ventilation effectiveness

The main goal of displacement ventilation is to have fresh air in the occupied zone and contaminated air in the upper zone of the room. Figure 3 presents Local Mean Age (LMA) on a plane cross-section, which clearly shows that the air in the occupied zone is much fresher than the air in the upper zone. This also proves that Autodesk Simulation CFD simulation provides quite accurate results for displacement ventilation.



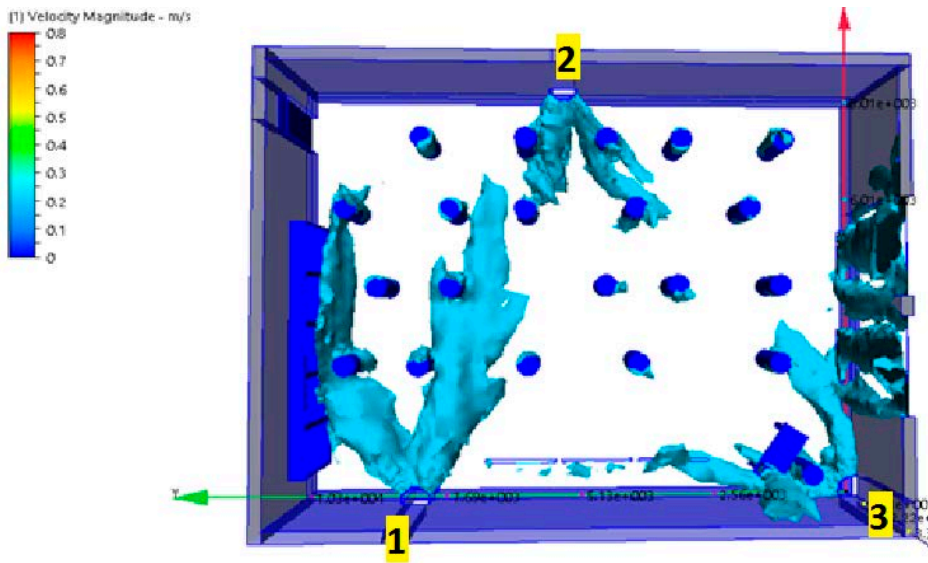
**FIGURE 3. Local Mean Age of air distribution in the room (Sokolnikas 2015)**

Simulations showed that air change efficiency of this auditorium is 80 %. If air change efficiency is 50 % in a fully mixed ventilation, this means that 1.6 times bigger air flow rate would be needed to achieve same indoor air quality in a case of fully mixed ventilation.

### Thermal comfort evaluation

To perform thermal comfort evaluation thermal comfort criteria values of ISO for C category of thermal environment were used. In Autodesk Simulation CFD simulation metabolic rate of the person was set to be 58 W/m<sup>2</sup>, clo value was set to be 1 clo and humidity was set to be 40 %. Results of Autodesk Simulation CFD program were compared to thermal comfort requirements for operative temperature range, PMV, PPD, vertical air temperature difference, mean air velocity and draught rate.

Figure 4 presents air velocity profile ( $v \geq 0.21$  m/s) as a volume for the auditorium. Comparison of results between Autodesk Simulation CFD and thermal comfort requirements showed that auditorium A132 does not meet lowest thermal comfort requirements for DR, PMV, PPD and mean air velocity set by ISO 7730.

