

## Rakennusfysikaaliset mittaukset ja mallintaminen.

### PaiBiRa – Paikalliset biopohjaiset rakennusmateriaalit Työpaketti 2 tutkimusraportti.

Työpaketin 2 osalta hankkeessa olivat mukana Kimmo Illikainen, Sanna Alitalo, Risto Väyrynen, Filip Fedorik, Alekski Littow ja Jukka-Pekka Savolainen.

Tutkittavat materiaalit olivat kutterinlastu, puukuitueriste, rahkasammal, irtoturve ja kolme erilaista turve-eristelevyä. Vertailueristeenä oli markkinoilla paljon käytetty ja tutkittu kivivilla. Hankkeen alussa mukana oli myös hammppubetoni, mutta siitä ei saatu tuotettua sopivaa materiaalia mittaustarkoitukseen.

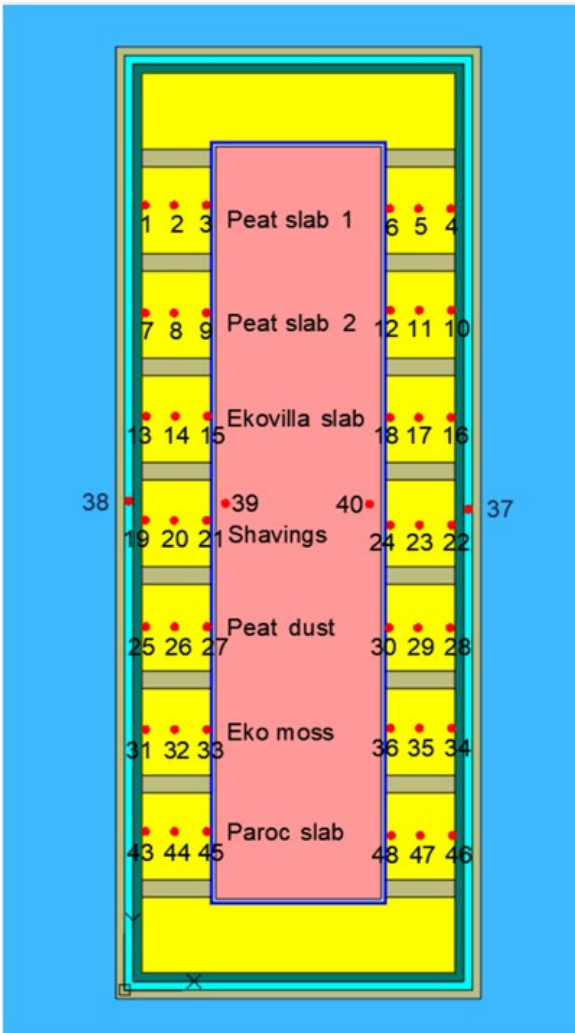
Tarkoituksena oli selvittää biopohjaisten materiaalien tekninen ja rakennusfysikaalinen soveltuvuus rakennusvaipan eristämiseen ja mahdolliseen muuhun rakentamiseen.

Tutkittavaksi valikoituneiden materiaalien rakennusfysikaaliseen mallintamiseen tarvittavat ominaisuudet (tiheys, lämmönjohtavuus, lämmönjohtavuuslämpötilan funktiona, lämmönjohtavuus suhteellisen kosteuden funktiona, sorptiokäyrät, vesihöyryn diffuusiovastuskerroin, huokoisuus, ominaislämpökapasiteetti) mittaautettiin *Brno University of Technology*:ssä. Mittaustulokset on esitetty liitteessä 1. Mittaustulokset ovat kaikille mitatuille materiaaleille samankaltaiset ja lähellä vertailumateriaali kivivillan arvoja. Mittaustulokset julkaistaan vertaisarvioidussa tieteellisessä julkaisusarjassa.

