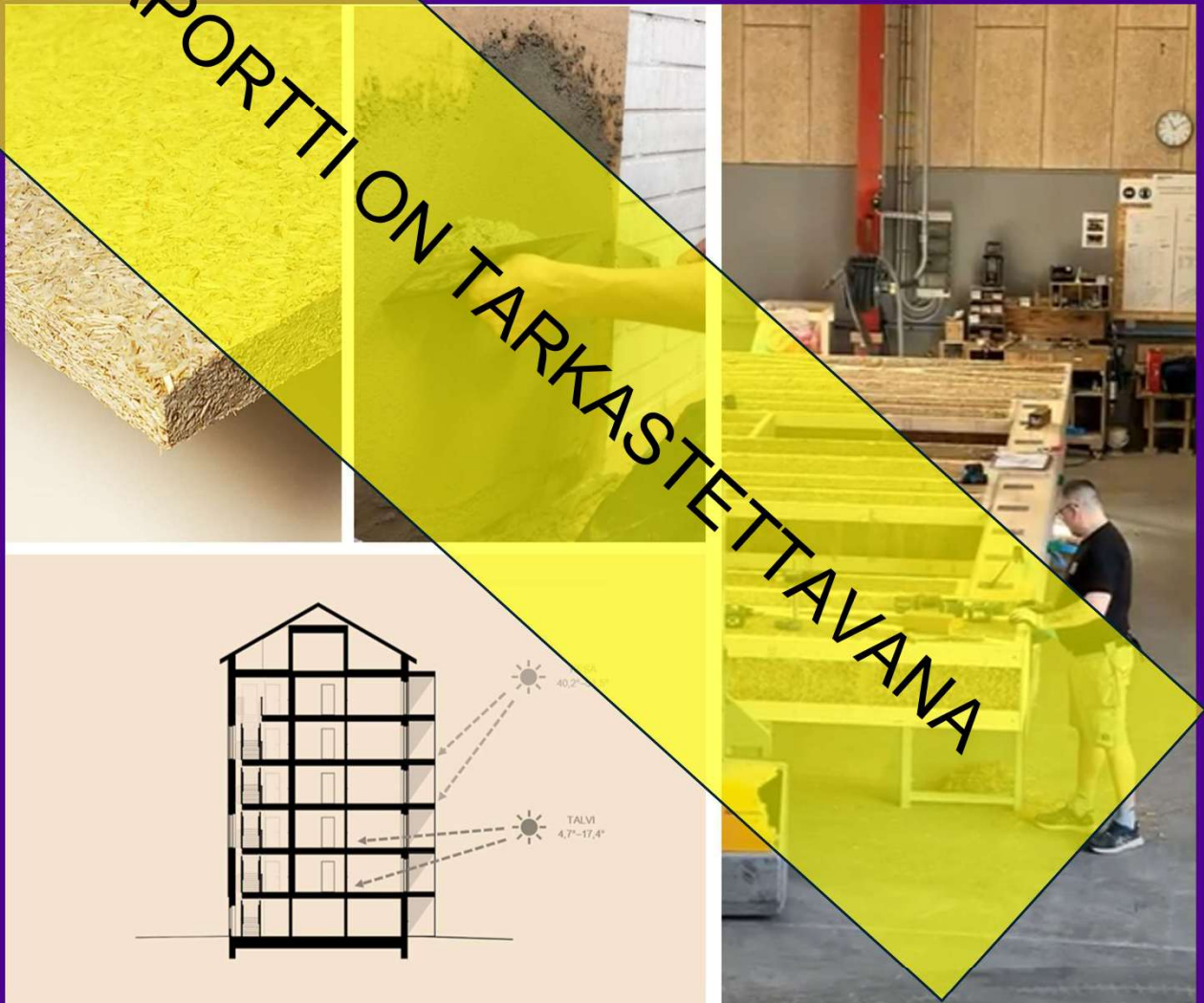


Mikael Westermarck, Ilkka Tuurala, Milla Virkki, Petteri Huttunen, Teemu Jokela, Jaakko Hietikko, Johanna Liblik, Pauli Karjala, Hannu Turunen, Matti Kilpiäinen, Timo Jokinen ja Juha Vinha

## STALK – Korresta kerrostaloksi

RAPORTTI ON TARKASTETTAVANA



Copyright © 2025 Tekijät



Tämä teos on lisensoitu Creative Commons Nimeä 4.0 Kansainvälinen (CC BY 4.0) -lisenssillä. Tarkastele lisenssiä osoitteessa: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fi>

Tampereen yliopisto. Rakennustekniikka. Tutkimusraportti 10

ISBN 978-952-03-4021-6 (verkkojulkaisu)

ISSN 2669-8838 (verkkoaineisto)

Julkaisun pysyvä linkki: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-03-4021-6>

Tampere 2025

Tähän julkaisuun liittyvät tiedostot tulevat saataville seuraaviin internet-osoitteisiin:

<https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/tutkimusprojektit/stalk-ja-biosivu/>

## Tiivistelmä

Mikael Westermarck, Ilkka Tuurala, Milla Virkki, Petteri Huttunen, Teemu Jokela, Jaakko Hietikko, Johanna Liblik, Pauli Karjala, Hannu Turunen, Matti Kilpiäinen, Timo Jokinen ja Juha Vinha

STALK – Korresta kerrostaloksi. Loppuraportti

Tampereen yliopisto. Rakennustekniikka. Tutkimusraportti 10. 105 s.

Asiasanat: olkielementti, savirappaus, järviruokolevy, kutterinlastu, kevytsavi, rakenteiden kosteustekninen toiminta, luonnonmukainen rakentaminen, ilmastonmuutos

---

Stalk-hankkeessa on tarkasteltu olkielementeillä eristetyn kerrostalon ulkoseinän rakenneratkaisujen rakennusfysikaalista toimintaa laskennallisesti ja kokeellisesti, sekä määritetty edellytykset toteuttaa kosteusturvallisia rakenteita nykyisissä ja tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa. Hankkeessa tutkittiin myös kutterinlastulla eristetyn yläpohjan sisäistä konvektiota, ja molempien rakenteiden (ulkoseinä ja yläpohja) paloturvallisuutta selvitettiin luonnonmukaisen kerrostalon toiminnallisessa palomitoituksessa. Biopohjaisten eristemateriaalien (ja myös puurakenteiden) palonsuojaverhouksiksi kehitettiin hankkeessa uuden tyyppinen savirappaus, jossa oli poikkeuksellisen korkea biomateriaalipitoisuus rappauksen palonsuojakyvyn parantamiseksi. Pohjarappauskerroksessa käytetty biohiili toimii samalla biopohjaisen hiilen pitkäaikaisena varastona. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu osallistui hankkeeseen kehittämällä järviruosta ja tärkkelyksestä koostuvan sisäverhouslevyn ja määrittelemällä levyn tuotantoparametrit sekä testaamalla levyn mekaanista lujuutta ja palo-ominaisuuksia. Lisäksi yksittäisiä testejä tehtiin savesta ja hampunpäistäreestä koostuvalla kevytsavieristeellä, biohiililaatalla ja nanoselluloosapinnoituksella. Mitattuja ominaisuuksia voidaan hyödyntää tutkittaessa rakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa niin käsinlaskentamenetelmillä kuin tietokonemallinnuksellakin.

Tutkimus on tuottanut käytännön työkaluja, mm. raja-arvoja rakennekerroksille, kuten sisäpinnalle, biopohjaiselle lämmöneristeelle, tuulensuojalle ja ulkoverhoukselle, jotta rakenteet olisivat kosteus- ja paloturvallisia myös kerrostalorakentamisessa. Olkea voidaan tutkimustulosten mukaan käyttää nykyvaatimusten mukaisissa ulkovaipparakenteissa. Kuten avohuokoisella lämmöneristyksellä varustetut ulkoseinärakenteet yleensä, myös olkieristeiset rakenteet toimivat parhaiten riittävän lämmönvastuksen omaavan tuulensuojalevyn kanssa, ja levyn tulisi lisäksi olla vähintään homehtumisherkkyyssluokassa HHL 2. Kutterinlastulla ja sen sekoituksilla eristetyissä yläpohjarakenteissa esiintyi sisäistä konvektiota, joka korreloi melko hyvin lasketun muunnetun Rayleighin luvun mukaan. Eroja eri materiaalien välillä oli, mutta kokonaisuutta katsoen sisäistä konvektiota voi ennustaa materiaalin ilmanläpäisevyyden perusteella. Pohjoisessa ilmastossamme ulkoseinä- ja yläpohjarakenteiden sisäpintaan tarvitaan lisäksi vanerin luokkaa oleva vesihöyryn vastus. Kerrostalorakentamisessa biopohjaiset materiaalit on palonsuojattava pintaluokan A2 materiaaleilla, jotka suojaavat rakennetta palolta 30 minuuttia sisäpinnassa ja 10 minuuttia tuulensuojakerroksessa. Nämä tutkimustulokset ovat hyödynnettävissä sekä uudis- että korjausrakentamisessa.

Tutkimusten yhteisenä tavoitteena oli lisätä ymmärrystä biopohjaisista rakennusmateriaaleista ja löytää niille sopivia ratkaisuja kerrostalorakentamiseen, mikä osoitti, että luonnonmukaisia materiaaleja voidaan hyödyntää rakentamisessa nykyistä laajemmin.

## Abstract

Mikael Westermarck, Ilkka Tuurala, Milla Virkki, Petteri Huttunen, Teemu Jokela, Jaakko Hietikko, Pauli Karjala, Hannu Turunen, Matti Kilpiäinen, Timo Jokinen and Juha Vinha

STALK - From stalk to high-rise building. Final report.

Tampere University. Faculty of Built Environment. Research report 10. 105 p.

Keywords: straw element, clay plaster, lake reed board, wood shavings, light clay, moisture performance of structures, nature-based building, climate change

---

The Stalk project has examined the computational and experimental behaviour of the exterior wall structure of a high-rise building insulated with straw elements and determined the prerequisites for implementing moisture-safe structures in current and future climatic conditions. The project also studied the internal convection of the roof insulated with wood shavings. The fire safety of these exterior wall and roof structures was investigated in the performance-based fire design of a nature-based high-rise building. A new type of clay plaster with high biomaterial content was developed in the project for the fire protective cladding of bio-based insulation materials (and wooden structures). The biochar used in the base plaster layer also serves as a long-term storage of bio-based carbon. The South-Eastern Finland University of Applied Sciences participated in the project by developing an interior cladding panel consisting of common reed and starch, defining the production parameters of the board, as well as testing the mechanical strength and fire properties of the board. In addition, individual tests were carried out with light clay insulation consisting of clay and hemp shives, biochar slab and nanocellulose coating.

The research has produced practical tools, such as limit values for structural layers, such as the inner surface, bio-based thermal insulation, wind protection and exterior cladding, to ensure that the structures are moisture and fire safe also in high-rise construction. According to the research results, straw can be used in outer envelope structures that meet current requirements. Straw insulated structures work best with wind protection boards with sufficient heat resistance, and the board should also be at least in mould susceptibility class HHL 2. The phenomenon of internal convection was observed in roof structures that were insulated with wood shavings, which correlated fairly well with the calculated modified Rayleigh number. There were differences between the various material, but overall, internal convection can be predicted based on the air permeability of the material. In our northern climate, the inner surface of the outer envelope also needs a water vapour resistance like plywood. In high-rise construction, bio-based materials must be fire-protected with reaction-to-fire class A2 materials, which protect the structure from fire for 30 minutes on the inner surface and 10 minutes on the wind protection layer. These research results can be utilised in both new construction and renovation.

The studies aimed to expand knowledge of bio-based building materials and identify optimal structural solutions for high-rise construction, demonstrating the broader potential of natural materials in modern building practices.

## Alkusanat

Tämä raportti on laadittu useiden tahojen toimesta. Eri luvuista vastaavina kirjoittajina ovat toimineet:

- Alkusanat ja johdanto: Mikael Westermarck
- Rakennusfysikaaliset kokeet: Milla Virkki ja Pauli Karjala
- Mekaaniset materiaalikokeet: Hannu Turunen, Matti Kilpiäinen
- Palokokeet: Mikael Westermarck, Johanna Liblik, Hannu Turunen
- Rakenteiden kenttäkokeet: Ilkka Tuurala
- Rakenteiden laskennalliset tarkastelut: Petteri Huttunen
- Kutterieristetyin yläpohjan konvektiotutkimus: Teemu Jokela, Jaakko Hietikko
- Palosimulaatio: Timo Jokinen

Hankkeen vastuullisena johtajana on toiminut professori Juha Vinha ja projektipäällikkönä Mikael Westermarck Tampereen yliopistosta. Väitöskirjatutkija Mika Alanen on kommentoinut palonsuojatuotteiden kehitystyötä sekä tutkimusapulaiset Sami Kiviaho ja Matti Hautala ovat tehneet savirappauksen koekappaleita sekä siihen liittyvää raaka-aineiden testausta Tampereen yliopistossa.

Stalk-hankkeen yhteydessä on tehty tutkimuksia lisäksi ostettuina palveluina muissakin organisaatioissa. Nämä tutkimukset, toteuttajatahot ja vastuuhenkilöt on lueteltu alla:

- Toiminnallinen palosuunnittelu ja palosimulaatio, Palotekninen insinööritoimisto, Markku Kauriala, vastuuhenkilö Timo Jokinen
- Savirappauksen palotekninen konsultointi, Johanna Liblik

Hankkeella on ollut osaava ohjausryhmä, joka on antanut palautetta ja osallistunut keskusteluihin hankkeen tuloksista. Ohjausryhmän jäseninä ovat olleet:

- Juha Vinha, Tampereen yliopisto, Rakennusfysiikan tutkimusryhmä (puheenjohtaja)
- Mikael Westermarck, Tampereen yliopisto, Rakennusfysiikan tutkimusryhmä
- Milla Virkki, Tampereen yliopisto, Rakennusfysiikan tutkimusryhmä
- Ilkka Tuurala, Tampereen yliopisto, Rakennusfysiikan tutkimusryhmä
- Pauli Karjala, Tampereen yliopisto, Rakennusfysiikan tutkimusryhmä
- Maija Stenvall ja Saimi Lappalainen, Ympäristöministeriö
- Jukka Sala, Anora Industria Oy
- Markku Suutari, Carbons Oy
- Paul Lynch, Ecococon Nordic Oy
- Kimmo Peltola, Fescon Oy
- Tuomo Hilli, Fifth Innovation Oy
- Nikolas Salomaa, nolla\_E Oy
- Sauli Tikka, Pikkalan kaislanleikku Oy
- Lauri Leppänen, Restart Oy
- Suveka Kymäläinen, Savimestarit Oy
- Juha Vihma, Sweco Oy
- Timo Hokkanen, Puusto- ja kiinteistöhoito – Luonapuu

- Timo Kallio, Tmi Timo Kallio
- Rauli Lautkankare, Turun ammattikorkeakoulu
- Tanja Kukkola, Kouvolan kaupunki
- Matti Kilpiäinen, Keski-Suomen ammattikorkeakoulu

Hankkeen yhteydessä on tehty diplomityö, jonka tekijänä on ollut Milla Virkki.

Laboratoriotyöntekijät Tomi Vuori ja Toni Järvinen Tampereen yliopistosta ovat lisäksi avustaneet tärkeällä työpanoksella hankkeen toteutusta.

Stalk-hanke on saanut tukea ympäristöministeriöltä Vähähiilisen rakennetun ympäristön ohjelmasta, jonka rahoitus tulee EU:n kertaluonteisesta elpymisvälineestä (RRF). Hanketta ovat rahoittaneet myös Tampereen yliopisto omarahoitusosuudella, Rakennustuotteiden Laatu -säätiö ja seuraavat yritykset rahoitusosuudella ja/tai työosuudella:

- Anora Industria Oy
- Carbons Oy
- Ecococon Nordic Oy
- Fescon Oy
- Fifth Innovation Oy / Ikarbon
- nolla\_E Oy
- Pikkalan kaislanleikku Oy
- Savimestarit Oy
- Sweco Oy

Stalk-hankkeen tutkijat haluavat kiittää kaikkia hankkeiden osapuolia mielenkiintoisen ja ajankohtaisen hankkeen toteutuksesta.

Tampereella 30.11.2025

Tekijät

## Sisällys

<b>1</b>	<b>Johdanto</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Tutkitut luonnonmukaiset materiaalit</b> .....	<b>1</b>
2.1	Olkielementti.....	1
2.2	UUSI Järviruoko-tärkkelyslevy .....	2
2.3	Järviruoko-tärkkelyslevy .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.4	Savirappaus .....	6
2.5	Biohiillaatta .....	8
2.6	Kutterinlastu ja sahanpuru.....	9
2.7	Nanoselluloosa pinnoite .....	10
2.8	Savi-hampunpäistäre-eriste eli kevytsavi.....	10
<b>3</b>	<b>Materiaalikoheet</b> .....	<b>13</b>
3.1	Rakennusfysikaaliset materiaalikoheet .....	13
3.1.1	Kokeiden lyhyt kuvaus .....	13
3.1.2	Vesihöyryn adsorptiokyky kaikille tutkituille tuotteille .....	15
3.1.3	Järviruoko-tärkkelyslevyn tulokset.....	16
3.1.4	Savirappausten tulokset .....	18
3.1.5	Biohiillaatan tulokset .....	23
3.1.6	Nanoselluloosa-pinnoitteen tulokset.....	25
3.1.7	Savi-hampunpäistäre-eristeen (kevytsavi) tulokset.....	28
3.2	Homehtumisherkkyyshäkökokeet .....	32
3.3	Palotekniset materiaalikoheet kartiokalorimetrillä .....	34
3.3.1	Testaaminen kartiokalorimetrialaitteella .....	34
3.3.2	Savirappausten palokokeet .....	35
3.3.3	Järviruoko-tärkkelyslevyn palokokeet.....	39
3.3.4	Nanoselluloosapinnoitteen palokokeet.....	40
3.3.5	Savi-hampunpäistäre-eristeen palokokeet .....	40
3.4	Järviruoko-tärkkelyslevyn mekaaniset materiaalikoheet .....	41
3.4.1	Taivutuslujuus.....	44
3.4.2	Leikkauslujuus .....	48
3.4.3	Kiinnikkeen pitävyys .....	53
3.4.4	Mekaanisten materiaalikoheiden yhteenveto .....	56
<b>4</b>	<b>Rakennetutkimukset</b> .....	<b>59</b>
4.1	Olkielementti-ulkoseinäarakenteiden kenttäkokeet.....	59
4.1.1	Rakenteet .....	59
4.1.2	Ulko- ja sisäilman olosuhteet tutkimusjakson aikana .....	64
4.1.3	Tulokset .....	66
4.1.4	Homehtumiselle otollisten olosuhteiden esiintyvyys.....	69
4.1.5	Yhteenveto tuloksista ja johtopäätökset .....	72
4.2	Olkielementtiulkoseinäarakenteen laskennalliset tarkastelut.....	74
4.2.1	Koerakenteiden vertailusimuloinnit.....	78
4.2.2	Simuloinnit mitoitulosuhteissa.....	85
4.2.3	Johtopäätökset ja yhteenveto.....	92
4.3	Kutterinlastueristeiden yläpohjakokeet – sisäinen konvektio .....	94
4.3.1	Rakenteiden kuvaus .....	94
4.3.2	Koejärjestely .....	97
4.3.3	Tulokset .....	98
4.4	Palosimulaatio .....	100
<b>5</b>	<b>Johtopäätökset</b> .....	<b>101</b>
	<b>Lähdeluettelo</b> .....	<b>104</b>



# 1 Johdanto

Rakentamisessa vähähiilisimmäksi vaihtoehdoksi ovat osoittautuneet puurunkoiset rakennukset, mutta niidenkin hiilijalanjälkiä voitaisiin vielä alentaa noin 10–15 % täydentämällä niitä luonnonmukaisilla lämmöneristeillä ja pintamateriaaleilla [1]. Jotta uudella rakennustavalla olisi suuria positiivisia ilmastovaikutuksia, olisi sillä voitava rakentaa myös kerrostaloja. Stalk-hankkeessa keskityttiin kerrostalorakentamiseen puurunkoisilla olkielementeillä, ja tutkittiin näiden ulkoseinärakenteiden soveltumista pohjoiseen ilmastoomme sekä kerrostalorakentamisen tiukkoihin palomääräyksiin. Hankkeessa tutkittiin edelleen myös kutterilastueristeen soveltumista yläpohjan eristämiseen, sekä kehitettiin uusia luonnonmukaisia rakennustuotteita.

Hanke koostui neljästä työpaketista:

- TP1:ssä tutkittiin olkielementin kosteus- ja lämpötekniistä toimintaa pohjoisessa ilmastossa ja tavoitteena oli määrittää rakenteen parhaiten toimivat sisä- ja ulkopintaratkaisut.
- TP2:ssa kehitettiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun toimesta rakennuslevyä järviruo'osta ja biopohjaisesta sideaineista kuten tärkkelyksestä. Tavoitteena oli kehittää lämpöä eristävä tuulensuojalevy, jota voitaisiin käyttää huokoisen puukuitulevyn sijaan olkielementtirakenteen ulkopinnassa ja samalla edistää ravinteiden poistamista rehevöityneistä vesistöistä.
- TP3:ssa etsittiin parasta koostumusta olkielementtiä palolta suojaavalle savirappaukselle. Tämä materiaalikehitys jatkoi Ecosafe-hankkeessa ja muissa eurooppalaisissa hankkeissa tehtyä tutkimusta savirappauksen palonsuojaominaisuuksista. Kerrostalorakentamisen pullonkaulaksi on muodostunut suomalaisessa palonormistossa paljon bioainesta sisältävien rakenteiden paloturvallisuus. Tavoitteena oli osoittaa luonnonmukaisten rakenteiden ja rakennuksen paloturvallisuus PO-menettelyn mukaisella palosimulaatiolla.
- TP4:ssä laadittiin koulutuspaketti hankkeen ohessa suunniteltavasta luonnonmukaisesta kerrostalosta sekä luonnonmukaisista rakennustuotteista, joita kartoitettiin Nature CO2 – hankkeessa. Koulutuspaketti sisältää tietoa rakennusjärjestelmän teknisistä ominaisuuksista, talotekniikasta, ilmastovaikutuksista sekä sisäilman terveysvaikutuksista. Esittelyaineistoa käytetään eri rakennusalan koulutustilaisuuksissa, ja aineisto tulee vapaasti saataville verkkoon.

## 2 Tutkitut luonnonmukaiset materiaalit

### 2.1 Olkielementti

Tutkittava olkielementti oli Ecococon Oy:n valmistama ja maahantuoma valmiselementti, joka on valmistettu Slovakiassa. Olkielementin tavanomainen paksuus on 400 mm, mutta sitä valmistetaan myös 300 mm paksuudella. Olkielementti valmistetaan teollisesti tuotantolinjalla puristamalla olkea puurunkoon siten, että oljen suunta on 90 asteen kulmassa elementin pintaan nähden. Olki on valmiissa elementissä puristuksessa. Valmistajan ilmoittama oljen tiheys elementissä on 115 kg/m<sup>3</sup> [2]. Lopuksi olkipinta on tasattu leikkaamalla. Valmistajan ilmoittama lämmönjohtavuus olkielementille on 0.056 W/(mK) [3].

Koerakennuskokeessa valmiin vanerilla 400 mm x 600 mm x 2400 mm elementin painoksi punnittiin n. 90 kg. Painosta arviolta 65 kg oli olkea. Oljen tiheydeksi saatiin arviolta 110–120 kg/m<sup>3</sup>, joten tiheys vastaa hyvin valmistajan ilmoittamaa tiheyttä 115 kg/m<sup>3</sup>.



Kuva 2.1 Olkielementti [4]

Olkielementtiä tutkittiin koerakennuskokeina ja laskennallisilla tarkasteluilla. Tässä hankkeessa ei materiaalikokein tutkittu olkielementin materiaaliominaisuuksia. Tämä olisi edellyttänyt koekappaleiden valmistusta siten, että ne vastaavat oljen tiheyttä ja rakennetta valmiissa elementissä.

## 2.2 Järviruoko-tärkkelyslevy

Järviruoko-tärkkelyslevyä kehitettiin Kakkoois-Suomen ammattikorkeakoulussa. Kehittämistyö tavoitteeksi asetettiin silputusta järviruosta valmistettava, tuulensuojalevyksi soveltuva huokoinen ja riittävän luja rakennuslevy, jonka tiheys on alle 300 kg/m<sup>3</sup>. Tavoitteena oli myös mahdollisimman vähähiilinen, lyhytkiertoisiin kasviraaka-aineisiin perustuvan materiaalin kehittäminen.

Järviruokolevystä valmistettiin myös tiheä, yli 500 kg/m<sup>3</sup> versio, joka voisi soveltua rakennuksen sisäpintalevyksi (kuva 2.3). Rakennusfysikaaliset ja mekaaniset materiaalikokeet tehtiin järviruoko-tärkkelyslevyn huokoiselle versiolle (kuva 2.4).

Koelevyjen valmistuksessa käytettiin Pikkalan kaislanleikkuu Oy:n tuottamaa järviruokosilppua. Järviruoko on korjattu Uudenmaan alueen rannikkoseudulta kevättalvella 2024. Kehitysvaiheessa

koelevyjä valmistettiin karkeammasta, järviruon korjuuvaiheessa silputusta ruosta sekä 8 mm seulalla varustetulla vasaramyllyllä silputusta ruosta (kuva 2.2).



*Kuva 2.2 Jäärviuokolevyjen valmistuksessa käytettyä jäärviuokosilppua.*

Hienojakoisesta silpusta valmistettu huokoinen levy arvioitiin karkeasta silpusta valmistettua levyä tasalaatuisemmaksi, minkä vuoksi testattavat kappaleet valmistettiin hienojakoisesta jäärviuokosilpusta.

Jäärviuokolevyn sideaineeksi valittiin tärkkelys sen hyvän saatavuuden sekä käytettävyyden vuoksi. Tärkkelys on monikäyttöinen teollisuuden raaka-aine, jota saadaan kasviperäisistä raaka-aineista, kuten maissista, vehnästä, perunoista tai muista mukulakasveista. Tärkkelyksiä käytetään elintarvikkeiden lisäksi hyvin laajasti teollisissa sovelluksissa, kuten liiman valmistuksessa ja tekstiiliteollisuudessa, mutta etenkin paperin- ja kartongin valmistuksessa. Tärkkelyksen soveltuvuutta lämpöpuristustekniikalla valmistettavan kasvikomposiitin sideaineeksi on aiemmin tutkittu monissa eri tutkimushankkeissa. Tärkkelystä pidetään sopivana moniin teollisiin sovelluksiin, koska se on biohajoavaa, laajalti saatavilla olevaa, myrkytöntä ja hinnaltaan kilpailukykyistä. Tärkkelyksen rakenne mahdollistaa geelitymisprosessin ja tärkkelys voi toimia erilaisiin biomassoihin perustuvien komposiittimateriaalien sideaineena [5].

Jäärviuoko-tärkkelyslevyn sideaineeksi testattiin ohra- ja perunatärkkelystä, joiden valintaan vaikutti niiden valmistukseen käytettävän raaka-aineen kotimaisuus sekä saatavuus ja hinta.



Järviruoko,  
karkea silppu



Huokoinen levy,  
vahvuus 20 mm,  
tiheys n 500 kg/m<sup>3</sup>



Tiheä levy,  
vahvuus 10 mm,  
tiheys n 600 kg/m<sup>3</sup>



Järviruoko,  
hieno silppu



Huokoinen levy,  
vahvuus 25 mm,  
tiheys n 300 kg/m<sup>3</sup>



Tiheä levy,  
vahvuus 10 mm,  
tiheys n 600 kg/m<sup>3</sup>

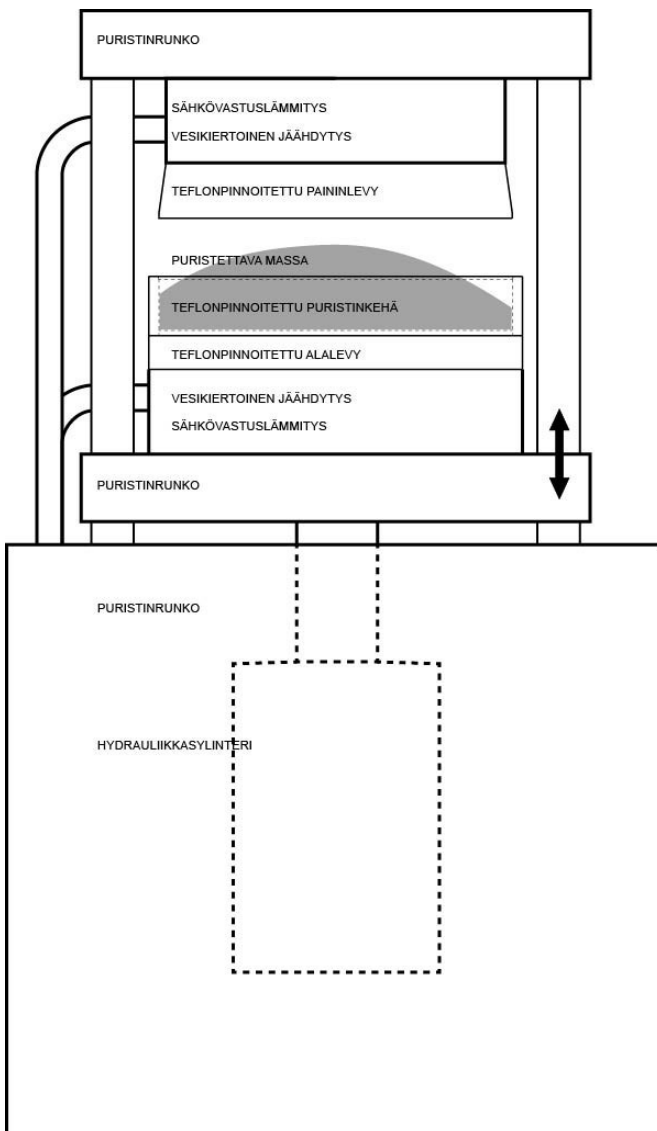
*Kuva 2.3 Kuvakooste Stalk-hankkeessa kehitetyn järviruoko-tärkkelyslevyn eri versioista sekä niihin käytetyistä järviruokosilpuista.*



*Kuva 2.4 Huokoinen järviruoko-tärkkelyslevy*

Koelevyjen valmistuksessa käytetyn seoksen koostumus painoprosentteina oli 52 % ruokosilppua, 33 % lisättyä vettä ja 15 % ohratärkkelystä. Järviruokosilpun kuiva-ainepitoisuus oli 80–85 % ja ohratärkkelyksen kuiva-ainepitoisuus oli 90–94 %.

Järviruoko-tärkkelyslevyjen koekappaleiden valmistuksessa käytettiin lämpöpuristustekniikkaa, jossa Järviruoko-tärkkelysmassaa puristetaan lämmitettyjen tasojen välissä haluttuun tiheyteen ja vahvuuteen (kuva 2.5). Koelevyt valmistetaan Scwabethan s200 laboriopuristimella. Koelevyjen valmistusta varten valmistettiin erillinen alumiinirakenteinen puristustyökalu, jonka puristus-pinta-ala on 267 mm x 267 mm. Työkalun avulla puristettava massa saatiin puristettua haluttuun vahvuuteen ja muotoon. Työkalu pinnoitettiin teflonpinnoitteella, ruokotärkkelysmassan kiinnitarttumisen estämiseksi.



Kuva 2.5 Koelevyjen valmistuksessa käytetyn puristinlaitteen ja puristustyökalun periaatepiirros

Seoksesta valmistettiin levyjä lämpöpuristamalla 220 °C lämpötilassa 10 minuutin ajan. Valmiiden levyjen on annettu kuivua noin 12 tuntia, jonka jälkeen ne on hiottu lopulliseen paksuuteensa. Testattujen levyjen paksuus oli 25 mm ja tiheys noin 250 kg/m<sup>3</sup>.

Järviruoko-tärkkelyslevylle toteutettiin rakennusfysikaalisia ja mekaanisia materiaalikokeita; lämmönjohtavuuden, ominaislämpökapasiteetin, vesihöyrynläpäisevyyden, hygroskooppisen tasapainokosteuden, vedenimeytymiskeroimen, ilmanläpäisevyyden, vesihöyrynsorptiokyvyn, taivutuslujuuden, leikkauslujuuden ja kiinnikkeen pitävyyden kokeet. Lisäksi levyn pintapaloluokkaa, eli osallistumista paloon, tutkittiin alustavasti kartiokalorimetrikokein.

## 2.3 Savirappaus

Savirappauksen kehitystyöllä pyrittiin kehittämään savilaasti, joka antaisi perinteistä savi-hiekkarappausta paremman palonsuojakyvyn. Savirappauksen koostumuksen ja paksuuden osalta oli tavoitteena määritellä laasti, joka olisi helppo rapata, ja joka tarjoaisi minimipaksuudella halutut palonsuojausajat eli 10 ja 30 minuuttia. Pohjarappauksen palonsuojakykyä pyrittiin parantamaan biomateriaalien määrää lisäämällä, ja kokeita tehtiin useilla biomateriaaleilla sekä seossuhteilla. Biomateriaalien määrälle oli selvä yläraja, koska muuten laasteista tuli liian joustavia, eli alustaan puristettu laasti kimposi takaisin ja putosi alas. Palonsuojana toimivan savirappauksen koostumuksen suunnittelussa on myös otettava huomioon kunkin biopohjaisen raaka-aineen lämpöarvo, jotta koko savirappauksen lämpöarvo ei ylitä 3 MJ/kg, mikä on vaatimus pintaluokan A2 täyttämiseksi. Parhaat pohjalaastit saatiin sekoittamalla laastiin biohiiltä tai järviruokoa hienoksi silputtuna, ja savi-hiekka-biohiililaastin päälle kokeiltiin vielä savesta sekä hiekasta koostuvaa pintarappausta sekä savimaalia (taulukko 2.1). Tätä kombinaatiota kutsutaan tässä hankkeessa Stalk-savirappaukseksi.

*Taulukko 2.1 Savirappausten koostumukset sekä verrokkituotteet*

<b>Seoksen koodi</b>	<b>Materiaalin kuvaus</b>		<b>Kuivan saviseoksen tiheys [kg/m<sup>3</sup>]</b>
	<b>Savi**</b>	<b>(Lisäainepitoisuus + pintakäsittely) **</b>	
MoTiRe5Sa	Tiileri 23 %	Ruoko 5 %, hiekka 68 %	1370
MoTiBi6SaCp eli Stalk-savirappaus	1. kerros: Tiileri 14 % 2. kerros: Tiileri 19 % 3. kerros: Savimaali	Biohiili* 6 %, hiekka 80 % Hiekka 81 %	1511
MoFescon***	Valmistuote: Fescon-savirappaus (Tiileri+hiekka)		1700-1800
MoUku***	Valmistuote: Perinteinen savirappaus (SaviUkumaja)		1610-1800

\*Kuusen biohiili.

\*\*Kuivapainon mukaan.

\*\*\*SaviUkun pintalaasti.

Kuva 2.6 esittelee Stalk-savirappauslaastin levityksen. Savirappausjärjestelmä vaatii ensin ohuen kerroksen pohjalaastia, jonka jälkeen päälle levitetään välittömästi paksumpi kerros pohjalaastia. Pohjalaastin on annettava kuivua ennen pintalaastin levittämistä. Samoin pinta lastin on annettava kuivua ennen pinnoittamista savi tärkkelysmaalilla. Koerappauksissa huomattiin, että biohiiltä sisältävä pohjalaasti tarttui perinteistä savi-hiekkalaastia kovemmin pohjamateriaalinsa, mutta näitä lujuuksia ei mitattu.



*Kuva 2.6 Savilaastin levitys (vasemmalla) ja 3 kerroksinen savirappausjärjestelmä, joka koostuu savi-hiekka-biohiilipohjalaastista (tummanharmaa), savi-hiekka-viimeistelylaastista (vaaleanharmaa) ja savi-tärkkelysmaalista (valkoinen väri) (oikealla).*

Stalk-savirappauksen pohjarappauksen koostumus kuivapainoprosentteina on 14 % Tiilerin savijauhetta, 6 % Carbonsin biohiiltä ja 80 % Fesconin hiekkaa. Biohiili on pyrolysoitu kuusesta ja jauhettu 0–2 mm rakeiksi. Hiekasta puolet on raekokoa 0,6–1,2 mm ja puolet raekokoa 1,2–3 mm. Koekappaleiden pohjarappauskerroksen nimellispaksuus oli 13 mm ja pintarappauksen paksuus oli 2 mm. Pintarappaus koostui kuivapainoprosentteina 19 % Tiilerin savijauheesta ja 81 % Fesconin 0–0,6 mm raekoon hiekasta. Koekappaleiden tiheys oli noin 1500 kg/m<sup>3</sup>, ja niille toteutettiin, hygroskooppisen tasapainokosteuden ja vesihöyryn adsorptiokyvyn kokeet sekä savi-tärkkelysmaalilla pinnoitettuna myös vedenimeytymiskertoimen, lämmönjohtavuuden, vesihöyrynläpäisevyyden ja kartiokolorimetrikokeet.

## 2.4 Biohiililaatta

Biohiililaatta on Fifth Innovation Oy:n kehittämä maa- ja metsätalouden sivuvirroista valmistettu materiaali. Raaka-aineet käsitellään mekaanisesti ja kemiallisesti ennen niiden sekoittamista, muovausta ja pyrolysointia. Näin saatuja biohiililaattoja, jolle yritys on antanut nimen Iki Carbon, muistuttaa keramiikkaa, ja on suunniteltu käytettäväksi julkisivuverhouksessa (kuva 2.7 ja 2.8). Biopohjaisten materiaalien muuntaminen biohiilituotteiksi tarjoaa mahdollisuuden pitkän aikavälin hiilenpoistoon rakennustuotteiden valmistuksessa.

Biohiililaatan koekappaleet sahattiin karkeasti vannesahalla levyistä, ja hiottiin nauhahiomakoneella lopullisiin mittoihin. Materiaalia työstettäessä huomattiin isoja eroja levyjen lujuudessa. Koekappaleiden tiheys vaihteli alueella 0,55–0,81 g/cm<sup>3</sup>. Keveimmät koekappaleet sisälsivät isoja yhtenäisiä hiilenpalasia. Materiaalin rakennusfysikaalisista kokeita tehtiin lämmönjohtavuuden, hygroskooppisen tasapainokosteuskäyrän, vesihöyrynläpäisevyyden sekä kapillaarisen vedenimeytymiskertoimen määrittämiseksi. Vedenime- ja vesihöyrynläpäisykokeisiin valikoitiin tasalaatuisia, tiheydeltään noin 0,6 g/cm<sup>3</sup> levyjä. Lämmönjohtavuuskappaleita valmistettiin kaikista levyistä.



Kuva 2.7 Biohiililaatan koekappaleiden ylä- ja alapintojen tekstuuri.



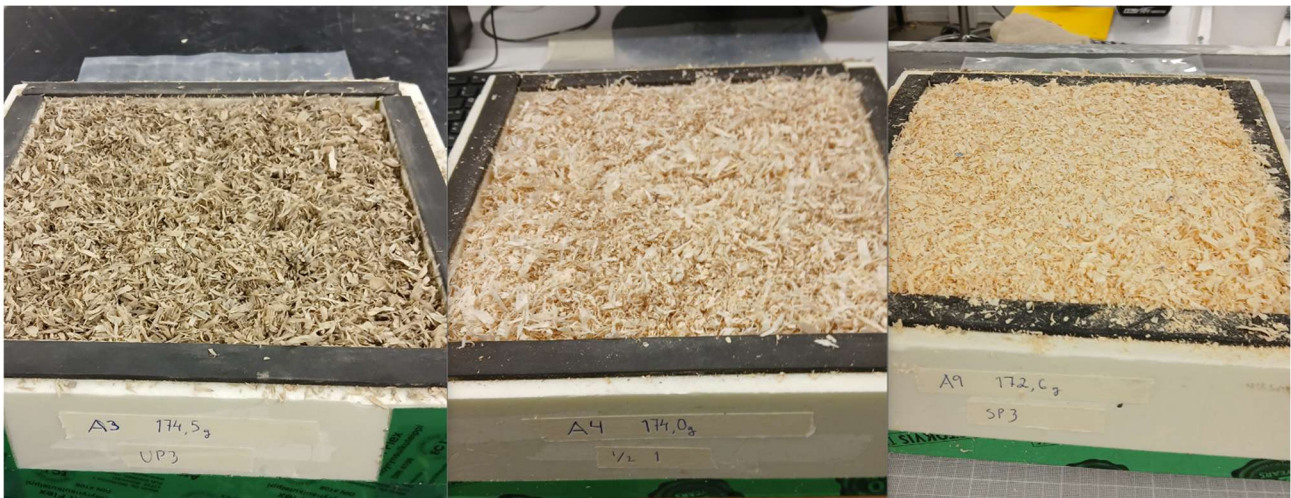
Kuva 2.8 Biohiililaattojen rakenne-eroja

## 2.5 Kutterinlastu ja sahanpuru

Rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteella tutkittiin kutterinlastun, savetetun kutterinlastun sekä kutterinlastun sekä sahanpurun sekoituksen käyttöä yläpohjaeristeenä. Kutterinlastuna tutkimuksessa käytettiin EHTA-eristettä, joka on höylättyä kuusilastua ja joka on tehty tasalaatuiseksi poistamalla tuotteesta hienoaines.

EHTA-kutterinlastun savetus on tehty sekoittamalla savilietettä ja kutterinlastua painosuhteessa 1:1, jonka jälkeen materiaali on kuivattu. Saviliete on puolestaan valmistettu sekoittamalla Tiilerin savijauhoa ja vettä painosuhteessa 1:1.

Sahanpuru, joka sekoitettiin EHTA-kutterinlastuun, haettiin Vilppulan sahalta, missä puru oli säilötty ulkona suureen kasaan. Sahanpuru ei ollut täysin tasalaatuinen vaan sisälsi myös joitakin yksittäisiä suurempia kappaleita kuten puunpalasia ja kiviä. Poikkeamien osuus oli kuitenkin vähäinen. Puru-kutteri-eriste valmistettiin sekoittamalla kutterinlastua ja sahanpurua painosuhteessa 1:1. Sahanpuru ei ollut ehtinyt kuivua samalle tasolle EHTA-kutterinlastun kanssa, joten kuivapainon avulla määritetty painosuhte oli todellisuudessa 2:1, siten että kutterinlastua oli seoksessa enemmän. Edellä kuvatut materiaalit on esitetty kuvassa 2.9.



Kuva 2.9 a) Savetettu kutterinlastu, b) puru-kutteri-sekoitus ja c) kutterinlastu

## 2.6 Nanoselluloosa pinnoite

Mikrofibrilloitua selluloosaa (MFC) on tuotettu Tampereen yliopiston nanoselluloosaryhmässä uudella refiner-tyyppisellä fibrillaattorilla. Raaka-aineena on käytetty koivusta keitettyä kraft-sellua. Sellu on keiton jälkeen kuivattu säilytystä varten ja esijauhettu ennen fibrillointia. Fibrillointi on suoritettu noin 2,0 % kuiva-ainepitoisuudessa lopun ollessa ionivaihdettua vettä.

Nanoselluloosaa laimennettiin noin 1 % kuiva-ainepitoisuuteen ja sillä pinnoitettiin puukuitulevyä ja kuitusementtilevyä. Pinnoitus tehtiin ruiskuttamalla maaliruiskulla yhteensä 8 ohutta kerrosta, jotka kuivattiin infrapunalampulla ennen seuraavan kerroksen ruiskuttamista. Valmiin pinnoitteen paksuus oli noin 20 mikrometriä.

Käytetty puukuitulevy oli Isoplaat 25 mm tuulensuojalevyä. Kuitusementtilevy oli Swisspearl Luja A 9 mm rakennuslevy. Sekä puukuitulevylle että kuitusementtilevylle toteutettiin vesihöyrynläpäisevyyden kokeet sekä pinnoitettuna että pinnoittamattomana. Lisäksi nanoselluloosapinnoitteen pintaluokkaa, eli osallistumista paloon, tutkittiin alustavasti kartiokalorimetrikokeilla.

## 2.7 Savi-hampunpäistäre-eriste eli kevytsavi

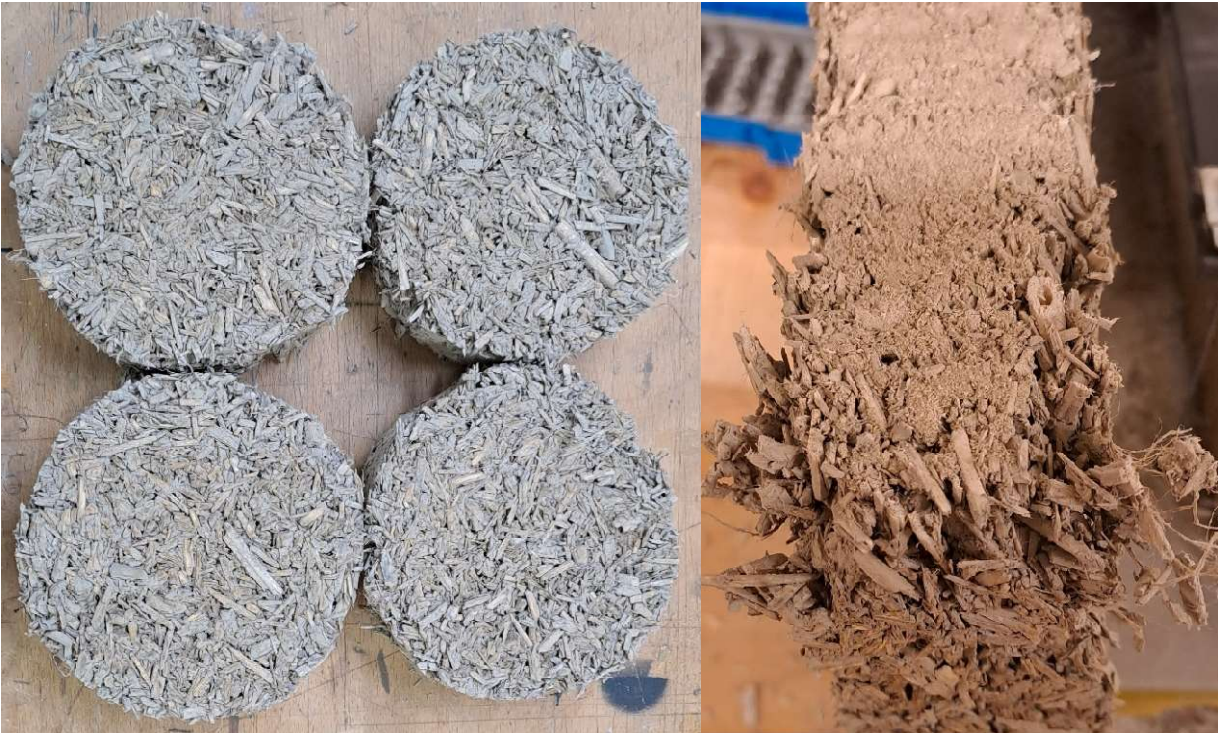
Kevytsaven rakennusfysikaalisia ominaisuuksia tutkittiin lyhyesti osana Stalk hanketta. Tarkoituksena oli kartoittaa materiaalin soveltuvuutta sisäpuoliseen lisälämmöneristykseen. Testattavia materiaaleja kysyttiin muutamista ajankohtaisista tutkimushankkeista. Testattavaksi saatiin lopulta yksi materiaali Kevytsavi 2.0 hankkeesta.

Kevytsaven hampunpäistäreen pituus ja pitoisuus oli huomattavasti suurempi kuin Biosivu hankkeen savi-hampunpäistärelevyissä. Kevytsavesta valmistettiin 300 x 300 x 50 mm<sup>3</sup> kokoisia kappaleita testaukseen. Kevytsavikappaleiden tiheys oli 248 kg/m<sup>3</sup>. Kappaleet olivat erityisesti reunoilta hauraita, ja niistä irtosi palasia käsitellessä. Koekappaleiden valmistuksessa kokeiltiin

kuppioranterää, mutta tämä repi materiaalia pahasti. Vanne- ja kuviosahaa käyttäen saatiin valmistettua kohtuullisen siistejä koekappaleita. Kevytsaven pintatekstuuri, leikkauspinnat ja koekappaleita on esitetty kuvissa 2.10–2.11.



