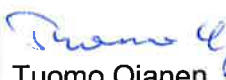




Dynaaminen puukuitueristerakenne

Kirjoittajat: Tuomo Ojanen

Luottamuksellisuus: Luottamuksellinen

Raportin nimi Dynaaminen puukuitueristerakenne	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Kehittämisyhtiö Witas Oy Markku Rautiainen InnoVapriikki Haapaniementie 16 44500 VIITASAARI	Asiakkaan viite Sopimus 22.10.2015
Projektin nimi Dynaaminen puukuitueristerakenne	Projektin numero/lyhytnimi Puukuitueristeet
Tiivistelmä <p>Tämän hankkeen tavoitteena oli koota olemassa oleva tieto puukuitueristerakenteiden hygroskooppisten ominaisuuksien hyödyistä rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden sekä rakenteiden ja sisäilman vuorovaikutuksen osalta. Tämän perusteella voitiin muodostaa näkemys tarvittavista lisäselvityksistä, joita tarvitaan sovellettaessa hygroskooppisia puukuitueristeitä Euroopan eri ilmasto-oloissa ja kehitettäessä niihin parhaiten soveltuvat ratkaisut.</p> <p>Hankkeessa koottiin olemassa oleva tutkimustieto puukuitueristeiden rakennesovellutusten toimivuudesta sekä niiden eduista ja toimivuuden edellytyksistä sisäilman suhteellisen kosteuden muutosten tasoittamisessa dynaamisissa kuormitustilanteissa.</p> <p>Valituille matalaenergiataloon soveltuville rakenteille tehtiin laskennalliset toimivuustarkastelut Suomen ilmastossa ja kuivien asuintilojen tuottamissa kosteusrasitusoloissa. Normaaleissa kosteusrasitusoloissa puukuituinen lämmöneriste mahdollistaa rakenteen turvallisen kosteusteknisen toimivuuden. Etuna on rakenteen mahdollisuus siirtää kosteutta molempiin suuntiin ja sen paikallisia kosteuksia tasoittava lämmöneriste.</p> <p>Vesihöyryn siirtyminen sisäilman ja rakenteen välillä parantaa sisäilman kosteustasojen pysyvyyttä viihtyisyysalueella, kun dynaamisen tilanteen ääriolot voidaan leikata pois rakenteiden kosteuskapasiteetin avulla. Kosteuden siirtyminen sisäilman kosteuskuormitustilanteessa tätä kuivempaan rakenteeseen johtaa faasimuutoksen lämmittävään vaikutukseen rakenteen sisäpinnalla. Tällöin rakenteen pintalämpötila nousee ja johtumislämpöhäviöt pienentyvät. Vuoden jakson aikana kuivumis- ja kostumissyklit pyrkivät tasoittamaan toistensa vaikutukset, mutta dynamiikan oikea-aikainen hyödyntäminen voi antaa mahdollisuuksia energiansäästöön sisäilman viihtyisyysolojen ylläpidon lisäksi. Hankkeessa koottujen tulosten perusteella voidaan esittää suunniteltavan eurooppalaisen puukuitueristehankkeen sisällön tavoitteet ja tehtäväkokonaisuudet.</p>	
Espoo, 12.2.2016	
Laatija  Tuomo Ojanen Senior Scientist	Tarkastaja  Pekka Tuomaala Principal Scientist
Hyväksyjä  Riikka Holopainen Research Team Leader	
VTT:n yhteystiedot Tuomo Ojanen p. 0405173773, tuomo.ojanen@vtt.fi	
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Tilaja Witas Oy, Termex Oy, Ekovilla Oy ja VTT	
<i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i>	

Abstract

The aim of this research was to summarize the published research findings about the hygroscopic properties of cellulose fibre insulation (CFI). Cellulose fibre insulation is a form of plant fibre insulation. Wood based cellulose fibre insulation is composed of fire retardant treated cellulose fibre. Recycled newspaper is a common source of the fibre. CFI is used as in-situ formed loose fill applications with or without binding agents and as batts.

The summarized information shows the benefits of the hygroscopic properties of CFI from the moisture performance of structures and also from the interaction of structures and indoor air aspects. As a result, the need for additional research could be evaluated when aiming to develop best solutions of CFI-structures to be applied under different climate conditions in Europe.

The existing research findings gave information about the moisture performance principles and benefits of CFI structures and also about the structural requirements to use the moisture buffering effect to smooth down the changes of indoor relative humidity values during dynamic moisture load conditions.

The moisture performance of selected structures were analysed numerically under the climate conditions of Finland and using typical indoor load conditions of dry living spaces. Under these conditions the moisture performance of the analysed CFI-structures was safe. When compared to wood frame structures with vapour barrier, the benefit of the cfi-structures having vapour open air barrier is their ability to dry out in both directions, to outdoor and indoor air spaces. The hygroscopic thermal insulation also smooths down the local moisture content levels in the structure when compared to the performance of non-hygroscopic materials.

The moisture transport between indoor air and hygroscopic structures can improve the indoor air comfort by cutting of the incidence of the extremely high and low relative humidity conditions. Under indoor humidity load conditions moisture will be transported into the structure, which causes heat release due to latent heat effect. This warms up the indoor surface layers of the structure and the heat losses through the inside surface are decreased. The yearly wetting and drying cycles tend to even out their opposite effects on heat flows, but timely utilization of the dynamics may enable energy savings in addition to maintaining comfortable indoor conditions. The results of this work allow the planning of the objectives and contents of a research project for European cellulose fibre insulation applications.

Sisällysluettelo

Abstract.....	2
Sisällysluettelo	3
1. Toimeksiannon kuvaus ja tavoitteet.....	4
2. Toteutus	5
3. Nykytilanteen kartoitus.....	5
3.1 Kosteustekninen toimivuus.....	5
3.2 Rakenteen ja sisäilman kosteusvuorovaikutus	6
3.2.1 Sisäilman kosteuden merkitys	6
3.2.2 Tapanilan Ekotalo.....	7
3.2.3 Laskennalliset analyysit.....	9
3.2.4 Kosteuskapasiteetin mittausmenetelmä.....	11
4. Esimerkkirakenteiden kosteustekninen toimivuus	14
4.1 Tavoitteet ja asetetut kriteerit.....	14
4.2 Tarkasteltavat rakenteet	14
4.3 Tarkastelumenetelmät.....	16
4.3.1 Homekasvun tarkastelu	16
4.4 Laskennassa käytetyt ilmastotiedot ja kosteuskuormitukset	18
4.5 Materiaaliominaisuudet.....	18
4.6 Seinärakenteet	19
4.6.1 Tarkastelutapaukset	19
4.6.2 Tulokset seinärakenteiden toimivuudesta	20
4.6.3 Seinärakenteen mahdollinen kesäkondenssi	23
4.6.4 Yhteenveto seinärakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta.....	25
4.7 Yläpohjarakenteet	26
4.7.1 Tarkastelutapaukset	26
4.7.1 Tulokset.....	27
4.7.2 Case - Yläpohjan vaakaerityksen lisäeristys	32
4.7.3 Yhteenveto yläpohjarakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta	34
5. Rakenteiden ja sisäilman vuorovaikutus	35
5.1 Sisäilman kosteuden askelmuutos 30 % RH – 60 % RH	35
5.2 Sisäilman kosteuden askelmuutos 60 % RH – 30 % RH	41
5.2.1 Kosteusvuorovaikutuksen tehostaminen sisäilman tuuletuksella	43
5.2.2 Pintalämpötilojen muutos kokeiden perusteella	44
5.3 Yhteenveto kosteusvuorovaikutuksesta.....	45
6. Jatkoselvitysten tarve - hankkeen sisällön hahmottelu.....	46
7. Yhteenveto	47
Liitteet /Lähdeviitteet	48

1. Toimeksiannon kuvaus ja tavoitteet

Selluvilla on yksi puukuitueristeen muoto. Selluvilla on paloestokemikaaleilla käsiteltyä sellukuitua, joka on valmistettu kierrätetystä sanomalehtipaperista. Rakennuseristeenä selluvillaa käytetään sekä irtoeristeenä että levyeristeenä. Selluvillaa asennetaan irtoeristeenä myös käyttämällä kuitujen sidontatekniikkaa, jolla saadaan aikaan levymäinen, painumaton eristekerros. Tässä raportissa käytetään yleisnimitystä **puukuitueriste**. Englanninkielisessä tekstissä tuotteen yleisnimenä on **cellulose fibre insulation** (CFI).

Dynaamisten puukuitueristeisten rakenteiden merkittävin ominaisuus on kosteuden varastoituminen rakenteeseen ja sen olosuhteista riippuva kuivuminen eri suuntiin. Perustava tekijä on puukuituisen lämmöneristeen hygroskooppisuus, ts. materiaalin kyky sitoa ja luovuttaa kosteutta. Tämä ominaisuus voi parantaa rakenteiden kosteusteknistä toimivuutta erilaisissa kosteusrasitusoloissa ja sitä voidaan hyödyntää sisäympäristön hyvien olosuhteiden ylläpitämisessä. Rakenteen lämmöneristeen ja muiden materiaalikerrosten kosteuskapasiteetti tasoittaa kosteustasoja ja -virtauksia, minkä johdosta rakenteissa voi olla höyrynsulun sijaan vesihöyryä läpäisevämpi ilmansulkukerros. Tämä mahdollistaa kosteudensiirron rakenteesta myös sisäilmaan päin.

Kosteuskapasiteetin (hygroskooppisuuden) vuoksi esimerkiksi rakenteiden kastepistetarkasteluun perustuva toimivuusarvio ei kuvaa rakenteen toimivuutta tyypillisissä, dynaamisesti vaihtelevissa olosuhteissa. Rakenteiden toimintaa todellisia olosuhteita vastaavissa tilanteissa voidaan parhaiten tarkastella dynaamisten simulointimenetelmien avulla. Tätä voidaan tukea kokeellisen tutkimuksen avulla.

Eri tekijöiden vaikutusta ja toimintaedellytyksiä on käsitelty useissa aiemmissa tutkimuksissa. Näissä on osoitettu puukuituisten lämmöneristerakenteiden kosteustekninen turvallisuus erilaisissa rakennetapauksissa ja rakenteiden mahdollisuus kosteustekniseen vuorovaikutukseen sisäympäristön kanssa. Rakenteiden hygroskooppista kapasiteettia voidaan hyödyntää sisäilman kosteuden tasoittamiseen dynaamisissa tilanteissa, mikä edesauttaa sisäilman pysymistä viihtyisyyalueella /1 - 8/. Edellytyksenä on mm. riittävä kosteudensiirto sisäilman ja kosteutta tasoittavan materiaalikerroksen välillä.

Tämän hankkeen tavoitteena oli esittää olemassa olevan tutkimustiedon ja tarkentavien analyysien avulla puukuitueristeisten rakenteiden toimivuuden perusteet, rakentamisessa hyödynnettävissä olevat ominaisuudet sekä niiden edellyttämä tarkentava tutkimus- ja kehitystyö. Keskeinen tekijä on kosteus, sen turvallinen hallinta rakenteissa sekä sisäilmavuorovaikutukset ja niiden vaikutus sisäympäristön tilaan.

Kosteusteknisen toimivuuden merkityksen ja mahdollisuuksien perusteellinen arviointi edellyttää puukuitueristeiden toimivuuden ja sovellutusten analysointiin suunnattua tutkimushanketta. Lähtökohtana on tässä raportoitu esiselvityshanke, jossa esitetään katsaus puukuitueristeisten rakenteiden tutkimustiedon nykytilanteeseen ja joitain kohdennettuja esimerkkirakenteiden tarkasteluja kosteusteknisen toimivuuden ja sisäilmavuorovaikutusten osalta. Tulosten avulla voidaan linjata tarvittava uusi hanke, jossa selvitetään kattavasti puukuitueristeisten rakennesovellutusten toimivuus eri ilmastoissa ja käyttöoloissa sekä niiden vaikutukset sisäympäristöön.

2. Toteutus

Työ tehtiin VTT:llä. Nykytilanteen kartoitukseen koottiin tieto olemassa olevista tutkimuksista ja esimerkkirakenteiden toimivuus selvitettiin laskennallisesti.

Projektilla ei ollut varsinaista johtoryhmää, mutta puukuitueristevalmistajien rooli oli merkittävä hankkeen toteutuksessa.

Hanke käynnistyi 22.10.2015 tehdyllä sopimuksella ja jatkui 15.2.2016 saakka.

3. Nykytilanteen kartoitus

Nykytilanteen kartoitus koostuu aiemmin tehtyjen tutkimusten tuloksien yhteenvedosta. Niiden pohjalta arvioidaan jatkoselvitystarpeita ja kehitysmahdollisuuksia.

3.1 Kosteustekninen toimivuus

Hyvin lämmöneristettyjen kuitueristerakenteiden kosteustekninen toimivuus Suomen ilmastossa ja normaalin asuinrakennuksen kuivien tilojen sisäpuolisissa kuormitusoloissa on useissa selvityksissä havaittu hyväksi.

Yhtenä esimerkkinä aiemmin tehdystä toimivuus selvityksistä on Termex Zero – seinärakenne, jonka tutkimustulokset on julkaistu /9/. Hyvää passiivitasoa ($U = 0,11 \text{ W/K m}^2$) olevan tuuletetun Termex Zero –seinärakenteen kosteustekninen toimivuus on todettu turvallisesti Suomen ilmastossa ja normaalissa asuinkäytössä olevan rakennuksen sisäilman kosteuskuormituksella. Rakenteessa ilmansulkukerroksena oli ilmasulkupahvi ja havuvaneri.

Puukuitulämmöneriste ei lisää kosteusteknisen toimivuuden riskejä asuintalojen kuivien sisätilojen kuormitusoloissa verrattaessa esimerkiksi muihin kuitumaisiin lämmöneristeisiin. Puukuiturakenteissa käytetään tyypillisesti muovisen höyryn/ilmansulun sijasta vesihöyryä jonkin verran läpäiseviä ilmansulkutuotteita. Tämä ja rakenteen sisäpinnan käsittely vaikuttaa kosteudensiirtoon sisäilman ja rakenteen välillä.

Hygroskooppisen rakenteen ja sisäilman välillä voi olla merkittävää kosteusvirtausta, mikä tuo uusia mahdollisuuksia toimivuuden kannalta ja toisaalta edellyttää toimivuuden varmistusta erilaisissa sisä- ja ulkopuolen kuormitusoloissa. Kahteen suuntaan kuivuvat rakenteet mahdollistavat kesäaikaisen kuivumisen sisäilmaan. Tämä hyöty voi edelleen korostua Suomen ilmastoa lämpimämissä oloissa. Toinen tekijä on rakenteen ja sisäilman kosteusvuorovaikutus sisäilman olosuhteiden kannalta.

