

Juha Vinha, Eero Tuominen, Ilkka Valovirta, Jaakko Hietikko, Ilkka Tuurala,
Petteri Huttunen, Teemu Jokela, Antti Forss, Arto Saari, Tuomo Joensuu,
Mikko Malaska, Mika Alanen, Mirja Salkinoja-Salonen, Kirsi Vaali ja Jimi
Brander

Kosteusturvalliset ja ympäristöystävälliset kutterinlastueristeiset puurakenteet

ECOSAFE- JA ECOSAFE 2-hankkeiden loppuraportti



Ympäristöministeriö
Miljöministeriet
Ministry of the Environment

Tampereen yliopisto
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Rakennustekniikka
Tampere 2023

Copyright © 2023 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 8

ISBN 978-952-03-2958-7 (verkkojulkaisu)

ISSN 2669-8838 (verkkoaineisto)

Tampere 2023

Tähän julkaisuun liittyvät tiedostot tulevat saataville seuraaviin internet-osoitteisiin:

<https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/tutkimusprojektit/ecosafe/>

Tiivistelmä

Juha Vinha, Eero Tuominen, Ilkka Valovirta, Jaakko Hietikko, Ilkka Tuurala, Petteri Huttunen, Teemu Jokela, Antti Forss, Arto Saari, Tuomo Joensuu, Mikko Malaska, Mika Alanen, Mirja Salkinoja-Salonen, Kirsi Vaali ja Jimi Brander

Kosteusturvalliset ja ympäristöystävälliset kutterinlastueristeiset puurakenteet – ECOSAFE- JA ECOSAFE 2-hankkeiden loppuraportti.

Tampereen yliopisto. Rakennustekniikka. Tutkimusraportti 8. 36 s., 72 liites.

Asiasanat: kutterinlastu, savetettu kutterinlastu, savi, mikrobikasvu, rakenteiden kosteustekninen toiminta, luonnonmukainen rakentaminen, ilmastonmuutos

ECOSAFE- hankkeissa on tarkasteltu kutterinlastueristepohjaisten rakenneratkaisujen rakennusfysikaalista toimintaa laskennallisesti ja kokeellisesti, ja määritetty edellytykset toteuttaa kosteusturvallisia rakenteita nykyisissä ja tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa. ECOSAFE 2 - hankkeessa on tarkasteltu savetuksen edullista vaikutusta kutterinlastueristeen rakennusfysikaaliseen toimivuuteen sekä laajennettu ECOSAFE-tutkimuksia akustiikan, palotekniikan, hiilijalanjälkilaskennan ja mikrobiologian osa-alueille. Tutkimus on osoittanut mahdollisuuden hyödyntää luonnonmukaisia materiaaleja tämän päivän rakentamisessa huomattavasti nykyistä laajemmin sekä tuottanut käytännön työkaluja, mm. suositusrakennetyyppejä sekä materiaalidataa. Tulokset ovat hyödynnettävissä sekä uudis- että korjausrakentamisessa.

Kutterinlastueristettä voidaan tutkimustulosten mukaan käyttää nykyvaatimusten mukaisissa ulkovaipparakenteissa. Erityisesti savetetulla kutterinlastulla eristetyt rakenteet ovat osoittautuneet hyvin toimiviksi. Kuten avohuokoisella lämmöneristyksellä varustetut ulkoseinärakenteet yleensä, myös kutterinlastueristeiset rakenteet toimivat parhaiten riittävän lämmönvastuksen omaavan tuulensuojalevyn kanssa. Kutterinlastueristeellä ja tuulensuojamineraalivillalla varustetut ulkoseinät osoittautuivat testatuista rakenteista parhaiten toimiviksi rakennusfysiikan näkökulmasta.

Tutkimuksessa käytettyjen materiaalien käyttö mahdollistaa myös rakenteiden hiilijalanjäljen huomattavan pienentämisen tyypillisiin nykyrakenteisiin verrattuna. Ulkovaipparakenteiden ääneneristävyys on tulosten perusteella samaa suuruusluokkaa tyypillisten nykyaikaisten puurankarakenteiden kanssa. Tämä mahdollistaa ääneneristysvaatimukset täyttävien rakenteiden toteuttamisen sellaisissa tapauksissa, joissa puurankarakenteiden käyttö ylipäänsä on mielekästä ääneneristysten kannalta.

Kutterinlastueristeellä ja puualustan päälle tehdyllä savirappauksella varustetut rakenteet täyttävät oikein toteutettuna asuinhuoneistojen väliset ääneneristysvaatimukset. Palokokeissa seinä saatiin myös täyttämään 60 minuutin palonkestovaatimus ei-kantavana osastoivana rakenteena.

Useiden erilaisten kutterinlastueristeiden rakennusfysikaaliset materiaaliominaisuudet mitattiin kattavasti. Mitattuja ominaisuuksia voidaan hyödyntää tutkittaessa rakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa niin käsinlaskentamenetelmillä kuin tietokonemallinnuksellakin. Erityyppisille saviille mitattiin fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet niiden luokittelua varten.

Materiaalien savetuksen todettiin lisäksi vähentävän haitallisten yhdisteiden muodostumista mikrobitoiminnan seurauksena, kun materiaali on kosteudelle alttiina.

Abstract

Juha Vinha, Eero Tuominen, Ilkka Valovirta, Jaakko Hietikko, Ilkka Tuurala, Petteri Huttunen, Teemu Jokela, Antti Forss, Arto Saari, Tuomo Joensuu, Mikko Malaska, Mika Alanen, Mirja Salkinoja-Salonen, Kirsi Vaali ja Jimi Brander

Moisture-proof and environmentally friendly timber structures with wood shavings insulation – Final report of the ECOSAFE and ECOSAFE 2 projects [in Finnish] Tampere University. Civil Engineering. Research report 8. 36 p., 72 app.

Keywords: wood shavings, clay-coated wood shavings, loam, building physics, mould growth, climate change, nature-based building

In ECOSAFE projects, building physical performance of structures insulated with wood shavings has been investigated. Prerequisites for moisture-proof structures in present and future climate have been determined. In ECOSAFE 2 project, main interest was studying of beneficial effects of clay addition for the performance of wood shavings. Studies were also extracted to the fields of acoustics, fire, carbon footprint and microbiology. The research has proved the possibility to exploit nature-based building materials in greater extent than is done today. Recommended types of structures as well as material data were produced for guidance and for practical design aids. The results of ECOSAFE projects can be exploited both in new construction and renovation.

Wood shavings insulation can be used in modern shell structures which meet present requirements. Structures insulated with clay-coated wood shavings performed especially well in the tests. A wind barrier with sufficient thermal resistance improves the performance of structures insulated with wood shavings, as it does with other porous insulation materials. A mineral wool wind barrier and wood shavings proved to be the best combination studied in this project.

The materials studied also enable considerable reduction of carbon footprint of structures. Tested building shell structures had sound insulation properties similar to typical timber-framed structures. Hence, the structures can be applied in the cases where the use of timber-framed structures is meaningful from the acoustical point of view.

Sound insulation requirements between two apartments can be met using wood shavings insulation and clay plaster over wooden backing. In the fire test, requirements for 60 minutes fire resistance were met while the wall is non-loadbearing.

Building physical properties were measured for several types of wood shavings. The measured data can be exploited both in simple calculations as well as computer simulations. Physical and chemical properties of several different loam samples were measured to characterize different clays.

Loam addition reduced the forming of hazardous substances due to microbiological action, while a material sample was subject to excessive moisture content.

Alkusanat

Tämä raportti on laadittu ECOSAFE ja ECOSAFE 2 -hankkeiden yhteisenä loppuraporttina useiden tutkijoiden toimesta. Eri lukujen ja liitteiden kirjoittajina ja tekijöinä ovat olleet seuraavat henkilöt:

Alkusanat ja luku 1: Ilkka Valovirta ja Juha Vinha

Luku 2: Ilkka Tuurala

Luku 3: Ilkka Tuurala, Mikko Malaska, Mika Alanen, Mirja Salkinoja-Salonen ja Jimi Brander

Luku 4: Jaakko Hietikko, Petteri Huttunen, Teemu Jokela ja Antti Forss

Luku 5: Tuomo Joensuu, Arto Saari, Mikko Malaska, Mika Alanen ja Ilkka Valovirta

Luku 6: Eero Tuominen ja Ilkka Valovirta

Liite 1: Eero Tuominen, Juha Vinha ja Ilkka Valovirta

Liite 2: Mirja Salkinoja-Salonen ja Kirsi Vaali

Liite 3: Jaakko Hietikko

Hankkeen vastuullisena johtajana on toiminut professori Juha Vinha ja projektipäällikkönä Eero Tuominen Tampereen yliopistosta. Hiilijalanjälkitarkasteluista on vastannut professori Arto Saari ja väitöskirjatutkija Tuomo Joensuu Tampereen yliopistosta, palotekniikan tutkimusosuudesta professori Mikko Malaska ja väitöskirjatutkija Mika Alanen Tampereen yliopistosta ja mikrobiologian tutkimusosuudesta professori Arto Visala ja emeritaprofessori Mirja Salkinoja-Salonen Aalto-yliopistosta.

ECOSAFE 2 -hankkeen yhteydessä on tehty tutkimuksia lisäksi ostettuina palveluina muissakin organisaatioissa. Nämä tutkimukset, toteuttajatahot ja vastuuhenkilöt on lueteltu alla:

- Akustiset materiaaliominaisuudet, Turun ammattikorkeakoulu, Akustiikkalaboratorio, vastuuhenkilö Valtteri Hongisto
- Ulkoseinä- ja yläpohjarakenteiden akustinen toiminta, A-Insinöörit Suunnittelu Oy, vastuuhenkilö Jesse Lietzen
- Savetetun kutterinlastun palo-ominaisuudet, Eurofins Expert Services Oy, vastuuhenkilö Johanna Koskela
- Savien koostumuksen karakterisointi, Helsingin yliopisto, vastuuhenkilö Salla Venäläinen
- Materiaalien homehtumisherkkyytestit, Turun yliopisto, Aerobiologia, vastuuhenkilö Anna-Mari Pessi

Hankkeilla on ollut osaavat ohjausryhmät, jotka ovat antaneet palautetta ja osallistuneet keskusteluihin hankkeiden tuloksista. Ohjausryhmien jäseninä ovat olleet:

Juha Vinha, Tampereen yliopisto, Rakennusfysiikan tutkimusryhmä (puheenjohtaja)

Eero Tuominen, Tampereen yliopisto, Rakennusfysiikan tutkimusryhmä (sihteeri)

Petri Heino, ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto

Simon Le Roux, ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto
Minna Aarnio, Rakennusasiaintoimisto Aarre Oy
Olli Hautala, Ehta Talot Oy
Lauri Leppänen, Restart Oy
Tero Tirronen, Punkaharjun Puutaito Oy
Markku Rudanko, Woodplanet Oy
Timo Hokkanen, Puusto- ja kiinteistönhoito – Luonapuu
Timo Kallio, Tmi Timo Kallio
Teuvo Ranki, Tmi Arkkitehtitoimisto Teuvo Ranki
Jukka Silvennoinen, Punkaharjun Puutaito Oy

Hankkeiden yhteydessä on tehty kolme diplomityötä, joiden tekijöinä ovat olleet Antti Forss ja Ilkka Tuurala (Tampereen yliopisto) sekä Jimi Brander (Aalto-yliopisto).

Tutkija Tuomas Raunima ja tutkimusapulainen Iida Kangashaka sekä laboratoriotyöntekijät Mikko Viitala, Toni Järvinen ja Tomi Vuori Tampereen yliopistosta ovat lisäksi avustaneet tärkeällä työpanoksella hankkeiden toteutusta.

ECOSAFE-hankkeen ovat rahoittaneet ympäristöministeriö sekä Tampereen yliopisto omarahoitusosuudella. ECOSAFE 2 -hankkeen ovat rahoittaneet ympäristöministeriö, Tampereen yliopisto, Aalto-yliopisto, Restart Oy, EHTA Talot Oy, Punkaharjun Puutaito Oy sekä Rakennusasiaintoimisto Aarre Oy.

ECOSAFE- ja ECOSAFE 2 -hankkeiden tutkijat haluavat kiittää kaikkia hankkeiden osapuolia mielenkiintoisten ja ajankohtaisten hankkeiden toteutuksesta.

ECOSAFE- ja ECOSAFE 2 -hankkeiden lupaavien tulosten vuoksi tutkimuksia tullaan jatkamaan ECOSAFE 3 -hankkeessa

Tampereella 15.12.2023

Tekijät

Sisällysluettelo

1	Johdanto	7
2	Tutkitut materiaalit	7
3	Materiaalikokeet	8
3.1	Koejärjestelyt ja -menetelmät	8
3.1.1	Yhteenveto rakennusfysikaalisista materiaaliominaisuuksista	8
3.1.2	Ilmanläpäisevyys	8
3.2	Lämmönjohtavuus	8
3.2.1	Hygroskooppinen tasapainokosteus	9
3.2.2	Vesihöyrynläpäisevyys	10
3.2.3	Vedenimeytymiskerroin	11
3.3	Savetetun kutterinlastun palonkestoluokka	11
3.3.1	Kartiokalorimetrikoe	11
3.3.2	SBI-koe	11
3.4	Savirapatun puulevyn ilmaääneneristysluku ja savetetun kutterinlastun absorptiokerroin	12
3.4.1	Savirapatun puulevyn ilmaääneneristysluku	12
3.4.2	Savetetun kutterinlastun absorptiokerroin	12
3.5	Mikrobiologiset ja kemialliset ominaisuudet	12
3.5.1	Homehtumisherkkyysluokka	12
3.5.2	Savilaatujen kemiallinen koostumus ja hiukkaskoostumus	13
3.5.3	Savinäytteiden ja savetetun kutterinlastun biologinen ja kemiallinen käyttäytyminen ja sen tutkiminen kammiomittauksilla	14
3.5.4	Kammiomittausten tulokset	15
3.5.5	Johtopäätökset	15
4	Rakennusfysikaaliset rakennetutkimukset	16
4.1	Kutterinlastulla eristettyjen rakenneosien laskennalliset mallinnukset	16
4.1.1	Rakenteiden kuvaus	16
4.1.2	Mallinnuksen toteutus	18
4.1.3	Tulokset	18
4.2	Ulkoseinärakenteiden kenttäkokeet	19
4.2.1	Rakenteiden kuvaus	19
4.2.2	Koejärjestelyt	21
4.2.3	Yhteenveto tuloksista	21
4.3	Ulkoseinärakenteiden koetulosten laskennalliset vertailut	23
4.3.1	Mallinnuksen lähtötilanne	23
4.3.2	Yhteenveto tuloksista	24
4.4	Yläpohjien U-arvokokeet	24
4.4.1	Mittausten lähtötilanne sekä käytetty koelaitteisto	24
4.4.2	Yhteenveto tuloksista	25
5	Muut rakennetutkimukset	26
5.1	Hiilijalanjälkilaskelmat	26
5.1.1	Tarkastellut rakenteet sekä laskentaperusteet	26
5.1.2	Yhteenveto tuloksista	27
5.2	Palonkestävyys	28
5.2.1	Tutkitut rakenteet	28
5.2.2	Yhteenveto koetuloksista	29
5.3	Rakenteiden ääneneristys	30
6	Suositusrakenteet	30
6.1	Yleistä	30
6.2	Ulkoseinät	31

6.3	Alapohja	32
6.4	Yläpohja	32
6.5	Ei-kantavat väliseinät	33
6.6	Rakennustarvikkeiden vaihto ja määrittely	33
7	Liitteet.....	33
8	Lähteet.....	34

1 Johdanto

Tässä loppuraportissa esitetään ECOSAFE ja ECOSAFE 2-hankkeissa tutkitut materiaalit ja rakenteet, tutkimusmenetelmät sekä keskeiset tulokset. Erityisesti tulokset on käsitelty raportin tekstiosassa lyhyesti laajemman aineiston löytyessä liitteistä ja lähteistä. Kaikki lähteet ovat vapaasti ladattavissa sähköisessä muodossa, ellei toisin ole mainittu.

Loppuraportin tarkoituksena on tarjota materiaaliarvoja, suunnitteluratkaisuja sekä rakenteiden suunnittelussa ja toteutuksessa tarvittavaa taustatietoa käytäntöön. Raportti on suunnattu yhtä lailla arkkitehti- ja rakennesuunnittelijoiden, urakoitsijoiden kuin rakennustuotealankin käyttöön.

Saven ja savetettujen materiaalien ominaisuuksista on entuudestaan olemassa varsin vähän tutkimustietoa, ottaen huomioon saven laajamittaisen käytön rakennusmateriaalina ympäri maailmaa. ECOSAFE-tutkimusten tarkoituksena on ollut tuottaa perustietoa niin materiaalien kuin kokonaisten rakenteiden käyttäytymisestä.

2 Tutkitut materiaalit

Materiaaliominaisuuksien tutkimukset käsittivät neljän kutterinlastutuotteen rakennusfysikaalisten ominaisuuksien mittaamisen. Tuotteista Ehta on kuudesta valmistettu kutterinlastu, josta on erotettu hienoaines. Ehta-tuote oli käytössä -hankkeen yläpohjarakenteiden kokeissa, joten materiaalikokeet tehtiin vastaavilla tiheyksillä. Ehta-eristettä käytettiin myös savetetun kutterinlastun valmistamiseen ECOSAFE2 -hankkeessa. Toinen kutterinlastuerä oli nimetöntä ”puusepän lastua”. Se edustaa tutkimuksessa satunnaista purua, jota voi olettaa saatavan milältä tahansa höyläämöltä. Seinärakennetiheyksissä kokeet tehtiin Pölkky-kutterinlastulla ja tästä jatkojalostetulla savetetulla Pölkky-kutterinlastulla. Tutkitut materiaalit on kuvattu tarkemmin Ilkka Tuuralan diplomityössä [1] sekä materiaalikorteissa [2].



Kuva 2.1 Tutkitut materiaalit. Vasemmalta Pölkky, Pölkky-savetettu, Ehta ja nimetön.

3 Materiaalikoheet

3.1 Koejärjestelyt ja -menetelmät

Kutterinlastumateriaalien rakennusfysikaalisista materiaaliominaisuuksista mitattiin ilmanläpäisevyys, tasapainokosteuskäyrät hygroskooppisella alueella adsorptiossa ja desorptiossa, lämmönjohtavuus eri tasapainokosteuksissa, vesihöyrynläpäisevyys sekä veden imeytymiskerroin. Lisäksi mitattiin savetetun kutterinlastun palonkestoluokka, äänen absorptiokerroin, savirapatun puulevyn ilmaääneneristysluku sekä savetetun kutterinlastun homehtumisherkkyysluokka.

3.1.1 Yhteenveto rakennusfysikaalisista materiaaliominaisuuksista

Materiaaliominaisuuksien mittaamenetelmät ja mittaustulokset on esitetty yksityiskohtaisesti Ilkka Tuuralan diplomityössä [1]. Eri tuotteiden välillä havaittiin eroja, jotka kuitenkin määräytyivät lähes kaikissa tapauksissa tuotteiden tiheyden perusteella.

Yhteenveto mitatuista materiaaliominaisuuksista on esitetty taulukossa 3.2.1, kuvassa 3.2.1 sekä lähteessä [2].

3.1.2 Ilmanläpäisevyys

Mittausten perusteella tutkittujen kutterinlastutuotteiden ilmanläpäisevyys määräytyi suoraan kunkin tuotteen tiheyden perusteella. Tulokset olivat yhtäpitäviä aiempien vastaavien tutkimusten kanssa [2].

3.2 Lämmönjohtavuus

Materiaalien lämmönjohtavuutta mitattiin eri kosteuspitoisuuksissa. 13 % suhteelliseen kosteuteen tasapainotettujen näytteiden lämmönjohtavuudet vaihtelivat välillä 0,048...0,055 W/mK lämmönjohtavuuden kasvaessa johdonmukaisesti tiheyden funktiona. 50 % suhteelliseen kosteuteen tasapainotettujen näytteiden lämmönjohtavuudet vaihtelivat välillä 0,053...0,060 W/mK. Hygroskooppisten materiaalien tuoteominaisuudet mitataan yleensä kuivana, joten ensin mainitut arvot soveltuvat paremmin eri tuotteiden väliseen vertailuun. Saven lisääminen ei vaikuttanut tässä tutkimuksessa kutterinlastun lämmönjohtavuuteen.

Mitatut lämmönjohtavuuden arvot poikkesivat ulkovaipparakenteissa yleisesti käytetyistä mineraalivilla-, puukuitu- ja muovipohjaisista eristeistä, joiden laboratoriossa mitatut lämmönjohtavuudet ovat tyypillisesti luokkaa 0,03...0,04 W/mK. Umpisoluisilla muovimateriaaleilla, joiden solut on täytetty muilla kaasuilla kuin ilmalla, saavutetaan tätäkin alhaisempia lämmönjohtavuuksia. Tutkituilla tuotteilla voidaan toteuttaa lämpöä hyvin eristäviä

ulkovaipparakenteita, mutta U-arvojen saattaminen samalle tasolle esimerkiksi mineraalivillaeristeellä eristettyjen rakenteiden kanssa edellyttää rakennepaksuuksien kasvattamista.

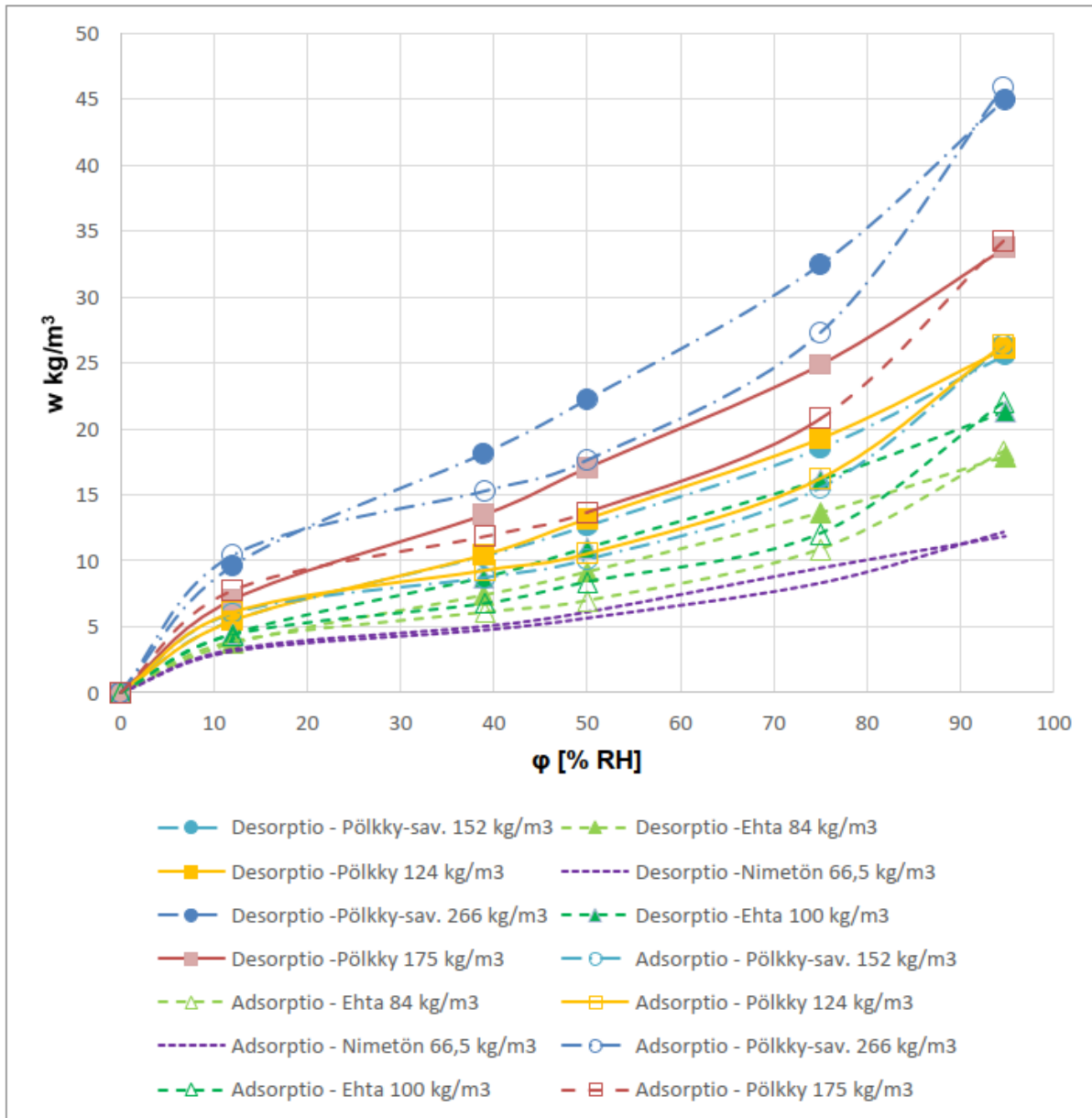
Taulukko 3.2.1 Tutkitut materiaalit. Vasemmalta Pölkky, Pölkky-savetettu, Ehta ja nimetön.

Materiaali	yksikkö	olo- suhde [%RH]	Pölkky 180 kg/m ³ *)160 kg/m ³	Ehta, 100 kg/m ³	Pölkky- sav. 266 kg/m ³	Nimetön, 66,5 kg/m ³
Lämmönjohtavuus	λ [W/(mK)]	11	0,052	0,052	0,055	
	λ [W/(mK)]	50	0,058	0,055	0,059	0,054
	λ [W/(mK)]	93	0,065	0,063	0,065	
Ilmanläpäisevyys	k_a [*10 ⁻⁴ m ³ /(msPa)]	50	0,64	4,87	0,62	1,74
Vesihöyrynlä- päisykerroin	W_v [m/s]	11–50	1,36E-04	1,90E-04	1,01E-04	2,39E-04
	W_v [m/s]	50–93	7,04E-04	8,15E-04	7,27E-04	2,64E-04
Vesihöyrynlä- päisevyys	δ_v [m ² /s]	11–50	12,9E-6	18,1E-6	9,6E-6	22,7E-6
	δ_v [m ² /s]	50–93	2,36E-05	2,73E-05	2,43E-05	2,50E-05
Vesihöyrynvastus	Z_v [s/m]	11–50	7,40E+03	5,26E+03	9,89E+03	4,20E+03
	Z_v [s/m]	50–93	1,49E+03	1,28E+03	1,45E+03	3,80E+03
Diffuusionvastus- kerroin	μ	11–50	2,07	1,48	2,79	1,18
	μ	50–93	1,19	1,02	1,16	1,07
Veden imeytymiskerroin	A_w [kg/(m ² s ²)]	50	0,6272	0,2305	1,0929	0,3857
Veden imeytymiskerroin	$A_{w,24}$ [kg/(m ² s ²)]	50	0,144	0,091	0,144	0,07
Kapillaarinen kyllästyskosteus	w_{cap} [kg/m ³]	50	478	329	489	234
*) Pölkky kutterinlastulle hyg. tasapainokosteuspitoisuus, vesihöyrynläpäisevyys ja vedenimukoe määritettiin tiheydessä 160 kg/m ³						

3.2.1 Hygroskooppinen tasapainokosteus

Hygroskooppinen tasapainokosteus määritettiin sekä adsorptio- että desorptiotilanteessa eli siirrettäessä materiaali aina edellistä kosteampiin tai edellistä kuivempiin olosuhteisiin. Hygroskooppisten materiaalien tasapainokosteus on jälkimmäisessä tilanteessa korkeampi verrattaessa tietyssä suhteellisessa kosteudessa tasapainotettua kappaletta.

Tuloksista havaitaan savetuksen lisäävän tuotteiden kosteudensitomiskykyä hygroskooppisella alueella.



Kuva 3.2.1 Tutkitut materiaalit. Vasemmalta Pölkky, Pölkky-savetettu, Ehta ja nimetön.

3.2.2 Vesihöyrynläpäisevyys

Vesihöyrynläpäisevyyskokeiden tulokset voidaan ilmoittaa usealla tavalla. Tässä raportissa on ilmoitettu vesihöyrynläpäisykerroin W_v (m/s), vesihöyrynläpäisevyytenä δ_v (m^2/s), vesihöyrynvastuksena Z_v (s/m) sekä diffuusiovastuskertoimena μ . Yksiköiden välisiä muunnoskaavoja löytyy esimerkiksi käsikirjasta RIL 255-1-2014 [3].

Kaikki tuotteet läpäisevät vesihöyryä erittäin hyvin, mitä havainnollistavat taulukon 3.2.1 diffuusiovastuskertoimet eli μ -arvot. Arvo ilmoittaa paikallaan olevan ilman ja tutkittavan materiaalin vesihöyrynläpäisevyyksien suhteen. Näin ollen sen minimiarvo on 1 ja tutkittaville materiaaleille saadut arvot (vaihteluväli 1,02...2,79) tarkoittavat erittäin suurta vesihöyrynläpäisevyyttä.

3.2.3 Vedenimeytymiskerroin

Kutterinlastu ja savi ovat tunnetusti kapillaarisia materiaaleja, ja tutkimuksissa havaittiin kosteusrintaman nopea nousu näytteissä. Kosteus levisi ensin materiaalien soluväleihin ja -seinämiin, jonka jälkeen solujen sisäosat alkoivat kyllästyä vedellä. Savetettujen lastujen tapauksessa kosteus levisi erityisen nopeasti näytteen yläpintaan lastujen pintoja pitkin.

Puhtailla kutterinlastuilla veden imeytymisen kappaleisiin määrittää yksinomaan näytteen tiheys, ja myös savetetuilla lastuilla tiheyden rooli on ratkaiseva.

3.3 Savetetun kutterinlastun palonkestoluokka

3.3.1 Kartiokalorimetrikoe

Rakennusmateriaalien paloluokitus perustuu standardiin EN 13501-1:2019 ja luokituksessa käytetyt materiaalien palo-ominaisuudet määritetään yleensä standardin EN 13823:2010 mukaisella yksittäisen palavan esineen SBI-kokeella. Menetelmässä mitataan materiaalin palonlevittämisoimaisuuksia ja savunmuodostusta. Mittaustuloksista lasketaan lämmönvapautumista (FIGRA) ja savunmuodostusta (SMOGRA) kuvaavat tunnusluvut. Rakennusmateriaalin FIGRA-arvoa ja paloluokkaa voidaan ennustaa tuotekehitystarkoituksessa kartiokalorimetrikokeiden avulla.

Tutkimuksessa selvitettiin ensin kartiokalorimetrikokeiden avulla kutterinlastun, kutterinlastuun lisätyn purun (hienoaineksen), savetetussa kutterinlastussa olevan saven määrän sekä kutterinlastun tiheyden vaikutusta tuotteen syttymisherkyyteen. Näiden tulosten perusteella valittiin paras koostumus SBI-kokeisiin sekä edelleen kohdassa 5.2 raportoidun osastoivan seinärakenteen polttokokeeseen. Kokeiden suoritus ja tulokset on esitetty lähteessä [3].

3.3.2 SBI-koe

SBI-kokeessa testattu näytemateriaali valittiin ja valmistettiin kartiokalorimetrikokeiden tuloksen perusteella. Koe tehtiin eri savetetun kutterinlastun tiheyksillä välillä 100...175 kg/m³. Standardin EN 13501-1:2019 mukaiseksi paloluokaksi saatiin D-s2, d0. Kokeen suoritus ja yksityiskohtaiset tulokset on esitetty Eurofins Expert Services Oy:n raporteissa EUFI29-21005584-T1 ... T3 [4] [5] [6].

3.4 Savirapatun puulevyn ilmaääneneristysluku ja savetetun kutterinlastun absorptiokerroin

3.4.1 Savirapatun puulevyn ilmaääneneristysluku

Savirapattujen lauta- ja vanerialustojen ilmaääneneristysluvut mitattiin laboratoriossa. Savirapatun vinolaudoitetun levyn ilmaääneneristysluvuksi R_w mitattiin 33 dB ja savirapatun vanerilevyn 41 dB. Ensin mainittu mittaustulos vastaa likimäärin kahta päällekkäin asennettua kipsilevykerrosta, mikä on tyypillinen ratkaisu esimerkiksi keveissä, kaksirunkoisissa huoneistojen välisissä seinissä. Savirappauksen paksuus oli molemmissa mittauksissa 30 mm. Pelkille alustoille mitatut ilmaääneneristysluvut R_w ilman savirappausta olivat vastaavassa järjestyksessä 21 dB ja 23 dB, jotka ovat kipsilevyihin verrattuna selkeästi pienempiä arvoja.

Mittaustulokset on esitetty Turun ammattikorkeakoulun raportissa [7].

3.4.2 Savetetun kutterinlastun absorptiokerroin

Savetetun kutterinlastun absorptiokerroin mitattiin laboratoriossa 100 mm vahvuiselle kutterinlastueristeelle. Materiaalinäytteen pinta oli avoin mittaushuoneeseen päin. Tämä vastaa tilannetta esimerkiksi tyypillisessä vaakasuuralla lämmöneristekerroksella varustetussa yläpohjassa, missä eristeen yläpinta on avoin tuuletustilaan päin. Absorptiokertoimen mittaustulos 1,0 on absorptiokertoimen teoreettinen yläraja ja soveltuu käytettäväksi myös paksummille kuin 100 mm kutterinlastukerroksille. Ohuempien kerrosten absorptiokerroin tulee määrittää erikseen.

Mittaustulokset on esitetty Turun ammattikorkeakoulun raportissa [8].

3.5 Mikrobiologiset ja kemialliset ominaisuudet

3.5.1 Homehtumisherkkyyssluokka

Homehtumisherkkyyssluokka mitattiin altistamalla materiaalinäytteet homehduttaville olosuhteille ja seuraamalla homeenkasvun kehitystä. Tutkitut materiaalit olivat puhdas kuusikutteri, savetettu kuusikutteri sekä verrokkimateriaaleina kivivillatuulensuojalevy Paroc Cortex ja puukuitutuulensuojalevy Hunton. Koekappaleet preparoitiin suihkuttamalla niiden päälle homesuspensiota, jossa oli puulle ja tuulensuojamateriaaleille tyypillisiä homelajeja. Olosuhteina käytettiin 95 % suhteellista kosteutta sekä +10 °C ja +25 °C lämpötiloja. Homehtumisherkkyyssluokan määrittely todetun homeenkasvun perusteella on esitetty suomalaisessa homemallissa [9] [10] [11].

Tutkittujen materiaalien homehtumisherkkyyssluokkaa ei tässä tutkimuksessa onnistuttu määrittelemään. Kokeiden perusteella savetus kuitenkin vaikuttaa kutterinlastun homehtumisherkkyyteen. Tutkimuslause on esitetty lähteessä [12].

3.5.2 Savilaatujen kemiallinen koostumus ja hiukkaskoostumus

ECOSAFE-hankkeissa etsittiin toimivia mittareita mikrobitoiminnaltaan hyvien savilaatujen valintaan. Määrittysten pohjana oli savilaatujen ja kutterinlastun fysikaalisten ja kemiallisten ominaisuuksien määrittäminen. Mitattuja suureita olivat alkuainekoostumus, pH-arvo, sähkönjohtavuus, ominaispinta-ala ja kationinvaihtokapasiteetti (KVK), joka kuvaa savien negatiivista sähköistä nettovarausta. Alkuainekoostumusta mitattaessa selvitettiin kaliumin (K), natriumin (Na), kalsiumin (Ca), magnesiumin (Mg), rikin (S), fosforin (P), boorin (B), raudan (Fe), alumiinin (Al), mangaanin (Mn) ja sinkin (Zn) pitoisuudet. Kattava selostus savilaatujen kemiallisesta koostumuksesta ja hiukkaskoostumuksesta on esitetty lähteissä [13] ja [14].

Taulukko 3.5.1 Tutkittujen näytteiden alkuainepitoisuudet (mg/kg) ja kalium/natrium (K/Na) sekä hiili/typpi (C/N) -suhteet.

Näyte	K	Na	k/Na	Ca	Mg	S	P	B	Fe	Al	Mn	Zn
Puu 201	590	121	4,9	466	187	89	61	8	4	7	97	27
Puu 202	2055	176	11,7	1711	3662	105	226	63	13790	9675	227	53
Puu 205	395	28	13,9	701	152	93	21	7	3	0	11	17
Savi 101	6798	541	12,6	5032	12050	179	565	164	50956	34311	545	127
Savi 102	9005	646	13,9	5122	13956	131	627	159	48157	34964	514	120
Savi 103	6768	929	7,3	3076	9744	550	627	123	35063	24878	352	98
Savi 104	11057	1183	9,3	6440	14797	675	635	189	55173	42907	445	133

Taulukon 3.5.1. tuloksissa Puu202 ("savetettu") sisälsi enemmän rautaa ja alumiinia kuin muut puulaadut, Rautaa (Fe) alumiinia (Al) ja magnesiumia (Mg) ei voi olla peräisin näin korkeina pitoisuuksina puun biomassasta. Puu202 sisälsi savea, mikä selittäisi osan tuloksia. Verrokki 301, kuituhamppu, taas sisältää erinomaiset pitoisuudet ravinneaineita, kuten korkean K/Na suhteen, paljon fosforia (P), rautaa (Fe), kalsiumia (Ca) ja typpeä (N), joilla kaikilla on iso vaikutus mikrobiologiaan. Suomalainen ominaisuuksiltaan verrokkihampun kaltainen tuote voisi olla järviruoko.

Taulukko 3.5.2. Tutkittujen näytteiden fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia

Näyte	pH	Sähkönjohtokyky EC [mS/cm]	KVK [cmol(+)/kg]	Ominaispinta-ala [m ² /kg]
Puu 205	4			
Savi 101	7,1	0,07	27,2	86
Savi 102	7,5	0,06	20,7	59
Savi 103	6,6	1,50	10,5	34
Savi 104	7,6	0,87	26,9	78

3.5.3 Savinäytteiden ja savetetun kutterinlastun biologinen ja kemiallinen käyttäytyminen ja sen tutkiminen kammiomittauksilla

ECOSAFE-hankkeen yksi tavoite oli tutkia materiaalien haitallisten päästöjen minimoimista savetuksen avulla. Kosteassa materiaalissa tapahtuva mikrobitoiminta saattaa tuottaa ihmisille haitallisia aineenvaihduntatuotteita. Näitä ovat rikkiä sisältävät kaasut sekä osa haihtuvista orgaanisista yhdisteistä (total volatile organic compounds, tVOC) sekä VOC-yhdisteistä suurimolekyylisemmistä orgaanisista yhdisteistä (particular organic matters, POM). Ihmisiä sairastuttaville homeille ja hiivoille yleinen piirre on niiden aox-geeni (alternatiivinen oksidaasi, geeni, joka vaikuttaa mitokondrioiden soluhengitykseen). Tämän seurauksena on mekanistisesti erilainen soluhengitys. Aox-homeet ovat ”kaksineuvoisia” eli niillä on kahdenlaiset mitokondriot, joista toinen toimii myös biosidien läsnä ollessa. Siksi tällaiset homeet ovat immuuneja monille homeenestokemikaaleille kuten kationisille tensideille. Näin ollen biosidien käyttö antaa aox-homeille kilpailuedun [15]. Aox-homeet saavat kilpailuetua myös vaarattomampaan lajistoon verrattuna, kuivista ja kylmistä olosuhteista, koska ne tuottavat itse sekä lämpöä että vettä.

Puusta haihtuu terpeenisiä yhdisteitä, esim. pihkat ja muut luonnon puiden eritteet. Nämä näkyvät tVOC -mittauksissa.

Eri savilaatujen ja puulajien biologisessa ja kemiallisessa käyttäytymisessä oletettiin olevan eroja. Savetuksen vaikutusta puumateriaalissa tapahtuvaan mikrobitoimintaan tutkittiin mittaamalla tVOC-yhdisteiden ja hiilidioksidin (CO₂) päästöjä kammiomittauksella (liite 2). Lisäksi mitattiin kammioden lämpötilaa, suhteellista kosteutta sekä happipitoisuutta, joilla on huomattava vaikutus erityisesti homeenkasvun intensiteettiin. Mittauksia tehtiin sekä pelkille puunäytteille että puu- ja savinäytteiden yhdistelmille, käytännössä savetetulle kutterinlastulle. Puunäytteitä ei kontaminoitu ennen mittauksia. Mittaustekniikka on esitelty Sisäilmastoseminaarissa 2019 [16]

Lisätty puu- ja savimateriaali asetettiin aina kammion pohjalle ja anturit sijaitsivat kammion yläosassa, 15 cm etäisyydellä kammion pohjasta. Koska vetokaappiin sijoitetussa suljetussa kammiossa ei esiinny konvektiota, tVOC-pitoisuuden nousu osoittaa kostean ilman kuljettavan tVOC- ja POM-yhdisteitä kammion korkeuden verran ylös diffuusiolla. POM-yhdisteet eivät kaasuunnu, mutta isotkin molekyylit (362–1500 g/mol) liikkuvat ilmassa olevan vesihöyryn mukana [16]. Tuloksia raportoitaessa on käytetty termiä "tVOC" kuvaamaan kaikkia tVOC-anturilla havaittuja yhdisteitä, mukaan lukien POM-yhdisteet.

3.5.4 Kammiomittausten tulokset

Mittaustulokset on esitetty yksityiskohtaisesti liitteessä 2.