Kesällä 2019 valmistui Utajärvelle kenttämittausrakennus (kuva 1). Rakennus on suunnattu siten, että pitkät sivut avautuvat etelään ja pohjoiseen. Pitkille sivuille on eristekerroksen paikalle asennettu tutkittavat eristemateriaalit vierekkäin, 550 mm leveydeltä kutakin. Eristekerroksen sisä- ja ulkopinnoille sekä eristeen keskelle asennettiin lämpötilan ja suhteellisen kosteuden (RH) mittausanturit. Lisäksi lämpötila- ja RH-anturit asennettiin myös sisä- ja ulkoilman olosuhteisiin. Anturien paikat näkyvät kuvassa 2. Kenttämittaus tehtiin yhden vuoden mittaiselta ajanjaksolta.



KUVA 1. Kenttämittausrakennus



KUVA 2. Kenttämittausrakennuksen mittausanturit (pohjoisessä kuvassa oikealla)

## Mallintamisen alkuarvojen ja laskentaparametrien määrittäminen

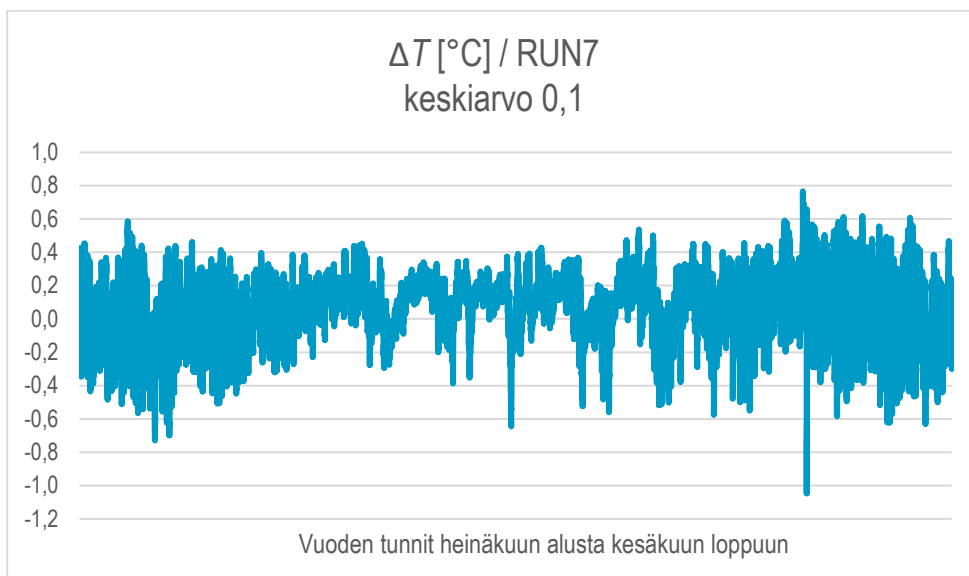
Mallintaminen tehtiin Wufi Pro 5.3 -ohjelmalla. Kunkin eristemateriaalin ominaisuudet syötettiin Wufi-ohjelmiston materiaalikirjastoon Brnon mittaustulosten mukaisina. Kosteuskapasiteettifunktiossa käytettiin kosteus määränä adsorptio- ja desorptioarvojen keskiarvoa. Utajärven kenttämittaustuloksista muodostettiin yhden vuoden eli 8760 tunnin ilmasto-olosuhteet (1. heinäkuuta 2019–30. kesäkuuta 2020) kunkin eristekerroksen ulko- ja sisäpinnalle erikseen (ks. kuva 2).

Kenttämittausrakennuksen ulkoseinän eristevahvuus oli 200 mm. Mallintamisen ensimmäisen vaiheen tavoitteena oli verrata mitattuja ja simuloituja, kunkin eristemateriaalin keskellä (100 mm syvyydellä) vallitsevia tunnittaisia olosuhteita toisiinsa (ks. kuva 2). Tarkastellut suureet olivat lämpötila, suhteellinen kosteus sekä niistä johdettu absoluuttinen vesihöyryn määrä.