Edelleen on tarpeen selvittää mm. seuraavien tekijöiden vaikutukset:

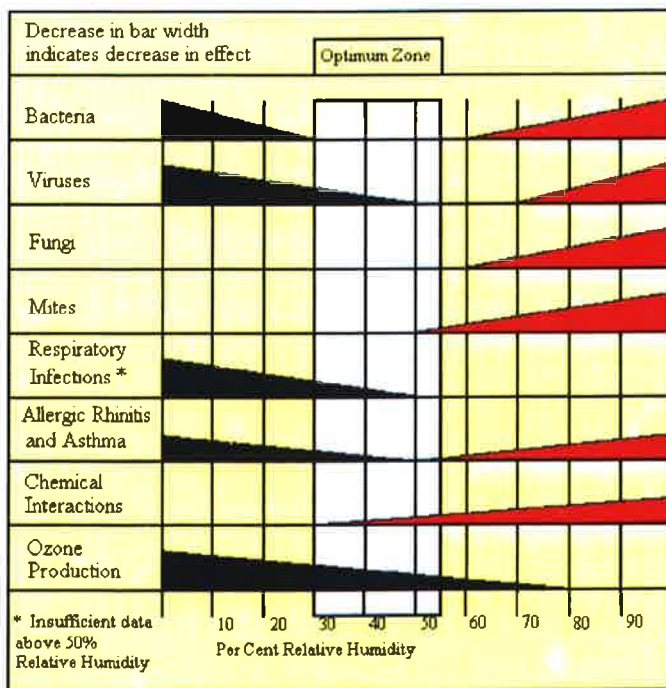
- Eri rakennekerrosten vaikutus kosteustekniseen toimivuuteen, erityisesti sisäpuolen ilmansulkukerroksen vesihöyryn läpäisyominaisuudet
- Toimivuus eri ilmastoissa
- Toimivuus erilaisissa sisäilman oloissa (kesäaikainen jäähdytys, korkeat kosteuskuormat, jne.)
- Puukuitueristeen ja muiden rakennekerrosten ominaisuuksien vaikutus ja niiden 'optimointi' vastaamaan ilmasto-olojen kuormitusta

Luvussa 4 esitetään joidenkin valittujen esimerkkirakenteiden kosteusteknisen toimivuuden tarkastelut Suomen ilmastossa.

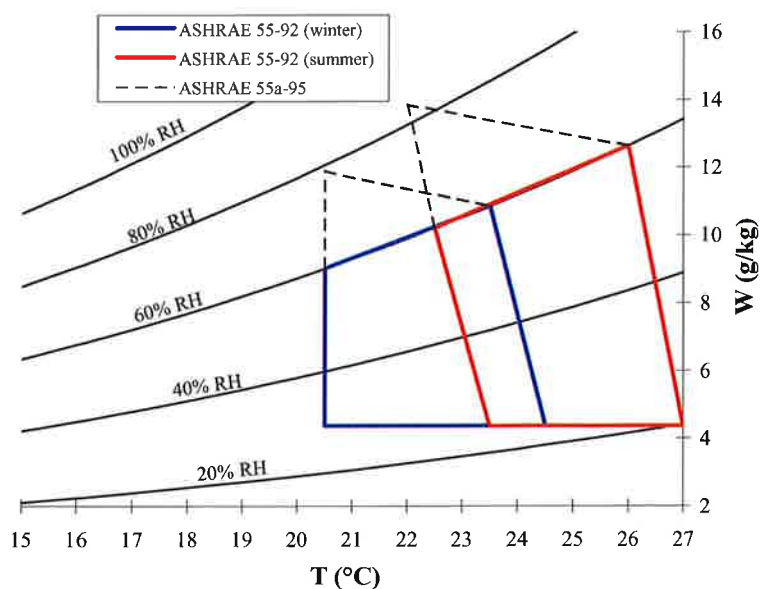
3.2 Rakenteen ja sisäilman kosteusvuorovaikutus

3.2.1 Sisäilman kosteuden merkitys

Sisäilman kosteudella on vaikutus ilman terveellisyyteen, koettuun laatuun ja termiseen viihtyisyyteen (Kuva 1 ja Kuva 2) /10 – 12/. Koettu sisäympäristön viihtyisyys riippuu mm. ilman ja pintojen lämpötilasta, ilman kosteudesta, ilman virtausnopeudesta ja ilman laadusta. Kun muut osatekijät ovat normaalilla tasolla, vastaa sisäilman kosteus 30 – 55 % RH tyypillisesti viihtyisyysoloja.



Kuva 1. Sisäilman suhteellisen kosteuden vaikutus erilaisiin terveyteen ja viihtyisyyteen liittyviin tekijöihin /10/.



Kuva 2. Kesä- ja talvikauden viihtyisyysolot /11 ja 12/.

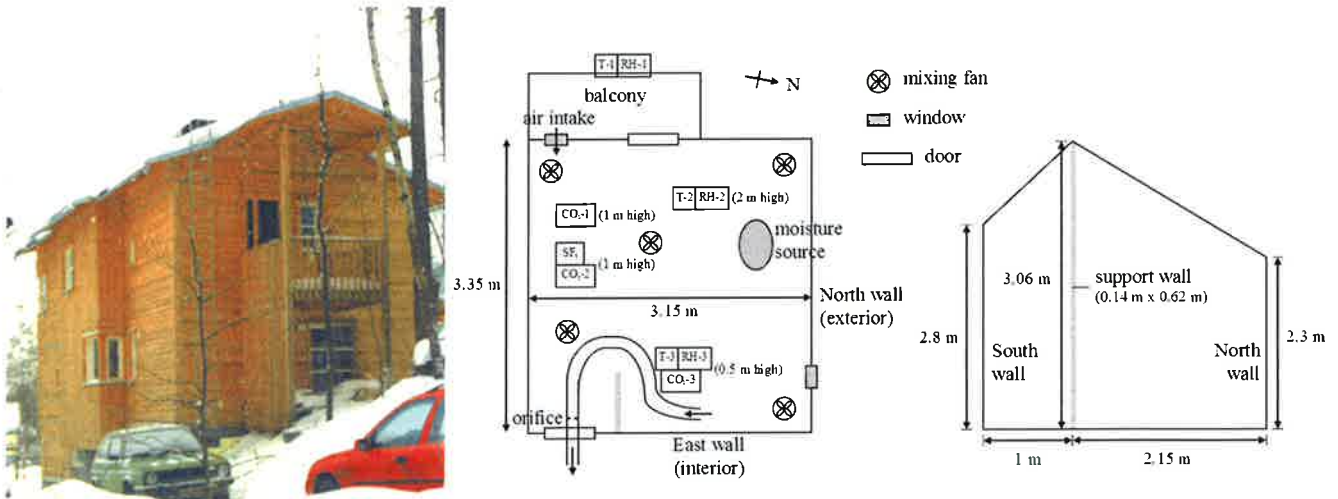
Lisäksi tilan käyttäjän ikä, paino, sukupuoli, työskentelyn tuottama lämpö, vaatetus jne. vaikuttavat koettuun termiseen viihtyisyyteen. Sisäilman koettua termistä viihtyisyyttä voidaan arvioida laskennallisesti eri menetelmiä käyttäen /13/ ja jatkossa niitä voidaan soveltaa myös hygroskooppisten rakenteiden viihtyisyysvaikutusten analysointiin.

3.2.2 Tapanilan Ekotalo

Ensimmäisiä käytännön osoituksia puukuitulämmöneristeiden sisäilmavaikutuksista saatiin Tapanilan Ekotalon kenttäkokeista vuodelta 2000 (Kuva 3) /1, 5, 6 ja 8/.

Valmistumisvaiheessa olleessa ekotehokkaaksi suunnitellussa omakotitalossa voitiin tehdä kokeita sisäilmavuorovaikutuksen osoittamiseksi todellisessa rakennuksessa. Tulokset vahvistivat aikaisemmat oletukset kosteudelle avoimien, hygroskooppisten rakenteiden kyvystä vaikuttaa merkittävästi sisäilman kosteuteen.

Kokeet tehtiin rakennuksen yhdessä makuuhuoneessa, jonka ulko- ja väliseinien sekä katon rakenteissa oli sisäpuolelta lähtien 13 mm kipsilevy, rakennuspaperi ja puurunko ja puukuitueriste. Ulkoseinät olivat tuuletut ja niissä oli puuverhous. Sisäpinnan kipsilevyt oli maalattu vesihöyryä läpäisevästi. Lautalattiassa oli käsittely, joten sen merkitys kosteusvuorovaikutuksessa oli vähäinen.



Kuva 3. Tapanilan Ekotalo ja kokeissa tutkitun huoneen dimensiot.

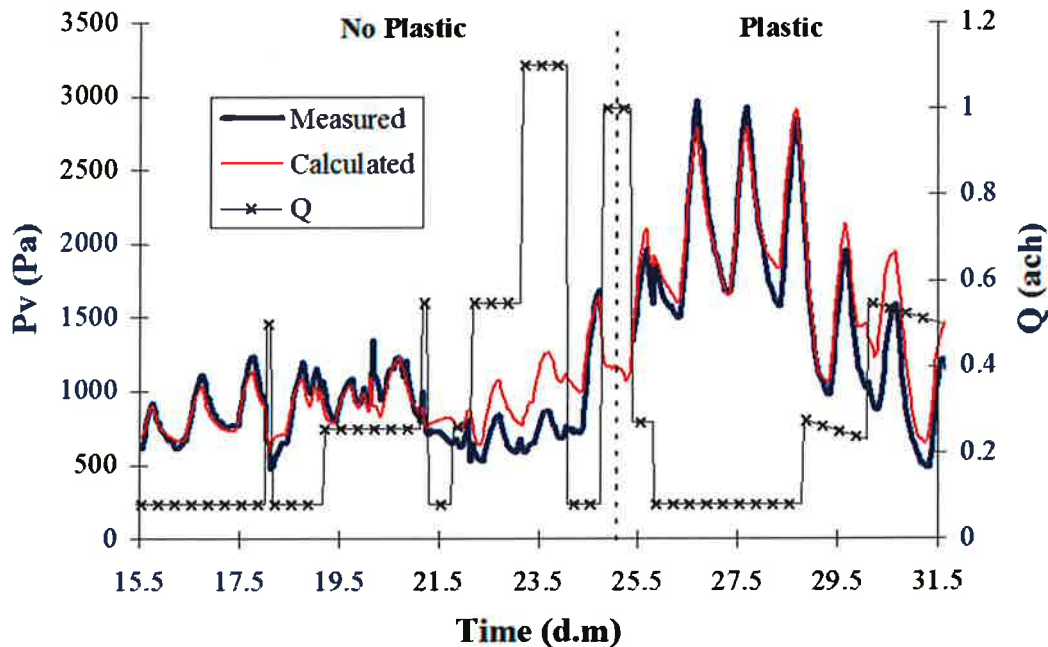
Noin 11 m² huoneessa oli saman verran kattopinta-alaa ja yhteensä noin 28 m² puukuitueristeistä seinäpintaa. Kokeessa voitiin asettaa huonetilan ilmanvaihto halutuksi ja huoneeseen tuotettiin kahden henkilön kuormitusta vastaava kosteuskuorma (87 g/h) 8 tunnin ajaksi joka yö. Muuna aikana huonetilassa oli sama ilmanvaihto kuin kuormitustilanteessakin. Lämpötilalle oli asetettu minimitaso +23 °C, mutta se saattoi kohota tätä korkeammaksi mittausjakson aikana.

Koejärjestelyissä mitattiin ensin huonetilan lämpötila ja suhteellinen kosteus eri ilmanvaihtomäärillä käyttäen kuvattua yöaikana toistuvaa kosteuskuormitusta. Tämä jakso kuvasi hygroskooppisesti avointa tilannetta. Toisessa vaiheessa huoneen kaikki sisäpinnat verhoiltiin höyrynsulkumuovilla, jolloin rakenteen kosteuskapasiteetti ei voinut vaikuttaa huonetilan kosteuteen. Mittausjakso sijoittui ajalle 14. – 31.5.1999, jolloin ulkoilman lämpötila vaihteli 0 °C ja +20 °C välillä (+11 °C keskimäärin).

Error! Reference source not found. esittää rakennuksen huonetilan koejaksot ja niissä käytetyt ilmanvaihtokertoimet. Alkuvaiheessa 14.-24.5. koerakenteet olivat sisäpinnastaan kosketuksessa sisäilmaan (*No Plastic* –merkintä) ja 25.- 31.5. rakenteiden sisäpinta oli peitetty höyrynsulkumuovilla (*Plastic* –merkintä) niin, että kosteudensiirto rakenteiden ja sisäilman välillä oli estetty. Lisäksi kuvassa esitetään sisäilman mitatut vesihöyryn

osapaineet koejakson aikana sekä numeerisesti ulkoilman olosuhteiden, rakenteiden, ilmanvaihdon ja sisäisten kosteuskuormien avulla ratkaistut osapaineet.

Numeerisen ratkaisun dynamiikka ja ratkaistut vesihöyryn osapaineiden tasot vastasivat hyvin mitattuja suurimman osan tarkastelujaksosta. Tulosten perusteella ilmiötä voidaan tarkastella riittävän luotettavasti myös numeerisesti.

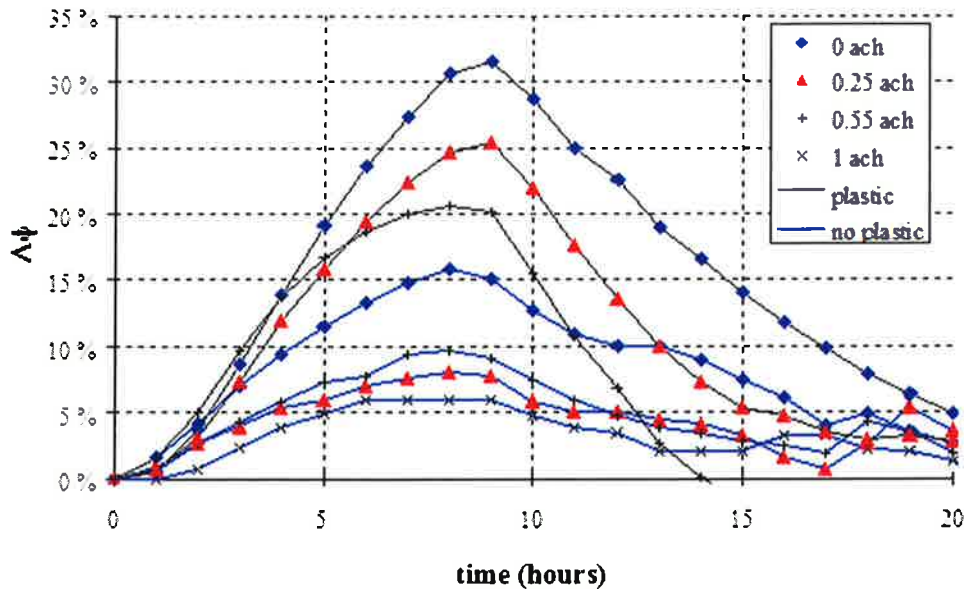


Kuva 4. Ilmanvaihtomäärät (Q , ach [1/h]) koejakson aikana. No Plastic –jakson aikana rakenteet olivat lopullisessa muodossaan ja avoimet sisäilmaan. Plastic –jakso aikana kaikki rakenteet oli verhoiltu höyrynsulkumuovilla. Lisäksi esitetään mitatut ja lasketut vesihöyryn osapaineet (p_v) sisäilmassa koejaksojen aikana.