Tutkituissa savituotteissa ei havaittu selkeitä eroja. Tosin mikäli materiaalien ympäristö oli hapan ($\text{pH} < 7$), varsinkin karbonaattipitoisista savista purkautui CO_2 :a, joka ei liity mikrobitoimintaan. Veden lisäys kammioon tuotti vesihöyryn aerosolisoimia orgaanisia yhdisteitä (tVOC ja POM), joita kiinnittyi lasikammion seinämille. Tällöin savi, joka oli lasikammion pohjalla, ei käsitellyt orgaanisia yhdisteitä. Osa CO_2 -päästöstä saattoi olla peräisin karbonaatteja sisältävistä savista (104 ja 106).

Kaikissa näytteissä oli nähtävissä savilisäyksen jälkeen CO_2 :n tuoton nousu ja tVOC:n lasku 14–140 h saven lisäämisestä, lukuun ottamatta Siperian lehtikuusta. Käytetyn saven määrän suhde puun määrään vaikutti luonnollisesti tuloksiin. Siperian lehtikuusen mittauksen avaamattomassa kammiossa tVOC päästö nousi korkealle, mutta CO_2 :n mikrobiperäinen tuotto käynnistyi vasta yli 200 h kuluttua. Puulaaduissa oli muutenkin eroja havupuiden tuottaessa enemmän tVOC:a kuin haapa. Eniten tVOC:a erittyi lastunäytteistä, joissa pinta-ala/paino suhde oli korkea. Pihkaperäisestä tVOC:sta ei ole raportoitu terveyshaittaa, joten tältä osin on keskitytty erottamaan pihkaperäiset ja mikrobitoiminnan aiheuttamat tVOC-päästöt toisistaan.

Mikäli näytteestä todettiin päästöä tVOC-anturin mittauksella, tutkimusta jatkettiin lisäämällä mittauskammioon rikkivetyä (H_2S) tai syanidia (CN). tVOC:n tuotto sammui tai väheni oleellisesti kaikissa näytteissä, joihin lisättiin jompaakumpaa em. yhdistettä. Tämä osoittaa, ettei tVOC-päästöjen tuottaja ollut missään näytteessä aox-tyypin home.

3.5.5 Johtopäätökset

Tutkimuksessa havaittiin saven lisäämisen kosteaan puunäytteeseen vaimentavan materiaalin tVOC-päästöjä, mistä selkeänä esimerkkinä on esimerkiksi puunäytteeseen 201 lisätty savi 103 (liite 2). Tutkimuksen perusteella jäi kuitenkin avoimeksi, millaiset savilaadut vaimentaisivat ihmiselle haitallisten mikrobien toimintaa tehokkaimmin.

Jatkotutkimuksissa on syytä tutkia, miten savi vaikuttaa muissa rakennusmateriaaleissa kuin tässä tutkimuksessa käytetyissä puhtaissa puunäytteissä muodostuviin tVOC -päästöihin.

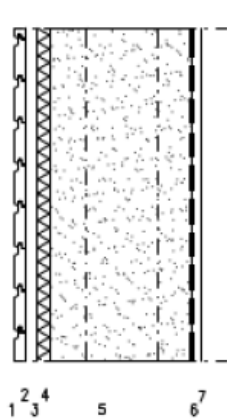
Käytettyjen puunäytteiden varastointiaika (2 v.) avoimessa paperipussissa vaikutti osaltaan havupuiden tVOC:n haihtumiseen.

4 Rakennusfysikaaliset rakennetutkimukset

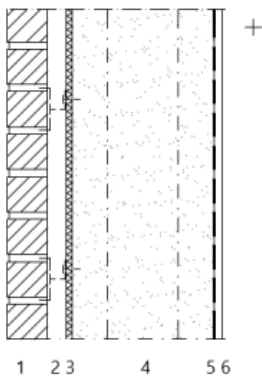
4.1 Kutterinlastulla eristettyjen rakenneosien laskennalliset mallinnukset

4.1.1 Rakenteiden kuvaus

Mallinnuksella tutkittiin kutterinlastueristeisten ulkoseinien sekä ala- ja yläpohjien rakennusfysikaalista toimintaa. Tutkitut rakenteet on esitetty oheisessa kuvissa 4.1.1 - 4.1.3. Rakenteet ja mallinnus tuloksineen on kuvattu yksityiskohtaisesti Antti Forssin diplomityössä [17].

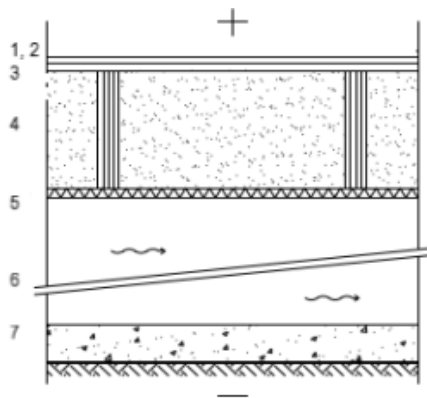


1. Pintakäsittely
2. Ulkoverhouslauta 23 mm
3. Tuuletusväli 32 mm
4. Tuulensuojalevy: puukuitulevy 12 / 25 / 50 / 75 mm tai mineraalivillatuulensuoja 25 / 50 mm
5. Kantava rakenne, levyuumatolpat k600, sekä lämmöneriste 300 mm: Kutterinlastu / sahanpurun ja kutterinlastun seos / mineraalivilla / selluvilla
6. Ilman-/höyrinsulkukerros: XReno -ilmansulkupaperi, X5 -ilmansulkupaperi, hygrokalvo tai höyrinsulkumuovi
7. Vaneri 18 mm / ei sisälevytystä



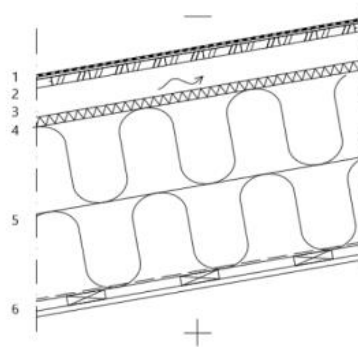
1. Tiiliverhous 85 mm
2. Tuuletusväli 32 mm
3. Tuulensuojalevy: puukuitulevy 12 / 25 / 50 / 100 mm tai min.villatuulensuoja 25 / 50 / 100 mm
4. Kantava rakenne, levyuumatolpat k600, sekä lämmöneriste 300 mm: Kutterinlastu / sahanpurun ja kutterinlastun seos / mineraalivilla / selluvilla
5. Ilman-/höyrinsulkukerros: XReno -ilmansulkupaperi, X5 -ilmansulkupaperi, hygrokalvo tai höyrinsulkumuovi
6. Vaneri 18 mm / ei sisälevytystä

Kuva 4.1.1 Mallinnuksella tutkitut ulkoseinärakenteet

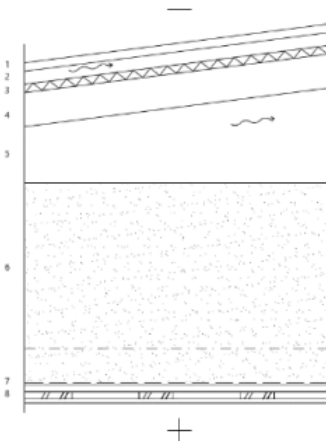


1. Lattialauta 25 mm
2. Vaneri 21 mm
3. Ilman-/höyrynsulkukerros: XReno -ilmansulkupaperi, X5 -ilmansulkupaperi, hygrokalvo tai höyrynsulkumuovi
4. Lämmöneriste 300 / 400 mm: kutterinlastu, kutterinlastun ja sahanpurun seos, mineraalivilla tai puukuitueriste
5. Tuulensuojalevy 25 / 50 mm: puukuitulevy tai mineraalivillatuulensuoja
6. Ryömintätila 800 mm
7. Kapillaarisen veden nousun estävä kerros

Kuva 4.1.2 Mallinnuksella tutkittu alapohjarakenne



1. Bitumikermikate
2. Aluslaudoitus 32 mm
3. Ilmaväli 100 mm
4. Tuulensuojalevy: puukuitulevy 12 / 25 / 50 mm tai mineraalivillatuulensuoja 25 mm
5. Kantava rakenne, kertopuu k900, sekä lämmöneriste: Kutterinlastu tai sahanpurun ja kutterinlastun seos 600 mm / mineraalivilla tai selluvilla 400 mm
6. Ilman-/höyrynsulkukerros: XReno -ilmansulkupaperi, X5 -ilmansulkupaperi, hygrokalvo tai höyrynsulkumuovi



1. Peltikate
2. Ilmaväli 50 mm
3. Lämmöneriste: puukuitulevy 12 / 25 / 50 mm tai mineraalivillatuulensuoja 25 mm
4. Kattoristikon yläpaarre
5. Ilmaväli 1000 mm
6. Kantava rakenne, kertopuu k900, sekä lämmöneriste: Kutterinlastu tai sahanpurun ja kutterinlastun seos 600 mm / mineraalivilla tai selluvilla 400 mm
7. Ilman-/höyrynsulkukerros: XReno -ilmansulkupaperi, X5 -ilmansulkupaperi, hygrokalvo tai höyrynsulkumuovi
8. Vaneri

Kuva 4.1.3 Mallinnuksella tutkitut yläpohjarakenteet

Tuulensuojan, lämmöneristekerroksen sekä höyryn-/ilmansulkukerroksen materiaaleja varioitiin, jolloin voitiin verrata rakenteiden toimintaedellytyksiä nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa.

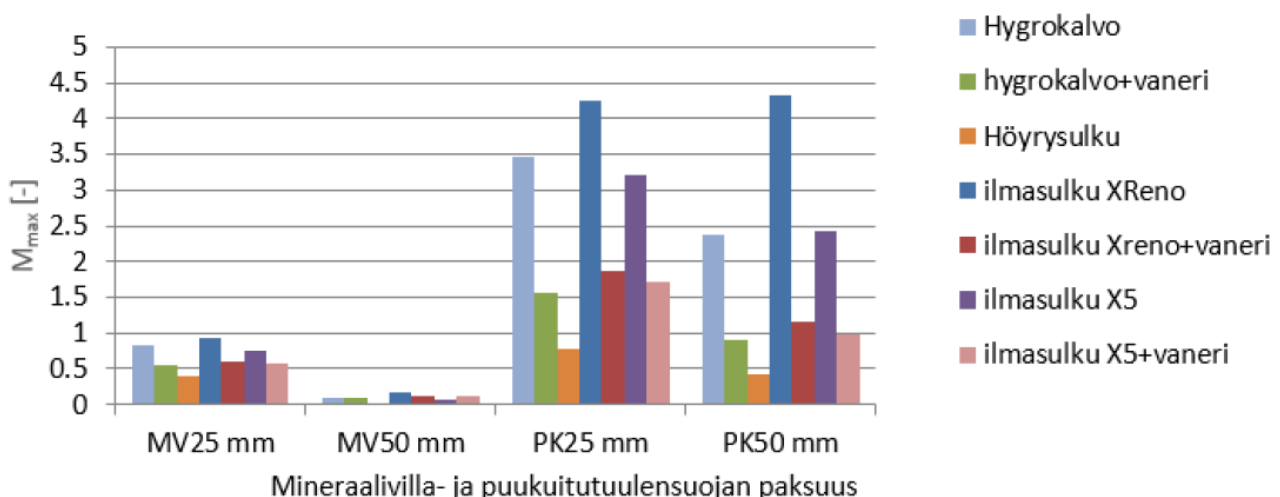
4.1.2 Mallinnuksen toteutus

Rakenteiden toimintaa mallinnettiin nykyisissä ja vuoden 2100 ilmasto-olosuhteissa Delphin 5.9.6 -ohjelmalla. Mallinnuksessa otettiin huomioon sekä rakenteen toimivuuteen vaikuttavat fysikaaliset ilmiöt että säätilan vaihtelu vuorokauden- ja vuodenaikojen mukaan.

Laskennassa hyödynnettiin rakennusfysikaalisia mitoitusvuosia sekä niiden perusteella mallinnettuja tulevaisuuden olosuhteita. Laskenta suoritettiin Jokioisten ilmastossa, paitsi tiilirakenteille Vantaan ilmastossa. Jälkimmäinen on todettu viistosateen kannalta kriittiseksi.

4.1.3 Tulokset

Ulkoseinärakenteiden sisäpuolen vesihöyrynvastus todettiin erityisen tärkeäksi tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa, jotka tulevat olemaan ulkovaipparakenteille nykyistä haastavammat. Luonnollisesti myös tuulensuojalevyn merkitys oli huomattava. Vuoden 2100 ilmastossa puukuitulevyn käyttö tuulensuojana edellyttää ulkoseinärakenteen sisäpinnalta suurempaa vesihöyrynvastusta kuin mallinnukseen valituilla ilmansulkupapereilla sekä hygrokalvolla on. Tämä rajaa käytännössä vesihöyryä hyvin läpäisevät ratkaisut pois, varsinkin mikäli seinän sisälevytyksen vesihöyrynvastus on pieni tai se jätetään varmuusvaraksi. Tuulensuojamineraalivillan käyttö mahdollistaa vesihöyryä hyvin läpäisevän seinärakenteen sisäpinnan käytön.



Kuva 4.1.4 Homeindeksin maksimiarvoja M_{max} erilaisilla puuverhoillun ulkoseinän ilmansulku-tuulensuojakombinaatioilla. PK = puukuitulevy, MV = mineraalivilla. Lämmöneristeenä on käytetty kutterinlastua, jonka lämmönjohtavuus on 0,042 W/mK.

Yläpohjan toimintaan vaikuttivat olennaisesti aluskatekerroksen materiaali sekä ilmanvaihtuvuus yläpohjan tuuletustilassa. Tutkimuksen perusteella optimaaliset olosuhteet saavutettiin alhaisilla yläpohjien ilmanvaihtuvuuksilla. Mallinnuksen mukaisessa optimitilanteessa tuuletustilan ilma vaihtui noin 0,5...1 kertaa tunnissa. Tämä on alle kymmenesosa nykyisillä yläpohjien tuuletusratkaisuilla

tavoitellusta ilmanvaihtuvuudesta. Tehokkaalla yläpohjan tuuletuksella on pyritty rakennekosteuden, sisäilmasta yläpohjaan pääsevän kosteuden sekä pienten vesivuotojen kuivattamiseen, kuten myös estämään katolle satavan lumen sulaminen ja tästä aiheutuva jään muodostuminen katolle sekä jääpuikkojen kertyminen räystäälle. Tehokkaan tuuletuksen mukana yläpohjan tuuletustilaan pääsee kuitenkin erityisesti kirkkaina öinä kylmää ulkoilmaa, jonka suhteellinen kosteus on erittäin korkea. Tämä aiheuttaa suhteellisen kosteuden nousun yläpohjarakenteessa sekä pahimmillaan kosteuden tiivistymistä eli kondenssia.

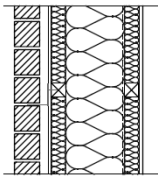
Tässä tarkastelussa yläpohjarakenne mallinnettiin ideaalisesti toimivana, eli ilman-/ höyrynsulun vuodoista tai vesikatteen vuodoista ei aiheutunut kosteusrasitusta. Näin ollen kosteuslähteitä olivat materiaalien alkukosteus sekä sisä- ja ulkoilman kosteus.

Alapohjarakenteiden kosteustekniseen toimintaan vaikuttaa ratkaisevasti ryömintätilan kosteuslisä ulkoilmaan verrattuna. Yleisesti ottaen rakenteet toimivat lähes kaikilla tutkituilla eristeiden ja tuulensuojalevyjen yhdistelmillä, kun kosteuslisä on 1 g/m^3 . Kosteuslisän ollessa 2 g/m^3 nousivat homeindeksit järjestään yli arvon 1,0, kun materiaalien homehtumisherkkyysluokka oli 1 ja osittain myös homehtumisherkkyysluokan ollessa 2. Yhteenvetona voidaan todeta alapohjan toimivan, kun kosteuslisä ulkoilmaan nähden on enintään 1 g/m^3 . Tämä edellyttää maapohjasta nousevan kosteuden estämistä erityisesti pyrkimällä laskemaan maapohjan lämpötilaa.

4.2 Ulkoseinärakenteiden kenttäkokeet

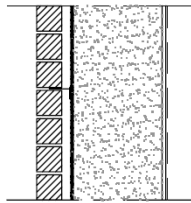
4.2.1 Rakenteiden kuvaus

Tutkittavien rakenteiden runko on toteutettu $51 \times 300 \text{ mm}^2$ kertopuulla k600-jaolla ja 15 mm havuvaneripohjalla. Havuvaneri on asennettu rungon sisäpuolelle ja se toimii rakenteen jäykistyksen ohella höyryn- ja ilmansulkuna. ECOSAFE-projektissa rakenteiden E1...E4 rungot sekä lämmöneristeen puhallus tehtiin Punkaharjun Puutaito Oy:n seinäelementtitehtaalla. Lämmöneristeenä käytetyt kutterinlastu ja savetettukutterinlastu asennettiin kyseisen tehtaan levypuhalluslaitteella. Eristeen painuminen pyrittiin välttämään tekemällä puhallus 30 mm ylitäyttöön ja puristamalla eriste kasaan tuulensuojalevyjen asentamisen yhteydessä. ECOSAFE-projektin rakennetyypit on esitetty kuvassa 4.1., liitteessä 3 sekä Rakennusfysiikkaseminaarin 2021 artikkelissa [18].



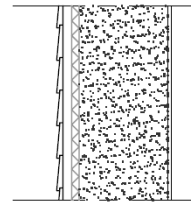
Rakennetyyppi W5

Tiilimuuraus	85 mm
Tuuletusväli ja pystykoolaus	30 mm
Tuulensuojakipsilevy	9 mm
Lämmöneriste ja vaakakoolaus	50 mm
Lämmöneriste ja runkotolpat	200 mm
Höyrynsulku	50 mm
Lämmöneriste ja vaakakoolaus	13 mm
Kipsilevy	



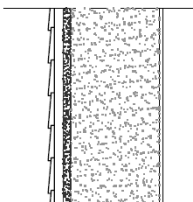
Rakennetyyppi E1

Tiilimuuraus	85 mm
Tuuletusväli	30 mm
Kipsituulensuojalevy	9 mm
Pölkky kutterinpuueristys	300 mm
Vaneri	15 mm
Höyrynsulkumuovi	



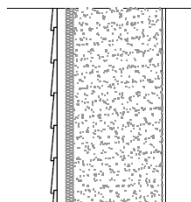
Rakennetyyppi E2

Puuverhous	22 mm
Tuuletusväli	30 mm
Hunton puukuitutuulensuojalevy	25 mm
Savetettu Pölkky kutterinpuueristys	300 mm
Vaneri	15 mm



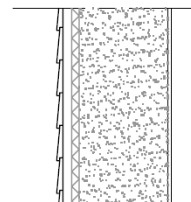
Rakennetyyppi E3-S

Puuverhous	22 mm
Tuuletusväli	30 mm
Savituulensuoja	30 mm
Pölkky kutterinpuueristys	300 mm
Vaneri	15 mm



Rakennetyyppi E3-V

Puuverhous	22 mm
Tuuletusväli	30 mm
Paroc mineraalivillatuulensuojalevy	30 mm
Pölkky kutterinpuueristys	300 mm
Vaneri	15 mm



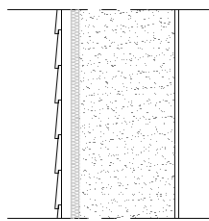
Rakennetyyppi E4

Puuverhous	22 mm
Tuuletusväli	30 mm
Hunton puukuitutuulensuojalevy	25 mm
Pölkky kutterinpuueristys	300 mm
Vaneri	15 mm

Kuva 4.2.1 ECOSAFE.-projektin koerakennusmittauksissa testatut rakenteet

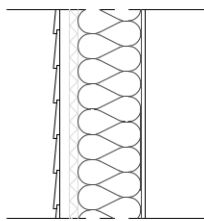
Yksi rakenne, E2, eristettiin savetetulla kutterinlastulla, jonka oletettiin parantavan kutterinlastun kosteusteknistä toimintaa. Muissa rakenteissa eristeenä käytettiin puhdas kutterinlastua, mutta toisistaan poikkeavia tuulensuojamateriaaleja: Yksi rakenne, E4, toteutettiin savetetun kutterinlastun vertailuelementiksi siten, että molemmissa rakenteissa on 25 mm bitumoitua huokoinen kuitulevy tuulensuojana. Rakenteiden E3-S ja E3-V kohdalla yksittäinen seinäelementti jaettiin keskimmäisen runkotolpan suhteen kahteen osaan ja kumpaankin runkotolppaväliin asennettiin omat tuulensuojalevyt. Tuulensuojalevyiksi valittiin vertailuun savituulensuoja (E3-S) ja kivivillatuulensuoja (E3-V). Kaikissa edellä mainituissa rakenteissa julkisivumateriaalina toimi puupanelointi. Rakenne E1 poikkeaa useammalta osin muista ECOSAFE-projektin rakenteista. Rakenteeseen asennettiin kipsituulensuojalevy, höyrynsulku sisäpintaan sekä tiilijulkisivu. Valinnoilla haluttiin saada vertailukelpoinen rakenne toisessa projektissa koerakennuksille asennettuihin mineraalivillaeristeisiin rakenteisiin (W5).

ECOSAFE2-projektissa mukaan tuotiin vielä kaksi uutta koerakennetta. Rakenteet valmistettiin Tampereen yliopistolla. ECOSAFE2-projektin seinärakenteet on esitetty kuvassa 4.2.2.



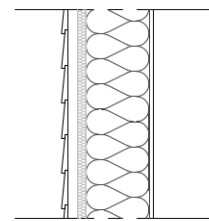
Rakennetyyppi E5

Puuverhous	22 mm
Tuuletusväli	30 mm
Paroc Cortex kivivillatuulensuoja	30 mm
Savetettu kutterinlastueriste	300 mm
Vaneri	15 mm



Rakennetyyppi E6_P

Puuverhous	22 mm
Tuuletusväli	30 mm
Hunton puukuitutuulensuoja	25 mm
Kivivillaeriste	200 mm
Vaneri	15 mm



Rakennetyyppi E6_V

Puuverhous	22 mm
Tuuletusväli	30 mm
Paroc Cortex kivivillatuulensuoja	30 mm
Kivivillaeriste	200 mm
Vaneri	15 mm

Kuva 4.2.2 ECOSAFE2-projektin koerakennusmittauksissa testatut rakenteet

Rakenne E5 on yhdistelmä ECOSAFE-projektissa paremmin pärjänneitä materiaaleja: eristeenä savetettu kutterinlastu ja tuulensuojana kivivillatuulensuoja. Rakenne vastaa muilta osin ECOSAFE-projektin rakenteita E2...E4. Tiilijulkisivulla varustetun rakenteen E1 puuverhoillut vertailurakenteet E6_P ja E6_V on tehty yhteen kivivillaeristeiseen seinäelementtiin siten, että kumpaankin runkotolppaväliin on asennettu omat tuulensuojalevyt: bitumoitu huokoinen kuitulevy (E6_P) ja kivivillatuulensuojalevy (E6_V). Kivivillaeristeisen rakenteen runkopaksuus (200 mm) on valittu siten, että sen laskennallinen U-arvo on likimain sama kuin kutterinlastulla ja savetetulla kutterinlastulla eristetyillä rakenteilla.

4.2.2 Koejärjestelyt

Kokeet toteutettiin Tampereen yliopiston Hervannan kampuksen koekentällä sijaitsevilla koerakennuksissa. Koerakennukset on toteutettu teräsrakenteisella pilari-palkkirungolla siten, että yhden rakennuksen polyuretaanieristetyin rungon väleihin voidaan asentaa yhteensä 12 seinäelementtiä ja 3 yläpohjalelementtiä. Seinäelementin maksimileveys on 1,2 m ja korkeus 2,5 m. Jokaisesta rakennetyypistä valmistettiin kaksi seinäelementtiä: toinen koerakennuksen etelä- ja toinen pohjoisjulkisivulle.

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

4.2.3 Yhteenveto tuloksista

Puurankaseinien kosteusteknisen toiminnan osalta kriittinen kohta on tyypillisesti tuulensuojalevyn sisäpinnassa, eli lämmöneristekerroksen ja tuulensuojalevyn rajapinnassa. Tulosten perusteella

sekä tuulensuojalevyn lämmönvastuksella että lämmöneristeen lämmönjohtavuudella ja kosteuskapasiteetilla on huomattava vaikutus tuulensuojan sisäpinnan olosuhteisiin.

Tuulensuojalevyn lämmönvastuksen vaikutus havaittiin selvästi levyn sisäpinnan lämpötilan ja suhteellisen kosteuden lukemista [19]. Mitä korkeampi lämmönvastus tuulensuojalevyllä oli, sitä korkeampi oli lämpötila tuulensuojalevyn takana ja vastaavasti sitä alhaisempi suhteellinen kosteus. Tuulensuojakipsilevyn takana lämpötilat olivat alhaisimmat ja suhteelliset kosteudet olivat korkeimmat (rakenteet E1 ja W5). Myös savituulensuojan takana (rakenne E3-S) suhteellinen kosteus oli puukuitu- ja mineraalivillatuulensuojia korkeammalla. Tuulensuojalevyn lämmönvastus on levyn paksuuden ja lämmönjohtavuuden osamäärä, eikä käytettyjen tuulensuojalevyjen paksuuksissa ei ollut dramaattista vaihtelua, tuulensuojakipsilevyä lukuun ottamatta. Tällöin tulosten ero selittyi ensisijaisesti levymateriaalien lämmönjohtavuuksien erolla, mikäli lämmöneristekerrosten lämmönvastukset olivat likimain samat. Tutkimuksen perusteella kaikkien käytettyjen tuulensuojalevyjen vesihöyrynläpäisevyys oli riittävä, koska homeindeksin arvot tuulensuojalevyn sisäpinnassa olivat selvästi alle 1,0 eikä kosteuden kondensoitumista eristeen ja tuulensuojalevyn rajapinnassa havaittu.

Mineraalivillaeristeen kanssa tuulensuojalevyn sisäpinnan lämpötila vaikutti herkästi kyseisen rajapinnan suhteelliseen kosteuteen (rakenteet W5, E6-P ja E6-V). Koska mineraalivillan kosteuskapasiteetti on olematon, riippui suhteellinen kosteus mineraalivillaeristeessä yksinomaan lämpötilasta ja huokosilman absoluuttisesta kosteudesta, mikä vastasi käytännössä pitkälti ulkoilman absoluuttista kosteutta. Puupohjaiset eristeet sen sijaan tasasivat kosteuden vaihtelua odotetusti. Rakenteet eivät olleet yhtä herkkiä reagoimaan kosteuden- tai lämpötilan muutoksiin kuin ei-hygroskooppisilla eristemateriaaleilla toteutetut rakenteet. Erityisesti savetetun Pölkky-kutterinlastun käyttö (rakenne E2) laski suhteellista kosteutta tuulensuojalevyn takana. Tämä selittyy kyseisen tuotteen suurella kosteuskapasiteetilla, mikä puolestaan on seurausta eristeen suuresta tiheydestä. Savetetun Pölkky-kutterinlastun ja puukuitutuulensuojan yhdistelmällä (E2) saavutettiin likimain samat kosteustasot kuin savettamattoman Pölkky-kutterinlastun ja mineraalivillatuulensuojan yhdistelmällä (E3-V). Savettamattoman Pölkky-kutterinlastun ja puukuitutuulensuojan yhdistelmän (E4) tapauksessa suhteellisen kosteuden arvot olivat puolestaan keskimäärin noin 5 %-yksikköä korkeammalla. Savetetun Ehta-kutterinlastun ja mineraalivillatuulensuojan yhdistelmä (E5) ei toiminut aivan yhtä hyvin kuin rakenteet E2 ja E3-V, mahdollisesti eristeen alhaisemman tiheyden ja siten pienemmän kosteuskapasiteetin vuoksi.

Tutkimustulosten yhteenvetona voidaan todeta eristeen tiheyden ja tuulensuojalevyn lämmönvastuksen kasvattamisen parantavan puurankarakenteisen ulkoseinän kosteusteknistä toimintaa.

Rakenteiden kosteusolosuhteita tutkittiin sekä eristeen kohdalta että runkotolpan vierestä. Kutterinlastueristeisillä rakenteilla tarkastelupiste oli eristeen kohdalla, koska siinä on kylmintä ja

eriste ja runko ovat samaa materiaalia ja näin ollen samaa homehtumisherkkyyssuokkaa. Kivivillaeristeisillä rakenteilla homehtumisherkkyyssuokka huomioiden rakenteen kriittinen piste on puolestaan hyvin todennäköisesti runkotolpan vieressä, koska runko on eristettä herkemmin homehtuvaa materiaalia. Tässä tutkimuksessa havaittiin, että kivivillaeristeisten rakenteiden runkotolpan vierestä mitatut olosuhteet rakennuksen pohjoissivulla vastasivat kutterinlastueristeisillä rakenteilla eristeen kohdalta mitattuja olosuhteita. Pohjoissivun olosuhteet todettiin kriittisemmiksi kuin eteläsivun.

Tulokset on esitetty yksityiskohtaisesti liitteessä 3.

4.3 Ulkoseinärakenteiden koetulosten laskennalliset vertailut

4.3.1 Mallinnuksen lähtötilanne

Laskennallisissa vertailuissa mallinnettiin kohdassa 4.2 esitetyn rakennetyypin E4 sekä sen variaatioiden rakennusfysikaalista toimivuutta. Rakenteen toimintaa mallinnettiin sekä nykyisessä että tulevaisuuden ilmastossa.

Rakennevariaatiot toteutettiin mallintamalla erilaisten tuulensuojalevyjen toimintaa. Tutkitut levyt olivat 12 ja 25 mm puukuitulevyt sekä 9 mm tuulensuojakipsilevy. Mitoitusvuosina käytettiin Jokioisen vuotta 2011 kuvaamaan nykyilmastoa. Tulevaisuuden ilmastona käytettiin mallinnettuja vuoden 2050 ilmasto-olosuhteita, jotka saatiin mallintamalla ilmastomuutoksen vaikutus päästöskenaariota RCP 4.5 mukaan. Tämä edustaa nykykehityksen perusteella todennäköistä kasvihuonekaasujen päästöjen kehitystä.

Puun ja puupohjaisten materiaalien mallinnuksesta tekevät haastavan useat tekijät, joita ei oteta huomioon ns. käyttövalmiissa laskentaohjelmissa. Näitä ovat tasapainokosteuden riippuvuus lämpötilasta sekä hystereesi eli tasapainokosteuden riippuvuus kappaleen kosteushistoriasta sekä kosteuspitoisuuden muutoksen suunnasta (kosteusko vai kuivuuko kappale parhaillaan). Vaikutusta on lisäksi huokosilman ja puun solumassan välisellä paikallisella epätasapainolla eli ns. ei-Fickiaanisella käyttäytymisellä. Rakennusfysiikan tutkimusryhmässä on meneillään väitöstutkimus, jossa näitä ilmiöitä on tutkittu kokeellisesti huokoisesta puukuitulevystä. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus sääolosuhteiden ja tuuletusraon geometrian funktiona on myös huonosti tunnettu suure. Laskennoissa käytettiin ilmanvaihtuvuudelle vakioarvoa 50 l/h, eli tuuletusvälin ilman oletettiin vaihtuvan 50 kertaa tunnissa.

Kosteuden sitoutuminen puussa perustuu selluloosaketjujen sisältämiin hydroksyyliyhmiin (-OH), joihin vesimolekyylit takertuu muodostaen vetysidoksen. Sidos voi myös katketa palautuvana prosessina (desorptio). Ilmiö toimii myös muilla puupohjaisilla materiaaleilla. Puupohjaisten

materiaalien tasapainokosteuksia voidaan siten arvioida materiaalin sisältämän selluloosamäärän eli käytännössä materiaalin tiheyden perusteella.

Mallinnuksessa käytettiin Comsol Multiphysics -ohjelmistoa. Ohjelmisto mahdollistaa mm. käytettävien materiaaliparametrien esittämisen laskentasuureiden funktiona. Toisin sanoen materiaaliominaisuuksien muuttuminen ympäristön olosuhteiden mukaan saadaan otettua huomioon.

Yhteenveto mallinnuksen lähtökohdista on esitetty lähteessä [20].

4.3.2 Yhteenveto tuloksista

Mikäli rakenteeseen ei tunkeudu julkisivuverhouksen läpi viistosadetta, kaikki tarkastellut rakenteet vaikuttivat kosteusteknisesti suhteellisen toimivilta nykyilmastossa [20]. Jokioinen 2050 -tilanteessa suhteelliset kosteudet tuulensuojalevyn takana ovat matalammalla kuin nykyilmastossa (Jokioinen 2011). Tulos antaa vahvoja viitteitä siitä, että tutkitut rakenteet toimivat rakennusfysikaalisesti tulevaisuuden ilmastossa. Kutterikerroksen paksuntamisella 300 mm:stä 400 mm:iin ei ollut tulevaisuuden ilmastossa merkittävää eroa toiminnassa. Paksummalla kerroksella suhteelliset kosteudet olivat hieman korkeammalla, mutta rakenteen toiminnan kannalta merkittävää eroa ei havaittu.

Mallinnuksessa käytetylle puukuitutuulensuojalevyille ilmoitetaan Sd-arvoksi 0,2 metriä (12 mm levy). Tämä tarkoittaa, että materiaalin μ -arvo on 16,7. Tämä on yli kaksinkertainen arvo tuulensuojakipsilevyyn verrattuna ($\mu = 7,9$) joka on myös ohuempi (9 mm). Kasvattamalla kyseisen puukuitulevyn paksuutta kasvaa luonnollisesti lämmönvastus, mutta myös vesihöyrynvastus, mikä hidastaa kosteuden poistumista kutterikerroksesta keväällä ja kesällä. Toisaalta ohuemmalla levyllä kosteuden talvisaikainen maksimimäärä kutterissa on hiukan korkeampi ohuella levyllä, ei kuitenkaan merkittävästi.

Laskentamallilla (konventionaalinen vs. lämpötilariippuva + hystereesi) oli jonkin verran vaikutusta tuloksiin, mutta ei johtopäätösten kannalta kriittistä. Tarkka simulointitulos vaatii kuitenkin hystereesimallin ja tasapainokosteuden lämpötilariippuvuuden huomioon ottamisen, mikä nykyisin puuttuu kaupallisista, käyttövalmiista mallinnusohjelmista.

4.4 Yläpohjien U-arvokokeet

4.4.1 Mittausten lähtötilanne sekä käytetty koelaitteisto

Sisäinen konvektio tarkoittaa ilman liikettä lämmöneristeen tai muun huokoisen aineen sisällä. Ilman liike johtuu nosteesta, jota aiheutuu ilman lämpötilaeroista johtuvista tiheyseroista. Alhaalta ylös kulkeva lämmin ilma ja ylhäältä alas kulkeva viileämpi ilma aiheuttavat lämpövirran lisääntymistä

lämmöneristekerroksen läpi pelkkään johtumisella siirtyvään lämpövirtaan verrattuna. Puhallettavissa yläpohjan lämmöneristeissä on aiemmissa tutkimuksissa havaittu sisäisen konvektion aiheuttamaa lämpövirran lisääntymistä eristekerroksen yli [21] [22]. Suuren ilmanläpäisevyyden omaavilla eristeillä sisäinen konvektio on ollut erityisesti merkittävää.

Sisäisen konvektion voimakkuutta kuvaavia mittalukuja ovat Rayleighin ja Nusseltin luvut. Jälkimmäinen ilmoittaa kokonaislämpövirran suhteessa tilanteeseen, jossa sisäistä konvektiota ei esiinny. Tilanteissa, joissa rakenteissa ei esiinny sisäistä konvektiota, mm. umpisoluisissa eristeissä normaaleissa rakennusten käyttötilanteissa, Nusseltin luku saa arvon 1. Tätä suuremmat arvot kertovat sisäistä konvektiota tapahtuvan. Esimerkiksi Nusseltin luvun ollessa 1,5 aiheutuu 50 % rakenteen läpi tapahtuvasta lämpövirrasta sisäisen konvektion vaikutuksesta.

Yläpohjakokeet tehtiin Tampereen yliopiston laboratoriossa Calibrated Hot Box -menetelmällä [23]. Tutkimuslaitteistolla voidaan mitata rakenteen lämmönläpäisykerroin todellisuutta vastaavissa olosuhteissa. Konvektion osuus rakenteen läpi menevästä lämpövirrasta voidaan määrittää, jos käytetyn eristemateriaalin lämmönjohtavuus tunnetaan. Tällöin saadaan laskettua rakenteen läpi menevä lämpövirta ihannetilanteessa, ilman sisäistä konvektiota. Kun tätä verrataan Calibrated Hot Box -menetelmällä saatuun tulokseen, saadaan laskettua konvektiolla tapahtuva lämpövirta. Mikäli rakenteessa ei tapahdu sisäistä konvektiota, ovat Calibrated Hot Box -menetelmällä tehdyn rakennekokeen ja materiaalin lämmönjohtavuuden perusteella tehtyjen ideaalitalanteen laskelmien tulokset mittaustarkkuuden rajoissa yhtä suuret.

Mitattavan rakenteen eri puolille voidaan asettaa eri lämpötiloja, joten koetulokset saadaan useilla eri lämpötilaeroilla. Koska sisäinen konvektio aiheutuu ilman lämpötilaeroista eri kohdissa rakennetta, on sisäinen konvektio sitä voimakkaampaa mitä suurempi lämpötilaero kappaleen eri puolilla vallitsee. Laitteen yläosaan voidaan luoda ilmavirta seinissä olevilla puhaltimilla, joilla voidaan mallintaa yläpohjan tuuletusilmavirtaa.

Tässä tutkimuksessa käytettiin lämmöneristeinä kutterinlastua ja savetettua kutterinlastua. Lämmöneristeen paksuus oli noin 600 mm.

4.4.2 Yhteenveto tuloksista

Tulosten perusteella puhtaalla kutterinlastulla eristetyssä rakenteessa tapahtui enemmän sisäistä konvektiota verrattuna savetetulla kutterinlastulla eristettyyn. Kutterinlastulla tapahtui sisäistä konvektiota mittaustarkkuuden rajoissa jo viiden asteen lämpötilaerolla, kun taas savetetulla kutterinlastulla sisäinen konvektio oli hyvin vähäistä vielä 15 asteen lämpötilaerolla. Suurimmalla tutkitulla lämpötilaerolla 35 °C kutterinlastulla sisäisen konvektion aiheuttama lämpövirran lisäys oli n. 80 % ilman tuuletusilmavirtaa ja 95 % tuuletusilmavirran kanssa. Samoissa olosuhteissa savetetun kutterinlastun vastaavat tulokset olivat n. 65 %. Yhteenveto tuloksista on esitetty

taulukossa 4.4.1. Pienempiä lämpötilaeroja kuin 15 °C ei ole raportoitu, sillä niissä oli tulosten osalta merkittävää epävarmuutta.

Taulukko 4.4.1. Yhteenveto sisäisen konvektion tuloksista. Tulokset on esitetty mitatuilla lämpötilaeroilla sekä eristeen yläpinnan ilmavirtauksen arvoilla.

Lämpötilaero ΔT	Nusseltin luku Nu			
	Kutterinlastu		Savetettu kutterinlastu	
	0 m/s	0,6 m/s	0 m/s	0,6 m/s
15 °C	1,45	1,7	1,1	1,15
20 °C	*)	1,85	1,2	1,3
35 °C	1,8	1,95	1,65	1,65

*) Tuloksessa huomattavaa epävarmuutta.

Tutkittujen eristeiden, kuten muidenkin irtoeristeiden, asennustiheyteen ja yleensä asennuksen suoritukseen on kiinnitettävä huomiota. Eristeen tiheys vaikuttaa käytännössä olennaisesti ilmanläpäisevyyteen, mikä on avaintekijä sisäisen konvektion mahdollisessa muodostumisessa.

5 Muut rakennetutkimukset

5.1 Hiilijalanjälkilaskelmat

5.1.1 Tarkastellut rakenteet sekä laskentaperusteet

Tarkasteluja on tehty vastaavanlaisille ulkoseinärakenteille, joiden rakennusfysikaalista toimintaa on mitattu koerakennuksissa. Verrokkeina on lisäksi tarkasteltu kerrostaloissa käytettyjä CLT- ja betonielementtiseiniä. Lisäksi on laskettu kutterinlastueristeisen ja tavanomaisen ylä- ja alapohjan hiilijalanjäljet.

Rakenteiden hiilijalanjälkilaskelmat on suoritettu Ympäristöministeriön julkaisun 2019:22 ”Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä” mukaan. Menetelmä perustuu Euroopan komission laatimaan Level(s)-menetelmään. Sen pohjana puolestaan ovat eurooppalaiset standardit, ennen kaikkea EN 15643 –sarja, EN 15978 ja EN 15804, sekä aiheesta tehty tutkimus. Laskenta on tehty tuotevaiheen päästöille (YM:n julkaisun 2019:22 vaiheet A1-A3) sekä rakenteen hiilivarastolle (vaihe D3) [24] [25].

5.1.2 Yhteenveto tuloksista

Tulosten yhteenveto on esitetty taulukossa 5.1.1. Kattava esitys laskelmista ja tuloksista on esitetty lähteessä [26] ja päivitetty versio lähteessä [27].

Taulukko 5.1.1 Yhteenveto rakenteiden hiilijalanjälkilaskelmista.