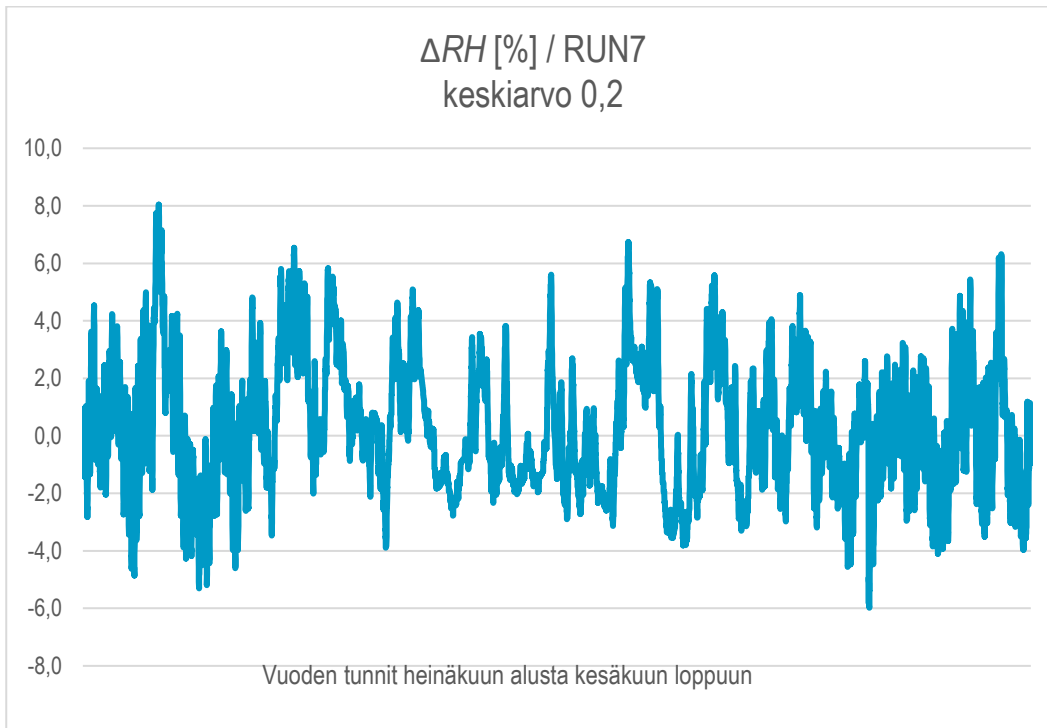
Pelkän eristekerroksen laskennassa käytettiin sisä- ja ulkopinnan pintavastuksena arvoa 0,01 m<sup>2</sup>K/W. Kunkin eristemateriaalin alkutilanteen suhteellinen kosteus ja lämpötila saatiin vastaavan eristekerroksen keskellä olleen mittausanturin mittaustuloksesta. Laskenta-aika oli kolme vuotta ja vertailuun valittiin laskennan tulosten viimeinen eli kolmas vuosi.

## Mitattujen materiaaliarvojen toimivuus mallissa

Eristeen keskeltä tunneittain mitattua lämpötilaa ja suhteellista kosteutta verrattiin vastaavan kohdan simulointitulokseen vähentämällä simulointituloksesta mitattu arvo ( $\Delta T = T_{\text{simuloitu}} - T_{\text{mitattu}}$ ). Vastaavat erotukset laskettiin myös suhteelliselle kosteudelle ja kosteuspitoisuudelle. Saaduista erotuksista laskettiin keskiarvot ja luotiin kuvaajat, jolloin tulosten arviointi helpottui. Ideaalitapauksessa tulokseksi olisi saatu nolla-akselin päällä lepäävä suora viiva. Positiiviset arvot kertovat simulointituloksen virheestä yläkanttiin, negatiiviset virheestä alakanttiin, ks. kuva 3 ja kuva 4.