*Kuva 2.10 Kevytsavikappale a) ylhäältä sekä b) sivusta kuvattuna.*



*Kuva 2.11 a) Pyöreitä 140 mm koekappaleita sekä b) lähikuva sahauspinnasta.*

Materiaalin rakennusfysikaalisista ominaisuuksista määritettiin sen lämmönjohtavuus, vesihöyrynläpäisevyys sekä kapillaarinen vedenimeytymiskerroin. Materiaalin paloteknisiä ominaisuuksia tutkittiin alustavasti kartiokalomietrikokeilla, jotta saataisiin arvioita sen pintaluokasta ja palosuojauskyvystä.

## 3 Materiaalikoheet

### 3.1 Rakennusfysikaaliset materiaalikoheet

Rakennusfysikaaliset materiaalikoheet toteutettiin pääosin osana hankkeessa tehtyä Milla Virkin diplomityötä [6]. Kaikki rakennusfysikaaliset kokeet toteutettiin Tampereen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmässä samoilla toteutusohjeilla ja laitteistoilla.

#### 3.1.1 Kokeiden lyhyt kuvaus

##### **Lämmönjohtavuus**

Lämmönjohtavuudet mitattiin FOX50-lämpövirtalevylaitteella sekä kevytsaven tapauksessa FOX304-lämpövirtalevylaitteella standardin SFS-EN 12667 mukaisesti [7]. Laitteen pääosat ovat ylä- ja alalevy, kaksi lämpövirtalevyä sekä suojakuori. Koekappale asetetaan ylä- ja alalevyjen väliin. Pintojen lämpötilat säädetään erisuuruisiksi, jolloin niiden välille muodostuu lämpötilagradientti. Tämä aiheuttaa pintojen välille lämpövirran, jonka suuruutta mitataan lämpövirtalevyillä. Mittauksessa koekappale on vaakasuorassa ja lämpövirran suunta lämpimämmältä levyltä kylmempää kohti.

Ellei muuta ole mainittu, ylälevyn lämpötilana käytettiin 20 °C ja alalevyn lämpötilana 0 °C keskilämpötilan ollessa tällöin 10 °C. Lämmönjohtavuus määritettiin järviruoko-tärkkelyslevylle, savi-biohiilirappaukselle, savi-hampunpäistäre-eristeelle (kevytsavi) ja biohiililaatalle. Näiden lisäksi testattiin rappausten vertailutuotteeksi kaupallinen savirappaus.

##### **Ominaislämpökapasiteetti**

Samoin kuin lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti määriteltiin FOX-lämpövirtalevylaitteella.

Ominaislämpökapasiteetin mittausta toteutettiin kolmella rinnakkaisella koekappaleella kustakin materiaalista FOX50 laitteella standardin ASTM C1784-13 [8] mukaisesti. Tutkittavat koekappaleet tasapainotettiin ennen mittauksia vakio-olosuhdehuoneessa 50 % RH suhteellisessa kosteudessa ja 22 °C lämpötilassa. Mittauslämpötiloina käytettiin 5 °C, 15 °C, 25 °C, 35 °C ja 45 °C. Lämpötilan muutos mittausvälillä oli tällöin 10 °C. Tuloksena saatava ominaislämpökapasiteetti on mittausten keskiarvo ja se ilmoitetaan mittausten keskiarvolämpötilassa, eli tässä tapauksessa 25 °C lämpötilassa.

Ominaislämpökapasiteetti määriteltiin järviruoko-tärkkelyslevylle. Kokeessa käytettiin samoja koekappaleita kuin lämmönjohtavuuskokeessa.

##### **Hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä**

Hygroskooppisessa tasapainokosteuskokeessa mitattiin materiaalin tasapainokosteuskäyrä hygroskooppisella alueella (< ~98 % RH) adsorptiossa (kuivuva materiaali) ja desorptiossa (kostuva materiaali) standardin SFS-EN 12571 [9] mukaisesti. Koekappaleita (avoin pinta-ala >100cm<sup>2</sup>)

tasapainotetaan määrätyssä kosteusolosuhteessa, kunnes se on tasapainottunut ko. kosteusolosuhteeseen. Tämän jälkeen kappale punnitaan ja lasketaan sen kosteuspitoisuus.

Hygroskooppisen tasapainokosteuden kokeet toteutettiin järviruoko-tärkkelyslevylle, Stalk-savirappaukselle (maalaamaton) ja biohiililaatalle. Biohiililaatan tasapainokosteus tutkittiin sekä adsorptiossa että desorptiossa neljässä eri kosteusolosuhteessa.

### ***Vesihöyryn adsorptiokyky***

Vesihöyryn adsorptiokykyä tutkittiin hankkeessa saksalaisen rakennussavilevyjen luokitteluun tarkoitetun standardin DIN 18948 liitteen A koekuvauksen A.2 mukaisesti [10]. Kyseessä on hygroskooppisen kosteustasapainokokeen sovellus, jossa otetaan huomioon kosteuden sitomiskyvyn nopeus. DIN18948 standardi on tarkoitettu savilevyrakennesjärjestelmän luokitteluun kolmeen eri vesihöyryn adsorptiokyvyn luokkaan, joista tuotteen on päästävä vähintään alimpaan päästäkseen markkinoille. Standardin mukaan koekappaleet tulisi pinnoittaa valitulla järjestelmäpinnoitteella. Pinnoitetuista koekappaleista saataisiin vain kyseiseen järjestelmään päteviä tuloksia, joten standardia sovellettiin ja materiaaleja tutkittiin pinnoittamattomina. Ainoastaan savilevy pinnoitettiin savimaalilla ja savimaalin vaikutuksen tutkimiseksi kaupallisesta savirappauslaastista tutkittiin savimaalattu ja maalaamaton versio. Vesihöyryn adsorptiokykyä tutkittiin savilevyn, savi-biohiililaastin ja järviruokolevyn lisäksi vertailun vuoksi myös 20 mm paksuisesta mäntypaneelistä, 13 mm paksuisesta kipsilevystä ja kaupallisesta savirappauksesta.

Vesihöyryn adsorptiokyvyn koe toteutettiin Stalk-savirappaukselle (maalaamaton) ja järviruoko-tärkkelyslevylle sekä joukolle vertailumateriaaleja.

### ***Vesihöyrynläpäisevyys***

Vesihöyrynläpäisykokeet tehtiin standardin SFS-EN 12572 [11] mukaisesti märkä- tai kuivakuppikokeena. Kustakin materiaalista valmistettiin pyöreitä koekappaleita, joiden halkaisija oli noin 140 mm. Koekappaleet vahattiin reunoiltaan. Ylä- ja alapintojen reunat vahattiin käyttäen 120 mm halkaisijan vahausmuottia. Avoimen alueen pinta-ala oli siis 113,1 cm<sup>2</sup>. Koekappaleet tiivistettiin suolaliuoksella tai kuivakuppikokeessa silikageelillä täytettyihin mittakuppeihin vahalla. Ilmatilan korkeus kuppien sisällä oli 15 mm. Kokeissa käytetyt suolat ja niillä aikaansaadut kosteusolosuhteet on esitetty taulukossa 3.1.

*Taulukko 3.1 Vesihöyrynläpäisevyyskokeissa käytetyt suolat.*

Suola	Suhteellinen kosteus 20°C lämpötilassa (% RH)
Litiumkloridi LiCl, 1H <sub>2</sub> O	11,3

Magnesiumkloridi $MgCl_2, 6H_2O$	33,1
Magnesiumnitraatti $Mg(NO_3)_2, 6H_2O$	54,4
Natriumkloridi NaCl	75,5
Kaliumsulfaatti $K_2SO_4$	97,6

Vesihöyrynläpäisevyyskokeet toteutettiin järviruoko-tärkkelyslevylle, Stalk-savirappaukselle, kaupalliselle savirappaukselle (Mr. Clay), nanoselluloosalla pinnoitetulle kuitusementtilevylle sekä pinnoittamattomalle vertailulevylle, nanoselluloosalla pinnoitetulle puukuitulevylle ja pinnoittamattomalle vertailulevylle, biohiililaatalle ja kevytsavelle. Järviruoko-tärkkelyslevyn osalta kokeet on raportoitu Milla Virkin diplomityössä [6].

### ***Veden imeytymiskerroin***

Veden imeytymiskerroin määritettiin vapaan veden imeytyskoelaitteistolla standardin SFS-EN 15148 mukaisesti [12]. Kokeessa koekappaleet riippuvat vaa'assa suljetussa kaapissa osittaisessa vesiupotuksessa. Kokeen aikana mitataan koekappaleiden massanmuutosta. Tuloksista piirretään kuvaaja massanmuutoksesta suhteessa vapaaseen pinta-alaan ja ajan neliöjuureen.

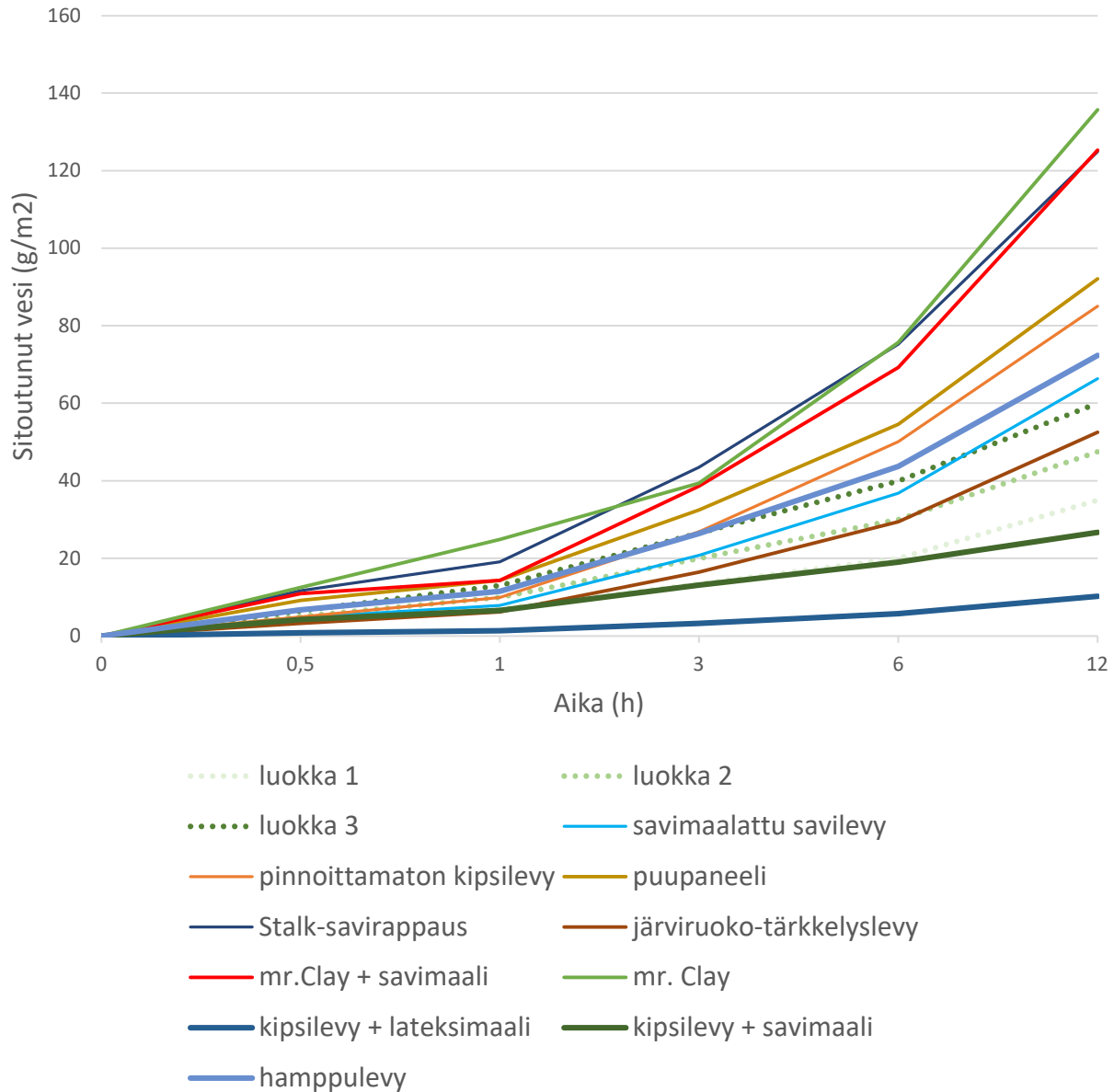
Kuvaajasta voidaan määritellä veden imeytymiskerroin alun lineaarisen osuuden kulmakertoimena. Kun koekappale saavuttaa kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden  $w_{cap}$  veden imeytyminen hidastuu ja massanmuutoskuvaaja taittuu. Ideaalitapauksessa alun lineaarinen osuus olisi selvä ja materiaalin saavuttaessa kyllästyskosteuspitoisuuden massannousu hidastuisi voimakkaasti (vaakasuora kuvaaja). Luonnonmateriaaleille ominaista on, että selkeän kuvaajan sijaan käyrä taittuu pyöreästi, eikä ole selkeää lineaarista vaihetta ole havaittavissa (standardin tyyppin B käyrä). Tällöin ei standardinmukaista veden imeytymiskerrointa voida määrittää. Tässä tutkimuksessa esitetyt veden imeytymiskertoimen  $A_w$  arvot eivät ole standardinmukaisia, vaan laskentatarkasteluja varten tarkoitettuja suuntaa antavia arvoja.

Vedenimeytymiskertoimen kokeet toteutettiin järviruoko-tärkkelyslevylle, savimaalilla maalatulle Stalk-savirappaukselle, kevytsavelle ja biohiililaatalle.

### **3.1.2 Vesihöyryns adsorptiokyky kaikille tutkituille tuotteille**

Vesihöyryns adsorptiokyvyn koe toteutettiin Stalk-savirappaukselle (maalaamaton) ja järviruoko-tärkkelyslevylle sekä joukolle vertailumateriaaleja. Vertailumateriaaleina oli 19 mm paksuinen pinnoittamaton mäntypaneeli, 13 mm paksuinen kipsilevy pinnoittamattomana, savimaalilla pinnoitettuna ja lateksimaalilla pinnoitettuna, kaupallinen savirappaus savimaalilla maalattuna ja maalaamattomana sekä hampun-tärkkelyslevy ja savi-hampunpäistärelevy, joita tutkittiin osana Biosivu-hanketta. Kaupallisen savirappauksen koekappaleet koostuivat Mr. Clayn pohjarappauslaastista ja Saviukumajan pintarappauslaastista (paksuus 3 mm). Kuvassa 3.1 on

esitetty kokeen tulokset. Pistekatkoviivalla on merkitty standardin DIN 18948 [10] mukaiset vesihöyryn adsorptiokyvyn luokkarajat.



Kuva 3.1 Vesihöyryn adsorptiokyvyn kokeen tuloksia

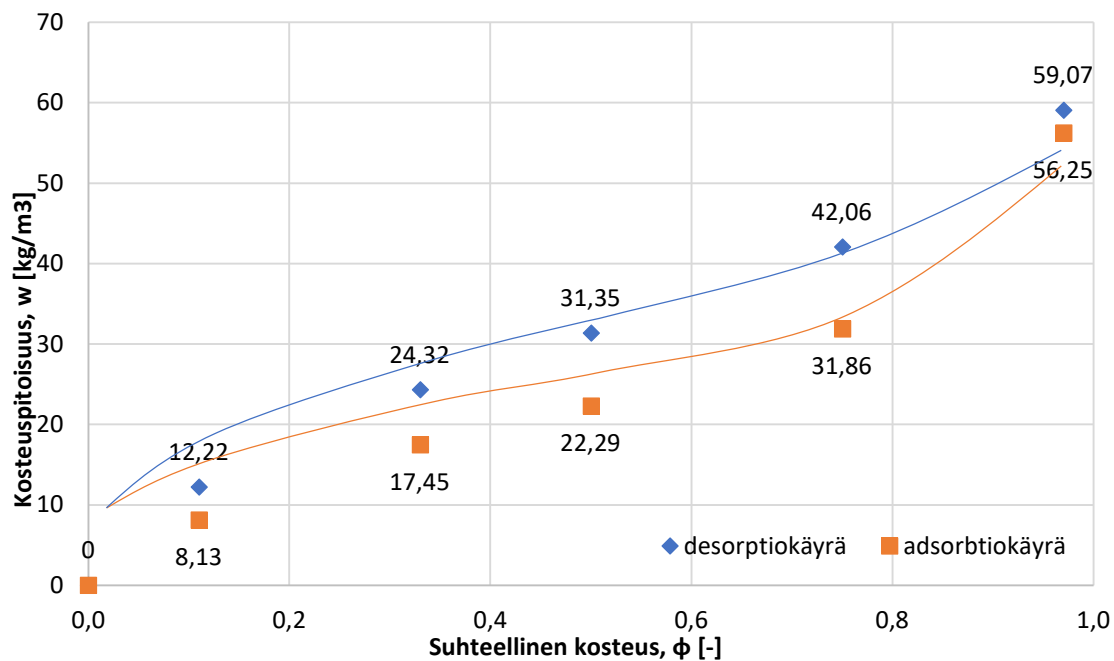
### 3.1.3 Järviruoko-tärkkelyslevyn tulokset

Järviruokolevylle mitattiin osana hanketta lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti, tasapainokosteuskäyrä, vesihöyrynläpäisevyys ja veden imeytymiskerroin (Taulukko 3.2 ja Kuva 3.2).

Järviruoko-tärkkelyslevyn tulokset ovat raportoitu Milla Virkin diplomityössä *Luonnonmukaisten rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet* [6]. Diplomityöstä löytyvät myös tarkemmat kuvaukset koejärjestelyistä.

Taulukko 3.2 Järviruoko-tärkkelyslevyn rakennusfysikaaliset materiaaliominaisuudet

Järviruoko-tärkkelyslevy			
tiheys 250 kg/m <sup>3</sup>			
Materiaaliominaisuus	Yksikkö	Olosuhde	Arvo
Lämmönjohtavuus	[W/(mK)]	11 % RH / 0–20 °C	0,067
		50 % RH / 0–20 °C	0,070
		94 % RH / 0–20 °C	0,087
Ominaislämpökapasiteetti	[J/(kgK)]	50 % RH / 21 °C	2000
Vesihöyrynläpäisevyys $\delta_v$	[10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s]	0–50 % RH / 21 °C	2,70
		50–98 % RH / 21 °C	4,54
Diffuusiovastuskerroin $\mu$	-	0–50 % RH / 21 °C	9,95
		50–98 % RH / 21 °C	5,95
Veden imeytymiskerroin $A_w$	[kg/(m <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> )]	50 % RH / 21 °C	0,409±0,174



Kuva 3.2 Ruokolevyn tasapainokosteuskäyrä.

### 3.1.4 Savirappausten tulokset

Savirappauksille mitattiin osana hanketta lämmönjohtavuus, tasapainokosteuskäyrä ja vesihöyrynläpäisevyys. Koejärjestelyt on raportoitu osana tätä loppuraporttia.

Kaupallisen savirappausten koekappaleet koostuivat Mr. Clayn pohjarappauksesta ja Saviukumajan pintarappauksesta (paksuus 3 mm). Kaupallisen savirappausten koekappaleiden ominaisuudet ja lämmönjohtavuus on esitetty taulukossa 3.3. Rappauslevy halkeili helposti eikä siitä saatu leikattua sopivia koekappaleita, joten koekappaleet valmistettiin mittausskoossa (50 mm halkaisija) vanerisiin muotteihin. Koekappaleet irrotettiin sahaamalla muotti auki. Koekappaleet olivat paksuudeltaan ja pinnaltaan epätasaisia, joten lämmönjohtavuusmittauksessa koekappaleiden pinnoille siveltiin kuparipastaa. Kuparipastan tarkoituksena oli parantaa kontaktia koekappaleen ja mittalaitteen välillä. Koekappaleita mitattiin yhteensä 15 kappaletta, viisi kutakin kosteusolosuhdetta kohden. Tulosten 95 % luottamusväli on melko suuri ja tarkempien tulosten saamiseksi tarvitsisi koekappalemäärän olla suurempi. Mittaustulokset on esitetty taulukossa 3.3.

*Taulukko 3.3 Kaupallisen savirappausten koekappaleet ja mittaustulokset.*

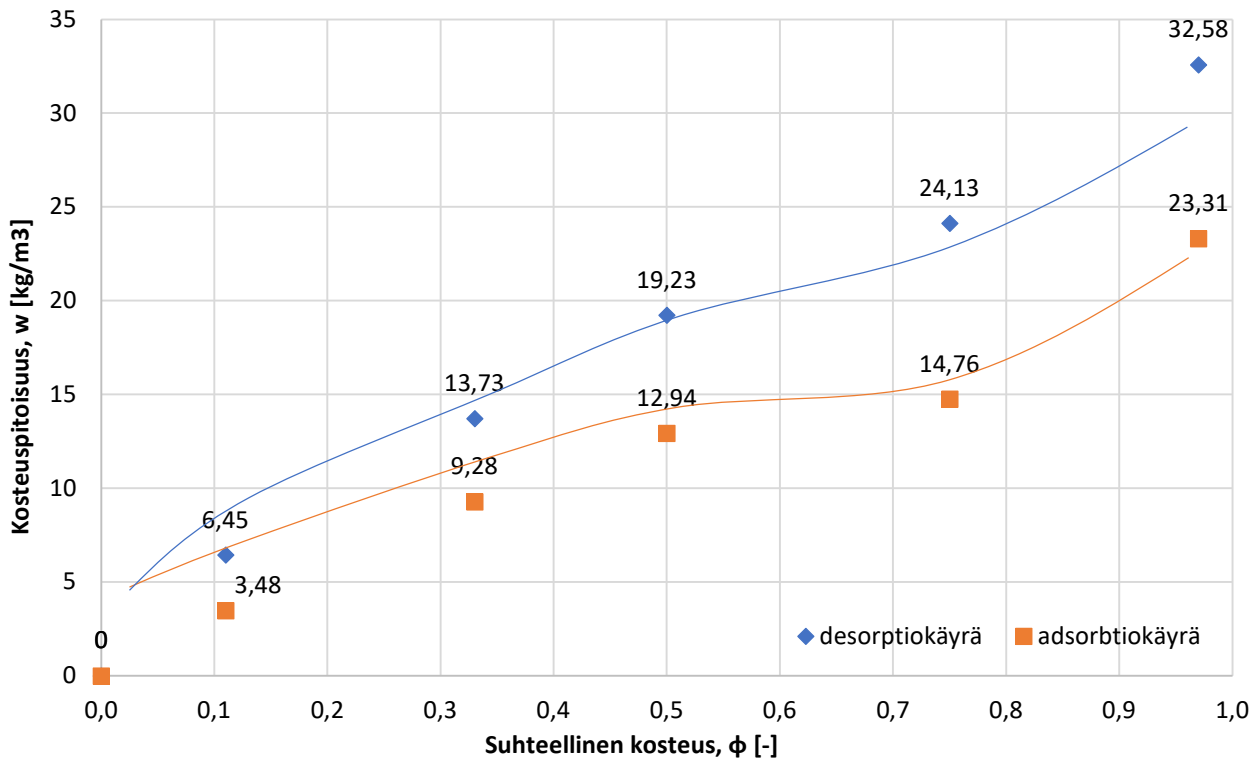
Koe-kappale	Paksuus [mm]	Halkaisija [mm]	Massa [g]	Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]	Kosteus [% RH]	Lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/(mk)]	Keskiarvo [W/(mK)]	95 % luottamusväli
1	15,70	52,27	60,31	1790	11	0,96	0,92	0,12
2	16,66	52,26	61,54	1722	11	0,766		
3	16,60	52,06	61,87	1751	11	0,922		
4	15,34	52,52	59,79	1799	11	0,878		
5	16,27	51,90	61,10	1775	11	1,05		
6	16,09	52,14	59,75	1739	50	0,784	0,72	0,08
7	15,50	52,28	58,99	1773	50	0,771		
8	15,65	52,27	59,42	1769	50	0,611		
9	15,88	52,16	58,93	1737	50	0,691		
10	15,94	52,10	60,00	1766	50	0,718		
11	16,11	51,60	60,93	1808	93	1,07	1,16	0,13
12	15,91	51,95	59,68	1770	93	1,34		
13	15,56	52,12	58,97	1776	93	1,07		
14	16,57	52,12	62,05	1756	93	1,10		
15	16,06	52,15	61,76	1800	93	1,22		

Myös Stalk-savirappausta oli haastavaa käsitellä levyinä, ja koekappaleet päädyttiin valmistamaan vanerimuottiin rappaamalla. Koekappaleet, joiden kokonaispaksuus on ilmoitettu taulukossa Taulukko 3.4 , koostuivat pohjarappausrappauksesta (savi-hiekka-biohiili) ja pintarappausrappauksesta (savihiekka), kuten on selitetty osassa 2.2. Myös näistä koekappaleista

tuli niin epätasaisia pinnoiltaan, että lämmönjohtavuusmittauksissa pinnoille siveltiin kuparipastaa. Koekappaleita mitattiin 16 kappaletta niin, että kuhunkin kosteuspitoisuuden tasapainotetuista koekappaleista saatiin viisi rinnakkaista tulosta. Koekappaleen numero 14 lämmönjohtavuusmittaus epäonnistui sähkövian takia. Tulokset on esitetty taulukossa 3.4.

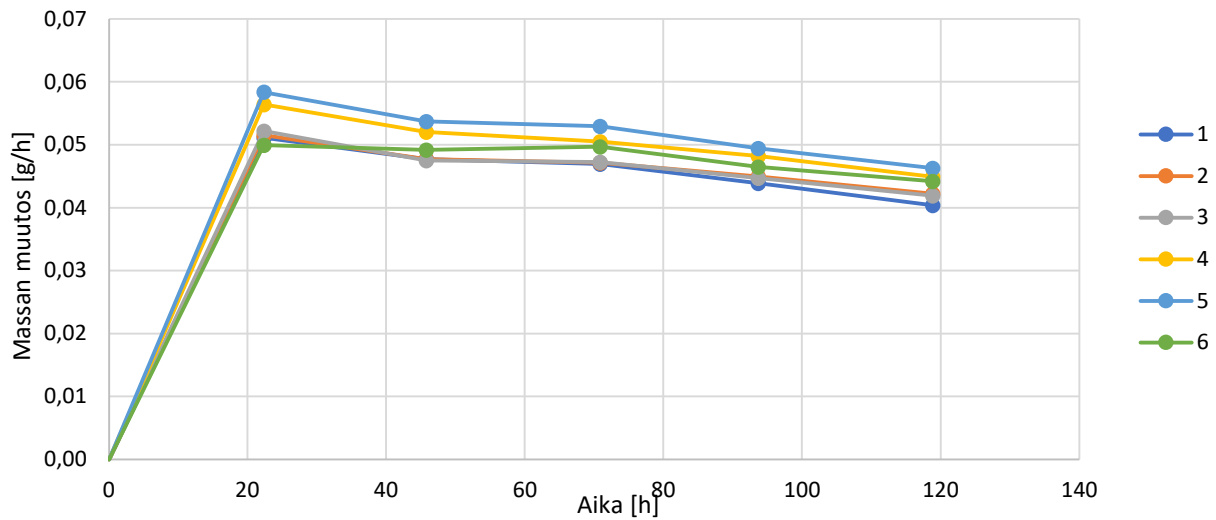
*Taulukko 3.4 Stalk-savirappauksen lämmönjohtavuuskokeiden koekappaleet ja mittaustulokset.*

Koe-kappale	Paksuus [mm]	Halkaisija [mm]	Massa [g]	Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]	Kosteus [% RH]	Lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/(mk)]	Keskiarvo [W/(mK)]	95 % luottamusväli
1	16,79	52,39	57,85	1599	11	0,64	0,66	0,12
2	17,14	52,11	57,11	1562	11	0,593		
3	17,27	52,79	59,98	1587	11	0,797		
4	17,39	52,06	56,81	1535	11	0,727		
5	17,54	52,58	58,36	1532	11	0,527		
6	16,94	51,85	57,56	1609	50	0,542	0,69	0,12
7	16,97	51,98	57,22	1589	50	0,726		
8	17,87	52,19	63,43	1659	50	0,778		
9	17,42	51,52	59,73	1645	50	0,617		
10	17,14	51,31	58,80	1660	50	0,806	0,83	0,13
11	16,49	53,15	61,01	1667	93	0,942		
12	16,72	53,00	62,03	1681	93	0,942		
13	16,19	52,37	59,45	1705	93	0,842		
14	16,64	51,92	59,92	1701	93	fail		
15	16,44	52,82	58,07	1612	93	0,702		
16	17,50	52,15	59,83	1601	93	0,722		

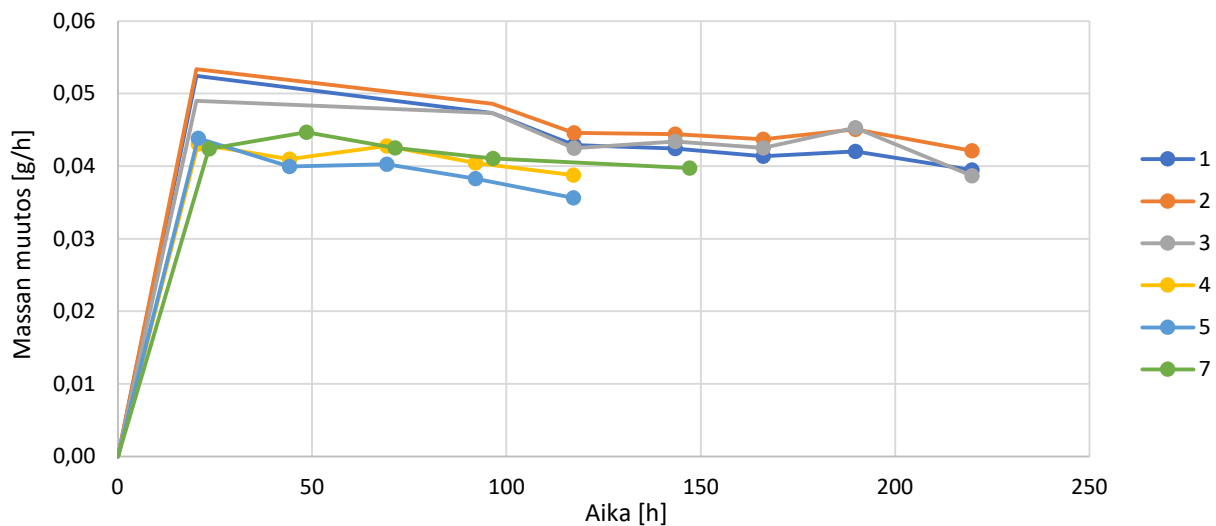


Kuva 3.3 Stalk-rappauksen (maalaamaton) tasapainokosteuskäyrä.

Stalk-savirappausta ja kaupallisesta savirappausta valmistettiin koekappaleet vanerisiin muotteihin rappaamalla, koska materiaalit murenivat ja halkeilivat, jos niitä yritti leikata. Molemmat materiaalit testattiin märkäkuppikokeella ja kuivakuppikokeella. Märkäkuppikokeessa kupin sisälle laitettiin kaliumsulfaatin ylikylläinen vesiliuos, jolla saadaan aikaan 98 % RH ilmatilaan 21 °C lämpötilassa. Kuivakuppikokeessa kupin sisälle laitettiin silikageeliä, jolla kupin sisälle saatiin 0 % RH. Kokeen aikana kuppeja säilytettiin olosuhdehuoneessa, jossa vallitsi 50 % RH ja 21 °C olosuhteet. Molemmista laasteista testattiin kummassakin kosteusparissa 6 koekappaletta. Kuivakuppikokeissa massanmuutos ei pysynyt vakiona tarpeeksi pitkään, että standardin ehto maksimissaan 5 % poikkeamasta massanmuutoksen keskiarvosta olisi toteutunut viidessä peräkkäisessä punnituksessa. Kuivakuppikokeen massan muutoksen kuvaaja ajan suhteen kaupallisen savilaastin osalta on esitetty kuvassa 3.4 ja Stalk-savirappauksen osalta kuvassa 3.5. Kuvissa on merkitty ympyrällä ne mittapisteet, joiden keskiarvona laskettiin kosteusvirta. Märkäkuppikokeessa standardin mukaisia tuloksia saatiin kaupallisen savirappausten osalta viisi kappaletta ja Stalk-savirappauksen osalta kuusi kappaletta. Taulukossa 3.5 on esitetty näistä tuloksista laskettujen diffuusiovastuskertoimien ja vesihöyrynläpäisevyyksien keskiarvot ja 95 % luottamusvälit.



Kuva 3.4 Kaupallisen savirappauksen kuivakuppikokeen massanmuutoskuvaaja.



Kuva 3.5 Stalk-savirappauksen kuivakuppikokeen massanmuutoskuvaaja.

Veden imeytymiskertoimen koekappaleet valmistettiin vanerimuotteihin rappaamalla, koska levyt murenivat, jos niitä yritti leikata. Pinnalle maalattiin myös maalikerros savimaalilla. Savi-biohiililaastista valmistetut koekappaleet alkoivat vapauttaa materiaalihiukkasia veteen välittömästi

tai lähes välittömästi vesikosketukseen saattamisen jälkeen (kuva 3.6), jolloin painonmuutoksen kuvaajasta ei saatu luotettavaa dataa vedenimeytymiskertoimen laskentaa varten.



Kuva 3.6 Koekappale 1 heti vesikosketukseen saattamisen jälkeen ja noin tuntia myöhemmin.

Taulukko 3.5 STALK-savirappauksen rakennusfysikaaliset ominaisuudet

STALK-savirappaus			
Materiaaliominaisuus	Yksikkö	Olosuhde	Arvo
Lämmönjohtavuus	[W/(mK)]	11 % RH / 0–20 °C	0,66 ±0,12
		50 % RH / 0–20 °C	0,69 ±0,12
		94 % RH / 0–20 °C	0,83 ±0,12
Vesihöyrynläpäisevyys $\delta_v$	[10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s]	0–50 % RH / 21 °C	1,83 ±0,12 Verrokki, Mr Clay: 1,83
		50–98 % RH / 21 °C	2,71±0,08 Verrokki, Mr Clay: 3,43
Diffuusiovastuskerroin $\mu$	-	0–50 % RH / 21 °C	14,73 Verrokki, Mr Clay: 14,72
		50–98 % RH / 21 °C	9,90 Verrokki, Mr Clay: 7,83

### 3.1.5 Biohiililaatan tulokset

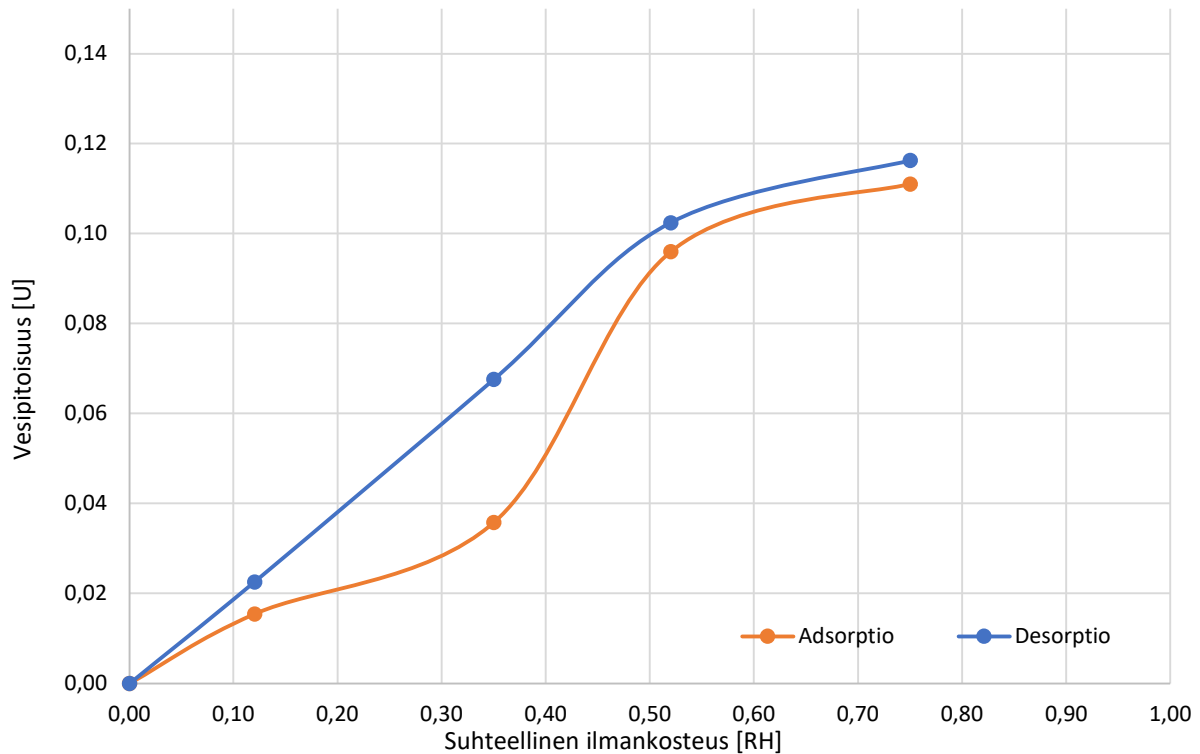
Biohiililaatalle tutkittiin hankkeessa lämmönjohtavuus, tasapainokosteuskäyrä ja vesihöyrynläpäisevyys. Veden imeytymiskerrointa ei saatu määritettyä. Koejärjestelyt on raportoitu osana tätä loppuraporttia. Taulukossa 3.6 on esitetty kootusti biohiililaatan mitatut materiaaliominaisuudet.

Tutkittavat biohiililaatat vaihtelivat paksuudeltaan ja tiheydeltään. Biohiililaatasta leikattiin vannesahalla koekappaleita eri tiheyden omaavista levyistä. Koekappaleet tasapainotettiin 50 % RH ja 21 °C olosuhteissa ja lämmönjohtavuus mitattiin FOX50-lämpövirtalevylaitteella. Koekappaleiden mitat ja mittaustulokset on esitetty taulukossa 3.6.

Taulukko 3.6 Biohiililaatan lämmönjohtavuus 50 % RH tasapainokosteudessa.

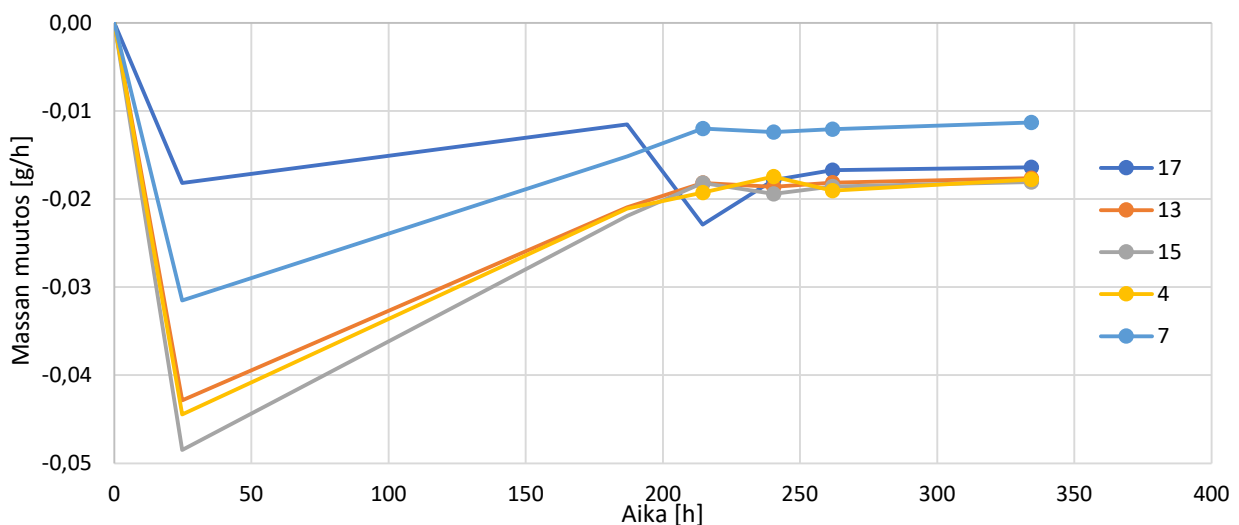
Levy	Koekappale	Paino [g]	Paksuus [mm]	Halkaisija [mm]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Kappaleen tiheys [g/cm <sup>3</sup> ]
1	1	43,8	21,1	57,5	0,23	0,80
	2	46,7	22,9	58,0	0,25	0,77
	3	33,0	17,5	57,7	0,23	0,72
	4	42,2	20,7	58,5	0,23	0,76
3	5	23,2	16,2	58,5	0,17	0,53
	6	25,8	19,9	56,3	0,17	0,52
	7	28,4	19,2	58,8	0,17	0,55
4	8	39,1	24,8	57,4	0,25	0,61
	9	36,8	24,0	56,2	0,24	0,62
	10	38,0	24,8	57,5	0,23	0,59
5	12	39,4	20,2	57,0	0,23	0,77
	13	34,2	17,7	57,4	0,22	0,75
6	15	23,6	15,5	57,0	0,24	0,60
8	16	20,6	15,3	54,8	0,18	0,57
9	17	27,5	19,3	55,9	0,20	0,58
10	18	33,1	25,2	55,3	0,20	0,55

Biohiililaatalle määritettiin tasapainokosteuskäyrä adsorptiossa ja desorptiossa neljässä kosteusolosuhteessa välillä 14...75 % RH (kuva 3.7).



Kuva 3.7 Biohiillaatan tasapainokosteuskäyrä.

Vesihöyrynläpäisykokeisiin biohiillaatoista valittiin tasalaatuisia, tiheydeltään noin  $0,6 \text{ g/cm}^3$  levyjä. Rinnakkaisia koekappaleita tutkittiin viisi kappaletta kosteusparilla 11-54. Laskelmissa käytettyjä standardin mukaisia tuloksia saatiin muilla koekappaleilla neljä peräkkäistä, mutta koekappaleella numero 17 tuloksia saatiin kolme peräkkäistä. Kuvassa 3.8 on esitetty massanmuutoskuvaaja ja ympyrällä ne mittapisteet, joiden perusteella taulukossa 3.7 esitetyt keskiarvot on laskettu.



Kuva 3.8 Biohiillaatan kuppikokeen massan muutoskuvaaja.

Biohiililaatan vedenimeytymiskokeesta ei saatu määriteltyä veden imeytymiskerrointa, sillä materiaali käyttäytyi hydrofobisesti. Kuvassa 3.9 nähdään, kuinka koekappaleen vesikosketuspintaan muodostui kokeen aikana laajoja ilmakuplia.



Kuva 3.9 Biohiililaatan vedenimeytymiskoe

Taulukko 3.7 Biohiililaatan rakennusfysikaaliset ominaisuudet

<b>Biohiililaatta</b>			
<b>Tiheys 520–800 kg/m<sup>3</sup></b>			
<b>Materiaaliominaisuus</b>	<b>Yksikkö</b>	<b>Olosuhde</b>	<b>Arvo</b>
Lämmönjohtavuus	[W/(mK)]	50 % RH / 21 °C	(tiheys n. 520 kg/m <sup>3</sup> ) 0,17 (tiheys n. 800 kg/m <sup>3</sup> ) 0,23
Vesihöyrynläpäisevyys $\delta_v$	[10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s]	11–54 % RH / 21 °C	1,19±0,20
Diffuusiovastuskerroin $\mu$	-	11–54 % RH / 21 °C	22,94

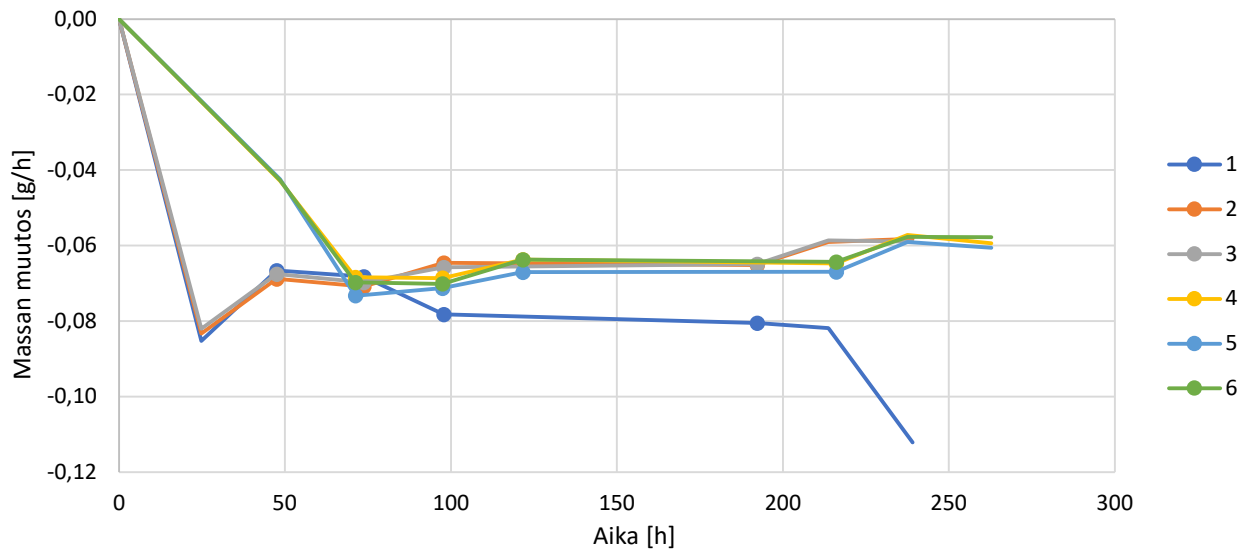
### 3.1.6 Nanoselluloosa-pinnoitteen tulokset

Nanoselluloosalevyille mitattiin hankkeessa lämmönjohtavuus ja vesihöyrynläpäisevyys. Koejärjestelyt on raportoitu osana tätä loppuraporttia. Tutkitut materiaaliominaisuudet on esitetty taulukossa 3.8

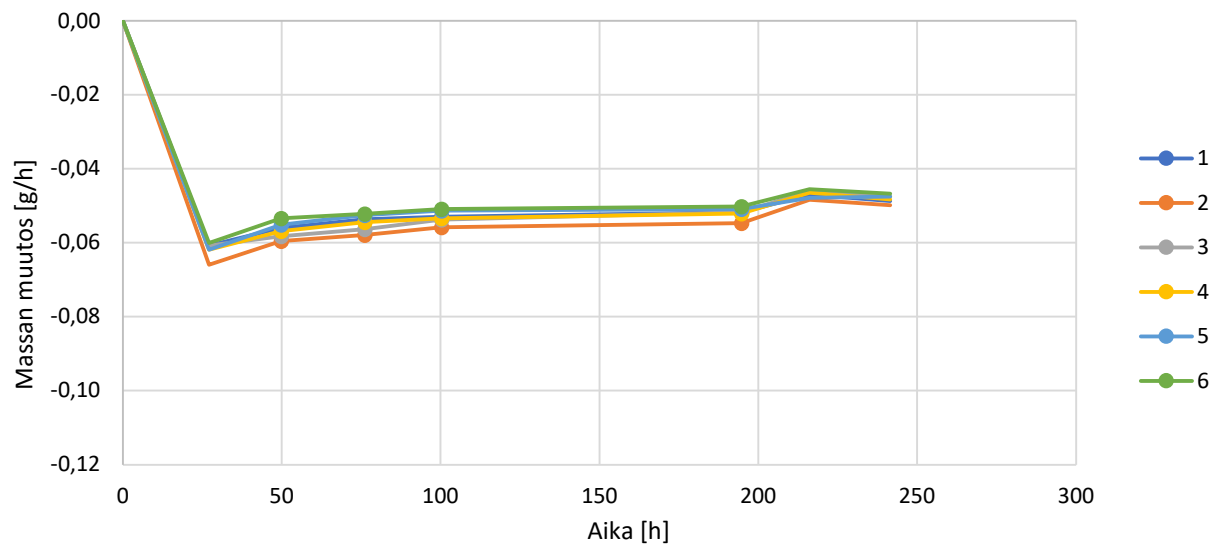
Vesihöyrynläpäisevyyskokeessa nanoselluloosalla pinnoitetut levyt ja niiden vertailukappaleet tutkittiin vain yhdellä kosteusparilla, jossa kupin sisäpuolelle saatiin natriumkloridin (NaCl) ylikylläisellä suolaliuksella aikaan 75 % RH olosuhde ja ulkopuolelle olosuhdekammioon magnesiumkloridin (MgCl) ylikylläisellä suolaliukselle 33 % RH. Sekä pinnoitettuja että pinnoittamattomia puukuitulevyjä ja kuitusementtilevyjä testattiin alkuun 3 rinnakkaista koekappaletta, mutta näistä kokeista useat epäonnistuivat. Puukuitulevystä tutkittiin seuraavaksi 6 rinnakkaista koekappaletta sekä pinnoitettuna että pinnoittamattomana. Näiden kokeiden massamuutoskuvaajat on esitetty kuvissa 3.10

<b>Nanoselluloosapinnoite</b>			
<b>Materiaaliominaisuus</b>	<b>Yksikkö</b>	<b>Olosuhde</b>	<b>Arvo</b>
Lämmönjohtavuus	[W/(mK)]	50 % RH / 21 °C	0,068
Vesihöyrynläpäisevyys $\delta v$	[10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s]	33–75 % RH / 21 °C	puukuitulevy (25 mm) nanoselluloosapinnoitteella 4,06 ilman pinnoitetta 5,26
Diffuusiovastuskerroin $\mu$	-	33–75 % RH / 21 °C	puukuitulevy (25 mm) nanoselluloosapinnoitteella 6,62±0,15 ilman pinnoitetta 5,11±0,20

ja 3.11. Kuvissa on merkattu ympyrällä ne mittapisteet, jotka on otettu laskennassa huomioon. Standardista poiketen peräkkäisiä mittapisteitä valittiin vain neljä kappaletta. Punnitusten massanmuutoksen keskiarvosta tuli myös joitain yli 5 % poikkeavuuksia, joista suurin oli pinnoittamattomalla koekappaleella 1: 9,7 %.