Koodi	Rakenne	Hiilijalanjälki Vaiheet A1-A3 [kgCO ₂ e/ rakennusosa-m ²]	D3 hiilivarasto [kgCO ₂ e/ rakennusosa-m ²]
Omakotitalo			
US-mv, U=0,17	Tyypillinen nykyratkaisu	24	-33
US-kl	Puupohjaiset ratkaisut, puhdas kutteri	14	-143
US-kl_s	Puupohjaiset ratkaisut, savetettu kutteri	15...25 *)	-142
US-kl-mv	ECOSAFE-suositusratkaisu, puhdas kutteri	15	-142
US-kl_s-mv	ECOSAFE-suositusratk., savetettu kutteri	15...25 *)	-142
YP-mv U=0,09	Tyypillinen nykyratkaisu	36	-39
YP-kl	Puupohjaiset ratkaisut, puhdas kutteri	12	-207
YP-kl_s	Puupohjaiset ratkaisut, savetettu kutteri	12...32 *)	-207
YP-kl	ECOSAFE-suositusratkaisu, puhdas kutteri	12	-207
YP-kl_s	ECOSAFE-suositusratk., savetettu kutteri	12...32 *)	-207
AP-maa, U=0,17	Tyypillinen nykyratkaisu	50	0
YP-kl	Puupohjaiset ratkaisut, puhdas kutteri	19	-135
YP-kl_s	Puupohjaiset ratkaisut, savetettu kutteri	19...29 *)	-135
Kerrostalo			
US-bet, U=0,17, ei kantava	Tyypillinen nykyratkaisu, ei-kantava US	77	0
US-bet, U=0,17, kantava	Tyypillinen nykyratkaisu, kantava US	96	0
US-kl_s-ranka	Puupohjainen seinärakenne, rankarunko	16	-142
US-kl_s-CLT	CLT-kerrostalo, kutterieristetty US	25	-199

*) Pienempi arvo, jos märkä savi-kutterinlastuseos kuivataan puupolttoaineella ja suurempi arvo, jos se kuivataan käyttämällä polttoaineena kevyttä polttoöljyä.

Tulosten perusteella puhtaalla kutterinlastulla lämmöneristettyjen puupohjaisten ulkoseinä-, yläpohja- ja alapohjarakenteiden tuotevaiheen (A1-A3) hiilijalanjälki on selvästi alhaisempi kuin mineraalivillaeristeisten puurakenteiden ja murto-osa, kun verrataan betonirakenteeseen ulkoseinään. Samoin savetetulla kutterinlastulla lämmöneristettyjen puupohjaisten ulkoseinä-, yläpohja- ja alapohjarakenteiden tuotevaiheen hiilijalanjälki on samaa tasoa kuin puhtaalla kutterinlastulla eristettyjen rakenteiden, jos savikutterinlastuseos kuivataan puupohjaisilla polttoaineilla, mutta se on samaa tasoa kuin mineraalivillaeristeisten rakenteiden, jos savikutterinlastuseos kuivataan käyttäen polttoaineena öljyä.

Puupohjaisiin rakenteisiin sitoutuu huomattava määrä hiiltä verrattuna kivipohjaisiin materiaaleihin. Puupohjaisten rakenteiden koko elinkaaren hiilijalanjäljen suuruuteen vaikuttaa merkittävästi niiden käsittely purkamisen jälkeen. Puurakenteiden vieminen kaatopaikalle elinkaaren loppuvaiheessa

syntyvän hiilijalanjäljen kannalta huonompi vaihtoehto kuin niiden poltto, kun taas niiden kompostointi on edellisiä parempi vaihtoehto.

5.2 Palonkestävyys

Tutkimuksessa selvitettiin, miten savirapattu ja savetetulla kutterinlastulla eristetty puurunkoinen eikantava seinärakenne toimii palotilanteessa sekä, miten hyvin se täyttää osastoivan rakenteen tiiveydelle ja eristävyydelle lainsäädännössä asetetut vaatimukset. Kokeilla haluttiin myös selvittää savirappauksen toimintaa seinärakenteen suojaverhouksena. Tutkitun seinän pintarakenteena käytettiin savirappausta. Palonkestävyyttä testattiin kahdella polttokokeella, jotka toteutettiin standardin EN 1363-1:2020 sekä soveltuvien osien standardin EN 1364-1:2015 mukaisesti [28].

5.2.1 Tutkitut rakenteet

Ensimmäisessä polttokokeessa tutkittiin samanaikaisesti kahta erilaista seinälevytysratkaisua savirappauksen alustana: vinolaudoitus ja vaneri. Jälkimmäisessä kokeessa levytyksenä käytettiin vaneria koko seinäpinnalla. Testattujen seinärakenteiden kokonaispaksuus oli 230 mm ja ne koostuivat seuraavista rakennekerroksista:

Seinärakenteen pinnassa käytettiin 30 mm paksua savirappausta. Ensimmäisessä polttokokeessa rappaus toteutettiin kahtena 15 mm paksuisena kerroksena ja kerrosten väliin asennettiin puurunkoon kiinnitetty metalliverkosta valmistettu rappausverkko. Jälkimmäisessä polttokokeessa rappaus toteutettiin kolmena kerroksena siten, että päälle tulevassa kerroksessa laastin raaka-aineet olivat aina edellisiin kerroksiin verrattuna hienojakoisempia. Näin päälle tulevasta rappauserroksesta muodostui edellisiä kerroksia tiiviimpi. Ensimmäisen 15 mm laastikerroksen päälle asennettiin rappausverkko vastaavalla tavalla kuin ensimmäisessä kokeessa.

Rappauksen alustana käytettiin joko vaneria tai ponttilaudoitusta. Ensimmäisessä polttokokeessa puolet koekappaleesta oli levytetty 15 mm vanerilla ja toinen puoli 22 mm ponttilaudoituksella. Toisessa polttokokeessa koko koekappale levytettiin 18 mm vanerilla.

Rankaseinä koostui siksak -rungosta, jossa runkopuoliskojen rangat 48*98 mm k300 oli limitetty toisiinsa nähden. Seinän ontelotila täytettiin savetetulla kutterinlastueristeellä. Eristetilan paksuus oli 123 mm tai 148 mm. Koekappaleen reunoilla ontelo suljettiin eristetilan paksuutta vastaavilla puusoiroilla.

Puurungon päälle rappauksen alusta ja savirappaus toteutettiin vastaavalla tavalla kuin seinän toisella puolella. Toteutus kuvattu edellä.

Tarkempi kuvaus koejärjestelyistä, rakenteista ja koetuloksista on esitetty lähteissä [28] ja [29].

5.2.2 Yhteenveto koetuloksista

Seinärakenteen polttokokeita tehtiin kaksi kappaletta. Ensimmäisessä kokeessa puolet seinärakenteesta levytettiin vanerilevyllä ja toisella puolella käytettiin vinoon asennettua ponttilaudoitusta. Kokeen aikana havaittiin, että ponttilaudoitettun rakenteen tiiveys ei ole riittävä estämään palamiskykyisten kaasujen leviämistä tulen vastakkaiselle puolelle. Nämä kaasut läpäisivät savirappauksen ja tulen vastakkaisella puolella havaittiin kestoaltaan yli 10 sekunnin pituisia jatkuvia liekkiä, kun kokeen alusta oli kulunut 49 minuuttia. Koetulokset osoittivat, että, jos seinärakenteelle tavoitellaan 60 minuutin palonkestävyyttä, ponttilaudoituksen käyttö edellyttää seinärakenteen tiivistämistä esimerkiksi tiivistepaperin avulla. Vaneri oli tulosten perusteella palonkestävyydeltään toimivampi levytysratkaisu ja tämän vuoksi jälkimmäisen kokeen levytyksenä käytettiin vaneria.

Toisessa polttokokeessa testattiin 3 m x 3 m ei-kantava osastoiva seinärakenne, jonka levytyksenä käytettiin 18 mm vaneria. Polttokoe keskeytettiin 71 minuutin kuluttua kokeen alusta. Standardissa EN 1363-1:2020 rakenteen tiiveydelle ja eristävyydelle esitetyt raja-arvot eivät ylittyneet kokeen aikana. Tuloksen perusteella testattu seinärakenne täyttää ei-kantavana osastoivana rakenteena 60 minuutin palonkestovaatimuksen.

Suojaverhouksella tarkoitetaan rakennekerrosta, joka määrätyn ajan suojaa sen takana olevaa rakennetta syttymiseltä, hiiltymiseltä tai muulta vaurioitumiselta. Tässä tutkimuksessa testatussa rakenteessa savirappaus toimii alla olevan puurakenteen suojaverhouksena. Suojaverhouksella saavutettava suojausaika esitetään luokitusstandardin EN 13501-2:2016 mukaisten suojaverhousluokkien avulla (Suomessa käytössä luokat K₂ 10 ja K₂ 30). Luokka määritetään standardin EN 14135 mukaisella testauksella ja standardin mukaisessa polttokokeessa rakenne testataan vaakasuunnassa. Tässä tutkimuksessa seinärakenne testattiin pystyasennossa, joten järjestely ei ole standardin mukainen. Rappauksen ja levytyksen välistä mitattujen lämpötilojen avulla voitiin kuitenkin arvioida aikaa, joka kului siihen, että lämpötilannousu ylitti standardissa esitetyt raja-arvot. Nämä raja-arvot ovat K₂-luokituksen tapauksessa keskilämpötilalle 250 °C ja maksimilämpötilalle 270 °C. Polttokokeessa mitattu lämpötilannousu ylitti 270 °C tason 16 minuuttia kokeen alkamisen jälkeen. Tämän tuloksen perusteella 30 mm vahvuisella savirappauksella voi olla mahdollista saavuttaa suojaverhousluokka K₂ 10. Asian varmistaminen ja standardin mukainen luokitus edellyttävät kuitenkin standardin mukaista testiä, jossa rappaus tehtäisiin 20 mm vahvuisen lastulevyn päälle ja koekappale testattaisiin vaakasuunnassa polttokoeuunin yläosassa.

Tutkimusraportti polttokokeista on lähteessä [28].

5.3 Rakenteiden ääneneristys

Hankkeissa tutkittiin huoneistojen välisten seinien, ulkoseinien ja yläpohjien ääneneristävyttä laskennallisesti. Rakenteissa käytettiin muun muassa savirapattuja puulevyjä sekä savetettua kutterilastua.

Tutkitut huoneistojen väliset seinät olivat kaksirunkoisia puuseiniä, joiden pintarakenteena oli vinolaudoitus tai havuvaneri ja päällä 15 mm tai 30 mm vahvuinen savirappaus. Lasketut ilmaääneneristysluvut R_w olivat välillä 62...80 dB. Kaikilla tutkituilla rakenteilla on mahdollista saavuttaa huoneistojen väliseltä seinältä vaadittu standardoitu äänitasoeroluku $D_{nT,w} = 55$ dB asuntojen välillä, mikäli rakenteelliset sivutiesiirtymät yms. estetään ja väliseinän erottamien tilojen mittasuhteet ovat vastaavat kuin tyypillisissä asuinhuoneissa.

Tutkittujen ulkoseinien ja yläpohjien ääneneristysominaisuudet erosivat selvästi toisistaan. Korkeimmat ilmaääneneristyslukujen $R_w + C_{tr}$ arvot (ilmaääneneristysluku tieliikennemelua vastaan) saavutettiin vanerin tai CLT-levyn päälle tehdyillä savirappauksilla varustetuilla rakenteilla. Myös yläpohjissa parhaat tulokset saavutettiin vaneri-savirappaus- yhdistelmällä varustetuilla rakenteilla, joskin tiilikatetta käytettäessä ero kipsilevyllä varustettuihin rakenteisiin oli pieni.

Rakennuksen ulkovaipan ääneneristävyys on aina kokonaisuus, johon vaikuttavat seinärakenteen $R_w + C_{tr}$ -arvo, ikkunoiden ja ovien $R_w + C_{tr}$ -arvot ja osuus seinän pinta-alasta, huoneiden geometria, mahdolliset ulkoseinässä olevat ilmanvaihtoventtiilit sekä lentomelualueella myös yläpohjan $R_w + C_{tr}$ -arvo. Myös rakennuspaikan meluolosuhteista aiheutuvilla ääneneristysvaatimuksilla on ratkaiseva merkitys. Näin ollen rakenteiden käyttökelpoisuus ääneneristysmielessä on aina tapauskohtaista. Nyrkkisääntönä voidaan kuitenkin todeta, että melualueilla suunnittelun pohjaksi kannattaa ottaa rakenteet, joiden $R_w + C_{tr}$ -arvo on luokkaa 44...46 dB. Mitoitettaessa asuinrakennuksen tai majoitus- ja potilashuoneiden ulkovaipparakenteet Ympäristöministeriön asetuksen 796/2017 58 minimivaatimuksen eli 30 dB äänitasoeron mukaan, voidaan yleensä käyttää ulkoseinärakenteita, joiden $R_w + C_{tr}$ -arvo on noin 40 dB.

Laskentatulokset on esitetty A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n tutkimusraportissa [30] sekä Ecosafe-hankkeiden loppuseminaarin esityksessä [31].

6 Suositusrakenteet

6.1 Yleistä

Suositusrakenteina esitetään käytännön rakentamiseen suositeltavat ala-, väli- ja yläpohjien sekä osastoivan, ei-kantavan väliseinän rakennetyypit. Rakennetyyppien toimivuutta on tarkasteltu kokonaisvaltaisesti, joten ne soveltuvat sellaisenaan pientaloihin sekä mataliin pari- ja rivitaloihin.

Ulkovaipparakenteiden rakennetyypit on suunniteltu täyttämään voimassa olevan Ympäristöministeriön asetuksen 1010/2017 lämmönläpäisyvertoimen (U-arvon) vertailuarvot, jolloin rakennetyyppien käyttö ei aiheuta ongelmia energiatehokkuusvaatimusten täyttymisen kannalta. Rakennetyypeissä määriteltyjen tuulensuojalevyjen vesihöyrynvastus on niin alhainen, että rakenteissa voidaan käyttää höyrynsulkumuovin sijasta ilmansulkupaperia. Rakenteiden kosteustekninen toiminta on varmistettu laskelmin. Seinärakenteiden kosteusteknisen toiminnan osalta on nojaututtu myös koerakennusmittauksiin. Rakenteiden hiilijalanjälki on lisäksi pienempi kuin vertailurakenteiden [26]. Tämä on saavutettu korvaamalla mineraalivillaeriste ja kipsilevyt puu- ja savipohjaisilla materiaaleilla. Joissakin rakenteissa on käytetty mineraalivillatuulensuojaa rakennusfysikaalisista syistä. Mineraalivillatuulensuojan käytöllä varmistetaan tällaisissa tilanteissa riittävän alhainen suhteellinen kosteus lämmöneristeessä tuulensuojalevyn takana.

Rakennetyypit on esitetty liitteessä 1.

6.2 Ulkoseinät

Ulkoseinärakenteesta on esitetty neljä rakennevariaatiota, jotka eroavat toisistaan tuulensuojalevyn, lämmöneristemateriaalin, kantavan rungon sekä sisäpinnan osalta.

Tuulensuojalevyn osalta vaihtoehdot ovat puukuitulevy ja mineraalivillatuulensuoja. Puukuitulevy osallistuu rakenteiden jäykistämiseen ja sillä on pienempi hiilijalanjälki. Mineraalivillatuulensuojan vesihöyrynläpäisevyys on suurempi, mistä on etua rakennusfysikaalisessa toiminnassa. Yhteenvetona voidaan todeta, että tarvittaessa tuulensuojalevyä rakenteiden jäykistämiseen voidaan valita puukuitutuulensuojalla varustettu variaatio (KT-VA). Tällöin lämmöneristeeksi suositellaan savetettua kutterinlastua. Rakennusfysikaalisesti haastavissa tilanteissa, esimerkiksi varaaduttaessa korkeaan kosteuslisaan rakennuksen sisällä, voidaan valita mineraalivillatuulensuojalla eristetty rakenne sen hyvän kuivumiskyvyn vuoksi (rakenteet MV-VA, MV-KI, MV-CLT).

Seinärunkona on käytetty levyuumapalkkeja, joilla voidaan helposti toteuttaa riittävän U-arvon tarjoava seinärakenne. Poikkeuksena on rakenne MV-CLT, jonka kantavana rakenteena on CLT-levy. Runkotolppina voidaan käyttää myös sahatavaraa tai kertopuuta, kun niiden vaikutus rakenteen U-arvoon tarkastetaan.

Rakenteiden sisäpinnaksi on useimmissa tapauksissa määritetty rakennetta jäykistävä ja sisäpinnan vesihöyrynvastusta lisäävä vanerilevy. Sen päälle on määritelty huokoisesta kuitulevystä tehty sisustuslevy. Sisäpintana voi olla myös kipsilevy, mikäli tarvitaan elämätön levytys pintakäsittelyn tai vedeneristyksen alustaksi.

6.3 Alapohja

Suositusrakenteena esitetty alapohjarakenne on tyypiltään ryömintätilainen alapohja. Rakenteen lämmöneristeenä suositellaan käytettäväksi savetettua kutterinlastua, mikä parantaa rakennusfysikaalisesti haastavaksi todetun tuulettuvan alapohjarakenteen toimintaa. Tuulensuojalevyksi on valittu 25 mm vahvuinen puukuitulevy, joka kestää eristeen painon ja lisää puupohjaisten materiaalien osuutta rakenteessa.

Tuulettuvan alapohjarakenteen toteutuksessa tulee noudattaa nykytietämyksen ja -käytännön mukaista rakennustapaa. Maapohja tulee peittää lämmöneristyksellä, mikä hillitsee kosteuden haihtumista sekä ryömintätilan jäähtymistä kesäaikaan. Ilmansulkukerroksen tulee olla ehdottoman tiivis ja lämmöneristeen tulee täyttää sille varattu tila kokonaan. Ryömintätilan tuuletuksen tulee olla riittävä.

Ecosafe-suositusrakenteisiin perustuvassa rakennuksessa voidaan käyttää myös maanvaraista alapohjaa. Tähän ei ole esitetty rakennetyyppejä suositusrakenteissa. Yleisesti käytetyt, nykyisten määräysten ja ohjeiden mukaiset maanvaraisen alapohjan rakennetyypit soveltuvat käytettäväksi, mikäli rakennuspaikka mahdollistaa maanvaraisen alapohjan käytön. Tällaisten rakenteiden hiilijalanjälki on suositusrakenteita suurempi, mutta muilta osin rakenne on toteutettavissa kosteusturvallisesti.

6.4 Yläpohja

Esitetty yläpohja on hyvin tuulettuva, ulospäin kaatavalla katolla varustettu yläpohjarakenne. Sen kantavaksi rakenteeksi soveltuvat esimerkiksi naulalevyristikot. Rakenne on varustettu lämpöä eristävällä aluskatteella, jonka tehtävänä on vähentää tuulettustilan jäähtymistä kirkkaina öinä. Tällöin home- ja kondenssiriskit pienenevät. Rakenne suositellaan eristettäväksi kutterinlastueristeellä, jonka ilmanläpäisevyys on suuruusluokaltaan alle $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{msPa}$. U-arvovaatimusten kannalta riittävän eristepaksuuden saavuttaminen ei tyypillisesti ole ongelma yläpohjissa. Eristeen päälle ei asenneta tuulensuojalevyä. Tämä edesauttaa rakennusaikaisen kosteuden kuivumista verrattuna esimerkiksi palkkiyläpohjaan, jossa on tyypillisesti puukuitutuulensuoja eristeen yläpuolella. Nykyisin käytetyillä suurilla eristepaksuuksilla eristeen rakennusaikaisen kosteuden kuivuminen kestää hyvin kauan.

Ilmansulkupaperin alle on määritelty vanerilevy, joka tukee ilmansulkua ja estää sen vaurioitumisen rakennustyön aikana.

6.5 Ei-kantavat väliseinät

Osastoivien, ei-kantavien väliseinien rakennetyypiksi on valittu kaksi polttokokeessa 60 minuutin palonkestovaatimuksen täyttäneitä rakennetta. Molemmat ovat kaksinkertaisella rungolla varustettuja. Rakennetyypeistä toisessa (VS) on sik-sak-runko ja toisessa (HVS) runkotolpat ovat kohdakkain vähintään 10 mm etäisyydellä toisistaan. Jälkimmäinen ratkaisu vaatii enemmän tilaa, mutta se mahdollistaa asuinhuoneistojen välisten ääneneristysvaatimusten täyttymisen. Molemmissa rakenteissa on rungon ulkopuolella 18 mm vaneri ja sen päälle tehty 30 mm savirappaus.

On huomattavaa, että rakenteille voidaan olettaa 60 minuutin palonkesto vain ei-kantavana. Esimerkiksi tyypillistä pari- tai rivitalon runkorakennetta ajatellen tämä ei ole ongelma. Edelleen palonkesto täyttyy enintään 3000 mm korkuisella seinällä, mikä riittää hyvin normaalissa asuntorakentamisessa.

6.6 Rakennustarvikkeiden vaihto ja määrittely

Rakennetyypeissä mainittujen tuotteiden vaihtamisesta toiseen vastaa kohteen rakennesuunnittelija. Yleisesti ottaen tuotevaihto on mahdollista, kun eri tuotteiden kohdalla otetaan rakennusfysikaaliset seikat huomioon.

Mallisuunnitelmiin on määritelty ilmansulukuksi ilmansulkupaperi. Tässä tulee käyttää tuotetta, jonka pitkäaikaiskestävyys on varmistettu ja jonka mekaaninen kestävyys on riittävä työmaaolosuhteita ajatellen. Suositusrakenteiden rakennusfysikaaliset laskelmat on tehty ilmansulkupaperilla, jonka vesihöyrynläpäisevyysarvo on $S_d = 0,7$ m. Sisäpinnan vanerin vesihöyrynvastus on syytä ottaa huomioon tehtäessä rakennetyyppeihin muutoksia. Vanerin vesihöyrynvastuksen vaikutus on huomattava eikä sitä voi siis jättää pois ilman, että rakenteen vesihöyrynvastusta lisätään muilla keinoilla.

Tuulensuojalevyiksi on määritelty tapauskohtaisesti joko mineraalivillatuulensuoja tai puukuitulevy. Vaipparakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastuksen tulee aina olla vähintään viisinkertainen tuulensuojan vesihöyrynvastukseen verrattuna. Mikäli tuulensuojalevyn paksuutta muutetaan, tulee rakenteen toimivuus varmistaa laskennallisesti. Suunnitelmien mukaista puukuitulevyä voidaan usein käyttää rakenteiden jäykistyksessä, mutta rakenteiden jäykistyksen ja rakennuksen kokonaisstabiileetin varmistaa aina kunkin kohteen rakennesuunnittelija.

7 Liitteet

1. Suositusrakenteet (8 s.)
2. Kammiomittausten tulokset (15 s.)
3. Koerakennusmittausten tulokset (49 s.)

8 Lähteet

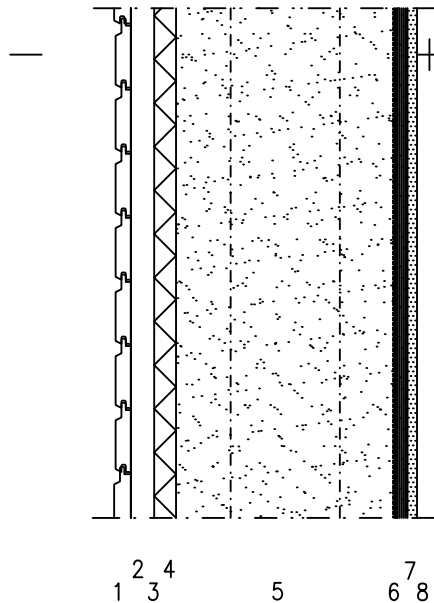
- [1] I. Tuurala, "Kutterinlastueristeiden rakennusfysikaaliset ominaisuudet", Diplomityö, Tampereen yliopisto, 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202206155671>
- [2] I. Tuurala, "Ecosafe-materiaalit ja rakennusfysikaaliset materiaalikokeet", esitetty tilaisuudessa Ecosafe-hankkeiden loppuseminaari, Tampere, helmi 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://research.tuni.fi/uploads/2023/06/558b7e34-0930_loppuseminaari.pdf
- [3] M. Alanen ja M. Malaska, "Kartiokaloremetrikokeet", esitetty tilaisuudessa Ecosafe 2 -johtoryhmä, Tampere, 23. syyskuuta 2021. Viitattu: 15. toukokuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://research.tuni.fi/uploads/2023/02/9e311972-kartiokaloremetrikokeet.pdf>
- [4] "Determination of the reaction to fire performance of the product Clay-wood shaving thermal insulation", Eurofins, Espoo, EUFI29-21005584-T1, syys 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://research.tuni.fi/uploads/2023/06/5b839e36-raportti-university-of-tampere-eufi29-21005584-t1-appendixesincluded.pdf>
- [5] "Determination of the ignitability of the Clay-wood shaving thermal insulation according to EN ISO 11925-2", Eurofins, Espoo, EUFI29-21005584-T2, syys 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://research.tuni.fi/uploads/2023/06/0c9bb0cb-raportti-university-of-tampere-eufi29-21005584-t2.pdf>
- [6] "Classification of reaction to fire in accordance with EN 13501-1:2018", Eurofins, Espoo, EUFI29-21005584-T3, syys 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://research.tuni.fi/uploads/2023/06/2b609cd2-raportti-university-of-tampere-eufi29-21005584-t3.pdf>
- [7] V. Hongisto ja R. Alakoivu, "Ilmaääneneristävyyden määrittäminen laboratorioissa", Turun ammattikorkeakoulu, akustiikkalaboratorio, Turku, Tutkimusselostus SY21-59B, tammi 2022. Viitattu: 15. toukokuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <https://research.tuni.fi/uploads/2023/02/72226a0a-sy21-59b.pdf>
- [8] V. Hongisto ja R. Alakoivu, "Akustisen absorptiosuhteen määrittäminen laboratorioissa", Turun ammattikorkeakoulu, akustiikkalaboratorio, Turku, Tutkimusselostus SY21-59A, tammi 2022. Viitattu: 15. toukokuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://research.tuni.fi/uploads/2023/02/275078ed-sy21-59a.pdf>
- [9] H. Viitanen *ym.*, "Moisture and Bio-deterioration Risk of Building Materials and Structures", *J. Build. Phys.*, vsk. 33, nro 3, ss. 201–224, tammi 2010, doi: 10.1177/1744259109343511.
- [10] T. Ojanen, R. Peuhkuri, H. Viitanen, K. Lähdesmäki, J. Vinha, ja K. Salminen, "Classification of material sensitivity - New approach for mould growth modeling", Tampere University of Technology, 2011.
- [11] J. Vinha, H. Viitanen, R. Peuhkuri, K. Lähdesmäki, T. Ojanen, ja K. Salminen, "VTT-TTY homemallin toimintaperiaatteet ja käyttö rakenteiden kosteusteknisen toiminnan tarkasteluissa", *Raken. 2013 Uusimmat Tutkimustulokset Ja Hyvät Käytännön Ratk. 22-24102013 Tamp.*, ss. 67–76, 2013.
- [12] Pessi, Anna-Mari, "Suomalaiseen homemalliin perustuva savikutterin homeutumisherkkyiden testaus", Turun yliopisto, Aerobiologia, Turku, Tutkimusselostus, joulukuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/tutkimusprojektit/ecosafe/>
- [13] S. Venäläinen, "ECOSAFE2: Kutterinlastujen kemiallisen koostumuksen ja savimateriaalien fysikaalis kemiallisten ominaisuuksien määrittäminen. Tutkimusselostus.", Helsingin yliopisto, Helsinki, Tutkimusselostus. [Verkossa]. Saatavissa: https://research.tuni.fi/uploads/2023/02/4f02660f-raportti_mikrobiologia.pdf
- [14] S. Venäläinen, "ECOSAFE2: Kutterinlastujen kemiallisen koostumuksen ja savimateriaalien fysikaalis kemiallisten ominaisuuksien määrittäminen. Tulostaulukot.", Helsingin yliopisto, Helsinki, Tutkimusselostuksen liite. [Verkossa]. Saatavissa: https://research.tuni.fi/uploads/2023/02/6e7d1270-tulokset_mikrobiologia.xlsx
- [15] M. S. Salkinoja-Salonen, "Alternatiivinen oksidaasi - patogeeninen piirre sienillä?", *Sienet Ja Terv.*, vsk. 18, nro 2, ss. 3–6, kesä 2017.

- [16] P. Harmo, J. Selkäinaho, M. Salkinoja-Salonen, H. Siren, M.-L. Riekkola, ja A. Visala, "Sisäilman epäpuhtauksien havainnointi ja vähentäminen vesiaerosolien avulla", esitetty tilaisuudessa SIY Raportti 36, ss. 413–418.
- [17] A. Forss, "Kutterinlastu- ja purueristeiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta nykyisissä ja tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa", Diplomityö, 2020. [Verkossa]. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202012219038>
- [18] J. Hietikko, E. Tuominen, ja J. Vinha, "Kutterinlastueristeisten seinärakenteiden koerakennuskokeet", teoksessa *Rakennusfysiikka 2021. Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut 26.– 28.10.2021, Tampere. Osa 1*, Tampere: Tampereen yliopisto, loka 2026, ss. 105–110. Viitattu: 15. toukokuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/137348>
- [19] J. Hietikko, "Ecosafe-koerakennusmittaukset", esitetty tilaisuudessa Ecoafe-hankkeiden loppuseminaari, Tampere, helmi 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://research.tuni.fi/uploads/2023/06/c7d7aab5-1030_loppuseminaari.pdf
- [20] Huttunen, Petteri, "Kutterinlastulla eristettyjen seinien laskennalliset tarkastelut", esitetty tilaisuudessa Ecoafe-hankkeiden loppuseminaari, Tampere, helmi 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://research.tuni.fi/uploads/2023/06/7494ae98-1100_loppuseminaari.pdf
- [21] Vinha, Juha ym., "Comprehensive development of nearly zero-energy municipal service buildings (COMBI). Tutkimushankkeen johdanto- ja yhteenvetoraportti.", Tampere, 168, 2019. [Verkossa]. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-4306-7>
- [22] J. Vinha ym., *Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa*. 2013.
- [23] H. Kivioja ja J. Vinha, "Hot-box measurements to investigate the internal convection of highly insulated loose-fill insulation roof structures", *Energy Build.*, vsk. 216, s. 109934, kesä 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109934.
- [24] *Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä*, vsk. 2019. teoksessa Ympäristöministeriön julkaisuja, no. 2019:22, vol. 2019. Helsinki: Ympäristöministeriö. Viitattu: 15. toukokuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161761>
- [25] T. Joensuu, R. Leino, J. Heinonen, ja A. Saari, "Developing Buildings' Life Cycle Assessment in Circular Economy-Comparing methods for assessing carbon footprint of reusable components", *Sustain. Cities Soc.*, vsk. 77, s. 103499, helmi 2022, doi: 10.1016/j.scs.2021.103499.
- [26] Saari, Arto, Tuominen, Eero, ja J. Vinha, "Kutterinlastueristeisten rakenteiden hiililaskennan tuloksia", teoksessa *Rakennusfysiikka 2021. Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut 26.– 28.10.2021, Tampere. Osa 1*, Tampere: Tampereen yliopisto, loka 2021, ss. 289–294. Viitattu: 15. toukokuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/137348>
- [27] A. Saari, "Kutterinlastueristeisten rakenteiden hiilijalanjälkitarkastelut", esitetty tilaisuudessa Ecoafe-hankkeiden loppuseminaari, Tampere, helmi 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://research.tuni.fi/uploads/2023/06/6beb82aa-1230_loppuseminaari.pdf
- [28] M. Malaska ja M. Alanen, "Fire resistance test on non-loadbearing timber stud wall. Clay-wood shaving thermal insulation material and clay plaster on timber frame", Tampere University, Faculty of Built Environment, Tampere, Research Report RAK/2683/2022, maalisk. 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/tutkimusprojektit/ecosafe/>
- [29] M. Alanen ja M. Malaska, "Ecosafe, palotekniset tutkimukset", esitetty tilaisuudessa Ecoafe-hankkeiden loppuseminaari, Tampere, helmi 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://research.tuni.fi/uploads/2023/06/4383f2cb-1310_loppuseminaari.pdf
- [30] V. Kovalainen, J. Lietzén, ja M. Kylliäinen, "Ecosafe 2, rakenteiden ilmaääneneristys", A-Insinöörit Suunnittelu Oy, Tampere, 1618693.1, tammi 2022. Viitattu: 15. toukokuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://research.tuni.fi/uploads/2023/02/fece43e4-ains_1618693.1.pdf

- [31] J. Lietzen, "Ecosafe 2, akustiikka", esitetty tilaisuudessa Ecosafe-hankkeiden loppuseminaari, Tampere, helmi 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://research.tuni.fi/uploads/2023/06/f3efada9-1250_loppuseminaari.pdf

LIITE 1 Suositusrakenteet Sivu 1/8	Työn nro .		US MV–VA
	Päiväys .	Tekijä .	
Rakennuskohde/Käyttökohde . .	Sisältö Puurakenteinen ulkoseinä Kutterinlastueriste Lautaverhous, vaneri ja kuitulevy sisäpinnassa		

1:10



	1	Pintakäsittely rakennusselityksen mukaan
≥ 23 mm	2	Ulkoverhouslauta, vaaka–tai pystyautoitus rakennusselityksen mukaan
32...44 mm	3	Ilmarako + pystyautoitus 32x100 k 600 (vaakautoituksen kanssa) tai ristiinkoolaus 22 mm + 22 mm (pystyautoituksen kanssa)
30 mm	4	Mineraalivillatuulensuojalevy $\lambda_d = 0,033$ W/mK
300 mm	5	Kutterinlastueriste + pystyrunko, levyuunapalkki 45x75 h=300, k600
0.3 mm	6	Ilmansulkupaperi, saumat rungon kohdalla, 200 mm limittäin ja teipattu
18 mm	7	Vaneri
13 mm	8	Sisustuslevy, huokoinen kuitulevy

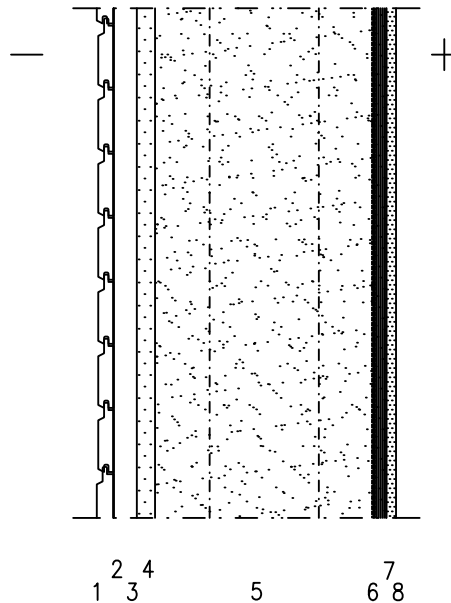
Rakenteen lämmönläpäisykerroin (U–arvo) kutterinlastun lämmönjohtavuuden mukaan	
λ_d	Lämmönläpäisykerroin (asetuksen 1010/2017 vertailuarvo 0,17 W/m²K)
0,042	0,14 W/m²K
0,050	0,16 W/m²K
0,055	0,17 W/m²K

Toteutusohjeet:

- Ilmansulkupaperin (6) vesihöyrynvastuksen tulee olla vähintään viisinkertainen mineraalivillatuulensuojalevyn (4) vesihöyrynvastukseen nähden

LIITE 1 Suositusrakenteet Sivu 2/8	Työn nro .		US KT–VA
	Päiväys .	Tekijä .	
Rakennuskohde/Käyttökohde . .	Sisältö Puurakenteinen ulkoseinä Savetettu kutterinlastueriste Lautaverhous, vaneri ja kuitulevy sisäpinnassa		

1:10



	1	Pintakäsittely rakennusselityksen mukaan
≥ 23 mm	2	Ulkooverhouslauta, vaaka- tai pysty laudoitus rakennusselityksen mukaan
32...44 mm	3	Ilmarako + pysty laudoitus 32x100 k 600 (vaakalaudoituksen kanssa) tai ristiinkoolaus 22 mm + 22 mm (pysty laudoituksen kanssa)
30 mm	4	Tuulensuojalevy, puukuitulevy, $\lambda_d = 0,049$ W/mK
300 mm	5	Savetettu kutterinlastu + pystyrunko, levyuunapalkki 45x75 h=300, k600
0.3 mm	6	Ilmansulkupaperi, saumat rungon kohdalla, 200 mm limittäin ja teipattu
18 mm	7	Vaneri
13 mm	8	Sisustuslevy, huokoinen kuitulevy

Rakenteen lämmönläpäisykerroin (U-arvo) kutterinlastun lämmönjohtavuuden mukaan

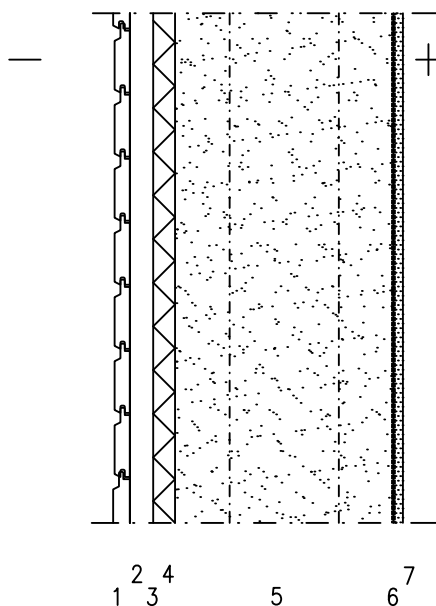
λ_d	Lämmönläpäisykerroin (asetuksen 1010/2017 vertailuarvo 0,17 W/m ² K)
0,042	0,14 W/m ² K
0,050	0,16 W/m ² K
0,055	0,17 W/m ² K

Toteutusohjeet:

- Ilmansulkupaperin (6) vesihöyrynvastuksen tulee olla vähintään viisinkertainen tuulensuojalevyn (4) vesihöyrynvastukseen nähden

LIITE 1 Suositusrakenteet Sivu 3/8	Työn nro .		US MV-KI
	Päiväys .	Tekijä .	
Rakennuskohde/Käyttökohde . .	Sisältö Puurakenteinen ulkoseinä Kutterinlastueriste Lautaverhous, kipsilevy sisäpinnassa		

1:10



≥ 23 mm	1	Pintakäsittely rakennusselityksen mukaan
32...44 mm	2	Ulkoverhouslauta, vaaka- tai pystyaukkoitus rakennusselityksen mukaan
	3	Ilmarako + pystyaukkoitus 32x100 k 600 (vaakalaudoituksen kanssa) tai ristiinkoolaus 22 mm + 22 mm (pystyaukkoituksen kanssa)
30 mm	4	Mineraalivillatuulensuojalevy, $\lambda_d = 0,033 \text{ W/mK}$
300 mm	5	Kutterinlastu + pystyrunko levyuunapalkki 45x75 h=300, k600
0.3 mm	6	Ilmansulkupaperi, saumat rungon kohdalla, 200 mm limittäin ja teipattu
13 mm	7	Kipsilevy

Rakenteen lämmönläpäisykerroin (U-arvo) kutterinlastun lämmönjohtavuuden mukaan

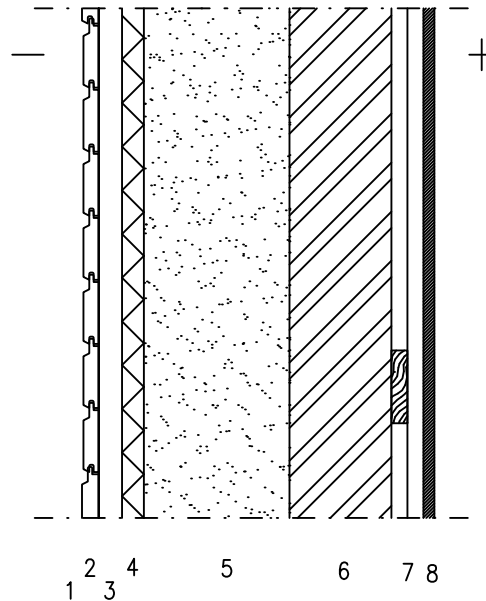
λ_d	Lämmönläpäisykerroin (asetuksen 1010/2017 vertailuarvo 0,17 W/m ² K)
0,042	0,14 W/m ² K
0,050	0,16 W/m ² K
0,055	0,17 W/m ² K

Toteutusohjeet:

– Ilmansulkupaperin (6) vesihöyrynvastuksen tulee olla vähintään viisinkertainen tuulensuojalevyn (4) vesihöyrynvastukseen nähden

LIITE 1 Suositusrakenteet Sivu 4/8	Työn nro .		US MV-CLT
	Päiväys .	Tekijä .	
Rakennuskohde/Käyttökohde . .	Sisältö CLT-runkoinen, palosuojattu ulkoseinä Savetettu kutterinlastueriste, mineraalivillatuulensuoja Lautaverhous, palokipsi sisäpinnassa		