Vesihöyryn osapaineiden taso oli mittausjakson ensimmäisen vaiheen aikana alempi kuin toisessa vaiheessa, jossa kaikki rakennepinnat oli peitetty muovilla. Joka yö kosteuskuormitus nosti vesihöyryn osapainetta huonetilassa. Ensimmäisen vaiheen aikana hygroskooppisesti avointen rakenteiden tapauksessa tämä nousu oli huomattavasti vähäisempi kuin toisen vaiheen muovilla peitettyjen rakenteiden tapauksessa. Jaksoja ei voida suoraan verrata toisiinsa, koska ulkoilman tila vaikutti mittauksiin. Tasoero eri vaiheiden välillä oli kuitenkin selkeä.

Parhaiten rakenteiden kosteuspuuskuroinnin vaikutusta voidaan arvioida vertaamalla sisäilman suhteellisen kosteuden muutoksia vuorokausisyklin aikana eri ilmanvaihtokertoimien tapauksessa (Kuva 5). Tulokset osoittavat, että suhteellisen kosteuden nousu kuormitustilanteessa oli huomattavasti suurempi muovipinnoitettujen rakenteiden tapauksessa kuin ilman muovikalvoa. Muovipinnoitetussa tapauksessa 0,55 1/h ilmanvaihtokertoimella huonetilan suhteellinen kosteus kasvoi enemmän kuin ilman muovipinnoitusta olevien rakenteiden tapauksessa, kun koneellista ilmanvaihtoa ei ollut (0 ach). Oletus vuotoilmanvaihdon suuruudesta oli 0,01 1/h. Tässä koetapauksessa pelkästään hygroskooppisten rakenteiden vaikutus huoneilman suhteelliseen kosteuteen oli siis suurempi kuin ilmanvaihdon tyypillisellä 0,5 1/h ilmanvaihtokertoimella.

Ilman koneellista ilmavaihtoa (vuotoilmanvaihto arvioitu 0,1 1/h suuruiseksi) muovipinnoitettujen rakenteiden tapauksessa suhteellisen kosteuden maksimimuutos kuormituksen aikana oli 32 % RH, kun se pinnoittamattomien rakenteiden tapauksessa oli puolet tästä, 16 % RH.



Kuva 5. Huoneilman suhteellisen kosteuden nousu yöajan kuormitustilanteessa eri ilmanvaihtomäärillä (0, 0.25, 0.5 ja 1.0 1/h ach) ja kun sisäverhouksena on kipsilevy (no plastic) tai kun rakenteen sisäpintaan on asennettu muoviverhous (plastic).

Kenttäkohteessa tehtyjen mittausten perusteella on ilmeistä, että rakenteiden hygroskooppisella massalla on huomattava merkitys sisäilman kosteusoloihin. Kosteuskuormitustilanteessa rakenteisiin voi sitoutua kosteutta, jolloin sisäilman suhteellinen kosteus pysyy tasaisempana ja epäviihtyisyyttä aiheuttavien ääritilanteiden esiintyminen vähenee. Koerakenteissa sisäverhouksena käytetyn kipsilevyn oma kosteuskapasiteetti on suhteellisen pieni, mutta se läpäisee oikein käsiteltynä vesihöyryä hyvin. Tällöin kipsilevyn takana olevat materiaalikerrokset – ilmansulkupaperi, puukuitueriste ja rungon puuosat – voivat olla mukana kosteusvuorovaikutuksessa sisäilman kanssa.

3.2.3 Laskennalliset analyysit

Laajassa numeeriseen simulointiin perustuvassa tutkimuksessa /2, 3, 4 ja 7/ selvitettiin pitkälti Tapanilan Ekotalon huonetilaa vastaavan huoneen toimintaa: Makuuhuoneessa yöpyy kaksi henkeä ja ilmanvaihto on määräysten mukainen. Laskennallisesti selvitettiin vuoden tarkastelujakson aikana erilaisten rakenteiden ja ilmasto-olojen vaikutusta sisäilman kosteustasojen kehitykseen.

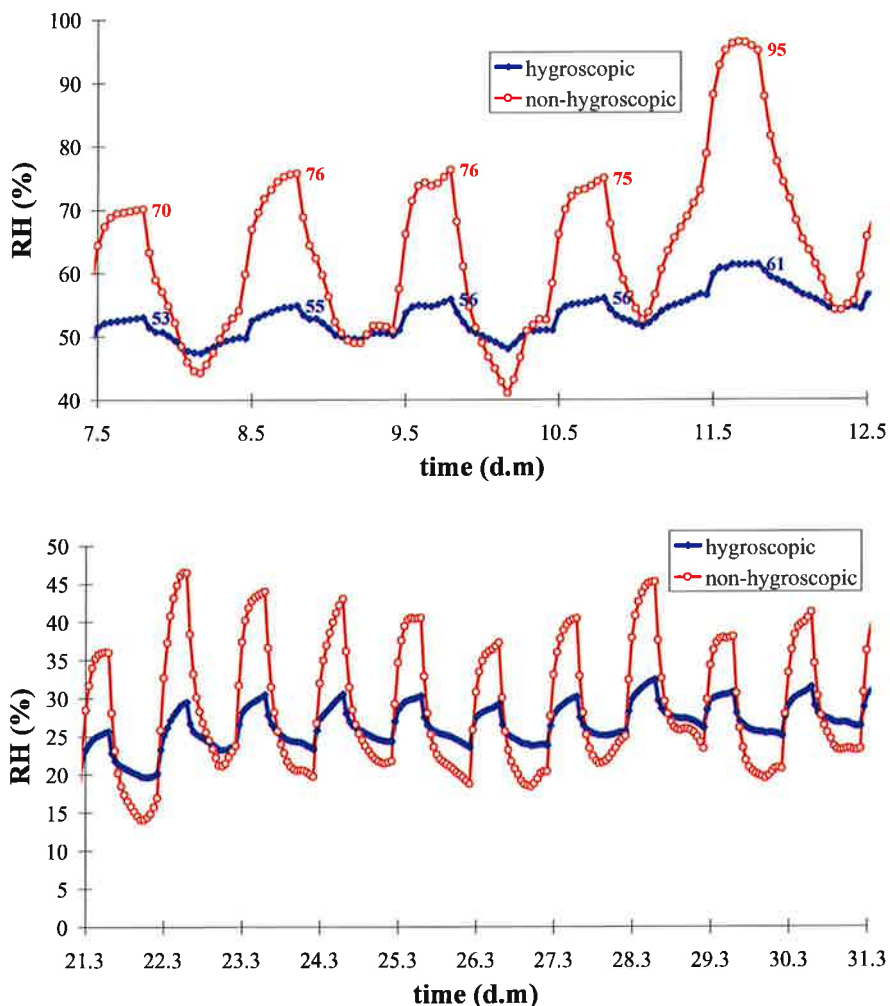
Taulukko 1 esittää eräät laskennassa käytetyt rakennetapaukset. Referenssitapauksena oli tilanne, jossa rakenteet olivat sisäpinnoiltaan lähes höyrytiivit.

Taulukko 1. Laskennallisen tarkastelussa pintavastuksen vertailussa käytetyt rakennetapaukset.

Rakennetapaus	Sisäpinnan käsittely	Sisäverhouslevy (huokoinen kuitulevy)		Ilmansulku	Lämmön-eriste
		Kosteus-kapasiteetti	Vesihöyryn läpäisevyys		
Hygroskooppinen	Suuri (vesih. läpäisevä maali)	Suuri	Suuri	Suuri (paperi)	Suuri (puukuitu)
Ei- hygroskooppinen	Pieni (höyrytiivis maali)	Suuri	Suuri	Suuri (paperi)	Suuri (puukuitu)

Tarkastelut tehtiin Euroopan erilaisille sääoloille ja sisäilman lämpötilan säätö oletettiin alueen mukaista käytäntöä mahdollisimman hyvin vastaavaksi. Ilmanvaihto oli huoneessa vakio 0,5 1/h. Seuraavassa esitetään joitain poimintoja tuloksista.

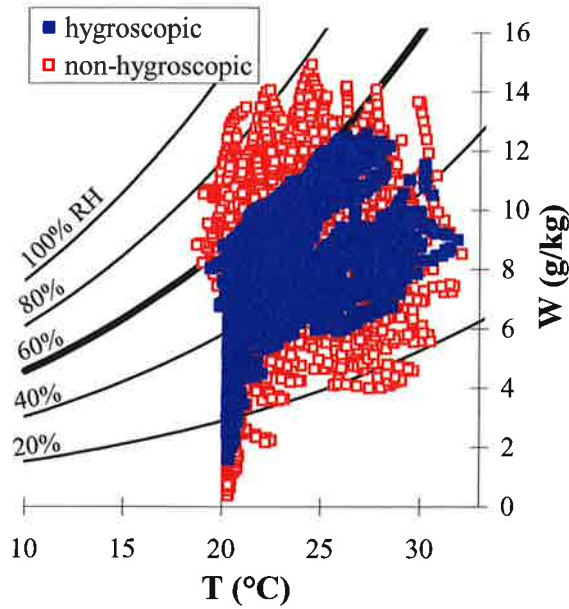
Kuva 6 /2/ esittää huoneilman suhteellisen kosteuden arvot valitun leudon jakson aikana Belgiassa ja kylmän jakson aikana Suomessa hygroskooppisuudeltaan erilaisissa rakennetapauksissa. Esimerkit kuvaavat kuinka hygroskooppiset rakenteet tehokkaasti vaimentavat sisäilman suhteellisen kosteuden vaihteluita dynaamisesti muuttuvien kuormitustilanteiden aikana. Leudoissa sääoloissa saattoi ei-hygroskooppisten rakenteiden tapauksessa huoneilman suhteellisen kosteus kasvaa kuormitustilanteessa tyypillisesti 30 – 35 % RH kun kasvu hygroskooppisilla rakenteilla jäi tasolle 5 – 8 % RH. Kylmissä oloissa suhteellisen kosteuden kasvulukemat olivat 20 – 30 % RH ja 5 – 10 % RH vastaavasti.



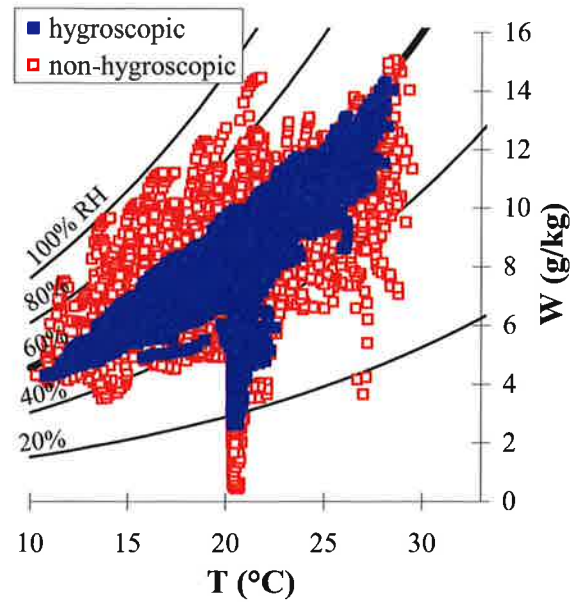
Kuva 6. Huoneilman suhteellisen kosteuden arvot leudon jakson aikana Belgiassa (yllä) ja kylmän jakson aikana Suomessa (alla) hygroskooppisessa ja ei-hygroskooppisessa tapauksessa /2/.

Kuva 7 esittää koko vuoden jaksolle tunneittain ratkaistut lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot neljässä eri ilmastossa. Kaikissa tapauksissa ei-hygroskooppisten rakenteiden tapauksessa esiintyi enemmän suhteellisen kosteuden ääriarvoja (hyvin kuivia tai kosteita tilanteita) kuin hygroskooppisten rakenteiden tapauksessa. Ääriolosuhteet ovat tyypillisesti viihtyisyysalueen ulkopuolella tai rajoilla, joten niiden vähentyminen johtaa sisäilman koetun laadun ja viihtyisyyden parantumiseen.

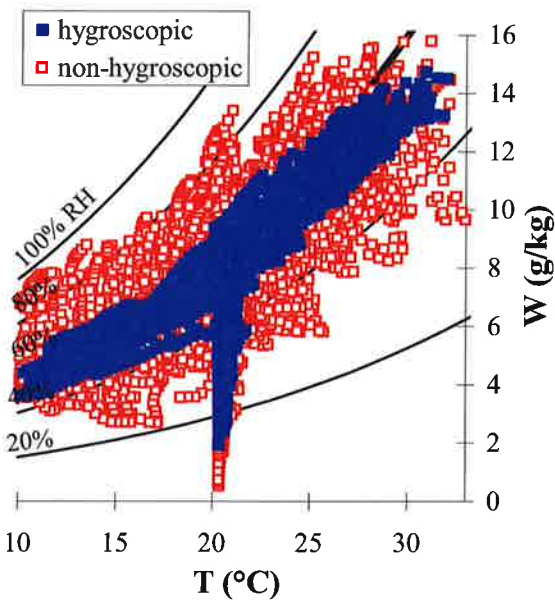
Helsinki



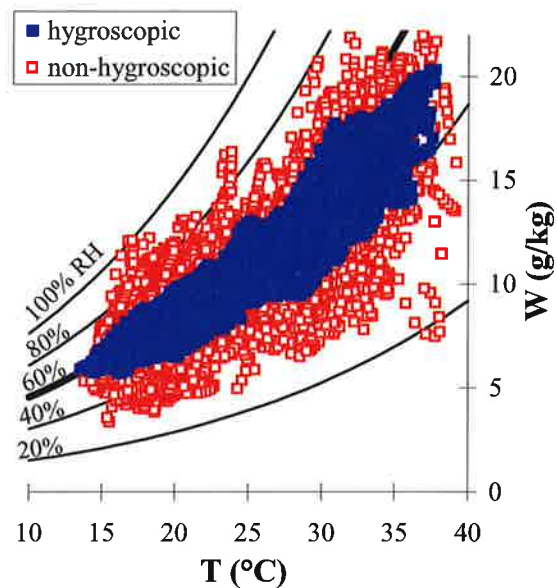
Saint Hubert, Belgia



Holzkirchen, Saksa



Trapani, Italia



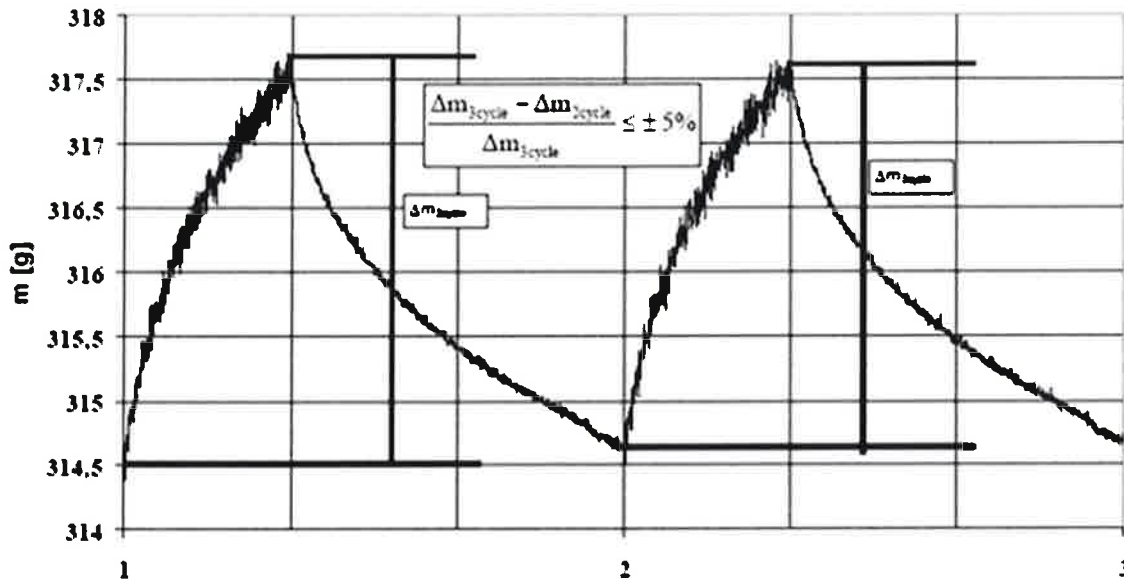
Kuva 7. Vuoden jokaiselle tunnille ratkaistut lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot tarkasteluhuoneessa Suomen, Belgian, Saksan ja Italian valittujen alueiden sääoloissa. Makuuhuoneiden lämpötilatason kansallisuuksittain tyypillisistä asetusarvoista ja lämmityslaitteista johtuen lämpötilan minimiarvot vaihtelivat ilmastoittain /2/.