Kuva 3.10 Pinnoittamattoman puukuitulevyn märkäkuppikokeen massanmuutoskuvaajat.



Kuva 3.11 Nanoselluloosalla pinnoitetun puukuitulevyn märkäkuppikokeen massanmuutoskuvaajat.

Taulukko 3.8 Nanoselluloosapinnoitteen rakennusfysikaaliset materiaaliominaisuudet

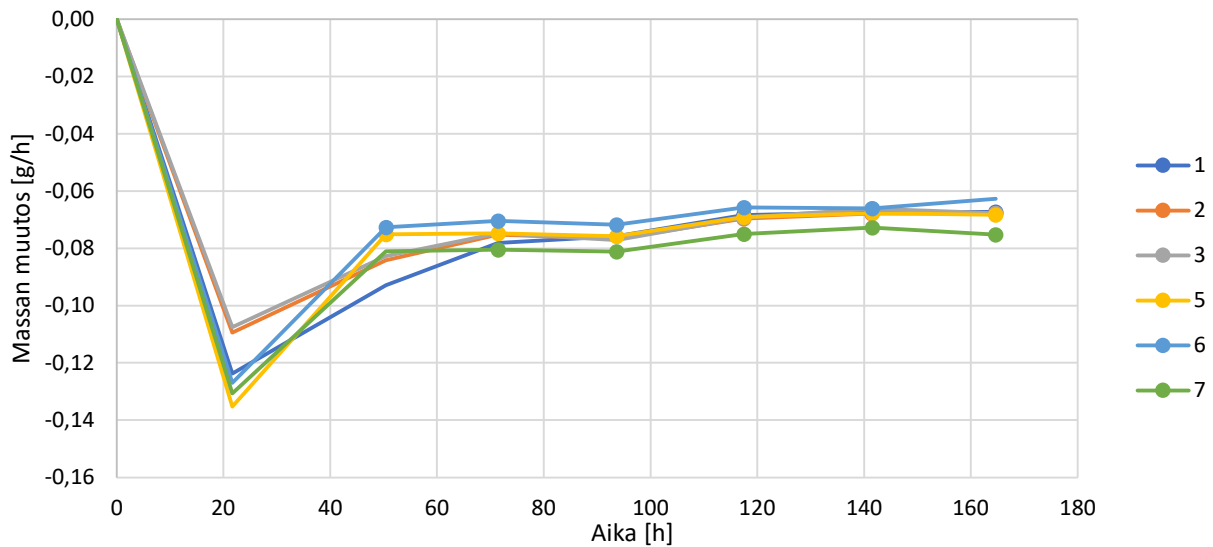
Nanoselluloosapinnoite			
Materiaaliominaisuus	Yksikkö	Olosuhde	Arvo
Lämmönjohtavuus	[W/(mK)]	50 % RH / 21 °C	0,068

Vesihöyrynläpäisevyys $\delta_v$	$[10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}]$	33–75 % RH / 21 °C	puukuitulevy (25 mm) nanoselluloosapinnoitteella 4,06 ilman pinnoitetta 5,26
Diffuusiovastuserroin $\mu$	-	33–75 % RH / 21 °C	puukuitulevy (25 mm) nanoselluloosapinnoitteella 6,62±0,15 ilman pinnoitetta 5,11±0,20

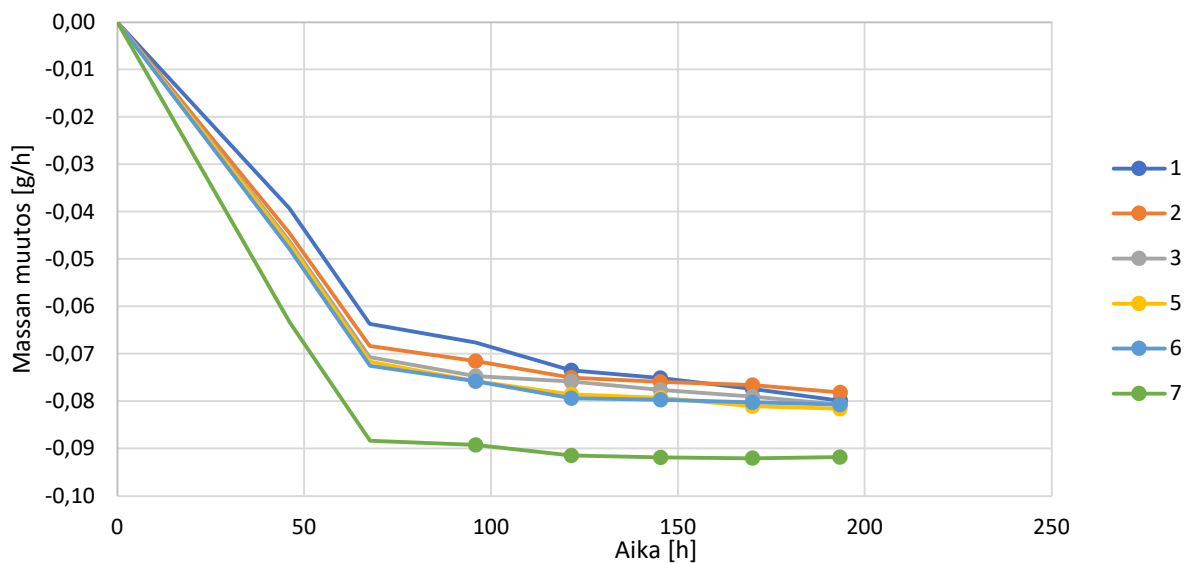
### 3.1.7 Savi-hampunpäistäre-eristeen (kevytsavi) tulokset

Savi-hampunpäistäre-eristeelle eli kevytsavelle tutkittiin lämmönjohtavuus, vesihöyrynläpäisevyys ja veden imeytymiskerroin.

Kevytsaven vesihöyrynläpäisevyys määritettiin matalan ja korkean ilmankosteuden alueilla käyttäen kosteuspareja 11–54 ja 50–100. Standardissa määritetään 100 % suhteellisen ilmankosteuden soveltuvan vain koekappaleille, joiden diffuusiovastus ( $S_d$ ) on alle 0,1 m. Kevytsaven diffuusiovastus osoittautui hieman sallittua suuremmaksi, mutta kokeet onnistuivat hyvin ilman veden kondensoitumista koekappaleen yläpintaan. Kummassakin kosteusparissa testattiin kuusi rinnakkaista koekappaletta. 54 % RH olosuhde toteutettiin koekuppiin magnesiumnitraatin ( $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) ylikylläisellä liuoksella. Koekappaleiden kosteusvirta (massanmuutos) ajan funktiona on esitetty kuvissa 3.12 ja 3.13. Vesihöyrynläpäisevyys on laskettu koekappaleiden keskiarvona tasaantuneen kosteusvirran punnitustuloksista.



Kuva 3.12 Kevytsaven 54/11 % RH massan muutoskuvaaja.



Kuva 3.13 Kevytsaven 100/50 % RH massan muutoskuvaaja

Veden imeytymiskertoimen kokeet tehtiin käyttäen vesihöyrynläpäisykokeen koekappaleita. Koekappaleiden vedenimupinta oli siis reunoilta vahalla peitetty. Peitetyn reunan vaikutus huomioitiin käyttäen vesihöyrynläpäisykokeen standardin mukaista korjauserrointa. Laskennallinen pinta-ala oli karkeasti avoimen- ja kokonaispinta-alan puolivälissä. Menetelmästä aiheutuva virhe on vähemmän kuin  $\pm 10\%$ .

Aikaisempien savipohjaisten materiaalien liuetta vedenimukokeessa, päätettiin käyttää verkkoa koekappaleen tukena. Ensimmäinen koekappale mitattiin verkolla, mutta kappaleessa ei havaittu minkäänlaista hajoamista, vaikka verkko poistettiin kokeen jälkeen. Seuraavat kaksi kappaletta

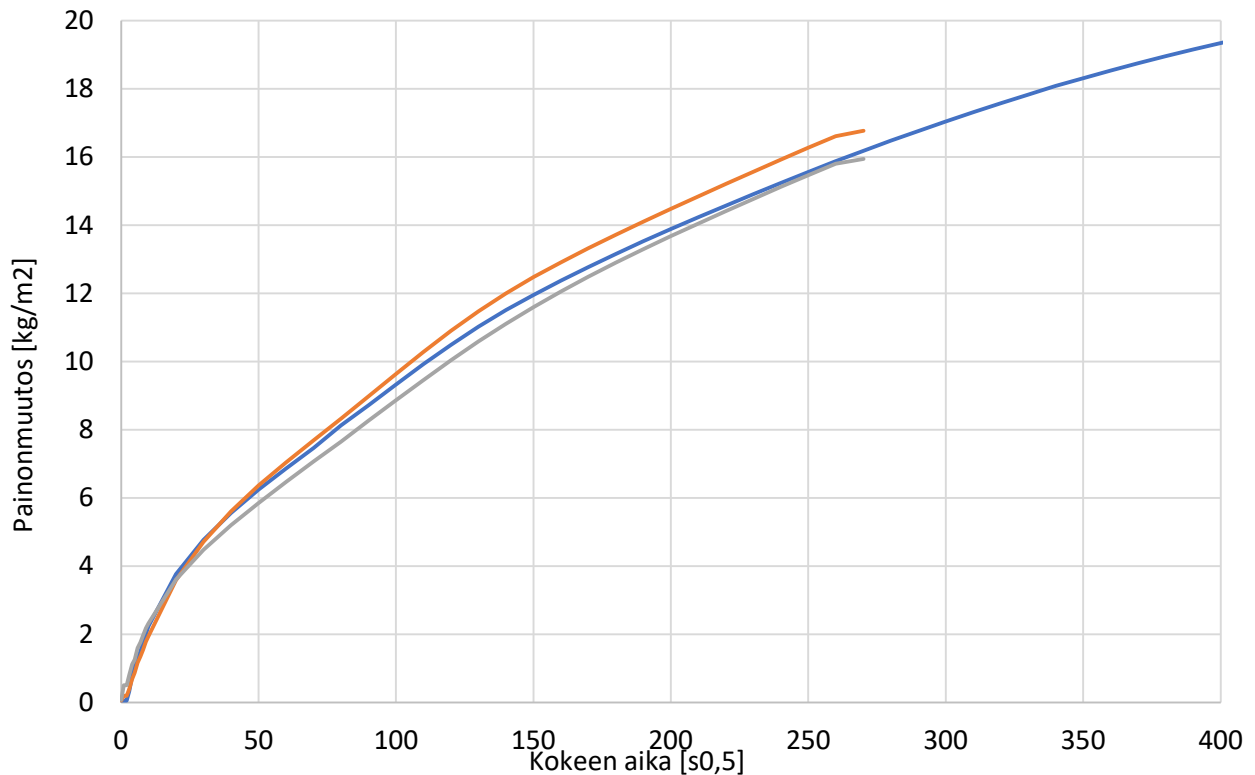
testattiin ilman verkkoa. Verkolla ei ollut merkittävää vaikutusta tuloksiin, kun huomioidaan erittäin pieni otanta. Vedenimukokeen tulokset esitetään siis näiden kolmen mittauksen keskiarvona.

Vedenimukoe-kappaleiden yläpinta alkoi kastua noin 3–4 h kohdalla. Mittausta jatkettiin noin vuorokauden ajan, jotta nähtäisiin, hajoaako materiaali. Laitteisto ja koekappaleet kokeen jälkeen on esitetty kuvassa 3.14.



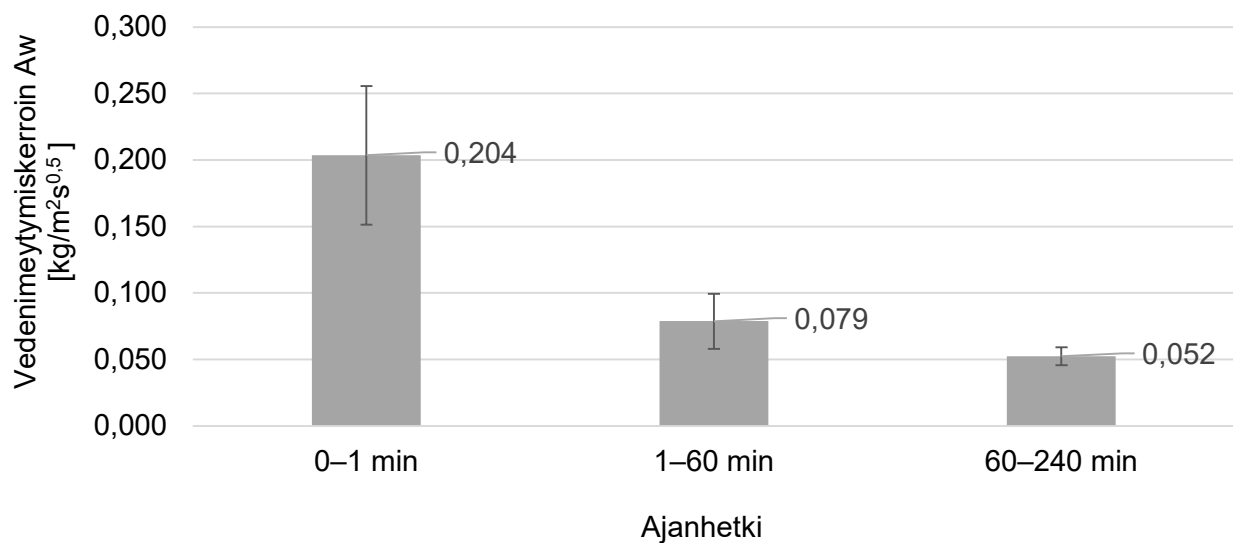
*Kuva 3.14 Verkottomat vedenimukoe-kappaleet.*

Vedenimukokeen aikana veteen liukeni vaihteleva määrä hienoainesta. Kyseessä oli kuitenkin enemmän veden värjäytyminen, kuin merkittävä määrä savea. Liuennut aines ei asettunut astian pohjalle seuraavan kahden vuorokauden aikana, ja nesteen väri säilyi samana. Pieni määrä kuituja irtosi astian pohjalle. Vedenimukokeen koekappaleiden painonmuutoksen graafi on esitetty kuvassa 3.15.



Kuva 3.15 Vedenimukoe-kappaleiden painonmuutos ajan neliöjuuren funktiona.

Kevytsaven vedenimeytymiskäyrä ei ole lineaarinen. Standardin mukaan vedenimeytymiskerroin  $A_w$  määritettäisiin 24 h ajankohdan mukaan, mutta koska kappale kastuu läpi muutamassa tunnissa, ei sille voida antaa standardin mukaista tulosta. Vedenimeytymiskerroin  $A_w$  on sen sijaan määritetty ajankohdille 0–1 minuuttia, 1–60 minuuttia sekä 60–240 minuuttia. Minuutit 1, 60 ja 240 vastaavat graafin ajanhetkiä 7.5, 60 ja 120. Vedenimeytymiskertoimen arvot on esitetty kuvassa 3.16.



Kuva 3.16 Kevytsaven vedenimeytymiskertoimet ja 95 % luottamusväli.

Taulukko 3.9 Kevytsaven rakennusfysikaaliset materiaaliominaisuudet

<b>Kevytsavi</b>			
tiheys 248 kg/m <sup>3</sup>			
<b>Materiaaliominaisuus</b>	<b>Yksikkö</b>	<b>Olosuhde</b>	<b>Arvo</b>
Lämmönjohtavuus	[W/(mK)]	50 % RH / 21 °C	0,068
Vesihöyrynläpäisevyys $\delta_v$	[10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s]	11–54 % RH / 21 °C	8,75±0,45
		52–100 % RH / 21 °C	8,84±0,73
Diffuusiovastuskerroin $\mu$	-	11–54 % RH / 21 °C	3,10
		52–100 % RH / 21 °C	3,05
Veden imeytymiskerroin $A_w$	[kg/(m <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> )]	50 % RH / 21 °C	0,204–0,052*)
*) veden imeytymiskertoimen tulokset on määritetty eri veden imeytymisen vaiheissa erikseen. Veden imeytymiskertoimen arvo ei ole standardinmukainen			

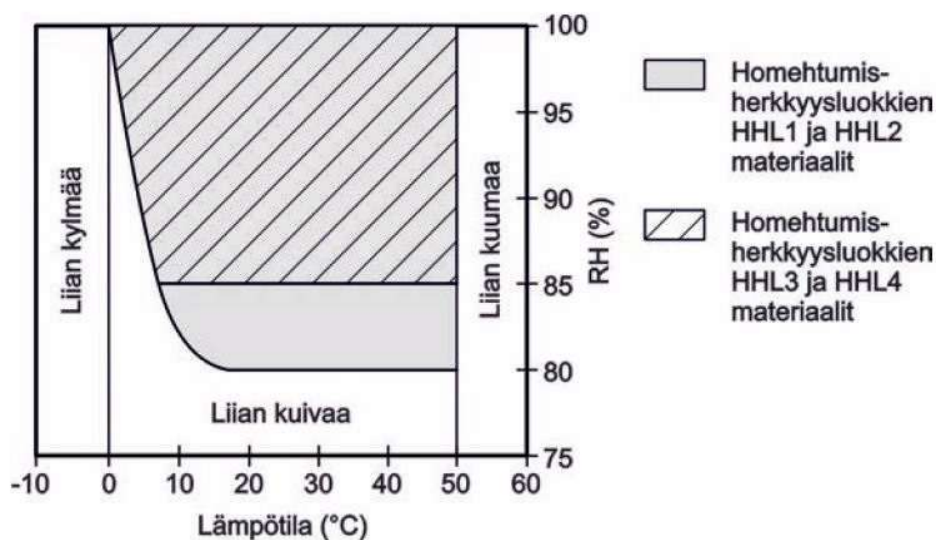
### 3.2 Homehtumisherkkyykokeet

Homeen kasvun riskiä rakenteissa ja rakennusmateriaaleissa voidaan arvioida laskennallisesti VTT:n ja TTY:n yhdessä kehittämän Suomalaisen homemallin (engl. Finnish mould growth model) avulla. Malli perustuu Hannu Viitaseen kehittämään laskennalliseen malliin homeen kasvulle puussa. Uudempi Suomalainen homemalli on tällä hetkellä pisimmälle kehitetty homehtumisriskin arviointityökalu maailmassa ja se sisältää eri materiaaleille käytettävät homehtumisherkkyyks- ja homeen taantumaluokat, jotka kuvaavat materiaalien herkkyyttä toimia homeiden ja mikrobien kasvun alustana ajan suhteen muuttuvissa lämpö- ja kosteusolosuhteissa. Mallissa käytetään materiaalin homehtumista kuvaavana jatkuvana suureena homeindeksiä M, joka vaihtelee välillä 0–6 ja kuvaa homekasvuston muodostamaa peittoa jonkin materiaalin pinnalla tai kahden materiaalin välisessä rajapinnassa. Kuvassa 3.17 on esitetty eri suuruisten homeindeksien määritelmät.

Mallissa lasketaan kumulatiivisesti kehittyvä homeindeksi perustuen tunnittaisiin lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoihin tarkastelupisteessä. Kuvassa 3.18 on esitetty homeen kasvulle suotuisten olosuhteiden alueet eri homehtumisherkkyyksluokille lämpötilan ja suhteellisen kosteuden koordinaatistossa. Kumulatiivinen homeindeksin arvo lasketaan lisäämällä joka ajan hetkenä edellisen hetken homeindeksiin M lisäys  $\Delta M$ , joka saa suurempia arvoja lämpimissä ja kosteissa olosuhteissa. Olosuhteiden ollessa kuvan mukaisten alueiden ulkopuolella kasvusto taantuu ja  $\Delta M$  saa negatiivisia arvoja.

Home-indeksi M	Havaittu homeenkasvu	Huomautuksia
0	Ei kasvua	Pinta puhdas
1	Mikroskoopilla havaittava kasvu	Paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma
2	Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu	Homerihmasto peittää 10 % tutkittavasta alasta (mikroskoopilla). Useita rihmastopesäkkeitä muodostunut.
3	Silmin havaittava kasvu Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu	Alle 10 % peitto alasta (silmillä) Alle 50 % peitto alasta (mikroskoopilla) Uusia itiöitä alkaa muodostua
4	Selvä silmin havaittava kasvu Runsas mikroskoopilla havaittava kasvu	Yli 10 % peitto alasta (silmällä) Yli 50 % peitto alasta (mikroskoopilla)
5	Runsas silmin havaittava kasvu	Yli 50 % peitto alasta (silmillä)
6	Erittäin runsas kasvu	Lähes 100 % peitto, tiivis kasvusto

Kuva 3.17 Suomalaisen homemallin homeindeksien määritelmät.



Kuva 3.18 Homeen kasvulle suotuisat ja epäsuotuisat alueet eri homehtumisherkkyyksiluokille.

Homehtumisherkkyyksiluokat kuvaavat homeen kasvun (ja taantumun) olosuhteista riippuvaa nopeutta sekä homeindeksin maksimiarvoa, johon homeindeksi lopulta päätyy olosuhteiden pysyessä vakiona ja homeen kasvulle suotuisina. Suomalaista homemallia käytetään tyypillisesti ajasta riippuvien lämpö- ja kosteusteknisten simulointitulosten analysoinnissa, mutta myös esimerkiksi rakennemittaustuloksista voidaan arvioida rakenteiden kosteusteknistä toimivuutta homeen kasvun kannalta mallin avulla. Uusille materiaaleille voidaan määrittää homehtumisherkkyyksiluokat laboratoriokokein, joissa aerobiologiaan ja mikroskopointiin perehtynyt asiantuntija tarkastelee homeen kasvun kehittymistä materiaalinäytteissä, joita säilytetään eri lämpö- ja kosteusolosuhteissa. Lisätietoa Suomalaisesta homemallista löytyy osoitteesta

<https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/suomalainen-homemalli/>, josta löytyy myös latauslinkki Excel-tiedostolle, jota voi käyttää homeindeksien laskemiseen.

Vaikka Stalk-hankkeen tutkimussuunnitelma ei sisältänyt homehtumisherkkyystudkimuksia, voidaan järviruoko-tärkkelyslevyn homehtumisherkkyyssluokkaa arvioida toisen hankkeen [13] tulosten avulla. Sen homehtumisherkkyysskokeessa järviruo'on homehtumisherkkyyys oli selkeästi HHL1 luokkaa. Tässä oppilastyössä arvioitiin pelkkää järviruo'on homehtumisherkkyyttä, mutta kokeen perusteella voidaan arvioida järviruoko-tärkkelyslevyn homehtumisherkkyyttä, jota tärkkelys ei ainakaan vähentäisi.

Lisäksi Biosivu-hankkeessa [14] tutkittiin vastaavilla parametreilla valmistetun hampunkorsi-tärkkelyslevyn homehtumisherkkyyttä. Levy lähetettiin homehtumisherkkyyssetesteihin Turun yliopiston aerobiologian laitokselle, ja koetuloksista voitiin nähdä sekä pinnoittamattoman että savimaalilla pinnoitetun levyn kuuluvan selkeästi homehtumisenherkkyyssluokkaan HHL1.

Nämä biopohjaisten rakennusmateriaalien koetulokset ovat hyvin vertailukelpoisia huokoisen puukuitulevyn tuloksiin. Se kuuluu myös käsittelemättömänä HHL1 luokkaan ja vasta läpibitumoituna levy kuuluu HHL2 luokkaan.

Alustavasti haluttiin myös tutkia, mikä vaikutus olisi mineraalisella sideaineella, ja siksi homehtumisherkkyysskokeeseen lähetettiin koekappaleita savi-biohiilirappauksista, ja savi-hampunpäistärelevystä. Näiden biomateriaalipitoisuudet painoprosentteina olivat vastaavasti 6 % ja 16 %, mutta savi ei estänyt näitä tuotteita homehtumasta. Kalkkimaali näiden savituotteiden pinnalla voisi vähentää niiden homehtumisherkkyyttä, mutta se jää testattavaksi seuraavissa hankkeissa.

### 3.3 Palotekniset materiaalikokeet kartiokalometrillä

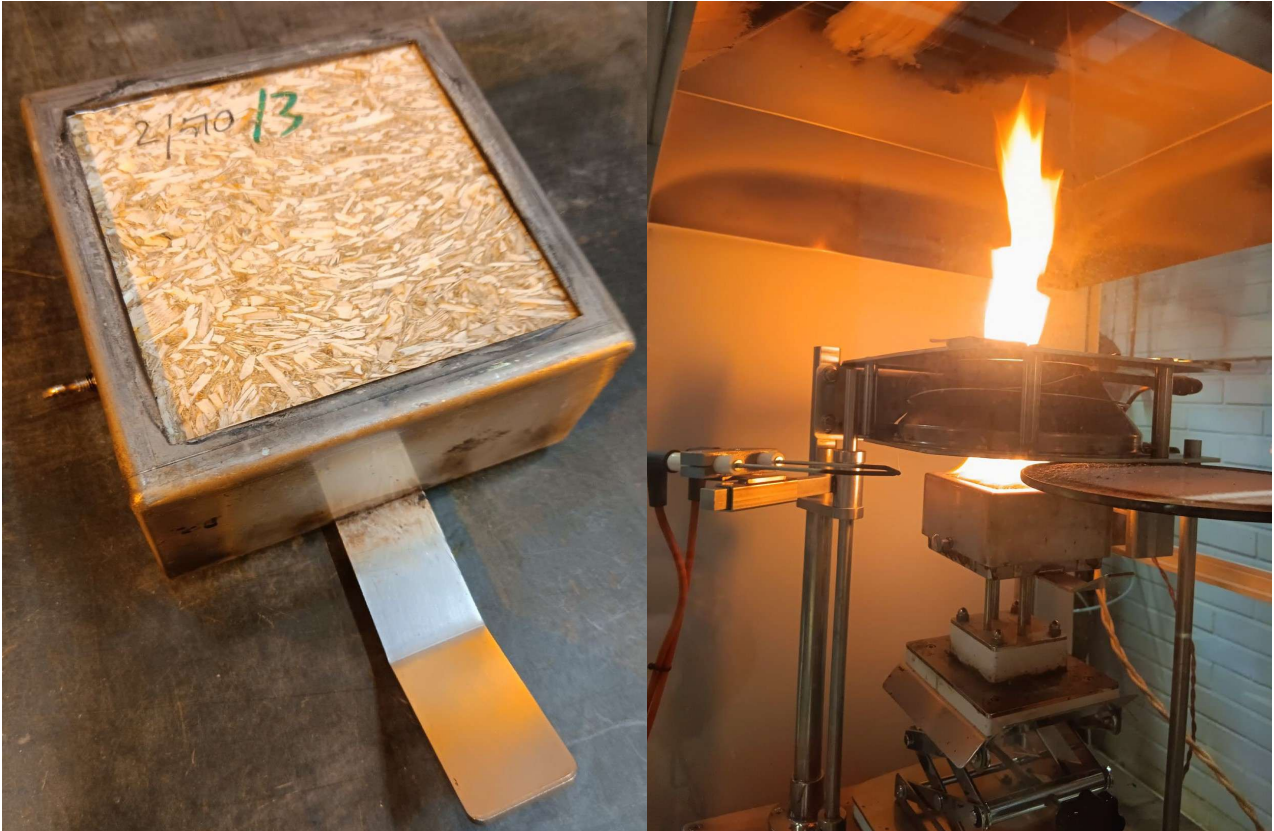
#### 3.3.1 Testaaminen kartiokalometrilaitteella

Kartiokalometrit tehtiin standardin ISO 5660-1 mukaan [15]. Standardin mukaisessa koejärjestelyssä testattavan näytteen testipinta-alan koko on 100 mm x 100 mm. 50 mm paksut ja sitä ohuempia näytteitä voidaan testata nimellispaksuudessaan. Testiaika on 10, 20 tai 30 minuuttia.

Kartiokalometritestissä koekappale asetetaan vaa'an päällä olevaan näytetelineeseen ja testipinta asetetaan vakio korkeudelle korkeussäädettävän näytetelineen ja rakotulkin avulla. Testikappaleen pinnan ja kartiokalometrin alareunan välinen etäisyys oli 25 mm ± 1 mm. Näytteen päälle tuodaan kipinäsytytin ja testipinta altistetaan vakioidulle lämpösäteilylle (50 kW/m<sup>2</sup>). Lämpö kohdistettiin ylhäältä vaakatasoisen testikappaleen yläpintaan (kuva 3.19).

Testin aikana mitataan palotapahtuman lämmöntuottoa sekä savunmuodostusta. Lisäksi määritetään visuaalisesti näytteen mahdollinen syttymisaika. Lämmöntuotto määritetään mittaamalla poistoilmasta hapen määrä ja virtausnopeus. Savunmuodostus lasketaan poistoilman läpi kulkevan lasersäteiden mittausdatan arvojen muutoksen perusteella.

Kartiokalorimetrituloksien perusteella ei saada virallista paloluokista. Tulosten perusteella voidaan arvioida materiaalin käyttäytymistä standardin EN 13501-1:2002 mukaisissa testeissä [16], kuten pienenliekin- ja SBI-testissä. Paloluokan arviointiin kartiokalorimetritulosten perusteella vaikuttaa muun muassa kokonaislämmöntuotto ja syttymisaika.



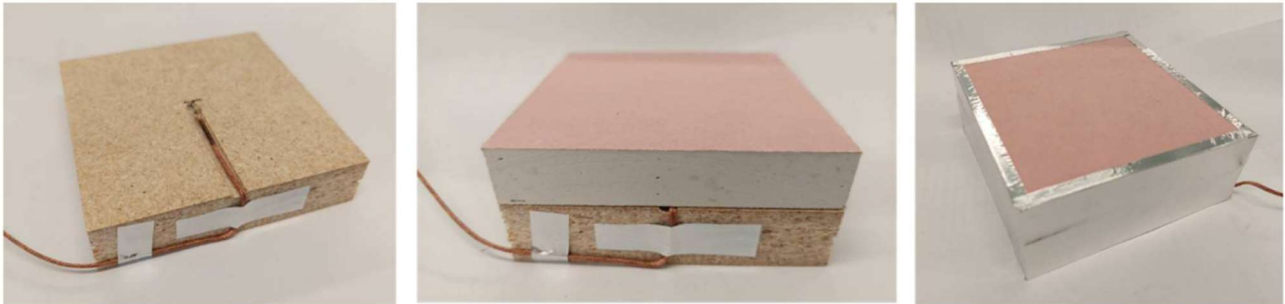
Kuva 3.19 Kartiokalorimetrikokeen koejärjestelyt.

### 3.3.2 Savirappausten palokokeet

Savirappausten koekappaleiden (Katso osa 2.3) mitat olivat 100 mm x 100 mm ja paksuusalue 9 - 24 mm ( $\pm 0,1$  mm toleranssi). Joitakin saman paksuisia savirappauksia valmistettiin testauksen toistettavuuden tutkimiseksi. Koekappaleiden alla oli puulastulevy, jonka mitat ovat 22 mm x 100 mm x 100 mm ja joiden tiheys on 700 kg/m<sup>3</sup>, katso kuvat 3.20 ja 3.21. Sekä savirappaukset että puulastulevyt käsiteltiin ilmastokammiossa 20 °C:n  $\pm$  2 °C:n ja 5 $\pm$ 0–5 %:n suhteellisessa kosteudessa pari viikkoa ennen testausta. Vertailukohtana testattiin myös kipsilevy (Gyproc GFL 18 FireLine 18 mm) ja sementtipohjaisten kuitulevyjen yhdistelmä (Swisspearl Luja A 12 mm + Cembrit Windstopper Extreme 9 mm), koska ne ovat A2-luokan materiaaleja ja täyttävät K:n palonsuojusvaatimukset K<sub>2</sub> 30.

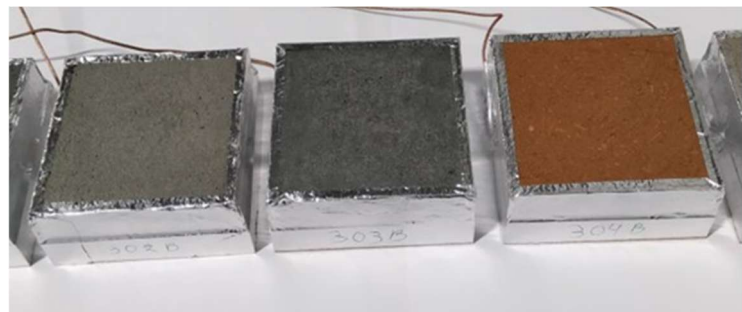
Koekappaleiden pintaluokkaa arvioitiin määrittämällä savirappausten lämmönvapautumisnopeus koko testauksen ajan. Samalla savirappausten ja vertailulevyjen palonsuojusvaikutusta arvioitiin ensisijaisesti niiden paljaalta puolelta (eli puulastulevyiltä) mitatun lämpötilan nousun avulla.

Jokainen testikappale instrumentoitiin kromeli-alumiinin (tyyppi K) termopareilla (TC) savirappauksen (tai vertailulevyn) ja lastulevyn välisessä rajapinnassa. TC:t kiinnitettiin uraan, joka jyrsittiin lastulevyn yläpintaan (lastulevyn paloalttiille puolelle) ja sijoitettiin levyn pinnan keskelle isotermin suuntaisesti ennen savirappauksen (tai vertailulevyn) asentamista (kuva 3.20). Ennen testausta näytteet käärittiin sivuilta alumiinifolioon (kuva 3.21) ilmavirran poistamiseksi ja massansiirron minimoimiseksi.



Kuva 3.20 Koekappaleen valmistelu palonsuojauskvyn testaamista varten.

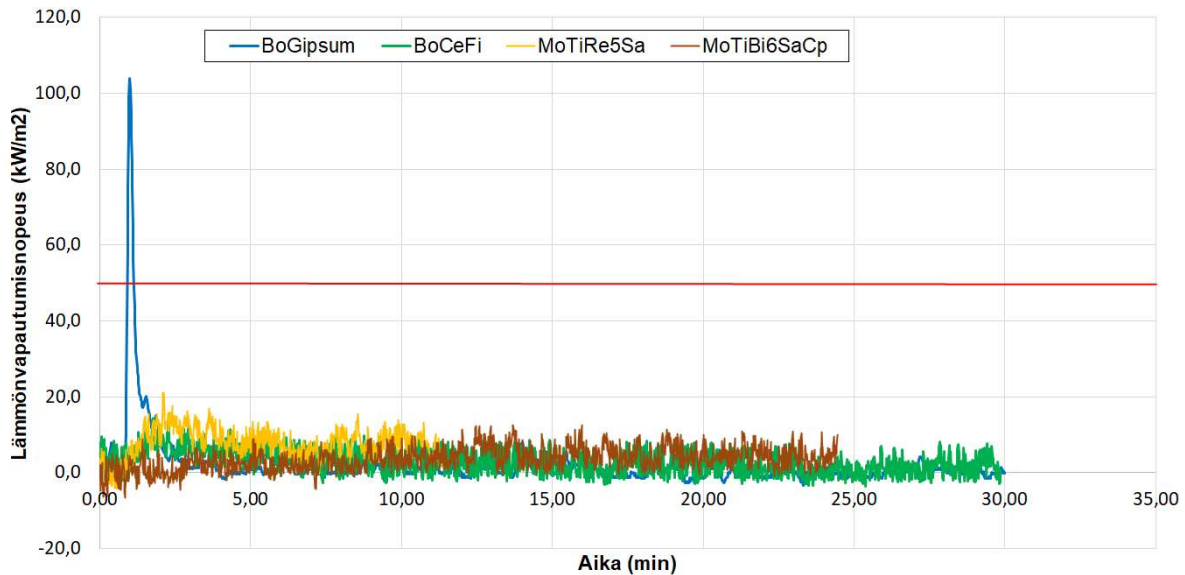
Kokeissa käytetty 50 kW/m<sup>2</sup> lämpövuorvo vastaa yleisesti käytettyä lämpövirtatasoa, jota on käytetty aiemmissa tutkimuksissa, joissa on arvioitu eri materiaalien palonsuojausvaikutusta [17], [18]. Lämpötilamittauksia tehtiin koko testausprosessin ajan, ja jokainen testi lopetettiin, kun asetettu TC mittasi 270 °C:n lämpötilan.



Kuva 3.21 Kartiokalorimetritestejä varten valmistetut testikappaleet: vasemmalla – kaavio poikkileikkaus näytteiden asettelusta, johon on asetettu lämpöanturi (TC); Oikea – Testikappaleet kääritty alumiinifolioon ennen testausta.

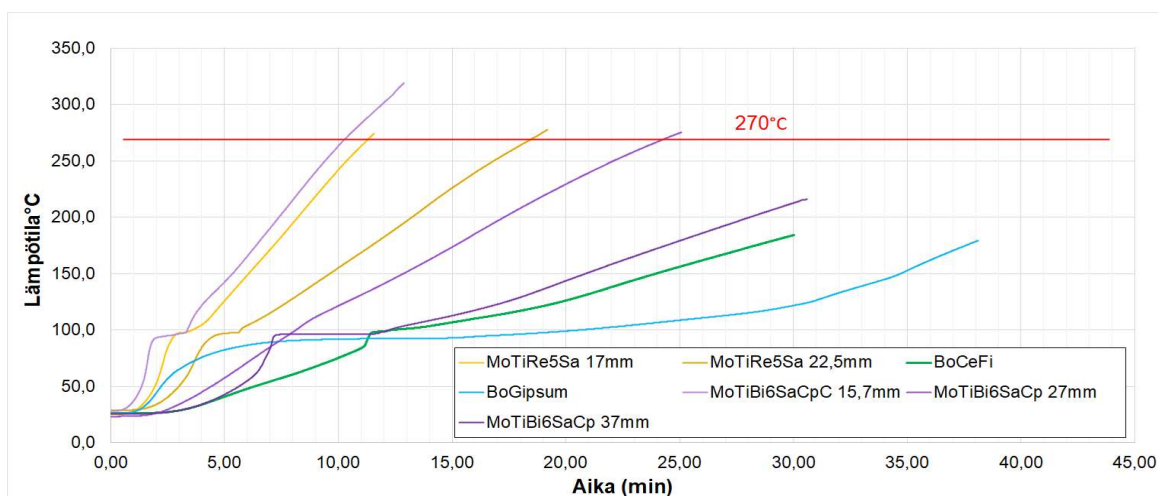
Kartiotestaus antoi ensimmäisen tärkeän tuloksen savirappausten pintaluokasta ja palonsuojauskvyydestä. Kuva 3.22 esittää lämmönvapautumisnopeudet testikappaleilla, joissa on biolisäaineita 5 % (MoTiRe5Sa) ja 6 % (MoTiBi6SaCp eli Stalk-savirappaus) ja niiden palonsuojaus vertailumateriaalit. Kipsilevyllä (Gyproc GFL) on alussa lämmön vapautumisen piikki, kun pinnassa oleva kartonki syttyy, mutta muuten kaikkien testikappaleiden lämmönvapautus on hyvin alhainen ja selvästi alle 50 kW/m<sup>2</sup>, jota pidetään rajana B- ja C-luokkien välillä. Saadut testitulokset vahvistivat

lämpöarvon laskentatuloksia, jotka osoittavat, että nämä savirappaukset kuuluisivat pintaluokkaan A2 eikä B.



Kuva 3.22 Savirappausten (MoTiRe5Sa ja MoTiBi6SaCp) lämmönvapautumisnopeus kartiokalorimetrikokeessa sekä vertailu kipsilevyyn (Gyproc GFL, tyyppi A) ja sementtipohjaiseen levyyn (Swisspearl Luja A).

Kuvassa 3.23 on esitetty valikoima eri savirappausten ja -paksuuksien lämpötilamittauksia. Testien aikana savirappausten palolta suojatun puolen lämpötilamittaukset osoittivat lämmönsiirtotavan testikappaleessa. Savesta ja biolisäaineista koostuvilla materiaaleilla on selkeä tasanko noin 100 °C:ssa, mikä johtuu veden haihtumisesta. Mitä paksumpi testikappale, sitä kauemmin haihtuminen kestää, ja sitä hitaammin lämpötila nousee savirappausten takana. Kiteytyneen veden haihtuminen kipsissä alkaa jo alhaisemmissa lämpötiloissa, ja sementtipohjaisen levyn kohdalla veden haihtuminen aiheuttaa pienen poikkeaman lämpötilan nousussa.

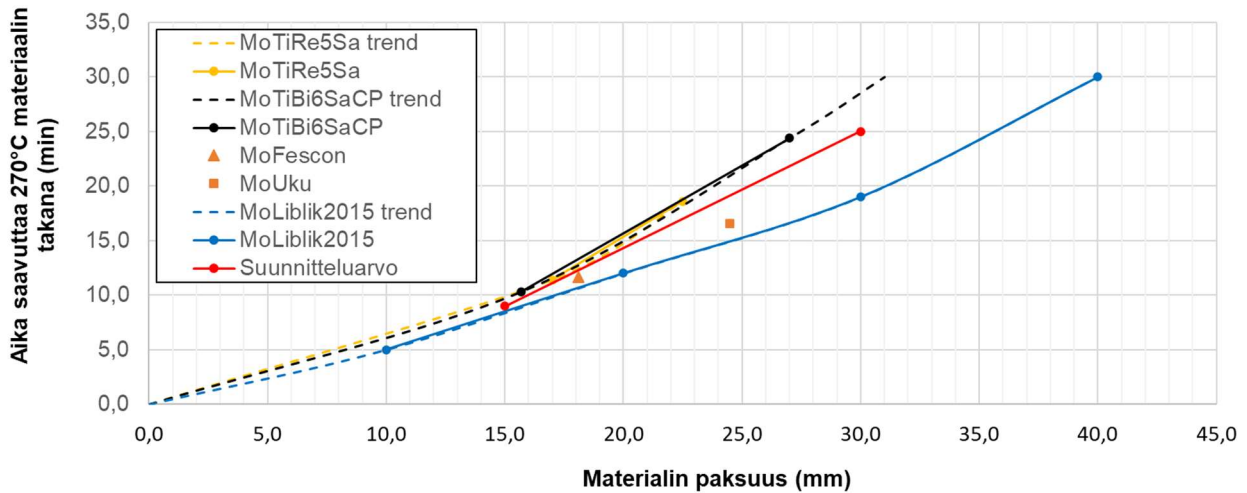


*Kuva 3.23 Lämpötilan nousu kartiokalorimetrikokeessa eri paksuisten savirappausten palolta suojatulla puolella, ja näiden vertailu kipsilevyn (BoGypsum) ja sementtipohjaiseen levyyn (BoCeFi).*

Kaikki tämän tutkimuksen savirappaukset ovat pintaluokkaa A1 tai A2 lämpöarvolaskelman perusteella, ja kutakin testikappaletta voidaan luonnehtia sen paksuuden, tiheyden ja sen ajan perusteella, joka tarvitaan lämpötilan nousemiseen 270 °C asteeseen testikappaletteen palolta suojatulla puolella (punainen viiva kuvassa 3.24). Kun samaa materiaalia on testattu useita paksuuksia, testitulosten perusteella voidaan piirtää lineaarinen käyrä ja trendikäyrä. Nämä trendikäyrät ovat poikkeuksetta eksponentiaalisia, eli testattujen materiaalien palosuojauskyky kasvaa nopeammin kuin niiden paksuus.

Savirappausten kehittämistä ohjasi kartiokalorimetritestaus, ja kuva 3.24 osoittaa, että 30 minuutin palosuojauksen saavuttamiseksi 6 % biohiiltä sisältävä savirappaus (MoTiBi6SaCP) voi olla noin 23 % ohuempi kuin perinteinen savi-hiekkarappaus (MoLiblik2015). Myös 5 % ruokoa sisältävällä savirappauksella (MoTiRe5Sa) oli hyvin samanlaiset tulokset ja trendikäyrä, mutta biohiilellä on monia muita etuja, joten se valittiin Fesconin testituotantoon. Näitä muita etuja ovat mekaaninen lujuus ja negatiivinen hiilijalanjälki pitkäaikaisen hiilen varastoinnin vuoksi. Saavuttaakseen 10 minuutin palosuojauksen biolisäaineiden määrällä tai laadulla ei näytä olevan suurta merkitystä, koska trendikäyrät näyttävät erottuvan toisistaan vasta 15 mm:n paksuuden jälkeen. Rappaustyön teknisistä syistä savirappauksissa ei voida käyttää yli 6 prosentin biolisäainepitoisuutta, kuten kohdassa 2.3 kuvattiin.