1:10



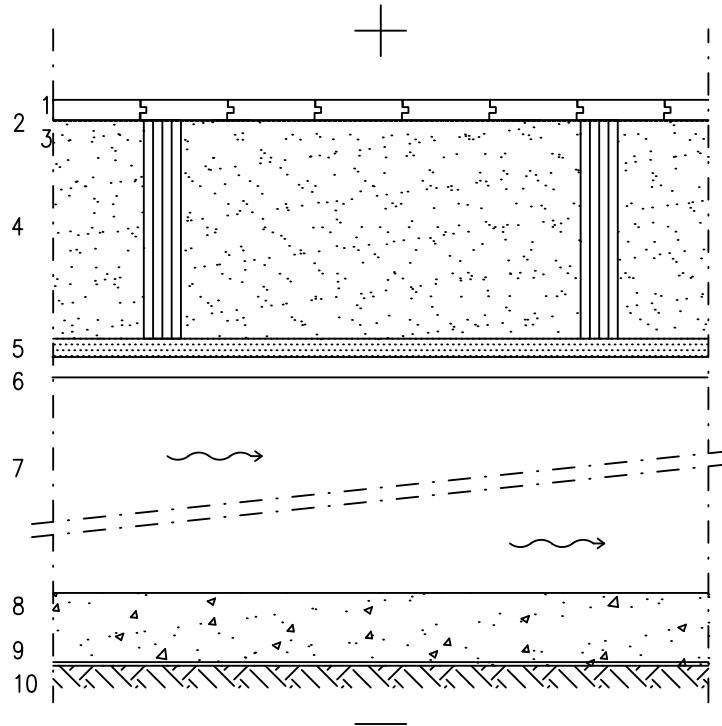
- | | | |
|---|--------------|---|
| 1 | | Pintakäsittely rakennusselityksen mukaan |
| 2 | ≥ 23 mm | Ulkoverhouslauta, vaaka- tai pysty laudoitus rakennusselityksen mukaan |
| 3 | 32...44 mm | Ilmarako + pysty laudoitus 32x100 k 600 (vaakalaudoituksen kanssa) tai ristiinkoolaus 22 mm + 22 mm (pysty laudoituksen kanssa) |
| 4 | 30 mm | Mineraalivillatuulensuojalevy, $\lambda_d = 0,033$ W/mK |
| 5 | 200 mm | Savetettu kutterinlastueriste + pystyrunko 45x200 k600 |
| 6 | 140 mm | CLT-massiivipuulaatta |
| 7 | 44 mm | Ristiinkoolaus / asennustila 2x 22x100 k600 |
| 8 | 15 mm | Palokipsilevy + pintakäsittely |

Rakenteen lämmönläpäisykerroin (U-arvo) kutterinlastun lämmönjohtavuuden mukaan

λ_d	Lämmönläpäisykerroin (asetuksen 1010/2017 vertailuarvo 0,09 W/m ² K)
0,042	0,15
0,050	0,16
0,055	0,17

LIITE 1 Suositusrakenteet Sivu 5/8	Työn nro .		AP
	Päiväys .	Tekijä .	
Rakennuskohde/Käyttökohde . .	Sisältö Puurakenteinen alapohja tuuletettu ilmatila Kutterinlastueriste		

1:10



Rakenne ylhäältä alaspäin:

- | | |
|--------|--|
| 28 mm | 1 Pintamateriaali ja/tai -käsittely huoneselityksen mukaan |
| 0.3 mm | 2 Ponttilautalattia |
| 300 mm | 3 Ilmansulkupaperi, saumat rungon kohdalla, 200 mm limittäin ja teipattu |
| 25 mm | 4 Savetettu kutterinlastu + kantava palkisto (kuvassa viilupuu 51x300 k600) |
| 22 mm | 5 Tuulensuojalevy, puukuitulevy $\lambda_d = 0,049 \text{ W/mK}$ |
| >800mm | 6 22x95 AB-luokan painekyllästetty harvalaudoitus k300 |
| | 7 Tuuletettu ryömintätila |
| | 8 Kapillaarisen veden nousun katkaiseva kerros/lämmöneriste, esim. kevytsora |
| | 9 Suodatinkangas (tarvittaessa, rakennesuunnittelija määrittelee kohdekohtaisesti) |
| | 10 Perusmaa, kaivurajojen kallistus salaojiin 1:100 |

Rakenteen lämmönläpäisykerroin (U-arvo) kutterinlastun lämmönjohtavuuden mukaan

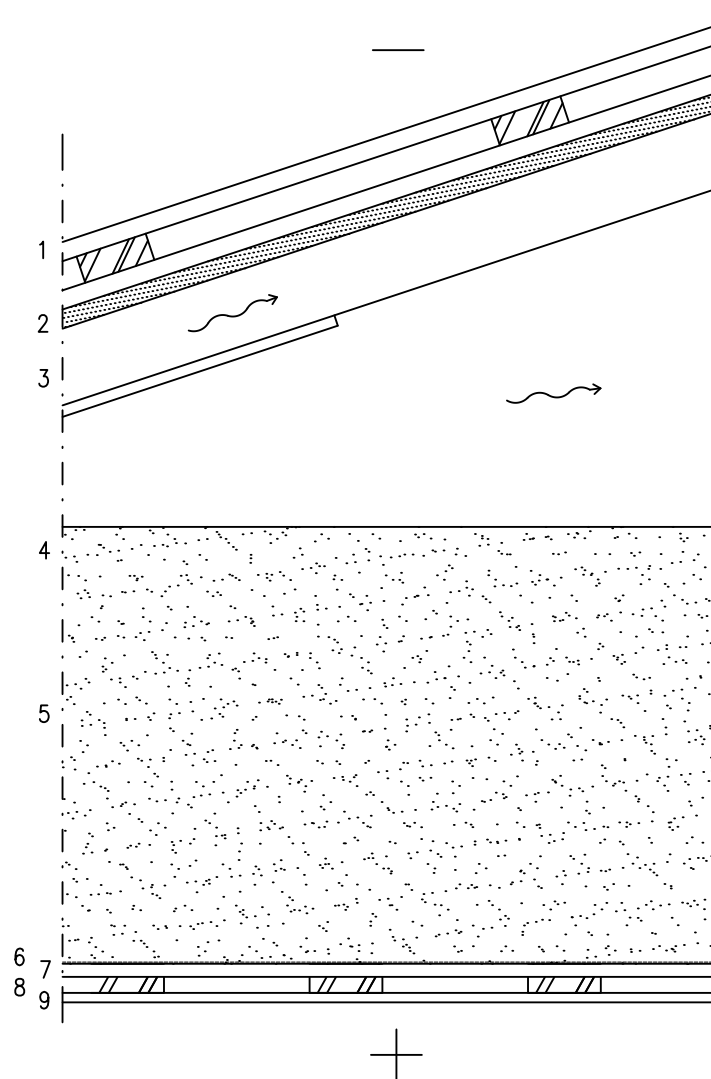
λ_d	Lämmönläpäisykerroin (asetuksen 1010/2017 vertailuarvo $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$)
0,042	0,14 $\text{W/m}^2\text{K}$
0,050	0,16 $\text{W/m}^2\text{K}$
0,055	0,17 $\text{W/m}^2\text{K}$

Toteutusohjeet:

- Ilmansulkupaperin (3) vesihöyrynvastuksen tulee olla vähintään viisinkertainen tuulensuojalevyn (5) vesihöyrynvastukseen nähden

LIITE 1 Suositusrakenteet Sivu 6/8	Työn nro		YP
	Päiväys	Tekijä	
Rakennuskohde/Käyttökohde	Sisältö Puuristikkoyläpohja, tuuletettu ilmatila Kutterinlastueriste		

1:10



Rakenne ylhäältä alaspäin:

- | | | |
|---------|---|--|
| | 1 | Korokerima 22*50, ruoteet ja vesikate |
| 25 mm | 2 | Lämpöä eristävä aluskate |
| ≥100 mm | 3 | Tuuletettu ilmatila |
| 600 mm | 4 | Kutterinlastueriste, $\lambda_d = 0,042 \text{ W/mK}$ |
| | 5 | Kattokannattajat rakennesuunnitelmien mukaan, tässä k900 |
| 0.3mm | 6 | Ilmansulkupaperi, saumat rungon kohdalla, 200 mm limittäin ja teipattu |
| 18 mm | 7 | Havuvaneri |
| | 8 | Koolaus 22*100 k600 |
| | 9 | Sisäverhous, panelointi |

Rakenteen lämmönläpäisykerroin (U-arvo) kutterinlastun lämmönjohtavuuden mukaan

λ_d	Lämmönläpäisykerroin (asetuksen 1010/2017 vertailuarvo $0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$)
0,042	0,08 $\text{W/m}^2\text{K}$
0,050	0,09 $\text{W/m}^2\text{K}$
0,055	0,10 $\text{W/m}^2\text{K}$

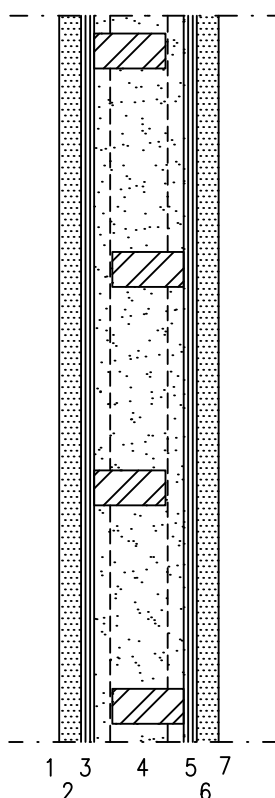
Toteutusohjeet:

- Aluskatetuotteen valinnassa otettava huomioon katon kaltevuus

LIITE 1 Suositusrakenteet Sivu 7/8	Työn nro .		VS
	Päiväys .	Tekijä .	
Rakennuskohde/Käyttökohde . .	Sisältö Puurakenteinen väliseinä Ei kantava		

1:10

Rakenne ylhäältä katsottuna



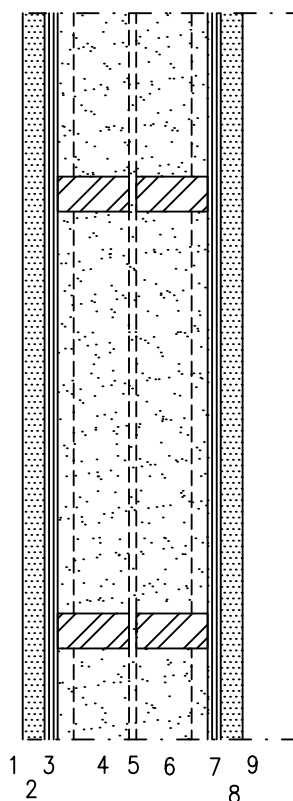
- | | | |
|--------|---|--|
| 30 mm | 1 | Pintakäsittely rakennusselityksen mukaan |
| 18 mm | 2 | Savirappaus + teräksinen rappausverkko |
| 123 mm | 3 | Vaneri, leveys 1200 mm, ruuvikiinnitys runkoon 4,2*45 k200/300, laudat 22*100 vaakasaumojen takana runkopuiden välissä |
| 18 mm | 4 | Puurunko + kutterinlastueriste, runkopuut 48*98 sik-sak, k600 kummallakin puolella |
| 30 mm | 5 | Vaneri, leveys 1200 mm, ruuvikiinnitys runkoon 4,2*45 k200/300, laudat 22*100 vaakasaumojen takana runkopuiden välissä |
| | 6 | Savirappaus + teräksinen rappausverkko |
| | 7 | Pintakäsittely rakennusselityksen mukaan |

Palonkesto: Seinä täyttää osastoivuudelle asetetut palonkestovaatimukset 60 minuuttia, kun seinän korkeus max. 3000 mm

LIITE 1 Suositusrakenteet Sivu 8/8	Työn nro .		HVS
	Päiväys .	Tekijä .	
Rakennuskohde/Käyttökohde . .	Sisältö Puurakenteinen huoneistojen välinen seinä Ei kantava		

1:10

Rakenne ylhäältä katsottuna



- | | | |
|-------|---|---|
| 30 mm | 1 | Pintakäsittely rakennusselityksen mukaan |
| 18 mm | 2 | Savirappaus + teräksinen rappausverkko |
| 98 mm | 3 | Vaneri, leveys 1200 mm, ruuvikiinnitys runkoon 4,2*45 k200/300, laudat 22*100
vaakasaumojen takana runkopuiden välissä |
| 10 mm | 4 | Puurunko + kutterinlastueriste, runkopuut 48*98 k600 |
| 98 mm | 5 | Erotuskaista 10 mm seinän ylä- ja alajuoksujen sekä päätyrankojen välissä,
rungot (4) ja (6) kauttaaltaan irti toisistaan, toteutus akustiikkasuunnittelijan
mukaan |
| 18 mm | 6 | Puurunko + kutterinlastueriste, runkopuut 48*98 k600 |
| 30 mm | 7 | Vaneri, leveys 1200 mm, ruuvikiinnitys runkoon 4,2*45 k200/300, laudat 22*100
vaakasaumojen takana runkopuiden välissä |
| | 8 | Savirappaus + teräksinen rappausverkko |
| | 9 | Pintakäsittely rakennusselityksen mukaan |

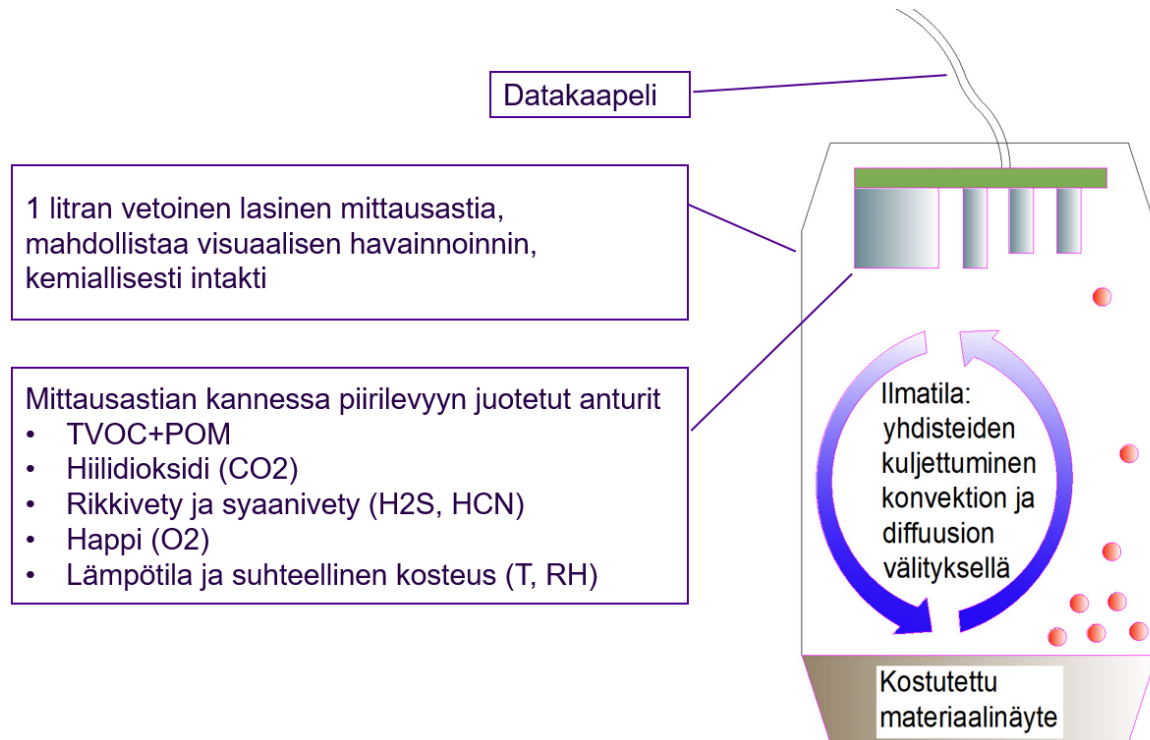
Palonkesto: Seinä täyttää osastoivuudelle asetetut palonkestovaatimukset 60 minuuttia, kun seinän korkeus max. 3000 mm

Rakenteen äänitasoeroluku: $D_{nT,w} > 55$ dB, kun liitokset, läpiviennit ja detaljit toteutetaan rakenne- ja akustiikkasuunnitelmien mukaan

Kammiomittausten suoritus ja tulokset

Mittauslaitteiston kuvaus

Mittaukset tehtiin suljetuissa 0,84 litran vetoisissa mittauskammioiden, ja olosuhteita seurattiin jatkuvatoimisilla antureilla.



Antureilla mitattiin kammioilmaista seuraavia suureita (suluissa kustakin suureesta käytetty merkintä sekä mittayksikkö):

- suhteellinen kosteus (RH, %)
- lämpötila (T, °C)
- hapen pitoisuus (O_2 , tilavuus-%)
- hiilidioksidin pitoisuus (CO_2 , ppm)
- tVOC-pitoisuus (tVOC, ppb) eli haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuus
- rikkivedyn pitoisuus (H_2S , ppm)
- aox-homeiden läsnäolon toteamiseen käytettiin syanidia (KCN, ppb) ja rikkivetyä

Mittausvälinä käytettiin 1 min kaikille suureille. Tulokset tallennettiin automaattisesti tietokoneelle.

Kammioilman suhteellinen kosteus näissä kokeissa oli välillä 20...85 % RH, lämpötila +25...30 °C ja happipitoisuus n. 20 %.

Tulosten tulkintaan vaikuttavia seikkoja

Saven vaikutus mikrobilajistoon

Savinen ympäristö suosii orgaanisia yhdisteitä ravinnokseen käyttäviä bakteereita homeiden ja hiivojen kustannuksella. Tämä havaitaan tVOC-yhdisteiden pitoisuuksien vähenemisenä samalla kun hiilidioksidipitoisuus nousee.

Hiilidioksidipitoisuus

Hiilidioksidin (CO₂) tyypillinen taustapitoisuus huoneilmassa on luokkaa 430–450 ppm. CO₂:n kohonnut pitoisuus indikoi kammiomittauksissa mikrobitoiminnan intensiteettiä, koska CO₂:n lähteet ovat materiaalit sekä kammioissa olevien mikrobien aineenvaihdunta. Samoin tVOC-pitoisuuksien kohoaminen kammio-olosuhteissa ilmaisee haitallisia materiaalipäästöjä.

Aox-homeiden esiintymisen todentaminen/ poissulkeminen

Tutkimusnäytteissä aox-homeiden läsnäolo voidaan todeta lisäämällä kammioon mitokondrioiden toimintaa estävä määrä (0,01–1 mg/1 L) rikkivetyä (H₂S) tai syanidia (CN). Mikäli tämän jälkeen tVOC päästö tutkimusnäytteestä pysähtyy, näyte ei sisällä homeita tai hiivoja, joilla on aox-mitokondriot. Mittaukset on tehty laboratorio-olosuhteissa vetokaapissa ja suljetuissa lasikammioissa, jolloin syanidin (myrkyllinen kemikaali) sekä rikkivedyn (hermomyrky) turvallinen käsittely on mahdollista.

tVOC-anturin toiminnan testaaminen

tVOC -anturin toiminnan testiin käytettiin tolueenia (1 µl/kerta annos). Se estää bakteriosidisenä kammiossa saven bakteerien toimintaa, mikä on otettu huomioon tulosten tulkinnassa.

Taulukko 1. Tutkittujen savien (101-115), kutterinlastujen (201-207) ja hamppukuivikkeen (301) alkuperä.

Nro	Nimi	Alkuperä
101	Tiileri savijauho	Seppälän Tiili Oy, Tarvasjoki
102	Kultelan Tiiliputki	Kultelan Tiiliputki Oy, Somero
103	Savitalli	Savitalli 1908, Merimasku
104	Hirvensalo	Hirvensalo, Turku
105	Kurala	Kurala, Turku
106	Sipoo	Talma, Sipoo
107	Viro	Aseri, Viro
108	Latvia	Latvia
109	Espoo	Olarinluoma, Espoo
110	Raikkonen	Raikkonen Oy, Loimaa
111	Tiileri raakasavi	Seppälän Tiili Oy, Tarvasjoki
112	Heinon Tiilitehdas	Heinon Tiilitehdas, Somero
113	Potilantiili	Potilantiili, Hämeenkyrö
114	Wienerberger	Wienerberger, Korja, Kouvola
115	Kirstinpuisto	Kirstinpuisto, Turku
201	Pölkky	Pölkky farm- kuivike, Pölkky Oy, kutterinlastua männystä ja kuusesta
202	Savettu Pölkky	Savettu Pölkky-kutterinlastu , ES1
203	Mänty	Restart Oy
204	Kuusi	Restart Oy
205	Haapa	Restart Oy
206	Siperianlehtikuusi	Restart Oy
207	Ehta	Ehta-eriste, Ehta Talot Oy, kutterinlastua kuusesta
301	Hamppukuivike	Hemparade hamppukuivike, HempFlax, Hollanti

Tutkimustulokset

Seuraavassa esitetään tehtyjen kokeiden tulokset ja johtopäätökset.

1. *Puu 201, 10 g (Pölkky Oy, kutterinlastu mänty ja kuusi) ja savi 101, 20 g (Tiilerin savijauho)*

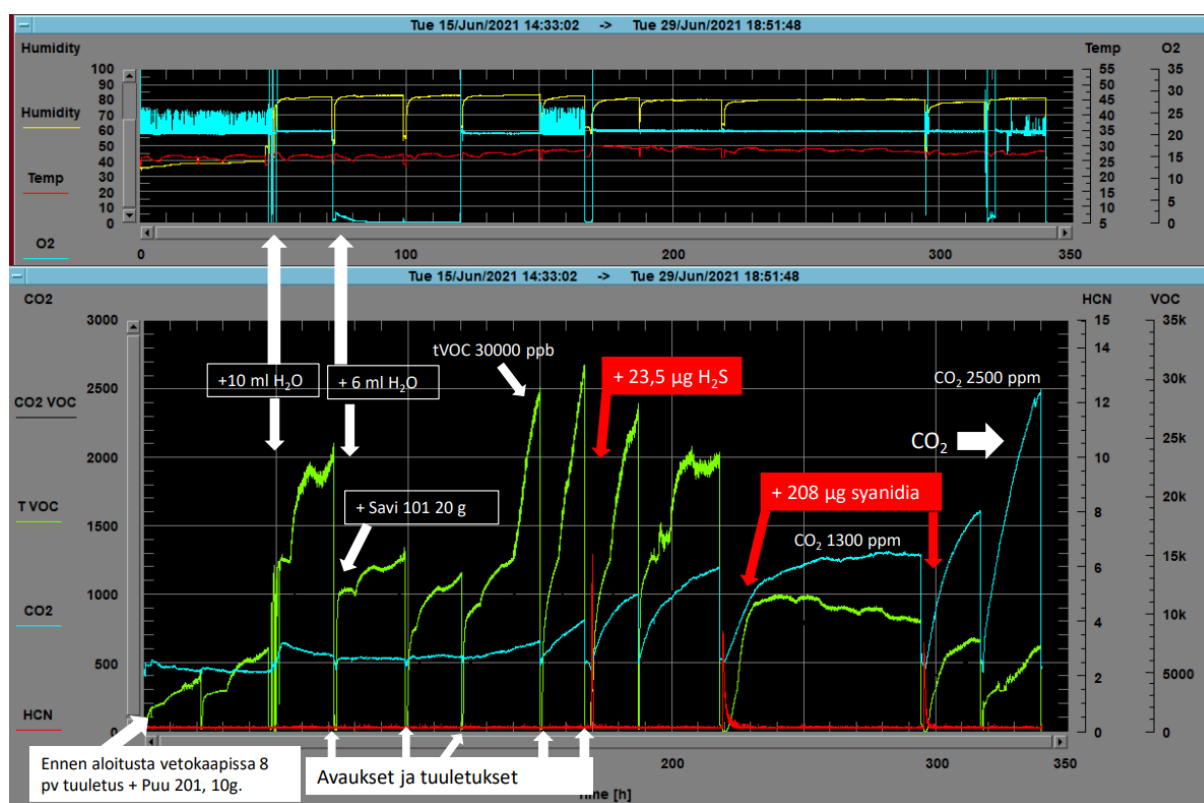
Ennen mittauksen aloitusta puuta 201 tuuletettiin vetokaapissa 8 päivää (24 h x 8). Sitten kansi suljettiin, tällöin VOC:in lukema oli 4000 ppb:n luokkaa ja CO₂ oli myös sisäilman tasolla (450 ppm). Mittaustulokset on esitetty kuvassa 1.

1h kuluttua tVOC nousi yli 5000 ppb:n, mutta CO₂ pysyi edelleen huoneilman tasolla (450 ppm) ja RH 38–40 % edelleen sama kuin sisäilman. Veden (10 ml) lisäys nosti RH 40=>80 % ja nosti tVOC >20 000 ppb.

Lisättiin 20 g Savea 101 ja 6 ml vettä. Tunnin tuuletukset 2x päästi tVOC:a ulos kammioista. RH % oli tasainen, 80 % ja tVOC:n tuotto jatkui. CO₂ alkoi kertyä kammioilmaan 3 vrk saveen lisäyksen jälkeen.

H₂S:n lisäys (23,5 µg) ei merkittävästi pysäyttänyt tVOC tuottoa. Syanidilisä pysäytti tVOC:n tuoton 10 000 ppb:n tasolle, (1/3 osa aiemmasta tasosta). Tämä viittaa siihen, että tVOC ei ollut aox-homeiden tuottamaa.

tVOC:n tuotanto riippui homeiden tai hiivojen aktiivisuudesta, koska syanidi pysäytti sen. Sen sijaan CO₂:n tuotantoa syanidi ei pysäyttänyt. Näin ollen saveen käynnistämä CO₂ tuotto oli todennäköisesti bakteeriperäistä, koska homeiden toiminta oli pysäytetty syanideilla.



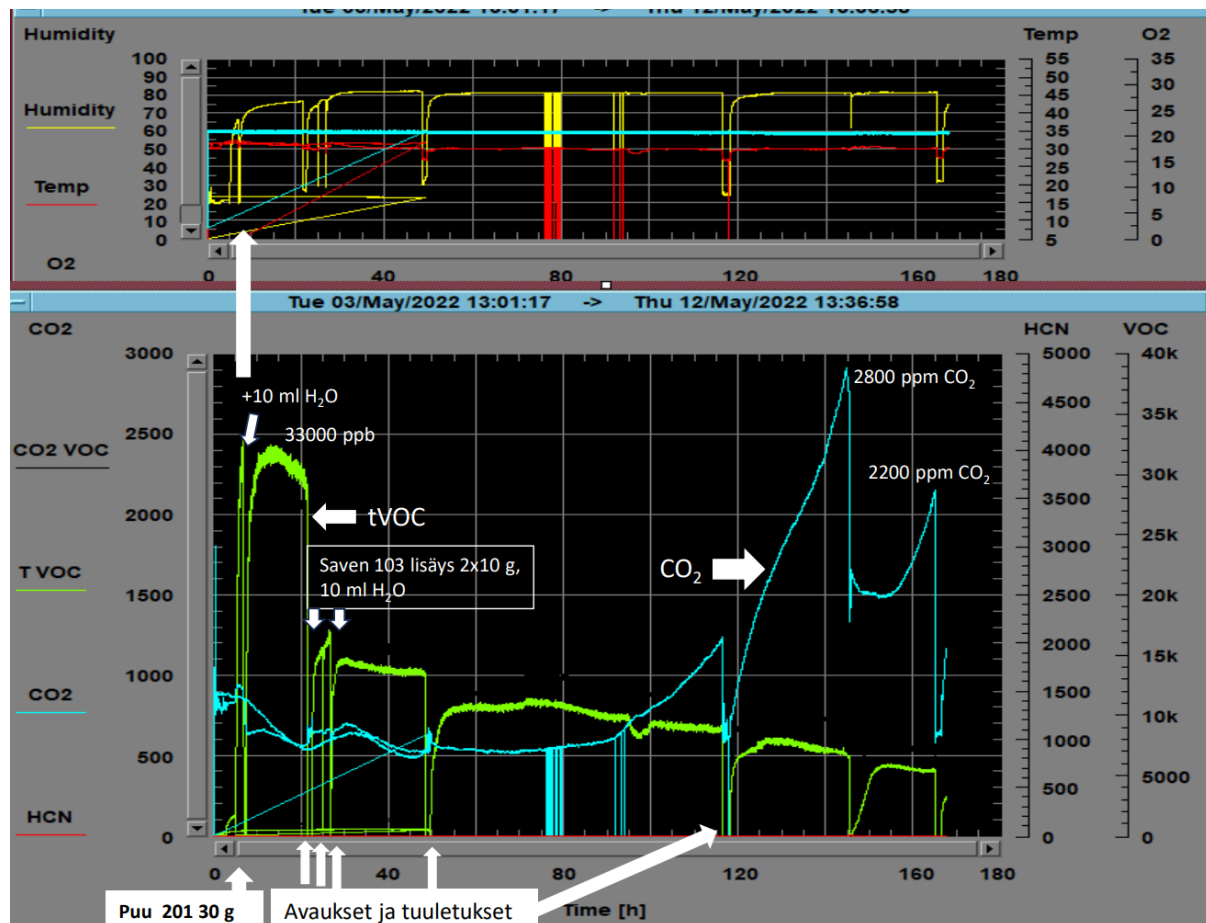
Kuva 1. Havupuun kutterinlastun päästämittaukset ja saveen vaikutus päästöön (v. 2021) kokeessa 1.

Tulosten tulkintaa

Materiaali oli ohutta kutterinlastua, jossa oli paljon pintaa. tVOC päästö oli tässä vielä enemmän kuin (v 2022) kuvassa 2. Saven sekoittaminen kosteaan kutterinlastuun pudotti tVOC päästön vasta n. 5 vrk kuluttua, kun saven bakteeristo alkoi kasvaa käyttäen tVOC yhdisteitä ravintona. Tällöin tVOC putoaa $\frac{1}{4}$ osaan, (30 000 ppb => 7 000 ppb). Toistuvista tuuletuksista huolimatta loppua kohden CO₂ taso 5-kertaistui seuraavan 5vrk aikana. Tässä näkyy, kuinka tVOC:n nopea nousu liittyi RH %:n nousuun. Saven VOC-aineita hajottavien bakteerien toiminta näkyy CO₂ -tasossa vasta, kun niiden määrä on kasvanut riittävästi, mihin kuluu 3–5 vrk.

2. Puu 201, 30 g (Pölkky Oy, kutterinlastu mänty ja kuusi) ja savi 103, 10 g (Savitalli 1908)

Kokeessa huoneen lämpötila oli 32 °C, RH oli matala (21,5 %). Lisättiin 10 ml vettä, RH 66 %. tVOC nousi 1000 ppb:stä yli 30 000 ppb 8 h:ssa. Saven 103 (2 x 10 g) ja vettä 10 ml lisättiin ja tehtiin useampi tuuletus, jolloin tVOC ja CO₂ poistui. tVOC nousi enää tasolle 15 000 ppb:n. 140 h kuluttua aloituksesta, CO₂ -tuotanto nousi tasolle 2800 ppm. tVOC laski 600 ppb:hen, mutta sen tuotto palautui kuitenkin tuuletuksen jälkeen. CO₂ nousi taas 2 200 ppm (=saven bakteerien toiminta käynnistyi) (kuva 2).



Kuva 2. Havupuun kutterinlastun päästömittaukset ja saven vaikutus päästöön (v. 2022) kokeessa 2.

Mittaus tehtiin v. 2022, eli paperipussissa säilytetyssä puuaineksessa oli jo tapahtunut tVOC:n haihtumista. Puun 201 määrän suhde kammion ilmatilaan ja saven 103 määrään on huomioitava ja mitatut tVOC-päästöt olivat varsin suuria.

Tulosten tulkintaa

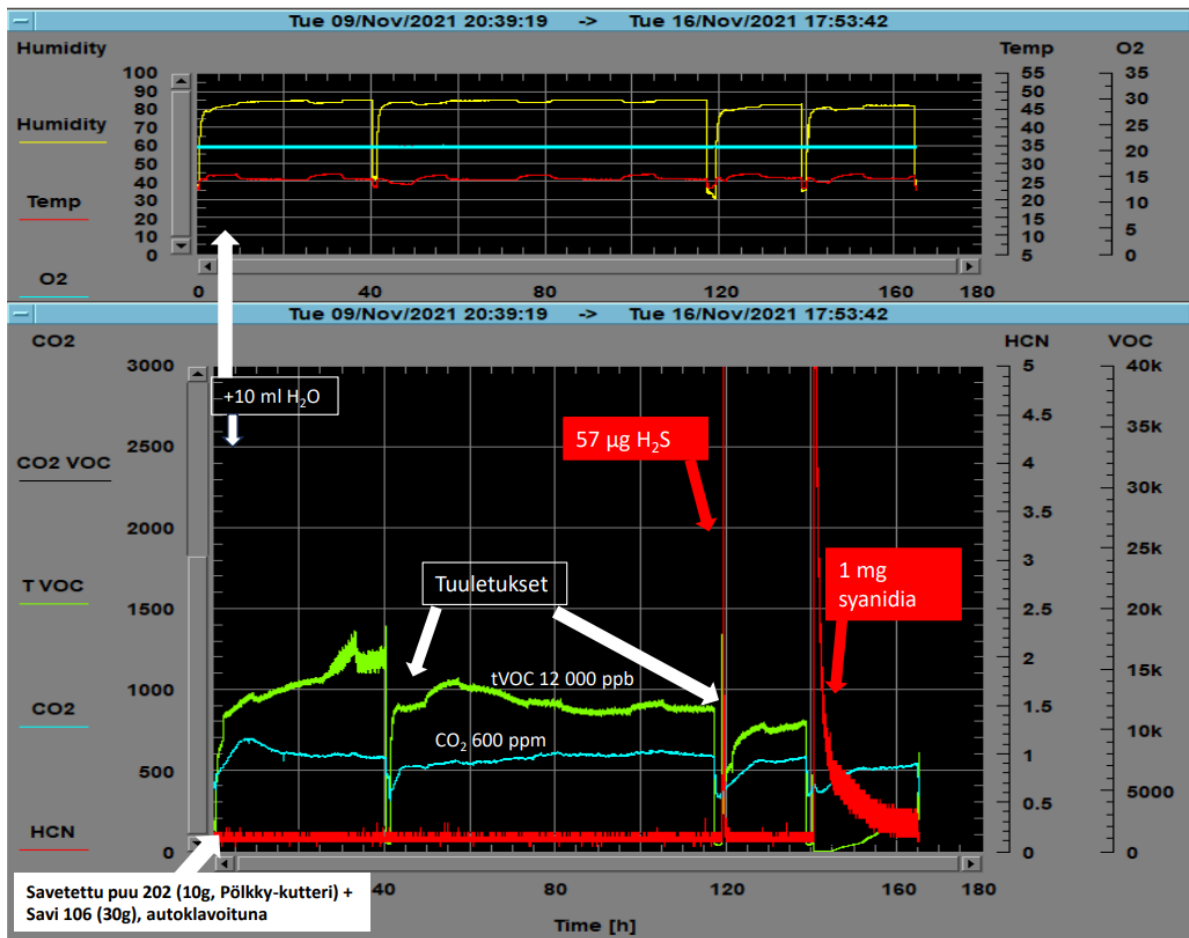
RH % noustessa tVOC nousee ennen saven lisäystä, eli vesi nostaa tVOC:n antureille. Savi sekoitettu kostutettuun kutterinlastuun puolitti tVOC-päästön, 33 000 ppb => 15 000 ppb. Tuuletuksesta huolimatta 5 vrk CO2 taso 5-kertaistui seuraavan 70 h aikana.

3. *Puu 202 (Savettu Pölkky kutterinlastu mänty ja kuusi, ES1) ja savi 106 (Talma, Sipoo) autoklavoituna*

Autoklavoinnin jälkeen lisättiin vettä 10 ml => RH nousi 43—>65 %. tVOC nousi tasolle 12 000 ppb ja CO2 oli 730 ppm. 40 h kuluttua tVOC oli 12 000 ppb, mikä kertoo puun sisältämästä pihkasta, jota autoklavointi ei vähennä (kuva 3).

Rikkivedyn (57 µg H₂S) lisäyksen jälkeen tehdyt tuuletukset eivät vaikuttaneet CO2 tasoon. Syanidin lisäys (1 mg pH 9), sammutti tVOC:n tuoton. Tuuletukset tosin alensivat tVOC jäämiä kammioista.

Vertaa kuvaan 4, jossa haapapuun tulokset: se tuottaa vähemmän tVOC:a.



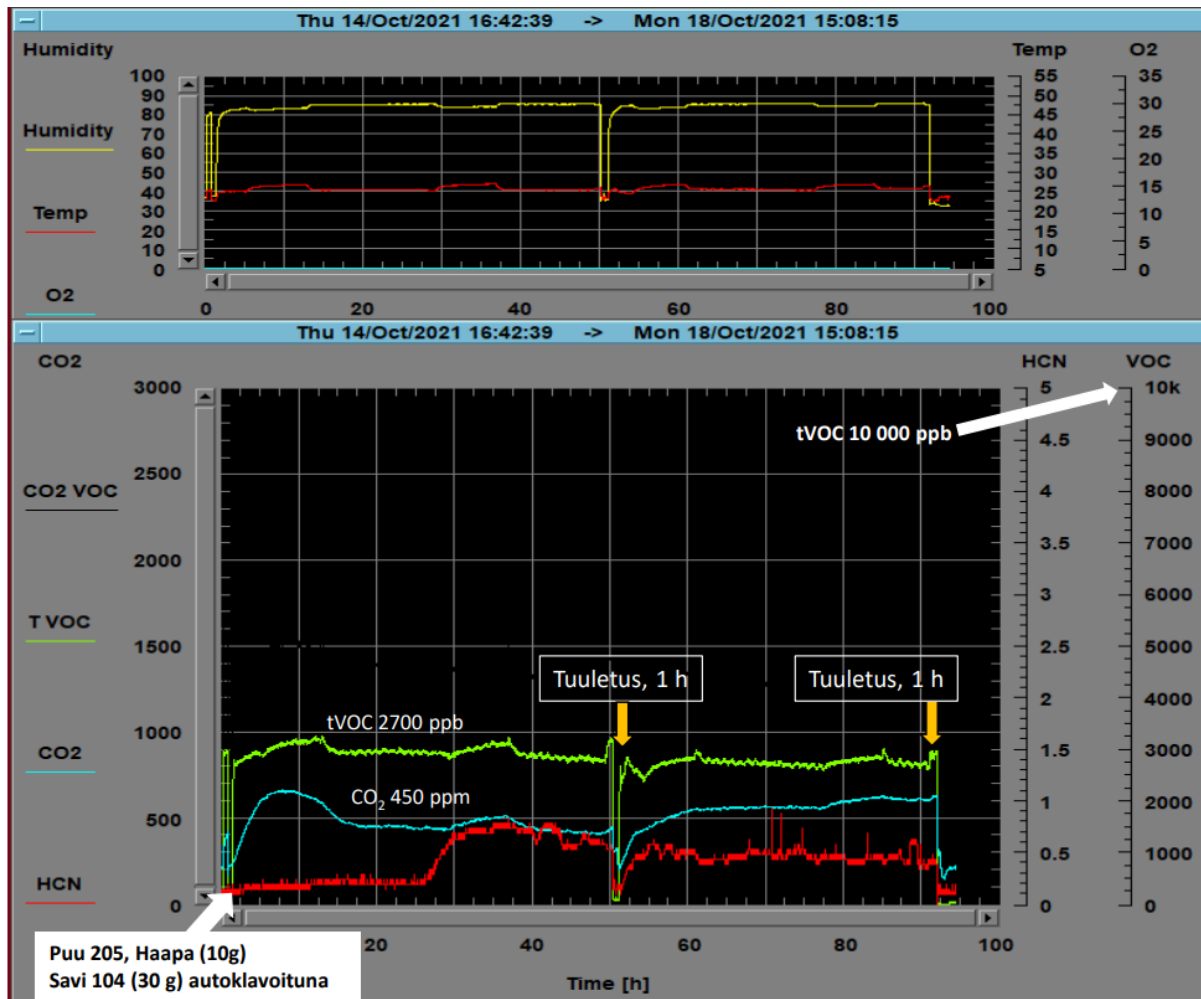
Kuva 3. Kuumennuskäsittelyn (autoklavointi, 121 °C, 20 min, RH 100 %) vaikutus savetetun kutterinlastun ja saven mikrobitoimintaan kokeessa 3.

Tulosten tulkintaa

Kuumennuskäsittely haihdutti puusta tVOC:a ja poisti kutterinlastun kyvyn tuottaa uutta tVOC:a tuuletuksen jälkeen.

4. Puu 205 10 g (Haapa Restart Oy) ja savi 104 (Hirvensalo, Turku) 30 g autoklavoituna

Puu 205 Haapa (10 g) ja Savi 104 (30 g) yhdessä autoklavoituna. H₂S /HCN anturi ei ole toiminut (punainen käyrä). Heilahdus CO₂ tuloksessa oli ilmanvaihtokoneen käyntiä. tVOC lukemat eivät tuuletuksesta muuttuneet ja olivat vain 1/6 osa kuuseen verrattuna, tosin tässä kuvassa oli 1/3 osa vähemmän puuta kuin kuvassa 3 havupuuta. Huomio tVOC akselin ero verrattuna muihin kuviin.