3.2.4 Kosteuskapasiteetin mittaamenetelmä

Yhteispuhjoismaisessa NORDTEST- hankkeessa (vv. 2004 - 2005) määritettiin rakennusmateriaalien kosteutta tasaavan vaikutuksen esittämiseen tarkoitettu MBV -arvo (Moisture Buffer Value), jolla voidaan esittää kosteuden puskurointivaikutus yhdellä lukuarvolla /14 - 16/ Samalla esitettiin kokeellinen testimenetelmä MBV-arvon määrittämiseksi. Tätä ennen hygroskooppista toimivuutta voitiin arvioida

materiaaliominaisuuksien perusteella tai käyttäen niitä simuloinnin lähtöoletuksina. Kun kosteuden puskurointivaikutus voidaan esittää yhdellä lukuarvolla, on eri tapausten vertailu aiempaa helpompaa.

Esitettyssä koejärjestelyssä koekappale on 8 tunnin ajan valitussa korkeassa suhteellisen kosteuden vakiotilassa ja 16 tunnin ajan matalassa suhteellisessa kosteudessa. Lämpötila kokeessa oli vakio, noin +23 °C. Ennen koetta koekappaleiden kosteus on tasoitettu vakioolosuhteissa (n. 50 % RH ja n. 23 °C). Kokeessa käytettäviä tyypillisiä suhteellisen kosteuden arvoja ovat 75 % RH kuormitustilannetta kuvaavalle 8 h jaksolle ja 33 % RH 16 h kuivumisjaksolle. Syklejä toistetaan ja koekappaleen painon muutosta seurataan jatkuvasti. Kun toisiaan seuraavien syklien kostumisvaiheen välinen painonmuutoksen ero on korkeintaan 5 %, päätetään koe (Kuva 8).



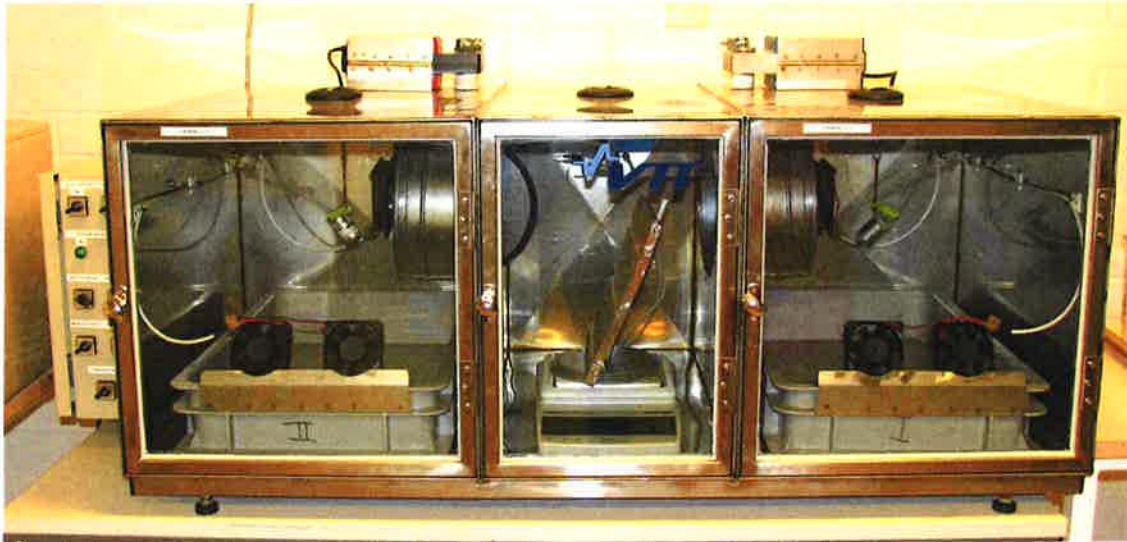
Kuva 8. Tyypillinen koekappaleen painon muutos sykleissä ja kokeen lopettamiskriteeri.

MBV -arvo lasketaan viimeisen syklin mittaustuloksista ja sen yksikkönä on $\text{g/m}^2\Delta\text{RH}$. Tämä luku voidaan laskea kaavalla 1

$$MBV = \frac{m_1 - m_0}{(RH_2 - RH_1) \cdot A}, \quad (1)$$

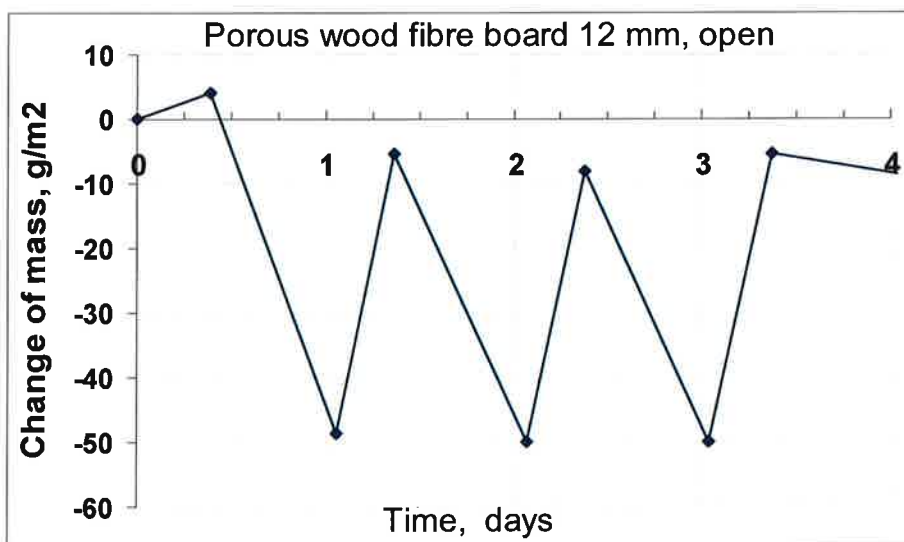
missä m_0 [g] on koekappaleen massa ennen viimeistä kostutusjaksoa, m_1 [g] on massa ko. kostutusjakson lopussa, RH_1 on alempi suhteellinen kosteus [%], RH_2 korkeampi suhteellisen kosteuden arvo [%] ja A on koekappaleen efektiivinen pinta-ala, joka on kosketuksessa ympäröivään ilmatilaan.

Kuva 9 esittää koelaitteiston MBV-arvon määrittämiseen. Koekappale on keskimmaisessa kammiossa jatkuvassa punnituksessa. Viereisissä kammioissa on suolaliuoksin ylläpidetyt suhteellisen kosteuden vakiotilat. Näistä voidaan venttiilejä ja puhaltimia ohjaamalla siirtää koekammioon halutussa tilassa olevaa ilmaa ja saada aikaan lähes porrasmaisesti muuttuva syklinen ilman kosteuden vaihtelu.

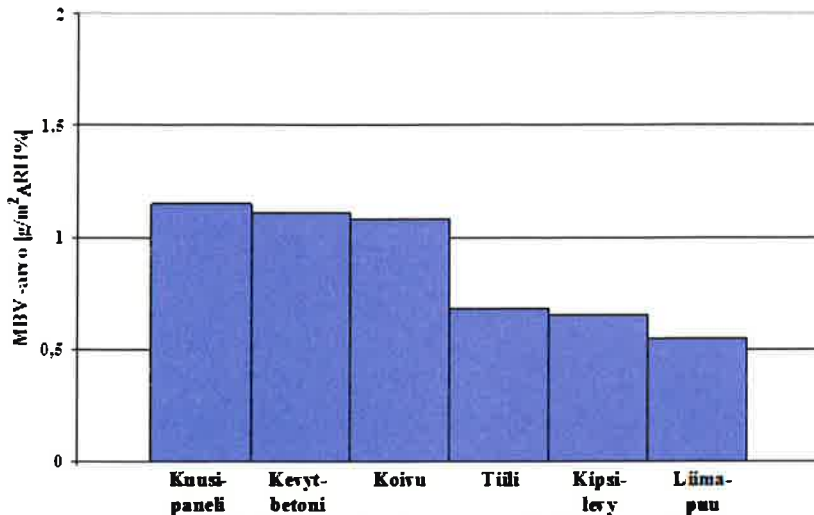


Kuva 9. Kosteuden puskurointikapasiteetin määrittämisessä VTT:llä käytetty laitteisto /16/.

Kuva 10 esittää MBV-kokeiden tyypillisen mittausdatan ja Kuva 11 esittää joillekin materiaaleille kokeellisesti määritetyt kosteuskapasiteetti-arvot. On huomattava, että arvot pätevät tutkittujen materiaalien pinoittamattomille koekappaleille, eivätkä siten kuvaa suoraan kosteuspuskurointia rakennesovellutuksessa.



Kuva 10. Esimerkki kosteuden muutoksesta syklin aikana huokoisessa kuitulevyssä.



Kuva 11. Eräille materiaaleille määritetyt kosteuskapasiteettia kuvaavat MBV-arvot /16/.

Kehitetty menetelmä antaa mahdollisuuden esittää materiaalin tai rakennekomponentin kosteuskapasiteetti yhden vertailukelpoisen lukuarvon avulla, mikä helpottaa käytettävissä olevan kosteuskapasiteetin suuruuden arviointia. Menetelmää on kuitenkin käytetty verrattain vähän, eikä MBV –arvoja juuri esitetä materiaaleille tai rakenteille. Syynä voi olla erillisen testausmenetelmän tuoma lisävaiva ja se, että kosteustekninen vuorovaikutus voidaan arvioida laskennallisesti materiaalien kosteusominaisuuksien avulla monikerroksiselle rakenteelle. Erityisesti sisäpinnan käsittely ja sisäpinnan viereiset kerrokset vaikuttavat merkittävästi rakenteen ja sisäilman välisiin kosteusvirtoihin ja monikerroksisen rakenteen eri variaatiot johtavat suureen hajontaan MBV –arvoissa.

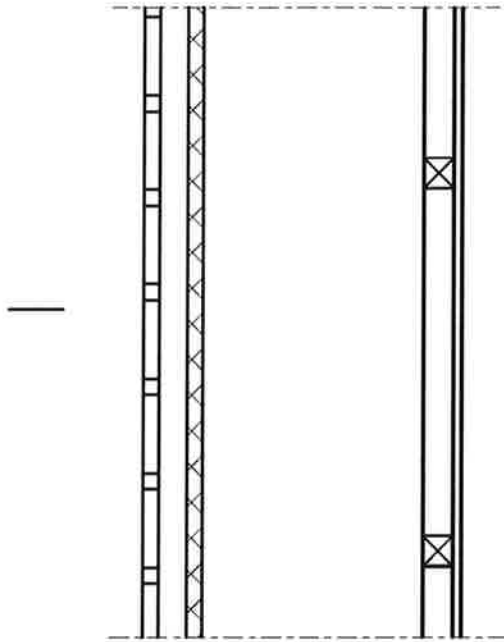
4. Esimerkkirakenteiden kosteustekninen toimivuus

4.1 Tavoitteet ja asetetut kriteerit

Tavoitteena oli selvittää muutamien valittujen esimerkkirakenteiden kosteustekninen toimivuus Suomen ilmastossa kuivien asuintilojen rakenteina. Kriteerinä käytettiin kosteuden kertymistä ja homeen kasvun numeerista analysointia. Homekasvun arviointi perustui VTT:n kehittämän homemallin käyttöön laskentatulosten jälkianalyysissä.

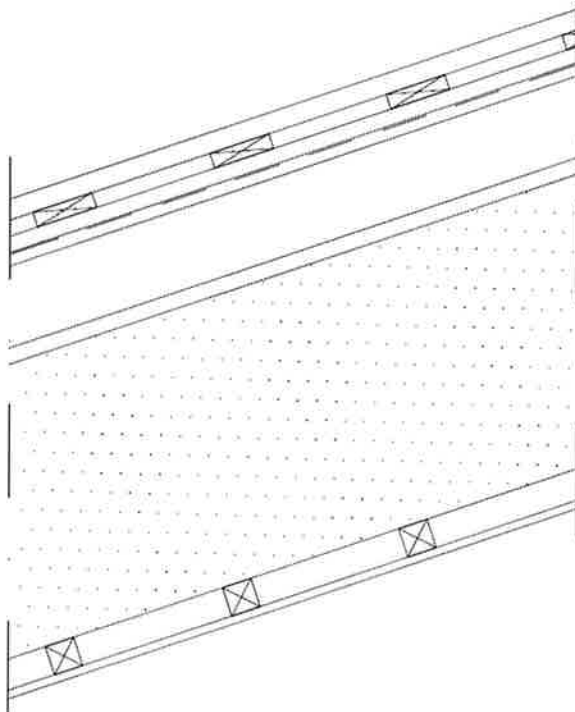
4.2 Tarkasteltavat rakenteet

Tarkasteltavia rakenteita oli kolme, yksi ulkoseinärakenne ja kaksi yläpohjarakennetta (Kuva 12, Kuva 13 ja Kuva 14). Rakenteiden ilman/höyrinsulun ominaisuuksia, lämmöneristeen materiaalia ja paksuutta sekä yläpohjien tuulensuojausta tarkasteltiin erilaisilla oletuksilla, joten tarkasteltavia tapauksia oli lukuisia. Vertailukohtana oli tyypillisesti höyrinsulullinen rakenne, joissain tapauksissa sisäpinnaltaan höyrytiivis rakenne.