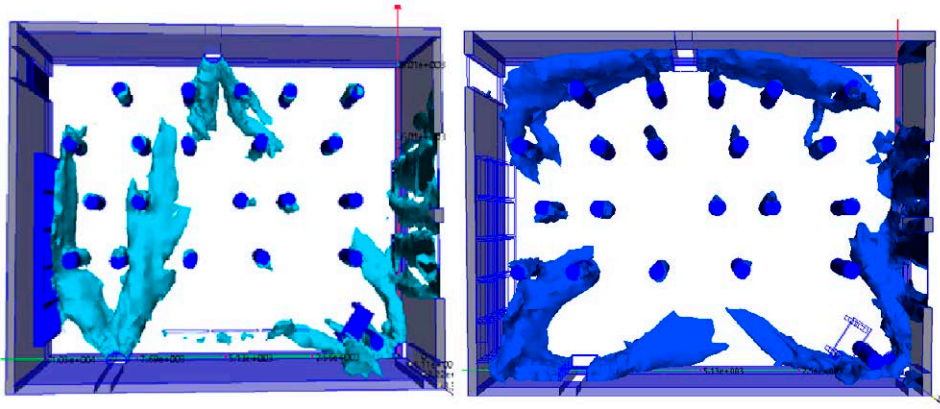


**FIGURE 4.** Air velocity profile ( $v \geq 0.21$  m/s) of the auditorium A132 (Sokolnikas 2015)

### Improving the ventilation system

High air velocity from the displacement diffusers was primary cause for thermal discomfort in this auditorium, one possible solution was to change the direction of the air flow from the diffusers. In this case, diffusers were modeled in such a way that air would flow only from the sides of diffusers, parallel to the walls. Also, air flow rates of diffusers were changed. The flow rate of diffuser 1 (numbering of diffusers are showed in Figure 4) was reduced from 320 l/s to 250 l/s. Air flow rate of diffuser 2 was increased from 190 l/s to 200 l/s and air flow rate of diffuser 3 was reduced from 190 l/s to 150 l/s. The total supply air flow rate in this case was 600 l/s. Thermal comfort in the auditorium was simulated after these changes.

The difference of velocity profiles before and after the improvements is shown in Figure 5. On the left the case before and on the right the case after improvements are presented. It can be concluded that there would be less draught after these improvements, because air velocities are lower in the occupied zone than those of before improvements.



**FIGURE 5. Air velocity profile ( $v \geq 0.21$  m/s) before and after improvements (Sokolnikas 2015)**

After these improvements a stagnant air zone appeared in north-west corner. This stagnant air should not cause any problems as it is above the height of occupied zone. Also mean age of air in this zone is about 500 s, when in fully mixed ventilation room mean age of air would be 462 s, so the difference is not so big.

## Conclusions

One aim of this study was to test if Autodesk Simulation CFD program is a reliable tool to predict thermal comfort. Comparison of measured air velocities in auditorium with air velocities in Autodesk Simulation CFD program proved that Autodesk Simulation CFD program provides results for air velocity which are very close to the experimental results. Average difference between velocities measured in auditorium and in Autodesk Simulation CFD was only 0.03 m/s (Sokolnikas 2015). Also, analysis of temperature stratification showed that Autodesk Simulation CFD program provides results which are typical for displacement ventilation system. The difference between measured temperature at the floor level in auditorium and Autodesk Simulation CFD was only 0.3 °C and the difference of temperature at the ceiling level was only 0.2 °C(Sokolnikas 2015).

Another aim of this study was to evaluate thermal comfort in auditorium with displacement ventilation system. Thermal comfort evaluation provided results which were expected. Too high air velocity from diffusers causes draught in auditorium. As a result, DR, PMV, PPD and mean air velocity values do not meet the lowest requirements for thermal comfort set by ISO.

Analysis of ventilation effectiveness and temperature stratification in auditorium showed that displacement ventilation works effectively for this room. There is clear temperature stratification in auditorium, as well as clear difference between the age of

air in the lower and in the upper zones. The air in the occupied zone is much younger than it would be in mixing ventilation with same air flow rate.

A proposal to change direction of air flow to be parallel to walls and adjust air flow rates of each diffuser was provided. This case was simulated using Autodesk Simulation CFD and results showed that these improvements would significantly reduce air velocities in occupied zone. Also, operation costs of ventilation system would be reduced, as supply air flow rate after improvements would be reduced to 600 l/s.