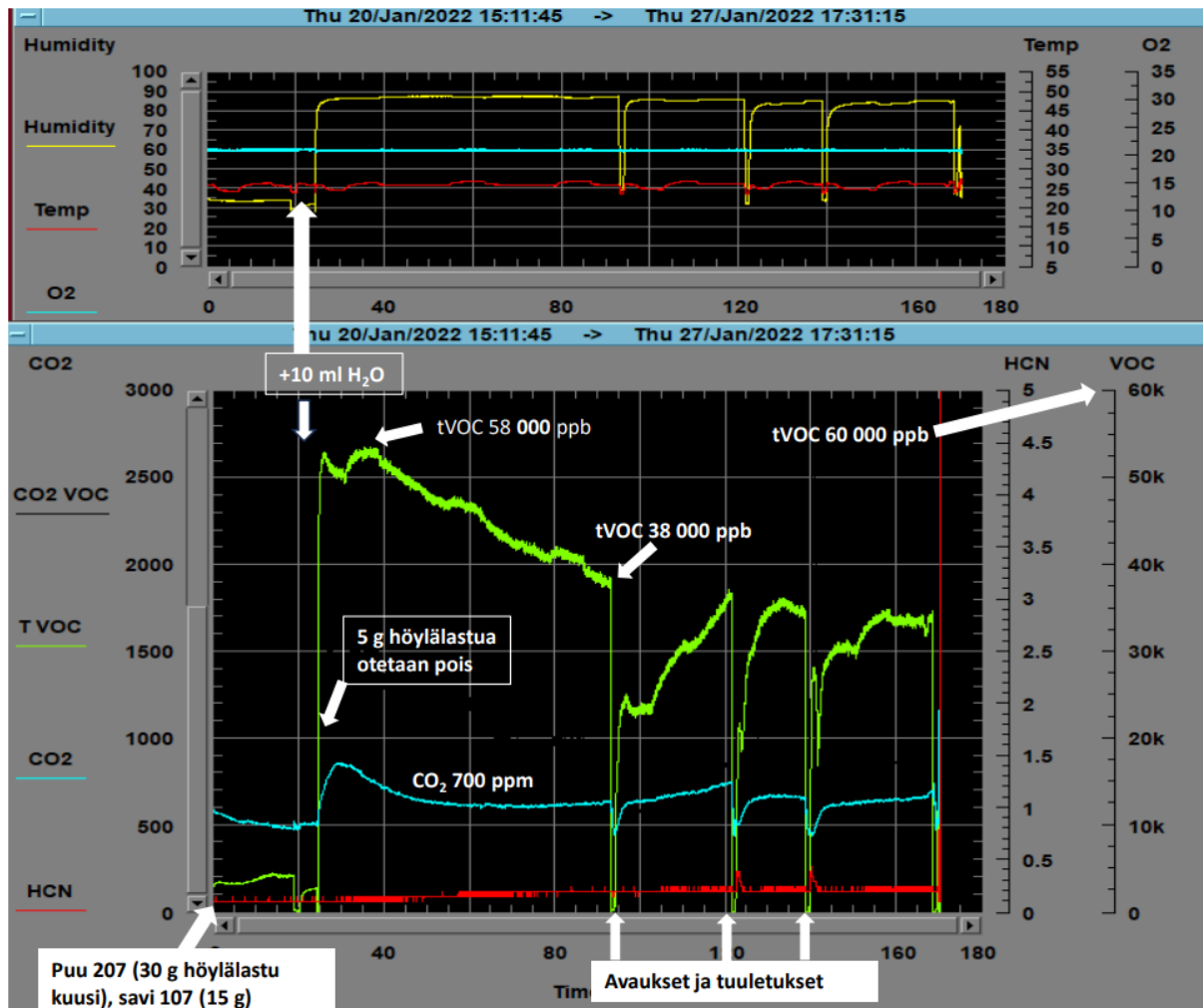
Kuva 4: Kuumennuskäsittelyn (autoklavointi, 121 °C, 20 min, RH 100 %) vaikutus haavan kutterinlastun ja saven mikrobitoimintaan.

Tulosten tulkintaa

Kuumennuskäsittely haihdutti puusta tVOC:a ja poisti haapapuun kyvyn tuottaa uutta tVOC:a tuuletuksen jälkeen.

5. Puu 207 30 g (Ehta-eriste, Ehta Talot Oy, kutterinlastua kuusesta) ja savi 107 15 g (Aseri, Viro).

Puu ja savi heti lähtötilanteessa. RH oli 34 %, jopa 29 %. tVOC oli lähtötilanteessa 3000–4000 ppb:tä. Veden lisäys (10 ml) seuraavana päivänä nosti RH 87 %:n tasolle. 5 g kutterinlastu-savea otettiin pois kammiosta. Ilman kosteuden nosto aiheutti tVOC:n aerosolisoitumisen (58 000 ppb) joka siitä laski 38 000 ppb:n tasolle. N. 90 h kuluttua tuuletettiin 1 h, tVOC nousi 35 000 ppb:tä asti, mikä oli tVOC:in tasapainottumista kammiassa. Kahdesta tuuleduksesta huolimatta RH pysyi tasolla 80–90 % ja tVOC jatkui tasaisena.



Kuva 5: Veden lisäyksen jälkeen muodostunut vesihöyry kuljetti tVOC yhdisteet puumateriaalista kammioilmaan.

Tulosten tulkintaa

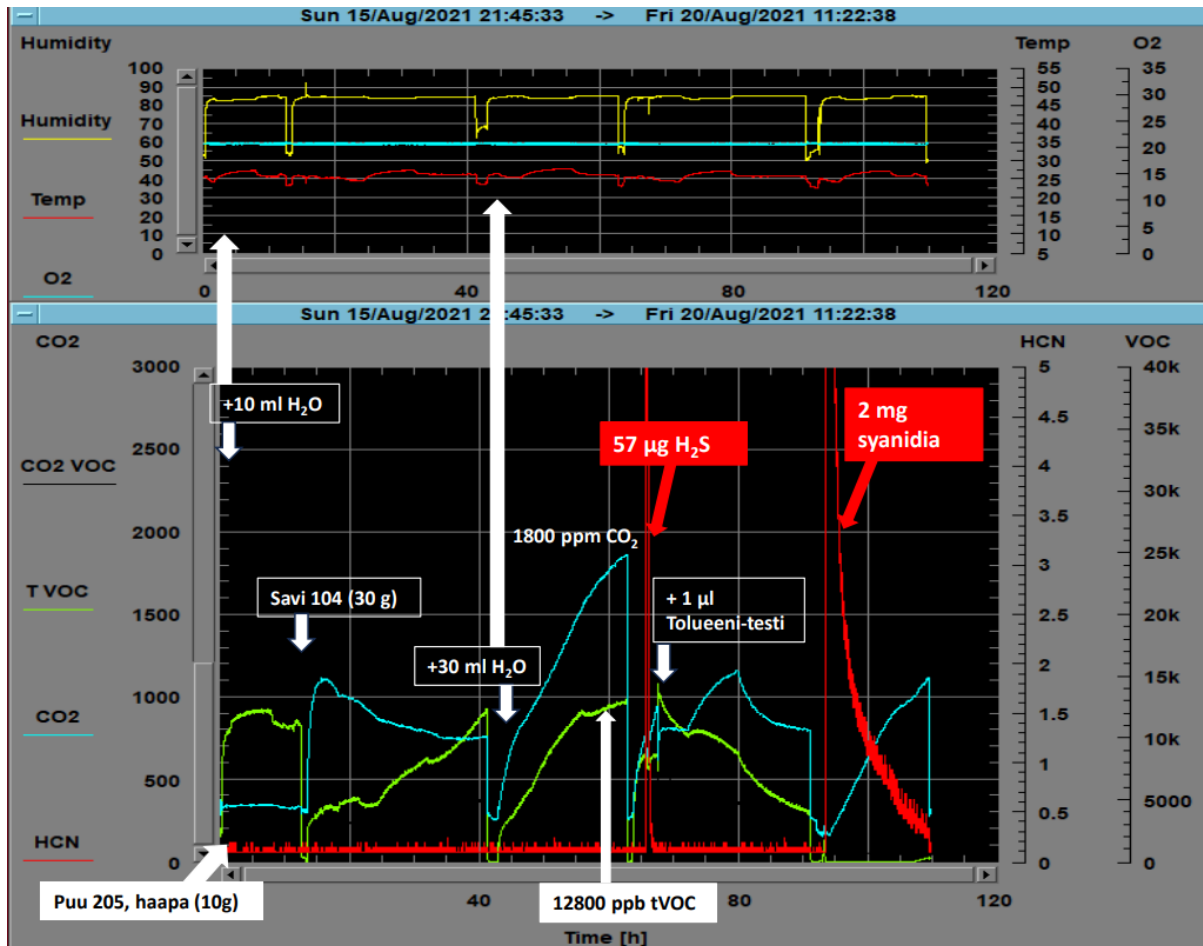
VOC aineiden kulkeutuminen kutterinlastusta kammioilmaan on fysikaalinen prosessi, johon ei liity mikrobiologiaa. Osa tVOC -ainesta tahmaantui lasikammion sisäseinille, eikä siis tavoittanut pohjalla olevaa savea (=mikrobeita), joten CO₂ :ta ei voinut muodostua tältä osin.

6. Puu 205 10 g (Haapa, Restart Oy) ja savi 104 (Hirvensalo, Turku) 30 g.

Saven pH oli alussa alkalinen. Puu 205, 10g, RH lähtötilanteessa 53 %, 10 ml veden lisäys ja seuraavana päivänä lisättiin Savi 104, 30 g. Savea nyt peräti 6x enemmän suhteessa puun määrään, kun verrataan edelliseen kuvaan 5.

Karbonaattipitoisen saven 104 lisäys nosti CO₂ -pitoisuuden tasolle 1100 ppm, koska savetun materiaalin pH oli 5,8 (hapan). Tämä mahdollistaa karbonaatin vapautumisen. Vettä oli yhteensä 40 ml (=kammio märkänä), jolloin savesta vapautunut CO₂ (1800 ppm), tVOC 12800 ppb.

Lisättiin 57 µg H₂S. tVOC anturi kalibroitiin 1 µl tolueenilla, tVOC 14 000 ppb. tVOC lähtee kuitenkin laskuun n. 90 h kohdalla aivan nolllille. Kansi suljettu ja lisätty syanidia 2,0 mg. CO₂ tuotto lisääntyi. Syntyneen CO₂ päästölähde todennäköisesti oli karbonaattipitoinen savi. Lopussa nähtävä tVOC nollataso sopisi siihen, että aox-homeita ei ollut läsnä.



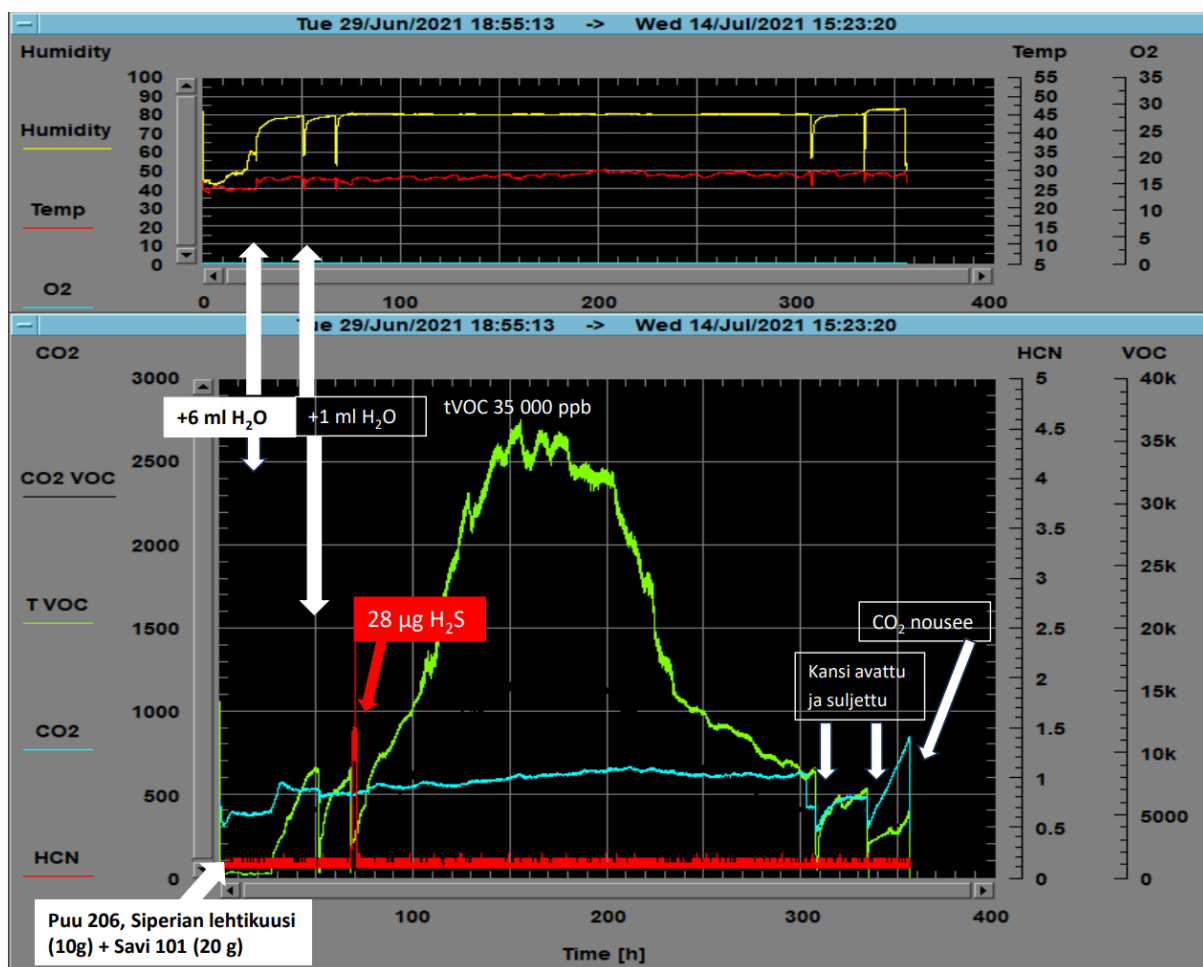
Kuva 6: Haapa vapautti vähemmän tVOC:a kuin havupuut. Veden lisäys saveen vapautti siitä karbonaatit tuottaen CO₂:a, kun pH <6. Tulokset eivät viittaa mikrobien rooliin.

Tulosten tulkintaa

Haapapuun tVOC:a päästö oli matalampi kuin havupuiden. Tässä oli eniten kalsiumkarbonaattia sisältävä savi (104), joka näkyi CO₂ voimakkaana päästönä. Savea ja vettä oli suhteessa puuhun paljon. Jos ympäristön pH on hapan, CO₂ vapautuu karbonaattipitoisesta savesta, eikä se silloin ole osoitus bakteerien kyvystä käsitellä tVOC:a.

7. Puu 206 10 g (Siperianlehtikuusi, Restart Oy) ja savi 101 (Seppälän Tiili Oy, Tarvasjoki) 20 g

Havupuista valmistettu kutterinlastu sisältää aina puuperäistä pihka-ainetta. Lähtötilanteesta tuuletus 0,5 h. Alussa nähtiin 2x tVOC:n nousukuvajan jyrkkä muoto. Lisättiin H₂S 28 µg ja 1 ml tislattua vettä sekä tuuletettiin. H₂S:n lisäys ei vaikuttanut lehtikuusesta vapautuvan pihka-aineen tVOC:n päästön nopeuteen. Kammion huoneilma oli kuivaa (RH 40-50 %), mutta kun vesi lisättiin, Siperianlehtikuusen tVOC:n päästö jatkui pitkän aikaa. 300 h kuluttua tVOC tuuletettiin pois, mutta CO₂ -emissiota ei syntynyt, vaikka savea oli läsnä. Tämä johtunee siitä, että tVOC oli lasikammion seinämällä, eikä savi päässyt sitä käsittelemään. Vasta kun uutta tVOC:a muodostui tuuletusten jälkeen, silloin savi sai sen kiinni (puun oli saveen kanssa lasikammion pohjalla).



Kuva 7: Vasta kun RH nostettiin 80 %:iin, alkoi tVOC emittoitua kammioilmaan.

Tulosten tulkintaa

Vasta kun vettä lisättiin (6 ml), RH nousi tasolle 80 %. Koe osoittaa ilmankosteuden tärkeän roolin tVOC-aineksen (tässä: puupihkan) kuljettajana kammion sisäilmassa. CO₂ :a alkoi muodostua tVOC:sta siltä osin, mikä oli kosketuksissa kammion pohjan saveen (300 h jälkeen). Kammio oli yli 200 h avaamatta, ja CO₂ -taso ei muuttunut, koska kun ilma oli

kosteaa, pihka mobilisoitui ilmaan ja vähitellen tarttui tahmaisen lasikammion sisäpintaan (200–300 h aikana) josta mikrobit eivät päässeet käyttämään sitä ravintona.

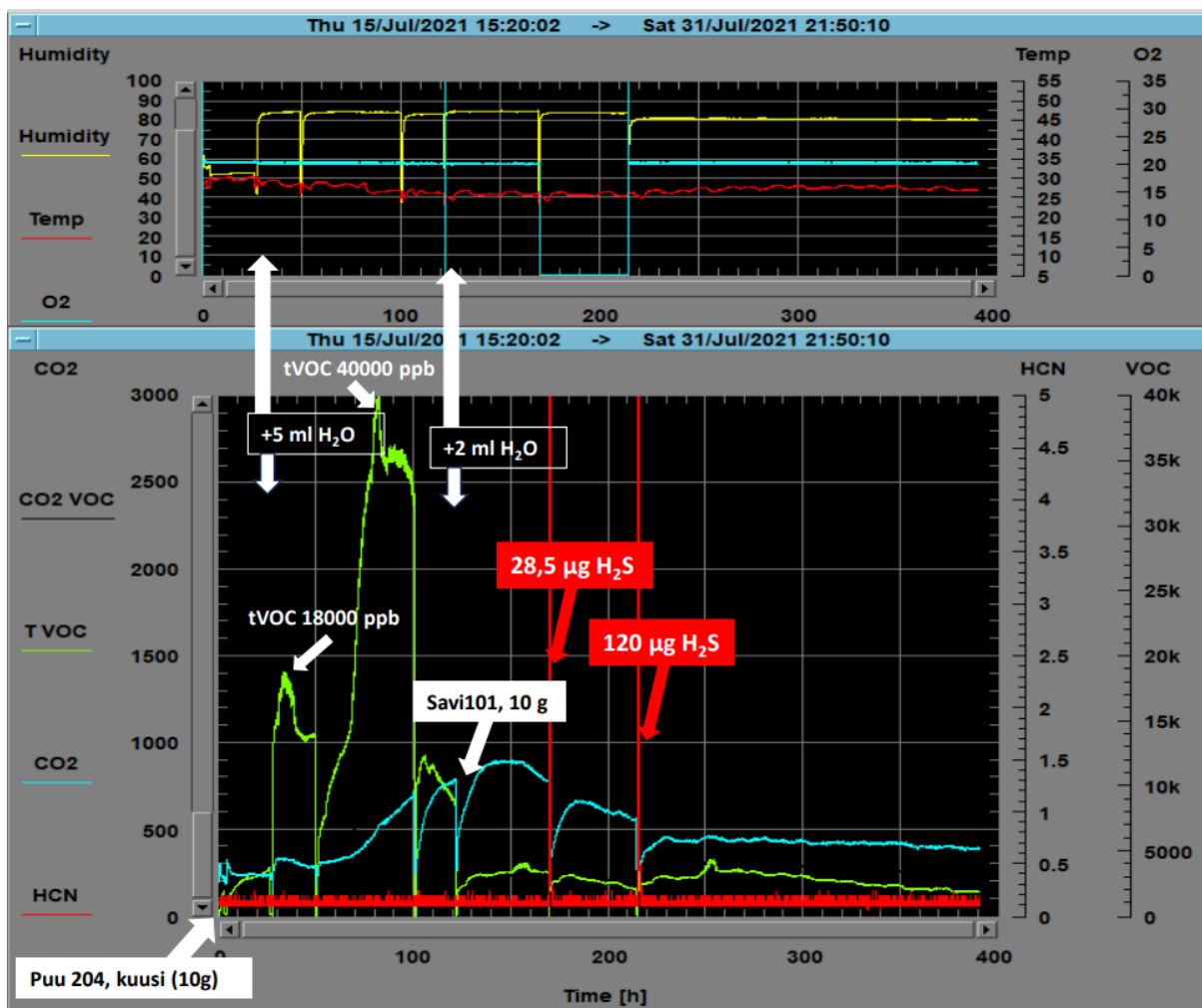
8. Puu 204 (Kuusi, Restart Oy) 10g, Savi 101 (10 g)

Puu 204 kuusi 10 g, RH on 55 %. Lisätty vettä 5 ml => RH 70-85 %. Tällöin tVOC lähti nousuun 18 000 ppb. tVOC poistettiin tuulettamalla 0 ppb tasolle, mutta tVOC:n nousi tuuletuksen jälkeen <30 h jopa tasolle 40 000 ppb, jonka jälkeen tehtiin uusi tuuletus.

CO₂ alkoi nousta 800 ppm tasolle jo ennen saven lisäystä. Kun savi 101 lisättiin, 10 g + 2 ml vettä => tVOC lähti laskuun, 1200–3300 ppb tasolle ja jäi pysyvästi matalaksi.

Päästetty tVOC ja CO₂ ulos, ja lisättiin 28,5 µg H₂S:ä, tVOC 3000–2000 ppb ja CO₂ oli 450–500 ppm. Lisättiin 120 µg H₂S => tVOC laski alle 2000 ppb.

Alle 120 h ajan kuusen tVOC haihtui ilmaan. Tämän jälkeen lisätty savi sai tVOC pysymään matalana, mutta ei ainoastaan matalana vaan CO₂/tVOC:n suhteen nousu viittasi siihen, että tVOC muuntui CO₂:ksi.



Kuva 8: Kuusen erittäin nopea tVOC nousu kammion seinämille veden lisäyksen jälkeen.

Tulosten tulkintaa

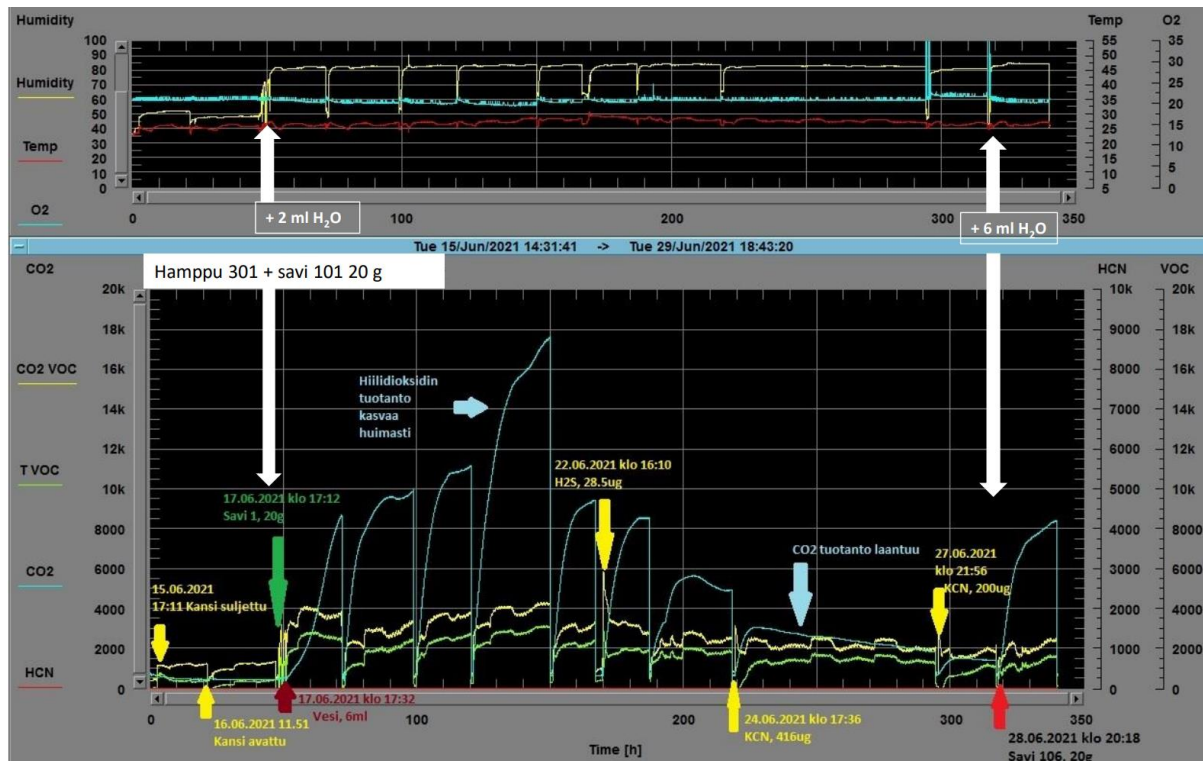
Kun kuusen pihka kostutettiin (RH 80 %), vesihöyryn kuljettama tVOC aerosolisoitui nopeasti ja osin tarttui kammion seinämille. Kuusipuu 204 sai CO₂:n tuoton nousuun jo ennen saven lisäystä.

9. Verrokkimateriaali, hamppu 301 (10 g) sekä Savi 101 ja Savi 106.

Verrokkimateriaali (hamppu) 301, 10 g, kammioon. Kun RH % on 40–50 %, vielä ei syntynyt tVOC:a tai CO₂:a. Kun lisättiin savea 101, (20g) ja vettä 6 ml (RH nousi 80 %) jolloin samalla CO₂ nousi 450 => 8500 ppm. Tuuletus 3 kertaa, kuitenkin kammioilman CO₂ nousi 17 000 ppm:n (37-kertaisesti)! tVOC taso liikkui 2500 ppb:n tasolla (vihreä viiva). Keltainen viiva oli laskennallinen tVOC, sitä ei ole mukana muissa kuvissa. Mikään testattu puumateriaali ei tuottanut näin paljoa CO₂:a.

Neljäs tuuletus laski CO₂:n 9000 ppm:n tasolle, ja H₂S lisäyksen jälkeen CO₂:n tuotto laski vähitellen 5000 ppm:ään. Kun 24.6.21 syanidi lisättiin, CO₂ putosi alle 2000 ppm tasolle. Toinen syanidi lisäys 27.6.21 ei vaikuttanut tVOC tasoon merkittävästi. 28.6.21 lisättiin savea 106, 20 g sekä 6 ml vettä lisätty, jolloin CO₂ nousu yli 8000 ppm. Hampun läsnä ollessa tVOC ei juurikaan nouse.

On mahdollista, että CO₂:n voimakas muodostus oli osaksi peräisin saven 106 sisältämästä karbonaatista. Verrattuna muihin tutkittuihin puulaatuihin, verrokissa oli 10–200 kertaa enemmän kivennäisiä kuin muissa puulaaduissa. Bakteerien toimintaa tukevat runsas fosfori (P), rauta (Fe), typpi (N), kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg).



Kuva 9: Hampputuote, jauhettua purua: ominaispinta-ala suuri kutterinlastuun ja kutteriin verrattuna.

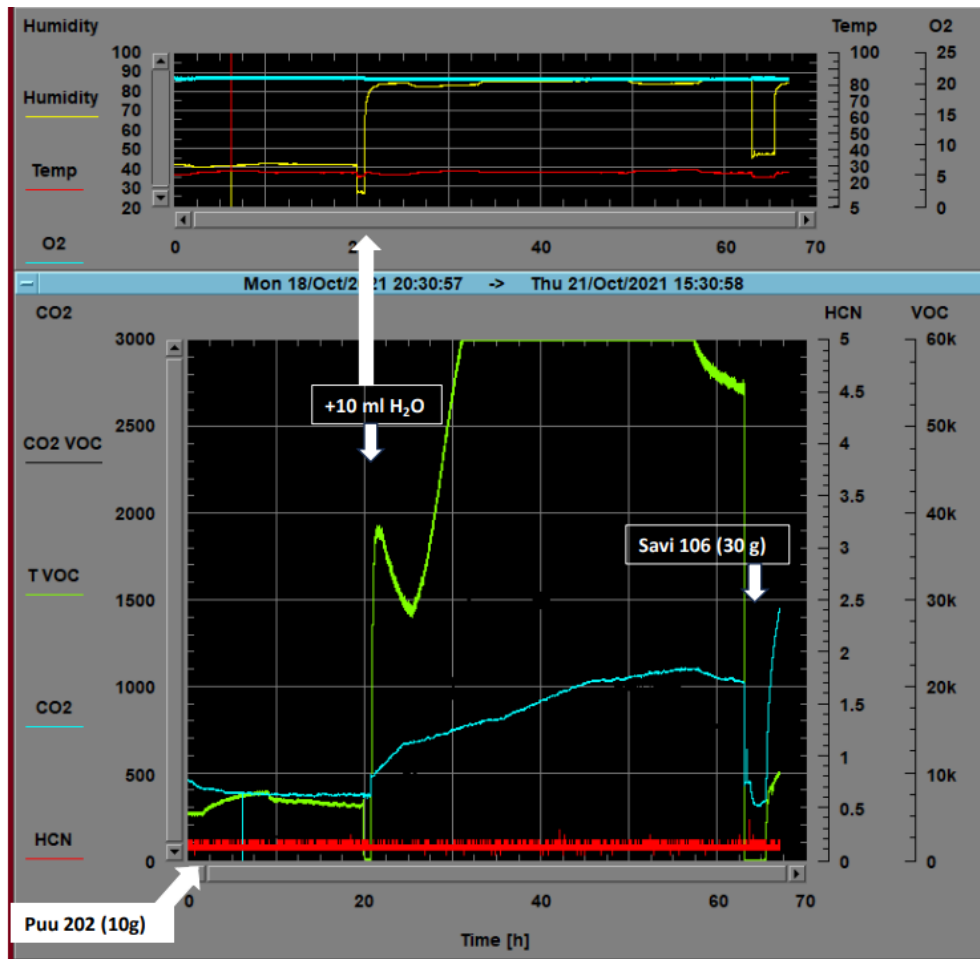
Tulosten tulkintaa

Tämä oli ainoa tutkittu materiaali, jossa CO₂ :n voimakas tuotto käynnistyi 10 h sisällä vesilisäyksestä. Savi 101 ei ole karbonaattipitoisin, ja se ei havupuilla saanut tällaista CO₂ -päästöä aikaan. Bakteerien toimintaa tukevat verrokin 301 erittäin runsas fosfori (P), rauta (Fe), typpi (N), sekä runsas kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg) pitoisuus.

Suomalainen järviruoko saattaisi olla vastaavasti toimiva materiaali kuin tämä verrokki.

10. Savetettu Pölkky-kutterinlastu, näytetunnus ES1(10 g)

Savettu Pölkky-kutterinlastu, näytetunnus ES1, päästi antureiden mittauskyvyn ylittävän määrän tVOC:a heti kun se kostutettiin (10 ml vettä). CO₂:n tuotto moninkertaistui tasolle 1000 ppm vuorokaudessa. Saven 106 (karbonaattipitoinen) lisäys nosti CO₂:n tuottoa lisää.



Kuva 10: Puu202 (Savettu Pölkky-kutterinlastu, ES1).

Tulosten tulkintaa

Ennakkoon tehty savetus ei tässä kokeessa näyttänyt ehkäisevän kostutukseen liittyvää tVOC:n runsasta tuottoa. Tässä näytteessä CO₂:n tuotanto kaksinkertaistui kostutuksen jälkeen vuorokaudessa.

ECOSAFE – KOERAKENNUSMITTAUKSET

Koerakennusmittausten tulokset

Jaakko Hietikko
jaakko.hietikko@tuni.fi

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	3
2 KOERAKENNUSMITTAUKSET	5
2.1 Koerakenteet.....	5
2.2 Rakennetyypit	6
2.2.1 E1: Tiilijulkisivu, kipsituulensuoja, kutterinlastueriste, höyryns.....	7
2.2.2 E2: Puukuitutuulensuoja, savetettu kutterinlastueriste	8
2.2.3 E3_S: Savituulensuoja, kutterinlastueriste	9
2.2.4 E3_V: Kivivillatuulensuoja, kutterinlastueriste	10
2.2.5 E4: Puukuitutuulensuoja, kutteripurueriste	11
2.2.6 E5: Kivivillatuulensuoja, savetettu kutterinlastueriste	11
2.2.7 E6: Kivivillatuulensuoja, kivivillaeriste.....	14
2.2.8 E6_V: Kivivillatuulensuoja, kivivillaeriste	15
2.2.9 W5: Tiilijulkisivu, kipsituulensuoja, lasivillaeriste, höyryns.	16
2.3 Rakenteiden valmistus	18
2.3.1 Koe-elementit.....	18
2.3.2 Anturointi	19
2.4 Mittausjärjestelyt	21
2.4.1 Koerakennukset.....	22
2.4.2 Olosuhteiden seuranta.....	23
3 TULOKSET	25
3.1 Rajaukset.....	25
3.1.1 Tarkastelujakson valinta.....	25
3.1.2 Tarkastelupisteiden valinta.....	29
3.2 Vertailutapaukset	31
3.2.1 Tuulensuojalevy	31
3.2.2 Eistemateriaali	32
3.2.3 Anturin sijainti	32
3.2.4 Ilmansuunta	33
3.3 Tulokset	33
3.3.1 Eristeen kohdalla, pohjoisjulkisivu	34
3.3.2 Runkotolpan vieressä, pohjoisjulkisivu	37
3.3.3 Eristeen kohdalla, eteläjulkisivu	40
3.3.4 Runkotolpan vieressä, eteläjulkisivu.....	43
3.4 Yhteenveto.....	46
3.5 Jatkotutkimukset	48
3.6 Virhearvio.....	48
LÄHTEET	49

1 JOHDANTO

Purueristeiden kosteusteknisestä toiminnassa on hyviä kokemuksia jo vuosikymmenten takaa, mutta ECOSAFE-projektissa haluttiin selvittää kutterinlastueristeiden toimintaa uudemmissa paksummin eristetyissä seinärakenteissa (Vinha, 2019). Projekti koostui useista eri osista, joista tässä käsitellään koerakennuksilla tehdyt koerakenteiden mitaukset tuloksineen. Myöhemmin ECOSAFE2-projektissa tutkimusta laajennettiin ja myös lisäkoerakenteita asennettiin koerakennuksille tutkittaviksi.

Projektin tavoitteet, joihin liittyen koerakennusmittauksista saatiin tietoa: (Vinha, 2019)

- määrittää millä edellytyksillä purueristeisillä rakenneratkaisuilla saadaan toteutettua kosteusturvallisia rakenteita nykyisissä ja tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa ilman, että lämmöneristeeseen on tarvetta laittaa homeenestoaineita, tai että rakenteessa on tarvetta käyttää höyrynsulkumuovia,
- verrata purupohjaisten vaipparakenteiden kosteusteknistä toimintaa ja hiilijalanjälkeä nykyiset energiatehokkuusmääräykset täyttäviin rakenneratkaisuihin.

Ensimmäiseen kohtaan koerakennusmittauksissa saadaan vastauksia rakenteiden kosteusteknisestä toiminnasta nykyisissä ilmasto-olosuhteissa. Toiseen tavoitekohtaan saatiin alustavia vastauksia vertailemalla ECOSAFE-projektissa tehtyä vertailurakennetta toisessa tutkimuksessa tehtyihin lasivillaeristeiseen rakenteeseen. ECOSAFE2-projektissa asennettiin paremmin vertailtava kivivillaeristeinen rakenne, missä rakenteiden välisiä eroja oli karsittu vertailun parantamiseksi.

Koerakennusmittauksissa saatiin myös tietoa liittyen tutkimuksen yhteen hypoteesiin: (Vinha, 2019)

- Purupohjaiset eristeet vähentävät rakenteiden kosteusvaurioriskiä käyttötilanteessa.

Käyttötilanteen kosteusturvallisuudesta saatiin tietoa, kun koerakennuksilla sisäilmaan tuotettiin RIL 107 kosteusluokan 2 mukainen kosteuslisä. (RIL, 2012)

Koerakennusmittauksia tutkimussuunnitelmassa alustettiin seuraavasti: Kenttäkokeiden avulla voidaan varmistua rakenteiden kosteusturvallisesta käyttäytymisestä myös todellisissa ulkoilman olosuhteissa. Kenttäkokeita jatketaan koko vuoden, jotta rakenteiden toiminnasta saadaan luotettava kuva eri vuodenaikojen ulkoilman olosuhteissa. (Vinha, 2019)

Koerakennusmittauksista saatiin tulosaineistoa kolmen vuoden ajalta. Jos varhaisessa vaiheessa havaittiin, että syksy on selvästi kriittisin aika vuodesta, ja että likimain kaikki rakenteet pärjäsivät hyvin muina vuodenaikoina. Tarkastelut päädyttiin rajaamaan syksyille.

2 KOERAKENNUSMITTAUKSET

2.1 Koerakenteet

Vuonna 2019 käynnistyneessä ECOSAFE-tutkimuksessa koerakennuksille asennettiin yhteensä kahdeksan koe-elementtiä vuoden 2020 keväällä. Myöhemmin tarkasteluja halettiin laajentaa ECOSAFE2-projektissa ja koerakennuksille asennettiin vielä 4 koe-elementtiä. Kummassakin projektissa jokaista koe-elementtityyppiä rakennettiin kaksi kappaletta, jotka asennettiin koerakennuksille pohjois- ja eteläjulkisivun vastakkaisiin tutkimusaukkoihin.

Kaikki koerakenteet koostuivat k600 jaolla toteutetusta kertopuurungosta, joka muodosti kaksi runkotolppaväliä. Molemmissa projekteissa yhteen koe-elementtipariin päätettiin asentaa eri tuulensuojalevyt koerakenteen kahteen eri runkotolppaväliin. Tällä tavoin vertailuun saatiin useampi variaatio ilman, että variointi vaatisi lisäelementtien rakentamista.

ECOSAFE-projektissa tehdyt koerakenteet:

- E1: Tiilijulkisivu, kipsituulensuoja, kutterinlastueriste, höyrynsulku
- E2: Puukuitutuulensuoja, savetettu kutterinlastueriste
- E3_S: Savituulensuoja, kutterinlastueriste
- E3_V: Kivivillatuulensuoja, kutterinlastueriste
- E4: Puukuitutuulensuoja, kutterinlastueriste

Edellä esitetyistä koerakenteista E3_S ja E3_V on tehty asentamalla eri tuulensuojalevyt koe-elementti eri runkotolppaväleihin.

ECOSAFE2-projektissa tehdyt koerakenteet:

- E5: Kivivillatuulensuoja, savetettu kutterinlastueriste
- E6_P: Puukuitutuulensuoja, kivivillaeriste
- E6_V: Kivivillatuulensuoja, kivivillaeriste

Kuvassa X on havainnollistettu eri eristeen ja tuulensuojan yhdistelmiä, joita tässä tutkimuksessa vertaillaan keskenään.

Eri mittaustapaukset on koottu kuvaan 1.

	Puukuitutuulensuoja	Kivivillatuulensuoja	Savituulensuoja	Kipsituulensuoja
Pölkky kutterinlastueriste				
Savetettu EHTA kutterinlastueriste				
Savetettu Pölkky kutterinlastueriste				
Kivivillaeriste				
Lasivillaeriste				

	E2: Puukuitutuulensuoja, savetettu Pölkky kutterinlastueriste
	E3_S: Savituulensuoja, kutterinlastueriste
	E3_V: Kivivillatuulensuoja, kutterinlastueriste
	E4: Puukuitutuulensuoja, kutterinlastueriste
	E5: Kivivillatuulensuoja, savetettu EHTA kutterinlastueriste
	E6_P: Puukuitutuulensuoja, kivivillaeriste
	E6_V: Kivivillatuulensuoja, kivivillaeriste
	E1: Tiilijulkisivu, kipsituulensuoja, kutterinlastueriste, vaneri, höyryns.
	W5: Tiilijulkisivu, kipsituulensuoja, lasivillaeriste, höyryns., kipsilevy

Kuva 1. Eristemateriaalin ja tuulensuojalevyn eri yhdistelmät.

Kuvassa 1 vihreällä on merkitty ECOSAFE- ja ECOSAFE2-projektien hyvin vertailtavissa olevat rakennetyypit. Keltaisella puolestaan on merkitty Future Spaces -hankkeen tiilijulkisivullinen rakenne sekä sitä varten tehty vertailurakenne, jota on kuitenkin hankala vertailla muihin ECOSAFE-rakenteisiin.

2.2 Rakennetyypit

Rakennetyypeillä on haluttu saada vertailtavia rakenteita eristemateriaalin ja tuulensuojalevyn suhteen sekä linkittää tulokset myös aiempiin tutkimuksiin muista ECOSAFE-projektin rakenteista poikkeavalla vertailurakenteella.

Future Spaces -projektin rakenteisiin vertailurakenteeksi on tehty rakenne E1, joka on esitelty luvussa 2.2.1. Tämän vertailurakenne Future Spaces -projektin puolelta on rakenne W5, joka on esitelty luvussa 2.2.9.

Rakenteet E2, E3_S, E3_V, E4 ja E5 ovat rungoltaan ja verhouksmateriaaleiltaan yhteneviä. Rakenteet on esitelty luvuissa 2.2.2, 2.2.3, 2.2.4, 2.2.5 ja 2.2.6. Rakenteissa vairoidaan vain eristemateriaalia sekä tuulensuojalevyä. Kivivillaeristeisillä rakenteilla E6_P ja E6_V on edellä mainittuihin rakenteisiin nähden eri runkopaksuus. Runkopaksuus on näiden rakenteiden kohdalla määritetty siten, että rakenteiden U-arvot olisivat yhtä suuria vertailtavien rakenteiden kanssa. Kivivillaeristeiset rakenteet on esitelty luvuissa 2.2.7 ja 2.2.8.

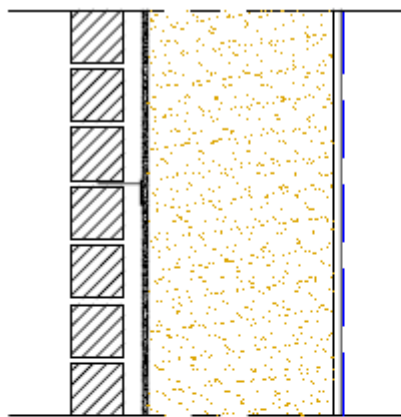
Verrokkirakennetta E1 lukuun ottamatta ECOSAFE ja ECOSAFE2-projektin kutterieristeisissä rakenteissa ei ole höyrynsulkukerrosta. Kutterinlastun kosteuskapasiteetin ja vanerilevyn vesihöyrynläpäisyvastuksen on katsottu riittävän (joka on myös myöhemmin todettu mittauksissa olevan totta).