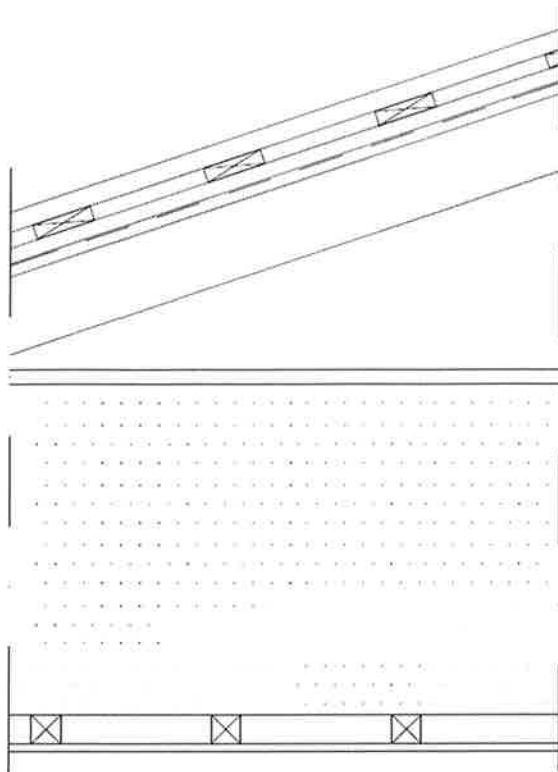
Ulkoverhouslauta 25 x 125
 Tuuletusväli, rimat 44 x 44 k 600
 Tuulensuoja Runkoleijona 25 mm
 Kantava runko 42 x 350 k 600
 ja puukuituinen lämmöneriste 350 mm
 Ekovilla X5 ilmansulku
 Vaakakoolaus 48 x 48
 Välissä puukuituinen
 lämmöneristelevy 50 mm
 Sisäverhouslevy, kipsi 13 mm
 Pintakäsittely

Kuva 12. Tarkastelussa käytetty seinärakenne. Tarkastelussa käytettiin eri ilmansulkukerroksia: X5, Intello ja OSB-levy. Referenssirakenteessa oli PE-höyrynsulku. Myös 175 mm eristepaksuuden rakenteen toimivuus selvitettiin.



Peltikate
 Harvalaudoitus 25 mm
 Rima 25x50 k 900 (tuul.rako)
 Aluskate
 Rima 20 x 45 k 900
 Kattoristikot 600 mm k 900
 Kattoristikoiden välissä:
 - tuuletusväli > 100 mm
 - tuulensuojalevy Runkoleijona 25 mm
 - puukuituinen lämmöneriste 450 mm
 Ilmansulku (X5)
 Koolaus 48 x 48 k300 (ilmaväli)
 Sisäverhouslevy, kipsi 13 mm
 Pintakäsittely

Kuva 13. YP1: kalteva, tuuletettu kattoeristerakenne. Tapauksesta riippuen ilmansulkuna käytettiin tarkastelussa joko X5 tuotetta tai höyrynsulkumuovia.



Peltikate
 Harvalaudoitus 25 mm
 Rima 25x50 k 900 (tuul.rako)
 Aluskate
 Rima 20 x 45 k 900
 Kattoristikot 600 mm k 900
 Kattoristikoiden välissä:
 - tuuletusväli > 100 mm
 - tuulensuojalevy Runkoleijona 25 mm
 - puukuituinen lämmöneriste 550 mm
 Ilmansulku (X5)
 Koolaus 48 x 48 k300 (ilmaväli)
 Sisäverhouslevy, kipsi 13 mm
 Pintakäsittely

Kuva 14. YP2: Vaakaeriste tuulettetussa katossa. Tuulensuojana runkoleijona tai rakenne on ilman tuulensuojaa. Tapauksesta riippuen ilmansulkuna käytettiin tarkastelussa joko X5 - ilmansulkutuotetta tai höyrynsulkumuovia.

4.3 Tarkastelumenetelmät

Tarkastelussa käytettiin WUFI 5.3 simulointiohjelmaa /17/ rakenteiden 1-d leikkausten tarkasteluun. Ohjelma ratkaisee rakenneleikkauksen lämpötila- ja kosteusjakauman tunneittain päivitettävien reunaehtojen avulla ja ottaen huomioon materiaalikerrosten lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet.

Homeen kasvu on ensimmäisiä merkkejä, joita liiallinen kosteus voi aiheuttaa rakenteissa. Laskentatulosten jälkitarkastelussa arvioitiin homeen kasvuriskiä rakenteiden kriittisissä osissa. Homeen kasvua arvioitiin VTT:n kehittämällä homemallilla, jota on täydennetty ottamaan huomioon eri materiaalien homehtumisherkkyys /18 – 24/.

4.3.1 Homekasvun tarkastelu

Homeen laskentamallin pohjana on materiaalipinnan homekasvun määrän visuaaliseen havainnointiin perustuva luokitus (Taulukko 2). Lukuisten kokeiden perusteella homeen kasvu on voitu kuvata laskentamallilla, joka ratkaisee homeindeksin arvon dynaamisesti vaihtelevissa olosuhteissa. Tarkastelussa kriittisiksi kohdiksi valittujen pintojen olosuhteiden perusteella voitiin laskea näiden kohtien homeen kasvua kuvaavat homeindeksit [0, 6] eri tapauksissa.

Homeindeksi arvo 1 kuvaa ensimmäistä mikroskoopilla havaittavaa alkavaa homekasvua ja taso 3 ensimmäistä paljain silmin havaittavaa kasvua tai mikroskooppihavainnoissa yli 50 % homepeittoa pinnalla. Rakenteiden sisäpinnan ja sisäilmaan kosketuksissa olevien osien kriittisenä maksimiarvona käytetään tasoa 1, ts. mitään kasvua ei sallita. Ulkopinnan lähellä olevien kerrosten rajana on usein taso 3, koska ulkoilman olosuhteet johtavat herkästi homeen lievään kasvumahdollisuuteen näissä kohdin rakennetta. Koska ne eivät ole

suoraan kosketuksessa sisäilman kanssa, ne eivät siten aiheuta olennaista epäpuhtausriskiä sisäilmaan sen enempää kuin ulkoilmasta tuuletuksen kautta tulevat epäpuhtaudet voivat aiheuttaa.

On huomattava, että homekasvu ei merkitse rakenteiden vaurioitumista esimerkiksi lujuuden osalta. Lujuuteen vaikuttava laho voi alkaa vasta huomattavasti korkeammassa kosteudessa ja edellyttää yleensä materiaalin kosketusta vapaaseen veteen. Homeen kasvun aiheuttama haitta rakenteen ulkopinnan viereisissä osissa on lähinnä esteettinen. Homeindeksin taso 3 vastaa ensimmäisiä paljain silmin havaittavia pilkkuja, jotka siis voivat tyypillisesti olla tuuletusrakoon rajoittuvissa osissa.

Taulukko 2. VTT:n kehittämän homemallin perusteena oleva materiaaliopin homekasvun määrää kuvaavan homeindeksin eri tasojen määritelmät.

Home-indeksi	Havaittu homekasvu	Huom.
0	Ei kasvua	Pinta puhdas
1	Paikallisesti alkava	Muutama rihma
2	Mikroskoopilla havaittava	Rihmasto muodostunut
3	Silmin havaittava, alkava kasvu	Itiöitä, rihmaston peitto alle 10 % alasta
4	Silmin havaittava kasvu, lievä	Rihmaston peitto noin 10–50 % alasta
5	Silmin havaittava kasvu, paikoin runsas	Rihmaston peitto yli 50 % alasta
6	Erittäin runsas kasvu	Runsas kasvu, rihmaston peitto lähes 100 %

Homeen kasvu riippuu kasvualustan homehtumisherkkyydestä. Materiaaleja on luokiteltu neljään eri ryhmään niiden homehtumisherkkyyden mukaan (Taulukko 3).

Taulukko 3. Homeen kasvun herkkyyssluokat joillekin rakennusmateriaaleille /23, ja 24/.

Homehtumis-herkkyyssluokka	Materiaalit
Erittäin herkkä	Käsittämätön, runsaasti ravinteita sisältävä männyn pintapuu
Herkkä	Paperipintaiset tuotteet ja kalvot, puupohjaiset levyt, höylätty kuusi
Kohtalaisen kestävä	Sementtipohjaiset materiaalit, muovipohjaiset materiaalit, mineraalivillat, polyesterivilla
Kestävä	Lasi- ja metallimateriaalit, tehokkaita suoja-aineita sisältävät tuotteet

Herkin taso on käsittämätöntä männyn pintapuuta vastaava (*erittäin herkkä, very sensitive*).

Seuraava herkkyyssluokka (*herkkä, sensitive*) vastaa tyypillisesti puupohjaisia tai paperipintaisia tuotteita, höylättyä kuusta ja kipsilevyä.

Sitä seuraava luokka (*kohtalaisen kestävä, medium resistant*) soveltuu sementti- ja muovipohjaisille materiaaleille sekä mineraalivillatuotteille.

Hometta vastustava taso 4 (*kestävä, resistant*) vastaa lasi-, metalli yms. pintoja sekä materiaaleja, jotka on käsitelty homeen kasvua estävillä tuotteilla.

Laskennallinen homeindeksi alenee kuivien ja kylmien jaksojen aikana, mikä kuvaa homeen taantumaa. Homeindeksin laskennallisen taantumisen kertoimena käytettiin laskennassa kerrointa 0,25. Tämä kuvaa homeindeksin laskennallista alentumisnopeutta kasvulle epäedullisissa oloissa verrattuna erittäin herkän puun vastaavaan arvoon, joten käytetty arvo tuo tarkasteluun lisävarmuutta.

4.4 Laskennassa käytetyt ilmastotiedot ja kosteuskuormitukset

Laskenta tehtiin Vantaan v. 2007 säätiedoilla, jotka on tarkoitettu kosteusteknisen toimivuuden mitoitustiedostoksi tuulettamattomille rakenteille. Tarkastelussa ulkoilman olosuhteet (lämpötila, suhteellinen kosteus, sade- ja tuulitiedot sekä auringon säteilytiedot) vaihtelevat tunneittain. Useiden vuosien tarkastelussa valitun säätiedon olosuhteet toistuvat vuosittain. Tarkastelut tehtiin tapauksesta riippuen 3 – 6 vuoden jaksolle.

Sisäilman olosuhteet asetettiin EN15026 mukaisesti normaalia kosteuskuormaa vastaaviksi. Tässä sisäilman lämpötila on vakio +20 °C silloin, kun ulkoilman lämpötila on alle +10 °C. Kun ulkoilman lämpötila muuttuu 10 °C:sta +20 °C:een, kasvaa sisäilman lämpötila lineaarisesti +20 °C:sta +25 °C:een. Tätä korkeammilla ulkoilman lämpötiloilla sisäilman lämpötila on vakio +25 °C.

Kun ulkoilman lämpötila on alle -10 °C, on sisäilman suhteellinen kosteus 30 % RH. Sisäilman suhteellinen kosteus kasvaa tästä lineaarisesti RH 60 %:iin ulkoilman lämpötilan kasvaessa -10 °C:sta +20 °C:een. Sisäilman suhteellinen kosteus on maksimissaan 60 % RH. Esitetty kosteuskuormitus vastaa kuivien asuintilojen sisäilman kosteutta ja sisältää lisäksi jonkin verran varmuutta.

Kaikkien materiaalikerrosten alkukosteus oletettiin 80 % RH suhteellista kosteutta vastaavaan tasapainokosteuteen, jollei tapauskohtaisesti ole muuta esitetty.

4.5 Materiaaliominaisuudet

Taulukko 4 esittää materiaaleille laskennassa käytetyt vesihöyrynläpäisyominaisuudet /17/.

Taulukko 4. Materiaalikerrokset ja niiden vesihöyrynläpäisyominaisuudet.

Materiaalikerros	Kerros- paksuudet, mm	Tiheys, kg/m ³	Vesihöyryn diffuusio- vastuskerroin μ
Puukuitueriste	350/175/48	40	2,3
Puukuitueriste	48	70, 120	2,3
Mineraalivilla	350 / 48	20	1,3
OSB	20	630	650 - 100 f (RH = 0, 100 %)
X5 -ilmansulku	1	-	700 ($S_d = 0,7$ m)
Intello -höyrnsulku	1	-	26000 - 250 f (RH = 0, 100 %)
Leijona tuulensuoja	25	300	12,5 - 3,5 f (RH = 0, 100 %)
Sisäverhouskipsilevy	12,5	625	8,3 - 2,6 f (RH = 0, 100 %)

Ilmansulkupaperin X5 /25/ vesihöyryn diffuusiovastus $S_d = 0,7$ m, mikä vastaa yleisesti hyvin vesihöyryä läpäisevää rakennuspaperia. S_d – arvo kuvaa kuinka paksua paikallaan olevaa ilmakerrosta tuotteen vesihöyrynvastus vastaa.

Intello – höyrynsululla on ilman suhteellisen kosteuden mukaan muuttuva diffuusiovastus. Kuivassa tilassa vesihöyryn vastus on höyrynsulun luokkaa ($S_d > 10 \text{ m}$) ja kosteassa päässä vastus on pienempi kuin rakennuspaperin.

OSB, oriented strand board, on isolastuisesta puusta liimattu rakennuslevy. Tuotteesta riippuen sen vesihöyrynvastus voi vaihdella. Lisäksi vastus riippuu kosteustasosta kuten puutuotteilla yleensäkin.

Puukuitueristeen tavanomaista lämmöneristystuotetta (tiheys n. 40 kg/m^3) suuremmat tiheydet (70 kg/m^3 ja 120 kg/m^3) eivät vastaa suoraan olemassa olevia tuotteita, mutta näitä tiheyksiä tarkasteltiin, kun haluttiin selvittää kosteuskapasiteetin muutoksen vaikutusta kosteusvirtoihin ja kosteuden tasoittumiseen. Vesihöyryn diffuusiovastus oletettiin näillä tuotteilla samaksi kuin 40 kg/m^3 tuotteella.

4.6 Seinärakenteet

4.6.1 Tarkastelutapaukset

Taulukko 5 esittää seinärakenteen tarkastelutapaukset. Tarkasteluissa käytettiin erilaisia tuulensuojan, lämmöneristeen ja ilma/höyrynsulun materiaaleja. Kaikissa tapauksissa sisäverhouksen pinnoitteen vesihöyrynvastus $S_d = 0,02 \text{ m}$, mikä vastaa erittäin hyvin läpäisevälle savimaalille ilmoitettua ominaisuutta. Pieni sisäpinnan höyrynvastus lisää kosteusteknisen toimivuuden tarkastelun varmuutta Suomen ilmastossa.

Taulukko 5. Seinärakenteiden tarkastelutapaukset. Tuulensuojana oli joko 25 mm huokoinen kuitulevy tai 12,5 mm kipsilevy.