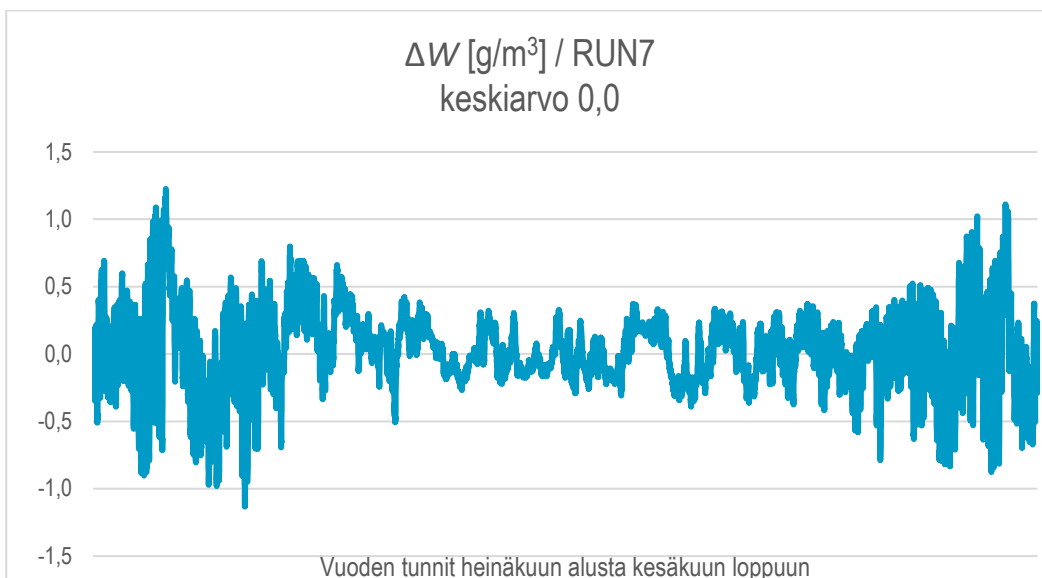


KUVA 3. Simuloidun ja mitatun lämpötilan tunnittaiset erotukset RUN7-eristemateriaalin keskellä yhden vuoden aikana



KUVA 4. Simuloidun ja mitatun RH:n tunnitaiset erotukset RUN7-eristemateriaalin keskellä yhden vuoden aikana

Maksimikosteuspitoisuus  $v_{max}$  johdettiin pelkästään mitatusta ja simuloimalla saadusta lämpötilasta ( $v_{max}$ , mitattu ja  $v_{max}$ , simuloitu), joista edelleen johdettiin mitattu ja simuloitu kosteuspitoisuus mitatun RH:n ja simuloidun RH:n avulla, kuva 5.

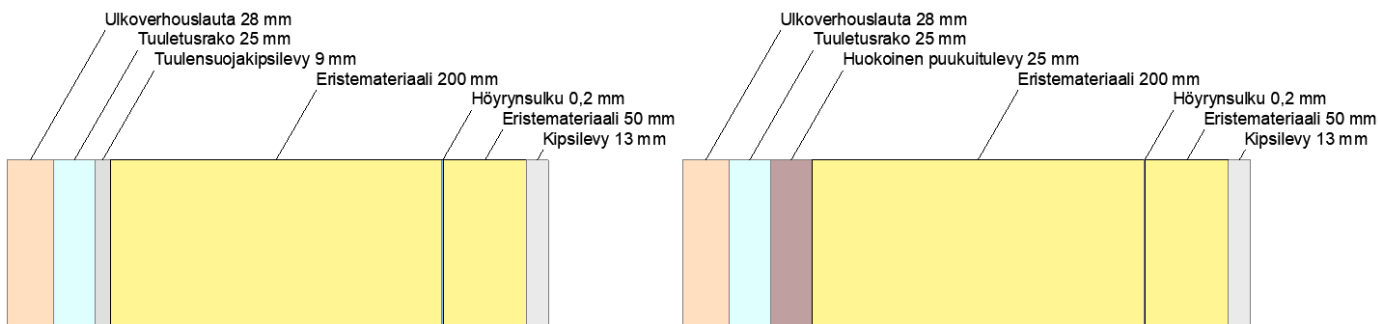


KUVA 5. Simuloidun ja mitatun kosteuspitoisuuden tunnitaiset erotukset RUN7-eristemateriaalin keskellä yhden vuoden aikana

Eri eristemateriaalien erotusvertailujen tulokset luonnollisesti vaihtelivat, mutta ne osoittivat eristemateriaalin toimivan riittävällä tarkkuudella laboratoriossa mitattujen ominaisuuksien mukaisesti (ks. LIITE 2 Simuloinnin verifiointi). Näin ollen simuloinnissa edettiin tarkastelemaan kunkin eristemateriaalin käyttäytymistä ulkoseinärakenteen osana tulevaisuuden ilmastossa.