2.2.1 E1: Tiilijulkisivu, kipsituulensuoja, kutterinlastueriste, höyryns.

Rakennetyyppi E1 on linkkinä Future Spaces -tutkimuksen lasivillaeristeisiin rakenteisiin. Tiilijulkisivun takana on tuuletusväli, kipsituulensuojalevy, 300 mm kertopuurunko ja kutterinlastueristys ja sisäpinnassa havuvanerilevy sekä höyrynsulku.

Rakenteen E1 standardin SFS-EN ISO 6946:2017 mukainen laskennallinen U-arvo on 0,18 W/(m²K).

Rakenteen E1 leikkauskuva on esitetty kuvassa 2.



Rakennetyyppi E1

Tiilimuuraus	85 mm
Tuuletusväli	30 mm
Kipsituulensuojalevy	9 mm
Kutterinlastueriste	300 mm
Vaneri	15 mm
Höyrynsulkumuovi	

Kuva 2. Rakennetyyppi E1: Tiilijulkisivu, kipsituulensuoja, kutterinlastueriste, höyrynsulku

Höyrynsulkua ei voitu asennuksen jälkeen lisätä rakenteen sisälle, joten se laitettiin rakenteen sisäpintaan. Future Spaces -rakenteissa on höyrynsulkukerrokset, joten vertailurakenteena myös rakenteeseen E1 haluttiin laittaa höyrynsulku.

Tiilijulkisivun tuuletus on toteutettu siten, että alareunasta 2 pystysaumaa (joka kolmas pystysauma) on jätetty auki. Rakenteen yläreunasta ilma pääsee virtaamaan vapaasti. Laskennallisesti tämä vastaisi standardin SFS EN 6946 luvussa 6.9.3 kuvattua vähän tuulettuvaa tuuletusväliä. (SFS, 2017)

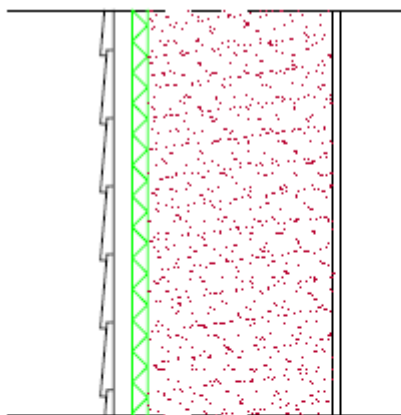
Rakenteen eristemateriaali Pölkky kutterinlastueriste on puhallettu rakenteeseen noin 162 kg/m^3 tiheyteen. Rakenteen E1 tuloksia on vertailtu Future Spaces -rakenteen W5 tuloksiin. Rakenne W5 on esitelty luvussa 2.2.9.

2.2.2 E2: Puukuitutuulensuoja, savetettu kutterinlastueriste

Rakennetyypistä E2 löytyy puujulkisivu, tuuletusväli, bitumoitunut puukuitutuulensuojalevy, 300 mm kertopuurunko ja savetettu kutterinlastueriste ja sisäpinnassa havuvaneri.

Rakenteen E2 standardin SFS-EN ISO 6946:2017 mukainen laskennallinen U-arvo on $0,19 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Rakenteen E2 leikkauskuva on esitetty kuvassa 3.



Rakennetyyppi E2

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

Kuva 3. E2: Puukuitutuulensuoja, savetettu kutterinlastueriste

Rakenteen puujulkisivu on ylä- ja alareunoistaan avoin ja tuuletusväli on hyvin tuulettuva. Sama tilanne on myös muiden puujulkisivullisten koerakenteiden kohdalla.

Rakenteen eristemateriaali savetettu Pölkky kutterinlastueriste on puhallettu rakenteesseen noin 266 kg/m^3 tiheyteen.

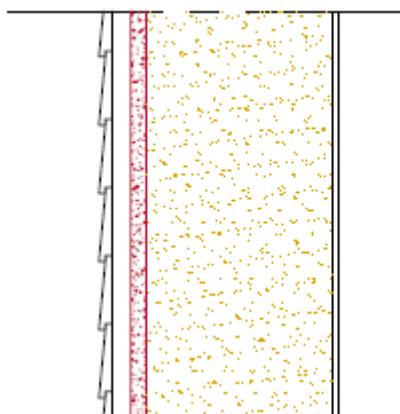
2.2.3 E3_S: Savituulensuoja, kutterinlastueriste

Elementti on jaettu kahteen osaan, missä toiseen runkotoilppaväliin on asennettu savituulensuojalevy ja toiseen kivivillatuulensuojalevy.

Rakenteesta E3_S löytyy puujulkisivu, hyvin tuulettuva tuuletusväli, savituulensuojalevy, 300 mm kertopuurunko ja Pölkky kutterinlastueriste ja sisäpinnassa havuvaneri.

Rakenteen E3_S standardin SFS-EN ISO 6946:2017 mukainen laskennallinen U-arvo on $0,21 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Rakenteen E3_S leikkauskuva on esitetty kuvassa 4.



Rakennetyyppi E3-S

Puuverhous	22 mm
Tuuletusväli	30 mm
Savituulensuoja	30 mm
Kutterinlastueriste	300 mm
Vaneri	15 mm

Kuva 4. E3-S: Savituulensuoja, kutterinlastueriste

Savituulensuoja asennettiin pienempinä levyinä ja valettiin savimassalla tiiviiksi. Savilevyt on tehty kahdessa osassa ja levyn puolivälissä on rakennetta vahvistava metalliverkko.

Rakenteen eristemateriaali Pölkky kutterinlastueriste on puhallettu rakenteeseen noin 162 kg/m^3 tiheyteen.

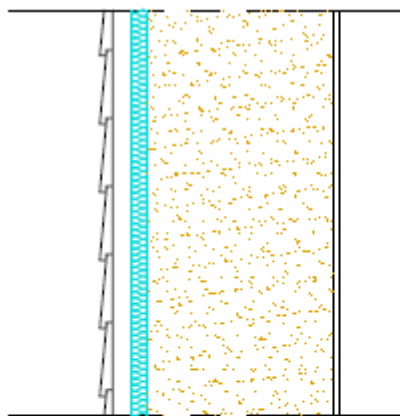
2.2.4 E3_V: Kivivillatuulensuoja, kutterinlastueriste

Elementti on jaettu kahteen osaan, missä toiseen runkotolppaväliin on asennettu savi-tuulensuojalevy ja toiseen kivivillatuulensuojalevy.

Rakenteesta E3_V löytyy puujulkisivu, hyvin tuulettuva tuuletusväli, kivivillatuulensuoja-levy, 300 mm kertopuurunko ja Pölkky kutterinlastueriste ja sisäpinnassa havuvaneri.

Rakenteen E3_V standardin SFS-EN ISO 6946:2017 mukainen laskennallinen U-arvo on $0,18 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Rakenteen E3_V leikkauskuva on esitetty kuvassa 5.



Rakennetyyppi E3-V

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

Kuva 5. E3-V: Kivivillatuulensuoja, kutteripurueriste

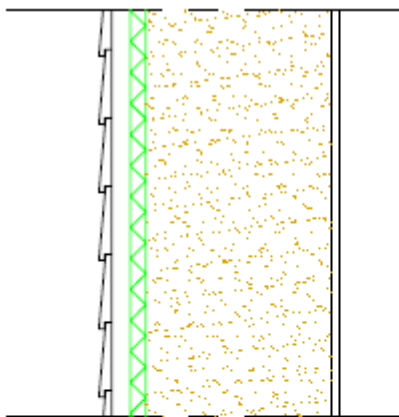
Rakenteen eristemateriaali Pölkky kutterinlastueriste on puhallettu rakenteeseen noin 162 kg/m^3 tiheyteen.

2.2.5 E4: Puukuitutuulensuoja, kutteripurueriste

Rakenteesta E4 löytyy puujulkisivu, hyvin tuulettuva tuuletusväli, bitumoitunut puukuitutuulensuojalevy, 300 mm kertopuurunko ja Pölkky kutterinlastueriste ja sisäpinnassa havu-
vaneri.

Rakenteen E4 standardin SFS-EN ISO 6946:2017 mukainen laskennallinen U-arvo on 0,19 W/(m²K).

Rakenteen E4 leikkauskuva on esitetty kuvassa 6.



Rakennetyyppi E4

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

Kuva 6. E4-V: Puukuitutuulensuoja, kutterinlastueriste

Rakenteen eristemateriaali Pölkky kutterinlastueriste on puhallettu rakenteeseen noin 162 kg/m³ tiheyteen.

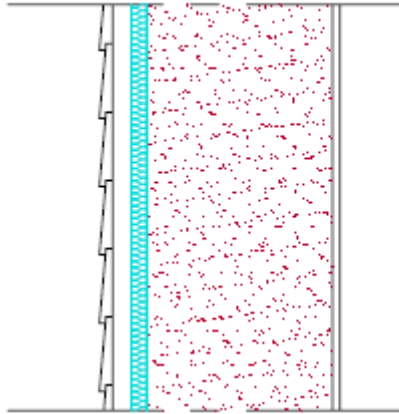
2.2.6 E5: Kivivillatuulensuoja, savetettu kutterinlastueriste

Rakenne E5 otettiin mukaan ECOSAFE2-projektissa, kun haluttiin tutkia parhaiten aiemmissa mittauksissa pärjänneen tuulensuojalevyn ja eristemateriaalin yhteisvaikutusta: kivivillatuulensuoja ja savetettu kutterinlastueriste.

Rakenteesta E5 löytyy puujulkisivu, hyvin tuulettuva tuuletusväli, kivivillatuulensuoja, 300 mm kertopuurunko ja savetettu EHTA kutterinlastueriste ja sisäpinnassa havu-neri.

Rakenteen E5 standardin SFS-EN ISO 6946:2017 mukainen laskennallinen U-arvo on 0,18 W/(m²K).

Rakenteen E5 leikkauskuva on esitetty kuvassa 7.



Rakennetyyppi E5

Puuverhous	22 mm
Tuuletusväli	30 mm
Paroc Cortex kivivillatuulensuoja	30 mm
Savetettu kutterinlastueriste	300 mm
Vaneri	15 mm

Kuva 7. E5: Kivivillatuulensuoja, savetettu kutterinlastueriste

Rakenteen eristemateriaali savetettu EHTA kutterinlastueriste on tiivistetty rakenteeseen noin 150 kg/m³ tiheyteen.

Rakenteen E5 runko sekä eristeen asentaminen tehtiin Tampereen yliopiston rakennus-hallissa. Eristeen asentamiseen ei ollut nyt käytettävissä kotelopuhalluslaitetta, joten eriste asennettiin kerroksittain puristamalla. Kuvassa 8 on esillä tilanne, missä kutteria asennetaan koe-elementtiin puristamalla sitä metallipainoilla ja vanerilevyillä.

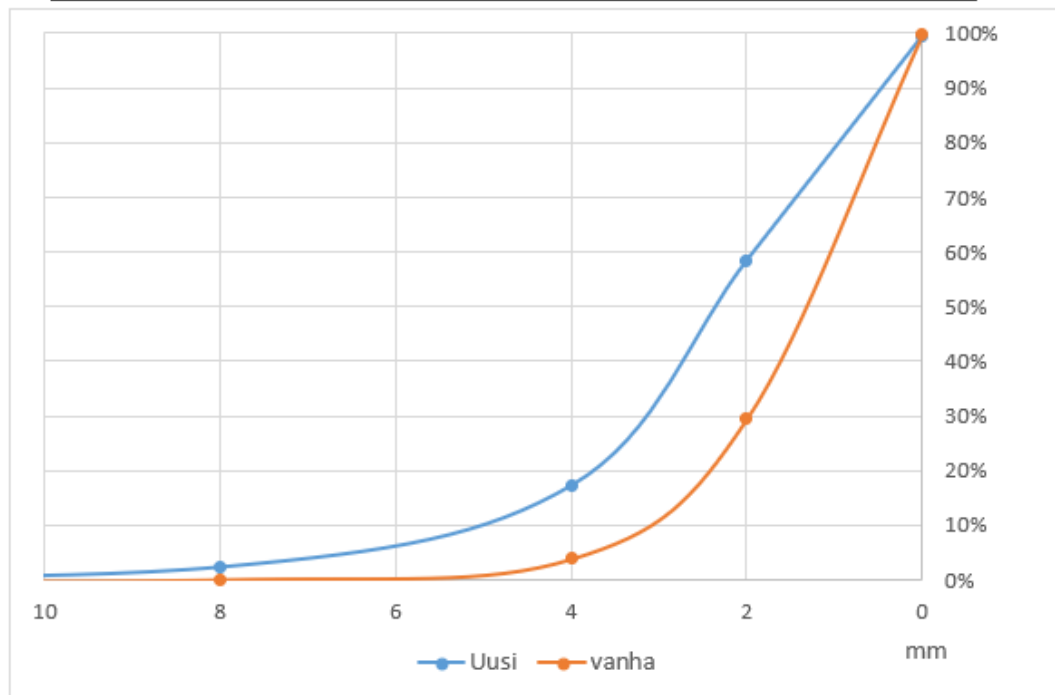


Kuva 8. Rakenteen E5 savetetun kutterilastueristeen tiivistäminen puristamalla.

Luvussa 2.2.2 esitetyn rakenteen E2 savetettu kutterilastueriste on tehty eri kutterinlastueristeestä, joten eristeen samaan tiheyteen oli mahdotonta päästä. Aiemmin käytetty savetettu Pölkky kutterinlastueriste sisälsi huomattavasti enemmän hienoainesta kuin nyt uuteen rakenteeseen käytetty savetettu EHTA kutterinlastueriste.

Kutterilastuja tutkittiin seulomalla ja niiden todettiin olevan ”raekooltaan” hyvin erilaisia. Uudessa erässä seassa oli myös savipaakkuja, jotka eivät olleet sekoittuneet kutteriin, joka viittaisi mahdollisesti siihen, ettei kutterinlastuissa ollut enää jäljellä pinta-alaa, mihin savi voisi tarttua. Seuraavassa kuvassa esitetty rakenteessa E2 käytetyn savetetun Pölkky kutterinlastueristeen ja uudessa rakenteessa E5 käytetyn savetetun EHTA kutterinlastueristeen seulonnan tulokset.

Seulonta [mm]	Uusi	Vanha	Uusi %	Vanha %
alku	183,00	410,50	100 %	100 %
16	0,00	0,00	0,0 %	0,0 %
8	4,00	0,20	2,2 %	0,0 %
4	31,40	15,70	17,2 %	3,8 %
2	107,00	120,90	58,5 %	29,5 %
0	182,20	409,20	99,6 %	99,7 %
hukka	0,80	1,30	0,4 %	0,3 %



Kuva 9. Vanhan ja uuden savetetun kutterinpuruerän seulonta.

Kuvasta 9 nähdään hyvin, että viimeisen seulan kohdalla (2 mm) uudesta savetetusta EHTA kutterinlastueristeestä vain noin 40 paino-% läpäisi seulan, kun taas vanhasta savetetusta Pölkky kutterinlastueristeestä noin 70 paino-% läpäisi seulan. Uusi eriste sisältää siis huomattavasti vähemmän pienainesta, jolloin myös sen tiheys tulee olemaan huomattavasti pienempi.

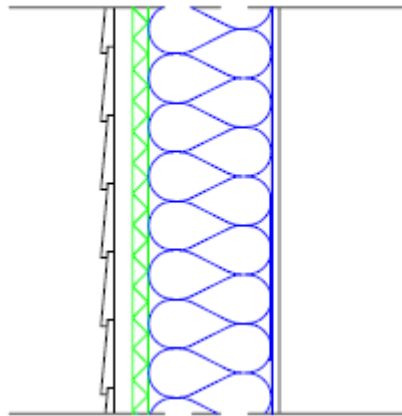
2.2.7 E6: Kivivillatuulensuoja, kivivillaeriste

Elementti on jaettu kahteen osaan, missä toiseen runkotolppaväliin on asennettu bitumoitunut puukuitutuulensuojalevy ja toiseen kivivillatuulensuojalevy.

Rakenteesta E6_P löytyy puujulkisivu, hyvin tuulettuva tuuletusväli, bitumoitunut puukuitutuulensuojalevy, 200 mm kertopuurunko ja kivivillalevyeristys ja sisäpinnassa havuvarsi.

Rakenteen E6_P standardin SFS-EN ISO 6946:2017 mukainen laskennallinen U-arvo on 0,21 W/(m²K).

Rakenteen E6_P leikkauskuva on esitetty kuvassa 10.



Rakennetyyppi E6_P

Puuverhous	22 mm
Tuuletusväli	30 mm
Hunton puukuitutuulensuoja	25 mm
Kivivillaeriste	200 mm
Vaneri	15 mm

Kuva 10. E6_P: Puukuitutuulensuoja, kivivillalevyeristys

Höyrynsulkumuovi jätettiin rakenteesta pois, jotta aluksi saataisiin puhtaasti kahden eri eristemateriaalin erot näkyviin. Höyrynsulku voidaan myöhemmin asentaa rakenteen sisäpintaan ja eroja voidaan vertailla myös höyrynsulun kanssa.

Rakenteen runkopaksuus 200 mm valittiin siten, että rakenne vastaisi U-arvoltaan likimain muita ECOSAFE- ja ECOSAFE2-projektin rakenteita. Taulukossa 1 on esitetty puukuitutuulensuojallisten koerakenteiden U-arvot.

Taulukko 1. Puukuitutuulensuojallisten koerakenteiden U-arvot.	
Rakenne	U-arvo
E2: Puukuitutuulensuoja, 300 mm savetettu kutterinlastueriste	0,19
E4: Puukuitutuulensuoja, 300 mm kutterinlastueriste	0,19
E6_P: Puukuitutuulensuoja, 200 mm kivivillaeriste	0,21

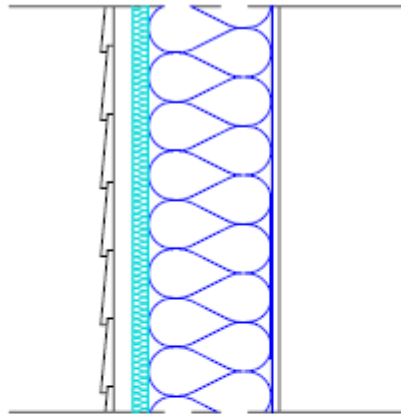
2.2.8 E6_V: Kivivillatuulensuoja, kivivillaeriste

Elementti on jaettu kahteen osaan, missä toiseen runkotolppaväliin on asennettu bituimoiu puukuitutuulensuojalevy ja toiseen kivivillatuulensuojalevy.

Rakenteesta E6_V löytyy puujulkisivu, hyvin tuulettuva tuuletusväli, kivivillatuulensuoja-levy, 200 mm kertopuurunko ja kivivillalevyeristys ja sisäpinnassa havuvaneri.

Rakenteen E6_V standardin SFS-EN ISO 6946:2017 mukainen laskennallinen U-arvo on 0,19 W/(m²K).

Rakenteen E6_V leikkauskuva on esitetty kuvassa 11.



Rakennetyyppi E6_V

Puuverhous	22 mm
Tuuletusväli	30 mm
Paroc Cortex kivivillatuulensuoja	30 mm
Kivivillaeriste	200 mm
Vaneri	15 mm

Kuva 11. E6_V: Kivivillatuulensuoja, kivivillalevyeristys

Rakenteen höyrynsulun puuttumien sekä eroava runkopaksuus on käsitelty luvussa 2.2.7. Taulukossa 2 on esitetty kivivillatuulensuojallisten koerakenteiden U-arvot.

Taulukko 2. Puukuitutuulensuojallisten koerakenteiden U-arvot.	
Rakenne	U-arvo
E3_V: Kivivillatuulensuoja, 300 mm kutterinlastueriste	0,18
E5: Kivivillatuulensuoja, 300 mm savetettu kutterinlastueriste	0,18
E6_V: Kivivillatuulensuoja, 200 mm kivivillaeriste	0,19

2.2.9 W5: Tiilijulkisivu, kipsituulensuoja, lasivillaeriste, höyryns.

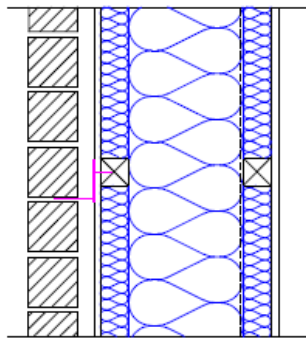
ECOSAFE-projektin alussa vertailua lasivillaeristeisiin Future Spaces -projektin rakenteisiin pyrittiin tekemään rakenteiden E1 ja W5 välillä. Myöhemmin kuitenkin huomattiin, että rakenteiden välillä on liikaa eroja, että vertailun tuloksia voitaisiin luotettavasti tulkita.

Rakenteessa W5 tiilijulkisivun takana on tuuletusväli, kipsituulensuojalevy, 50 mm koolaus ja lasivillaeriste, 200 mm mitallistettu puurunko ja lasivillaeriste, höyrynsulku, 50 mm koolaus ja lasivillaeriste ja sisäpinnassa kipsilevy.

Rakenteen W5 standardin SFS-EN ISO 6946:2017 mukainen laskennallinen U-arvo on 0,14 W/(m²K).

Rakenteen W5 leikkauskuva on esitetty kuvassa 12.

W5 Tiilijulkisivu, paksu eristys



Rakenne ulkoa sisäänpäin:

1.	Tiilimuuraus	85 mm
2.	Tuuletusväli ja pystykoolaus	30 mm
3.	Tuulensuojakipsilevy	9 mm
4.	Lämmöneriste ja vaakakoolaus	50 mm
5.	Lämmöneriste ja runkotolpat	200 mm
6.	Höyrynsulku	
7.	Lämmöneriste ja vaakakoolaus	50 mm
8.	Kipsilevy	13 mm

Kuva 12. W5: Tiilijulkisivu, kipsituulensuoja, lasivillaeriste, höyrynsulku, kipsilevy

Kuten luvun alussa todettiin, rakenteen W5 ja luvussa 2.2.1 esitetyn rakenteen E1 välillä on liian paljon eroja, että vertailua eroista eristemateriaalien kosteusteknisessä käyttäytymisessä voitaisiin tehdä luotettavasti. Rakenteen U-arvot ovat melko erisuuret, joka vaikuttaa vahvasti myös tuulensuojalevyn sisäpinnan olosuhteisiin. Tästä syystä ECOSAFE2-projektissa tehtiinkin uudet vertailurakenteet.

Taulukossa 3 on esitetty rakenteiden E1 ja W5 U-arvot.

Taulukko 3. Rakenteiden W5 ja E1 U-arvot.

Rakenne	U-arvo
E1: Tiilijulkisivu, kipsituulensuoja, kutterinlastueriste, vaneri, höyryns.	0,18
W5: Tiilijulkisivu, kipsituulensuoja, lasivillaeriste, höyryns. kipsilevy	0,14

2.3 Rakenteiden valmistus

ECOSAFE-projektin koerakenteet E1, E2, E3_S, E3_V ja E4 käytiin valmistamassa ja anturoimassa Punkaharjun Puutaidon puuelementtitehtaalla alkuvuodesta 2020. ECOSAFE2-projektin uudemmat elementit rakennettiin ja anturoitiin Tampereen yliopiston rakennushallissa vuoden 2022 aikana.

2.3.1 Koe-elementit

Koe-elementtien runko on tehty 51x300 mm² keropuusta. Poikkeuksena kivivillavertailurakenteiden E6_P ja E6_V runko, joka on luvussa 2.2.7 esitettyin perustein tehty 51x200 mm² kertopuusta. Runkotolpat ovat k600 jaolla.

Rungot on kasattu kaadettuina siten, että pohjalla on ollut rakenteen sisäpintaan jäävä 15 mm havuvaneri. Runkotolppien väli on täytetty koerakennekohtaisella eristeellä. Tuulensuojalevyt on ruuvattu kiinni runkotolppiin ja teipattu asianmukaisella tuulensuojateipillä tiiviiksi runkotolppiin. Tuulensuojalevy on lisäksi tiivistetty koeaukkoon asentamisen jälkeen teippaamalla koerakennukseen.

Koe-elementit on asennettu koerakennuksen tutkimusaukkoihin XPS-levyn päälle ja sivu- sekä yläsauman on tiivistetty uretaanilla. Kuvassa 13 koe-elementtiä ollaan asentamassa koerakennuksen tutkimusaukkoon.



Kuva 13. Tutkimuselementin asentaminen koerakennuksen tutkimusaukkoon.

Tuulensuojalevyjen päälle on asennettu pystykoolaus runkotolppien kohdalle. Koolauksen päälle on asennettu julkisivupanelointi.

Poikkeuksena rakenne E1, missä koolauksen ja paneloinnin sijaan rakenteeseen muurattiin tiilijulkisivu elementin tutkimusaukkoon asentamisen jälkeen.

2.3.2 Anturointi

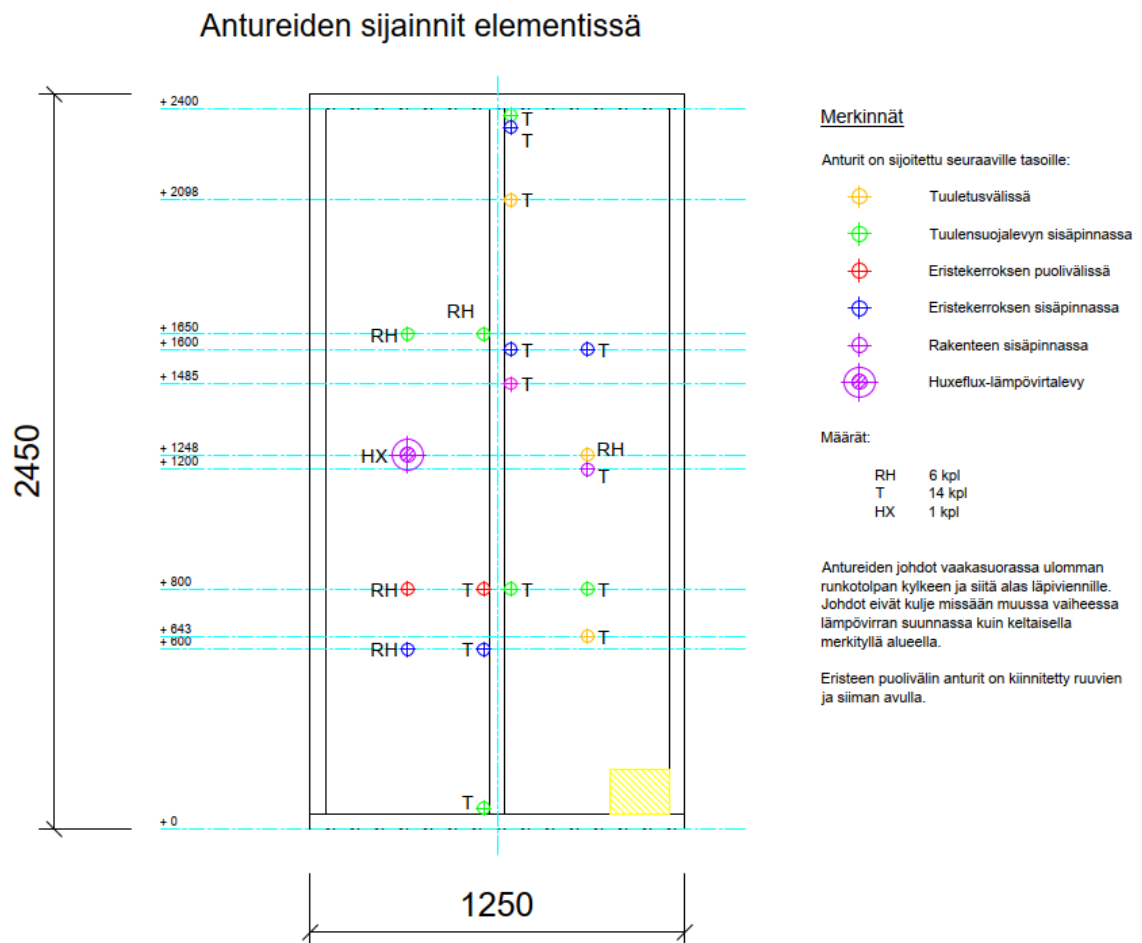
Koerakenteiden anturointi on suunniteltu siten, että eri rakennekerrosten rajapintojen olosuhteita voidaan vertailla eri koerakenteiden välillä keskenään. Anturit on asennettu kaikkiin koerakenteisiin samoihin pisteisiin, jolloin vertailudata saadaan kaikilta rakenteilta samoista pisteistä.

Koerakenteisiin on asennettu yhteensä 21 anturia. Poikkeuksena elementit, jotka on jaettu keskimmäisen runkotolpan suhteen kahteen osaan. Näissä elementeissä on sekä yhteisiä antureita että myös yksilölliset anturit mielenkiintoisimmissa rajapinnoissa.

Rakenteisiin on asennettu sekä lämpötilaa että suhteellista kosteutta mittaavia antureita. Lisäksi rakenteen sisäpintaan asennettiin lämpövirtalevy. Lämpövirtalevyjen kiinnitykset eivät kuitenkaan olleet riittävän hyviä, joten lämpövirtalevyiltä saatu data ei ole luotettavaa eikä sitä käydä tässä tutkimuksessa läpi.

Tässä tutkimuksessa keskitytään vertailemaan tuulensuojalevyn sisäpinnan olosuhteita. Jokaiseen rakenteeseen on sijoitettu Vaisalan HMP110 -suhteellisen kosteuden anturi mittaamaan rajapinnan lämpötilaa ja suhteellista kosteutta sekä runkotolppavälin keskeltä, että keskimmäisen runkotolpan vierestä. Edellä mainitut mittapisteen ovat lisäksi samalla korkeudella rakenteessa.

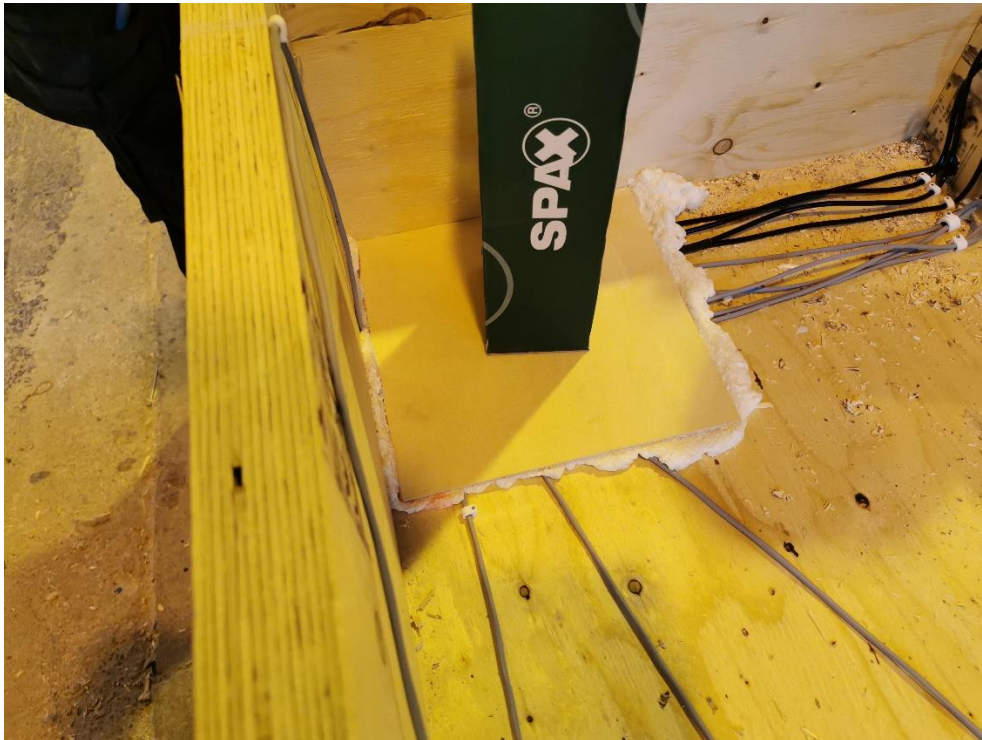
Kuvassa 14 on esitetty ECOSAFE- ja ECOSAFE2-rakenteiden anturointi.



Kuva 14. ECOSAFE- ja ECOSAFE2-rakenteiden anturointi.

Kaikki anturit on johdotettu rakenteeseen siten, etteivät johdot tai anturit kulje lämpövirran suunnassa. Johdoille on tehty läpiviennit rakenteen alanurkkaan. Johdot on viety rei'ityksen jälkeen heti runkotolpan kylkeen ja siellä lämpövirran suunnassa tavoitesyvyyteen. Tämä jälkeen rei'itetty alue on tiivistetty uretaanin ja vanerikappaleen avulla tiiviiksi.

Poikkeuksena anturoinnin yhdenmukaisuuteen on vertailuelementti E1, jonka anturointi on tehty vastaamaan mahdollisimman hyvin Future Spaces -projektin rakenteen W5 anturointia. Kyseisen vertailuparin ongelmia käytiin läpi luvussa 2.2.9. Anturointi on likimain samanlainen kuin muillakin ECOSAFE-rakenteille, mutta antureiden sijainneissa rakenteessa on hieman eroja. Läpiviennin tiivistys on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. ECOSAFE-elementin johtoläpiviennin tiivistys uretaanivaahdolla ja vanerikappaleella.

2.4 Mittausjärjestelyt

Tampereen yliopiston Rakennusfysiikan tutkimusryhmällä on kaksi koerakennusta, joissa voidaan tutkia seinä- ja yläpohjarakenteita todellisissa ulkoilman olosuhteissa. Koerakenteita ympäröiviä olosuhteita seurataan tarkasti jatkuvatoimisin mittauksin.

Koerakennusten mittausjärjestelmät voidaan jakaa kolmeen osaan. Ulkoilman olosuhteita seurataan koerakennusalueella sijaitsevalla omalla Vaisalan AWS310 sääasemalla, sisäilman olosuhteita mitataan Pietiko Oy:n MIRAN DLS loggerijärjestelmällä ja koerakenteiden rakennekerrosten rajapintojen olosuhteita mitataan rakenteisiin asennetuilla antureilla.

2.4.1 Koerakennukset

Koerakennuksen ovat keskenään samanlaiset. Kummassakin koerakennuksessa on kolme tutkimushuonetta, joihin jokaiseen voidaan asentaa yhteensä neljä seinäelementtiä, kaksi pohjoisjulkisivulle ja kaksi eteläjulkisivulle, ja yksi yläpohjaelementti. Yhteensä koerakennuksille voidaan asentaa 24 seinäelementtiä ja 6 yläpohjaelementtiä. Kuvassa 16 näkyy koerakennukset kuvattuna rakennusten pohjoispuolelta.



Kuva 16. Koerakennukset kuvattuna rakennusten pohjoispuolelta.

Jokaisessa tutkimushuoneessa on oma puhallinkonvektori lämpötilan säätöön ja kostutin ilmankosteuden hallitsemiseen. Kuivatusmahdollisuutta sisätiloissa ei ole. Lämpötilaa ohjataan siten, että sisäilman lämpötila pysyisi vakiolämpötilassa 21 °C. Kostuttimia ohjataan siten, että sisäilmassa olisi RIL 107 kosteusluokan 2 mukainen kosteuslisä ulkoilman kosteuteen nähden. Sekä lämpötilan että kosteuden hallinta on tuottanut haasteita varsinkin mittausten alkupuolella. Järjestelmää on kehitetty mittausten aikana, mutta se ei ole vertailun kannalta ongelma, koska lähtökohtaisesti mahdollisesti väärin toimiva ohjaus on toiminut kuitenkin kaikissa tutkimushuoneissa pääsääntöisesti samalla tavalla.

Kuva 17 on toisen koerakennuksen sisältä ja siinä nähdään koe-elementtien sisäpinnan lisäksi mittauksissa käytettyä laitteistoa.



Kuva 17. Näkymä koerakennuksen tutkimushuoneesta, missä mittauksessa on kaksi kipsilevypintaista koe-elementtiä.

2.4.2 Olosuhteiden seuranta

Ulkoilman olosuhteita seurataan koerakennusalueen omalla sääasemalla, Vaisalan AWS310. Sääasemaan on lisätty sensoreita mittausten aikana ja nykytilassa sääasemalta saadaan mittaustulokset seuraavista suureista:

- Lämpötila
- Suhteellinen kosteus
- Ilmanpaine
- Sademäärät
- Lyhyt- ja pitkäaaltoinen auringonsäteily
- Tuulen nopeus ja suunta

Antureita on lisätty siten, että mastoon sijoitettujen antureiden lisäksi saadaan mittaustuloksia myös koerakennuksen etelä- ja pohjoisseinien pinnoilta. Kuvassa 18 näkyy sääasema ja koerakennuksen seinälle asennettuja sensoreita.



Kuva 18. Koerakennusalueen sääasema Vaisala AWS310.

Sisäilman olosuhteita seurataan MIRAN DLS loggerijärjestelmällä, joka mittaa sisäilmasta seuraavia olosuhteita:

- Lämpötila
- Suhteellinen kosteus
- Ilmanpaine ja paine-ero

Rakenteiden sisään on lisäksi asennettu rakennekerrosten rajapintoihin lämpötilaa mittaavia LM335 puolijohdelämpötila-antureita ja Vaisalan HMP110 -suhteellisen kosteuden antureita, joilla saadaan mitattua sekä suhteellista kosteutta että lämpötilaa. Jälkimmäiset anturit on tehdaskalibroitu, kun taas LM335 lämpötila-anturit on kalibroitu Tampereen yliopistolla Rakennusfysiikan tutkimusryhmän laboratoriossa.

3 TULOKSET

3.1 Rajaukset

3.1.1 Tarkastelujakson valinta

Koerakenteiden olosuhteita ei ole mielekästä tarkastella jokaiselta vuodenajalta. Kun halutaan vertailla rakenteiden kosteusteknistä toimintaa, tulee tarkasteltavan jakson edustaa tältä osin haastavinta vuodenaikaa, joka Suomen sääoloissa tarkoittaa syksyä.

Tarkastelun alkua- ja loppupäivämäärän valinta tehtiin tarkastelemalla vuosien 2020–2022 dataa eri rakenteille. Dataa pyrittiin löytämään ne päivämäärät, jolloin kosteusteknisesti haastavampi jakso alkaa ja loppuu. Tämä tarkastelu toteutettiin laskemalla jokaiselle rakenteelle tuulensuojalevyn sisäpinnan suhteellisen kosteuden erotus saman mittapisteen lämpötilaa vastaavasta homeutumisherkkyyden 1 kriittisestä suhteellisesta kosteuden raja-arvosta (Vinha *et al.*, 2013). Tämä tieto antaa siis tuulensuojalevyn sisäpinnassa vallinneen suhteellisen kosteuden etäisyyden homeutumiselle otollisiin olosuhteisiin. Kun erotus menee alle nollan, ollaan homeutumisen kannalta suotuisissa olosuhteissa. Tarkasteluvälin alkua- ja loppupäivämäärät valittiin alkamaan siitä päivästä, kun edellä kuvattu erotus alittaa ensimmäisen kerran arvon 5 ja loppumaan siihen päivämäärään, jonka jälkeen arvoa 5 ei ole enää alitettu useaan viikkoon. Raja-arvon 5 ensimmäisen alituksen jälkeen olosuhteet vaikuttivat muuttuvan selvästi keskimäärin kosteusteknisesti haastavammiksi, joten sitä voidaan pitää kohtuullisen hyvänä rajavana tekijänä.

Taulukkoon 4 on koottu kyseiset päivämäärät vuosille 2020–2022.

Taulukko 4. Kosteusteknisesti mielenkiintoisen tarkastelujakson alku- ja loppupäivämäärät vuosina 2020–2022.

Vuosi	Alkupäivämäärä	Loppupäivämäärä	Kesto [päivää]
2020	23.8.2020*	24.12.2020	123
2021	8.8.2021	19.11.2021	103
2022	26.7.2022**	16.11.2022***	113

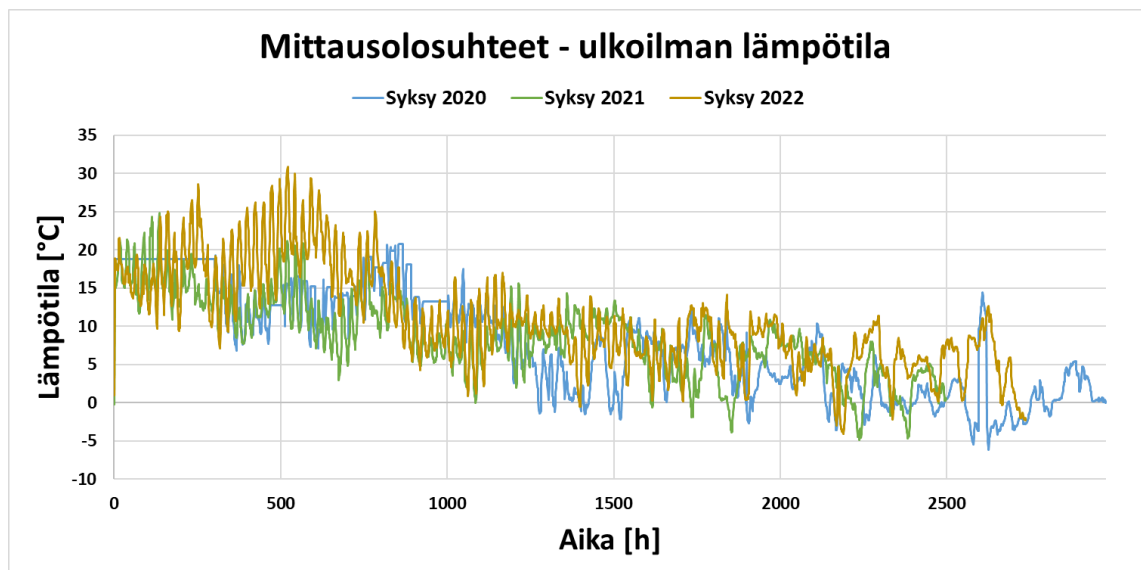
* Ulkoilman olosuhteista ei ole dataa saatavilla välillä 23.8.2020 – 4.9.2020 12:40. Tämä ei kuitenkaan estä vertailemasta tuulensuojalevyn sisäpinnan olosuhteita toisiinsa.