Tunnus	Tuulensuoja	Lämmöneriste	Höyryn/ ilmansulku	Lämmöneriste, sisäpuolen 48 mm tila	Sade rakenteen sisään
E	25 mm hk	350 mm puukuitu	X5	puukuitu	Ei
Eg	12,5 mm kipsil.	350 mm puukuitu	X5	puukuitu	Ei
Eint	25 mm hk	350 mm puukuitu	Intello	puukuitu	Ei
Eosb	25 mm hk	350 mm puukuitu	20 mm osb	puukuitu	Ei
mw	25 mm hk	350 mm mineraalivilla	HS	mineraalivilla	Ei
mw	25 mm hk	350 mm mineraalivilla	HS	ilmarako	Ei
R2	25 mm hk	350 mm umpisolu	Al-pinta	umpisolu	Ei
E%	25 mm hk	350 mm puukuitu	X5	puukuitu	1 % viistosateesta
E,int%	25 mm hk	350 mm puukuitu	Intello	puukuitu	1 % viistosateesta
En%	25 mm hk	175 mm puukuitu	X5	puukuitu	1 % viistosateesta
Eg%	12,5 mm kipsil.	350 mm puukuitu	X5	puukuitu	1 % viistosateesta
Egn%	12,5 mm kipsil.	175 mm puukuitu	X5	puukuitu	1 % viistosateesta
Eosb	25 mm hk	350 mm puukuitu	20 mm osb	puukuitu	1 % viistosateesta
mw%	25 mm hk	350 mm mineraalivilla	HS	mineraalivilla	1 % viistosateesta

Referenssirakenteista toinen oli höyrynsulullinen mineraalivillalla eristetty seinä, jossa sisäpuolen 48 mm:n eristeontelossa oli joko mineraalivilla (mw) tai pelkkä ilmatila (mwi). Toisessa referenssirakenteessa oli lämmöneristeinä umpisoluinen, ei-hygroskooppinen eriste, jonka pinnat oli suljettu alumiinikalvolla (R2).

Referenssirakenteiden lämmöneristeet eivät olleet suoraan olemassa olevista tuotteista peräisin. Kaikkien lämmöneristeiden lämmönjohtavuus oli asetettu samaksi 0,039 W/mK. Näin lämpötekni- sen toimivuuden erot eivät vaikuttaneet kosteustekni- sen toimivuuden eroihin. Lisäksi erot lämpövirroissa johtuivat pääosin kosteuden faasimuutoksista, eivätkä muista eroista materiaalien ominaisuuksissa.

4.6.2 Tulokset seinä rakenteiden toimivuudesta

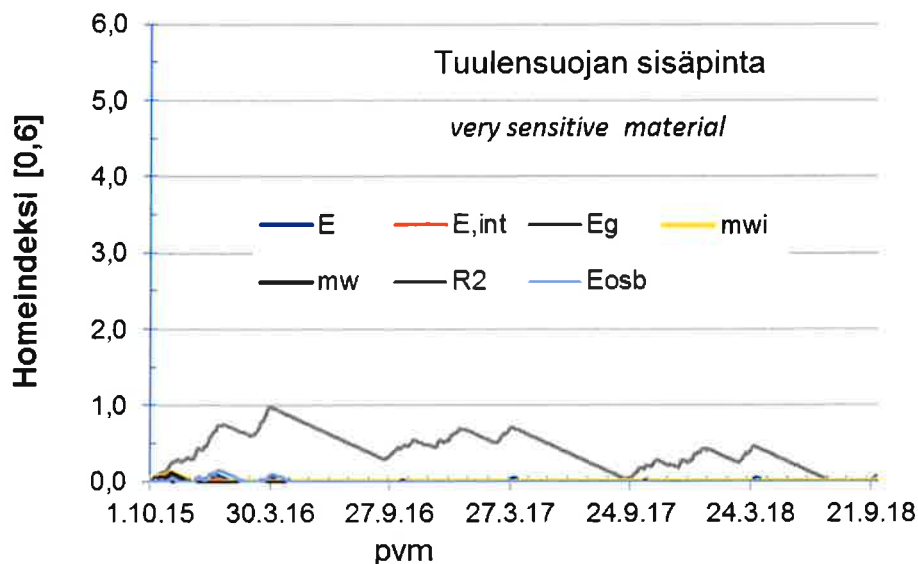
Rakenteen kosteustekni- sen toimivuuden kriittiset kohdat ovat tuulensuojan molemmat pinnat ja erityisesti sen sisäpinta, jonka kosteustasoa sisältäpäin siirtyvä kosteus voi kasvattaa. Tuulensuojan ulkopintaan vaikuttaa eniten tuuletusvälin olosuhteet.

Normaali kosteusrasitustilanne

Kuva 15 esittää laskennallisen tarkastelun tuottamia homeindeksin tuloksia tuulensuojan sisäpinnalle tapauksissa, joissa rakenne on suojattu sisään tunkeutuvalta vedeltä.

Kun rakenteen tuulensuojana oli kipsilevy, aiheutti ensimmäisen vuoden aikana rakenteesta ulospäin kuivuva kosteus lievän indeksin nousun tuulensuojan sisäpinnalla, kun homekasvun tarkastelussa käytettiin herkintä kasvuluokkaa *erittäin herkkä*. Laskennallinen homeindeksi kävi arvossa 1, eikä se edusta mitään todellista kasvuriskiä rakenteessa. Hetkellinen arvo ensimmäisellä mikroskooppisesti havaittavalla tasolla rakenteen sisällä ei aiheuta kasvuriskiä. Muissa rakennetapauksissa homeindeksi sai alkuvaiheen kuivumistilanteessa hyvin pieniä arvoja (<0,15).

Tuulensuojan ulkopinnan homeindeksit pysyivät näissä tapauksissa lähes nollassa, eikä niiden homeindeksin tuloksia ole erikseen esitetty kuvana. Tulosten perusteella tuulensuojan ulkopinnalla ei ole homeen kasvuriskiä on normaaleissa kosteuskuormitusoloissa.



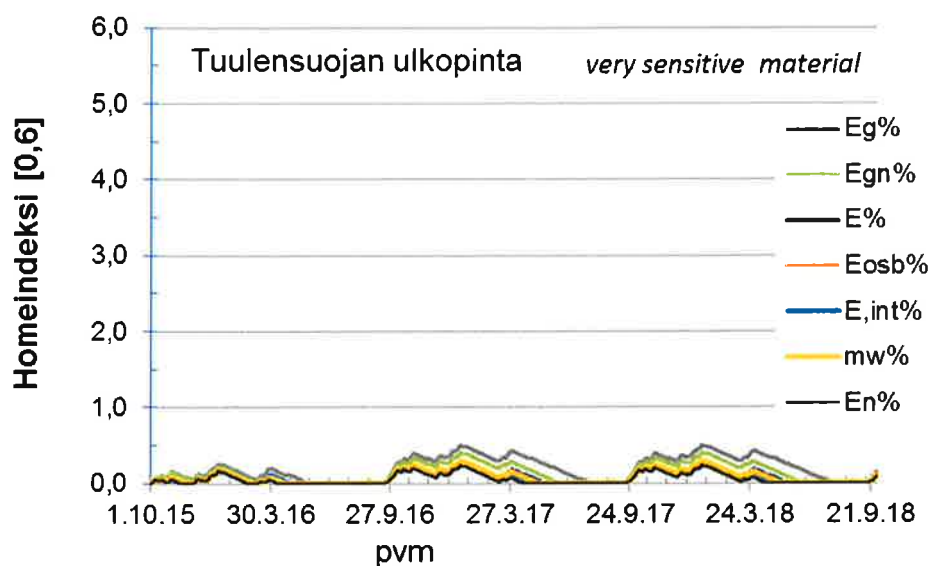
Kuva 15. Tuulensuojan sisäpinnan homeindeksi pysyi turvallisella tasolla kaikissa tapauksissa. Materiaalin homeutumisherkkyysluokka: *Erittäin herkkä*.

Sateen tunkeutuminen rakenteeseen

Sateen tunkeutuminen rakenteeseen kuvaa rakenteiden toimintaa kosteuskuormituksen kasvaessa huomattavasti normaalista tilanteesta. Näissä laskentatapauksissa oletettiin, että 1 % viistosateesta tunkeutui rakenteen tuulensuojan läpi lämmöneristekerroksen uloimpaan 50 mm kerrokseen vetenä ja aiheutti rakenteen sisäisen kosteuskuormituksen. Tilanne kuvaa rakenteen virheellistä toimintaa ja sen tarkoitus on antaa kuva rakenteiden selviytymiskyvystä poikkeuksellisissa kuormitustilanteissa.

Kuva 16, Kuva 17 ja Kuva 18 esittävät eri tapauksille laskettuja homeindeksien arvoja viistosateen kuormituksessa.

Tuulensuojan ulkopinnan homeindeksi pysyi ensimmäistä mikroskooppista kasvua kuvaavan raja-arvon 1 alapuolella kaikissa rakennetapauksissa (Kuva 16).



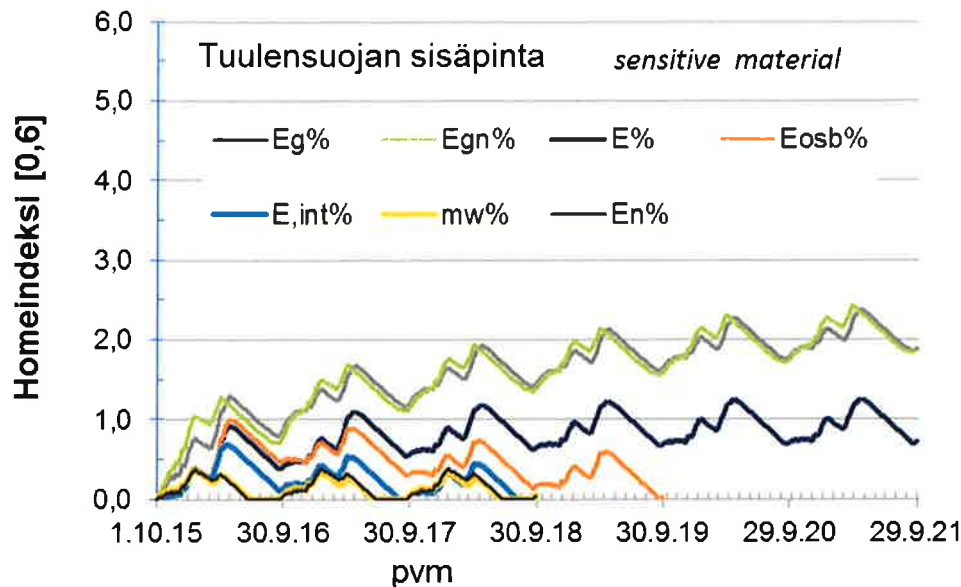
Kuva 16. Tuulensuojan ulkopinnan homeindeksi tapauksissa, joissa viistosateesta tunkeutuu 1 % lämmöneristeeseen. Materiaalin homehtumisherkkyysluokka: Erittäin herkkä.

Homeen kasvu näkyi tuulensuojan sisäpinnalla, johon ylimääräinen, ulospäin kuivuva kosteus muodosti korkeita kosteuspitoisuuksia.

Herkästi homehtuvan materiaalin oletuksella (Kuva 17) kipsilevytuulensuojarakenteiden (Eg% ja 175 mm eristeellä Egn%) homeindeksi saivat laskennassa suurimmat arvot. Näissä tapauksissa homeindeksin kehitys kuuden vuoden tarkastelujakson aikana näytti näissä tapauksissa jäävän tasolle 2. Tämä on vielä hyväksyttävä tulos rakenteen ulkopinnan lähellä olevalle kerrokselle, mutta indeksin kasvu kertoo kohonneesta riskistä.

Rakenne 25 mm:n Leijonatuulensuojalla, puukuitueristeellä ja X5 –ilmansululla rakenteen (E%), laskennallinen homeindeksi jäi tasolle noin 1, eikä siinä tapahtunut enää lisäkasvua. Toimivuus on tuloksen perusteella turvallinen.

Höyrynsulullinen rakenne (mw%), muuttuvan vesihöyrynläpäisevyyden Intello-höyrynsulullinen rakenne (E,int%) ja 175 mm puukuitueristerakenne Leijonatuulensuojalla ja X5 –ilmansululla (En%) jäivät homeindeksin arvoissa tätä alemmalle tasolle. OSB-ilmansulkurakenteen korkean alkukosteuden (OSB:n alkukosteus) takia homeindeksi sai ensimmäisenä vuonna maksimi-arvon 1,0, mutta se ei johtanut myöhempään kasvuun. Myös OSB-rakenne tuulensuojan sisäpuolisen kasvun kannalta turvallinen, kun oletuksena oli homehtumisherkkydeltään *'herkkä'* materiaali.



Kuva 17. Tuulensuojan sisäpinnan homeindeksi tapauksissa, joissa viistosateesta tunkeutuu 1 % lämmöneristeeseen. Materiaalin homehtumisherkkyyssluokka: Herkkä.

Kuva 18 esittää tuulensuojan sisäpinnalle ratkaistut homeindeksin tulokset *erittäin herkän* materiaalin oletuksella. Tilanne, jossa rakenteeseen pääsee merkittävästi vettä ja tuulensuojan sisäpinnan materiaali on homehtumisherkkyydeltään *'erittäin herkkä'*, johtaa kosteusteknisen toimivuuden riskiin. Riski näkyy tuulensuojan sisäpinnan oloissa.

Tuloksista nähdään, että ilmansulun hyvä vesihöyrynläpäisevyys tuo tässä tilanteessa lisäkuormaa hyvin lämmöneristettyihin rakenteisiin ja niiden homeindeksi kasvoi kolmen vuoden aikana tasolle 4 – 5. Suurimmat arvot olivat kipsilevytuulensuojilla, kun huokoinen kuitulevytuulensuoja (E%) hidasti kasvua jonkin verran.

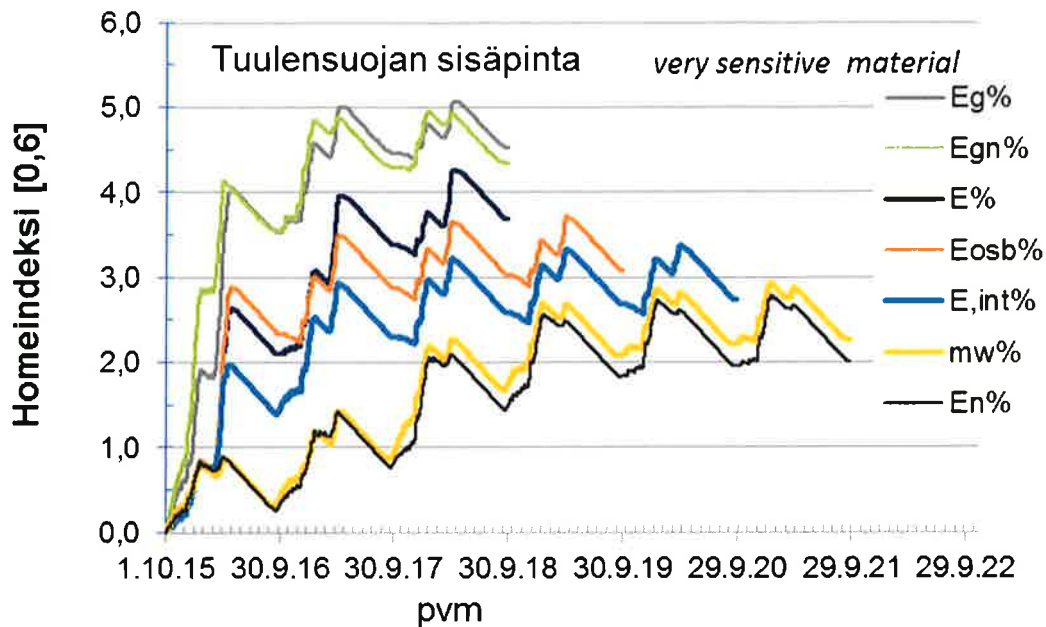
Jos raja-arvona ulkoilman viereisille kerroksille pidetään homeindeksin tasoa 3,0, johti myös OSB-ilmansulku ja Intello-höyrynsulku yhdessä huokoinen kuitulevytuulensuojan kanssa tämän rajan selvästi ylittävään arvoon kolmen ensimmäisen tarkasteluvuoden aikana.