After all, designing a displacement ventilation system is a real challenge as heat sources and cold surfaces have a significant influence on the air movement in the room. However, displacement ventilation is more effective than typical mixing ventilation and could reduce operation costs significantly.

Compliments to Autodesk inc. which provides students with free software. I would recommend Autodesk Simulation CFD program for solving all kinds of problems related to heat and mass transfer, as this program provides a wide range of results. Application range of this program is really wide: fluid mechanics, electronics, aerodynamics, building design, HVAC and many more. Though, as this program is created to be multipurpose, the designing process requires a lot of effort and experience.

## References

- Sokolnikas Ignas. 2015. Thermal comfort and ventilation effectiveness evaluation in auditorium. Bachelor Thesis.
- Nielsen V. Peter, Allard Francis, Awbi B. Hazim, Davidsson Lars and Schalin Alois. 2007 REHVA guidebook. Computational Fluid Dynamics in Ventilation Design. Finland, Forssan Kirjapaino, Forssa. REHVA.
- Mundt Elisabeth, Mathisen Martin Hans, Nielsen V. Peter, Moser Alfred. 2004 REHVA guidebook. Ventilation Effectiveness. Finland, Forssan Kirjapaino Oy, Forssa. REHVA.
- Skistad Håkon, Mundt Elisabeth, Nielsen V. Peter, Hagström Kim, Railio Jorma. 2002. REHVA guidebook. Displacement Ventilation in non-industrial premises. Finland, Forssan Kirjapaino Oy, Forssa. REHVA.
- ISO. 2005. Standard 7730:2005: Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. International Organization for Standardization.
- Price Industries. 2015. Engineering guide. Displacement ventilation. Price Industries Limited. <http://www.priceindustries.com/content/uploads/assets/literature/engineering-guides/displacement-ventilation-engineering-guide.pdf>. Referred 22.09.2015.



# KESKIJÄNNITEVERKON MYRSKYSIMULAATIOMALLI

*Juha Korpijärvi*

Ilmastonmuutoksen edessä erilaiset sään ääri-ilmiöt lisääntyvät. Suomessa tämä näyttäytyy erityisesti kovien tuuliolosuhteiden eli myrskyjen esiintymisenä useammin. Tähän asti verkon vaurioitumisesta aiheutuvan ja jakelun keskeytyksen aiheuttaman haitan (KAH) laskeminen on perustunut yksittäisten vikojen simulointiin keskijänniteverkossa. Tässä artikkelissa esitetyn simulointimallin laskeminen perustuu kuitenkin useaan yhtä aikaa esiintyvään vikatilanteeseen. Tällainen tilanne esiintyy erityisesti myrskyjen yhteydessä, jolloin suuri osa verkkoa tai ääritilanteessa koko verkko on vikaantunut ja sähkönjakelu keskeytynyt.

## Tausta

Mikkelin ammattikorkeakoulussa on kahdessa eri TEKES-rahoitteisessa projektissa tutkittu keskijänniteverkon vikaantumisesta aiheutuvia kustannuksia sekä tämän johdosta verkossa esiintyvää kunnossapito- ja uusintainvestointitarvetta. Ensimmäisessä SKUTMA-projektissa (2008–2010) luotiin verkon kunnossapitoa ja uusimista optimoiva malli, ja sitä seuranneessa SLIMO-projektissa (2011–2013) edelleen kehitettiin mallia tehden siihen uusi käyttöliittymä ja siirtämällä ohjelmisto uudelle alustalle. Näissä projekteissa vian simulointi perustui kuitenkin yksittäisen vian esiintyvyyteen ja todennäköisyyteen keskijänniteverkossa. SKUTMA- ja SLIMO-projektien pohjalta perustettu Virtaveikot Oy kehitti edelleen verkon monivikamallin, jollainen tilanne verkossa esiintyy myrskyjen yhteydessä. Monivikatilanteessa verkossa on monta yhtäaikaista vikaa.