** Mittadatatassa näkyy yksittäinen alitus 23.7.2022, mutta mittauksissa ollut häiriöitä ennen 26.7.2022, joten tätä aiempaa dataa ei monen rakenteen osalta ole saatavissa.

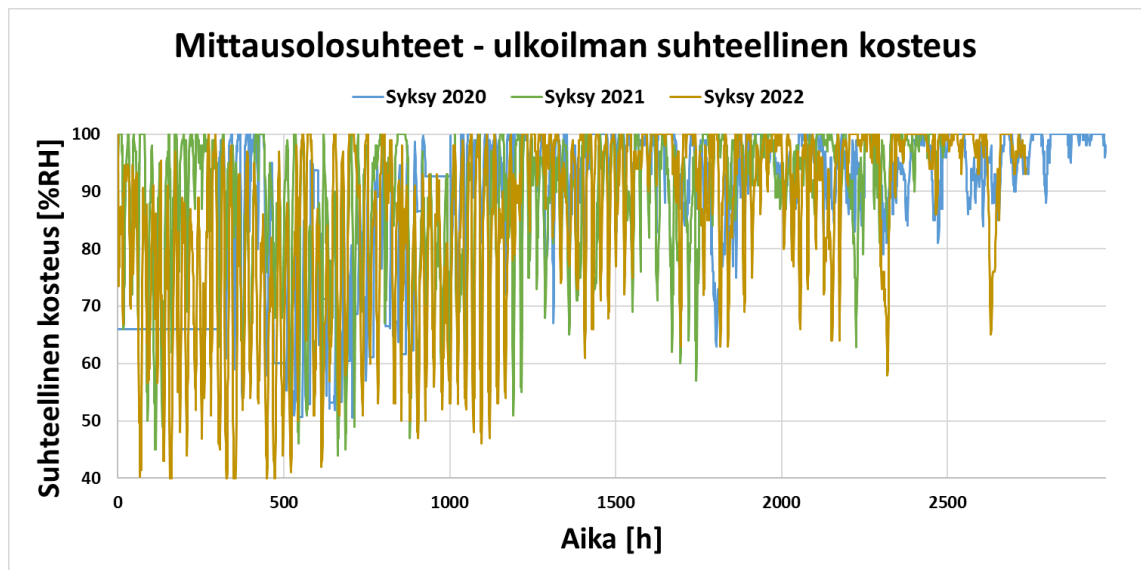
*** Uutena rakenteena kivivillaeristetty puukuitutuulensuojallinen rakenne alitti talven aikana useamman kerran arvon 5. Tämä jakso on rajattu pois, koska olosuhteet jaksolla eivät kuitenkaan keskimäärin ole kosteusteknisesti haastavia.

Tarkastelujaksoja on järkevä rajata juuri mielekkäiden olosuhteiden suhteen, jolloin mahdolliset kesän korkeat lämpötilat tai talven kovat pakkaset eivät vaikeuta tulosten tulkitusta ja rakenteiden keskinäistä vertailua. Esimerkiksi pakkasella korkeamman lämmöneristävyyden omaava tuulensuojalevy tulee erottumaan selvästi edukseen, kun lämpötila tuulensuojalevyn sisäpinnassa on selvästi muita vertailtavia tapauksia korkeampi ja suhteellinen kosteus tällöin myös matalampi. Heikommin lämpöä eristävillä tuulensuojalevyillä olosuhteet eivät kuitenkaan ole kovilla pakkasilla lähellä homehtumisen kannalta kriittistä rajaa. Tällöin eristävemmän tuulensuojan tuoma etu painottuu enemmän rakenteen lämpötekniisiin ominaisuuksiin, eikä ole kosteusteknisen toiminnan kannalta niinkään mielenkiintoinen.

Kuvissa 19 ja 20 on esitetty eri vuosien tarkastelujaksojen ulkoilman olosuhteet samalla kuvaajalla siten, kaikki mittausjaksot alkavat samasta pisteestä ja vaaka-akselilla kulkee mittausjakson pituus tunteina



Kuva 19. Eri vuosien tarkastelujaksojen ulkoilman lämpötila.



Kuva 20. Eri vuosien tarkastelujaksojen ulkoilman suhteellinen kosteus.

Kuvaajilta nähdään, että ulkoilman olosuhteiden muutos syksyllä on ollut melko sama-laista, vaikka tarkastelujaksojen alkamispäivämäärät ovatkin olleet eri ajankohtina. Taulukossa 5 on esitetty eri vuosien tarkastelujaksojen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden keskiarvot.

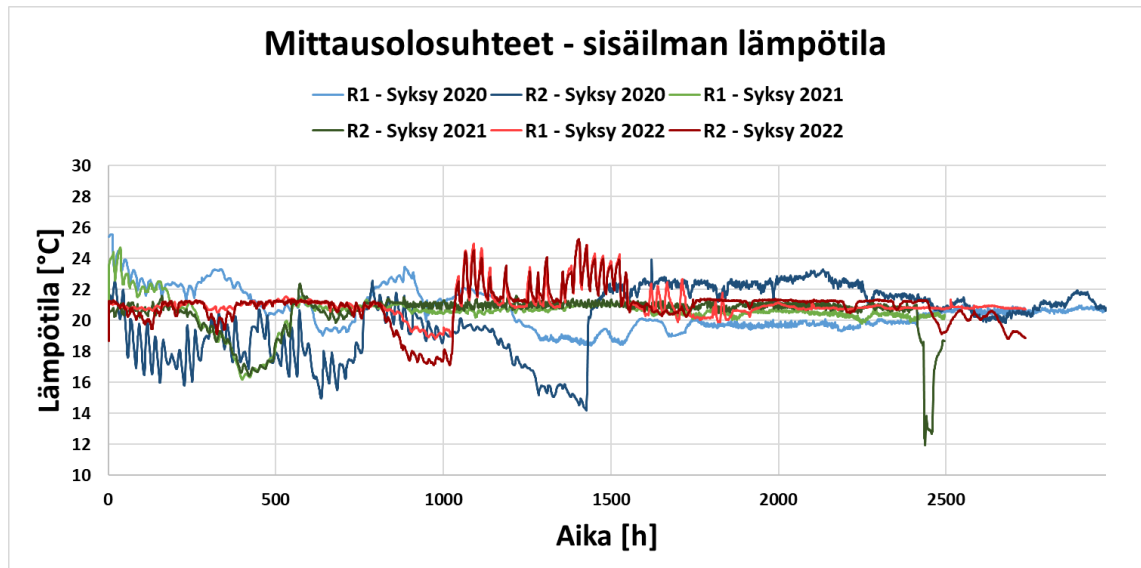
Taulukko 5. Eri vuosien tarkastelujaksojen ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden keskiarvot.

Vuosi	Lämpötilan ka. [°C]	Keskihajonta, s [°C]	Suhteellisen kosteuden ka. [%RH]	Keskihajonta, s [%RH]
2020	6,4 *	6,1	90,0 *	12,6
2021	8,6	5,2	88,6	12,2
2022	10,7	6,5	85,7	15,7

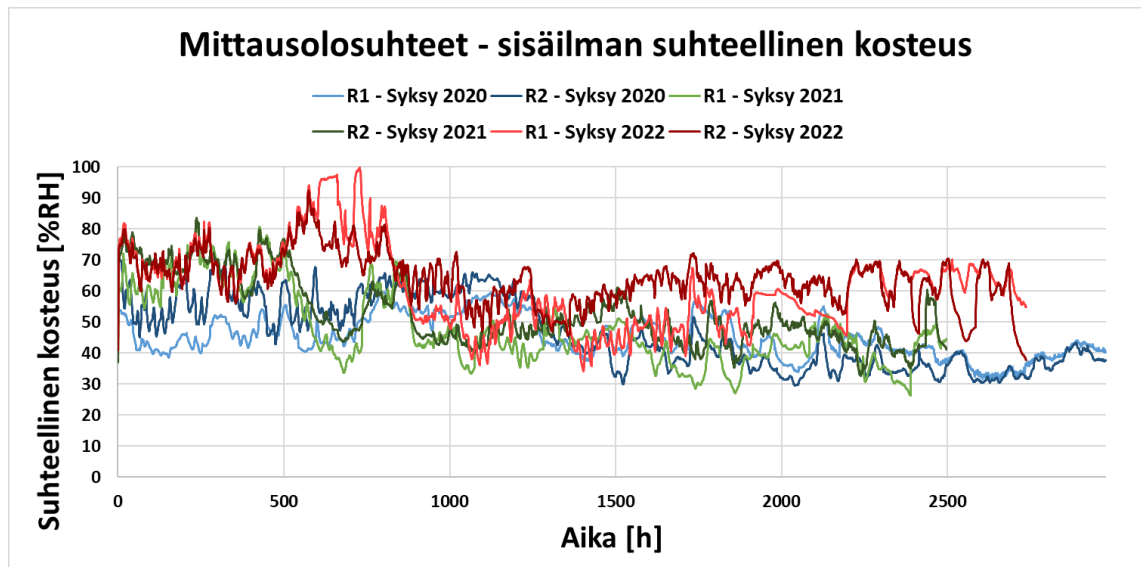
* Vuoden 2020 tarkastelujaksolta ei ole saatavissa dataa ulkoilman olosuhteista jakson alusta. Datan puuttuminen todennäköisesti laskee jakson keskimääräistä lämpötilaa ja nostaa keskimääräistä suhteellista kosteutta.

Taulukosta 5 nähdään, että tarkastelujaksojen keskiarvotettujen ulkoilman olosuhteiden välillä löytyy eroja. Vuoden 2022 jakso vaikuttaisi selvästi lämpimimmältä, kun taas aiempien vuosein 2020 ja 2021 suhteellisen kosteuden keskiarvo on ollut hieman korkeampi. Vuoden 2020 osalta on vaikea arvioida paljonko puuttuvien päivien data vaikuttaisi koko tarkastelujakson keskiarvoihin.

Sisäilman olosuhteita on pyritty pitämään tasaisena koko mittausjakson ajan, mutta erilaisien haasteitten takia olosuhteet eivät ole olleet täysin halutun kaltaiset koko mittausjakson ajan. Kuvissa 21 ja 22 on esitetty kummankin koerakennuksen sisäilman eri huoneiden väliset keskiarvot lämpötilalle ja suhteelliselle kosteudelle tarkastelujaksojen aikana.



Kuva 21. Eri vuosien tarkastelujaksojen kummankin koerakennuksen sisäilman lämpötila.



Kuva 22. Eri vuosien tarkastelujaksojen kummankin koerakennuksen suhteellinen kosteus.

Kuvassa 21 nähdään, että lämpötilan ohjauksen kanssa on ollut huomattavasti enemmän ongelmia ensimmäisen mittausvuoden 2020 aikana (kuvassa sinisellä). Myös jälkimmäisinä vuosina lämmitys- ja jäähdytystarpeen vaihtelu on tuottanut ohjaukselle haasteita. Sisäilman kosteuden ohjauksen kanssa oli haasteita päästä riittävän korkeisiin kosteuksiin. Järjestelmä saatiin toimimaan paremmin vuonna 2022, joka näkyy kuvassa 22 punaisen käyrän keskimäärin koreampina suhteellisen kosteuden arvoina.

Taulukossa 6 on esitetty eri vuosien tarkastelujaksojen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden keskiarvot.

Taulukko 6. Eri vuosien tarkastelujaksojen sisäilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden keskiarvot.

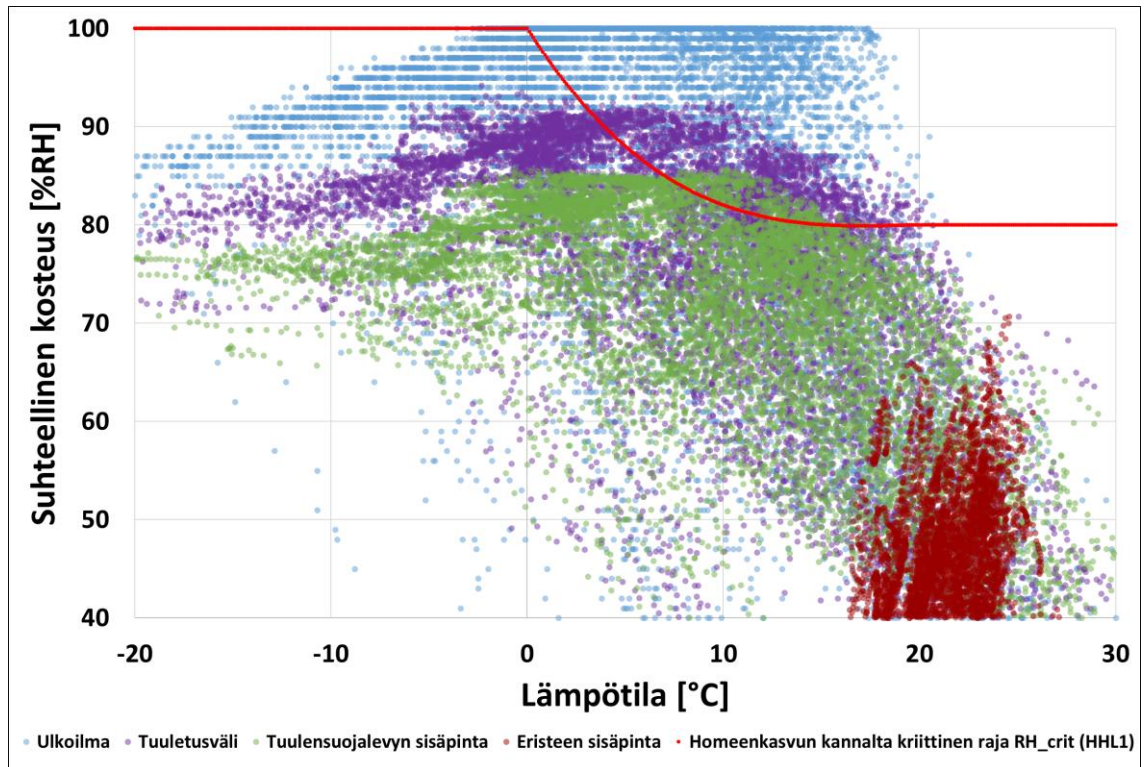
Vuosi	Koerakennus 1				Koerakennus 2			
	Lämpötila [°C]		Suhteellinen kosteus [%RH]		Lämpötila [°C]		Suhteellinen kosteus [%RH]	
	T _{ka}	s	RH _{ka}	s	T _{ka}	s	RH _{ka}	s
2020	20,6	1,3	45,2	6,6	20,1	2,2	46,4	11,1
2021	20,3	1,2	49,7	13,9	20,8	1,0	46,5	10,8
2022	21,1	0,9	60,9	13,0	21,1	0,9	63,7	8,2

Taulukosta 6 nähdään sisäilman lämmityksen ja kosteuden hallintajärjestelmiin tehtyjen muutosten vaikutuksia. Lämpötilan keskihajonta on pienentynyt vuoteen 2022 tultaessa. Suhteellinen kosteus on puolestaan saatu pysymään huomattavasti korkeammalla tasolla vuoden 2022 tarkastelujaksolla. Kummankin rakennuksen olosuhteet ovat olleet eri vuosien mittausjaksoilla hyvin samanlaisia keskenään. Eri vuosien vaihtelut sisäolosuhteissa eivät tuota tämän tutkimuksen vertailuihin ongelmia, koska kaikki tutkittavat rakenteet ovat olleet samoissa tutkimustiloissa ja samoissa sisä- ja ulko-olosuhteissa.

3.1.2 Tarkastelupisteiden valinta

Koerakenteisiin on asennettu useita antureita useamman eri rakennekerroksen rajapintaan. Kaikkia antureita ei kuitenkaan ole mielekästä tarkastella jo ihan siihen kuluien resurssien takia. Kosteusteknisen toiminnan kannalta rakenteiden mielenkiintoisin rakennekerrosten välinen rajapinta löytyy tuulensuojalevyn sisäpinnasta. Kyseinen pinta on lähimpänä ulkoilmaa oleva pinta, joka on yhteydessä rakenteen eristetilaan. Homehutumista kyseiselle pinnalle ei sallita ja sen olosuhteiden tarkastelu antaa hyvä vertailupinnan eri koerakenteille.

Kuvassa 23 on esitetty erään koerakenteen ja sen ympäröivien olosuhteiden mittaustuloksista muodostetut pistepilvikuvaajat.



Kuva 23. Erään koerakenteen ja sen ympäröivien rakenteiden mittaustulokset pis-tepilvikuvaajalla.

Kuvassa 23 sinisellä on kuvattu ulkoilman, violetilla tuuletusvälin, vihreällä tuulensuoja-levyn sisäpinnan ja tummanpunaisella eristeen sisäpinnan olosuhteita. Kuvan punainen viiva kuvaa homehtumisherkkyysluokan 1 kriittisen suhteellisen kosteuden rajaa. Tässä raportissa keskitytään tarkastelemaan kuvan virheitä pisteitä vastaavia olosuhteita tutkittavilla koerakenteille.

Tuulensuojalevyn sisäpinnassa olosuhteet vaihtelevat lisäksi sijainnin mukaan. Lämpötila on matalimmillaan eristevälin keskellä, missä etäisyys runkotolppiin on suurin ja runkotolppien läpi johtuva lämpö vaikuttaa vähiten. Oletusarvoisesti tämä on kriittisin tarkasteltavin piste.

Kaikki materiaalit eivät kuitenkaan kuulu samaan homehtumisherkkyysluokkaan. Heikommin homehtuvilla eristemateriaaleilla kriittisin piste saattaakin löytyä runkotolpan ulkonurkasta. Tästä syystä kaikkien rakenteiden osalta toiseksi mittapisteeksi valitaan tuulensuojalevyn sisäpinnassa runkotolpan vieressä oleva anturi.

Edellä kuvattujen mittapisteiden anturit sijaitsevat rakenteissa samalla korkeudella ja samassa runkotolppavälissä.

Edellä kuvattujen mittapisteiden lisäksi tulokset luodaan sekä pohjois- että eteläpuolen koerakenteille.

3.2 Vertailutapaukset

Käydään läpi ECOSAFE- ja ECOSAFE2-projektien vertailutapaukset. Vertailua on saatu tehtyä seuraavien muuttujien suhteen.

- Tuulensuojalevy (savituulensuoja – puukuitutuulensuoja – kivivillatuulensuoja)
- Eristemateriaali (kutterinlastu, savetettu kutterinlastu, kivivilla)
- Anturin sijainti (eristeen keskellä – runkotolpan vieressä)
- Ilmansuunta (pohjoinen – etelä)

Lisäksi tuloksia on käyty läpi myös rakenteiden E1: Tiilijulkisivu, kipsituulensuoja, kutterinlastueriste, höyryns. ja W5: Tiilijulkisivu, kipsituulensuoja, lasivilla, höyryns. välille. Lu-
vussa 2.2 on kuitenkin käyty läpi syyt, miksi kyseisen vertailuparin tuloksia on melko vaikea tulkita pelkästään eristemateriaalin suhteen, kun rakenteissa on keskenään myös muita muuttujia.

3.2.1 Tuulensuojalevy

Tutkimuksessa käytettyjen erilaisten tuulensuojalevyjen kosteusteknistä toimivuutta saadaan arvioitua vertailemalla rakenteita, joiden välillä muuttujana on vain tuulensuojalevy. Tässä tutkimuksessa koerakenteissa on käytetty seuraavia tuulensuojalevyjä:

- Paroc Cortex 30 mm -kivivillatuulensuojalevy
- Hunton-bitumoitu puukuitutuulensuojalevy
- savituulensuojalevy (valmistanut: Timo Kallio)

Taulukossa 8 on listattu tuulensuojalevyjen eri vertailutapaukset.

Taulukko 8. *Tuulensuojalevyn vertailutapaukset.*

Kutterinlastueristeiset rakenteet

E3 S: Savituulensuoja, 300 mm kutterinlastueriste

E3 V: Kivivillatuulensuoja, 300 mm kutterinlastueriste

E4: Puukuitutuulensuoja, 300 mm kutterinlastueriste

Kivivillaeristeiset rakenteet

E6 P: Puukuitutuulensuoja, 200 mm kivivillaeriste

E6_V: Kivivillatuulensuoja, 200 mm kivivillaeriste

Koerakenteissa E1 ja W5 on käytetty kipsituulensuojalevyjä, mutta niiden tulosten vertailu muihin tuulensuojalevytapauksiin ei suoraan onnistu, koska rakenteissa on muitakin eroavaisuuksia.

3.2.2 Eristemateriaali

Tutkimuksessa käytettyjen erilaisten eristemateriaalien kosteusteknistä käyttäytymistä saadaan arvioitua vertailemalla rakenteita, joiden välillä muuttujana on vain käytetty eristemateriaali. Tässä tutkimuksessa koerakenteissa on käytetty seuraavia eristemateriaaleja:

- Pölkky kutterinlastueriste
- savetettu Pölkky kutterinlastueriste
- savetettu EHTA kutterinlastueriste
- Paroc eXtra -kivivillaeriste
- Isover KL-36 lasivillaeriste

Taulukossa 9 on listattu eristemateriaalien eri vertailutapaukset.

Taulukko 9. Tuulensuojalevyn vertailutapaukset.

Puukuitutuulensuoja

E2: Puukuitutuulensuoja, 300 mm savetettu Pölkky kutterinlastueriste

E4: Puukuitutuulensuoja, 300 mm Pölkky kutterinlastueriste

E6 P: Puukuitutuulensuoja, 200 mm kivivillaeriste *

Kivivillatuulensuoja

E3 V: Kivivillatuulensuoja, 300 mm Pölkky kutterinlastueriste

E5: Kivivillatuulensuoja, 300 mm savetettu EHTA kutterinlastueriste

E6 V: Kivivillatuulensuoja, 200 mm kivivillaeriste *

Kipsituulensuoja **

E1: Kipsituulensuoja, 300 mm Pölkky kutterinlastueriste

W5: Kipsituulensuoja, 300 mm lasivillaeriste

* Kivivillaeristeen kohdalla runkopaksuus on eri kuin puupohjaisilla eristeillä. Runkopaksuuden valinta käyty läpi luvussa 2.2.7.

** Rakenteiden E1 ja W5 välillä on eristemateriaalin lisäksi myös muita eroja, jotka vaikeuttavat eristemateriaalien vertailua. Erot käyty läpi luvussa 2.2

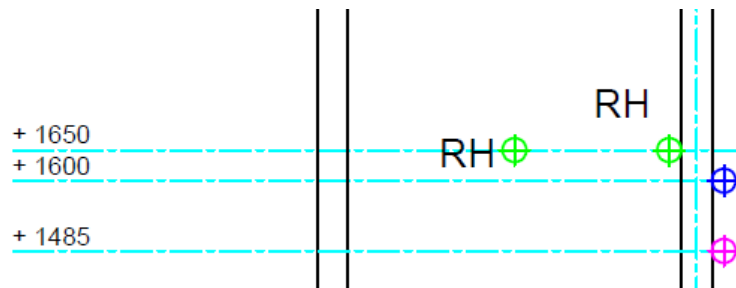
Luvussa 2.2.6 käytiin läpi rakenteiden E2 ja E5 savetetun kutterin eroja. Siellä esitetyistä syistä kyseisiä eristemateriaaleja on hyvä tuloksia tarkasteltaessa käsitellä eri materiaaleina.

3.2.3 Anturin sijainti

Tuloksia tarkastellaan kahden eri mittapisteen suhteen. Toinen on sijoitettu runkotolppavälin keskelle eristeen kohdalle ja toinen runkotolpan viereen. Antureiden sijainti on kaikkien vertailtavien rakenteiden E2...E6 välillä sama. Future Spaces -hankkeeseen linkitetyn rakenteen E1 ja rakenteen W5 kohdalla antureiden sijainti korkeussuunnassa on

hieman eri. Lisäksi kahden jälkimmäisen rakenteen kohdalla runkotolpan viereen ja eristeiden kohdalle sijoitetut anturit ovat keskenään eri korkeuksilla elementissä, kun taas rakenteiden E2...E6 kohdalla kumpikin anturi on sijoitettu samaan runkotolppaväliin ja samalle korkeudelle, jolloin tulokset ovat hyvin vertailtavissa keskenään. Anturin sijaintia on tästä syystä vertailtu vain rakenteiden E2...E6 välillä.

Kuvassa 24 näkyy tässä tarkastelussa käytettyjen antureiden sijainnit koerakenteessa.



Kuva 24. ECOSAFE-koerakenteiden HMP110-anturien sijainti tuulensuojalevyn sisäpinnassa.

Kuvan 24 vihreällä merkityt RH-anturit ovat tässä tarkastelussa käytetyt Vaisalan HMP110-anturit, jotka on sijoitettu kunkin rakenteen tuulensuojalevyn sisäpintaan korkeudella 1 650 mm elementin alareunasta.

3.2.4 Ilmansuunta

Kaikista tutkimusrakenteista on tehty kaksi koe-elementtiä, jotka on sijoitettu toistensa peilikuviksi koerakennuksen pohjois- ja eteläjulkisivuille. Näiden elementtiparien avulla saadaan hyvät vertailuparin ilmansuunnan vaikutukselle rakenteen kosteusteknisiin olosuhteisiin.

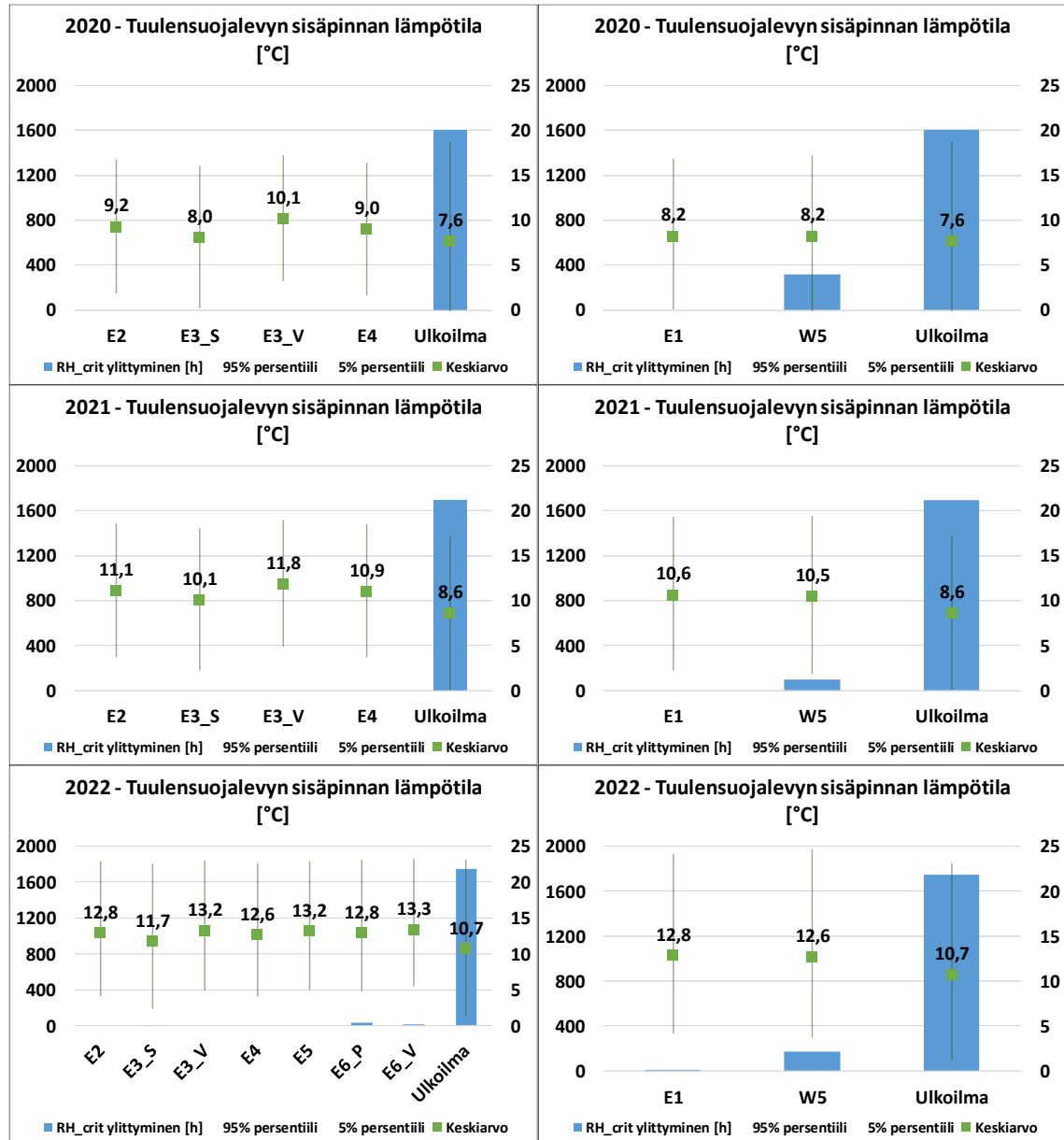
3.3 Tulokset

Rakenteita vertaillaan tuulensuojalevyn sisäpinnan lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittaustulosten avulla. Kosteusteknisen toiminnan kannalta ranteita tullaan vertailemaan ensisijaisesti tuulensuojalevyn sisäpinnan suhteellisen kosteuden suhteen. Ilman suhteellinen kosteus riippuu ilman lämpötilasta ja vesihöyrypitoisuudesta. Tästä syystä on myös hyvä tarkastella pinnan lämpötilaa, joka voi joissain tapauksissa selittää eroja pinna suhteellisessa kosteudessa.

Rakenteiden olosuhteet eivät ylittäneet rajaa, missä homeindeksi tuulensuojalevyn sisäpinnassa olisi lähtenyt kasvuun. Tästä syystä rakenteiden homeindeksikuvaajia ei ole raportissa esitetty.

3.3.1 Eristeen kohdalla, pohjoisjulkisivu

Kuvassa 25 on esitetty jokaisen pohjoisjulkisivulle asennetun koerakenteen tuulensuojalevyn sisäpinnan keskiarvolämpötila eri tarkastelujaksoilla eristeen kohdalta mitattuna.



Kuva 25. Pohjoisjulkisivun koerakenteiden tuulensuojalevyn sisäpinnan keskiarvolämpötila eri tarkastelujaksoilla eristeen kohdalta mitattuna.

Kuvassa 25 on esitetty tuulensuojalevyn sisäpinnan lämpötilan keskiarvo eri koerakenteille pohjoisjulkisivulla ja eristeen kohdalta mitattuna. Vasemmalla puolella rakenteiden E2...E6 tulokset ja oikealla rakenteiden E1 ja W5 tulokset. Kuvaajille on myös otettu vertailutiedoksi ulkoilmalle lasketut vastaavat tulokset. Siniset palkit kuvaavat suomalaisen homemallin homeutumisherkkyysluokan 1 mukaisen kriittisen suhteellisen kosteuden ylittymisiä tunteina (Vinha et al., 2013). Kuten kuvasta nähdään, ei koerakenteissa

ole juurikaan esiintynyt homehtumiselle suotuisia olosuhteita. Vihreillä pisteillä kuvataan tuulensuojalevyn sisäpinna keskiarvolämpötilaa tarkastelujaksolla. Keskiarvo on myös ilmoitettu lukuarvona pisteen yllä. Lisäksi 95 %:n ja 5 %:n persentiilit on esitetty viivoina keskiarvon ympärillä.

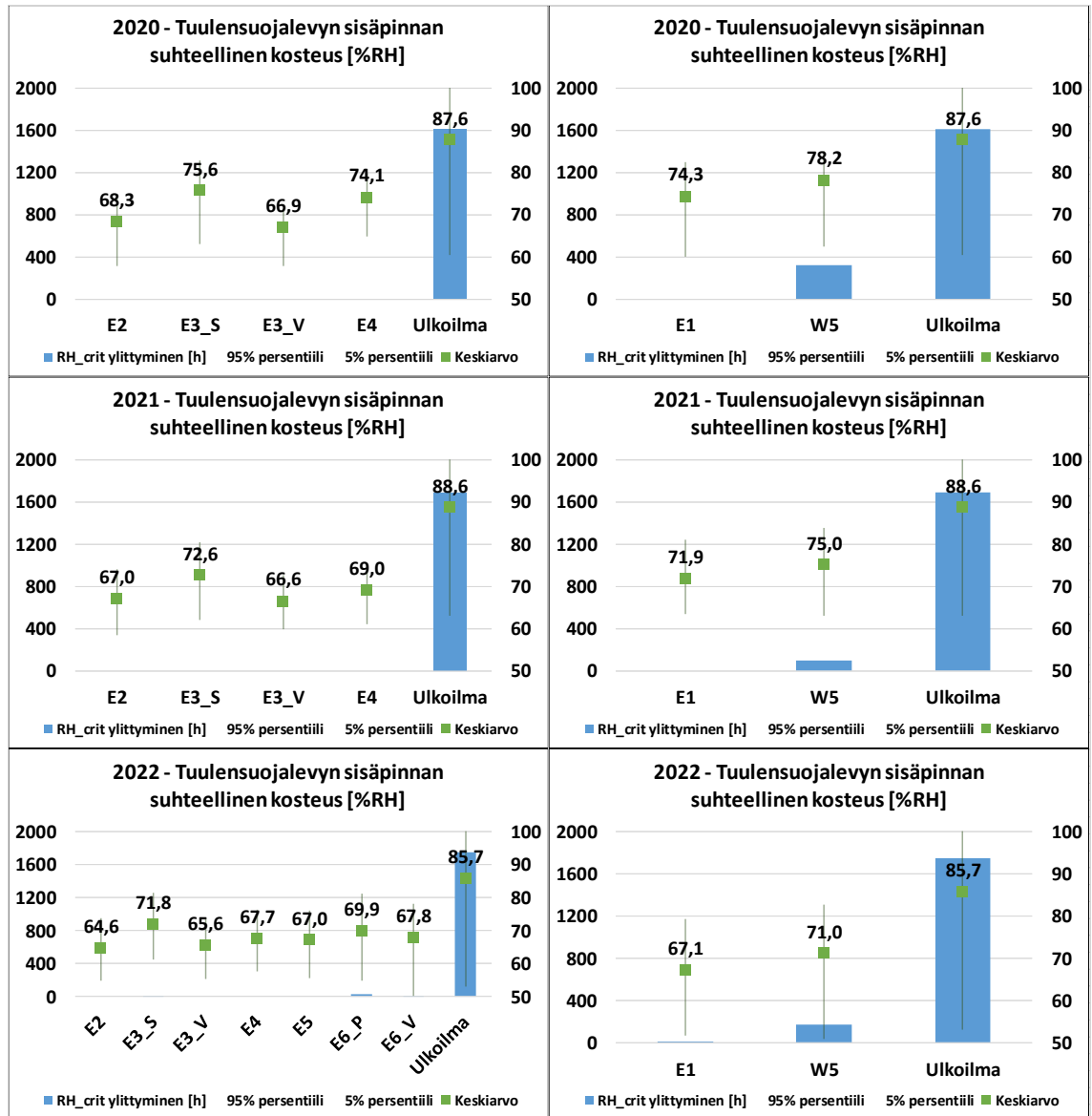
Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta tuulensuojalevyn sisäpinnassa korkeampi lämpötila tarkoittaa yleensä matalampaa suhteellista kosteutta. Koerakenteiden tuulensuojalevyn sisäpinnan lämpötilat riippuvat hyvin vahvasti koerakenteeseen valikoidusta levytyypistä. Kuvan 25 vasemmanpuoleisilla kuvaajilla nähdään, että voimakkaammin lämpöä johtavan savituulensuojalevyn kanssa, rakenne E3_S, levyn sisäpinnan lämpötila pysyy selvästi muita alempana ja vain hieman ulkoilman lämpötilaa korkeampana. Puukuitutuulensuojat pärjäävät hieman paremmin, rakenteet E2, E4 ja E6_P, ja ovat noin asteen verran savituulensuojan tuloksia parempia. Kivivillatuulensuojien kanssa levyn sisäpinnan lämpötila pysyy selvästi korkeimpana, rakenteet E3_V, E5 ja E6_V, ollen keskimäärin reilu puoli astetta puukuitutuulensuojan vastaavia lämpötiloja korkeampia.

Rakenteiden E1 ja W5 välillä ei ole juurikaan eroja tuulensuojalevyn sisäpinnan lämpötilan keskiarvoissa. Tulos on odotettu, koska rakenteet ovat tuulensuojalevystä ulospäin täysin samanlaisia.

Kuvassa 26 on esitetty vastaavat tulokset kuin edellä, mutta tuulensuojalevyn sisäpinnan suhteelliselle kosteudelle. Kuvasta nähdään hyvin edellä saatujen levyn sisäpinnan lämpötilalle saatujen tulosten yhteys levyn sisäpinnan suhteelliseen kosteuteen. Esimerkiksi savituulensuojalevyn sisäpinnan lämpötila, rakenne E3_S, oli selvästi muita matalampi. Nyt nähdään, että kuvan 26 vasemmalla puolella savituulensuojalevyn kanssa levyn sisäpinnan suhteellinen kosteus pysyy selvästi muita rakenteita korkeampana.

Kuvista myös nähdään, että vuosien 2020 ja 2021 tarkastelujaksoilla kivivillatuulensuojan ja kutterinlastueristeen yhdistelmä, rakenne E3_V, on saanut puukuitutuulensuojan ja savetetun kutterinlastueristeen yhdistelmän, rakenne E2, ohella parhaimmat tulokset. Levyn sisäpinnan suhteellinen kosteus on kummassakin tapauksessa pysynyt matalalla verrattuna muihin koerakenteisiin. Tästä syystä ECOSAFE2-projektissa haluttiinkin tuoda kummankin tapauksen ns. paras materiaaliveikote samaan rakenteeseen ja tätä varten tutkimukseen otettiin mukaan kivivillatuulensuojan ja savetetun kutterinlastun yhdistelmä, rakenne E5. Eristemateriaali poikkeaa kuitenkin merkittävästi rakenteen E2 savetetusta kutterinlastueristeestä. Eroja on käyty läpi luvussa 2.2.6 ja merkittävin syy tähän todennäköisesti on eristeen hieman erilainen koostumus sekä asennustapa sekä

-tiheys. Mitä tiheämpään eriste on saatu, sitä suurempi sen kosteuskapasiteetti. Nyt rakenne E2 oli selvästi tiheämpi kuin rakenteet E4 ja E5, jotka puolestaan asettuivat melko samaan tiheyteen. Voi myös olla, ettei uusi rakenne E5 ole täysin ehtinyt tasoittumaan ja sen tulokset ovat tästä syystä hieman eri tasolla. Asiaan saadaan varmuus vasta seuraavan syksyyn (2023) aikana. Ne tulokset eivät kuitenkaan ehdi tähän raporttiin.



Kuva 26. Pohjoisjulkisivun koerakenteiden tuulensuojalevyn sisäpinnan suhteellisen kosteuden keskiarvo eri tarkastelujaksolla eristeen kohdalta mitattuna.

Vuoden 2022 tarkastelujaksolla uusi rakenne asettuu nyt lähemmäs puukuitutuulensuojan ja kutterinlastueristeen yhdistelmää, rakennetta E4. Rakenteet E3_V ja E2 ovatkin olleet yhä vuoden 2022 tarkastelujaksolla kosteusteknisesti parhaiten pärjänneet rakenteet.

Kuvan 26 oikealla puolella esitettyjen rakenteiden E1 ja W5 tuloksissa on selvästi nähtävissä eroja. Lämpötilat tuulensuojalevyn sisäpinnassa todettiin jo kuvan 25 tuloksissa olleen rakenteiden välillä melko samansuuruisia. Kutterinlastueristeisen rakenteen E1 suhteellinen kosteus levyn sisäpinnassa on ollut selvästi lasivillaeristeisen rakenteen W5 vastaavaa matalammalla tasolla.