Tässä tapauksessa höyrynsulullisen mineraalivillarakenteen (mw%) ja 175 mm puukuitueristerakenteen (En%) homehtuminen oli hitainta. Kuuden vuoden tarkasteluajana homeindeksi jäi näillä hieman alle tason 3, tosin niidenkin homeindekseissä oli edelleen pientä vuotuista kasvua. Homeindeksin arvojen 2 ja 3 välissä olevat arvot kuvaavat kuitenkin kasvanutta homehtumisriskiä myös rakenteen ulkopuolisissa kerroksissa, eikä rakenteiden toiminta vaikuta asetetuissa tarkasteluoloissa täysin turvalliselta.

Tässä tapauksessa homeen kasvu ei-hygroskooppisen ja höyrynsulullisen rakenteen tapauksessa oli hitaampaa kuin muuten vastaavassa rakenteessa, jossa oli hygroskooppinen lämmöneriste ja vesihöyryä läpäisevä ilmansulku. Kaikissa tapauksissa toimivuuteen liittyi jonkinasteinen homeen kasvuriski, mutta hitaampi kasvu voi mahdollistaa tilanteen korjaamisen ennen liiallisen kasvun alkua.

Kasvunopeuteen vaikuttaa paitsi sisäilmasta tuleva lisäkosteus, myös kosteusolojen pysyvyys rajapinnalla. Tässä tilanteessa ohut lämmöneristys (En%) ja sen hyvää lämmöneristystasoa suuremmat lämpöhäviöt edistivät kriittisen rajapinnan kuivumista ja hidastivat homeen kasvua, mikä oli samalla tasolla kuin höyrynsulullisen ja paksumman ei-hygroskooppisen lämmöneristeen rakenteella (mw%). Heikompi lämmöneristetaso ei antanut tässäkään tapauksessa riittävää suojaa kosteuden aiheuttamaa homeen kasvuriskiä vastaan, vaikka hidasti sen kehittymistä. Kun lämmöneristeen tuulensuojana oli kipsilevy, ei eristeen paksuus vaikuttanut homeen kasvuun. Tämä johtuu kipsilevyn vesihöyrynläpäisevyydestä sekä siitä, ettei sen yli muodostu samanlaista lämpötila- ja vesihöyrynläpäisevyydestä sekä siitä, ettei sen yli muodostu samanlaista lämpötila- ja vesihöyrynläpäisevyydestä.

osapaine-eroa kuin paksumman ja paremmin lämpöä eristävän huokoisen kuitulevyn tapauksessa. Kosteusteknisen toimivuuden varmuus ei perustu rakenteen lämmöneristystasoon vaan sen kaikkien kerrosten toimivuuteen kokonaisuutena.



Kuva 18. Tuulensuojan sisäpinnan homeindeksi tapauksissa, joissa viistosateesta tunkeutuu 1 % lämmöneristeeseen. Materiaalin homehtumisherkkyysluokka: *Erittäin herkkä*.

Sateen tunkeutuminen rakenteeseen edustaa aina jonkinasteista virhetilannetta. Tarkastellut tapaukset osoittavat eri rakenteiden herkkyyden ylimääräisen kosteuden aiheuttamiin ongelmiin kosteusteknisessä toimivuudessa. Tässä tapauksessa näkyi ilmansulun vesihöyrynläpäisevyyden, sisäilmasta ja materiaalikerrosten alkukosteuksista tulevan lisäkuormituksen, hygroskooppisen materiaalin ja myös eristepaksuuden vaikutus. Mikään tarkasteltu rakenne ei ollut toimivuudeltaan täysin turvallinen, jos tuulensuojan sisäpinnalla oli homehtumisherkkyysluokan *'Erittäin herkkiä'* materiaaleja.

4.6.3 Seinärakenteen mahdollinen kesäcondenssi

Tavoitteena oli selvittää kesäkauden (1.5. – 30.10.) aikainen kosteus rakenteen höyryn- tai ilmansulun eri puolilla. Rakenteena oli aiemmassa toimivuustarkastelussa käytetty tuuletettu ja puuverhottu seinärakenne (Kuva 12), jossa on 25 mm tuulensuojalevy (huokoinen kuitulevy), 350 mm lämmöneriste, höyryn/ilmasulku, 48 mm sisäpuolinen eristekerros ja sisäverhouksena 13 mm kipsilevy.

Rakenne oli Suomen ilmasto-oloissa ja sen sisäilman lämpötila oli vakio +20 °C, mikä kesäkaudella vastaa koneellisen jäähtyksen tilannetta. Etelään suunnattuun ulkopintaan kohdistui viistosade ja auringon säteily (absorptiokerroin 0,80 ja tumma puupinta) varjostamattomana. Lisäksi viistosateesta 1 % tunkeutui tuulensuojan läpi lämmöneristeen uloimpaan 50 mm kerrokseen, mikä lisäsi kosteuskuormaa ulkoilmasta. Tarkasteluolot sisälsivät paljon varmuutta, ts. ne edistivät mahdollista kosteuden kertymistä kriittisille kohdin rakennetta. Kriittinen kohta ilman/höyrynsulun ulkopinta.

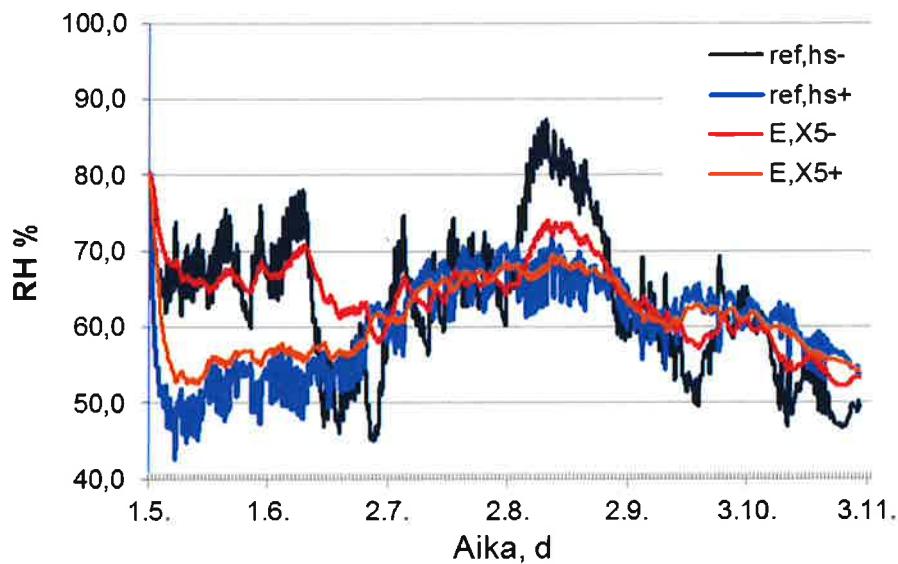
Kuva 19 esittää suhteelliset kosteudet ilman/höyrynsulun molemmiin puolin kahdessa eri rakennetapauksessa: Tapaus E, jossa on puukuitueriste ja X5 –ilmansulkutuote, sekä ref,hs, jossa on mineraalivillaeristys ja höyrynsulku.

Höyrynsulun ulkopuolen suhteellinen kosteus kohosi tarkastelluissa oloissa lyhytaikaisesti yli 80 % RH tason (maksimi 85 % RH), kun se kosteutta läpäisevän ilmansulun tapauksessa jäi

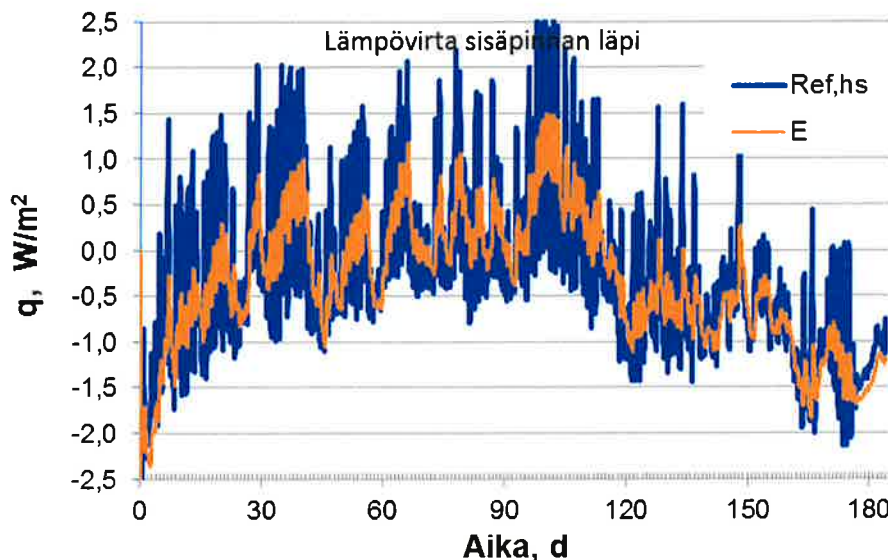
korkeimmillaan noin 73 % tasolle. Vesihöyryn kondenssia ei rakenteissa esiintynyt. Kumpaankaan rakenteeseen ei näissä oloissa kohdistunut kosteusteknisen toimivuuden riskiä Suomen ilmasto-oloissa.

Jos ulkoilman olosuhteet ovat olennaisesti lämpimämmät (tai sisäilma viileämpi) ja rakenteeseen pääsee ulkoa kosteutta, voi tilanne muuttua. Tyypillisesti molempiin suuntiin kosteutta siirtävä rakenne parantaa kosteusteknistä toimintavarmuutta verrattuna vastaavaan höyrynsululliseen rakenteeseen. Hygroskooppisten ja molempiin suuntiin diffuusiolla avoimien rakenteiden materiaalikerrosten kosteustasot ovat erilaisissa kuormitusolosuhteissa tasaisemmat kuin ei-hygroskooppisten ja höyrynsulullisten rakenteiden. Toimivuuden toteaminen eri ilmastoissa ja erilaisissa kosteuskuormitusolosuhteissa edellyttää lisätarkasteluja.

Johtumislämpövirrat olivat hygroskooppisella rakenteella tasaisemmat kuin höyrynsulullisella rakenteella (Kuva 20). Kosteudensiirto ja sen faasimuutokset tasoittivat lämpövirran huippuja.



Kuva 19. Suhteellisen kosteuden arvot höyryn/ilmansulun molemmiin puolin.



Kuva 20. Johtumislämpövirrat rakenteen sisäpinnan läpi jaksolla 1.5. – 30.10.

4.6.4 Yhteenveto seinärakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta

Normaalit kuivan sisäilman ja ulkoilman rasitusolot

Yhteenvetona kosteusteknisen toimivuuden tarkasteluista voidaan todeta, että hygroksooppiset rakenteet ovat kosteusteknisesti turvallisia normaaleilla kuivien asuintilojen sisäilman kosteuskuormilla ja kun ulkoilman kosteuskuormitus vastaa sateelta suojattujen ja tuuletettujen rakenteiden toimintaa. Tällöin rakenteen eri kerrosten materiaalit voivat olla homehtumisherkkydeltään suurinta luokaa *'erittäin herkkä'* vastaavia. Olennaisia eroja ei-hygroksooppisten rakenteiden tai erilaisten ilmansulun vesihöyrynläpäisevyyksien välillä ei ollut.

Tuulensuojan ulkopinta edustaa tuuletusvälin olosuhteita, eikä siinä ollut homeen kasvua mahdollistavia olosuhteita missään tarkastelutapauksessa.

Kipsilevytuulensuojan tapauksessa homeindeksi kävi tuulensuojan sisäpinnalla tasolla 1 alkukosteuden kuivumisjakson yhteydessä ja homehtumisherkkydeltään *'erittäin herkkä'* materiaalin oletuksella. Tätä ei voi pitää todellisena riskinä sisäilman tai rakenteen homehtumisen kannalta.

Rakenteeseen tunkeutuvan sateen lisärasitus

Oletus viistosateen kosteuden tunkeutumisesta (1 %:n viistosateen määrästä) tuulensuojan taakse lämmöneristeeseen edustaa poikkeustilannetta.

Homehtumisriski ei näkynyt tuulensuojan ulkopinnalla millään rakenteella. Tuulensuojalevy hidasti kosteuden poistumista niin, että sen ulkopinta pysyi turvallisissa oloissa, mutta vastaavasti sen sisäpinnan kosteus nousi rakenteeseen tunkeutuvan sateen vaikutuksesta.

Tuulensuojan sisäpinta oli tarkastelussa olleiden seinärakenteiden kosteusteknisen toimivuuden kriittinen kohta. Kun tuulensuojan taakse lämmöneristeeseen tunkeutui 1 %:n viistosateen kosteudesta, johti tilanne homehtumiselle *'erittäin herkkä'* materiaalin oletuksella homeen kasvuriskiin kaikissa rakennetapauksissa.

Sateen tunkeutuessa rakenteeseen näkyy pienikin lisäkuormitus tuloksessa. Hitaimman homeenkasvun tilanne oli höyrynsulullisessa rakenteessa ja ohuemalla (175 mm) eristepaksuudella eristetyssä hygroksooppisessa rakenteessa. Näiden homeindeksien arvot vaihtelivat välillä 2 – 3 kuuden vuoden jakson lopulla. Tämä kuvaa kohonnutta homeen kasvuriskiä, vaikka taso jää vielä alle kriittisen arvon ulkopinnan viereisissä osissa.

Rakenne, jossa oli Intello-höyrynsulku sijoittui höyrynsulullisen rakenteen ja X5 – ilmansulkutuotteella toteutetun rakenteen tulosten väliin. OSB –ilmansulkukerros johti hieman Intello-tapausta korkeampaan homehtumiseen *'erittäin herkkä'* materiaalin oletuksella.

Hygroksooppinen rakenne, jossa oli kipsilevytuulensuoja ja homehtumiselle *'herkkä'* materiaali johti kuuden vuoden simulointijaksolla homeindeksien maksimitasoon noin 2,5. Tämä taso on vielä hyväksyttävä rakenteen ulko-osissa, eikä edusta sellaista homehtumisriskiä, jolla voisi olla vaikutusta sisäilmaan. Silti tapaus kuvaa homehtumisen lisääntyntä herkkyyttä verrattuna tilanteeseen, jossa oli paksumpi huokoinen puukuitulevy tuulensuojana.