## Materiaalien käyttäytyminen ulkoseinärakenteen osana tulevaisuuden ilmastossa

Toisessa vaiheessa kukin eristemateriaali sijoitettiin vuorollaan kahteen erilaiseen ulkoseinärakenteeseen (kuva 6). Ulkoseinärakenteet poikkesivat toisistaan vain tuulensuojamateriaalin osalta: ensin tarkasteltiin ulkoseinää, jossa tuulensuojana oli tuulensuojakipsilevy (9 mm). Toisessa laskennassa tuulensuojakipsilevy vaihdettiin huokoiseen puukuitulevyyn (25 mm). Seinissä eristettä oli yhteensä 250 mm, 50 mm höyrynsulun (Sd-arvo = 89 m) sisäpuolella ja 200 mm höyrynsulun ulkopuolella. Ulkoverhouksena käytettiin 28 mm vaaleaksi öljymaalattua lautaa ja sisäverhouksena 13 mm:n maalattua kipsilevyä.

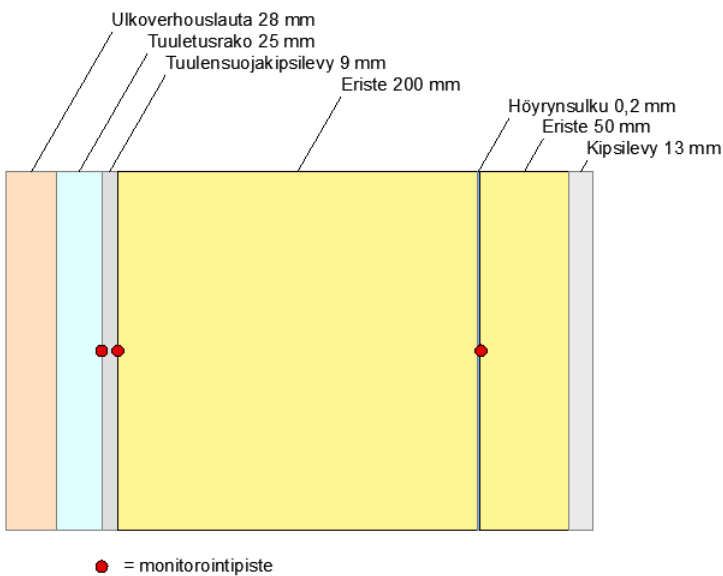


KUVA 6. Mallinnetut ulkoseinärakenteet

Tarkastelluista rakennetyypeistä tehtiin ajasta riippuva yksiulotteinen lämmön- ja kosteus-densiirtymisen laskentamalli Wufi Pro 5.3 -ohjelmalla. Ulkoseinärakenne sijoitettiin kohti pohjoista tulevaisuuden ilmastoon käyttäen säädätänä Jokioisten ilmastoa vuonna 2050 (rakennusfysikaalinen testivuosi). Sisäilman vakiolämpötilaksi asetettiin 21 °C. Sisäilman peruskosteuspitoisuus määräytyi ulkoilman mukaan ja sisäilman kosteuslisä oli 2–5 g/m<sup>3</sup> (kosteusluokka 2) ulkoilman lämpötilasta riippuen. Tuuletusraon ilmanvaihtoarvona oli 100 1/h. Laskennassa käytettiin lyhytaaltoisen säteilyn huomioivaa eksplisiittinen säteilytase -toimintaa.

Laskennassa oletettiin, ettei rakenteiden läpi virtaa ilmaa, ts. rakenne on ehjä, virheetön ja ilmatiivis. Tämä tarkoittaa, että luonnollisen konvektion vaikutusta rakenteen kosteuskäyttämiseen ei tutkittu, vaan rakenteiden tarkastelu perustui vesihöyryn diffuusion sisä- ja ulkoilmasta. Laskenta-aika oli 5 vuotta. Laskennan pinnansiirtokertoimet ilmenevät tarkemmin liitteestä 3 (LIITE 3 Homeindeksivertailu). Hankkeen aikana tuotettiin myös Wufi Pro 5.3 -ohjelman pinnansiirtokertoimet-välilehteä käsittelevä ohje (LIITE 4 Pinnansiirtokertoimet (Wufi Pro 5.3 -ohje)).