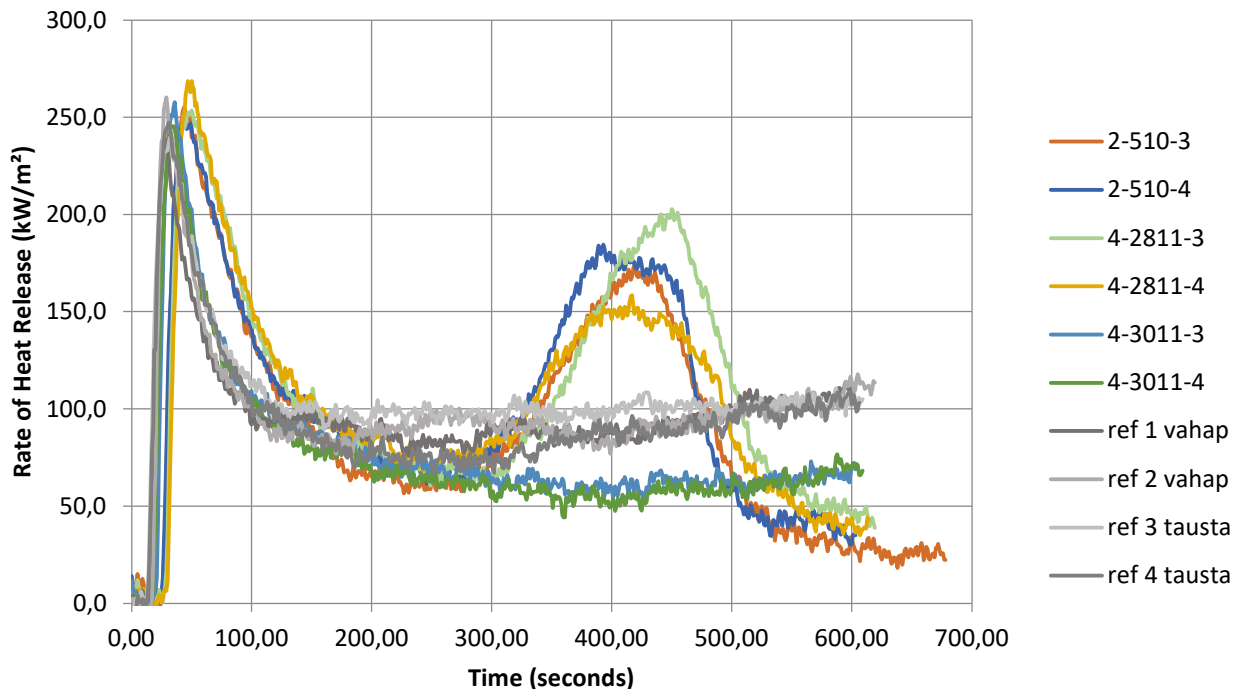
Kuvassa 3.24 on vertailuarvona mukana tulokset vastaavasta tutkimuksesta savirappauksien palonsuojauskyvystä [19], jossa esitetään suunnitteluarvo (prEN 1995-1-2:2024) savirappauksille. Suunnitteluarvo on johdettu kartiotestituloksista perustuen puutavaran hiiltymisen alkamisaikaan (300°C) perinteisten savirappausien takana (tiheysalue 1700-1800 kg/m<sup>3</sup>). Huomaa, että hiiltymisen alkamisaika (t<sub>ch</sub>) poikkeaa hieman palonsuojaustehon lämpötilakriteereistä, eli 270 °C. Kyseinen tutkimus [19] osoitti, että kartiotestauksen tulokset antavat hieman konservatiivisen mutta riittävän arvion savirappausten palosuojausajasta, jota yleensä testataan uunissa standardin mukaisissa paloaltistusolosuhteissa. Nämä tulokset ovat myös melko hyvin linjassa Ukun ja Fesconin rappaustulosten kanssa tässä tutkimuksessa.



Kuva 3.24 Savirappausten palonsuojaajan riippuvuus laastin koostumuksesta ja paksuudesta. Hankkeessa kehitettyjä savirappauksia (MoTiRe5Sa ja MoTiBi6SaCp) verrattiin kaupallisiin savi-hiekkarappauksiin (MoLiblik2015, MoFescon ja MoUku) sekä suunnitteluarvoon (punainen).

### 3.3.3 Järviruoko-tärkkelyslevyn palokokeet

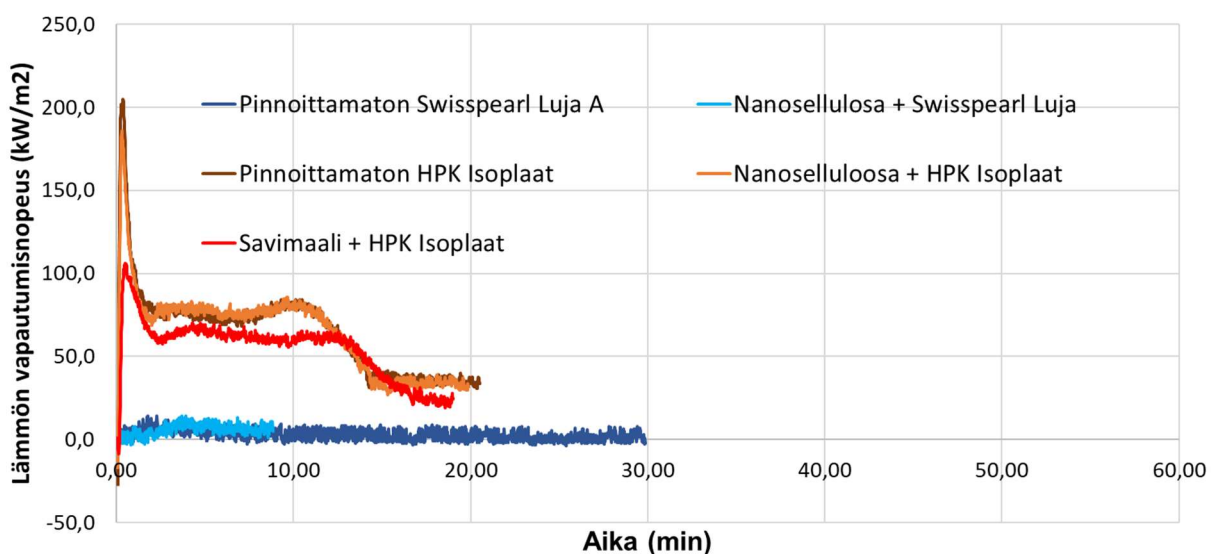
Kuvassa 3.25 on esitetty ruokolevyn lämmöntuotto ajan suhteen. Referenssinä on harmaalla esitetty myös 25 mm Hunton tuulensuojalevyn tulokset sekä vahatulta että vahaamattomalta pinnalta.



Kuva 3.25 Järviruokolevyn lämmöntuoton kuvaaja Koekappaleiden selitykset.

### 3.3.4 Nanoselluloosapinnoitteen palokokeet

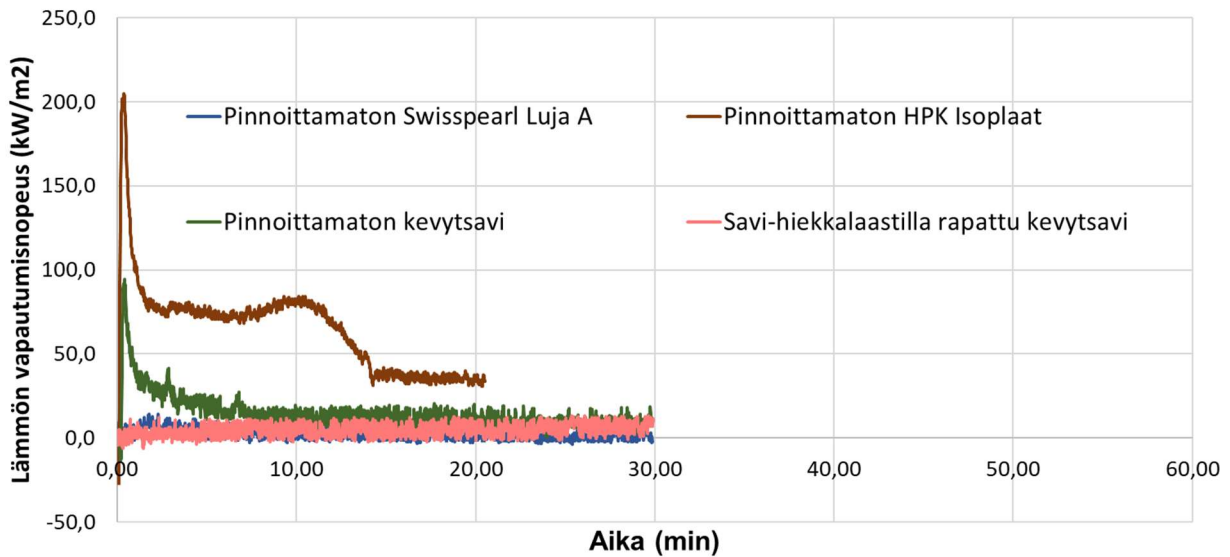
Nanoselluloosapinnoitteen pintaluokkaa, eli osallistumista paloon, tutkittiin alustavasti kartiokalorimetrikokeilla. Kokeet tehtiin pinnoitetuille ja pinnoittamattomille puukuitu- ja kuitusementtilevyille. Samalla tutkittiin myös savimaalin (2 ohutta maalikerrosta) vaikutusta puukuitulevyn pintaluokkaan. Kokeet tehtiin vain yhdellä koekappaleilla kutakin, ja sen perusteella nanoselluloosalla ei havaittu olevan vaikutusta, mutta savimaali näytti pienentävän puukuitulevyn osallistumista paloon (kuva 3.26).



Kuva 3.26 Nanoselluloosan ja savimaalin vaikutus puukuitu- ja kuitusementtilevyjen lämmön vapautusnopeuteen kartiokalorimetrikokeessa.

### 3.3.5 Savi-hampunpäistäre-eristeen palokokeet

Kevytsaven pintaluokkaa, eli osallistumista paloon, tutkittiin alustavasti kartiokalorimetrikokeilla. Kokeet tehtiin savi-hiekkalaastilla pinnoitetuille ja pinnoittamattomille kevytsavelle ja tuloksia verrattiin puukuitu- ja kuitusementtilevyjen testituloksiin (kuva 3.27). Kokeet tehtiin vain kahdella koekappaleilla kutakin, joten tulokset ovat hyvin alustavia. Tulosten perusteella rapattu kevytsavi käyttäytyy kuten A-luokan sementtikuitulevy ja pinnoittamaton kevytsävy saattaisi päästä pintaluokkaan B, sillä sen lämmön vapautumisnopeus on huomattavasti alle 50 kW/m<sup>2</sup>. Stalk-hankkeen palokonsultti Timo Jokinen arvioi, että B-luokan lämmöneristeellä voisi olla mahdollista saada rakennuslupa suoraan taulukkomitoituksen ja paloalan asiantuntijan lausunnon perusteella.



Kuva 3.27 Pinnoittamattoman ja pinnoitetun kevytsaven sekä verrokkien kartiokalorimetrikokeiden tulokset.

### 3.4 Järviruoko-tärkkelyslevyn mekaaniset materiaalikokeet

Mekaanisten materiaalitestien ensimmäisessä vaiheessa testattiin järviruokolevyjen sideaineeksi valittujen tärkkelysten vaikutusta järviruoko-tärkkelyslevyn valmistettavuuteen ja taivutuslujuuteen.

Taivutuslujuustestejä varten järviruokosilpusta sekä peruna- ja ohratärkkelyksestä valmistettiin nimellismitoiltaan 250 x 250 x 15 mm olevia koelevyjä. Ennen testausta koekappaleet tasaannutettiin olosuhdehuoneessa t 20 o C ja RH 65 % vakio-olosuhteissa. Tasaannutuksen jälkeen koekappaleet testattiin standardin EN 310– Puulevyt, taivutuskimmomodulin ja taivutuslujuuden määrittämiseksi.

Järviruoko-tärkkelyslevyjen sideaineeksi soveltuvan tärkkelyksen valinta tehtiin vertailemalla tärkkelyksen käytettävyyttä levyvalmistuksessa sekä tekemällä valmiille koekappaleille soveltuvan standardin mukaiset taivutuskokeet. Taivutuskimmomodulin ja taivutuslujuuden määrittäminen tehtiin standardin EN 310 – Puulevyt, taivutuskimmomodulin ja taivutuslujuuden määrittämiseksi. Taivutuskoekappaleiden nimellispaksuus oli 15 mm, leveys 50 mm ja tukiväli 240 mm. Koejärjestely on esitetty kuvassa 3.28. Taivutustesteissä järviruoko-perunatärkkelyslevyjen ominaisuudet olivat järviruoko-ohratärkkelyslevyjä parempia. Perunatärkkelyslevyjen kimmomodulin keskiarvo oli 1161 ja ohratärkkelyslevyjen 803 MPa. Perunatärkkelyksellä saavutettiin myös suurempi taivutuslujuus 6,32 N/mm<sup>2</sup>, ohratärkkelyksellä vastaava arvo oli 4,61 N/mm<sup>2</sup>. Tärkkelyksen valintaan liittyvät taivutustestitulokset on esitetty taulukoissa 3.10 ja 3.11.

Koekappaleiden testauksen yhteydessä havaittiin useissa koekappaleissa rakenteellisia eroja mm. sisähalkeamia, mikä vähensi peruna- ja ohratärkkelyskappaleiden vertailukelpoisuutta. Kappaleiden

virheet selittävät ainakin osan taivutustestitulosten eroista eri tärkkelysten välillä. Järviruoko-tärkkelyslevyjen valmistettavuuteen ei eri tärkkelysten välillä ollut havaittavia eroja.

Kasvikomposiittilevyjen kehitystyötä ja testikappaleiden valmistusta jatkettiin sekä peruna- että ohratärkkelyksellä, niin että Stalk-hankkeessa, järviruokolevyn valmistuksessa käytettiin ohratärkkelystä ja perunatärkkelystä käytettiin Biosivu-hankkeen hampunkorsi-tärkkelyslevyn valmistuksessa.

*Taulukko 3.10 Järviruoko + ohratärkkelyslevyjen taivutustestitulokset*

Specimen	Deflection s <sub>max</sub> [mm]	Strain ε <sub>max</sub> [%]	Force F <sub>max</sub> [N]	Flexular strength ofM [N/mm <sup>2</sup> ]	Loading time [s]	Modulus of elasticity f <sub>0.1-0.4</sub> [MPa]	of Em
4/510/RO1/1	6,2	0,9	154,1	5,2	75,02	712,64	
4/510/RO1/2	9,1	1,4	63,7	2,0	109,78	410,31	
4/510/RO1/3	4,5	0,7	111,4	3,7	54,50	655,93	
4/510/RO1/4	7,7	1,3	141,0	4,2	92,85	564,28	
5/510/RO2/1	6,8	1,0	183,6	6,7	81,69	905,18	
5/510/RO2/2	6,5	1,0	82,7	2,6	77,96	576,61	
5/510/RO2/3	7,1	1,0	145,8	5,5	58,34	772,86	
5/510/RO2/4	9,8	1,5	95,1	3,0	117,21	507,83	
6/510/RO3/1	6,5	0,8	150,1	8,0	78,26	1298,75	
6/510/RO3/2	11,5	1,5	69,5	3,3	137,38	656,59	
6/510/RO3/3	3,4	0,4	96,2	5,4	41,70	1518,35	
6/510/RO3/4	9,2	1,2	120,4	5,7	111,23	1058,45	
<b>Max.</b>	<b>11,50</b>	<b>1,53</b>	<b>183,61</b>	<b>7,95</b>	<b>137,38</b>	<b>1518,35</b>	
<b>Min.</b>	<b>3,45</b>	<b>0,41</b>	<b>63,71</b>	<b>2,01</b>	<b>41,70</b>	<b>410,31</b>	
<b>Average</b>	<b>7,36</b>	<b>1,06</b>	<b>117,81</b>	<b>4,61</b>	<b>86,33</b>	<b>803,15</b>	
<b>St.deviation</b>	<b>2,26</b>	<b>0,34</b>	<b>37,58</b>	<b>1,78</b>	<b>28,36</b>	<b>335,06</b>	
<b>st.dev.-%</b>	<b>30,67</b>	<b>31,61</b>	<b>31,90</b>	<b>38,60</b>	<b>32,85</b>	<b>41,72</b>	

Taulukko 3.11 Järviruoko + perunatärkkelyslevyjen taivutustestitulokset

Specimen	Deflection s <sub>max</sub> [mm]	Strain ε <sub>max</sub> [%]	Force F <sub>max</sub> [N]	Flexular strength of M [N/mm <sup>2</sup> ]	Loading time [s]	Modulus of elasticity E <sub>m f0.1-0.4</sub> [MPa]
7/510/RP1/1	6,9	1,0	193,0	7,1	83,04	921,63
7/510/RP1/2	4,6	0,7	63,8	1,9	55,85	492,59
7/510/RP1/3	4,7	0,7	122,4	4,3	56,89	794,86
7/510/RP1/4	10,6	1,7	73,9	2,3	126,02	344,21
1/610/RP2/1	8,7	1,0	221,0	11,8	104,06	1888,74
1/610/RP2/2	5,8	0,7	173,4	9,3	69,14	1939,35
1/610/RP2/3	4,7	0,6	180,5	9,5	72,18	2171,49
1/610/RP2/4	5,3	0,6	184,0	9,7	63,37	1853,46
2/610/RP3/1	6,0	0,9	218,2	8,0	72,08	1265,81
2/610/RP3/2	6,3	1,0	73,9	2,2	75,87	587,53
2/610/RP3/3	5,6	0,8	193,4	6,8	67,70	1078,14
2/610/RP3/4	5,5	0,9	91,2	2,8	66,16	595,79
<b>Max.</b>	<b>10,58</b>	<b>1,68</b>	<b>220,96</b>	<b>11,80</b>	<b>126,02</b>	<b>2171,49</b>
<b>Min.</b>	<b>4,64</b>	<b>0,57</b>	<b>63,77</b>	<b>1,92</b>	<b>55,85</b>	<b>344,21</b>
<b>Average</b>	<b>6,23</b>	<b>0,89</b>	<b>149,04</b>	<b>6,32</b>	<b>76,03</b>	<b>1161,13</b>
<b>St.deviation</b>	<b>1,77</b>	<b>0,29</b>	<b>59,75</b>	<b>3,47</b>	<b>20,25</b>	<b>647,20</b>
<b>st.dev.-%</b>	<b>28,46</b>	<b>32,73</b>	<b>40,09</b>	<b>54,93</b>	<b>26,64</b>	<b>55,74</b>

Järviruoko-tärkkelyslevyn varsinaiset mekaaniset materiaalitestit toteutettiin huokoiselle levyversiolle, jonka materiaalivahvuus oli 25 mm. Mekaanisten materiaalitestien tavoitteena oli arvioida huokoisen järviruoko-tärkkelyslevyn ominaisuuksia ja soveltuvuutta rakennuksen tuulensuojalevyksi.

Mekaanisia testejä varten valmistettiin huokoisia, tiheydeltään alle 300 kg/m<sup>3</sup> olevia, 25 mm vahvuisia koelevyjä. Puristuksessa käytettävää pintapainetta optimoimalla, järviruokotärkkelysseoksesta valmistettiin nimellispaksuudeltaan 30 mm vahvuisia levyjä, jotka työstettiin lopulliseen, 25 mm vahvuuteen koneellisesti hiomalla.

Testejä varten koelevyistä sahattiin standardien EN 310, ASTM D143 ja ASTM D 1037 mukaisia sekä mitoiltaan sovellettuja koekappaleita. Koekappaleita sahattiin niin, että jokaisesta levyaihiosta testattiin kimmomoduuli, taivutus-, leikkauslujuus sekä kiinnikkeen pitävyys vakio-olosuhteissa pidetyistä sekä säärasitetuista kappaleista. Referenssimateriaalina käytettiin markkinoilla olevaa 25 mm paksua Hunton – tuulensuojalevyä. Referenssinäytteille tehtiin vastaavat säärasitukset, tasaannutukset ja mekaaniset testit kuin järviruokokoekappaleille.

Koekappaleiden valmistamisen jälkeen, ennen mekaanisia testejä kappaleet pidettiin olosuhdehuoneessa t 20 o C ja RH 65 % vakio-olosuhteissa. Säärasituskoekappaleille tehtiin standardissa ASTM D 1037 esitettyä säärasitusta soveltava säärasitus Sovelletun säärasituksen sykli on esitetty taulukossa 3.12. Säärasituksen jälkeen kappaleet siirrettiin olosuhdehuoneeseen vakio-olosuhteisiin, jossa ne tasaannutettiin ennen testausta.

*Taulukko 3.12 Säärasitus sykli*

Sykli	Lämpötila	kosteus	kesto h
Kostutus	50 C	95 %	1
Kosteat olosuhteet	90 C	93 %	3
Pakkanen	-15 C	-	20
Lämmitys	95 C	-	3
Kosteat olosuhteet	90 C	93 %	3
Kuivaus	103 C	-	18
Syklityksen kesto			48
Säärasitus toistetaan 6 x			288

### 3.4.1 Taivutuslujuus

Taivutuslujuuskappaleet sahattiin neliskulmaisista levyaihioista kulmittain, jotta levyistä saatiin valmistettua mahdollisimman pitkiä kappaleita. Testikappaleiden nimellispaksuus oli 25 mm ja -leveys 50 mm. Kolmipistetaivutuksessa tukivälinä käytettiin 280 mm. Standardin mukaan tukivälin

kuuluisi olla 20 x kappaleen paksuus. Näin ollen 25 mm paksulla kappaleella tukivälin tulisi olla 500 mm. Koekappaleaihioiden koko oli 250 mm x 250 mm, joten standardin mukaisella tukivälillä testaaminen ei ollut mahdollista. Tukivälin liian suuri lyhentäminen voi aiheuttaa kappaleeseen sisäisiä leikkausvoimia taivutussuuntaa kohtisuoraa olevassa tasossa. Koekappaleiden hajoamismekanismin visuaalisen tarkastelun ja testitulosten perusteella koekappaleiden hajoaminen tapahtui kuitenkin taivutuksesta johtuvasta alapinnan vetojännityksestä ja yläpinnan puristusjännityksestä. Järviruokolevyjen testitulokset on esitetty taulukoissa 3.13 ja 3.14. Vakio-olosuhteissa pidettyjen järviruokolevyjen kimmomoduulin keskiarvo oli 132,08 MPa ja säärasitettujen 99,11 MPa. Vakio-olosuhteissa olleilla levyillä taivutuslujuuden keskiarvo oli 0,58 N/mm<sup>2</sup> ja säärasitetuilla vastaava arvo oli 0,37 N/mm<sup>2</sup>. Referenssikoekappaleet testattiin vastaavalla koejärjestelyllä kuin järviruokokoe-kappaleet. Referenssilevyjen testitulokset on esitetty taulukoissa 3.15 ja 3.16. Vakio-olosuhteissa pidettyjen referenssien kimmomoduulin keskiarvo oli 77 MPa ja säärasitettujen 181 MPa. Vakio-olosuhteissa olleilla levyillä taivutuslujuuden keskiarvo oli 0,9 N/mm<sup>2</sup> ja säärasitetuilla vastaava arvo oli 1,4 N/mm<sup>2</sup>. Säärasitus heikensi järviruokolevyjä mutta paransi hieman referenssimateriaalin jäykkyyttä ja lujuutta.



*Kuva 3.28 Taivutustestin koejärjestely*

Taulukko 3.13 Taivutustestitulokset, ruokolevyt, vakio-olosuhde

Specimen	Deflection s <sub>max</sub> [mm]	Strain ε <sub>max</sub> [%]	Force F <sub>max</sub> [N]	Flexular strength σ <sub>fM</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Loading time [s]	Modulus elasticity f <sub>0.1-0.4</sub> [MPa]	of E <sub>m</sub>
2/113	3,2	0,04	34,0	0,4	51,86	71,34	
5/113	2,7	0,03	28,9	0,4	32,49	125,14	
1/263	3,8	0,05	69,7	0,9	45,19	178,26	
2/263	3,4	0,04	44,4	0,6	45,19	178,26	
6/263	2,5	0,03	45,8	0,6	30,50	121,95	
<b>Max.</b>	<b>3,76</b>	<b>0,05</b>	<b>69,72</b>	<b>0,87</b>	<b>51,86</b>	<b>178,26</b>	
<b>Min.</b>	<b>2,49</b>	<b>0,03</b>	<b>28,89</b>	<b>0,37</b>	<b>30,50</b>	<b>71,34</b>	
<b>Average</b>	<b>3,11</b>	<b>0,04</b>	<b>45,92</b>	<b>0,58</b>	<b>41,09</b>	<b>132,08</b>	
<b>St.deviation</b>	<b>0,52</b>	<b>0,01</b>	<b>15,74</b>	<b>0,19</b>	<b>9,16</b>	<b>44,90</b>	
<b>st.dev.-%</b>	<b>16,60</b>	<b>15,42</b>	<b>34,28</b>	<b>33,09</b>	<b>22,30</b>	<b>33,99</b>	

Taulukko 3.14 Taivutustestitulokset, ruokolevyt, säärasitetut

Specimen	Deflection s <sub>max</sub> [mm]	Strain ε <sub>max</sub> [%]	Force F <sub>max</sub> [N]	Flexular strength σ <sub>fM</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Loading time [s]	Modulus elasticity f <sub>0.1-0.4</sub> [MPa]	of E <sub>m</sub>
Sr 1/113	3,1	0,6	33,6	0,4	36,72	68,52	
Sr 7/263	2,2	0,4	24,0	0,3	27,56	106,98	
Sr 8/263	2,7	0,5	27,6	0,3	32,49	69,61	
Sr 4/263	1,9	0,4	26,2	0,3	23,13	137,68	
Sr 3/263	3,2	0,0	34,9	0,4	39,21	104,80	
<b>Max.</b>	<b>3,20</b>	<b>0,60</b>	<b>34,87</b>	<b>0,44</b>	<b>39,21</b>	<b>137,68</b>	

<b>Min.</b>	<b>1,90</b>	<b>0,04</b>	<b>23,98</b>	<b>0,31</b>	<b>23,13</b>	<b>68,52</b>
<b>Average</b>	<b>2,60</b>	<b>0,37</b>	<b>29,29</b>	<b>0,37</b>	<b>31,64</b>	<b>99,11</b>
<b>St.deviation</b>	<b>0,55</b>	<b>0,22</b>	<b>4,75</b>	<b>0,06</b>	<b>6,57</b>	<b>29,05</b>
<b>st.dev.-%</b>	<b>21,25</b>	<b>58,10</b>	<b>16,23</b>	<b>16,09</b>	<b>20,78</b>	<b>29,31</b>

Taulukko 3.15 Taivutustestitulokset, referenssit, vakio-olosuhde

<b>Specimen</b>	<b>Deflection</b> $S_{max}$ [mm]	<b>Strain</b> $\epsilon_{max}$ [%]	<b>Force</b> $F_{max}$ [N]	<b>Flexular strength</b> $\sigma_{fM}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>Loading time</b> [s]	<b>Modulus of elasticity</b> $E_{m, f0.1-0.4}$ [MPa]
Ref 1	8,0	2,1	129,6	0,9	95,54	79,96
Ref 2	8,3	2,1	123,4	0,9	99,43	76,09
Ref 3	12,1	3,2	128,3	0,9	145,25	71,59
Ref 4	8,3	2,1	131,1	1,0	99,73	80,36
<b>Max.</b>	<b>12,1</b>	<b>3,2</b>	<b>131,1</b>	<b>1,0</b>	<b>145,2</b>	<b>80</b>
<b>Min.</b>	<b>8,0</b>	<b>2,1</b>	<b>123,4</b>	<b>0,9</b>	<b>95,5</b>	<b>72</b>
<b>Average</b>	<b>9,2</b>	<b>2,4</b>	<b>128,1</b>	<b>0,9</b>	<b>110,0</b>	<b>77</b>
<b>St.deviation</b>	<b>1,98</b>	<b>0,53</b>	<b>3,36</b>	<b>0,03</b>	<b>23,58</b>	<b>4</b>
<b>st.dev.-%</b>	<b>21,57</b>	<b>22,08</b>	<b>2,62</b>	<b>3,62</b>	<b>21,44</b>	<b>5,31</b>

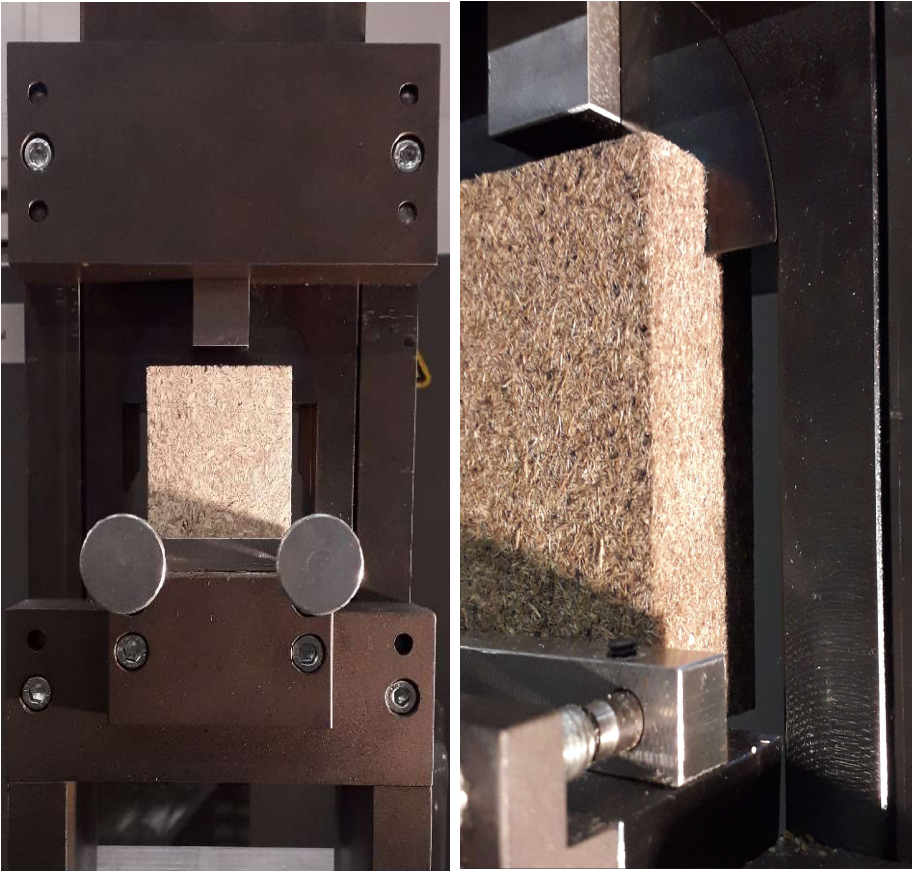
Taulukko 3.16 Taivutustestitulokset, referenssit, säärasitetut

<b>Specimen</b>	<b>Deflection</b> $S_{max}$ [mm]	<b>Strain</b> $\epsilon_{max}$ [%]	<b>Force</b> $F_{max}$ [N]	<b>Flexular strength</b> $\sigma_{fM}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>Loading time</b> [s]	<b>Modulus of elasticity</b> $E_{m, f0.1-0.4}$ [MPa]
sr ref 1	6,5	1,3	109,9	1,4	62,11	175,42

sr ref 2	6,5	1,3	99,2	1,2	77,71	166,79
sr ref 3	9,7	1,9	122,1	1,5	116,46	175,03
sr ref 4	8,4	1,7	134,3	1,7	100,27	206,99
<b>Max.</b>	<b>9,7</b>	<b>1,9</b>	<b>134,3</b>	<b>1,7</b>	<b>116,5</b>	<b>207</b>
<b>Min.</b>	<b>6,5</b>	<b>1,3</b>	<b>99,2</b>	<b>1,2</b>	<b>62,1</b>	<b>167</b>
<b>Average</b>	<b>7,8</b>	<b>1,5</b>	<b>116,4</b>	<b>1,4</b>	<b>89,1</b>	<b>181</b>
<b>St.deviation</b>	<b>1,56</b>	<b>0,32</b>	<b>15,17</b>	<b>0,19</b>	<b>24,02</b>	<b>18</b>
<b>st.dev.-%</b>	<b>20,11</b>	<b>20,41</b>	<b>13,03</b>	<b>13,03</b>	<b>26,95</b>	<b>9,80</b>

### 3.4.2 Leikkauslujuus

Järviruoko-tärbkelyslevyn leikkauslujuuden testaaminen tehtiin standardin ASTM D143 - Standarditestimenetelmät pienille virheettömille puokappaleille - mukaan. Standardin mukaan koekappaleiden uloimmat nimellimitat ovat 25 mm x 50 mm x 65 mm. Koekappaleen päätyyn toiselle lapepinnalle tehdään neliskulmainen lovi. Loven mitat ovat 12,5 mm x 50 mm x 15 mm. Koekappale asetetaan testilaitteeseen niin, että loven sisänurkka on kiinni yläpainimen reunassa. Painimella painetaan näytteen toista reunaa alaspäin ja toinen pysyy tuen avulla paikoillaan. Tarkoituksena on, että näyte leikkautuu kappaleen keskilinjaa pitkin. Testijärjestely on esitetty kuvassa 3.29. Järviruokolevyjen leikkauslujuustestitulokset on esitetty taulukoissa 3.17, 3.18 ja referenssinäytteiden tulokset taulukossa 3.19 ja 3.20. Koekappaleiden mitat ja kosteuspitoisuudet on esitetty taulukossa 3.21. Järviruokomateriaalilla vakio-olosuhteissa pidettyjen kappaleiden leikkauslujuuden arvot (0,124 MPa) olivat hieman suurempia verrattuna säärasitettuihin kappaleisiin (0,096 MPa). Referenssimateriaalilla vakio-olosuhde koekappaleiden leikkauslujuuden (0,162 MPa) ja säärasitettujen näytteiden leikkauslujuuden arvojen (0,165 MPa) välillä ei käytännössä ollut eroa. Säärasitus alensi hieman järviruokomateriaalin leikkauslujuutta mutta ei referenssimateriaalin.



*Kuva 3.29 Leikkauslujuustestin koejärjestely*

Taulukko 3.17 Leikkauslujuustestitulokset, ruokolevy, vakio-olosuhde

Key Word	Vakio-olosuhde	Product Name	Ruokolevy
Method File Name	20240530 Leikkauslujuus D-143.vwav	Test Date	30/05/2024
Test Type	Compression	Speed	5mm/min
Shape	Plate	Qty/Batch:	10

Name Parameters	Fmax Calc. at Entire Areas	$\tau$ Calc. at Entire Areas	Time to failure Calc. at Entire Areas	Max_Stroke Calc. at Entire Areas
Unit	N	MPa	sec	mm
8-263	369,399	0,14668	14,5000	1,20816
2-113	319,957	0,13000	15,2500	1,27026
7-263	340,584	0,13586	19,5500	1,62901
1-263	418,531	0,16400	12,1500	1,01221
4-263	197,104	0,07945	10,5000	0,87456
5-113	234,433	0,09603	16,0000	1,33311
6-263	293,191	0,11808	25,1000	2,09151
2-263	231,809	0,09506	17,1500	1,42898
3-263	295,794	0,12098	25,2500	2,10393
1-113	385,442	0,15511	24,3000	2,02464
Average	308,624	0,12413	17,9750	1,49764
Standard Deviation	72,3175	0,02770	5,37552	0,44801
Maximum	418,531	0,16400	25,2500	2,10393
Minimum	197,104	0,07945	10,5000	0,87456

Taulukko 3.18 Leikkauslujuustestitulokset, ruokolevy, säärasitettu

Key Word	Säärasitettu	Product Name	Ruokolevy
Method File Name	20240530 Leikkauslujuus D-143.vwav	Test Date	31/05/2024
Test Type	Compression	Speed	5mm/min
Shape	Plate	Qty/Batch:	10

Name Parameters	Fmax Calc. at Entire Areas	$\tau$ Calc. at Entire Areas	Time to failure Calc. at Entire Areas	Max_Stroke Calc. at Entire Areas
Unit	N	MPa	sec	mm
6-263	242,582	0,09867	13,3500	1,11234
8-263	296,738	0,11987	26,4000	2,19981
7-263	205,093	0,08396	16,3500	1,36235
3-263	276,375	0,11361	80,4800	6,70511
2-263	153,183	0,06272	14,6500	1,22036
1-263	356,249	0,14324	13,3500	1,11196
4-266	157,751	0,06429	32,3000	2,69135
5-115	191,313	0,07964	18,2000	1,51625
1-113	237,438	0,09719	27,1500	2,26202
2-113	259,623	0,10384	28,7500	2,39566
Average	237,635	0,09670	27,0980	2,25772
Standard Deviation	63,4994	0,02517	20,0210	1,66807
Maximum	356,249	0,14324	80,4800	6,70511
Minimum	153,183	0,06272	13,3500	1,11196

Taulukko 3.19 Leikkauslujuustestitulokset, referenssi, säärasitettu

Key Word	Säärasitettu	Product Name	Referenssi
Method File Name	20240530 Leikkauslujuus D-143.vmav	Test Date	31/05/2024
Test Type	Compression	Speed	5mm/min
Shape	Plate	Qty/Batch:	8

Name Parameters	Fmax Calc. at Entire Areas Unit N	$\tau$ Calc. at Entire Areas MPa	Time to failure Calc. at Entire Areas sec	Max_Stroke Calc. at Entire Areas mm
31	362,622	0,14671	15,0500	1,25389
32	381,274	0,15390	17,4500	1,45390
33	416,016	0,17128	19,3500	1,61203
34	417,235	0,17222	19,8000	1,64962
35	388,678	0,15865	18,4500	1,53734
36	385,954	0,15494	16,9500	1,41198
37	390,274	0,15585	15,8500	1,32062
38	451,332	0,18328	15,6500	1,30387
Average	399,173	0,16210	17,3188	1,44291
Standard Deviation	27,6481	0,01220	1,76492	0,14704
Maximum	451,332	0,18328	19,8000	1,64962
Minimum	362,622	0,14671	15,0500	1,25389

Taulukko 3.20 Leikkauslujuustestitulokset, referenssi, vakio-olosuhde

Key Word	Vakio-olosuhde	Product Name	Referenssi
Method File Name	20240530 Leikkauslujuus D-143.vmav	Test Date	30/05/2024
Test Type	Compression	Speed	5mm/min
Shape	Plate	Qty/Batch:	9

Name Parameters	Fmax Calc. at Entire Areas Unit N	$\tau$ Calc. at Entire Areas MPa	Time to failure Calc. at Entire Areas sec	Max_Stroke Calc. at Entire Areas mm
Ref_21	382,241	0,15458	33,7500	2,81228
Ref_22	442,992	0,17963	34,8500	2,90393
Ref_23	438,705	0,17760	22,6500	1,88695
Ref_24	387,011	0,15525	21,6000	1,79954
Ref_25	387,806	0,15563	22,5000	1,87469
Ref_26	412,286	0,16661	22,1000	1,84127
Ref_27	420,616	0,18017	27,7000	2,30809
Ref_28	383,571	0,15639	25,9000	2,15816
Average	406,904	0,16573	26,3813	2,19811
Standard Deviation	25,1958	0,01175	5,32064	0,44348
Maximum	442,992	0,18017	34,8500	2,90393
Minimum	382,241	0,15458	21,6000	1,79954

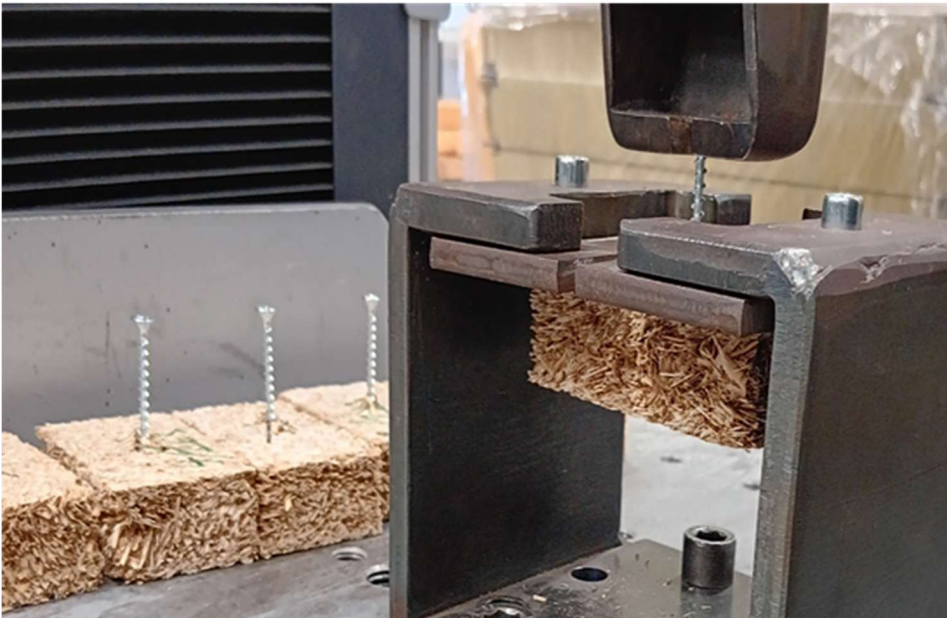
Taulukko 3.21 Leikkauslujuustestikoekappaleiden mitat ja kosteuspitoisuudet

Vakio-olosuhde	Pituus	Leveys	Kosteus
	k.a mm	k.a mm	%
Ref 21	49,34	50,14	7,30
Ref 22	49,48	50,12	7,32
Ref 23	48,83	49,88	7,20
Ref 24	49,50	49,90	7,19
Ref 25	49,37	49,91	7,17
Ref 26	49,27	49,83	7,27
Ref 27	46,16	50,15	7,26
Ref 28	48,71	50,12	7,31
8-263	49,62	50,52	9,79
2-113	49,53	50,43	9,72
7-263	49,62	50,43	9,96
1-263	49,73	50,60	10,01
4-263	49,46	49,94	9,87
5-113	49,44	50,16	9,71
6-263	49,46	50,26	9,79
2-263	48,91	50,35	9,79
3-263	48,62	50,44	9,61
1-113	49,50	50,47	9,62

Säärasitetut	Pituus	Leveys	Kosteus
	k.a mm	k.a mm	%
Ref 31	49,47	50,15	7,13
Ref 32	49,52	50,11	7,05
Ref 33	48,82	49,86	7,15
Ref 34	49,30	49,45	6,92
Ref 35	49,36	49,60	7,07
Ref 36	49,51	49,74	7,18
Ref 37	49,69	50,13	7,11
Ref 38	49,35	49,45	6,98
6-263	49,39	50,20	8,73
8-263	49,57	50,23	8,76
7-263	49,44	49,97	8,67
3-263	47,59	49,40	8,61
2-263	49,50	50,08	8,71
1-263	49,68	50,28	8,92
4-266	49,10	50,37	8,87
5-115	48,95	49,71	8,79
1-113	48,46	49,87	8,87
2-113	49,13	50,20	8,84

### 3.4.3 Kiinnikkeen pitävyys

Järviruoko-tärkkelyslevyjen kiinnikkeen pitävyydestä kohtisuoraan levyn pintaa vastaan tehtiin standardin ASTM D 1037 Standardimenetelmät puupohjaisten kuitu- ja lastulevymateriaalien ominaisuuksien arviointiin – mukaan. Koekappaleiden koko oli 50 mm x 80 mm x 25 mm. Kiinnikkeen reiän esiporauksessa käytettiin 3,2 mm halkaisijan poranterää. Testiruuvinä käytettiin 3,8 mm x 51 mm kipsilevyruuvia ja vetonopeus oli 15 mm minuutissa. Koejärjestely on kuvassa 3.30. Vakio-olosuhteissa pidettyjen levyjen kiinnikkeen ulosvetojännityksen keskiarvo oli 6,87 MPa ja säärasitettujen 4,73 MPa. Referenssimateriaalilla vastaavat arvot olivat 4,95 MPa ja säärasitetulla materiaalilla 4,81 MPa. Säärasitetuista koelevyistä kiinnikkeet irtosivat hieman helpommin kuin vakio-olosuhteissa pidetyistä. Referenssimateriaalilla tapahtui samoin mutta ero jännityksissä oli huomattavasti alhaisempi. Testitulokset on esitetty taulukoissa 3.22–26.



*Kuva 3.30 Kiinnikkeen pitävyydestin koejärjestely*

Taulukko 3.22 Kiinnikkeenpitävyydestin tulokset, huokoinen ruokolevy, vakio-olosuhde

Key Word	Stalk vakio-olosuhde	Product Name	Huokoinen korsilevy
Method File Name	240614_ruuvinveto.vwav	Test Date	14.6.2024
Test Type	Tensile	Speed	15mm/min
Shape	Area	Qty/Batch:	10

Name Parameters	F_max Calc. at Entire Areas	Max_Stroke Calc. at Entire Areas	Stress Calc. at Entire Areas
Unit	N	mm	N/mm2
1-263	94,6730	1,36191	8,34859
7-263	73,4355	1,87426	6,47579
2-263	75,5356	2,24911	6,66099
6-263	82,8941	1,56159	7,30989
4-263	68,8198	1,22384	6,06877
5-113	62,4784	1,43673	5,50956
3-263	97,2028	1,46095	8,57168
8-263	77,3664	1,46188	6,82243
1-113	86,8073	1,44921	7,65496
2-113	59,8751	1,64913	5,27999
Average	77,9088	1,57286	6,87027
Maximum	97,2028	2,24911	8,57168
Minimum	59,8751	1,22384	5,27999

Taulukko 3.23 Kiinnikkeenpitävyydestin tulokset, huokoinen ruokolevy, säärasitettu

Key Word	Stalk Säärasitetut	Product Name	Huokoinen korsilevy
Method File Name	240614_ruuvinveto.vwav	Test Date	14.6.2024
Test Type	Tensile	Speed	15mm/min
Shape	Area	Qty/Batch:	10

Name Parameters	F_max Calc. at Entire Areas	Max_Stroke Calc. at Entire Areas	Stress Calc. at Entire Areas
Unit	N	mm	N/mm2
3-263	60,6709	1,72295	5,35017
6-263	67,3650	2,64913	5,94048
4-263	55,1617	1,68597	4,86435
8-263	54,5167	1,54898	4,80747
5-113	57,6612	2,23676	5,08476
7-263	52,1870	1,79935	4,60203
1-113	45,8948	2,16181	4,04716
1-263	68,4297	1,09836	6,03437
2-113	35,5247	1,76111	3,13269
2-263	39,4730	1,81158	3,48086
Average	53,6885	1,84760	4,73444
Maximum	68,4297	2,64913	6,03437
Minimum	35,5247	1,09836	3,13269

Taulukko 3.24 Kiinnikkeenpitävyydestin tulokset, referenssi, vakio-olosuhde

Key Word	Vakio-olosuhde	Product Name	Referenssi
Method File Name	240614_ruuvinveto.vwav	Test Date	14.6.2024
Test Type	Tensile	Speed	15mm/min
Shape	Area	Qty/Batch:	8

Name Parameters Unit	F_max Calc. at Entire Areas N	Max_Stroke Calc. at Entire Areas mm	Stress Calc. at Entire Areas N/mm2
1_1	56,8830	2,32320	5,01614
1_2	57,3561	2,71182	5,05786
1_3	54,0537	2,43636	4,76664
1_4	51,9568	2,67328	4,58173
1_5	62,8393	3,24874	5,54138
1_6	45,8381	2,56180	4,04216
1_7	54,0377	2,22406	4,76523
1_8	66,8811	2,26165	5,89780
Average	56,2307	2,55511	4,95862
Maximum	66,8811	3,24874	5,89780
Minimum	45,8381	2,22406	4,04216

Taulukko 3.25 Kiinnikkeenpitävyydestin tulokset, referenssi, säärasitetut

Key Word	Säärasitetut	Product Name	Referenssi
Method File Name	240614_ruuvinveto.vwav	Test Date	14.6.2024
Test Type	Tensile	Speed	15mm/min
Shape	Area	Qty/Batch:	8

Name Parameters Unit	F_max Calc. at Entire Areas N	Max_Stroke Calc. at Entire Areas mm	Stress Calc. at Entire Areas N/mm2
10	53,7791	3,26093	4,74243
11	59,7047	3,27389	5,26497
12	59,2710	3,12401	5,22672
13	58,0482	2,86103	5,11889
14	61,9879	3,08640	5,46631
15	63,8302	3,32397	5,62877
16	65,8861	3,24860	5,81006
17	13,9528	0,82433	1,23041
Average	54,5575	2,87540	4,81107
Maximum	65,8861	3,32397	5,81006
Minimum	13,9528	0,82433	1,23041

Taulukko 3.26 Kiinnikkeenpitävyytestikoeappaleiden paksuudet

Vakio-olosuhde	Paksuus	Säärasitetut	Paksuus
	k.a mm		k.a mm
Ref 1	24,85	Ref 10	25,71
Ref 2	25,07	Ref 11	24,79
Ref 3	25,55	Ref 12	25,23
Ref 4	25,79	Ref 13	25,49
Ref 5	25,15	Ref 14	25,30
Ref 6	24,96	Ref 15	25,41
Ref 7	25,87	Ref 16	24,93
Ref 8	25,55	Ref 17	25,74
1-263	25,77	3-263	25,53
7-263	25,33	6-263	25,67
2-263	25,64	4-263	25,55
6-263	25,36	8-263	25,53
4-263	25,53	5-113	25,48
5-113	25,38	7-263	25,40
3-263	25,50	1-113	25,40
8-263	25,41	1-263	25,69
1-113	25,42	2-113	25,41
2-113	25,47	2-263	25,51

#### 3.4.4 Mekaanisten materiaalikokeiden yhteenveto

Koekappaleiden mekaanisten materiaalikokeiden tarkoituksena oli selvittää järviruokolevyn mekaanisia ominaisuuksia ja verrata näitä referenssimateriaaliksi valitun Hunton – tuulensuojalevyn mekaanisiin arvoihin. Koe- ja referenssilevyt testattiin toisiaan vastaavin menetelmin. Stalk-hankkeessa valmistettujen ja testattujen järviruokolevyjen testituloksien keskiarvot olivat osittain referenssilevyjä parempia.