## Laskentaperiaate

Jokainen verkon vika tulee erottaa ensi tilassa verkosta avaamalla verkon käsin ohjattuja tai kaukokäytettäviä erottimia. Näin vika-alue saadaan rajattua mahdollisimman nopeasti mahdollisimman pieneksi. Tässä yhteydessä tulee ottaa huomioon myös varasyöttöyhteyksien sijainti sekä rengasyhteydet. Koska erottimilla on tietty toiminta-aika, käsin ohjattavilla erottimilla keskimäärin yksi tunti ja kaukokäytettävillä erottimilla kymmenen minuuttia, vaikuttaa tämä kytkentäaika samoin kuin vian korjausaika keskeytyksestä aiheutuvan haitan (KAH) suuruuteen.



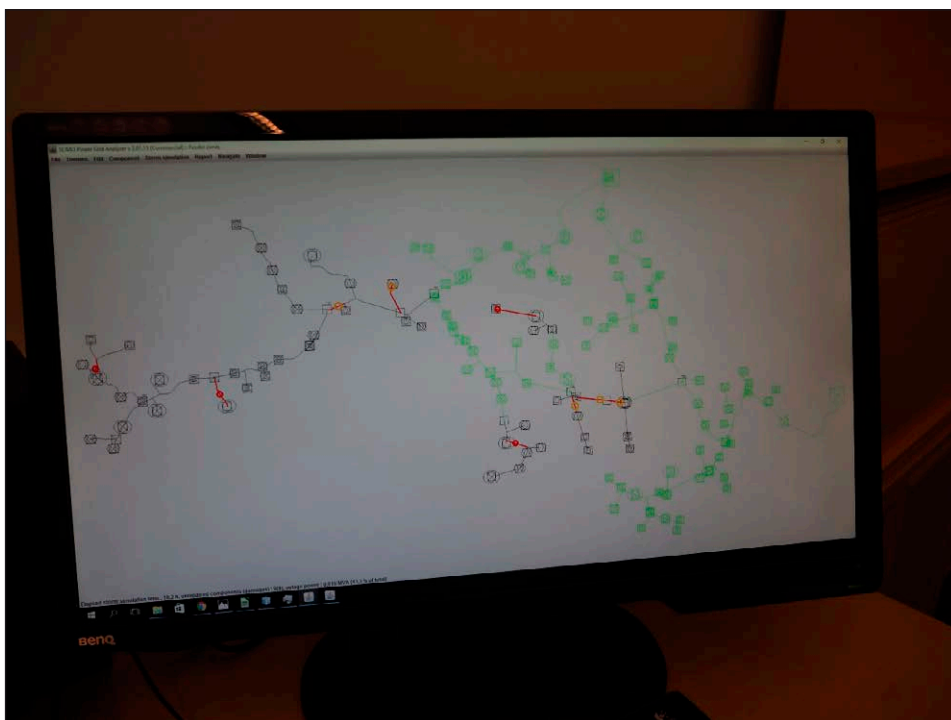
Vian korjausajan suuruuteen vaikuttaa lisäksi se, onko kyseessä avojohtoverkon vika vai kaapelivika, sekä se, sijaitseeko korjattava kohde tien vieressä. Yksittäisen vian vikataajuus saadaan selville keskijänniteverkon vikatilastojen perusteella. Toisaalta vikataajuuteen vaikuttavat myös verkon ikä ja iän seurauksena tapahtuva rappeutuminen.

Myrskytilanteessa verkossa saattaa esiintyä kuitenkin yksittäisten vikojen sijaan monta yhtäaikaista vikaa. Monen yhtäaikaisen vian esiintyvyyttä on kuitenkin vaikeaa – ellei mahdotonta – ennustaa verkon vikatilastojen perusteella. Tämän takia onkin kehitetty simulointimalli, jossa verkon yhtäaikaisia vikoja tuotetaan satunnaisesti. Tätä voitaneen kutsua sovellukseksi Monte Carlo -menetelmästä.