Laskentatuloksista laskettiin valituista monitorointipisteistä homeindeksi suomalaisella homemallilla (<https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/suomalainen-homemalli/>). Homeindeksi laskettiin koko viiden vuoden tuloksesta. Monitorointipisteet sijaitsivat tuulensuojamateriaalin ulkopinnalla, ulomman eristekerroksen ulkopinnalla ja sisemmän eristekerroksen ulkopinnalla, ks. kuva 7. Ulkoseinässä kriittisimmät olosuhteet vallitsevat tyypillisesti tuulensuojamateriaalin sisäpinnalla, koska suhteellinen kosteus kasvaa rakenteen ulko-osia lähestyttäessä.



KUVA 7. Homeindeksilaskennassa käytetyt monitorointipisteet

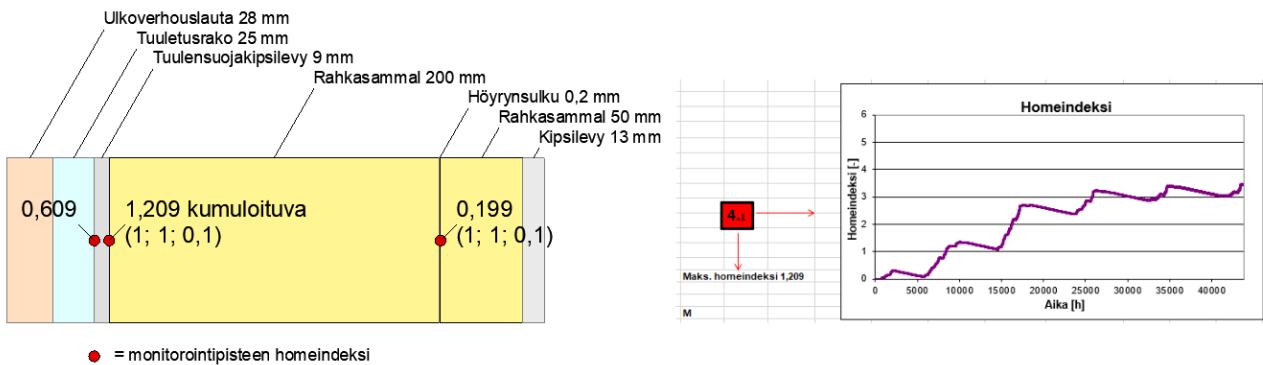
Koska kaikkien tutkittujen orgaanisten materiaalien tarkat homeen kasvunopeuden ja maksimimäärän herkkyysluokat sekä taantumaluokat eivät olleet tiedossa, asetettiin homeindeksivertailussa em. luokat samoiksi kaikille eristemateriaaleille. HUOM! Näin ollen homeindeksilaskuria käytettiin työkaluna materiaalien rakennusfysikaalisen toiminnan arvioimiseksi ja vertailemiseksi, eivätkä lasketut homeindeksi-arvot kuvaa todellista homehtumisriskiä materiaalissa. Tulos kuitenkin kertoo materiaalien rakennusfysikaalisten ominaisuuksien (tiheys, lämmönjohtavuus, lämmönjohtavuuslämpötilan funktiona, lämmönjohtavuus suhteellisen kosteuden funktiona, sorptiokäyrät, vesihöyryn diffuusiovastuskerroin, huokoisuus, ominaislämpökapasiteetti) monimutkaisen yhteisvaikutuksen eroista materiaalien lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan.

Homeindeksi-arvoja vertailtiin kahdella tavalla asettamalla herkkyys-, kasvunopeus- ja taantumaluokat seuraavasti:

- 1) homeen kasvunopeuden ja maksimimäärän herkkyysluokka 1, taantumaluokka 0,1
- 2) homeen kasvunopeuden ja maksimimäärän herkkyysluokka 2, taantumaluokka 0,25.