Säärasitettujen koekappaleiden vanhennus tehtiin olosuhdekaapissa soveltaen standardia ASTM D 1037. Sovellettu säärasitusykyllisyys on esitetty taulukossa 3.10. Säärasituskoekappaleita ei altistettu vesirasitukselle. Vakio-olosuhdekappaleet pidettiin olosuhdehuoneessa t 20°C ja Rh 65 %. Säärasitetuista testikappaleista testattiin taivutus- ja leikkauslujuus sekä kiinnikkeen pysyvyys. Säärasitus vaikutti heikentävästi järviruokokappaleiden taivutuslujuuden, kimmomoduulin, leikkauslujuuden sekä kiinnikkeen ulosvetojännitykseen. Referenssimateriaalilla säärasitus lisäsi koekappaleiden taivutusjäykkyyttä ja taivutuskimmomoduulia mutta muihin arvoihin rasituksella ei juurikaan ollut vaikutusta. Säärasituksesta aiheutuneet erot materiaalien mekaanisissa arvoissa eivät kuitenkaan olleet huomattavan suuria.

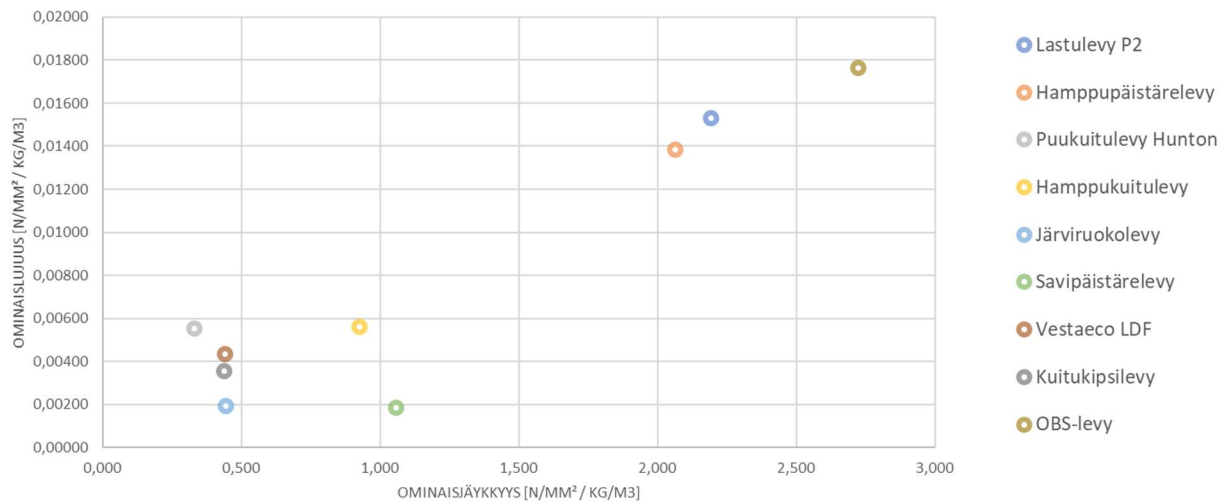
Vakio-olosuhteissa pidettyjen koekappaleiden testitulosten keskiarvoja vertaillaessa järviruokolevyjen taivutuskimmomoduuli (132,08 Mpa) oli referenssilevyjä (77 Mpa) suurempi mutta taivutuslujuuden arvo (0,58 N/mm<sup>2</sup>) jäi vastaavasti referenssilevyn (0,90 N/mm<sup>2</sup>) alapuolelle. Järviruokolevy on siis jäykempää mutta ei kestä yhtä suurta voimaa kuin referenssimateriaali. Kiinnikkeen pitävyyden testissä järviruokolevy (6,57 N/mm<sup>2</sup>) pärjasi markkinoilla olevaa tuulensuojalevyä (4,96 N/mm<sup>2</sup>) paremmin. Leikkauslujuustestissä järviruokolevyn arvot (0,124 Mpa) olivat hieman referenssimateriaalia (0,165 Mpa) alhaisempia.

Testattujen 25 mm vahvojen järviruokolevyjen tiheys oli noin 300 kg / m<sup>3</sup>. Tiheys on markkinoilla olevaa tuulensuojalevyä 235 kg / m<sup>3</sup> suurempi. Suurempi tiheys vaikuttaa negatiivisesti muun muassa levyjen käsiteltävyyteen. Alustavien testitulosten perusteella järviruosta on mahdollista valmistaa levytuotteita, joita voisi käyttää myös esimerkiksi tuulensuojalevyinä. Levyjen valmistamista tulisi kuitenkin kehittää, jotta levyjen mekaanisia ominaisuuksia saataisiin parannettua ja tiheyttä madallettua. Stalk- ja Biosivu-hankkeessa kehitettyjen järviruoko- ja hammppulevyjen sekä kaupallisten referenssimateriaalien ominaisarvoja on koottu taulukkoon 3.27. Kuvassa 3.31 on esitetty vastaavien levyjen ominaislujuuksia.

*Taulukko 3.27 Levyjen mekaanisia ominaislujuuksia*

Levyvahvuus ~25 mm	Tiheys kg/ m <sup>3</sup>	Taivutuslujuus N/mm <sup>2</sup>	Ominaislujuus N/mm <sup>2</sup> /kg/m <sup>3</sup>	Taivutuskimmomoduuli N/mm <sup>2</sup>	Ominaisjäykkyyys N/mm <sup>2</sup> / kg/m <sup>3</sup>
Kuitukipsilevy [20]	1150	4,10	0,00357	500	0,435
Savipäistärelevy [14]	920	1,72	0,00187	971	1,055

Lastulevy [21]	685	10,50	0,01533	1500	2,190
OSB-levy [22]	680	12,00	0,01765	1850	2,721
Hamppukuitulevy [14]	326	1,84	0,00564	301	0,923
Olkilevy [23]	320	1,40	0,00438	140	0,438
Järviruokolevy [24]	300	0,58	0,00193	132	0,440
Hamppupäistärelevy [14]	260	3,60	0,01385	536	2,062
Puukuitulevy [25]	235	1,30	0,00553	77	0,328



**Kuva 3.31** Biosivu- ja Stalk-hankkeissa kehitettyjen hamppu- ja järviruokolevyjen sekä joidenkin tunnettujen, markkinoilla olevien puu- ja kasvikuitulevyjen ominaislujuusarvojen vertailu

## 4 Rakennetutkimukset

### 4.1 Olkielementti-ulkoseinärakenteiden kenttäkokeet

Hankkeessa tutkittiin 400 mm paksuilla olkieriste-elementeillä varustetun ulkoseinärakenteen rakennusfysikaalista käyttäytymistä 17 kuukauden koejakson aikana eri vuodenaikoina ja verrattiin rakenteen toimivuutta aiemmassa ECOSAFE-hankkeessa tutkittuihin kutterinlastueristeisiin rakenteisiin.

Olkielementtirakenteena tutkittiin EcoCocon Oyn suositusrakennetta. Suositusrakenne on suunnattu lähinnä pientaloille. Kokeet toteutettiin Tampereen yliopiston Hervannan kampuksen koekentällä sijaitsevissa koerakennuksissa (Kuva 4.1). Koerakennukset on toteutettu teräsrakenteisella pilari-palkkirungolla siten, että yhden rakennuksen polyuretaanieristetyin rungon väleihin voidaan asentaa yhteensä 12 seinäelementtiä ja 3 yläpohjaelementtiä. Seinäelementin maksimileveys on 1,2 m ja korkeus 2,5 m.

Kaikkiin koerakenteisiin asennettiin yhtenevät anturoinnit, joilla mitattiin eri rakennekerrosten rajapintojen olosuhteita. Rakenteiden oman anturoinnin lisäksi koerakennuksilla on sekä ohjaus- että mittausjärjestelmät, joilla pystytään tarkasti säätämään ja mittaamaan sisäilman olosuhteita. Ulkoilman olosuhteita seurataan koerakennusalueen omalla sääasemalla.



Kuva 4.1 Koerakennusalue

#### 4.1.1 Rakenteet

Tutkittavat rakenteet ja kokoaminen on esitetty kuvassa 4.2. Tutkittavien rakenteiden runko muodostoi kahdesta 600 mm leveästä ja 400 mm paksuisesta Ecococon-olkielementistä. Elementeissä on puurunko, jossa on vaneripohja ja päällinen, ja jonka sisään on puristettu olkieriste. Ennen elementtien rakennusta, elementit punnittiin, jotta voidaan tarvittaessa jälkikäteen arvioida elementin tiheyttä ja asennusaikaista kosteuspitoisuutta.

Elementit, ja elementin sisäpuolen verhous, eristettiin toisistaan molemmin puolin muoviin käärityllä vanerilevyllä. Levyn tarkoitus oli estää kosteuden siirtyminen elementtien välillä. Näin kummallakin puoliskolla voitiin testata eri sisäverhousmateriaaleja. Ensimmäisessä puoliskossa sisäpintana

testattiin savirappausta, joka rapattiin suoraan olkielementtiin. Toisessa puoliskossa sisäpinnassa oli aluksi fermacell-kuitukipsilevy, joka vaihdettiin noin vuoden koejakson jälkeen, 1.2.2025, 15 mm paksuiseen vanerilevyyn. Vanerilevy oli vastaavanlainen, kuin referenssinä käytetyissä ECOSAFE-projektin rakenteissa. Olkielementit ruuvattiin puurungostaan toisiinsa noin 40 cm välein.

Olkielementin ulkopinnassa, molemmissa puoliskoissa oli Solitex Mento 3000 diffuusioavoin aluskatteeksi tarkoitettu ilmansulkukangas ja -kalvo, josta vesihöyry pääsee läpi, mutta joka estää nestemäisen veden. Kalvon valmistajan ilmoittamat materiaaliominaisuudet olivat, paksuus 0,45 mm, tiheys  $150 \text{ kg/m}^3$ , diffuusiovastuskerroin  $\mu = 110$ , diffuusiovastus  $S_d = 0,05 \text{ m}$ , ja lämmönjohtavuus  $\lambda = 2,3 \text{ W/(mK)}$

Ilmansulku taitettiin myös elementtien ulkopintaan ja tuotiin yhtenäisenä rakenteen sisäpuolelle asti. Ilmansulun saumakohdat teipattiin järjestelmään kuuluvalla ilmansulkuteipillä. Samoin teipattiin ruuvien kannat.

Kalvon ulkopuolelle ruuvattiin 60mm Steico Protect puukuitulevy. Steico puukuitulevy muodostuu kolmesta 20mm yhteenliimatusta puukuitulevystä. Valmistajan ilmoittama lämmönjohtavuus on  $\lambda = 0,048 \text{ W/(mK)}$  ja diffuusiovastuskerroin  $\mu = 5$ . Myös puukuitulevyn saumat teipattiin ilmansulkuteipillä.

Elementteihin kiinnitettiin lämpötila- ja kosteusanturit jokaiseen kerrokseen. Anturikaapelit tuotiin elementin sisäpuolelle alakulman kautta, joten mittausalueilla elementeissä ei ole sisä- ja ulkopinnan välisiä läpivientejä.

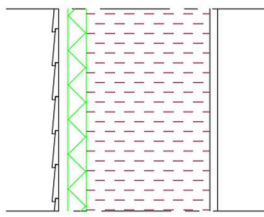




*Kuva 4.2 Rakenteiden kokoaminen*

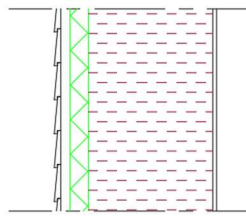
Puukuitulevyn ulkopintaan kiinnitettiin pystyruoteet n. 100 mm x 32 mm sahatusta kuusilaudasta, johon kiinnitettiin lautaverhous. Tuulensuojavälin rakenne ja vaakasuuntainen lautaverhous, UTV 20 x 120 mm pohjamaalattu ulkoverhouslauta, toteutettiin vastaavasti kuin referenssirakenteissa [26].

STALK-projektissa tutkittavien rakenteita verrattiin aiemmin ECOSAFE-projektissa tutkittuihin rakenteisiin. Rakenteiden poikkileikkaukset on esitetty kuvassa 4.3. Näissä referenssirakenteissa on eristekerroksena 300 mm kutterinlastu, osassa savetettuna. Tuulensuojalevynä näissä oli puukuitutuulensuojalevy 25 mm Hunton tai kivivillatuulensuojalevy. Vertailtavuuden parantamiseksi yhteen referenssirakenteeseen E3\_S asennettiin vastaava Solitex Mento tuulensuojakangas ja Steico puukuitutuulensuojalevy kuin olkirakenteissa. Referenssirakenteiden osalta on huomioitava, että näiden rakenteiden E2, E3\_V ja E4 tutkimus jatkui mittausaikana vauriotutkimuksella jossa rakenteiden höyrynsulku rei'itettiin tammikuussa 2024. Rakenteet rei'itettiin (3 kpl 3,5mm halkaisijaltaan olevia reikiä 1700 mm korkeudella). Rei'ityksen odotetaan vaikuttavan niin, että rakenteisiin pääsee enemmän vesihöyryä sisäpuolelta ja kosteuspitoisuus rakennekerroksissa nousee.



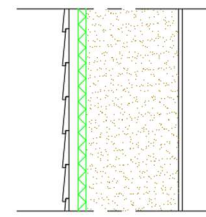
Rakennetyyppi S1

Puuverhous	22 mm
Tuuletusväli	30 mm
Steico puukuitutuulensuoja	60 mm
Solitex Mento 3000 tuulensuojakangas	
Olkielementti	400 mm
Savirappaus (kolmikerrosrappaus)	28 mm



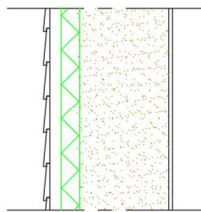
Rakennetyyppi S2

Puuverhous	22 mm
Tuuletusväli	30 mm
Steico puukuitutuulensuoja	60 mm
Solitex Mento 3000 tuulensuojakangas	
Olkielementti	400 mm
Fermacell-kipsilevy (myöh. vaneri)	15 mm



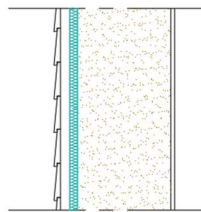
Referenssi E2

Puuverhous	22 mm
Tuuletusväli	30 mm
Hunton puukuitutuulensuoja	25 mm
Savetettu kutterinlastueriste	300 mm
Vaneri	15 mm



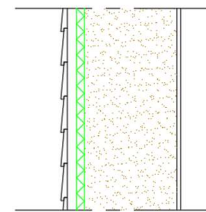
Referenssi E3-S

Puuverhous	22 mm
Tuuletusväli	30 mm
Steico puukuitutuulensuoja	60 mm
Solitex Mento 3000 tuulensuojakangas	
Kutterinlastueriste	300 mm
Vaneri	15 mm



Referenssi E3-V

Puuverhous	22 mm
Tuuletusväli	30 mm
Paroc Cortex kivivillatuulensuoja	30 mm
Kutterinlastueriste	300 mm
Vaneri	15 mm



Referenssi E4

Puuverhous	22 mm
Tuuletusväli	30 mm
Hunton puukuitutuulensuoja	25 mm
Kutterinlastueristys	300 mm
Vaneri	15 mm

Kuva 4.3 Tutkittujen rakenteiden ja referenssirakenteiden rakenneleikkaukset

Rakenteita koottiin kaksi, toinen koerakennuksen etelä- ja toinen pohjoisjulkisivulle. Rakenteet koottiin ja niihin asennettiin anturit koerakennusalueen hallissa, jonka jälkeen ne siirrettiin ja asennettiin koerakennuksen aukkoihin puukilojen varaan. XPS-eristekiilat pitivät rakenteen irti aukon reunoista ja väli tiivistettiin uretaanivaahdolla aukon reunoihin. Lopuksi kiinnitettiin lautaverhous pystyruoteisiin.

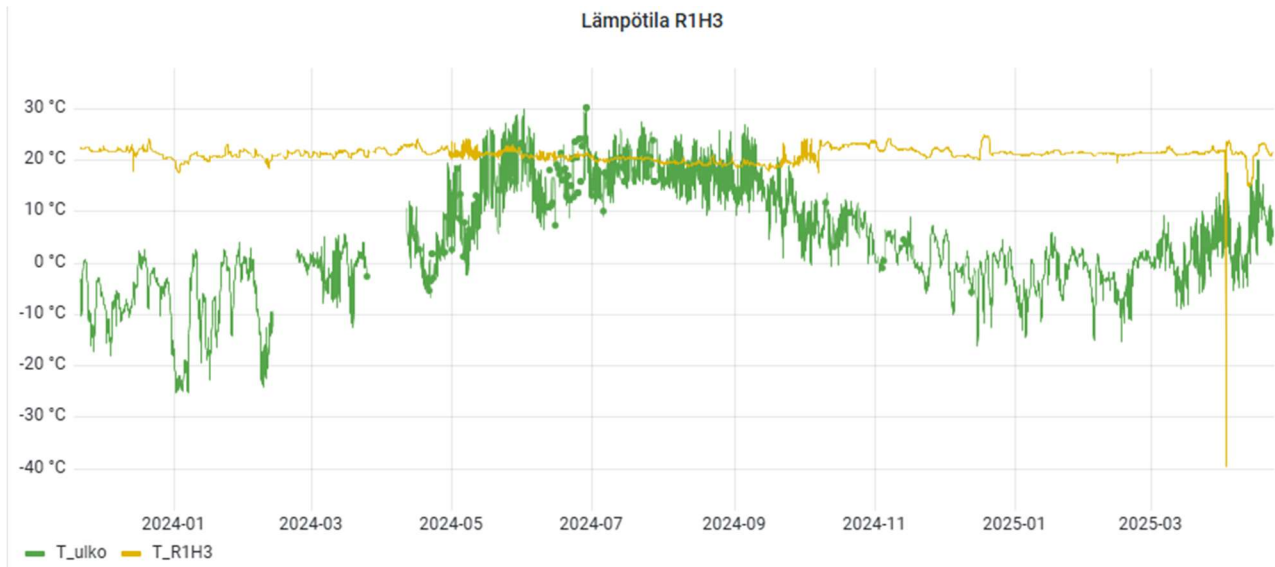


*Kuva 4.4 Kuvat rakenteiden asennuksesta*

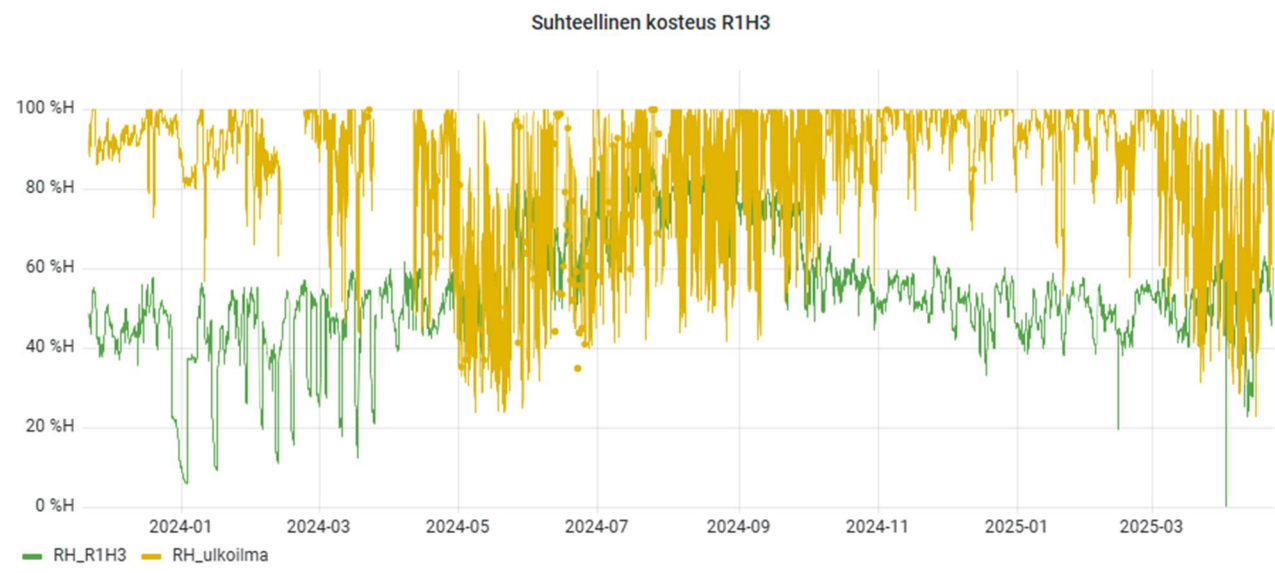
Rakenteiden sisäpintaan toteutettiin vasempaan elementtiin savirappaus kolmikerrosrappauksena. Noin 10 mm paksuinen pohjarappaus tehtiin 16.8.2023. Väli-rappaus 10 mm toteutettiin 28.8 ja kolmas hienorappauskerros n. 5 mm paksuisena rapattiin 22.9. Rappaukset toteutti Ecococonin edustaja ja ammattimainen savirappaja. Toiseen elementtipuoliskoon asennettiin fermacell-kipsilevy 27.10.2023. Mittaukset aloitettiin viimeisen rappauskerroksen annettua kuivua noin kuukauden ajan 23.11.2023.

#### 4.1.2 Ulko- ja sisäilman olosuhteet tutkimusjakson aikana

Kuvissa 4.5 ja 4.6 on esitetty koerakennuksen ulko- ja sisäilman olosuhteet, suhteellinen kosteus ja lämpötila tutkimuksen aikana. Koerakennuksen sisälämpötila on säädetty pysymään tasaisesti +21 °C lämpötilassa. Sisätilan suhteellinen kosteus on tutkimusjaksolla ollut pääosin välillä 40–60 % RH lukuun ottamatta kylmimpiä vuoden 2024 tammi–maaliskuun lyhyitä pakkasjaksoja ja loppukesää heinä–syyskuu.

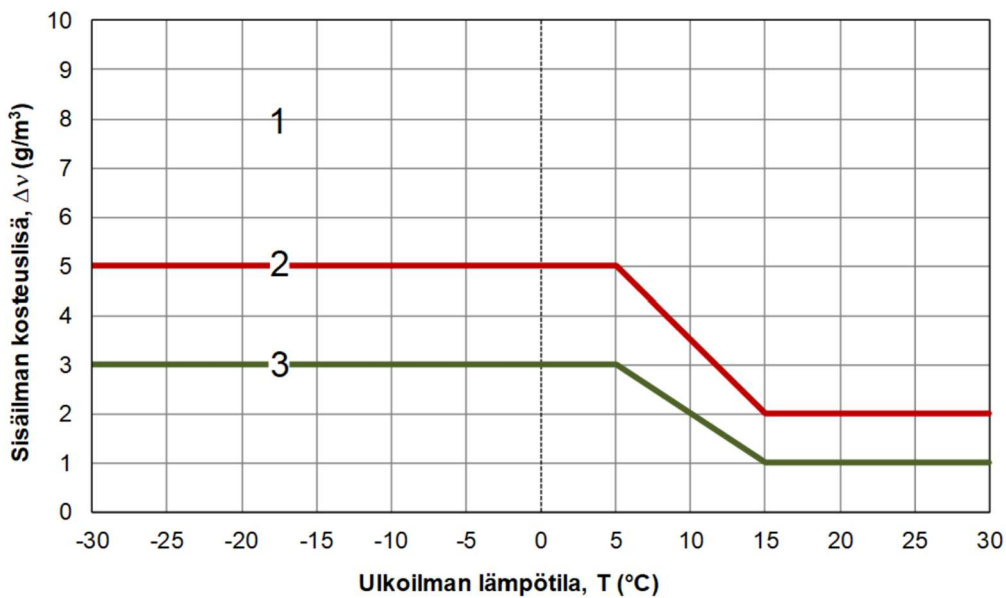


Kuva 4.5 Lämpötila ulkona ja sisällä koejakson aikana 21.11.2023–23.4.2025

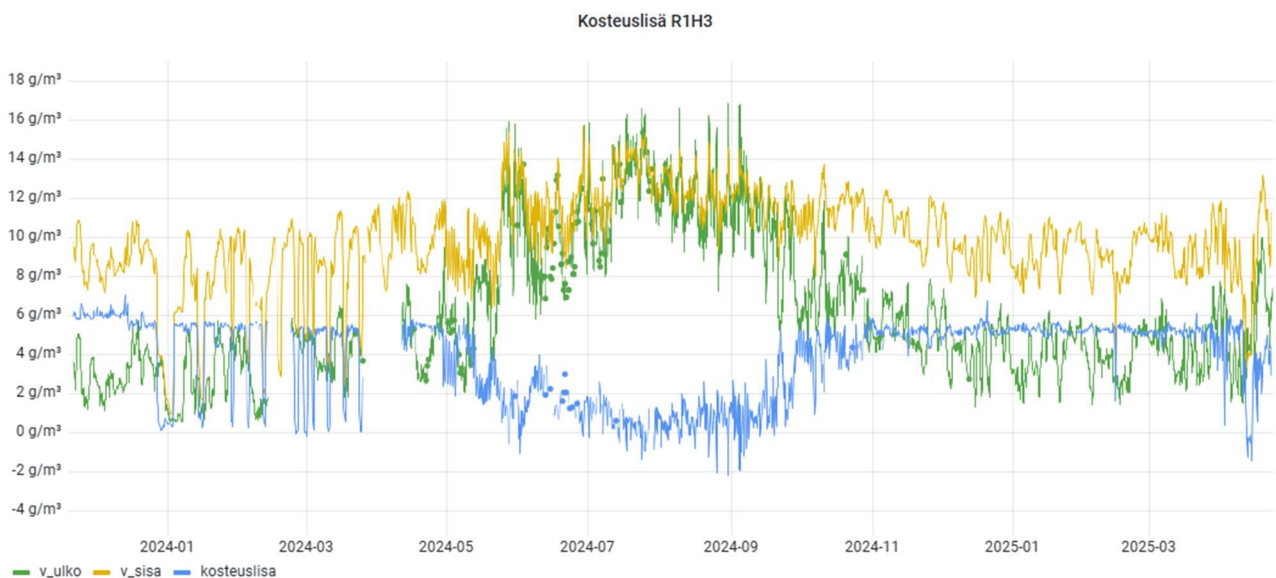


Kuva 4.6 Suhteellinen kosteus (%RH) ulkona ja sisällä koejakson aikana 21.11.2023–23.4.2025

Koerakennuksessa ylläpidetään sisäilman kosteudensä, joka säätyy ulkoilman lämpötilan perusteella noudattaen RIL 107-2022 [27] mukaista kosteudensä kosteudensäluokassa 2 (kts. kuva 4.7). Kosteudensä on  $+2...5 \text{ g/m}^3$  ja se muuttuu lineaarisesti ulkoilman lämpötilojen  $+5...15 \text{ }^\circ\text{C}$  välillä siten, että ulkoilman lämpötilan laskiessa myös kosteudensä laskee. Kuvasta 4.8 näkyy, että talviaikaan kosteudensä noudattaa hyvin mitoitusarvoa, mutta kesäaikaan ulkoilman lämpötilan vaihdellessa  $+5...15 \text{ }^\circ\text{C}$  välillä kosteudensässä on enemmän vaihtelua sen kuitenkin seurattessa tällöinkin mitoitusarvoa. Rakennuksen sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero on pidetty lähellä nollaa.



Kuva 4.7 Sisäilman kosteudensä



Kuva 4.8 Kosteuspitoisuus (g/m<sup>3</sup>) ulkona ja sisällä, sekä mitattu sisäilman kosteudensä koejakson aikana 21.11.2023-23.4.2025

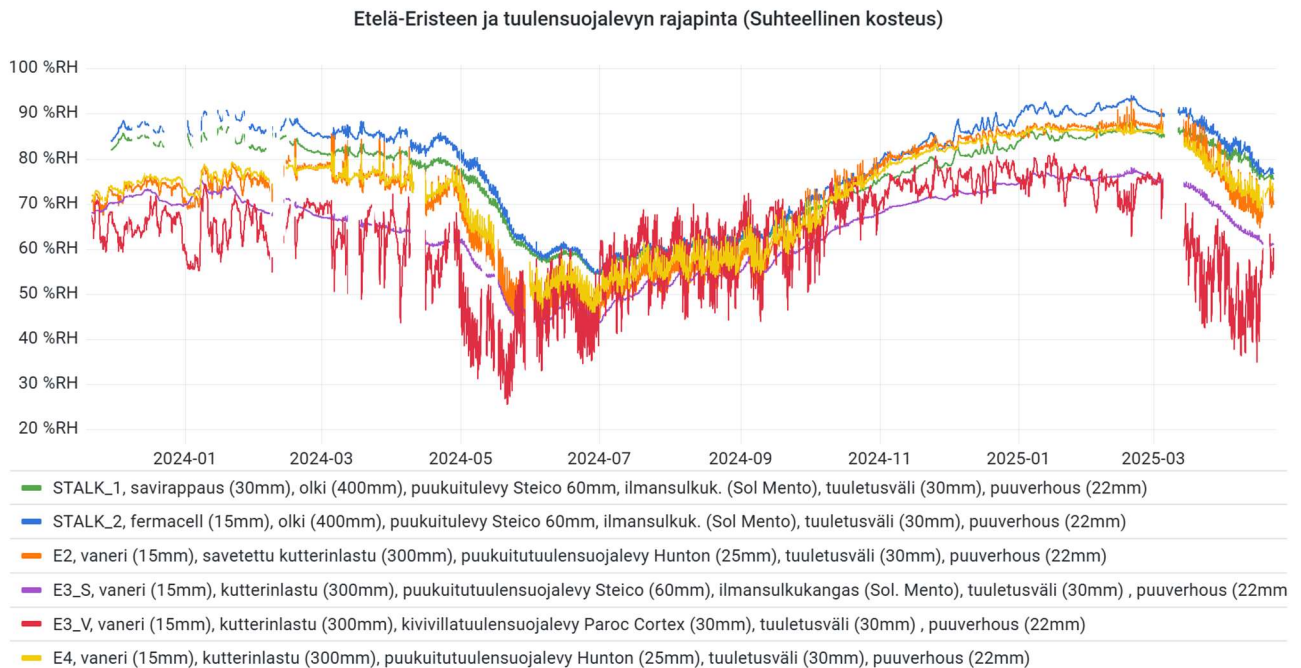
### 4.1.3 Tulokset

Kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisin kohta on tyypillisesti eristekerroksen ja tuulensuojalevyn rajapinnassa. Toinen tässä tarkasteltava piste on eristeen sisäpinta. Vertailu tehtiin aiemmin ECOSAFE-projektissa asennettuihin kutterinlastulla eristettyihin rakenteisiin samassa koerakennuksessa.

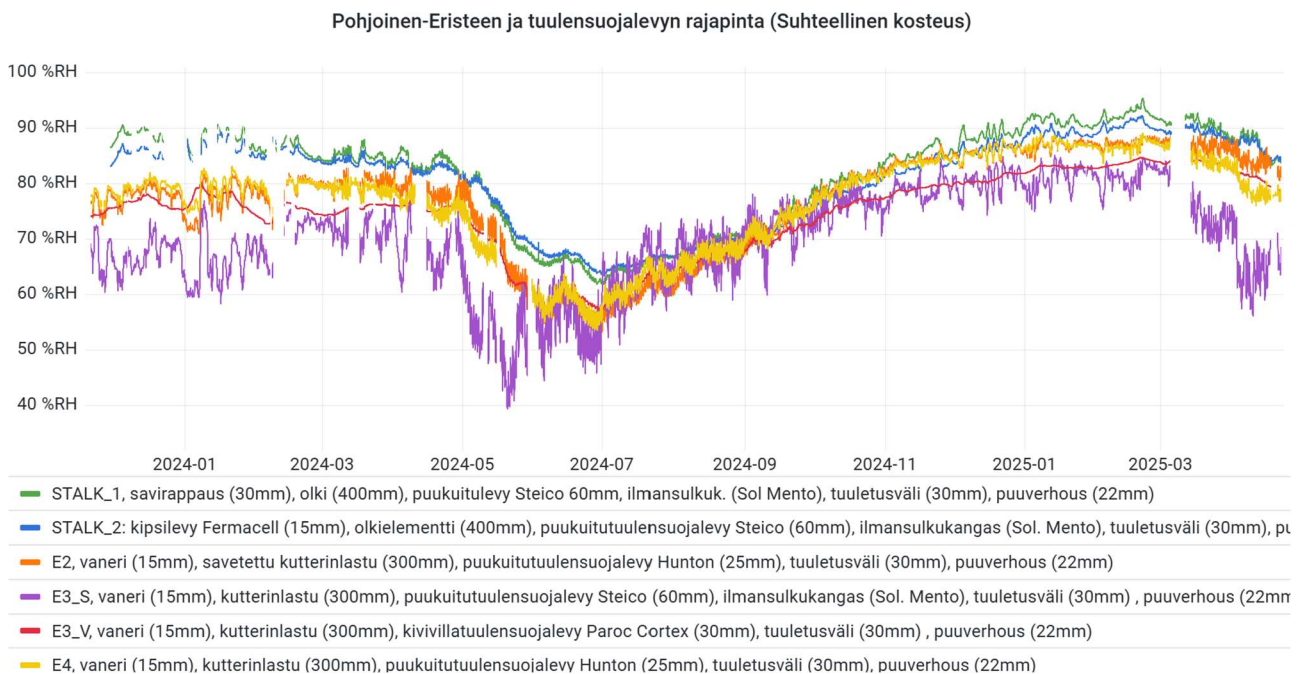
Kuvissa 4.9–4.10 on esitettyä mitattu suhteellinen kosteus eristeen ulkopinnassa koko 16 kuukauden tarkastelujaksolla. referenssirakenteista erottuu violetilla rakenne E3\_S, jossa eristeen ulkopuoliset kerrokset ovat vastaavia kuin tutkittavissa olkirakenteissa. Siinä oli myös 60 mm paksu puukuitu-tuulensuojalevy ja sen alla Solitex Mento ilmansulkukangas. Rakenteessa E4 oli muutoin sama rakenne kuin E3\_S, mutta siinä oli 25 mm puukuitu-tuulensuojalevy, eikä ilmansulkukangasta eristeen ulkopinnassa. Näiden kahden rakenteen tuloksia vertaamalla näkyy, että paksu 60 mm puukuitulevy, joka siis on Ecococon-olkirakenteessakin käytössä, tasaa jo sinänsä tehokkaasti kosteusvaihteluita varsinaisen eristekerroksen ulkopinnassa. Tosin 60 mm paksu tuulensuojalevy toimii jo lämmöneristeenäkin rakenteessa. Paksumpi tuulensuojalevy alentaa suhteellista kosteutta eristeen ulkopinnassa jopa 10 %-yksikköä. Rakenteessa E3\_V oli kivivillatuulensuojalevy ja sen osalta näkyy, että suhteellinen kosteus on samalla tasolla kuin 60 mm puukuitutuulensuojalevyllä, mutta vaihtelut ovat jyrkempiä. Kivivillan osalta toisaalta kosteus nousee korkeammalle, mutta rakenne myös kuivuu nopeammin.

Kuvista 4.9–4.10 näkyy myös, että rakenteella STALK2 (olkirakenne, kipsilevy sisäpinnassa) suhteellinen kosteus eristeen ulkopinnassa oli molempina talvikausina rakenteista korkeimmalla tasolla, noin 5 %-yksikköä korkeammalla kuin referenssirakenteilla. Kesäkaudellakin sen suhteellinen kosteus pysyi korkeammalla kuin muilla rakenteilla ja vain rakenteen E3\_V, jossa kivivillatuulensuoja, korkeimmat kosteuspiikit kävivät lyhytaikaisesti korkeammalla. Erityisesti on huomattava, että STALK2-rakenteen suhteellinen kosteus oli jopa 20 %-yksikköä korkeampi kuin kutterinlastueristeisellä rakenteella E3\_S, jossa vastaava puukuitutuulensuojalevy ja ilmansulku. Vastaava ero oli rakenteeseen E3\_V, jossa oli kivivillatuulensuoja.

Myös rakenteen STALK1 (olkirakenne, savirappaus sisäpinnassa) suhteellinen kosteus oli suuren osan talviajasta korkeammalla kuin referenssirakenteilla. Syksyllä 2024 sen suhteellinen kosteus on ollut referenssirakenteita alemmalla tasolla, mutta jälleen keväällä 2025 korkeammalla. Senkin osalta on huomattava, että rakenteiden E3\_S ja E3\_V suhteellinen kosteus eristeen ulkopinnassa on merkittävästi alempi.

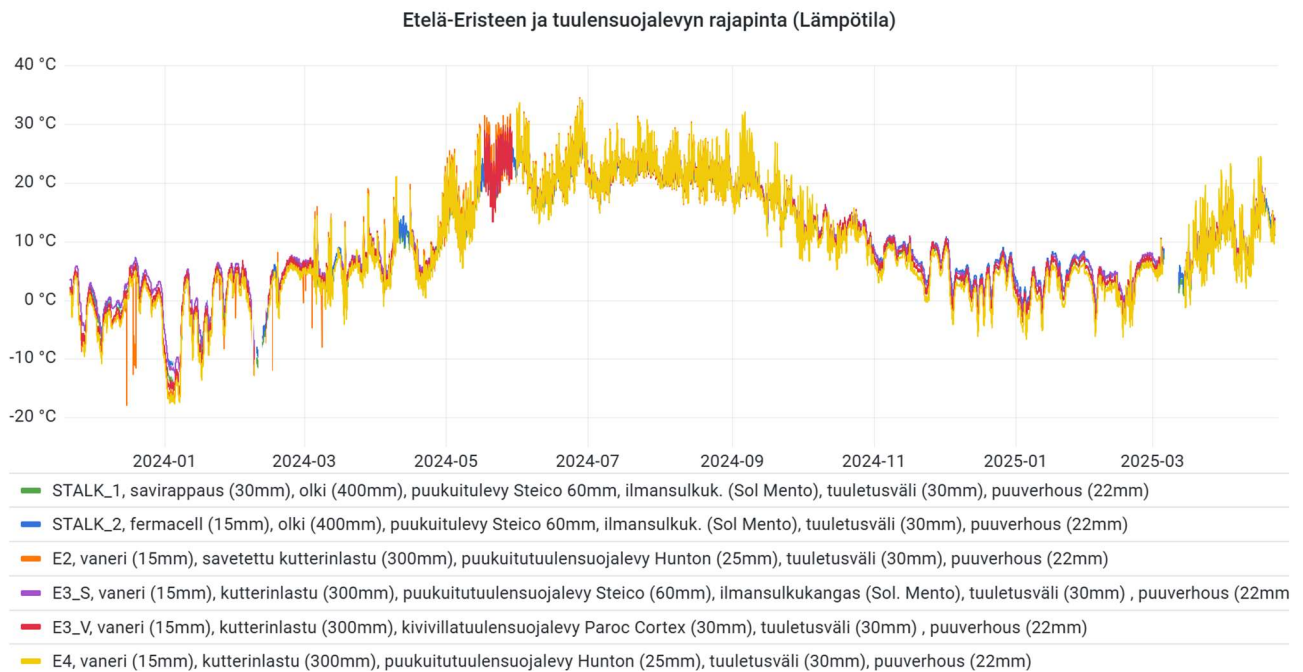


**Kuva 4.9** Suhteellinen kosteus eristeen ja tuulensuojalevyn välisessä rajapinnassa, eteläinen julkisivu.

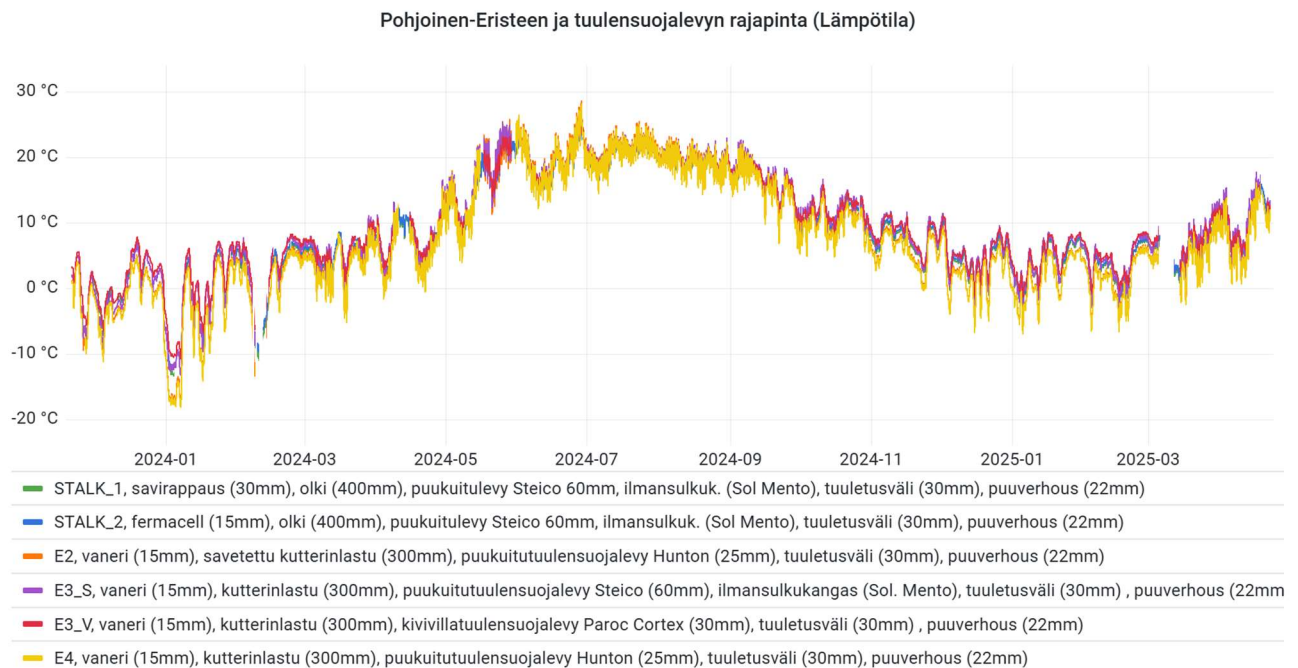


**Kuva 4.10** Suhteellinen kosteus eristeen ja tuulensuojalevyn välisessä rajapinnassa, pohjoinen julkisivu.

Kuvissa 4.11–4.12 on esitetty rakenteiden lämpötilat eristekerroksen ulkopinnassa. Lämpötilan osalta rakenteiden välillä ei ollut eristekerroksen ulkopinnassa merkittäviä eroja.

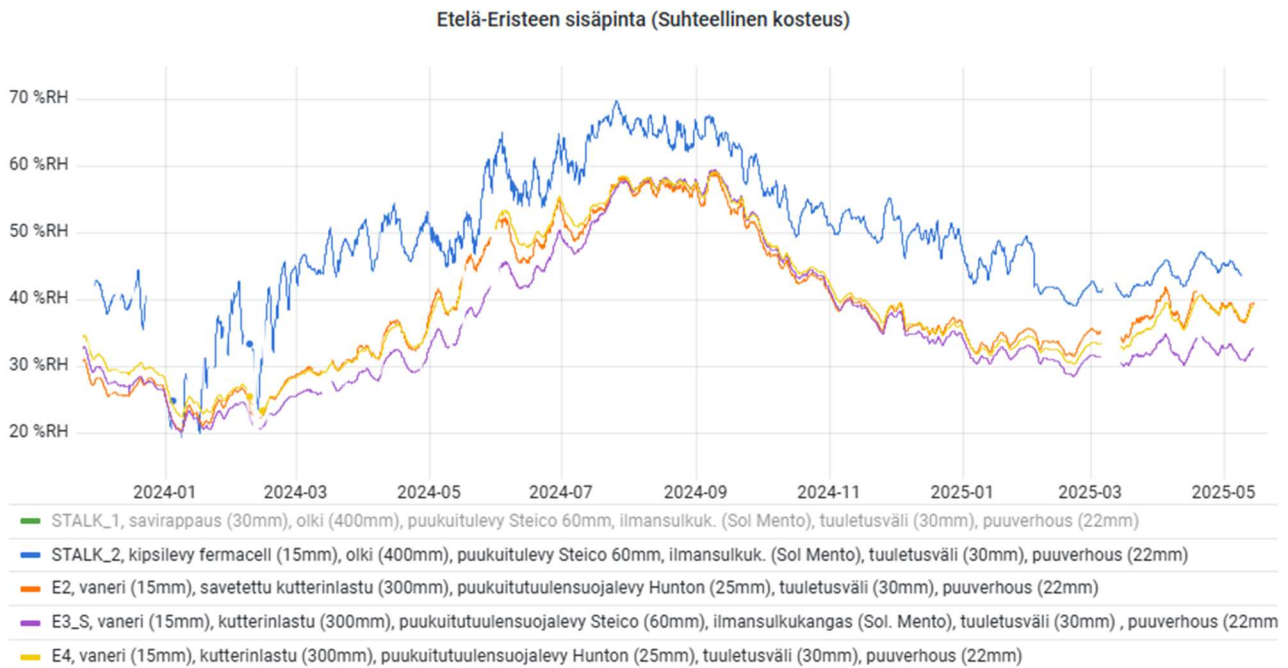


**Kuva 4.11** Lämpötila eristeen ja tuulensuojalevyn välisessä rajapinnassa, eteläinen julkisivu



**Kuva 4.12** Lämpötila eristeen ja tuulensuojalevyn välisessä rajapinnassa, pohjoinen julkisivu.

Kuvassa 4.13 on esitetty suhteellinen kosteus eristeen sisäpinnassa. Rakenteen STALK1 osalta eristeen sisäpinnan anturin todettiin rikkoutuneen, mahdollisesti savirappauksen yhteydessä, joten sen osalta ei ole tuloksia. Rakenteen STALK2 osalta on nähtävissä, että vastaava suhteellisen kosteuden ero on nähtävissä eristeen sisäpinnassakin.



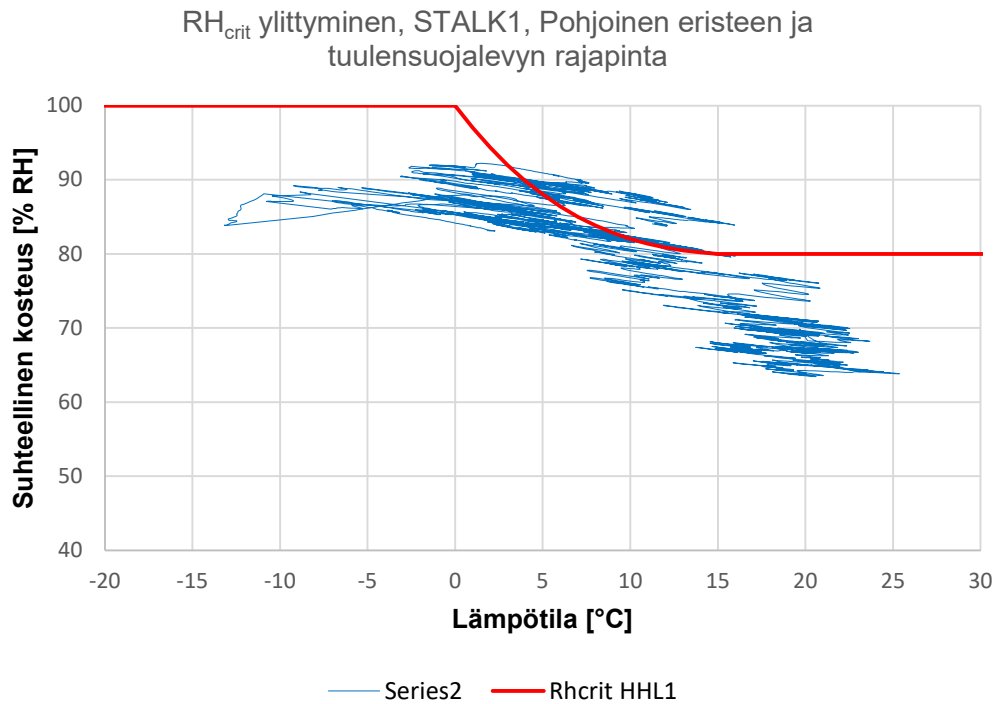
**Kuva 4.13** Suhteellinen kosteus eristeen sisäpinnassa, eteläinen julkisivu.