Myrskymallissa jakeluverkon maa-aluetta pommitetaan säädettävällä iskutiheydellä satunnaisesti. Yksittäinen pommi kuvaa kaatuvaa puuta. Mikäli tällainen kaatuva puu osuu verkkoon, jota ei ole maakaapeloitu tai joka ei sijaitse avomaalla, syntyy jakeluverkkoon vika. Vika-aluetta voidaan rajata 10 minuutin kuluessa kaukokäytettävillä erottimilla ja yhden tunnin kuluessa käsikäyttöisillä erottimilla. Myös maastokatkaisijoiden toiminta huomioidaan, mikäli sellaisia on asennettu verkkoon. Verkkoa aletaan odotusajan jälkeen korjata määrättyllä strategialla. Erilaisia strategiavaihtoehtoja on korjata vikoja niiden esiintymisjärjestyksessä, vian vikalaajuuden perusteella, lähdön alusta lähtien tai strategialla, jossa ensin korjataan helpoimmin korjattavat viat, esim. viat teiden vieressä. Lisäksi huomioidaan käytettävissä olevien vikapartioiden määrä.

Tuloksena simulaatiosta saadaan keskeytysteho ja energia, keskeytysaika sekä keskeytyksestä aiheutuva taloudellinen haitta (outage cost). Tätä keskeytyksestä aiheutuvaa taloudellista haittaa käytetään tunnuslukuna vertailtaessa toimenpiteitä, joita verkolle tulee tehdä myrskyvaurioiden rajaamiseksi ja vähentämiseksi.

Laskentatehtävänä yhden myrskytilanteen simulointi vaatii paljon aikaa ja prosessoritehoa. Lisäksi vaaditaan useamman erilaisen myrskyn simulointia, jotta ilmiöön saadaan riittävästi tilastollisuutta. Prosessoritehoa on mahdollisuus hankkia ns. virtuaalitietokoneista pilvipalveluna, jolloin tavallisen kannettavan salkkumikron neljän laskentatimin sijasta voidaan ilmiön simulointiin valjastaa satakin laskentaydintä kerralla. Tämä vähentää huomattavasti laskentaan kuluvaa aikaa. Optimoinnin tuloksena saadaan esiintyvää myrskyä kohti laskettuna merkittävimmät perusparannuskohteet verkolle, näiden perusparannuskohteiden hinta sekä niiden vaikutus myrskystä aiheutuvaan taloudelliseen haittaan.



**KUVA 1. Esimerkkiverkossa mustat johto-osuudet ovat vikaantuneita. Viat ovat punaisilla ympyröillä merkityissä paikoissa (kuva Juha Korpijärvi)**

## Yhteenveto

Mikkelin ammattikorkeakoulun projektien pohjalta kehitetyssä sähkönjakeluverkon myrskysimulaatiomallissa mallinnetaan usean yhtäaikaisen vian esiintyvyyttä verkossa. Simuloimalla useampaa erilaista myrskytilannetta saadaan selville ne verkkoinvestoinnit, joilla on merkittävin vaikutus keskeytyksestä aiheutuvan haitan vähentämiseksi. Yhdistämällä saadut tulokset yksittäisistä vioista saatuun verkkodataan voidaan verkkoinvestoinnit kohdistaa parhaalla mahdollisella tavalla, jonka avulla on mahdollisuus saada aikaan merkittäviä liiketaloudellisia ja kansantaloudellisia säästöjä.

## Lähteet

Sähkönsiirtoyrytysten kunnossapidon taloudellinen malli – SKUTMA, Loppuraportti, Mikkelin ammattikorkeakoulu, 2010

Sähkönjakeluverkko liiketoiminnan mallintaminen ja optimointi – SLIMO, Loppuraportti, Mikkelin ammattikorkeakoulu, 2014