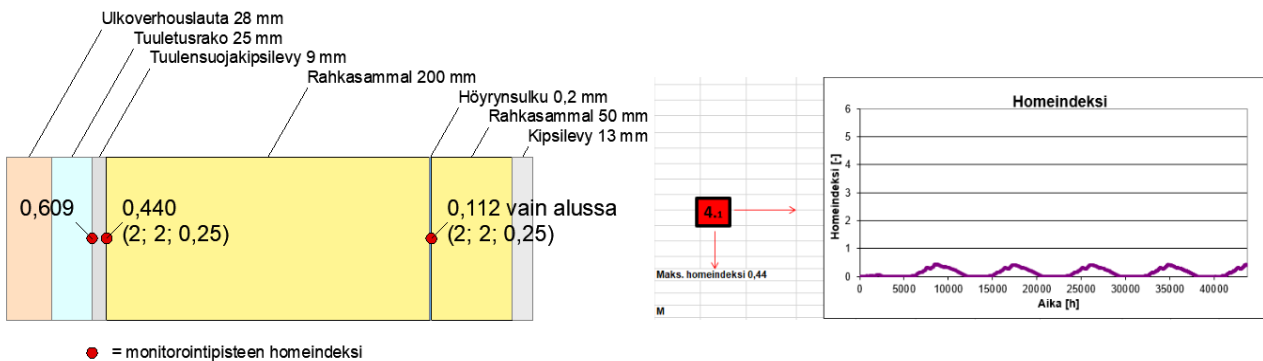
Alla olevissa kuvista (kuvat 8 ja 9) käy ilmi käytettyjen homehtumisherkkyyks- ja taantumaluokkien dramaattinen vaikutus homeindeksiin. Esimerkkimateriaalina on rahkasammal, mutta kaikki materiaalit käyttäytyvät samankaltaisesti. Kuvissa oikealla oleva kuvaaja kuvaa homeindeksin muutosta viiden vuoden aikana pääeristekerroksen ulkopinnalla (toinen monitoripiste vasemmalta). Kaikkien materiaalien tulokset ovat tarkemmin liitteestä 3 (LIITE 3 Homeindeksivertailu).

US1 / Rahkasammal / Jokioinen 2050 (tuulensuojakipsilevyn homeindeksiluokat 2; 2; 0,25)



KUVA 8. Homehtumisherkkyyks- ja taantumaluokkien vaikutus homeindeksiin (lämmöneristeenä rahkasammal)

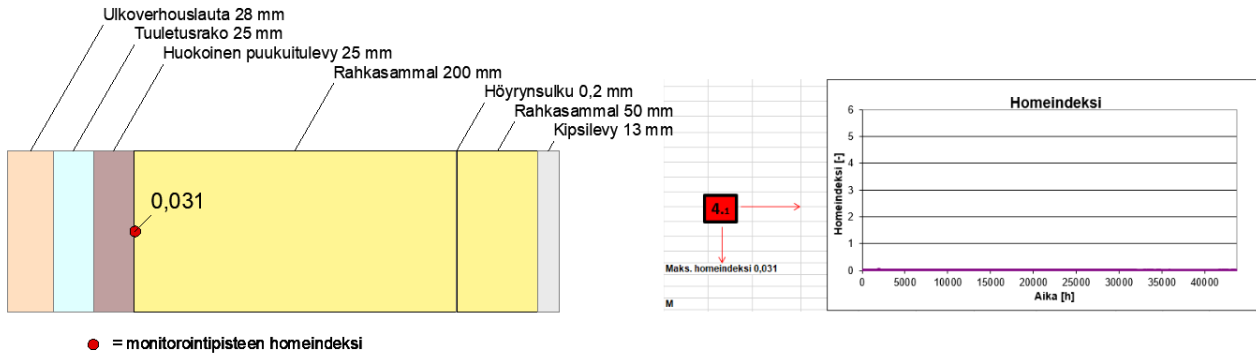
US1 / Rahkasammal / Jokioinen 2050 (tuulensuojakipsilevyn homeindeksiluokat 2; 2; 0,25)



KUVA 9. Homehtumisherkkyyks- ja taantumaluokkien vaikutus homeindeksiin (lämmöneristeenä rahkasammal)

Kuvasta 10 käy ilmi rakenteessa käytetyn tuulensuojamateriaalin vaikutus homeindeksiin päeristeen ulkopinnalla, kun tuulensuojakipsilevy vaihtuu huokoiseksi puukuitulevyksi. Homeen kasvunopeuden ja maksimimäärän herkkyysluokka on 2, taantumaluokka on 0,25.