#### 4.1.4 Homehtumiselle otollisten olosuhteiden esiintyvyys

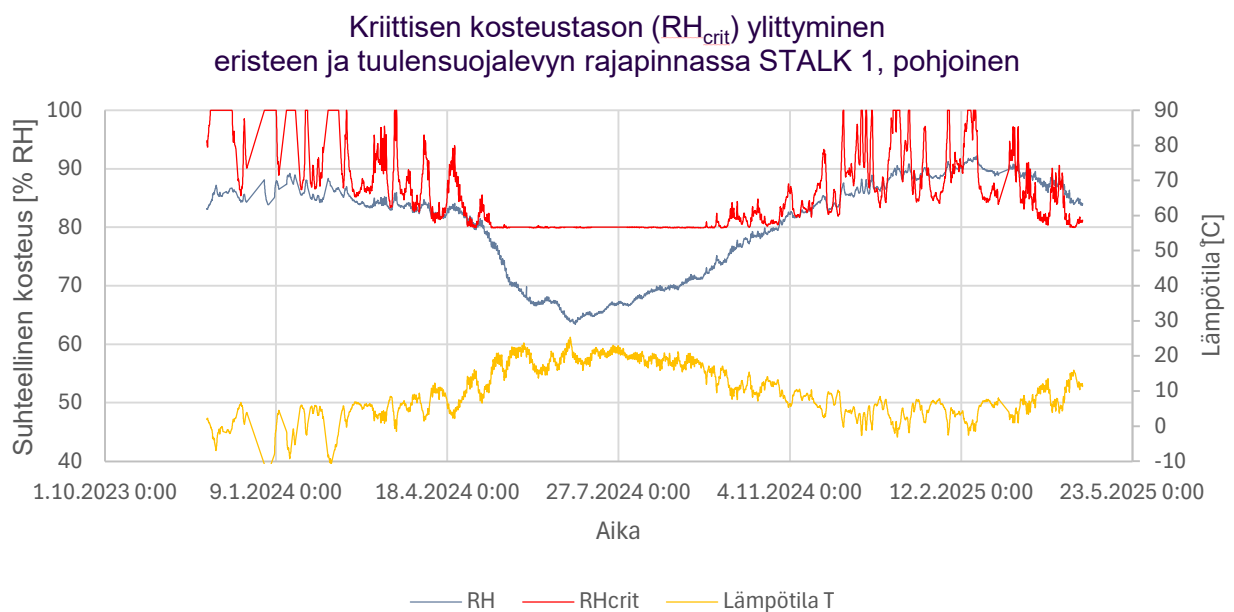
Kuvassa 4.14 on esitetty pistepilvenä savirapatun olkielementin (STALK1) lämpötila ja suhteellinen kosteus tutkimusajalta pohjoisella julkisivulla sekä HHL1 luokan rakennusmateriaalin homeenkasvun kannalta kriittisen kosteustason raja (kaava 4.1).

$$RH_{crit} = \begin{cases} 100 \% RH, & \text{kun } T \leq 0^\circ C \\ (-0,00267T^3 + 0,16T^2 - 3,13T + 100) \%RH, & \text{kun } 0^\circ C < T \leq 20^\circ C \\ RH_{min} = 80 \% RH, & \text{kun } T > 20^\circ \end{cases} \quad (4.1)$$

Mitä enemmän ja kauemmin olosuhteet ovat kriittisen kosteustason yläpuolella, sitä nopeammin homeindeksi ja homeenkasvu alkaa kehittyä. Kuvasta 4.14 näkyy pistepilvenä suhteellinen kosteus lämpötilan funktiona ja kuinka usein kriittinen kosteustaso (punainen viiva) on ylittynyt. Kuvasta 4.15 näkyy suhteellinen kosteus ja kriittisen kosteustason ylittyminen tutkimusjaksolla. Keväällä 2025 helmikuun lopulta (22.2.2025 ->) tutkimusjakson loppuun (23.4.2025) kriittinen taso on ylittynyt melkein yhtäjaksoisesti noin 2 kuukauden ajan. Tätä aiemmin mittausaineistossa on muutamia noin 1–2 viikon aikajaksoja, jolloin kriittinen taso on ylittynyt.



Kuva 4.14 STALK1 savirapatun olkielementtirakenteen lämpötila- ja kosteustasot tutkimusaikana ja RH<sub>crit</sub> ylittyminen pohjoisella julkisivulla.



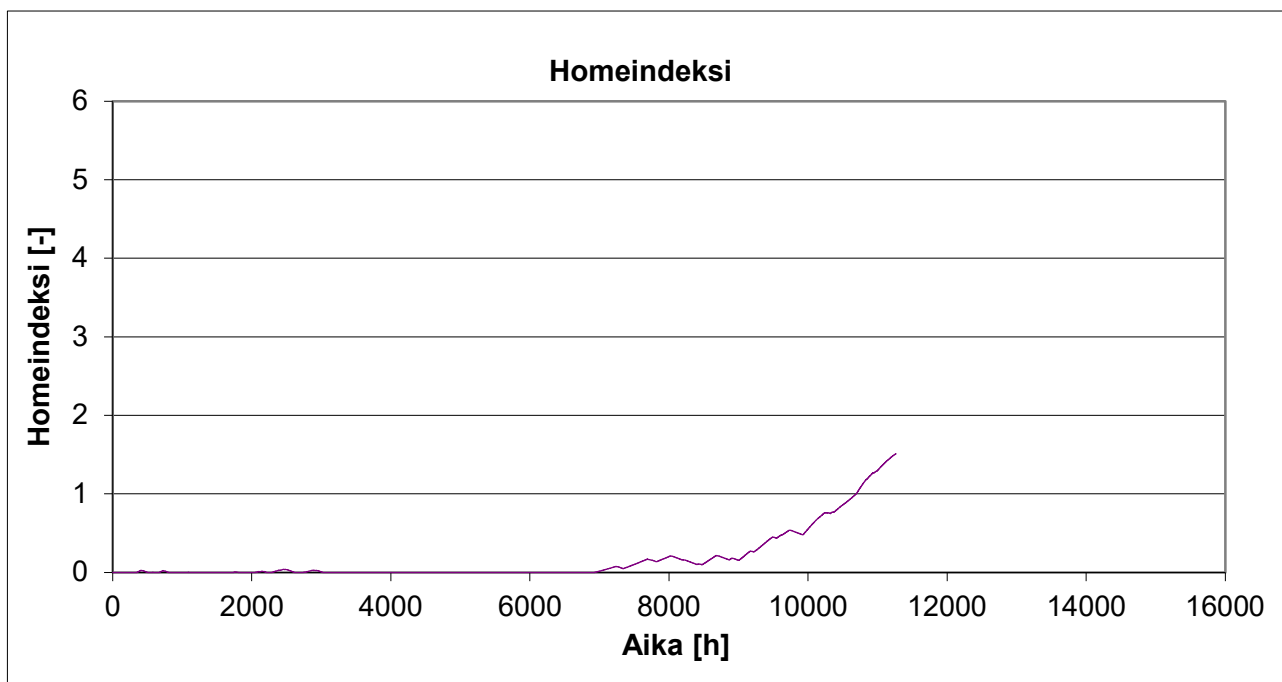
Kuva 4.15 STALK1 savirapatun olkielementtirakenteen lämpötila- ja kosteustasot tutkimusaikana ja RH<sub>crit</sub> ylittyminen pohjoisella julkisivulla.

Vuosien 2024 ja alkuvuoden 2025 osalta laskettiin homeindeksi suomalaisen homemallin mukaisesti. Homehtumisherkkyysluokaksi arvioitiin HHL1 ja taantumaluokaksi HTL2 eli merkittävä taantuma, jolle taantumakerroin on  $C_{mat}$  on 0,5 (Kuva 4.16).

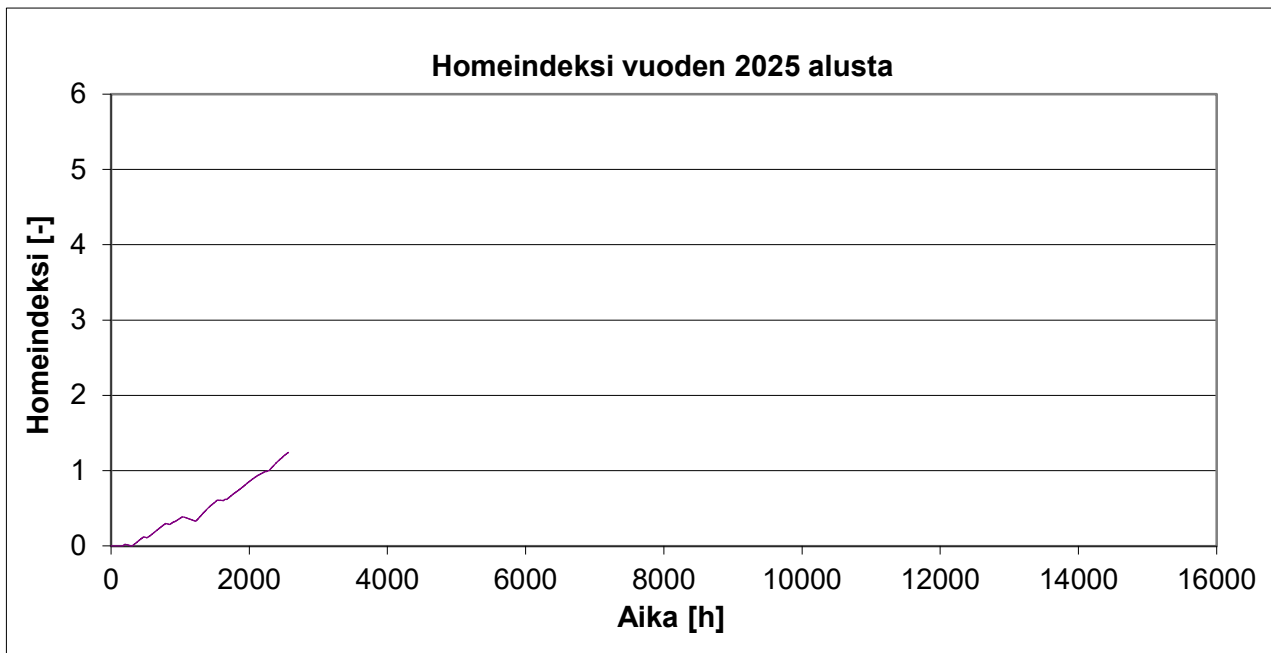
Homehtumis-herkkyysluokka	Homeen taantumaluokka
HHL1	HTL2 Merkittävä taantuma
HHL2	HTL3 Kohtalainen taantuma
HHL3	HTL4 Vähäinen taantuma
HHL4	HTL4 Vähäinen taantuma

Kuva 4.16 Suomalainen homemalli, homehtumisherkkyysluokat ja homeen taantumaluokka. [28]

Kuvassa 4.17 on esitetty homeindeksi koko tutkimusjaksolta marras-joulukuun vaihteesta 2023 toukokuuhun 2025. Vuoden 2024 aikana ei homeindeksissä ole merkittävää kasvua. Vuoden 2025 alusta laskettu homeindeksi (kuva 4.18) nousee yli yhden, joka homemallin homeindeksiluokituksen mukaan on tulkittavissa mikroskoopilla havaittavaksi paikoin alkavaksi kasvuksi, muutamaksi homerihmaksi.



Kuva 4.17 Homeindeksi koko tutkimusjaksolta joulukuusta 2023 toukokuuhun 2025.



Kuva 4.18 Homeindeksi vuoden 2025 alusta

#### 4.1.5 Yhteenveto tuloksista ja johtopäätökset

Tutkituissa olkirakenteissa eristekerroksen ulkopinnan kosteuspitoisuus oli käytännössä koko 16 kuukauden mittaisen tutkimusajanjakson referenssirakenteita korkeammalla. Näin siitä huolimatta, että tuulensuojalevynä oli 60 mm puukuitulevy, joka jo sinänsä toimi myös lämmöneristeenä. Homeenkasvun kannalta kriittinen suhteellisen kosteuden taso  $RH_{crit}$  ylittyi tutkimusjaksolla erityisesti lämpimän ja kostean 2025 kevättalven aikana. Tällöin myös homeindeksi on ylittänyt tason 1.

Vertailusta rakenteiden eri rakenteiden välillä voi todeta, että 60 mm puukuitutuulensuojalevy ja ilmansulkukangas alensi suhteellista kosteutta merkittävästi verrattuna 25 mm puukuitutuulensuojalevyyn. Tämän perusteella voi vetää johtopäätöksen, että myös olkirakenteella ilman 60 mm puukuitu-tuulensuojalevyä suhteellinen kosteus eristeen ulkopinnassa olisi ollut vieläkin korkeammalla.

Referenssirakenteista on myös havaittavissa, että 30 mm kivillatuulensuoja alentaa kosteuspitoisuutta eristekerroksen ulkopinnassa. Rakenteita E3\_S ja E3\_V vertaamalla voitiin todeta, että 30 mm kivillä-tuulensuojalevyn vaikutus on suunnilleen sama kuin 60 mm puukuitulevyllä. Puukuitulevy piti suhteellisen kosteuden tasaisempana, kun taas kivillalevyllä sekä kastuminen, että kuivuminen oli nopeampaa. Tuloksista voidaan todeta, että samoin kuin kutterinlasturakenteissa, myös olkirakenteessa kivillatuulensuoja alentaisi eristekerroksen ulkopinnan kosteuspitoisuutta.

Lämpötila eristeen ulkopinnassa oli sekä rakenteessa E3\_S, jossa 300 mm kutterinlastueriste, että 400 mm olkieristeellä samalla tasolla.

Todennäköisin syy korkealle kosteuspitoisuudelle eristekerroksessa oli sisäpinnan alhainen vesihöyrynvastus. Tämä näkyy siinä, että myös eristekerroksen sisäpinnassa suhteellinen kosteus oli vastaavasti korkeammalla tasolla, kuin ulkopinnassakin. Referenssirakenteiden 15 mm vaneri, vaikka sekään ei varsinainen höyrynsulku ole, muodosti merkittävämmän vesihöyrynvastuksen, kuin savirappaus tai kipsilevy. Rakenteisiin pääsi kosteutta sisäpuolelta. Sillä, oliko sisäpinnassa savirappaus vai kuitukipsilevy ei ollut merkittävää vaikutusta rakenteen kosteuspitoisuuteen.

Jotta rakennetta voitaisiin jatkotutkimuksessa paremmin verrata referenssirakenteisiin, sisäpintaan vaihdettiin toiselle puolelle kipsilevyn tilalle vastaava vanerilevy kuin referenssirakenteissa. Vaihto tehtiin kuitenkin vasta tammikuun lopussa 2025, joten tähän tutkimusraporttiin tulokset vaihdon vaikutuksesta eivät ehtineet.

On huomattava, että koerakennuksessa ylläpidetään mitoituskosteuslisää. Todellinen rakennuksen kosteuslisä voi olla matalampi, kuin mitoituskosteuslisä. Suomalainen RIL mitoituskosteuslisä perustuu kuitenkin tutkimusnäyttöön, jossa myös höyrynsuluttomissa rakenteissa sisäilman kosteuslisä ei merkittävästi eronnut höyrynsulullisista rakenteista [29]. RIL mitoituskosteuslisä on lisäksi samaa luokkaa kuin muualla Euroopassa käytössä oleva mitoitusolosuhde [29]. Alempi kosteuslisä alentaisi myös referenssirakenteiden osalta rakennekerrosten kosteuspitoisuuksia.

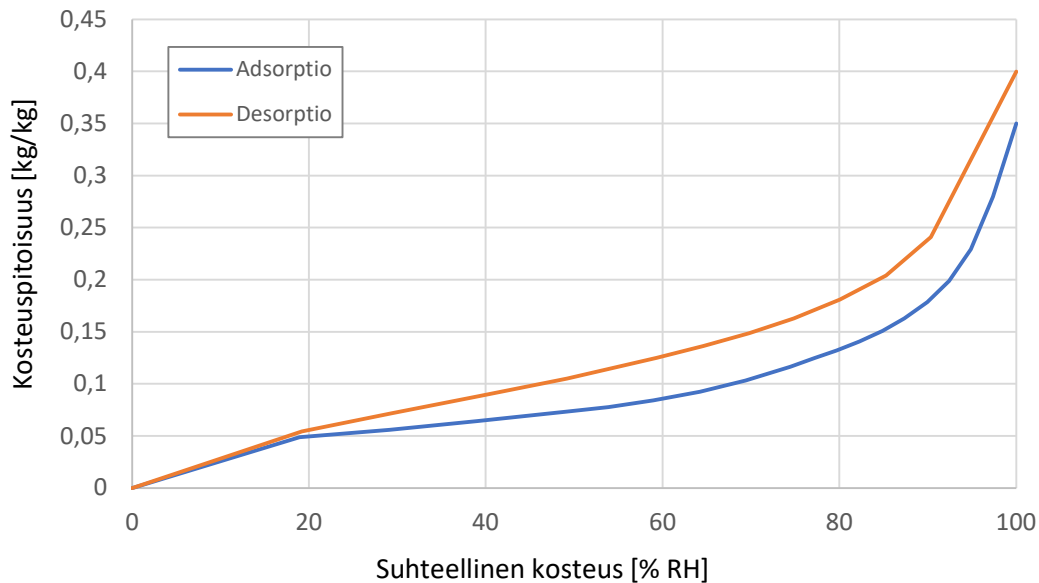
## 4.2 Olkielementtiulkoseinärakenteen laskennalliset tarkastelut

Hankkeessa tehtiin 400 mm paksuilla olkieriste-elementeillä varustetuille ulkoseinärakenteille ajasta riippuvia rakennusfysikaalisia simulointitarkasteluja, joilla pyrittiin selvittämään kosteusteknisesti toimivia rakenneratkaisuja eri tuulensuoja- ja sisäverhousmateriaalien yhdistelmillä sekä tutkimaan mallintamisen tarkkuuteen vaikuttavien tiettyjen materiaalien kosteusteknisien ilmiöiden merkitystä vertailusimuloinneilla kenttäolosuhteissa tutkituille koerakenteille. Tarkasteluissa sovellettiin Tampereen yliopiston Rakennusfysiikan tutkimusryhmässä kehitettyä rakenteiden kosteusteknistä analysointimenetelmää, jolla voidaan tehdä lämpö- ja kosteusteknisiin simulointeihin perustuvaa rakenteiden mitoittamista ja toimivuuden arviointia rakennusfysikaalisesta näkökulmasta.

Laskentaohjelmana käytettiin elementtimenetelmäpohjaista Comsol Multiphysics -ohjelmaa (v. 6.2), jolla voidaan tehdä lämmön- ja kosteudensiirron taseyhtälöiden kannalta vastaavia tarkasteluja kuin laskentaohjelma WUFI Pro:lla. Comsol mahdollistaa käyttäjälle myös taseyhtälöiden eli energian ja massan säilyvyyslakien muokkaamisen siten, että laskettava malli ottaa huomioon laajemmin materiaalien monimutkaista kosteusteknistä käyttäytymistä. Ilmiöitä, joita esimerkiksi WUFI Pro:n nykyversioilla ei voida ottaa huomioon, ovat muun muassa tiettyjen materiaalien tasapainokosteuskäyrän riippuvuus lämpötilasta sekä myös tasapainokosteuteen liittyvä hystereesi eli tasapainokosteuden riippuvuus kosteuspitoisuuden muuttumisen suunnasta ajan suhteen. Olkielementtien simuloinneissa vertailtiin tuloksia eri mallien välillä. Yksinkertaisemmasta mallista, jossa tasapainokosteuden lämpötilariippuvuutta ja hystereesiä ei ole implementoitu laskentamalliin kutsutaan tässä yhteydessä konventionaaliseksi malliksi. Huokoisen kevyen puukuitulevyn tasapainokosteuden lämpötilariippuvuutta ja hystereesiä kuvaavia arvoja on tutkittu kokeellisesti lähteessä: *Temperature-dependency of hysteretic sorption in hygrothermal modelling of wood fibreboard sheathing: analysis of exterior wall laboratory experiments* [30].

Kyseisessä tutkimuksessa esitettyä mallia käytettiin konventionaalisen mallin lisäksi olkieristeisten ulkoseinärakenteiden simuloimiseen ja mallista käytetään tässä yhteydessä nimitystä TDH-malli (*temperature-dependent and hysteretic*). TDH-materiaalimalli perustuu puukuitulevystä lämpökaapin ja kosteusantureiden avulla tehtyihin mittauksiin sekä Rakennusfysiikan tutkimusryhmässä aiemmin toteutettujen seinärakenteiden laboratoriotutkimuslaitteistolla tehtyjen rakennekokeiden tuloksista määritettyihin hystereesiparametreihin. Sekä olkieriste että puukuitu ovat selluloosapohjaisia materiaaleja, joten olkieristeestä haluttiin tutkia, käyttäytyykö se hygroskooppisella tasapainokosteuden alueella puukuitulevyn kaltaisesti.

Laskentatarkasteluissa tarvittava tasapainokosteus tilavuusyksikköä kohti ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) lasketaan kertomalla tasapainokosteus kuivamassayksikköä kohti ( $\text{kg}/\text{kg}$ ) materiaalin kuivatiheydellä (olkieristeen kuivatiheys noin  $110 \text{ kg}/\text{m}^3$ ). Lähteessä [30] on esitetty taulukoituna puukuitulevystä  $20^\circ\text{C}$  lämpötilassa mitatut adsorptio- ja desorptiokäyrien mukaiset tasapainokosteuden arvot yksikössä ( $\text{kg}/\text{kg}$ ).



Kuva 4.19 Huokoisesta puukuitulevystä mitatut adsorptio- ja desorptiokäyrät 20 °C lämpötilassa.

Tutkimuskirjallisuudesta löytyy paljon tietoa siitä, kuinka eri materiaalien tasapainokosteuskäyttäytyminen muuttuu korkeammassa lämpötiloissa. Kosteutta sisältävän huokoisen materiaalin ollessa tasapainotilanteessa materiaalin sisällä tapahtuu jatkuvaa materiaaliin sitoutuneiden vesimolekyylien irtoamista takaisin huokosilmaan ja toisaalta myös jatkuvaa vesimolekyylien sitoutumista materiaaliin. Tasapainotilanteessa nämä kaksi huokosverkoston mittakaavassa lokaalia vesimolekyylien sitoutumista ja irtoamista kuvaavaa virtaa ovat yhtä suuria. Lämpötilan kasvaessa virtojen tasapaino muuttuu siten, että molekyylien korkeamman keskimääräisen kineettisen energian takia irtoaminen on nopeampaa ja tämä näkyy huokosverkostoa suuremmassa mittakaavassa tarkasteltuna materiaalin tasapainokosteuksien madaltumisena korkeissa lämpötiloissa.

Lämpötilan vaikutusta puun ja muiden selluloosapohjaisten materiaalien tasapainokosteuteen kylmissä lämpötiloissa on kuitenkin tutkittu verrattain vähän johtuen siitä, että kylmyys aiheuttaa hankaluuksia tasapainokosteuksien määrittämiseen suoralla menetelmällä esimerkiksi standardin ISO 12571 [9] mukaisesti. Tutkimuksessa [30] on esitetty koe, jossa useisiin koeputkiin asetettiin eri kosteuksiin tasapainotettuja puukuitunäytteitä sekä kosteusanturi. Putket sinetöitiin höyrytiiviksi massalla ja asetettiin lämpökaappiin, jossa alkaen 20 °C lämpötilasta lämpötilaa laskettiin askelittain kohti -20 °C. Eri askelten aikana kosteusantureista luettavat suhteellisen kosteuden arvot putosivat lähtötilanteesta, mikä johtuu siitä, että puukuidun kosteuskapasiteetti kasvaa lämpötilan pudotessa, mutta kosteus määrä pysyy koeputkien sinetöinnin takia vakiona. Kokeen tuloksina saatu data voidaan koota laskentaohjelmissa hyödynnettävään muotoon. Tutkimuksessa [30] on esitetty paloittain lineaarisesti määritetty funktio puukuidun tasapainokosteuden lämpötilariippuvuudelle, joka perustuu samaan dataan:

$$u(\varphi, T) = u_{20^\circ\text{C}}(\varphi) + k_T(\varphi) \cdot (293.15 \text{ K} - T) \quad (4.2)$$

missä:

$u$  = kosteuspitoisuus, [kg/kg]

$\varphi$  = suhteellinen kosteus, [-]

$T$  = lämpötila, [K]

$k_T$  = suhteellisesta kosteudesta riippuva tasapainokosteuden lämpötilariippuvuuskerroin, [1/K]

Paloittain lineaarisesti määritellyn funktion  $k_T$  arvot suhteellisen kosteuden funktiona on esitetty Taulukko 4.14.

*Taulukko 4.14 Lämpötilariippuvuutta kuvaavan funktion  $k_T$  arvot suhteellisen kosteuden funktiona. Väliarvot interpoloidaan lineaarisesti.*

$\varphi$ [-]	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$k_T$ [ $10^{-3}/\text{K}$ ]	0	0.17	0.20	0.29	0.40	0.52	0.58	0.83	0.99	1.58	1.58

Konventionaaliseksi malliksi kutsutussa yhdistetyssä lämmön- ja kosteudensiirron mallissa on kaksi tuntematonta muuttujaa, lämpötila ja suhteellinen kosteus, joiden avulla ilmaistaan energian ja massan säilymislait seuraavien osittaisdifferentiaaliyhtälöiden muodossa:

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T + h_v \delta_p \nabla(\varphi p_{sat})) \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \xi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \cdot (\xi D_w \nabla \varphi + \delta_p \nabla(\varphi p_{sat})) \quad (4.4)$$

missä:

$(\rho C_p)_{eff}$  = materiaalin tehollinen ominaislämpökapasiteetti, [J/(m<sup>3</sup>K)]

$\lambda$  = materiaalin lämmönjohtavuus, [W/(m·K)]

$h_v$  = veden höyrystymislämpö,  $\approx 2,5 \cdot 10^6$  J/kg

$\delta_p$  = materiaalin vesihöyrynläpäisevyys, [kg/(m·s·Pa)]

$p_{sat}$  = vesihöyryn kylästyspaine, [Pa]

$w$  = kosteuspitoisuus, [kg/m<sup>3</sup>]

$\xi$  = kosteuskapasiteetti, [kg/m<sup>3</sup>]

$D_w$  = kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti, [m<sup>2</sup>/s]

Tasapainokosteuden lämpötilariippuvuus otetaan huomioon laskemalla kosteuspitoisuuden kokonaisaikaderivaatta sekä suhteellisen kosteuden että lämpötilan suhteen. Yhtälön 4.3 vasen puoli korvataan:

$$\begin{aligned}\frac{\partial w}{\partial t} &= \rho_{dry} \left( \frac{\partial u}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right) \\ &= \rho_{dry} \left( \xi_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \xi_T \frac{\partial T}{\partial t} \right)\end{aligned}\quad (4.5)$$

missä  $\rho_{dry}$  = materiaalin kuivatiheys, [kg/m<sup>3</sup>].

Hystereesin mallintaminen TDH-malliksi kutsutussa mallissa perustuu Roden alun perin esittämän hystereettisen kosteuskapasiteetin kaavaan [31], josta Frandsen esitti yleistetyn muodon [32]:

$$\xi_{\varphi} = \rho_{dry} \begin{cases} \frac{A \cdot (u - u_a)^B \xi_d - (u_d - u)^B \xi_a}{(u_d - u_a)^B}, & \frac{\partial \varphi}{\partial t} \geq 0 \\ \frac{(u - u_a)^B \xi_d - A \cdot (u_d - u)^B \xi_a}{(u_d - u_a)^B}, & \frac{\partial \varphi}{\partial t} < 0 \end{cases}\quad (4.6)$$

missä  $u_a$  ja  $u_d$  ovat adsorptio- ja desorptiokäyrien mukaiset tasapainokosteudet [kg/kg]. A ja B ovat alun perin eri puulajeille tarkoitettuja materiaalikohtaisia parametrejä, joille käytettiin puukuitulevylle määritettyjä arvoja A = 0,9 ja B = 3,3 [30].

Tasapainokosteuden lämpötilariippuvuusdata on määritetty desorptiutilanteesta, mutta lämpötilan vaikutus saattaa poiketa adsorptio- ja desorptiutilanteiden välillä. Vastaavaa dataa adsorptiutilannetta varten ei kuitenkaan vielä ole saatavilla ja termi  $\xi_T$  lasketaan TDH-mallissa aina kaavasta 4.7.

$$\xi_T = \frac{\partial u_a(\varphi, T)}{\partial T} (1 - \theta) + \frac{\partial u_d(\varphi, T)}{\partial T} \theta \quad (4.7)$$

missä

$$\theta = \frac{u - u_a(\varphi, T)}{u_d(\varphi, T) - u_a(\varphi, T)} \quad (4.8)$$

Hystereesin huomioon ottaminen edellyttää, että simulaatiossa pidetään erikseen yllä tietoa kosteuspitoisuuden  $u$  jakaumasta, joka vaikuttaa kosteuskapasiteettitermeihin  $\xi_{\varphi}$  ja  $\xi_T$ . Käyttäessä mallintamiseen Comsol Multiphysics -ohjelmaa se voidaan tehdä hyödyntämällä ohjelman *State Variables* -toiminnallisuutta, jossa jakauma  $u$  päivitetään muistiin joka aika-askelen jälkeen seuraavan yhtälön mukaisesti, kun uudet arvot lämpötilalle ja suhteelliselle kosteudelle on ratkaistu:

$$u_{i+1} = u_i + \xi_{\varphi}(\varphi_{i+1}, u_i, T_{i+1}) \cdot \left( \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)_{i+1} \cdot \Delta t + \xi_T(\varphi_{i+1}, u_i, T_{i+1}) \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right)_{i+1} \cdot \Delta t \quad (4.9)$$

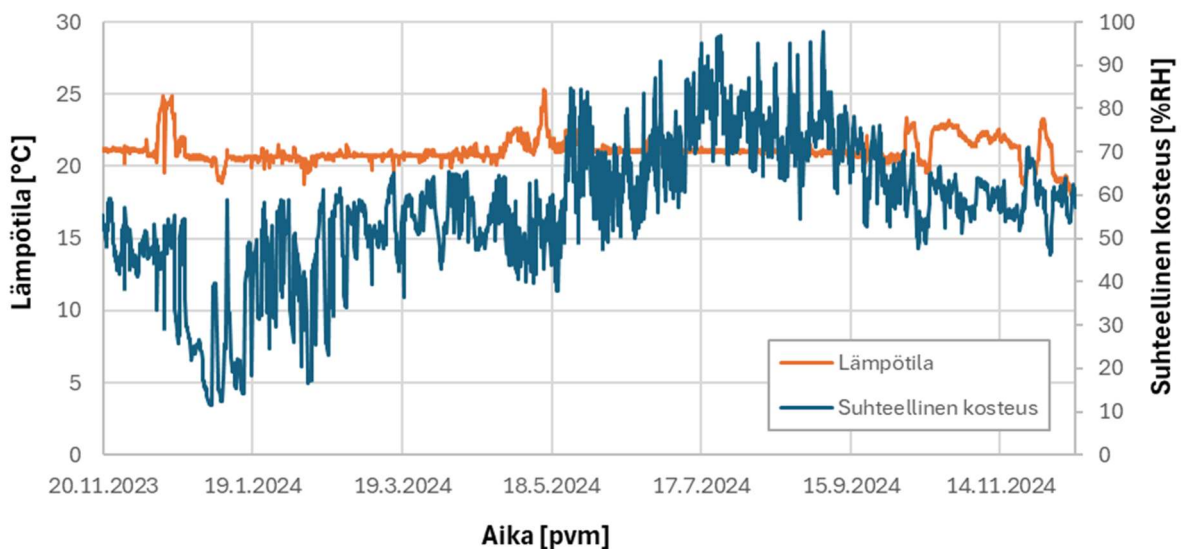
missä  $\Delta t$  = aika-askel, [s].

Hankkeessa tehdyt olkieristettyihin seiniin liittyvät laskentatarkastelut jakautuvat kahteen osaan, joista ensimmäisessä tehtiin vertailusimulointeja Tampereen yliopiston rakennusfysikaalisella

koerakennuksella tutkittavina oleville koeseinille. Jälkimmäisessä osassa tehtiin simuloiteja olkieristyksen suhteen vastaaville ulkoseinärakenteille, joissa eri tuulensuoja- ja sisäverhousmateriaalien yhdistelmiä varioitiin ja sisä- ja ulkoilman olosuhteina käytettiin kosteusteknisen analysointimenetelmän mukaisia mitoittavia olosuhteita.

#### 4.2.1 Koerakenteiden vertailusimuloinnit

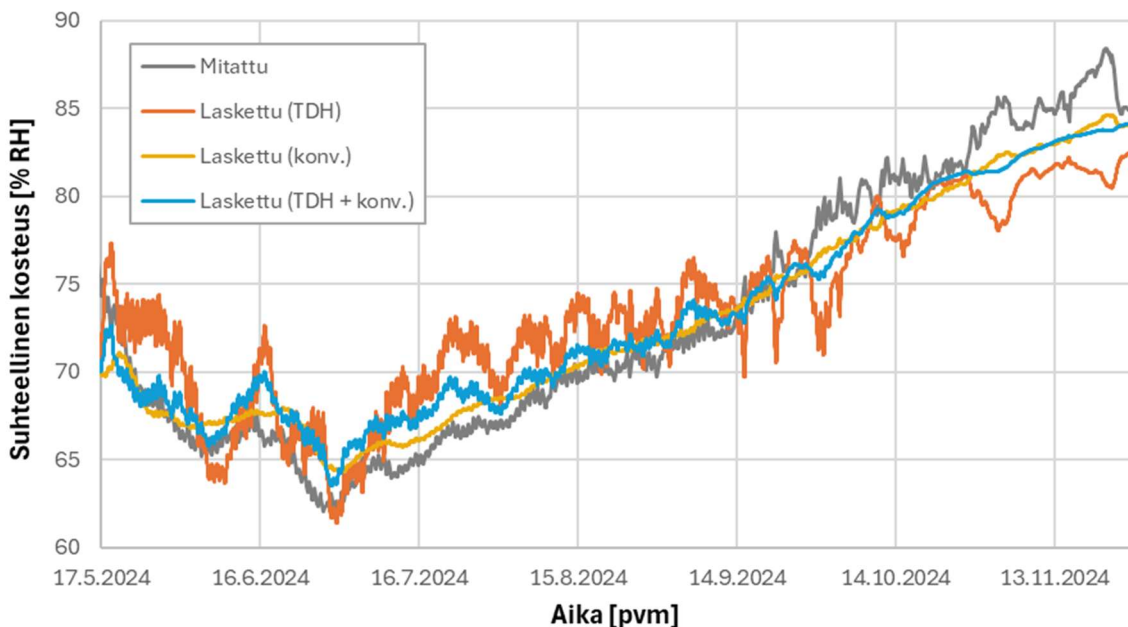
Vertailusimuloinneissa tutkitut koerakenteet olivat hankkeen aikana asennettuna Tampereen yliopiston rakennusfysikaalisessa koerakennuksessa, jota kuvailtiin edellisessä luvussa 4.1. Vertailusimuloinnit tehtiin neljälle koeseinälle, joissa tutkittiin kahta rakennetyyppiä asennettuna koerakennuksen sekä pohjois- että eteläjulkisivulle. Rakennetyypit erosivat toisistaan ainoastaan sisäverhouslevyn osalta, joka toisessa rakennetyypissä oli Fermacell-kipsilevy (15 mm) ja toisessa noin 20 mm paksu savirappaus. Tuulensuojalevynä rakenteissa on 60 mm paksu STEICO-merkkinen huokoinen puukuitulevy. Tuulensuojan ja sisäverhouksen välissä on kantavana ja eristettynä rakenteena Ecococon olkieriste-elementti (400 mm). Tuulensuojalevyn ja puisen ulkoverhouslaudoituksen välissä on 32 mm tuulettuva ilmarako, josta mitattuja lämpö- ja kosteusolosuhteita käytettiin reunaehtoina malleissa, jotka rajoittuvat ulkopuolelta tuulensuojalevyn ulkopintaan. Ulkoverhouksen jättäminen pois malleista auttaa vertailutulosten analysoimisessa, sillä tällöin epävarmuudet muun muassa ulkopintaan kohdistuvista säteilykomponenteista sekä tuuletusraon jatkuvasti muuttuvasta ilmanvaihtuvuudesta eivät vaikuta mallintamisen ja mittausten vertailuun rakenteen sisältä. Stalk-hankkeen olkielementit olivat asennettuna samaan huoneeseen koerakennuksessa, josta mitatut lämpö- ja kosteusolosuhteet on esitetty kuvassa 4.20.



Kuva 4.20 Sisäilman lämpötila ja suhteellinen kosteus vertailusimulointien tarkastelujaksolla koerakennuksessa, joissa oli olkieristettyjä ulkoseinärakenteita

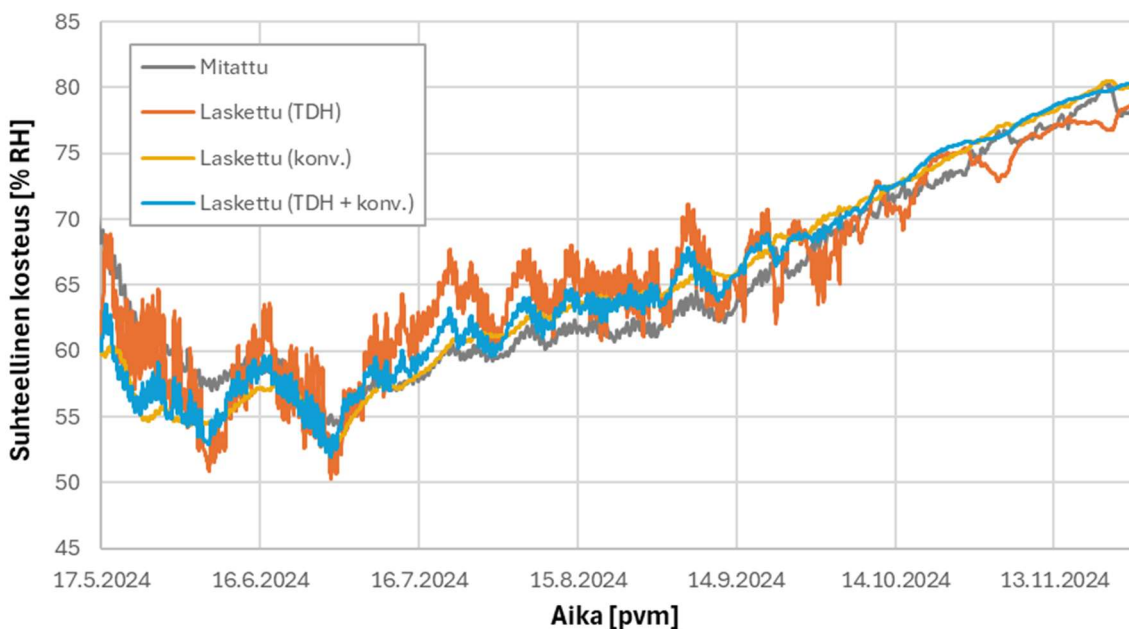
Laskennassa käytetyt materiaaliominaisuudet sisäverhousmateriaaleille olivat peräisin laskentaohjelma WUFI Pro:n (versio 6.3) materiaalitietokannan Fraunhofer IBP -kansioista ("clay rendering" ja "FERMACELL Gypsum-Fiberboard"). Kipsilevyn suhteellisen diffuusiovastuskertoimenä käytettiin arvoa 16,0 ja savirappaukselle arvoa 11,3 tietokannan mukaisesti. STEICO-tuulensuojalevyille käytettiin suhteellisen diffuusiovastuskertoimenä arvoa 5,0 ja lämmönjohtavuutena 0,036 W/(m·K). Olkieristekerroksen lämmönjohtavuutena käytettiin arvoa 0,065 W/(m·K), jolla saatiin alustavissa tarkasteluissa kohtuullinen vastaavuus tuulensuojalevyn sisäpinnasta mitattujen lämpötilojen osalta. Olkieristeen suhteellisen diffuusiovastuskertoimenä käytettiin arvoa 1,3. Simuloinnit tehtiin yksiulotteisina.

Kuvissa 4.21 ja 4.22 on esitetty laskennan ja mittausten vertailut tuulensuojalevyn sisäpinnasta mitatun suhteellisen kosteuden osalta savirapatuissa rakenteissa ja kuvissa 4.23 ja 4.24 vastaavasti kipsilevyverhotuissa rakenteissa. Dataloggaukseen liittyvien ongelmien vuoksi ehjät vertailukäyrät voidaan esittää rakenteista aikaväliltä toukokuu 2024 – joulukuu 2024, paitsi kipsilevyllisestä pohjoiseen suunnatusta rakenteesta väliltä marraskuu 2023 – joulukuu 2024. Kuvissa selitteellä "TDH" tarkoitetaan laskennallista mallia, jossa sekä puukuitutuulensuojalevyssä että olkieristeessä on mukana tasapainokosteuskäyrän lämpötilariippuvuus ja hystereesi, ja selitteellä "TDH + konv." tarkoitetaan mallia, jossa ainoastaan puukuitulevyssä on edellä mainitut tekijät mukana.

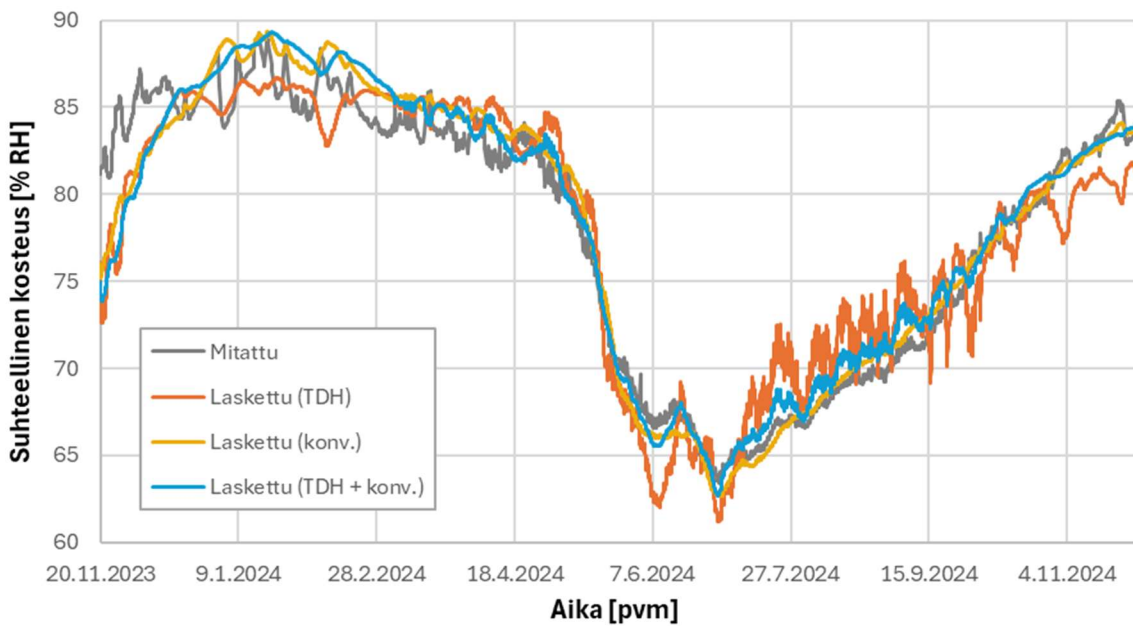


**Kuva 4.21** Laskenta- ja mittaustulosten vertailu suhteellisen kosteuden osalta tuulensuojalevyn ja olkieristeen välissä pohjoiseen suunnatussa sisältä savirapatussa koerakenteessa.

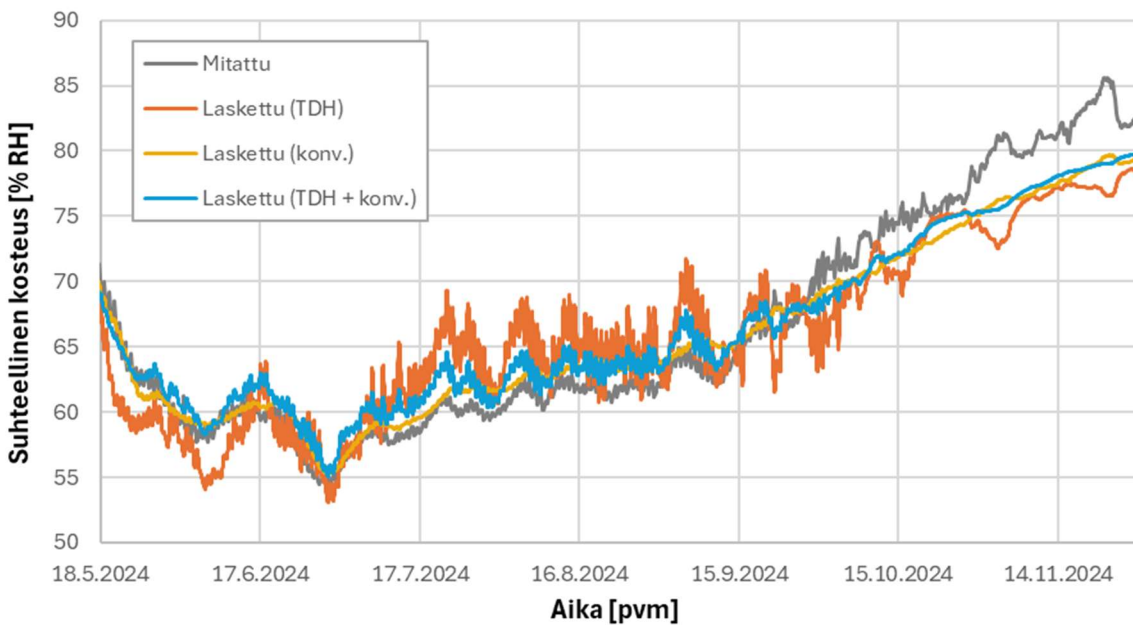
Kuvista 4.21–4.24 nähdään, että käyttäessä TDH-mallia olkieristeelle laskentatulosten mukaiset suhteellisen kosteuden nopeat vaihtelut kesäaikaan eivät vastaa hyvin mittaustuloksia. Täysin konventionaalinen malli ja malli, jossa TDH-ominaisuudet ovat mukana ainoastaan puukuitutuulensuojassa tuottivat keskenään lähellä olevat tulokset, mutta jälkimmäisen mallin osalta tuloksissa on havaittavissa samankaltaista päivätason nopeaa vaihtelua tuulensuojalevyn taustapinnan suhteellisessa kosteudessa kuin mittaustuloksissakin. Molempien mallien keskimääräinen suhteellisen kosteuden taso eri ajanhetkinä on kuitenkin sama ja lähellä mittaustuloksia, paitsi alkutalvesta 2024 etelään suunnatulla kipsilevyllisellä rakenteella ja pohjoiseen suunnatulla savirapatulla rakenteella, joissa mittaustulokset nousevat välille 85–90 % RH laskentatulosten pysyessä hiukan matalampina.



Kuva 4.22 Laskenta- ja mittaustulosten vertailu suhteellisen kosteuden osalta tuulensuojalevyn ja olkieristeen välissä etelään suunnatussa sisältä savirapatussa koerakenteessa.