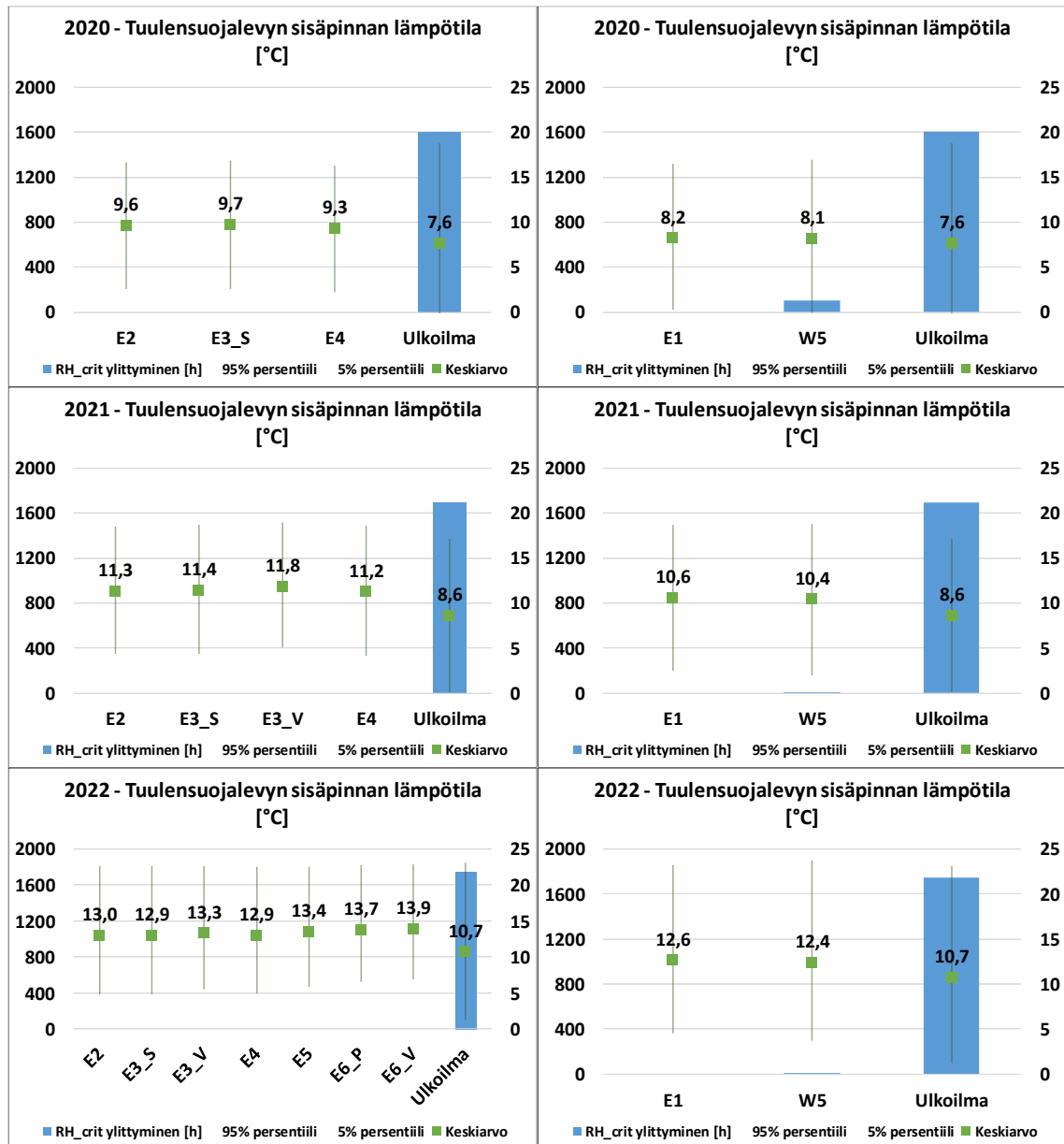
3.3.2 Runkotolpan vieressä, pohjoisjulkisivu

Kuvassa 27 nähdään eri tarkastelujaksojen keskiarvotulokset koerakenteiden tuulensuojalevyn sisäpinnan lämpötilalle runkotolpan vierestä mitattuna pohjoisjulkisivulla. Tuulensuojalevyn sisäpinnan lämpötila on runkotolpan vierestä mitattuna keskimäärin hieman korkeampi kuin eristeen kohdalta mitattuna. Koerakenteissa runkotolpan kohdalla lämpö pääsee johtumaan suoraan sisäpinnasta tuulensuojalevyyn asti, joten tulos oli odotettavissa.

Kivivillatuulensuojallisen kutterilastueristetyn rakenteen E3_V ensimmäisen tarkastelujakson mittauksissa datassa oli epäjohtonmukainen jakso, missä anturi antoi n. -20 °C tuloksia. Kyseisen rakenteen vuoden 2020 tarkastelujakson tuloksia ei voida tämän anturin osalta ottaa tarkasteluun. Vuosien 2021 ja 2022 tarkastelujaksoilta kyseisen rakenteen osalta saatu data on kunnossa.

Kun tarkastellaan pidempään mittauksessa olleita rakenteita E2, E3_S, E3_V ja E4, runkotolpan vieressä lämpötila on noussut eristeen keskeltä mitattuun tulokseen nähden enemmän heikommin lämpöä eristävien tuulensuojalevyjen kanssa. Savituulensuojan kanssa runkotolpan läheisyydestä mitattu tuulensuojalevyn sisäpinnan lämpötila on selvästi eristeen kohdalta mitattua vastaavan pinna lämpötilaa korkeampi. Puukuitutuulensuojan kanssa nousu on hieman maltillisempaa ja kivivillatuulensuojan kanssa pienintä. Tuulensuojalevyjen keskiarvolämpötilat ovat nyt hyvin lähellä toisiaan. Runkotolpan taasaavat eri eristeiden ja tuulensuojalevyjen vaikutusten eroja.

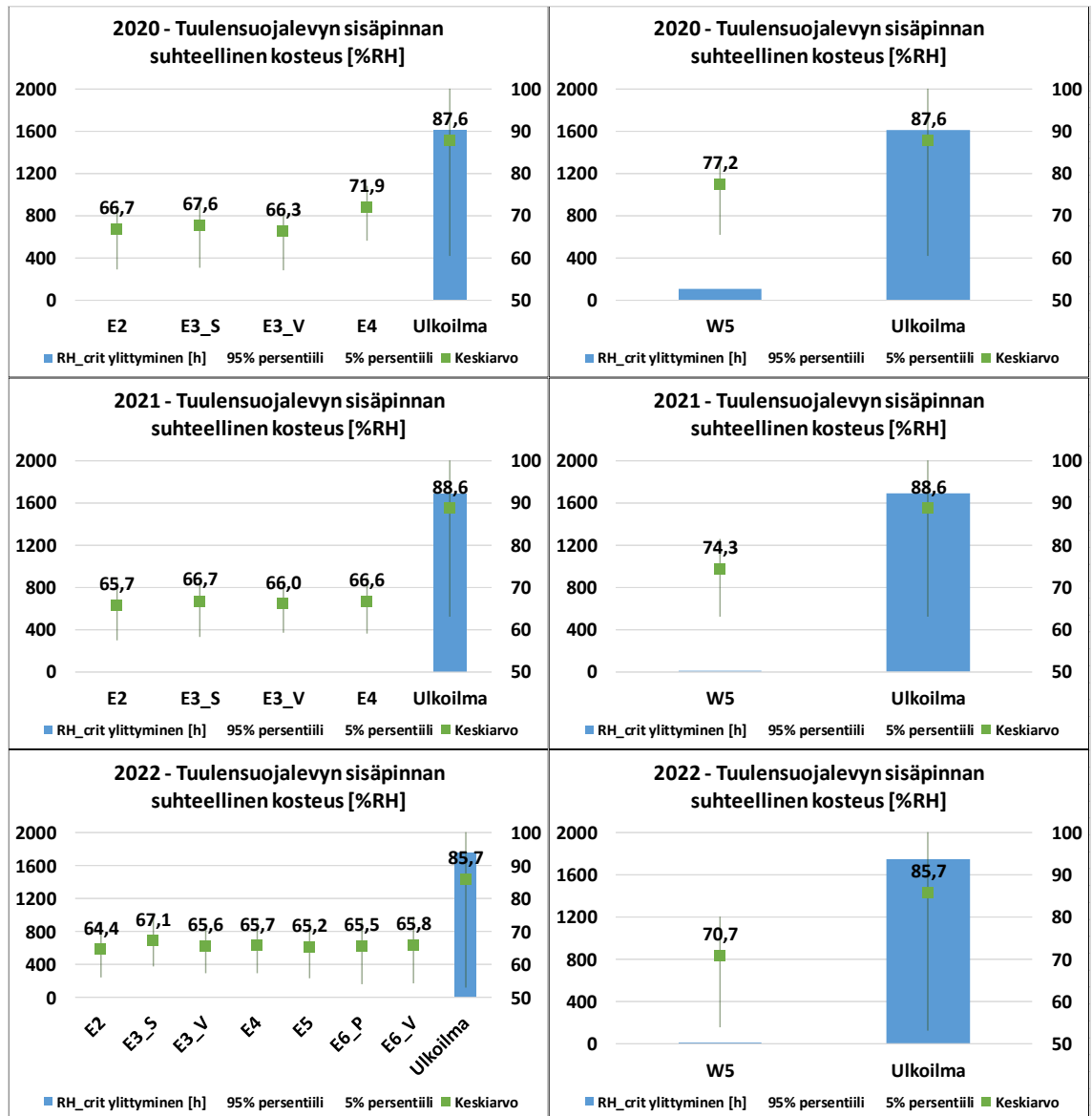
Vuoden 2022 mittauksissa kivivillaeristeisillä rakenteilla E6_P ja E6_V muutoksen ovat selvästi kutterilastueristeisiä rakenteita suurempia. Tämä johtuu oletettavasti pienemmästä runkopaksuudesta.



Kuva 27. Pohjoisjulkisivun koerakenteiden tuulensuojalevyn sisäpinnan keskiarvolämpötila eri tarkastelujaksoilla runkotolpan vierestä mitattuna.

Tiilijulkisivullisilla rakenteilla E1 ja W5 lämpötila on jokaisella tarkastelujaksolla hyvin lähellä samaa arvoa runkotolpan vierestä mitattuna kuin eristeen kohdalta mitattuna.

Kuvassa 28 on esitetty vastaavat tulokset tuulensuojalevyn sisäpinnan suhteelliselle kosteudelle, kuin mitä edellisessä kuvassa esitettiin lämpötilalle.



Kuva 28. Pohjoisjulkisivun koerakenteiden tuulensuojalevyn sisäpinnan suhteellisen kosteuden keskiarvo eri tarkastelujaksolla runkotolpan vierestä mitattuna.

Lämpötilakeskiarvojen kohdalla huomattiin, että runkotolppa tasaa melko paljon eri koerakenteiden välisiä eroja ja lämpötila tuulensuojalevyn sisäpinnassa runkotolpan läheisyydessä on kaikkien rakenteiden välillä melko lähellä toisiaan. Sama tulos on myös havaittavissa suhteellisen kosteuden kanssa. Suhteellinen kosteus tuulensuojalevyn sisäpinnassa runkotolpan vieressä on myös pysynyt kaikilla rakenteilla melko matalalla.

Kivivillaeristeisillä rakenteilla runkotolpan vierestä tehty mittausta on todennäköisesti rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisempi kuin olosuhde eristeen kohdalla. Tämä johtuu siitä, että runko on huomattavasti herkemmin homehtuvaa materiaalia kuin eriste. Tällöin koerakenteiden osalta olisi toisaalta perusteltua vertailla kutterinlastueristeisten rakenteiden eristeen kohdalta tehtyä mittausta kivivillaeristeisen raken-

teen runkotolpan vierestä tehtyyn mittaukseen. Nyt kivivillaeristeisten rakenteiden suhteellinen kosteus asettuu likimain samalle viivalle kuin eristeen kohdalta mitattujen paremmin pärjänneiden rakenteiden E2 ja E3_V suhteelliset kosteudet.

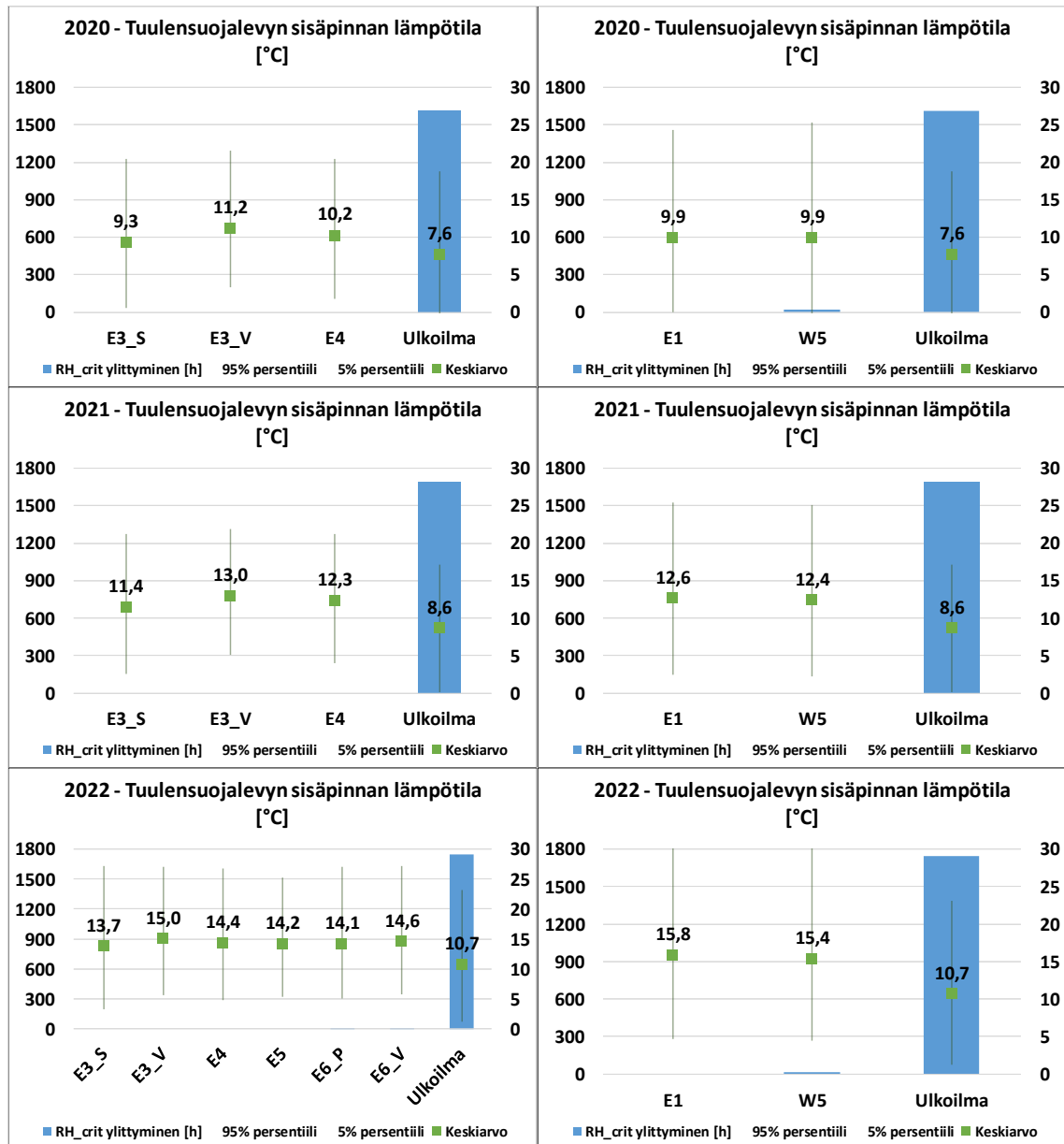
Rakenteen E1 tuulensuojalevyn sisäpintaan runkotolpan viereen sijoitettu anturi ei ole toiminut kunnolla, eikä kyseiselle rakenteelle ole tässä tarkastelutapauksessa saatavilla tuloksia.

3.3.3 Eristeen kohdalla, eteläjulkisivu

Kuvassa 29 on eri tarkastelujaksojen keskiarvotulokset koerakenteiden tuulensuojalevyn sisäpinnan lämpötilalle eristeen kohdalta mitattuna eteläjulkisivulla.

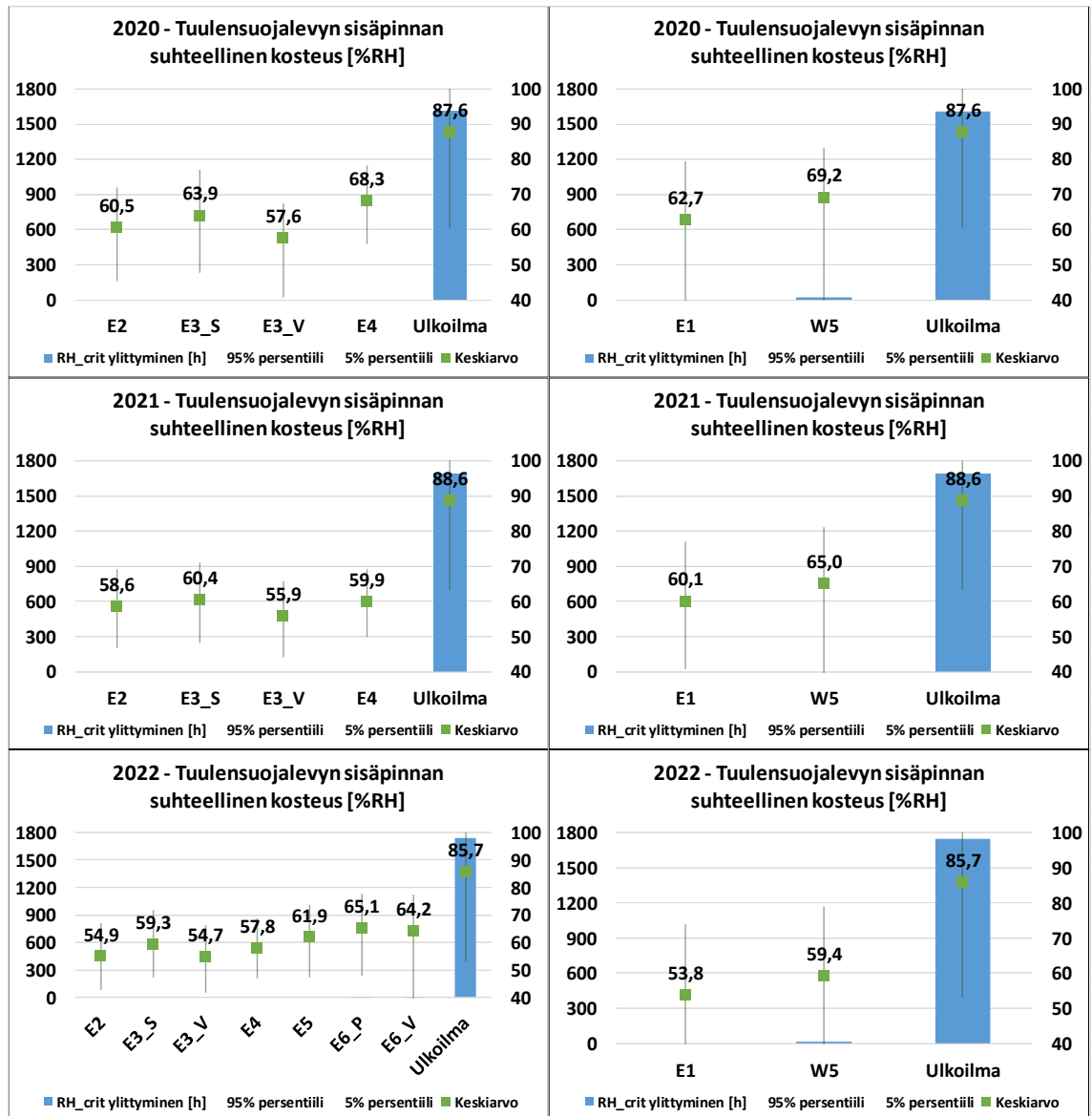
Kuvan 29 tuloksia voidaan verrata luvun 3.3.1 kuvan 25 vastaaviin tuloksiin. Eteläjulkisivulla on nähtävissä samat trendit tuulensuojalevymateriaalin vaikutuksesta levyn sisäpinnan lämpötilaan kuin mitä pohjoisjulkisivun tuloksissa havaittiin. Lämpötilakeskiarvot ovat kuitenkin eteläjulkisivulla kauttaaltaan selvästi pohjoisjulkisivun vastaavia tuloksia korkeampia.

Tiilijulkisivullisilla rakenteilla E1 ja W5 lämpötilan nousu pohjoisjulkisivulta eteläjulkisivulle on hieman puujulkisivullisia rakenteita voimakkaampaa. Tulos on odotettu, koska eteläjulkisivu saa huomattavasti enemmän auringon säteilyä ja tiilijulkisivu pystyy varastoimaan lämpöenergiaa huomattavasti puujulkisivua enemmän.



Kuva 29. Eteläjulkisivun koerakenteiden tuulensuojalevyn sisäpinnan keskiarvolämpötila eri tarkastelujaksoilla eristeen kohdalta mitattuna.

Kuvassa 30 on esitetty vastaavat tulokset kuin edellä, mutta tuulensuojalevyn sisäpinnan suhteelliselle kosteudelle.



Kuva 30. Eteläjulkisivun koerakenteiden tuulensuojalevyn sisäpinnan suhteellisen kosteuden keskiarvo eri tarkastelujaksolla eristeen kohdalta mitattuna.

Kuvasta 30 nähdään, että samat rakenteen osoittautuvat edukseen eteläjulkisivulla kuin pohjoisjulkisivun kohdalla luvussa 3.3.1 todettiin. Pidempään mittauksissa olleista puujulkisivullisista rakenteista kivivillatuulensuojallinen rakenne E3_V saa koerakenteista matalimman suhteellisen kosteuden keskiarvon jokaisella tarkastelujaksolla. Toiseksi parhaiten rakenteista on pärjännyt savetetulla kutterilla eristetty rakenne E2. Eteläjulkisivulla suhteelliset kosteudet ovat karkeasti yleistäen noin 10 %RH matalampia kuin pohjoisjulkisivulla.

Myös tiilijulkisivullisilla rakenteilla eteläjulkisivulla saatiin selvästi matalammat suhteellisen kosteuden keskiarvot kuin pohjoisjulkisivulla. Ennen tutkimuksen aloitusta tiilijulkisivullisilla rakenteilla ajateltiin olevan mahdollisesti kuormittavammat olosuhteet eteläjulki-

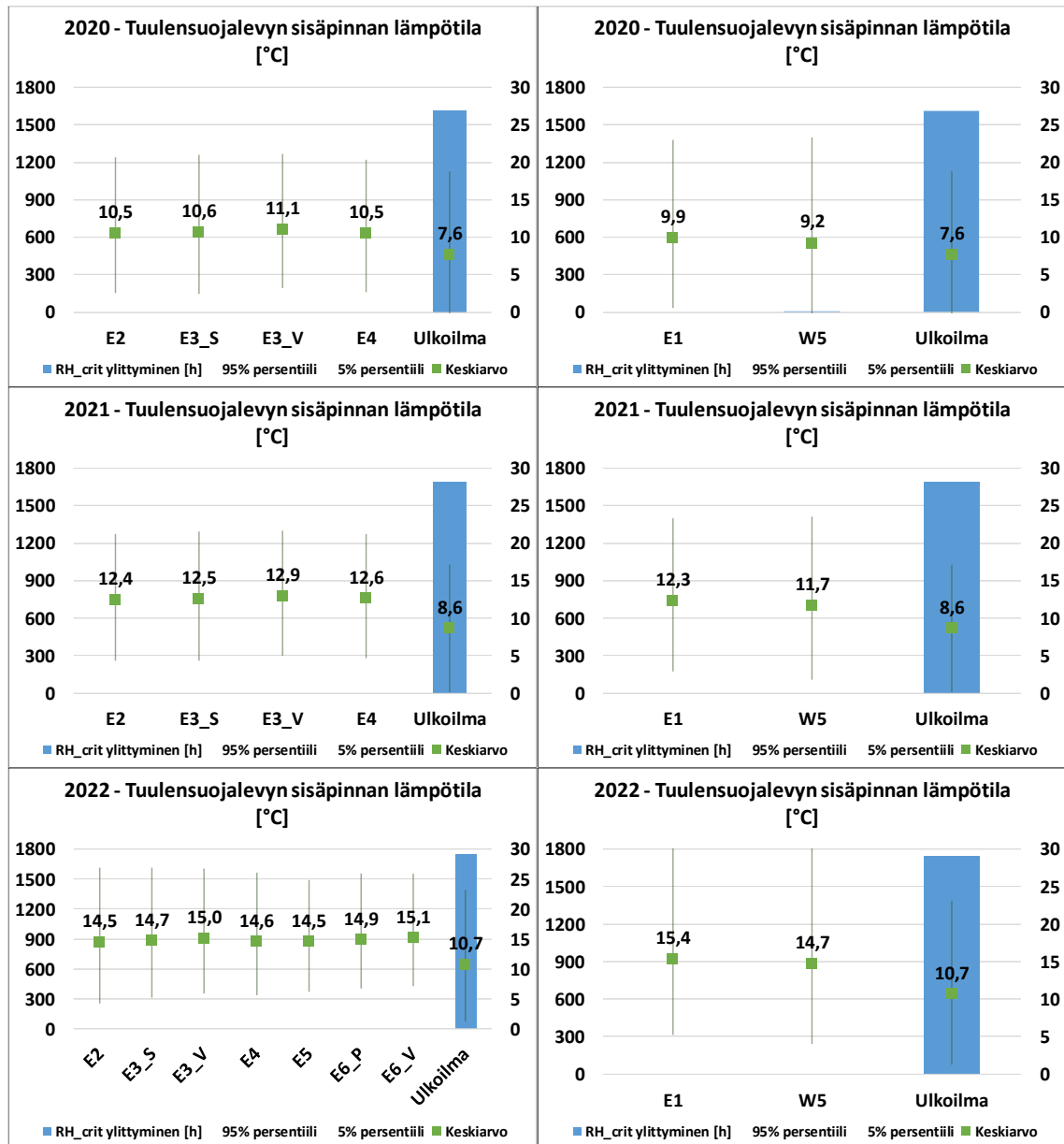
sivulla viistosaderasitusten takia. Merkittävämmäksi tekijäksi osoittautui kuitenkin eteläjulkisivujen lämpiäminen auringonsäteilyn vaikutuksesta ja suhteelliset kosteudet koerakenteiden tuulensuojalevyjen sisäpinnassa pysyivät tästä syystä selvästi pohjoisjulkisivun vastaavia tuloksia matalampina.

3.3.4 Runkotolpan vieressä, eteläjulkisivu

Kuvassa 31 on eri tarkastelujaksojen keskiarvotulokset koerakenteiden tuulensuojalevyn sisäpinnan lämpötilalle eristeen kohdalta mitattuna eteläjulkisivulla.

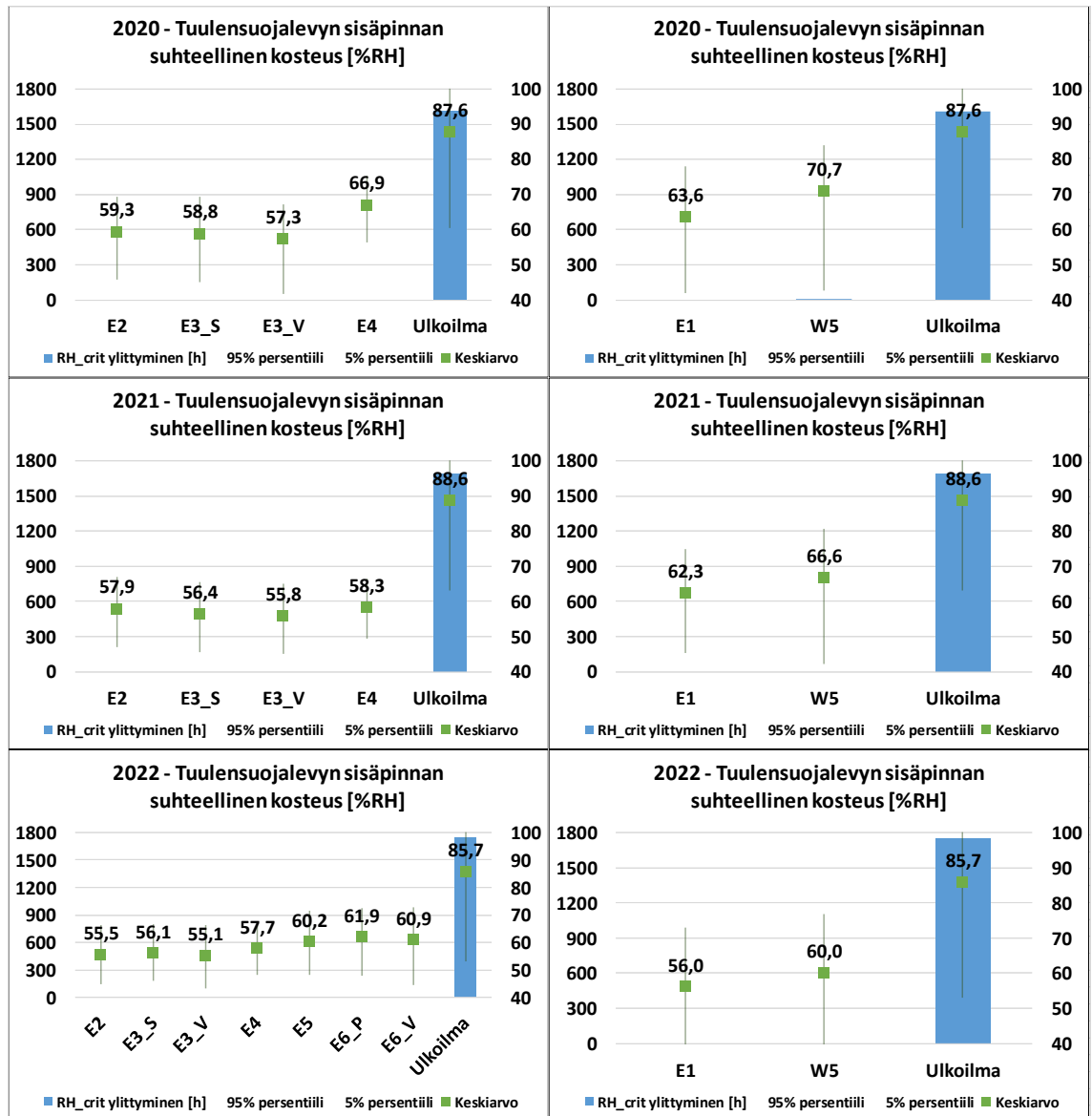
Eteläjulkisivulla on havaittavissa sama ilmiö kuin luvun 3.3.2 pohjoispuolen mittauksissa, missä runkotolpan läheisyydessä erot tuloksissa eri koerakenteiden välillä pienenevät. Eristävämpien tuulensuojalevyjen kanssa ero runkotolpan vierestä ja eristeen kohdalta mitatussa lämpötilassa on hyvin pieni. Enemmän lämpöä johtavilla tuulensuojalevyillä lämpötila runkotolpan vieressä on selvästi eristeen kohdalta mitattua lämpötilaa korkeampi.

Eteläpuolen mittauksissa lämpötilat tuulensuojalevyn sisäpinnassa runkotolpan vieressä pysyvät samalla tavalla kauttaaltaan pohjoispuolen vastaavia lämpötiloja korkeampina kuin mitä luvussa 3.3.3 todettiin eristeen kohdalta tehtyjen mittausten kanssa.



Kuva 31. Eteläjulkisivun koerakenteiden tuulensuojalevyn sisäpinnan keskiarvolämpötila eri tarkastelujaksoilla runkotolpan vierestä mitattuna.

Kuvassa 32 on esitetty vastaavat tulokset kuin edellä, mutta tuulensuojalevyn sisäpinnan suhteelliselle kosteudelle.



Kuva 32. Eteläjulkisivun koerakenteiden tuulensuojalevyn sisäpinnan suhteellisen kosteuden keskiarvo eri tarkastelujaksoilla runkotolpan vierestä mitattuna.

Tulokset ovat johdonmukaisia pohjois- ja eteläjulkisivun mittausten eroja käsittelevän luvun 3.3.3 sekä eristeen kohdalta ja runkotolpan vierestä mitattujen tulosten eroja käsittelevän luvun 3.3.2 kanssa.

Ainoa selvä ero on, että pohjoispuolella verrattaessa kivivillaeristeisten rakenteiden runkotolpan vierestä tehtyä mittausta kutterinlastueristeisten rakenteiden eristeen kohdalta tehtyihin mittauksiin, saatiin melko yhä hyviä tuloksia, mutta eteläpuolen mittauksissa kivivillaeristeisten rakenteet ovat tässä vertailussa kutterinlastueristeisiä rakenteita heikompi.

3.4 Yhteenveto

Tarkasteluihin valittiin neljä eri vertailutekijää, joiden suhteen tuloksia on tarkasteltu: tuulensuojalevy, eristemateriaali, anturin sijainti ja julkisivun ilmansuunta.

Tässä tutkimuksessa rakenteita tarkasteltiin kolmen eri syksyn ajan todellisissa ulkoilman olosuhteissa. Kyseiset vuodet eivät edusta mitään mitoittavaa tapausta vaan antavat vain mahdollisuuden vertailla tutkittavia rakenteita todellisissa olosuhteissa. Olosuhteet voivat olla tulevaisuudessa olla huomattavasti tässä tutkimuksessa ilmenneitä sääoloja haastavampia. Vaikka kaikki rakenteet pärjäsivät tarkastelujaksoilla hyvin, on perusteltua pyrkiä löytämään niiden välisiä eroja ja arvioimaan niiden paremmuutta kosteusteknisen toiminnan osalta.

Rakenteen tuulensuojalevyllä on oleellinen vaikutus kyseisen levyn ja eristekerroksen rajapinnan lämpötilaan. Kun rakenteessa on hyvin lämpöä eristävä tuulensuojalevy, lämpötila edellä mainitussa rajapinnassa pysyy korkeampana. Korkeampi lämpötila laskee rajapinnan suhteellista kosteutta ja parantaa näin rakenteen kosteusteknistä toimivuutta. Vastaavasti heikommin eristävällä tuulensuojalevyllä rajapinnan lämpötila kulkee lähellä ulkoilman olosuhteita ja riski homeen kasvulle otollisten olosuhteiden syntymiselle on suurempi.

Tässä tutkimuksessa tarkastelussa olleista tuulensuojalevyistä 30 mm kivivillatuulensuojalevy oli selvästi paras, 25 mm bitumoitu puukuitutuulensuoja oli hieman kivivillatuulensuojaa huonompi ja kokeiluun otettu savituulensuojalevy johti liikaa lämpöä ja oli selvästi huonoin vaihtoehto. Kahdessa koerakenteessa käytettyä kipsituulensuojalevyä ei pystytty ottamaan mukaan vertailuun, koska kyseisissä rakenteissa on liikaa muuttujia muihin koerakenteisiin nähden. Tuloksissa ilmenneiden erojen yksilöinti tuulensuojalevyn vaikutuksiin ei onnistu.

Eristemateriaalien osalta vertailu vaikuttaisi antavan positiivisia tuloksia kutterinlastueristeille rakenteille. Savetettu Pölkky kutterinlastueriste oli tarkasteltavista eristemateriaaleista kosteusteknisesti paras. Tulosta selittää pitkälti materiaalin korkea tiheys, joka tuo samalla lisää kosteuskapasiteettia. Myös Pölkky kutterinlastueriste sellaisenaan pärjasi hyvin.

Tutkimukseen tuotiin ECOSAFE2-projektin aikana ns. parhaana yhdistelmänä kivivillatuulensuojan ja savetetun kutterinlastueristeen yhdistelmä rakenne. Uuteen rakenteeseen E5 otettiin aiemmista rakenteista poiketen savetettua EHTA kutterinlastueristettä. Eristeen tiheys jäi huomattavasti matalammaksi kuin aiemmin käytetty savetettu Pölkky kutterinlastueriste. Kutterinlastueristeen kosteustekninen toiminta vaikuttaisi tämän tut-

kimuksen perusteella paranevan, kun eristeen tiheys kasvaa. Se, että uudesta rakenteesta ei ole kuin yhden syksyn mittaukset, rajoittaa tarkastelun kykyä sanoa eristeen varmasti olleen aiempia kutterinlastueristeitä huonompi, mutta sen suuntaisia tuloksia mittauksissa saatiin. Tulevaisuudessa toisen syksyn mittaukset tuovat havainnolle varmuuden ja voidaan poissulkea eristeen tasaantumisesta johtuvat häiriöt.

Kivivillaeristeillä tasaantumista ei vastaavalla tavalla tapahdu. Samaan U-arvoon tähdätyillä kivivillaeristeisillä vertailurakenteilla tulokset olivat hieman kutterinlastueristeisiä rakenteita heikompia. Todellisuudessa kyseisellä eristemateriaalilla ei varmasti tehtäisi rakennetta ilman höyrynsulkua. Tässä tutkimuksessa vertailtavuuden saavuttamiseksi höyrynsulku jätettiin pois, mutta se voidaan tulevaisuudessa vielä rakenteeseen jälkikäteen asentaa, jolloin sen vaikutus saadaan myös todettua. Kaikissa tämän tutkimuksen keskenään vertailukelpoisissa rakenteissa sisäpinnassa oli 15 mm vaneri, joka tuo jo kohtalaisen vesihöyrynvastuksen rakenteen sisäpintaan. Ja kutterinlastueriseillä kyseinen levy vaikuttaisi olevan riittävä.

Kahden eri mittapisteen tarkastelulla haluttiin selvittää rakenteille kosteusolosuhteet sekä eristeen kohdalta mitattuna, että myös runkotolpan vierestä mitattuna. Kutterinlastueristeisillä rakenteilla olosuhde eristeen kohdalla on luonnollisesti kriittisempi, koska eriste ja runko ovat samaa materiaalia ja näin ollen voidaan olettaa kuuluvan samaan homehtumisherkkyyssluokkaan. Kivivillaeristeisillä rakenteilla puolestaan homehtumisherkkyyssluokka huomioiden rakenteen kriittinen piste on puolestaan hyvin todennäköisesti runkotolpan vieressä, missä runko on eristettä herkemmin homehtuvaa materiaalia. Tässä tutkimuksessa havaittiin, että kivivillaeristeisten rakenteiden runkotolpan vierestä mitatut olosuhteet olivat pohjoispuolella yhtä hyviä kuin kutterinlastueristeisillä rakenteilla eristeen kohdalta mitatut olosuhteet. Eteläpuolen mittauksissa kivivillaeristeiset rakenteet puolestaan olivat hieman heikompia kuin kutterinlastueristeiset rakenteet samassa vertailussa.

Viimeisenä vertailutapauksena tutkimukseen otettiin ilmansuunnan vaikutus eri koerakenteisiin. Pohjoispuolen rakenteet osoittautuivat kosteusteknisesti huomattavasti kriittisemmiksi kuin eteläpuolen rakenteet. Jokaisen tarkastelujakson aikana eteläpuolella havaitut korkeammat lämpötilat tuulensuojalevyn sisäpinnassa olivat merkittävästi pohjoispuolen vastaavia lämpötiloja korkeampia eikä mahdollisen viistosadevaikutuksen aiheuttama lisäkosteus osoittautunut ongelmaksi.

3.5 Jatkotutkimukset

Koerakenteet pysyvät koerakennuksilla ja mittauksia jatketaan. Jo aiemmin todettiin, että uusimpien rakenteiden mittaustulosten luotettavuutta parantaa toisen tarkastelujakson saaminen vertailuun.

Lisäksi rakenteiden sisäpintoihin on tulevaisuudessa tarkoitus tehdä reikiä rakenteen sisäpintaan ja tarkastella niiden vaikutusta rakenteiden kosteustekniseen toimintaan. Hyvillä rakenteilla tulee olla vikasietoisuutta ja tämän tutkimuksen tulosten perusteella korkean kosteuskapasiteetin omaavilla kutterinlastueristeillä tätä oletettavasti löytyy.

3.6 Virhearvio

ECOSAFE-projektissa asennetuilta rakenteilta mittaustuloksia saatiin kolmen eri vuoden ajalta. Niiden osalta tulosten voidaan olettaa olevan luotettavia. Uusien ECOSAFE2-projektissa asennettujen rakenteiden osalta mittaustuloksia on vain viimeisen tarkastelujakson osalta. Tuloksia ei ole toistettu ja niihin pitää suhtautua alustavina tuloksia. Vaaditaan vielä toiselle syksyille sijoittuva tarkastelujakso, jotta tuloksia voidaan pitää luotettavina. Uudet koerakenteet on asennettu koerakennuksille keväällä ennen tarkastelujakson alkua, mutta erityisesti savetetun kutterilastueristerakenteet tasaantumiseen menee aikaa ja sen vaikutuksia tuloksiin ei voida täysin sulkea pois.

Anturit ovat laadukkaita ja kalibroituja eikä niiden osalta ole syytä epäillä tulosten luotettavuutta. Mittauksissa on tullut ajoittain häiriöitä, mutta se on ilmennyt käytännössä datan puuttumisena tai selvästi häiriintyneenä datana, joka on voitu jättää pois tarkasteluista.

Anturointia ei rakenteissa ole liikaa, joten antureiden ja johdotusten vaikutus rakenteen toimintaan voidaan todeta erittäin pieneksi.

Rakenteet ovat melko yksinkertaisia ja valmistettu huolella ja vaiheet dokumentoitu, joten mahdolliset rakennusvirheet voidaan sulkea pois.

LÄHTEET

RIL (2012) *RIL 107-2012 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet*. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

SFS (2017) *SFS-EN ISO 6946 Rakennusosat. Lämmönvastus ja lämmönjohtavuus. Lasken-tamenetelmät*. Suomen standardisoimisliitto SFS.

Vinha, J. (2019) 'TUTKIMUSSUUNNITELMA. Kosteusturvalliset ja ympäristöystävälliset purueristeiset puurakenteet – ECOSAFE'. Tampereen Yliopisto.

Vinha, J., Viitanen, H., Pehkuri, R., Lähdesmäki, K., Ojanen, T. and Salminen, K. (2013) *VTT-TTY homemallin toimintaperiaatteet ja käyttö rakenteiden kosteusteknisen toiminnan tarkasteluissa*.