### US2 / Rahkasammal / Jokioinen 2050



**KUVA 10.** Tuulensuojamateriaalin vaikutus homeindeksiin päeristeen ulkopinnalla (homeen kasvunopeuden ja maksimimäärän herkkyysluokka on 2, taantumaluokka on 0,25)

## Loppupäätelmät

Tarkastelujen perusteella voidaan todeta, että kaikki tutkitut eristemateriaalit toimivat myös tulevaisuuden ilmastossa, jos niiden homeutumisherkyys saadaan kyllin pieneksi. Orgaanisista materiaaleista rahkasammal vaatisi tarkastelun mukaan eniten jatkotuotekehitystä. Myös rakenneratkaisulla – käytetyllä tuulensuoja- ja höyrynsulkumateriaalilla – on suuri vaikutus eristeen ulkopinnan homeutumisherkyteen.

Tutkitut eristemateriaalit voidaan laskentatulosten perusteella luokitella seuraavaan paremmuusjärjestykseen:

- RUN7-turve ja puukuitueriste
- kutterinlastu ja RUN24-turve
- irtoturve ja RUN10-turve
- rahkasammal
- kivivilla.

**HUOM!** Yllä oleva järjestys saatiin käyttämällä homeindeksilaskennassa kaikille materiaaleille samoja herkkyys-, kasvunopeus- ja taantumaluokkia. Tulos kuvaa homeen kasvulle suotuisten lämpö- ja kosteusolosuhteiden esiintymistä ja niiden suhteellisia eroja eri materiaaleissa, ei siis materiaalien todellista homeutumisalttiutta.

Verrattaessa kenttämittaustuloksia pelkän eristekerroksen simulointitulokseen vastasi laskentatulokset mitattuja arvoja vaihtelevasti. Esimerkiksi kutterinlastun simulointitulokset olivat lähes yhtenevät mitattuihin dataan verrattuna, kun taas irtoturpeen ja rahkasammalen simulointitulokset poikkesivat mitattuihin arvoista selvästi enemmän. Virhettä voivat aiheuttaa esim. asennuksen epätarkkuudet, kuten mitta-



anturin epätarkka paikka, mitta-anturin mittaustarkkuus, ilmavuodot eristekerroksessa sekä lähtökosteuden poikkeavuudet sekä luonnollisesti epätarkkuudet laboratoriomittauksissa. Kenttämittausjakso kesti vain vuoden ja pidempi mittausjakso antaisi todennäköisesti tarkempia tuloksia (rakennuskosteuden tasaantuminen).

Jatkotutkimuksissa tulisi selvittää tutkittujen materiaalien todelliset homehtumisen herkkyys-, kasvunopeus- ja taantumaluokat.

#### Julkaisut:

- 1) Sirviö S. Puutuoteteollisuuden sivuvirrat: Sivuvirtojen käytön nykytilanne ja mahdollisuudet Pohjois-Pohjanmaalla. Opinnäytetyö OAMK. 2019.
- 2) Sirviö S. ja Alitalo S. Ekoteko? Mitä luonnosta talon rakenteisiin? [https://issuu.com/telu\\_oamk/docs/oamk\\_telulainen](https://issuu.com/telu_oamk/docs/oamk_telulainen). 2020.
- 3) Kangas J: Puutuoteteollisuuden sivuvirtojen hyödyntäminen Pohjois-Pohjanmaalla. Artikkelit Puumieslehti. 9/2020.
- 4) Illikainen K., Väyrynen R. ja Alitalo S. Homehtuuko? Rakenteiden toimivuuden arviointi mallintamalla. [https://issuu.com/telu\\_oamk/docs/oamk\\_telulainen](https://issuu.com/telu_oamk/docs/oamk_telulainen). 2020.
- 5) Fedorik F, Zach J, Jallinoja M, Kymäläinen HR, Kuisma R, Illikainen K, Alitalo S. Hygrothermal performance of new bio-based insulation materials. luonnos. 2020.