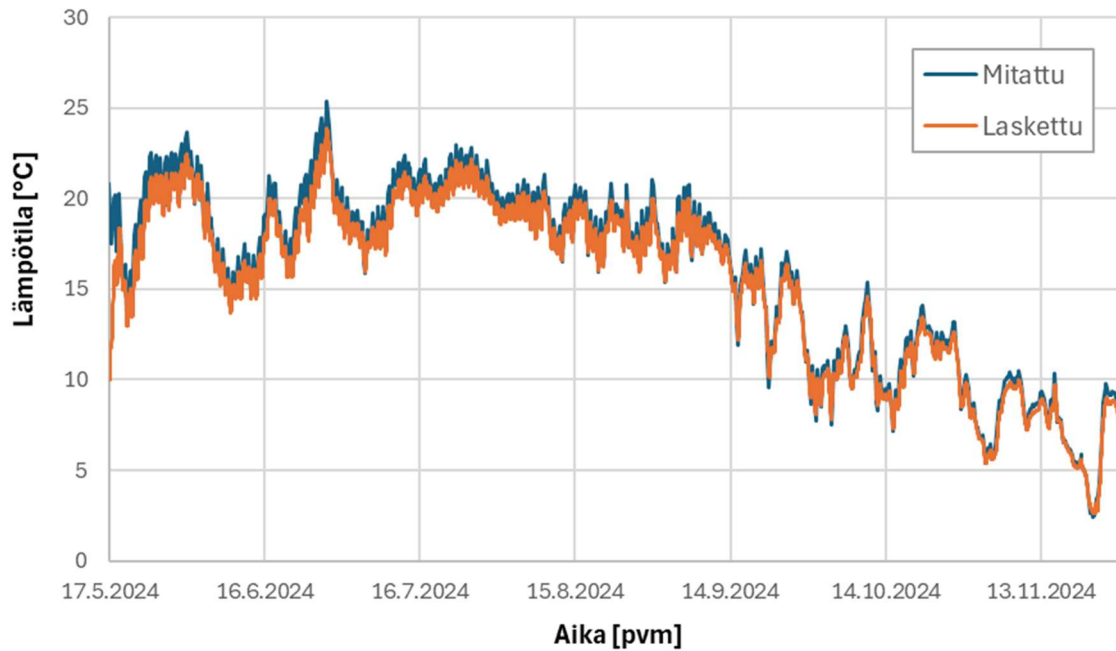


Kuva 4.23 Laskenta- ja mittaustulosten vertailu suhteellisen kosteuden osalta tuulensuojalevyn ja olkieristeen välissä pohjoiseen suunnatussa sisältä kipsilevyllä verhotussa koerakenteessa.

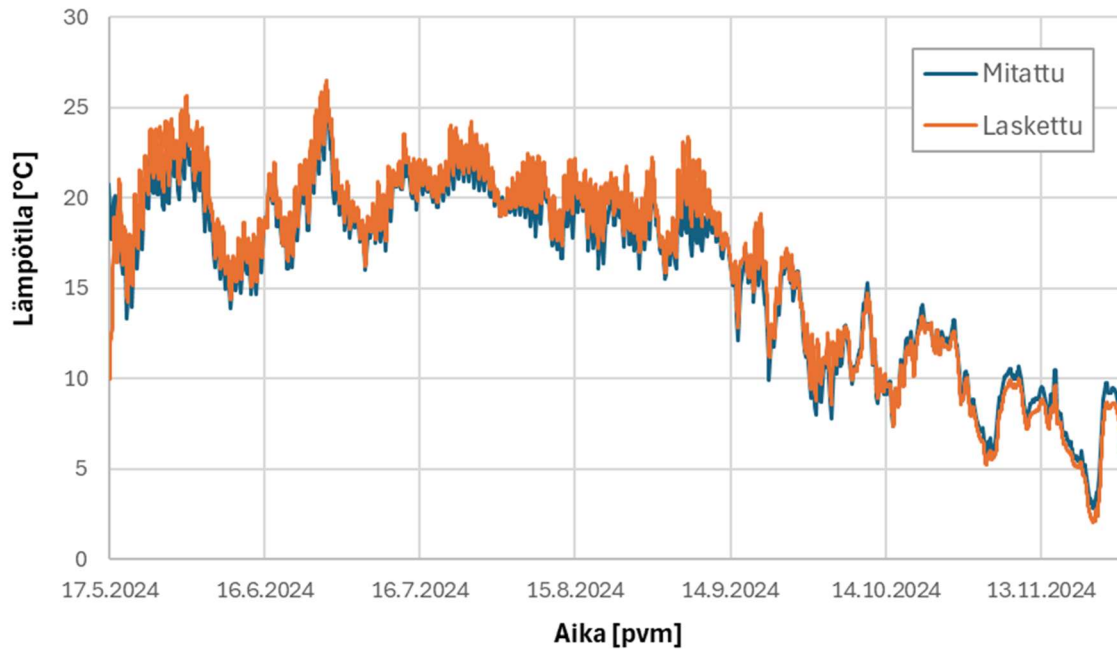


Kuva 4.24 Laskenta- ja mittaustulosten vertailu suhteellisen kosteuden osalta tuulensuojalevyn ja olkieristeen välissä etelään suunnatussa sisältä kipsilevyllä verhotussa koerakenteessa.

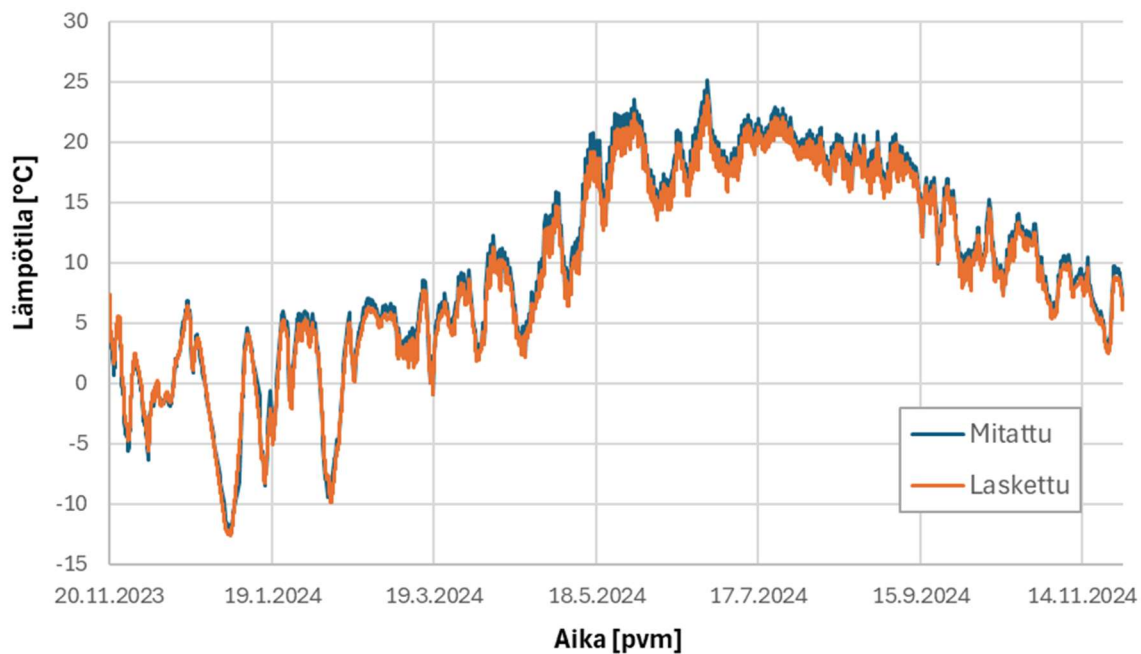
Kuvissa 4.25–4.28 on esitetty laskenta- ja mittaustulosten vertailu lämpötilojen osalta tuulensuojalevyn sisäpinnasta. Laskentatulokset on esitetty ainoastaan konventionaalisen mallin mukaisesti, sillä kaikkien mallien mukaiset lämpötilatulokset ovat hyvin lähellä toisiaan.



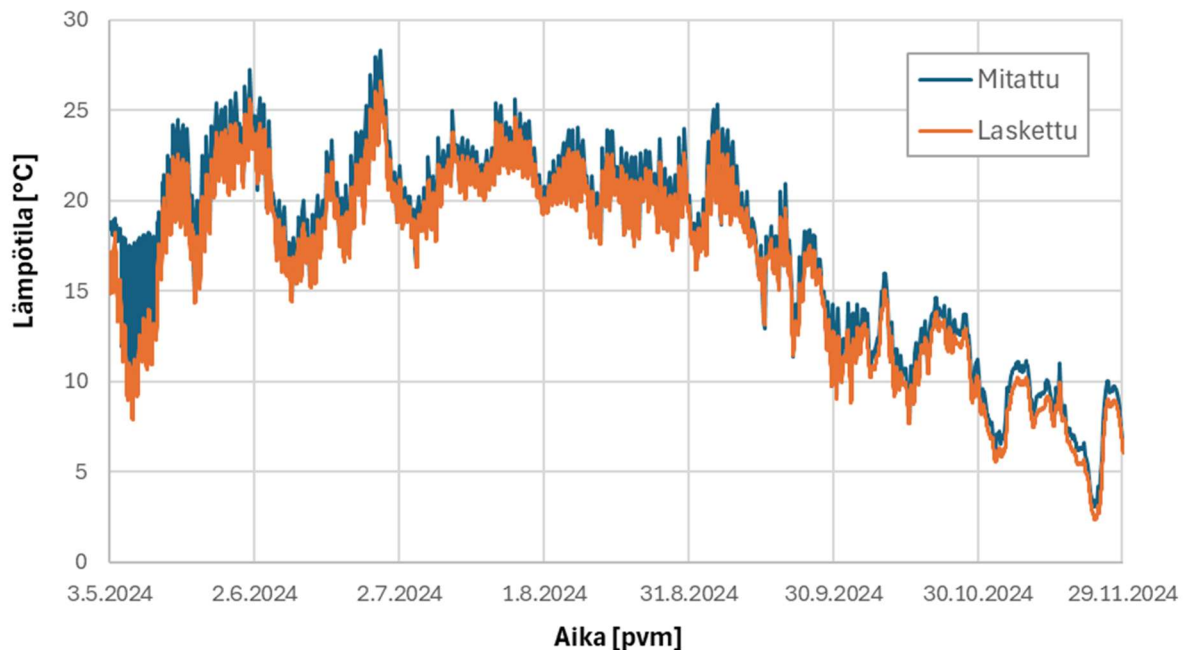
*Kuva 4.25 Laskenta- ja mittaustulosten vertailu lämpötilojen osalta tuulensuojalevyn ja olkieristeen välissä pohjoiseen suunnatussa sisältä savirapatussa koerakenteessa.*



Kuva 4.26 Laskenta- ja mittaustulosten vertailu lämpötilojen osalta tuulensuojalevyn ja olkieristeen välissä etelään suunnatussa sisältä savirapatussa koerakenteessa.



Kuva 4.27 Laskenta- ja mittaustulosten vertailu lämpötilojen osalta tuulensuojalevyn ja olkieristeen välissä pohjoiseen suunnatussa sisältä kipsilevyllä verhotussa koerakenteessa.



*Kuva 4.28 Laskenta- ja mittaustulosten vertailu lämpötilojen osalta tuulensuojalevyn ja olkieristeen välissä etelään suunnatussa sisältä kipsilevyllä verhotussa koerakenteessa.*

Kuvista 4.25–4.28 nähdään, että samoilla materiaaliominaisuuksilla mallinnettuna eri koerakenteilla mittausten ja laskentatulosten vastaavuus lämpötilojen osalta tuulensuojalevyn sisäpinnassa vaihtelee. Erot ovat suurimpia kesäaikaisissa tuloksissa. Sisäpuolelta savirapatuissa rakenteissa mittausten ja laskentatulosten välisten erojen suunta on päinvastainen etelään ja pohjoiseen suunnattujen rakenteiden välillä. Huonoin vastaavuus mittausten ja laskentatulosten välillä lämpötilojen osalta oli etelään suunnatulla kipsilevyllisellä rakenteella. Syitä rakenteille tehtyjen simulointien ja niitä vastaavien mittausten väliselle epätäydelliselle vastaavuudelle on rakennusfysikaalisissa tutkimuksissa usein monia. Rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan laskennallisen analysoinnin tarkkuuden ja luotettavuuden kannalta todennäköisesti merkittävimpiä tekijöitä tässä tapauksessa olivat mallien yksilotteisuus sekä epävarmuudet liittyen olkieristeen lämmönjohtavuuteen. Olkieriste on huokosrakenteeltaan selvästi anisotrooppinen ja heterogeeninen materiaali, joka voi tarkoittaa merkittäviä paikallisia eroja lämmönjohtavuudessa rakenteen sisällä. Materiaalin lämmönjohtavuus voi olla myös merkittävästi riippuvainen kosteuspitoisuudesta, jota laskennassa ei otettu huomioon materiaaliominaisuustietojen puutteen vuoksi. Toisaalta tarkastelujakson aikana eristekerrokset eivät olleet mitattujen suhteellisten kosteuksien perusteella erityisen kosteita. Arvioitaessa olkieristettyjen koeseinien vertailusimulointien tuloksia ja niiden vastaavuutta mittaustuloksiin kokonaisuutena voidaan todeta,

että olkieristeen lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan mallintaminen konventionaalisella mallilla käyttäen puukuitulevystä mitattua tasapainokosteuskäyrää on tarkkuudeltaan ja luotettavuudeltaan riittävällä tasolla rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden arvioinnin kannalta. Laskennan ja mittausten välisiä eroja tarkastellessa on myös otettava huomioon, että suhteellisen kosteuden mittaamiseen liittyy tyypillisesti  $\pm 2-3$  % RH mittausepävarmuus.

#### 4.2.2 Simuloinnit mitoitulosuhteissa

Eriolaisten olkieristeellä lämmöneristettyjen seinärakenteiden kosteusteknistä toimivuutta suomalaisissa mitoitulosuhteissa tutkittiin laskennallisesti 4 vuoden pituisilla simuloinneilla, joissa ulkoilman olosuhteina käytettiin rakennusfysikaalisia mitoitusvuosia Jokioinen 2011, Jokioinen 2050 (RCP8.5) ja Jokioinen 2080 (RCP8.5). Sisäilman olosuhteina käytettiin vakiolämpötilaa  $21$  °C ja RIL107-2022 mukaisen kosteusluokan 2 sisäilman kosteuslisästä laskettavaa muuttuvaa suhteellista kosteutta.

Mitoitusolosuhteiden tarkastelut tehtiin myös yksiulotteisina. Rakenteiden julkisivuna käytettiin kaikissa tapauksissa 20 mm paksua puuverhousta, jonka takana oli 32 mm tuuletusväli. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuutena käytettiin vakioarvoa 50 1/h. Puuverhous oletettiin sadevettä imemättömäksi. Olkieristykselle käytettiin myös mitoitulosuhtetarkasteluissa paksuutta 400 mm. Rakenteet mallinnettiin edellä mainituissa eri sääolosuhteissa sekä etelään että pohjoiseen suunnattuina. Auringon säteilystä aiheutuvat lyhytaaltoisen säteilyn komponentit (suora ja diffuusi) sekä pitkäaaltoisen taivaan vastasäteilyn komponentit etelään ja pohjoiseen suunnatuille rakenteille laskettiin Comsolille sopivaan tiedostomuotoon ensin hyödyntäen WUFI-laskentaohjelmaa. Puuverhouksen ulkopinnan lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokertoimenä käytettiin arvoa 0,5 ja pitkäaaltoisen säteilyn emissiviteettinä arvoa 0,8.

Tutkituissa rakennetyypeissä käytettiin kolmea eri tuulensuojalevyä materiaalia:

- Mineraalivilla ( $0,035$  W/(m·K),  $\mu = 1,3$ )
- STEICO-puukuitulevy (samat ominaisuudet kuin vertailusimuloinneissa)
- Weatherboard 365 -tuulensuojakipsilevy ( $0,25$  W/(m·K), 9,5 mm levyn  $s_d = 0,071$  m)

Sisäverhousrakenteina käytettiin seuraavia materiaaleja:

- Fermacell-kipsilevy (samat ominaisuudet kuin vertailusimuloinneissa)
- Vaneri (ominaisuudet FRAME-raportin liitteestä 1, "A11 Havuvaneri")
- Savi-hampunpäistärelevy (myöhemmin savihamppulevy, ominaisuudet Milla Virkin diplomityöstä)

Savihamppulevyn osalta tutkittiin lisäksi tapauksia, joissa levyn takana on rakenteen sisäpuolista vesihöyrynvastusta kasvattava Ekovilla X5 -ilmansulkupaperi tai Intello-höyrynsulkukalvo. Ekovilla X5 -paperia on tutkittu kokeellisesti Elina Maneliuksen diplomityössä [33], jossa esitettyjä arvoja materiaalille käytettiin ( $s_d$ -arvo kuivissa olosuhteissa noin 0,6 m, kosteissa olosuhteissa 0,016 m). Intello-höyrynsulkukalvolle käytettiin WUFI-ohjelman materiaalitietokannasta löytyvää suhteellisen

kosteuden funktiona muuttuvaa vesihöyrynvastusta ( $s_d$ -arvo kuivissa olosuhteissa 34 m, kosteissa olosuhteissa 0,3 m).

Johtuen laskennallisista tarkasteluista saatavan tulostiedon suuresta määrästä tässä raportissa esitetään vain rajallisesti tuloksia. Taulukoissa 4.2–4.4 on esitetty tuloksista laskettujen homeindeksien maksimiarvoja tuulensuojalevyn ja olkieristeen rajapinnassa eri sisäverhous- ja tuulensuojalevyn yhdistelmistä muodostuvilla rakenteilla. Koska TDH-mallin mukaiset vertailusimulointien tulokset olivat mittauksiin nähden konventionaalista mallia epäluotettavampia, tässä raportissa esitetään tulokset homeindeksien osalta ainoastaan malleista, joissa olkieriste mallinnettiin konventionaalisesti. Tapauksista, joissa tuulensuojana oli STEICO-levy, esitetään kaksi tulosta, joista ensimmäinen on peräisin mallista, jossa STEICO-levy mallinnettiin TDH-mallilla ja jälkimmäinen mallista, jossa myös STEICO-levyyn käytettiin konventionaalista mallia. Homeindeksit laskettiin laskentatulosten viimeiseltä vuodelta (väliltä heinäkuu–heinäkuu). Olkieristeen homeutumisherkkyysluokkana käytettiin luokkaa HHL1. Tulokset on värjätty punaisella maksimihomeindeksin ylittäessä arvon 1,0, jota pidetään kosteusteknisessä analysointimenetelmässä hyväksyttävästi toimivan rakenteen kriittisenä rajana.

*Taulukko 4.2 Homeindeksin maksimiarvot tarkastelluista rakenteista nykyilmastossa (Jokioinen 2011)*

<b>Jokioinen 2011, Pohjoinen</b>	<b>Tuulensuojalevy:</b>		
<b>Sisäverhouslevy:</b>	Mineraalivilla 30 mm	STEICO 60 mm	Weatherboard 9.5 mm
Fermacell 15 mm	0.50	1.06 / 1.39	2.48
Vaneri 15 mm	0.12	0.00 / 0.00	1.40
Saviamppulevy 26 mm	0.53	0.84 / 1.07	2.49
Saviamppulevy 26 mm + X5	0.30	0.05 / 0.08	1.93
Saviamppulevy + Intello	0.06	0.00 / 0.00	0.98
<b>Jokioinen 2011, Etelä</b>	<b>Tuulensuojalevy:</b>		
<b>Sisäverhouslevy:</b>	Mineraalivilla 30 mm	STEICO 60 mm	Weatherboard 9.5 mm
Fermacell 15 mm	0.09	0.46 / 0.67	1.12
Vaneri 15 mm	0.02	0.00 / 0.00	0.51
Saviamppulevy 26 mm	0.09	0.37 / 0.54	1.13
Saviamppulevy 26 mm + X5	0.04	0.00 / 0.01	0.76
Saviamppulevy + Intello	0.01	0.00 / 0.00	0.35

Maksimihomeindeksien tuloksista nähdään, että kriittinen ilmansuunta on pohjoinen kaikilla tutkituilla rakenteilla ja että mitoitusvuodet muuttuvat rakenteiden toiminnan kannalta kriittisemmiksi tulevaisuudessa. Maksimihomeindeksin kriteerin täyttävät nykyilmastossa kaikki tutkitut rakenteet, joissa tuulensuojalevynä oli lämpöä eristävä ja hyvin vesihöyryä läpäisevä 30 mm mineraalivilla. Kipsilevytuulensuojan (Weatherboard) osalta tulokset vahvistavat aiemmissä tutkimuksissa tehtyjä johtopäätöksiä, joiden mukaan kipsilevytuulensuojien ominaisuudet ovat ulkoseinärakenteiden rakennusfysikaalisen toimivuuden kannalta heikkomat kuin vesihöyryä läpäisevillä ja lämpöä

eristävillä tuulensuojalevyillä. Nykyilmaston tarkasteluissa ainoastaan kipsilevytuulensuojallinen rakenne, jossa oli sisäverhouksena savihamppulevy ja Intello-kalvo täytti maksimihomeindeksikriteerin molemmissa ilmansuunnissa.

*Taulukko 4.3 Homeindeksin maksimiarvot tarkastelluista rakenteista tulevaisuuden ilmastossa (Jokioinen 2050)*

<b>Jokioinen 2050, Pohjoinen</b>		<b>Tuulensuojalevy:</b>		
<b>Sisäverhous:</b>	Mineraalivilla 30 mm	STEICO 60 mm	Weatherboard 9.5 mm	
Fermacell 15 mm	1.18	2.96 / 3.21	3.83	
Vaneri 15 mm	0.61	0.01 / 0.01	2.93	
Savihamppulevy 26 mm	1.26	2.92 / 3.17	3.86	
Savihamppulevy 26 mm + X5	0.83	0.46 / 0.68	3.38	
Savihamppulevy 26 mm + Intello	0.50	0.00 / 0.00	2.62	
<b>Jokioinen 2050, Etelä</b>		<b>Tuulensuojalevy:</b>		
<b>Sisäverhouslevy:</b>	Mineraalivilla 30 mm	STEICO 60 mm	Weatherboard 9.5 mm	
Fermacell 15 mm	0.48	1.35 / 1.83	2.66	
Vaneri 15 mm	0.15	0.00 / 0.00	1.68	
Savihamppulevy 26 mm	0.53	1.35 / 1.83	2.70	
Savihamppulevy 26 mm + X5	0.24	0.06 / 0.20	2.13	
Savihamppulevy 26 mm + Intello	0.10	0.00 / 0.00	1.33	

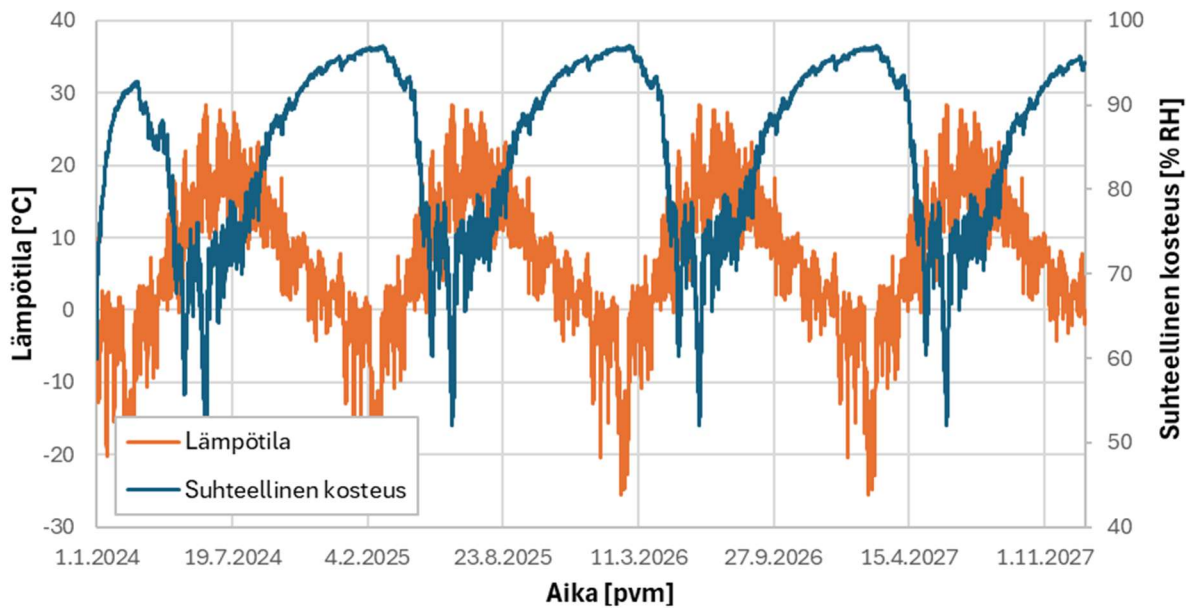
Verratessa maksimihomeindeksituloksia rakenteista, joissa sisäverhouksena oli savihamppulevy + Ekovilla X5, huomataan, että kyseisen sisäverhousrakenteen vesihöyrynvastus on nykyilmastossa riittävä, kun rakenteessa on lisäksi lämpöä eristävä tuulensuojalevy, mutta toimivuus heikkenee, kun mitoitusolosuhteet vaihdetaan tulevaisuuden ilmaston mukaisiin testivuosiin. Syynä on oletettavasti korkea sisäilman suhteellinen kosteus kesäisin, joka muuttuu rakenteelle ankarammaksi tulevaisuuden mitoitusvuosia ja samaa sisäilman kosteuslisää käyttäessä. Sisäilman suhteellinen kosteus saa yli 90 % RH arvoja tulevaisuuden mitoitusvuosilla ja kosteusluokan 2 kosteuslisällä, jolloin sisäverhousmateriaalit savihamppulevy ja Ekovilla X5 muuttuvat läpäisevämmiksi ja kesäaikainen kosteusvirta sisältä ulos päin pääsee kerryttämään eristekerroksen kosteuspitoisuutta, joka johtaa syksyllä ja talvella kriittisiin olosuhteisiin tuulensuojalevyn ja eristeen välissä. Ilmiötä voimistaa, jos rakenteessa on lisäksi paksu puukuitutuulensuojalevy, johon kesäaikainen sisäilman kosteus pääsee myös kertymään. TDH-malli tuottaa tällaisissa tarkasteluissa vähemmän kriittisiä tuloksia, sillä sen mukaisesti kesäaikaan materiaalien ollessa talvea lämpimämissä olosuhteissa niiden kosteuskapasiteetti on lämpötilariippuvuuden takia matalampi kuin talvella, jolloin lämpötilan pudotessa kesän jälkeen kosteuskapasiteetti kasvaa ja suhteellinen kosteus pyrkii tältä osin laskemaan. STEICO-levyn osalta TDH-ilmiöt tulisi kuitenkin pyrkiä ottamaan huomioon, sillä aiemmassa tutkimuksessa on havaittu TDH-mallin parantavan simulointitarkkuutta puukuitutuulensuojalevyillä.

Taulukko 4.4 Homeindeksin maksimi-arvot tarkastelluista rakenteista tulevaisuuden ilmastossa (Jokioinen 2080)

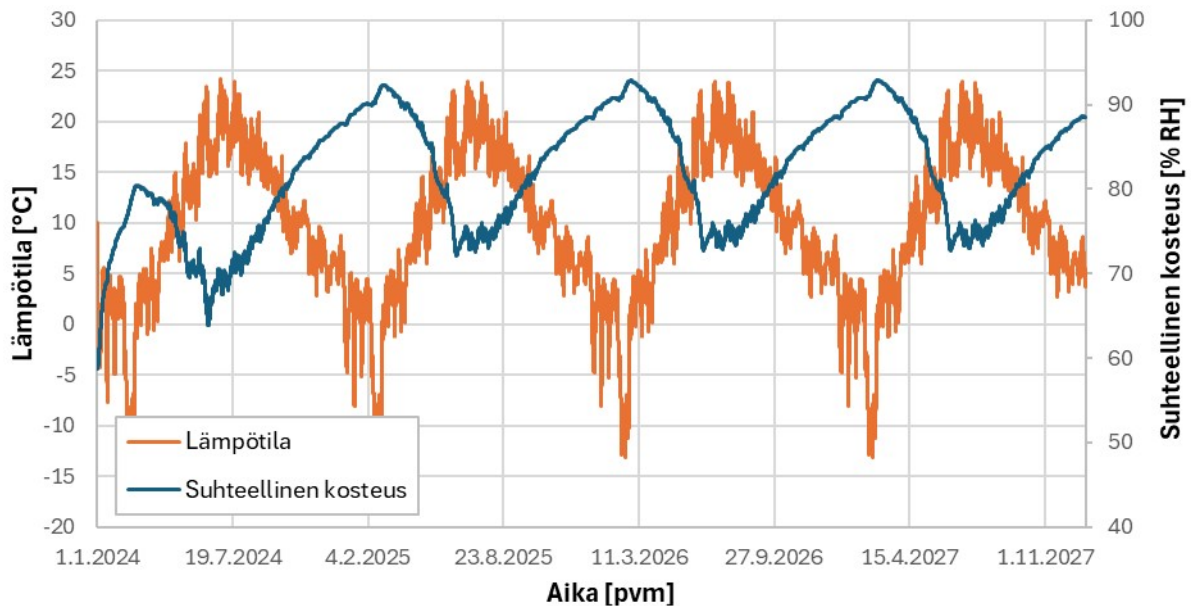
Jokioinen 2080, Pohjoinen	Tuulensuojalevy:		
<b>Sisäverhous:</b>	Mineraalivilla 30 mm	STEICO 60 mm	Weatherboard 9.5 mm
Fermacell 15 mm	2.15	3.57 / 3.76	4.62
Vaneri 15 mm	1.43	0.52 / 0.66	4.09
Saviahampulevy 26 mm	2.21	3.60 / 3.78	4.64
Saviahampulevy 26 mm + X5	1.75	1.98 / 2.33	4.34
Saviahampulevy 26 mm + Intello	1.19	0.07 / 0.09	3.80
Jokioinen 2080, Etelä	Tuulensuojalevy:		
<b>Sisäverhous:</b>	Mineraalivilla 30 mm	STEICO 60 mm	Weatherboard 9.5 mm
Fermacell 15 mm	0.97	2.54 / 2.94	3.85
Vaneri 15 mm	0.63	0.12 / 0.16	3.08
Saviahampulevy 26 mm	1.00	2.59 / 2.99	3.88
Saviahampulevy 26 mm + X5	0.80	0.77 / 1.05	3.41
Saviahampulevy 26 mm + Intello	0.49	0.00 / 0.00	2.73

30 mm paksu mineraalivilla oli tulosten perusteella paras tuulensuojavaihtoehto, paitsi käyttäessä sisäverhouksena 15 mm vaneria, jolloin 60 mm puukuitulevy tuulensuojana tuotti hiukan pienempiä maksimihomeindeksejä. Vanerissa ei käytetty missään tarkastelussa TDH-mallia. Sisäpuolella vaneri pysyy läpi vuoden samoissa lämpötiloissa, mutta sen kosteuspiitoisuus vaihtelee sisäilman suhteellisen kosteuden vaihdella, jolloin vanerin käyttäytymiseen liittyy mahdollisesti myös tasapainokosteuden hystereesi, jonka huomioon ottaminen vaatisi kuitenkin materiaalikokeita vanerilla.

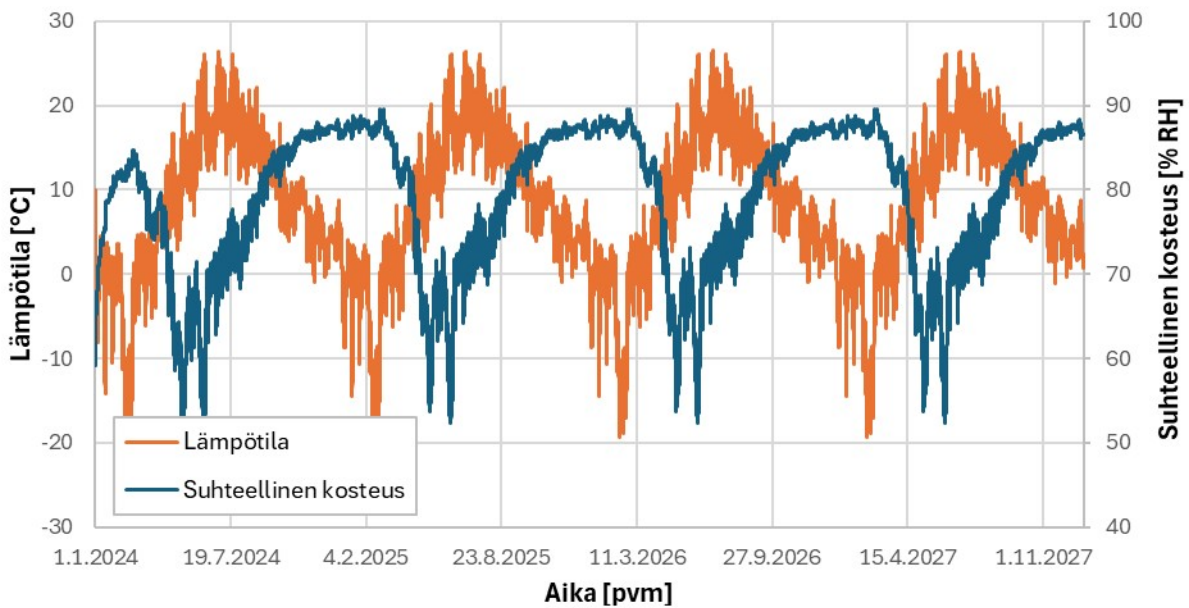
Kuvissa 4.29–4.31 on esitetty laskentatulosten mukaiset lämpötilat ja suhteelliset kosteudet eri tuulensuojalevyjen ja olkieristeen välissä nykyilmastossa pohjoiseen suunnatuilla rakenteilla, joissa on Fermacell-kipsilevy sisäverhouksena. Vastaavat tulokset tulevaisuuden ilmastossa (2080) on esitetty kuvissa 4.32–4.34. Kuvista nähdään, että homeindeksitarkastelun perusteella heikosti toimiviin kipsilevytuulensuojallisiin rakenteisiin ei kuitenkaan kerry kosteutta vuosi vuodelta lisää. Keskeinen syy korkeille maksimihomeindekseille on tuulensuojalevyn heikko lämmönvastus, joka johtaa korkeisiin suhteellisiin kosteuksiin levyn takana, ja etenkin homehtumisherkkyyden luokan 1 mukaiselle eristeelle olosuhteet muodostuvat liian kriittisiksi syksyisin, jolloin homeindeksi kasvaa nopeasti.



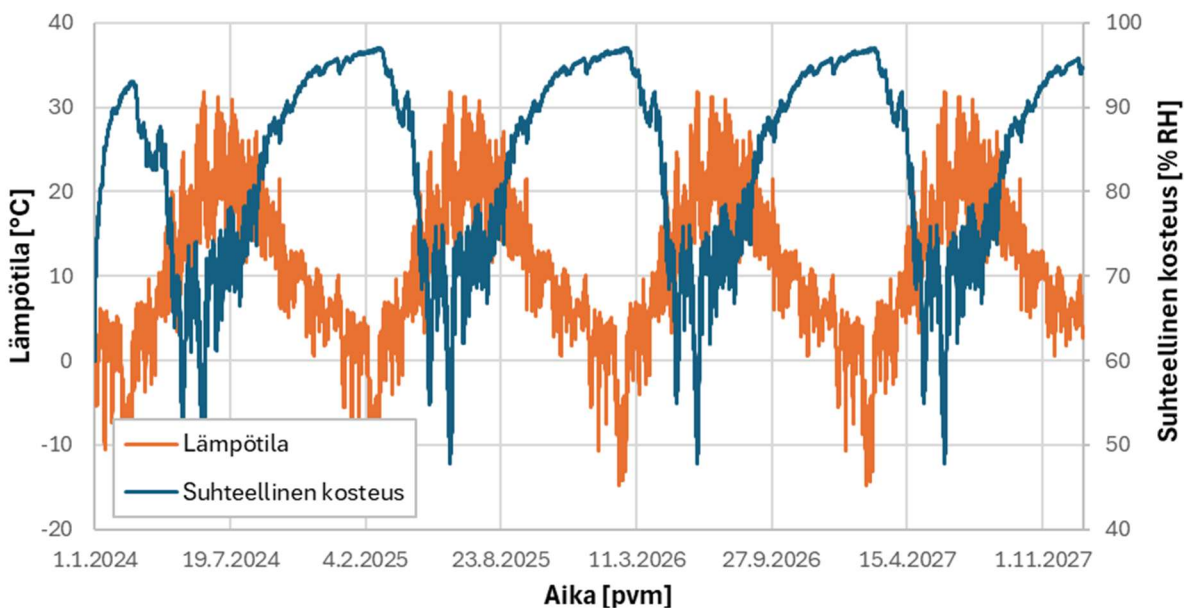
Kuva 4.29 Lämpötila ja suhteellinen kosteus tuulensuojalevyn takana rakenteessa, jossa tuulensuojalevynä Weatherboard ja sisäverhouslevynä Fermacell-kipsilevy (Jokioinen 2011, rakenteen ilmansuunta pohjoinen)



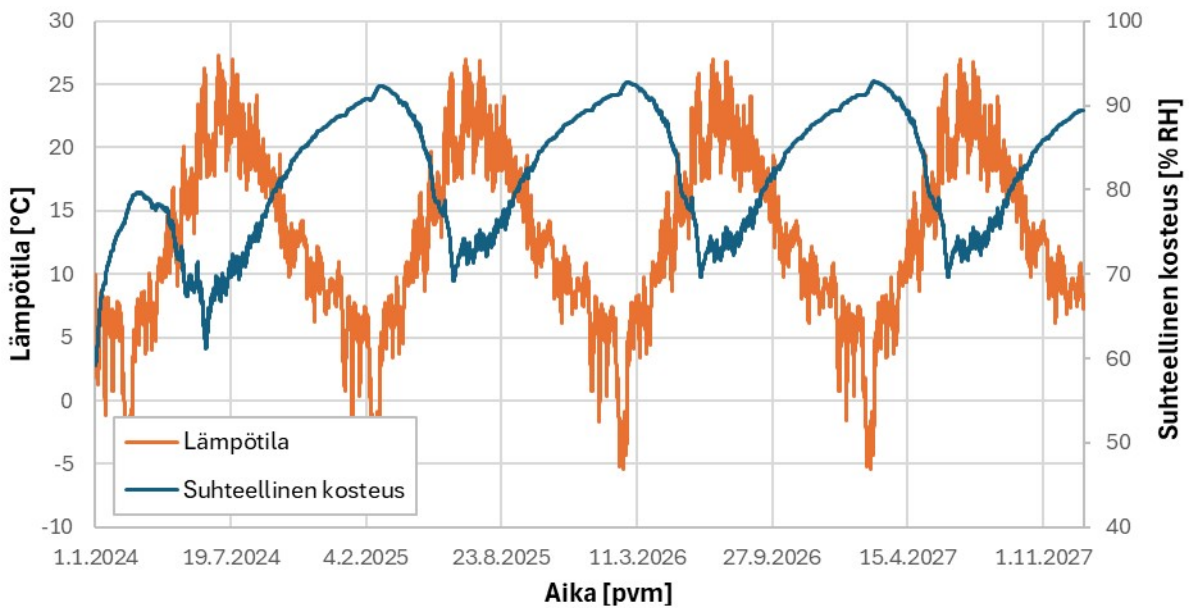
Kuva 4.30 Lämpötila ja suhteellinen kosteus tuulensuojalevyn takana rakenteessa, jossa tuulensuojalevynä STEICO-levy (TDH-malli) ja sisäverhouslevynä Fermacell-kipsilevy (Jokioinen 2011, rakenteen ilmansuunta pohjoinen)



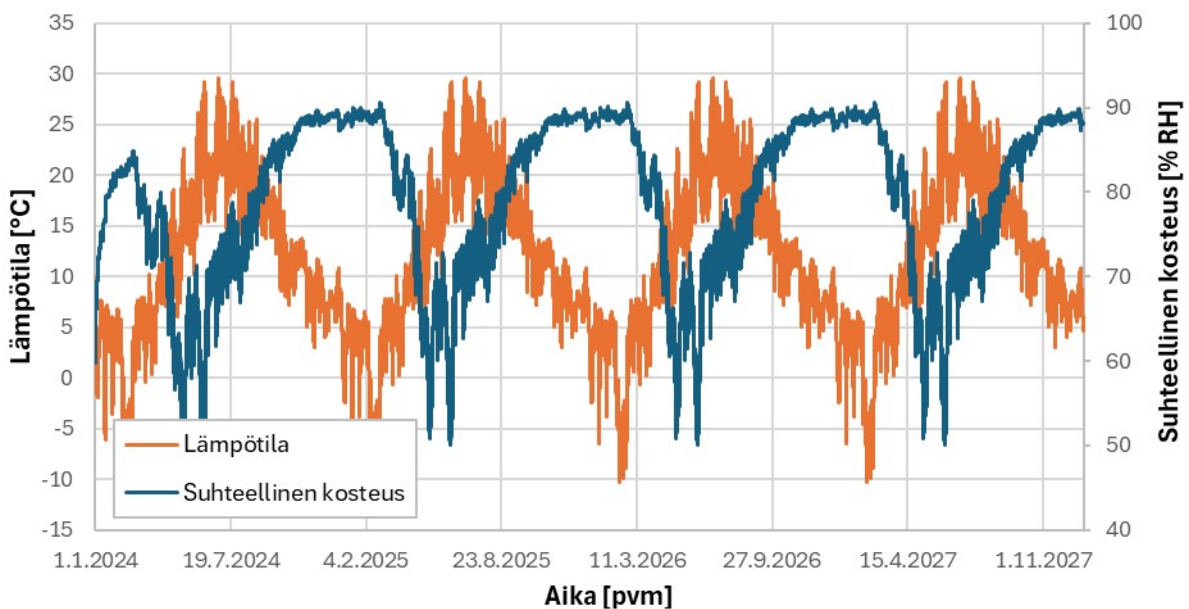
Kuva 4.31 *Lämpötila ja suhteellinen kosteus tuulensuojalevyn takana rakenteessa, jossa tuulensuojalevynä mineraalivilla ja sisäverhouslevynä Fermacell-kipsilevy (Jokioinen 2011, rakenteen ilmansuunta pohjoinen)*



Kuva 4.32 *Lämpötila ja suhteellinen kosteus tuulensuojalevyn takana rakenteessa, jossa tuulensuojalevynä Weatherboard ja sisäverhouslevynä Fermacell-kipsilevy (Jokioinen 2080, rakenteen ilmansuunta pohjoinen)*



Kuva 4.33 *Lämpötila ja suhteellinen kosteus tuulensuojalevyn takana rakenteessa, jossa tuulensuojalevynä STEICO-levy (TDH-malli) ja sisäverhouslevynä Fermacell-kipsilevy (Jokioinen 2080, rakenteen ilmansuunta pohjoinen)*



Kuva 4.34 *Lämpötila ja suhteellinen kosteus tuulensuojalevyn takana rakenteessa, jossa tuulensuojalevynä mineraalivilla ja sisäverhouslevynä Fermacell-kipsilevy (Jokioinen 2080, rakenteen ilmansuunta pohjoinen)*

Koska edellä esitetyistä tarkasteluista ei löytynyt tulevaisuuden ilmastossa homeindeksikriteeriä täyttävää rakennetta, jossa tuulensuojana olisi käytetty palovaatimukset täyttävää 30 mm mineraalivillalevyä, olkieristetyille seinärakenteille tehtiin vielä lisätarkasteluja käyttäen tuulensuojana 50 mm paksua mineraalivillaa. Lisätarkasteluissa käytettiin sisäverhouslevynä Fermacell-kipsilevyä ja vaneria.

Taulukko 4.5 Maksimihomeindeksit lisätarkasteluissa, joissa tuulensuojana käytettiin 50 mm paksua mineraalivillaa.

<b>Jokioinen 2011</b>	<b>Pohjoinen</b>	<b>Etelä</b>
Fermacell 15 mm	0.13	0.02
2 x Fermacell 15 mm	0.06	0.01
Vaneri 15 mm	0.01	0.0
<b>Jokioinen 2050</b>	<b>Pohjoinen</b>	<b>Etelä</b>
Fermacell 15 mm	0.57	0.11
2 x Fermacell 15 mm	0.43	0.07
Vaneri 15 mm	0.12	0.02
<b>Jokioinen 2080</b>	<b>Pohjoinen</b>	<b>Etelä</b>
Fermacell 15 mm	1.23	0.56
2 x Fermacell 15 mm	0.96	0.39
Vaneri 15 mm	0.69	0.19

Taulukosta 4.5 nähdään, että yhdellä Fermacell-levyllä homeindeksikriteeri ei aivan täyty tulevaisuuden ilmastossa (Jokioinen 2080), kun rakenteen ilmansuunta on pohjoinen. Laskentatulosten mukaan 400 mm paksulla olkieristyksellä lämmöneristetty ulkoseinä, jossa on tuulensuojana 50 mm paksu mineraalivilla ja sisäpuolella kaksinkertainen Fermacell-levytys, voidaan todeta lämpö- ja kosteusteknisesti toimivaksi. Rakenteen toimivuus edellyttää, että tuulensuojakerros on hyvin lämpöä eristävä (50 mm mineraalivillakerroksen lämmönvastus tarkasteluissa oli noin 1,43 m<sup>2</sup>K/W) ja samalla hyvin vesihöyryä läpäisevä. Lisäksi rakenteessa tulee olla sisäpuolella riittävästi vesihöyrynvastusta. Kaksinkertaisen Fermacell-levytyksen vesihöyrynvastus on s<sub>d</sub>-arvoltaan noin 0,5 m. Rakenteen tulee olla myös toteutettu muilta osin huolellisesti siten, että se on ilmatiivis eikä julkisivu päästä viistosadevettä tunkeutumaan rakenteeseen.

#### 4.2.3 Johtopäätökset ja yhteenveto

Hankkeessa tutkittiin laskennallisesti olkieristeellä lämmöneristettyjen ulkoseinärakenteiden toimintaa tekemällä vertailusimulointeja Tampereen yliopiston rakennusfysikaalisella koerakennuksella tutkittaville koerakenteille sekä käyttäen ulko- ja sisäilman mitoitusolosuhteita useiden vuosien simuloinneissa rakenteille, joissa käytettiin eri tuulensuoja- ja sisäverhousmateriaaleja. Vertailusimuloinnit tehtiin kahdelle muuten samanlaiselle rakennetyypille,

joissa toisessa sisäverhouslevynä on 15 mm paksu Fermacell-kipsilevy ja toisessa noin 20 mm paksu savirappaus. Molemmista rakennetyypeistä rakennettiin koerakenteet koerakennuksen etelä- ja pohjoispuolille eli tutkittavia rakenteita oli vertailusimuloinneissa yhteensä neljä.

Vertailusimuloinneilla pyrittiin saamaan tietoa, kuinka luotettavasti nykyisin laajasti rakennusfysikaalisessa tutkimuksessa käytetyt laskentamenetelmät soveltuvat olkieristeisten rakenteiden tutkimukseen sekä soveltuvatko puukuitulevystä aiemmassa tutkimuksessa määritetyt materiaalin lämpötilariippuvat ja hystereesin huomioivat tasapainokosteusominaisuudet olkieristeelle ja parantavatko ne mallintamisen tarkkuutta. Mittaus- ja laskentatulosten vertailusta nähdään, että TDH-malli tuotti selvästi suurempia nopeita suhteellisen kosteuden vaihteluita kesällä tuulensuojalevyn ja eristeen välisessä rajapinnassa verrattuna vastaaviin mittaustuloksiin molemmilla sisäverhouslevyillä ja ilmansuunnilla. Puukuitulevystä määritettyjä TDH-ominaisuuksia on käytetty aiemmin vastaavalla tavalla puukuitulevyä kevyemmälle kutterinlastueristeelle, joka paransi selvästi laskenta- ja mittaustulosten vastaavuutta samankaltaisissa koerakenteiden vertailusimuloinneissa [34]. Tästä syystä mallia kokeiltiin tässä hankkeessa olkieristeelle, jossa vastaavuus päinvastoin kuitenkin heikkeni. TDH-malli tuotti myös kylminä aikoina keskimäärin muita malleja ja mittaustuloksia matalampia eli kosteusteknisen toiminnan arvioinnin kannalta vähemmän kriittisiä suhteellisen kosteuden tuloksia. Olkieriste ei selvästi käyttäydy tasapainokosteuksien osalta täysin vastaavasti kuin huokoinen puukuitulevy huolimatta siitä, että molemmat ovat bio- ja selluloosapohjaisia materiaaleja.

Mittaustuloksissa on havaittavissa jonkin verran pientä ja nopeaa suhteellisen kosteuden vaihtelua, jota täysin konventionaalinen malli ei tuottanut tuloksiin vastaavasti kuin malli, jossa paksu puukuituinen tuulensuojalevy mallinnettiin TDH-mallilla ja olkieriste konventionaalisesti. Vaihtelu on kuitenkin kosteusteknisen toimivuuden arvioinnin kannalta merkityksetöntä. Näistä kahdesta mallista molemmat tuottivat keskimäärin tyydyttävän vastaavuuden mittauksiin nähden eikä mallien tuloksissa ole selvää eroa suhteellisen kosteuden tasosta, johon olosuhteet tuulensuojalevyn takana päätyvät talvisin. Savirapatusta pohjoispuolelle asennetusta rakenteesta ja kipsilevyllisestä eteläpuolelle asennetusta rakenteesta mitattiin syystalvella 2024 korkeampia suhteellisia kosteuksia, kuin mitä vastaavat laskennat tuottivat. Erot ovat suurimmillaan noin 5 % RH suuruisia eikä niille löydetty selvää syytä. Vertailusimulointituloksia analysoitaessa on kuitenkin otettava huomioon, että vaipparakenteiden lämpö- ja kosteustekninen mallintaminen tuottaa harvoin lähes täydellistä vastaavuutta koerakennemittauksiin nähden, mikä aiheutuu useista tekijöistä, jotka liittyvät muun muassa materiaaliominaisuuksien ja -mallien tarkkuuteen sekä lämpö- ja kosteusolosuhteiden mittaustarkkuuteen. Koska olkieriste on useimpien selluloosapohjaisten materiaalien kanssa selvästi hygroskooppista, tulisi sen sekä muiden biopohjaisten rakennusmateriaalien kosteuskapasiteettiin liittyviä ominaisuuksia tutkia lisää vähähiilisyteen ja luonnonmukaiseen rakentamiseen tähtäävissä hankkeissa.

Tuulensuojalevyn taustalta mitattujen lämpötilojen osalta vastaavuus laskentatulosten kanssa on keskimäärin hyvä. Hetkelliset erot voivat olla useampia asteita nopeasti muuttuvissa tilanteissa. Lämpötilojen osalta tuloksia analysoitaessa on kuitenkin otettava huomioon, että olkieristeelle käytettiin lämmönjohtavuutta, jolla vastaavuus laskenta- ja mittaustuloksien välillä lämpötilojen osalta saatiin hyväksi ja joka on korkeampi kuin olkielementin toimittajan esittämästä U-arvosta laskettava tehollinen lämmönjohtavuus.

Koerakenteiden vertailusimulointien lisäksi olkieristeisille ulkoseinärakenteille tehtiin laskennallisia tarkasteluja, joissa käytettiin sisä- ja ulkopuolella rakennusfysikaalisesti mitoitettavia olosuhteita nykyilmastossa ja tulevaisuudessa. Tarkasteluissa tehtiin 4 vuoden pituisia simulointeja eri rakenteille, joissa olkieriste-elementin yhteydessä käytettiin eri tuulensuoja- ja sisäverhousmateriaaleja. Simulointitulosten viimeisen vuoden ajalta (heinäkuusta heinäkuuhun) laskettiin ajan suhteen kehittyvät homeindeksit tuulensuojalevyn ja eristeen välisestä rajapinnasta, joiden maksimiarvot taulukoitiin. Rajapinnassa homeutumisherkkydeltään heikompi materiaali oli kaikissa tapauksissa olkieriste, jolle käytettiin homeutumisherkkyysluokkaa 1.

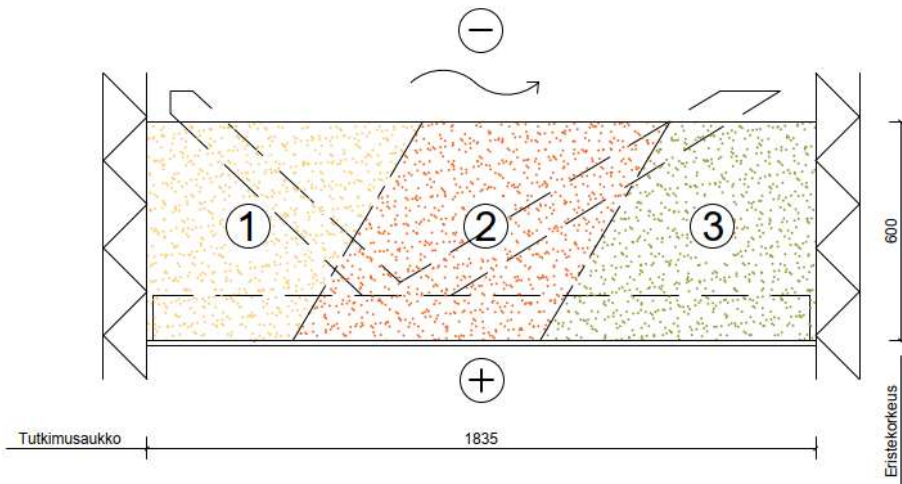
Tuloksista voidaan tehdä samat yleisen tason johtopäätökset ulkoseinärakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta kuin useissa aiemmissakin tutkimuksissa eli, että rakenteet tarvitsevat toimiakseen riittävästi vesihöyryn diffuusiovastusta sisäpuolelle ja että tuulensuojalevyn ominaisuudet ovat myös tärkeitä. Kriittisin tarkastelupiste ulkoseinärakenteessa on tyypillisesti tuulensuojalevyn sisäpinta, jonne muodostuvat ajan suhteen muuttuvat olosuhteet riippuvat monimutkaisella tavalla useista tekijöistä. Suuri sisäpuolinen vesihöyryn diffuusiovastus ei etenkään tulevaisuuden ilmastossa takaa kuitenkaan yksistään vielä ulkoseinärakenteen kosteusteknistä toimivuutta, vaan tuulensuojalevyn tulisi olla mahdollisimman hyvin lämpöä eristävä ja samalla diffuusioavoin. Olkieriste on oletettavasti verrattain homeutumisherkkä materiaali, joten olkieristettyjen rakenteiden suunnittelussa tulisi käyttää sellaisia rakenneratkaisuja, jotka laskennallisesti tarkasteltuna osoittautuvat kosteusteknisesti toimintavarmiksi.

## 4.3 Kutterinlastueristeiden yläpohjakokeet – sisäinen konvektio

### 4.3.1 Rakenteiden kuvaus

STALK-hankkeen yhteydessä rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteistolla tutkittiin EHTA-kutterinlastun ja sahanpurun sekoitusta. Lisäksi ECOSAFE-hankkeissa [26] oli tutkittu kahta muuta puupohjaista irtoeristettä; EHTA-kutterinlastua sekä savetettua EHTA-kutterinlastua. Eristepaksuus kaikilla materiaaleilla oli n. 600 mm ja eristeen yläpinta oli avoin yläpinnan ilmatilaa vasten. Tutkitut materiaalit on listattu alla olevan kuvan (kuva 4.35) leikkauspiirustuksen alle.

Savetettu EHTA-kutterinlastu on valmistettu ECOSAFE-hankkeissa kuvatulla tavalla [26]. EHTA-kutterinlastuun on sekoitettu savijauhoa painosuhteessa 2:1. Tarkempi kuvaus valmistuksesta on esitetty lähteessä [35]. EHTA-kutterinlastun ja purun sekoitus on valmistettu kuivapainosuhteessa 2:1.

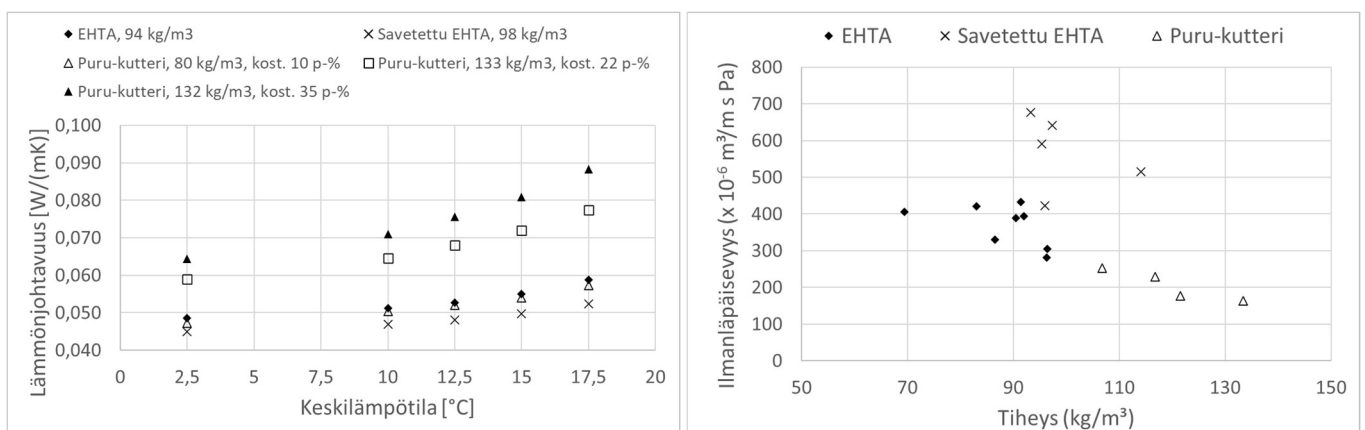


- STALK, tehdyt rakennekokeet
1. EHTA kutterinlastueriste
  2. Savetettu EHTA kutterinlastueriste
  3. EHTA kutterinlastu + puru -eriste

Kuva 4.35 Yläpohjakokeiden koerakenteet.

Ensimmäinen yläpohjakoe tehtiin EHTA-kutterinlastulle 24.3.–2.5.2023. Toisena materiaalina mitattiin savetettu EHTA, joka mitattiin 15.5.–21.7.2023. Kolmantena mitattiin purun ja EHTA-kutterinlastu-sekoitus 2.10.–22.11.2024.

Yläpohjakokeissa tutkittujen materiaalien ominaisuudet sisäisen konvektion tarkasteluja varten mitattiin kokeiden yhteydessä. Kosteuspitoisuuden ja tiheyden lisäksi jokaisen tutkitun materiaalin lämmönjohtavuus ja ilmanläpäisevyys mitattiin. Eristemateriaalien lämmönjohtavuudet ja ilmanläpäisevyudet on esitetty alla olevassa kuvassa (kuva 4.36).



Kuva 4.36 Yläpohjakokeissa tutkittujen materiaalien lämmönjohtavuudet (a) ja ilmanläpäisevyudet (b).

Ilmanläpäisevyyden arvoina on käytetty asennustiheyttä vastaavia arvoja: EHTA-kutterinlastu  $400 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ , Savetettu EHTA-kutterinlastu  $590 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$  ja EHTA-kutterinlastun ja purun sekoitus  $180 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ .

Savetettua kutterinlastua ei voitu asentaa yläpohjalaitteeseen käyttämällä puhalluslaitetta, koska lastun pinnalle kiinnittynyt savi pölysi voimakkaasti. Savetettu kutterinlastu asennettiin kaatamalla sitä tutkimusaukkoon suoraan säkeistä ohuina kerroksina, joita paineltiin käsin tiiviimmiksi. Yläpohjakokeissa tutkittujen materiaalien asennustiheydet, -kosteudet ja -tavat on listattu alla olevassa taulukossa (taulukko 4.6).

*Taulukko 4.6 Tutkittujen materiaalien asennustavat, -kosteudet ja -tiheydet.*

Materiaali	Asennustapa	Asennuskosteus, suhteessa kuivapainoon [p-%]	Asennustiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
EHTA kutterinlastu	Asennettu puhaltamalla	13 %	88
Savetettu EHTA kutterinlastu	Kaadettu säkeistä ja tiivistetty painamalla	7 %	95
Purun ja EHTA kutterinlastun sekoitus	Asennettu puhaltamalla	38 % / 22 % <sup>1)</sup>	127 / 116 <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Puru-kutteri oli asennushetkellä huomattavan kosteaa ja kuivui kokeen aikana. Ensimmäinen luku kuvaa tilannetta ennen yläpohjakokeen alkua ja jälkimmäinen kokeen jälkeen.

EHTA-kutterinlastu sekä EHTA-kutterinlastun, johon on sekoitettu savea, olivat kumpikin kuivia (säilytetty huoneilmassa) ennen yläpohjakoetta. EHTA-kutterinlastun ja savetetun EHTA-kutterinlastun kohdalla materiaalin kosteuspuiteisuus kokeen aikana ei muuttunut merkittävästi. Purun ja EHTA-kutterinlastun sekoitus puolestaan oli asennushetkellä huomattavan kosteaa ja kuivui selvästi kokeen aikana. Ennen kokeen alkua puru-kutterieristeen kosteuspuiteisuus oli noin 38 % (paine-% suhteessa materiaalin kuivapainoon). Yläpohjakokeen jälkeen materiaalista otettiin useita näytteitä, joiden kosteuspuiteisuus määritettiin. Materiaali eristekerroksen pinnalla oli kuivunut noin 10 %:iin, laitteen pohjalla materiaali oli kuivunut noin 22 %:iin ja materiaali eristekerroksen puolivälissä oli n. 35 %:n kosteudessa.

Kuvassa 4.36 (a) on esitetty tutkittujen materiaalien lämmönjohtavuudet keskilämpötilan suhteen, kun lämmönjohtavuusmittauksen lämpötilaero oli 20 °C. Puru-kutterille määritettiin lämmönjohtavuudet edellä esitettyjen kolmesta eri kerroksesta mitattujen kosteuspuiteisuuksien suhteen. Puru-kutterin lämmönjohtavuuksina käytettiin keskimääräisten kosteuspuiteisuuksien perusteella laskettuja lämmönjohtavuuksia. Kosteuspuiteisuuksia arvioitiin ennen mittausta ja mittausten jälkeen tehtyjen kosteuspuiteisuuksien määritysten perusteella. Puru-kutterin käytetyt lämmönjohtavuudet on esitetty alla olevassa taulukossa (taulukko 4.7).

Taulukko 4.7 EHTA-kutterinlastun ja purun sekoituksen lämmönjohtavuudet laskennassa.

Keskilämpötila (°C)	Lämmönjohtavuus (W/(mK))
2.5	0.0642
10	0.0656
12.5	0.0652

Ilmanläpäisevyyskoekappaleet puhallettiin samassa yhteydessä kuin yläpohjalaitteen tutkimusaukon eriste. Koekappaleet ovat oletettavasti hieman kuivuneet ennen mittausta, mutta olleet lähellä kokeen alkupuolen tilannetta, kun ilmanläpäisevyudet on mitattu.

#### 4.3.2 Koejärjestely

Sisäisellä konvektiolla tarkoitetaan ilman liikettä huokoisen materiaalin sisällä. Kun materiaalin sisällä oleva lämpötilaero kasvaa tarpeeksi suureksi ja materiaali on riittävän huokoista, materiaalin sisällä olevaan ilmaan syntyy ilman tiheyseroista nostetta, joka saa kevyemmän lämpimän ilman nousemaan alhaalta ylöspäin ja vastaavasti viileämpi ilma siirtyy ylhäältä alaspäin. Tätä kutsutaan luonnolliseksi konvektioksi. Sekä eristemateriaalin sisällä että eristeen ja yläpuolisen ilmatilan välillä kiertävä ilmavirta aiheuttaa lämpövirran lisääntymistä eristekerroksen läpi. Tällöin eristekerroksen läpi virtaa lämpöä enemmän kuin pelkän lämmön johtumisen vaikutuksesta.

Sisäisen konvektion syntymisen potentiaalin arviointiin voidaan käyttää muunnettua Rayleighin lukua standardin EN ISO 10456 mukaan. Nusseltin luvulla  $4(4.7)10$  puolestaan kuvataan sisäisen konvektion voimakkuutta. Nusseltin luku kuvaa materiaalikerroksen läpi siirtyvää kokonaislämpövirtaa suhteessa pelkästään johtumalla siirtyvään lämpövirtaan.

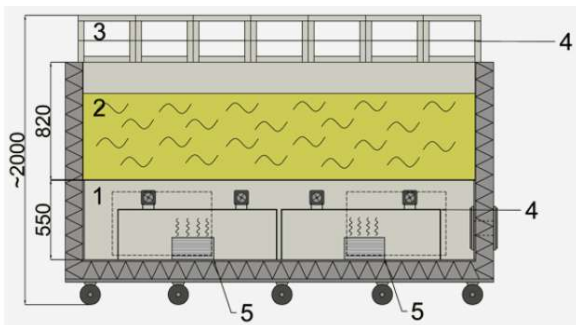
$$Nu = \frac{q_{cv} + q_{cd}}{q_{cd}}, \quad 4(4.7)10$$

missä  $q_{cv} + q_{cd}$  (W/m<sup>2</sup>) on mitattu lämpövirta koerakenteen yli ja  $q_{cd}$  (W/m<sup>2</sup>) on johtumalla siirtynyt lämpövirta koerakenteen yli.

Umpisoluisessa lämmöneristeessä Nusseltin luku on 1, koska materiaalissa ei tapahdu konvektiota. Huokoisilla eristeillä Nusseltin luku voi olla yli 1, kun lämpötilaero kasvaa riittävän suureksi ja sisäinen konvektio alkaa; esimerkiksi Nusseltin lukun 1,5 tarkoittaa, että sisäinen konvektio aiheuttaa johtumalla rakenteen läpi siirtyvään lämpövirtaan 50 %:n suuruisen kasvun.

Tampereen yliopiston Rakennusfysiikan tutkimusryhmällä on käytössä sekä vaaka- että pystyrakennelaitteistot, missä erilaisia seinä- ja yläpohjarakenteita voidaan tutkia hallituissa sisä- ja ulkopuolen olosuhteissa. Tässä tutkimuksessa kokeet tehtiin yläpohjarakennelaitteella, joka toimii Calibrated Hot Box -menetelmällä. Menetelmässä laitteisto kalibroidaan siten, että lämmönjohtavuudeltaan tunnetun kalibrointielementin avulla laitteiston vaipan läpi siirtyvä lämpövirta (häviöteho) voidaan laskea lämmitystehon ja kalibrointielementin mitatun lämmönjohtavuuden perusteella. Yläpohjakokeessa tutkittavan rakennekerroksen lämmönläpäisykerroin saadaan siten laskettua kokonaislämmitystehon ja häviötehon erotuksena. Nusseltin luku tutkittavalle rakenteelle voidaan laskea, kun tunnetaan tutkittavan materiaalin lämmönjohtavuus, ja siitä laskettu pelkästään johtumalla siirtyvän lämpövirran osuus. Tarkempi kuvaus yläpohjarakenteen toiminnasta on esitetty lähteessä [36]. Kokeissa selvitettiin sisäisen konvektion esiintymistä, kun yläpohjarakenteen eristeenä käytettiin luvussa 4.3.1 esiteltyjä materiaaleja.

Alla olevassa kuvassa (kuva 4.37) on yläpohjalaitteen periaatepiirustus (poikkileikkaus) sekä kuva laitteesta, jossa on asennettuna EHTA-kutterinlastun ja purun sekoitus. Tutkimusaukon pinta-ala on  $2,73 \text{ m} * 1,84 \text{ m} = 5,0 \text{ m}^2$ .



- 1 Lämmin kammio
- 2 Testattava rakenne
- 3 Kylmä kammio
- 4 Suojalevyt ja anturit
- 5 Lämmitin ja tuuletin

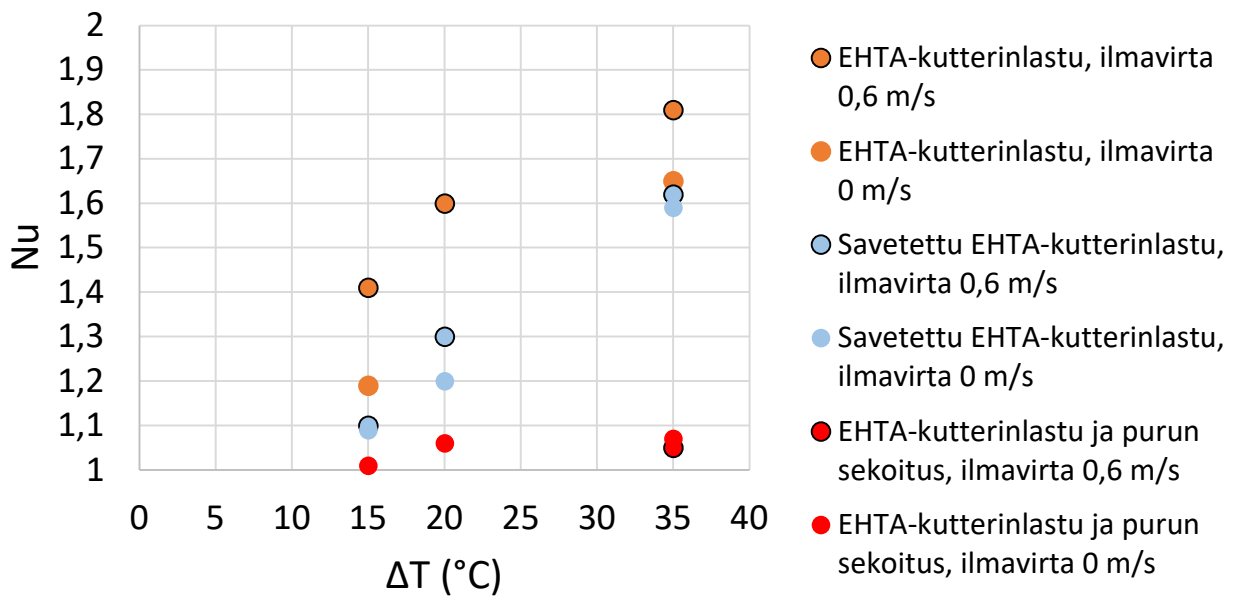


*Kuva 4.37 Tutkimuslaitteen poikkileikkaus (a) ja tutkimusaukko, mihin on asennettu EHTA-kutterinlastun ja purun sekoitus (b).*

Yläpohjakokeissa materiaalin läpi siirtyvä lämpövirta mitattiin lämpötilaeroilla  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  ja  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Sisäkammion lämpötila oli  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ , ja ulkopuolen lämpötilaa vaihdeltiin. Lisäksi tutkittavan rakenteen yläpintaan tehtiin paikallaan olevan ilman lisäksi tilanne, jossa eristeen pinnalle puhallettiin ilmapirta, jonka nopeus oli  $0,6 \text{ m/s}$ . Tämä simuloi tuuletusilmapirta todellisessa yläpohjarakenteessa.

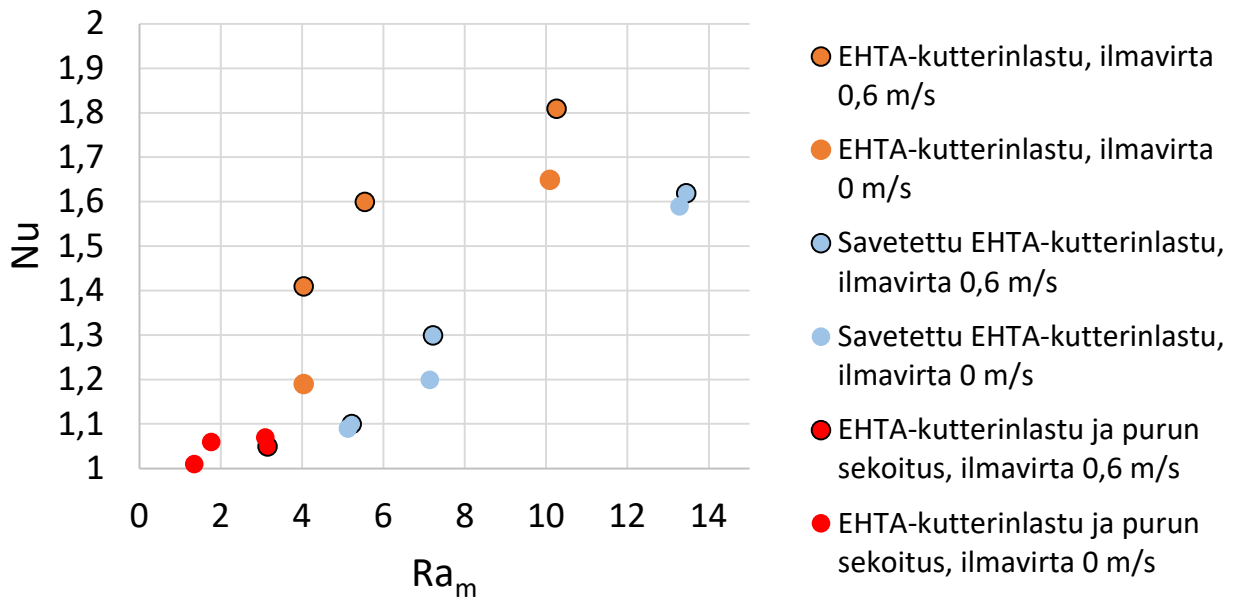
### 4.3.3 Tulokset

Alla olevassa kuvassa (kuva 4.38) on esitetty Nusseltin luvun tulokset lämpötilaeron funktiona. Kuvasta nähdään, että EHTA-kutterinlastulla sekä savetetulla EHTA-kutterinlastulla sisäinen konvektio kasvattaa lämpövirtaa selvästi pelkästään johtumiseen verrattuna. Savetetun kutterinlastun tapauksessa tuuletusilmavirralla ei ollut aivan yhtä suurta vaikutusta sisäisen konvektion voimakkuuteen kuin pelkällä EHTA-kutterinlastulla. Kutterin ja purun sekoituksella sisäisen konvektion suuruus oli selvästi vähäisintä. Tämä korreloi selvästi tutkituista materiaaleista pienimmän ilmanläpäisevyyden kanssa.



Kuva 4.38 Nusseltin luku lämpötilaeron funktiona.

Alla olevassa kuvassa (kuva 4.39) on esitetty Nusseltin luvun tulokset muunnetun Rayleighin luvun funktiona. Kuvan perusteella sisäistä konvektiota alkaa jo esiintymään muunnetun Rayleighin luvun arvoilla 2–3.



Kuva 4.39 Nusseltin luku muunnetun Rayleighin luvun funktiona.

Eri materiaalien välillä käyttäytyminen on jonkin verran toisistaan poikkeavaa, mikä on tavallista aikaisempienkin tutkimustenkin perusteella. Sisäinen konvektio on kuitenkin tavallisesti vähäisempää, kun materiaalin ilmanläpäisevyys on pienempi. Pelkästään vähäisen ilmanläpäisevyyden tarkastelu ei kuitenkaan riitä, kun tarkastellaan eri yläpohjaeristeiden paremmuutta. Sisäisen konvektion ja lämmönjohtavuuden yhteisvaikutus lämmönläpäisykertoimeen on otettava huomioon, sillä vähäisen ilmanläpäisevyyden materiaalissa lämmönjohtavuus voi olla suurempi, jolloin kokonaisuuden tarkastelu on tärkeää.

#### 4.4 Palosimulaatio

Hankkeessa tehtiin toiminnallinen palomitoitus [37] luonnonmukaisten eristemateriaalien hyödyntämisestä puukerrostalossa (olkieriste ulkoseinissä, kutterilastueriste yläpohjassa). Näiden eristemateriaalien (ja myös puurakenteiden) suojaverhouksina tarkasteluissa käytettiin savi + hampun päistäre -levytyksiä. Perinteinen taulukkomitoitus ei salli sellaisten eristemateriaalien, jotka eristävältä osaltaan eivät täytä A2-luokkaa, käyttämistä yli 2-kerroksisessa P2-paloluokan rakennuksessa, joten toiminnallisella suunnittelulla tutkittiin, millä edellytyksillä tarkasteltavia eristeitä (jotka ovat nyt E-luokkaisia) voitaisiin hyödyntää P0(P2) paloluokan rakennuksissa käyttäen apuna case-rakennusta. Tarkastelujen pääpaino oli olkieristeissä, mutta myös (savetettujen) kutterilastueristeiden hyödyntämisestä tarkasteltiin case-rakennuksella (mutta vähäisemmässä määrin, eli ainoastaan osana rakennuksen yläpohjaa).

Tarkastelu piti sisällään FEM-analyysit savilevyille tehdyistä polttokokeista, riskianalyysit erilaisten paloskenaarioiden todennäköisyyksistä tarkasteltavassa kohteessa sekä palosimuloinnit.

Palosimuloinneilla tutkittiin kolme paloskenaariota (sprinkler toimii suunnitellusti, sprinkler on osittain vikaantunut ja sprinkler on kokonaan vikaantunut) ja kaksi herkkyystarkastelua.

Case-rakennus täytti sille asetetut hyväksymiskriteerit, eli savilevysuojattuja olkieristeitä ja yläpohjan (savetettuja) kutterilastueristeitä on mahdollista käyttää asuinkerrostalossa. Saadut toiminnalliset luokkavaatimukset ovat verrannollisia ilman olki-/ kutterilastueristeitä toteutettavien asuinrakennusten taulukkomitoituksen mukaisiin vaatimuksiin, eli osittain täysin samoja ja osittain hieman näitä vaatimuksia tiukempia.

Toiminnalliset analyysit suoritettiin vain yhdelle case-rakennukselle, mutta analyysien johtopäätöksiä on mahdollista laajentaa myös muihin samankaltaisiin rakennuksiin. Oletettuun palonkehitykseen perustuva suunnittelu (toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu, palosimuloinnit) on kuitenkin aina kohdekohtainen, eli tämän tutkimuksen tuloksia ei voi sellaisenaan käyttää oikean kohteen suunnitelmina. Tutkimuksessa hyödynnetyt menettelytapoja voidaan kyllä soveltaa oikeaa kohdetta suunnitellessa ja tehdyistä johtopäätöksistä voidaan arvioida suuruusluokkia eri luokkavaatimuksista oikeaa kohdetta suunniteltaessa.

## 5 Johtopäätökset

Stalk-hankkeen tutkimusten yhteisenä pyrkimyksenä oli lisätä tietoa biopohjaisista rakennusmateriaaleista, ja löytää parhaiten sopivia rakenneratkaisuja kerrostalorakentamiseen pohjoisessa ilmastossamme. Hankkeessa mitattiin mm. olkielementillä eristetyn ulkoseinärakenteen eri kerroksissa suhteellista kosteutta ja lämpötiloja standardoiduissa sisäolosuhteissa. Kun mittauksia verrattiin laskennallisiin arvoihin, huomattiin että olkieriste ei käyttäydy tasapainokosteuksien osalta täysin vastaavasti kuin esim. huokoinen puukuitulevy huolimatta siitä, että molemmat ovat biopohjaisia ja selluloosaa sisältäviä materiaaleja.

Taulukossa 5.1 esitetään 2–8 kerroksisen NBB-rakennuksen ulkoseinältä vaadittavat ominaisuudet suoritettujen rakennusfysikaalisten ja paloteknisten simulointien pohjalta. Sisäpinta voi osallistua paloon vain erittäin rajoitetusti, sen on suojattava rakennetta palolta 30 minuuttia, ja sillä on oltava riittävä vesihöyrynvastus. Biopohjaiselta lämmöneristeeltä ei pienen lämmönjohtavuuden lisäksi vaadita erityistä paloturvallisuuden tai homeutumisherkkyyden suhteen. Tuulensuoja voi osallistua paloon vain erittäin rajoitetusti, sen on suojattava rakennetta palolta 10 minuuttia, ja sillä on oltava pieni vesihöyrynvastus. Sen pitää myös eristää hyvin lämpöä, ja sen tulisi olla vähintään homeutumisherkkyyden luokassa HHL 2. Huokoinen puukuitulevy ei siis sovellu kerrostalon ulkoseinän tuulensuojaksi edes bitumoituna, sillä se ei täytä palovaatimuksia, vaikka se täyttää lämmöneristys- ja homesuojavaatimuksen. Lämmöneristeen ulkopuoliselle ilmansulkukankaalle ei tutkimusten perusteella nähty tarvetta. Tuulettuva vesitiivis ulkoverhous voi osallistua paloon hyvin rajoitetusti,

eikä se saa tuottaa paljon savua, eikä palavia pisaroita. Koko rakenteen osastoivusaajan on oltava 75 minuuttia ja täytettävä U-arvovaatimus.

*Taulukko 5.1* Ulkoseinän vaatimukset 2–8 kerroksisen asuinrakennuksen simuloinnissa, kun lämmöneriste on biopohjainen.

	<b>Paloturvallisuuden vaatimukset P0(P2) -simuloinnissa</b>	<b>Kosteusturvallisuuden vaatimukset rakennusfysikaalisessa simuloinnissa</b>
<b>Sisäpinta</b>	Osallistuu paloon erittäin rajoitetusti (A2), ja suojaa palolta 30 min ( $K_2$ 30).	Riittävä vesihöyrynvastus $\geq s_d$ 0,5 m
<b>Biopohjainen lämmöneriste.</b> Esim. olkielementti.	Käyttäytyminen palossa hyväksyttävissä (E).	Pieni lämmönjohtavuus. Homehtumisherkkyyks, ei vaatimuksia. Suuri kosteuskapasiteetti edullinen.
<b>Tuulensuoja</b>	Osallistuu paloon erittäin rajoitetusti (A2), ja suojaa palolta 10 min ( $K_2$ 10).	Pieni vesihöyrynvastus $\leq s_d$ 0,1 m Suuri lämmönvastus $\geq 1,43$ m <sup>2</sup> K/W Homehtumisherkkyyks $\geq$ HHL 2.
<b>Ulkoerustus (tuulettuva).</b> Esim. palosuojakäsitelty puu.	Osallistuu paloon hyvin rajoitetusti (B), savuntuotto on vähäistä ( $s_2$ ), eikä pisaroi ( $d_0$ ).	Vesitiivis viistosateellakin.
<b>Koko rakenne</b>	Osastoivusaika 75 min (EI75 tai REI75).	U-arvo vaatimus 0,17 W/(m <sup>2</sup> K). Alittuu esim. olkielementin paksuudella 400 mm.

Tässä hankkeessa palosimuloitiin myös 2–8 kerroksisen asuinrakennuksen yläpohjarakenne (taulukko 5.2), jonka kosteusteknistä turvallisuutta oli tutkittu jo aikaisemmin Ecosafe-hankkeessa. Yläpohjarakenteen sisäpinta voi osallistua paloon vain erittäin rajoitetusti, sen on suojattava rakennetta palolta 60 minuuttia, ja sillä on oltava riittävä vesihöyrynvastus. Biopohjaiselta lämmöneristeen alaosalta ei pienen lämmönjohtavuuden lisäksi vaadita erityistä paloturvallisuuden tai homehtumisherkkyyden suhteen, mutta sen yläpinta saa osallistua paloon vain rajoitetummin. Koko rakenteen osastoivusaajan on oltava 75 minuuttia ja täytettävä U-arvovaatimus. Yläpohjan todellisessa U-arvossa on syytä ottaa huomioon sisäisen konvektion mahdollisesti aiheuttama lisäys lämpövirtaan. Sisäisen konvektion suuruuden lisäksi kokonaisuudessa on otettava huomioon myös materiaalin lämmönjohtavuus. Kun ilmanläpäisevyys materiaalilla pienenee, niin sisäinen konvektio vähenee, mutta samaan aikaan materiaalin lämmönjohtavuus voi nousta. Tästä syystä kokonaisuuden tarkastelu on olennaista.

*Taulukko 5.2* Yläpohjan vaatimukset 2–8 kerroksisen asuinrakennuksen simuloinnissa, kun lämmöneriste on biopohjainen.

	<b>Paloturvallisuuden vaatimukset P0(P2) -simuloinnissa</b>	<b>Kosteusturvallisuuden vaatimukset rakennusfysikaalisessa simuloinnissa</b>
<b>Alapinta</b>	Osallistuu paloon erittäin rajoitettusti (A2), ja suojaa palolta 60 min (K <sub>2</sub> 60).	Riittävä vesihöyrynvastus $\geq s_d 0,5$ m
<b>Bio-pohjainen lämmöneriste</b>	Käyttäytyminen palossa hyväksyttävissä (E), mutta yläpinta luokassa D. Esim. kutterilastu yläpinta savetettuna ( $\geq 180$ mm).	Pieni lämmönjohtavuus. Esim. kutterinlastu 0,042 W/(mK). Homehtumisherkyys, ei vaatimuksia.
<b>Koko rakenne</b>	Osastoivuusaika 75 min (EI75 tai REI75).	U-arvovaatimus 0,09 W/(m <sup>2</sup> K). Esim. kutterinlastueriste 600 mm.

Tässä hankkeessa kehitetty Stalk-savirappaus tarjoaa riittävän palonsuojauksen esimerkiksi puurakenteiselle huoneistojen väliselle seinälle. Palokokeet indikoivat, että noin 30 mm paksuinen rappauskerros antaisi 30 minuutin palonsuoja-ajan. Pohja- ja pintalaastien valmistus onnistui myös hankkeessa mukana olleen Fesconin laitteistolla, joten kuivalaastia voidaan tilauksesta valmistaa suuriakin määriä. Savirappaus ei kuitenkaan sellaisenaan antanut olkielementillä eristetyn kerrostalon ulkoseinän sisäpinnalle riittävää vesihöyrynvastusta. Jatkossa pitäisi tutkia voidaanko vesihöyryn vastusta parantaa jollain lisäaineilla vaikkapa pohjarappauksen ensimmäisessä kerroksessa.

Lisäksi tässä hankkeessa kehitetyn järviruoko-tärkkelyslevyn valmistukselle saatiin määriteltyä alustavat parametrit. Levy sopii käytettäväksi rakentamisessa sisätiloissa huokoisen puukuitulevyn tapaan, mutta se ei sellaisenaan kuitenkaan sovellu käytettäväksi ulkoseinän tuulensuojana, sillä se on homehtumisherkyysluokassa HHL1. Huokoisessa puukuitulevyssä käytetty bitumointi tai muu vastaava homeenestokäsittely poistaisi mahdollisesti tämän puutteen. Kumpikaan levy ei kuitenkaan täytä kerrostalon ulkoseinän tuulensuojakerrokselta vaadittua paloturvallisuutta, eli A2 pintaluokkaa.

Hankkeessa valmisteltiin myös luonnonmukaisen rakentamisen koulutusaineisto, joka koostuu oppikirjasta, diaesityksestä sekä videosta. Nämä ovat vapaasti ladattavissa hankesivulta. Koulutusaineistoa on esitelty/esitellään:

- Luonnonmukaisen rakentamisen valtakunnallisessa informaatiotilaisuudessa 28.4.2025
- Rakennustietosäätiön Ilmiö-kirjoitussarjassa, joka julkaistiin 14.5.2025

- FinnBuild 2024 -messuilla 7.–10.10.2024
- Rakennusfysiikka 2025 -seminaarissa 28.–29.10.2025
- Useissa pienemmissä koulutustilaisuuksissa 2024–2025

## Lähdeluettelo

- [1] "Nature CO2 | Building Physics | Tampere Universities", Building Physics. Viitattu: 25. kesäkuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://research.tuni.fi/buildingphysics/nature-co2/>
- [2] "ecococon-technical-specifications.pdf". Viitattu: 25. kesäkuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://ecococon.eu/assets/downloads/ecococon-technical-specifications.pdf>
- [3] "c3a\_building-physics-guide.pdf". Viitattu: 25. kesäkuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: [https://ecococon.eu/assets/downloads/c3a\\_building-physics-guide.pdf](https://ecococon.eu/assets/downloads/c3a_building-physics-guide.pdf)
- [4] ecococon, "ecococon". [Verkossa]. Saatavissa: <https://ecococon.eu/fi/elementti>
- [5] G. F. Schutz, S. de Ávila Gonçalves, R. M. V. Alves, ja R. P. Vieira, "A review of starch-based biocomposites reinforced with plant fibers", *International Journal of Biological Macromolecules*, vsk. 261, s. 129916, maaliskuu 2024, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.129916.
- [6] M. Virkki, "Luonnonmukaisten rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet", Diplomityö, Tampereen yliopisto, Tampere, 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-2024120910902>
- [7] CEN, *EN 12667 Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance*, 2001.
- [8] "Standard Test Method for Using a Heat Flow Meter Apparatus for Measuring Thermal Storage Properties of Phase Change Materials and Products". Viitattu: 25. kesäkuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://store.astm.org/c1784-13.html>
- [9] CEN, *ISO 12571:2021 Hygrothermal Performance of Building Materials and Products — Determination of Hygroscopic Sorption Properties.*, 2021.
- [10] *DIN 18948:2024-03, Lehmplatten\_ - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung.* doi: 10.31030/3518014.
- [11] CEN, *EN ISO12572:2016 Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of water vapour transmission properties. Cup method*, 2016.
- [12] CEN, *EN ISO15148 Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of water absorption coefficient by partial immersion*, 2002.
- [13] R. Lautkankare ja T. Alijoki, "Ruoko rakennusmateriaalina : Cofreen-hanke ruo'on hyötykäytön edistäjänä". Viitattu: 25. kesäkuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <http://www.theseus.fi/handle/10024/821319>
- [14] "BIOSIVU – öljyhampun sivuvirroista tuotteita vähähiiliseen rakentamiseen", Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. Viitattu: 25. kesäkuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.xamk.fi/hanke/biosivu-oljyhampun-sivuvirroista-tuotteita-vahahiiliseen-rakentamiseen/>
- [15] CEN, *ISO 5660-1:2015 Reaction-to-fire tests — Heat release, smoke production and mass loss rate*, 2015.
- [16] CEN, *EN 13501-1:2019 Fire classification of construction products and building elements. Part 1: Classification using data from reaction to fire tests*, 2019.
- [17] J. Liblik ja A. Just, "Small-scale assessment method for the fire resistance of historic plaster system and timber structures", *Fire and Materials*, vsk. 47, nro 1, ss. 62–74, tammi 2023, doi: 10.1002/fam.3069.

- [18] M. Tiso, "Charring behavior of cross laminated timber with respect to the fire protection Comparison of different methods in small, model and large scale with simulations", SP Technical Research Institute of Sweden, Borås, Sweden, 2014.
- [19] CEN, "prEN 1995-1-2:2024: Design of timber structures - Part 1-2: General – Structural Fire Design, Final Draft for Formal Vote in 2025", 2025.
- [20] Hunton, "Fermacell kuitukipsilevy". Viitattu: 24. tammikuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://hunton.fi/tuotteet/seina/fermacell-kuitukipsilevy-12-5-10-15-18/>
- [21] "Lastulevykäsikirja". Viitattu: 26. kesäkuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://koskisen.fi/wp-content/uploads/materials/Koskisen-lastulevykasikirja.pdf>
- [22] "Oriented strand board - European Panel Federation". Viitattu: 26. kesäkuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://europanel.org/the-wood-based-panel-industry/types-of-wood-based-panels-economic-impact/oriented-strand-board/>
- [23] "VestaEco". Viitattu: 26. kesäkuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: [https://www.vestaeco.com/produkt\\_VestaEco\\_LDF,2.html](https://www.vestaeco.com/produkt_VestaEco_LDF,2.html)
- [24] M. Westermarck, "STALK - korresta kerrostaloksi loppuraportti", Rakennustekniikka, Tampere, unpublished final report, published 2025.
- [25] "Hunton Tuulensuojalevy™ - Hunton Finland". Viitattu: 26. kesäkuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: [https://hunton.fi/tuotteet/seina/hunton-tuulensuojalevy/?\\_gl=1\\*\\_zdhkvt\\*\\_up\\*MQ..\\*\\_gs\\*MQ..&gclid=EAlalQobChMlye2cmab8iQMVn0KRBR3tqR6\\_EAAYASAAEgKMTPD\\_BwE](https://hunton.fi/tuotteet/seina/hunton-tuulensuojalevy/?_gl=1*_zdhkvt*_up*MQ..*_gs*MQ..&gclid=EAlalQobChMlye2cmab8iQMVn0KRBR3tqR6_EAAYASAAEgKMTPD_BwE)
- [26] J. Vinha ym., "Kosteusturvalliset ja ympäristöystävälliset kutterinlastueristeiset puurakenteet: ECOSAFE- JA ECOSAFE 2-hankkeiden loppuraportti", Tampereen yliopisto, Tampere, 2023.
- [27] RIL 107-2022 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet", RIL. Viitattu: 23. kesäkuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://ril.fi/tuote/ril-107-2022-rakennusten-veden-ja-kosteudeneristysohjeet/>
- [28] "Suomalainen homemalli | Rakennusfysiikka | Tampereen korkeakouluyhteisö", Rakennusfysiikka. Viitattu: 26. kesäkuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/suomalainen-homemalli/>
- [29] J. Vinha, *Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys*. teoksessa Tutkimusraportti / Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan osasto, talonrakennustekniikka, no. 131. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, 2005.
- [30] P. Huttunen ja J. and Vinha, "Temperature-dependency of hysteretic sorption in hygrothermal modelling of wood fibreboard sheathing: analysis of exterior wall laboratory experiments", *Journal of Building Performance Simulation*, vsk. 17, nro 4, ss. 395–405, heinä 2024, doi: 10.1080/19401493.2023.2293847.
- [31] C. Rode, P. N. Hansen, ja K. K. Hansen, "Combined heat and moisture transfer in building constructions", Doctoral Thesis, Technical University of Denmark, 1990.
- [32] H. L. Frandsen, "Selected Constitutive Models for Simulating the Hygromechanical Response of Wood", Doctoral Thesis, Aalborg University, Aalborg, 2007.
- [33] E. Manelius, "Rakennusmateriaalien vesihöyrynläpäisevyyskokeiden kehittäminen", *Development of water vapour permeability measurements of building products*, 2013, Viitattu: 25. kesäkuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/123456789/21859>
- [34] P. Huttunen ja J. Vinha, "Hygrothermal Performance of Wood Shavings as Thermal Insulation of Exterior Walls in Cold Climate", teoksessa *Multiphysics and Multiscale Building Physics*, U. Berardi, Toim., Singapore: Springer Nature, 2025, ss. 290–301. doi: 10.1007/978-981-97-8313-7\_40.
- [35] I. Tuurala, "Ecosafe-materiaalit ja rakennusfysikaaliset materiaalikokeet", esitetty tilaisuudessa Ecosafe-hankkeiden loppuseminaari, Tampere, helmikuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: [https://research.tuni.fi/uploads/2023/06/558b7e34-0930\\_loppuseminaari.pdf](https://research.tuni.fi/uploads/2023/06/558b7e34-0930_loppuseminaari.pdf)
- [36] H. Kivioja ja J. Vinha, "Hot-box measurements to investigate the internal convection of highly insulated loose-fill insulation roof structures", *Energy and Buildings*, vsk. 216, s. 109934, kesä 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109934.

[37]”TOIMINNALLINEN PALOTEKNINEN TARKASTELU SAVILEVYSUOJATTUJEN OLKIERISTEIDEN HYÖDYNTÄMISESTÄ PUUKERROSTALOSSA”. Viitattu: 26. kesäkuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: [https://research.tuni.fi/app/uploads/sites/112/2024/10/10125787-stalk\\_kauriala\\_toiminnallinen\\_palotekninen\\_tarkastelu\\_olkieristeista\\_puukerrostalossa\\_simulointiraportti\\_hd.pdf](https://research.tuni.fi/app/uploads/sites/112/2024/10/10125787-stalk_kauriala_toiminnallinen_palotekninen_tarkastelu_olkieristeista_puukerrostalossa_simulointiraportti_hd.pdf)