Kesäaikaista kondenssia ei esiintynyt tarkastelluissa tapauksissa Suomen ilmasto-oloissa, vaikka sateen ja auringon säteilyn vaikutus valittiin tällaista ilmiötä suosiviksi. Hygroksooppisten ja molempiin suuntiin diffuusiolle avoimien rakenteiden materiaalikerrosten kosteustasot ovat erilaisissa kuormitustilanteissa selvästi tasaisemmat kuin ei-

hygroskoopipisten ja höyrynsulullisten rakenteiden. Tämä vähentää hetkellisten korkeiden kosteustasojen ja mahdollisen kondenssin esiintymistä vaativammassa kosteusrasituksessa, esimerkiksi lämpimämissä ilmasto-oloissa.

4.7 Yläpohjarakenteet

4.7.1 Tarkastelutapaukset

Tässä tarkasteltiin Kuva 13 ja Kuva 14 mukaisia rakenteita. Tarkasteluissa käytettiin erilaisia oletuksia tuulensuojasta sekä lämmöneristeen ja ilma/höyrynsulun materiaaleista.. Kaikissa tapauksissa sisäverhouksen pinnoitteen vesihöyrynvastus $S_d = 0,02\text{m}$, mikä vastaa erittäin hyvin läpäisevälle savimaalille ilmoitettua ominaisuutta. Pieni sisäpinnan höyrynvastus lisää tarkastelun varmuutta Suomen ilmastossa. Taulukko 6 esittää yläpohjarakenteiden tarkastelutapaukset.

Taulukko 6. Yläpohjarakenteiden tarkastelutapaukset.

Tunnus	Tuulensuoja	Lämmöneriste	Höyryn/ ilmansulku	Sisäpuolen 48 mm tila	Muuta
YP1 –rakenteet:					
X5	25 mm hk	450 mm puukuitu	X5	ilmarako	
X5n	25 mm hk	300 mm puukuitu	X5	ilmarako	
X5e0	25 mm hk	450 mm puukuitu	X5	ilmarako	Emissiokerroin = 0
Ref,hs	25 mm hk	450 mm mineraalivilla	HS	ilmarako	
YP2 –rakenteet:					
X5C	25 mm hk	450 mm puukuitu	X5	ilmarako	25 mm kattava lautakerros peltikatteen alla
X5-2	25 mm hk	550 mm puukuitu	X5	ilmarako	Vaakarakenne
X5-22	Ei tuulensuojaa	550 mm puukuitu	X5	ilmarako	Vaakarakenne
Ref,hs-22	Ei tuulensuojaa	550 mm puukuitu	HS	ilmarako	Vaakarakenne

Peltikaton ja aluskatteen välisen 25 mm ilmaraon ilmanvaihtokerroin oletettiin 40 1/h suuruiseksi. Kaltevan yläpohjaerityksen tapauksessa lämmöneristeen ja aluskatteen välinen 100 mm ilmavälin ilmanvaihtokerroin oletettiin 20 1/h suuruiseksi (Kuva 13). Vaakaeristeen yläpohjan (Kuva 14) ilmatila asetettiin laskennassa 150 mm korkuiseksi ja sen ilmanvaihtokerroin oli 30 1/h. Asetetut ilmanvaihtokertoimet ovat realistisia, mutta suurehkoja. Ilman virtausnopeus esimerkiksi katteen alapuolisessa 25 mm:n ilmavälissä, jonka pituus on 15 m olisi noin 0,17 m/s. Riittävän suureksi oletetulla tuuletuksella haluttiin varmistaa se, että toimivuuden arviointi riippuu itse lämmöneristerakenteesta, ja toisaalta se, että vastasäteilyn jäähdyttämään rakenteeseen tulee ulkoilman kosteutta kohtuullisesti varmuutta sisältävä määrä.

Katto oletettiin kiiltäväksi peltikatoksi, jonka auringon säteilyn absorptiokerroin oli 0,20 ja pitkäaaltoisen lämpösäteilyn emissiokerroin oli 0,90. Kattoon kohdistuu auringon säteily ja

taivaan vastasäteily. Lumipeitettä tmv. lämmönsiirron lisävastusta ei otettu huomioon. Oletusten takia taivaan vastasäteilyn aiheuttama jäähtyminen tapahtuu vuodenajasta riippumatta, mutta auringon säteilyn lämmittävä vaikutus on vähäinen.

Peltikatteen harvalaudoitusta ei kuvattu vaan ulkokatetta tarkasteltiin pelkkänä peltikerroksena. Tällöin peltipinnan jäähtyminen on pahimman tilanteen mukaista, koska mukana ei ole laudoituksen tuomaa lämmönsiirtovastusta tai termistä massaa.

YP1:n tapauksessa oletettiin loiva, noin 14 asteen kulmassa kallistettu rakenne, joka oli suunnattu etelään. YP2:n tapauksessa oletuksena oli kuvasta poiketen vaakasuora katto, mikä hieman lisäsi taivaan vastasäteilyn vaikutusta YP1:n tapaukseen verrattuna.

Laskentajakson pituus oli 3 – 5 vuotta riippuen tapauksesta.

4.7.1 Tulokset

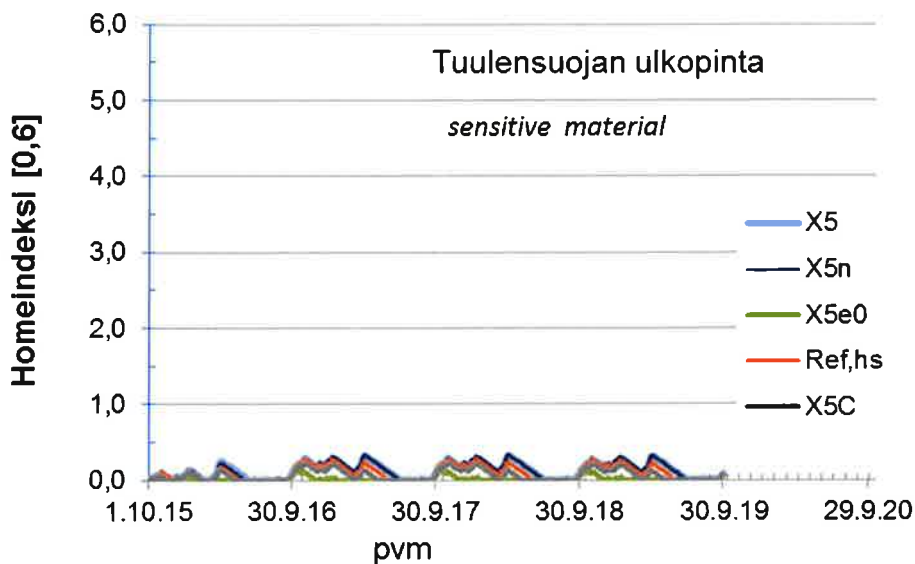
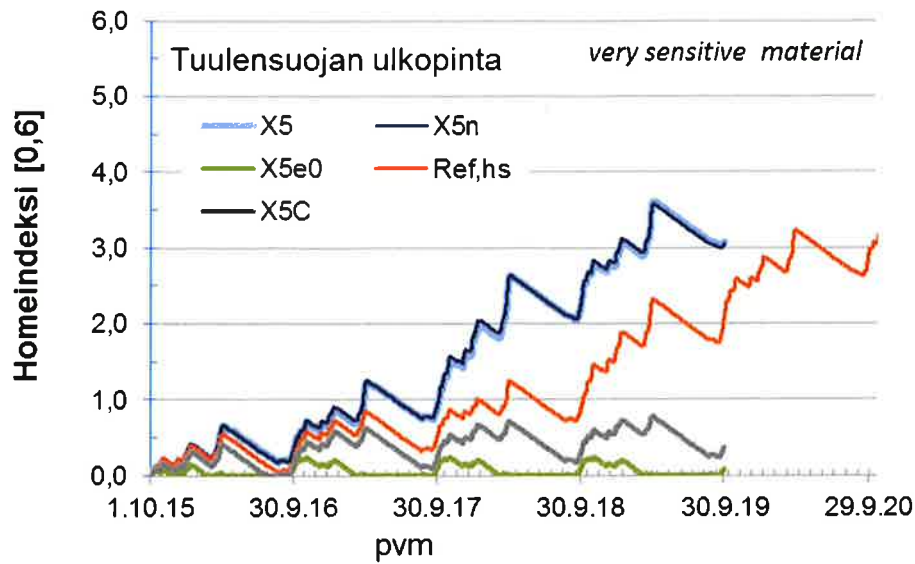
Viistot yläpohjarakenteet

Rakenteiden kriittinen kohta on tuulensuojan molemmin puolin. Näille kohdille ratkaistiin homeindeksit simuloitujen lämpötila- ja kosteusarvojen avulla olettaen joko *'erittäin herkkä'* tai *'herkkä'* homehtumisherkkyyssuokka. Luokka *'erittäin herkkä'* vastaa männyn käsittelemätöntä pintaputa ja luokka *'herkkä'* yleensä puupohjaisia rakennustuotteita. Kuva 21 esittää viistojen eristerakenteiden YP1 homeindeksit tuulensuojan yläpinnalle ja Kuva 22 tuulensuojan sisäpuoliselle alapinnalle.

Tuulensuojan yläpuoliset rakenteet voivat altistua homeen kasvulle, jos niissä on homeen kasvulle *'erittäin herkkiä'* materiaaleja. Homeen kasvussa ei ollut juurikaan eroa riippuen lämmöneristekerroksen paksuudesta silloin kun ilmansulkuna oli X5-tuote. Homeindeksin maksimitaso neljän vuoden simulointijakson aikana oli noin 3,5 ja vuotuinen trendi oli nouseva. Kun rakenteessa oli höyrynsulku ja lämmöneriste oli mineraalivillaa, oli homeen kasvu hitaampaa, mutta viidessä vuodessa homeindeksin maksimi ylitti tälläkin rakenteella tason 3.

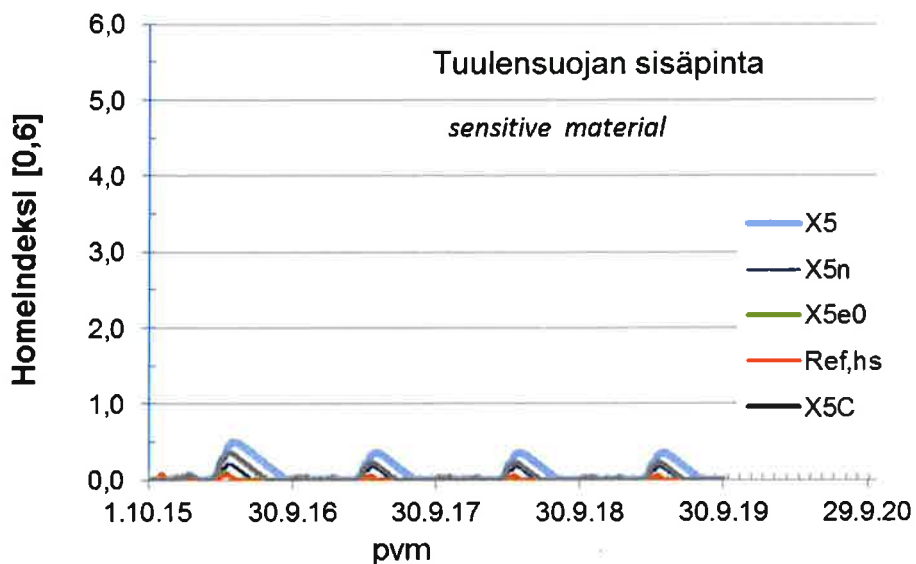
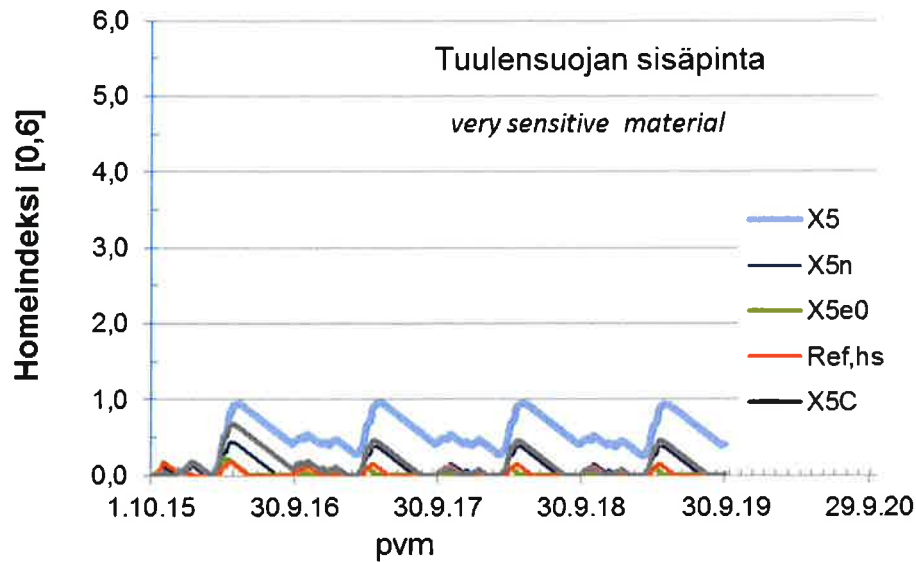
Tapauksessa, jossa taivaan vastasäteily oli poistettu, ts. peltikate ei voi jäähtyä ulkoilmaa alempaan lämpötilaan (X5e0), ei tuulensuojan yläpuolisessa kerroksessa ollut homeen kasvuriskiä edes erittäin herkän materiaalin tapauksessa. Samoin, jos pellin alla oli kattava 25 mm lautakerros (X5C), riitti se estämään alapuolisten kerrosten liiallisen jäähtymisen ja kosteustasojen nousun. Tällöin homeindeksi jäi myös täysin turvalliselle tasolle, alle 1:n. Tämän perusteella yläpohjien homeen kasvuun liittyvät ongelmat selittyvät taivaan vastasäteilyn aiheuttamalla tuulensuojan yläpuolisten rakenteiden jäähtymisellä.

Kun tuulensuojan yläpuoliset kerrokset on tehty materiaaleista, joiden homehtumisherkkyyssuokka on *'herkkä'*, ei homehtumisriskiä esiintynyt rakenteissa.



Kuva 21. Yläpohjarakenteen YP1 tuulensuojan ulkopinnan laskennallinen homeindeksi eri rakennetapauksissa. Yllä oletuksena homehtumisherkkyysluokka 'erittäin herkkä' ja alla 'herkkä' materiaali.

Tulosten perusteella rakenteiden tuulensuojan alapuoliset kerrokset ovat kosteusteknisesti toimivia myös silloin, kun näissä kohdin on homehtumiselle 'erittäin herkkiä' materiaaleja, esim. männyn pintapuuta (Kuva 22).

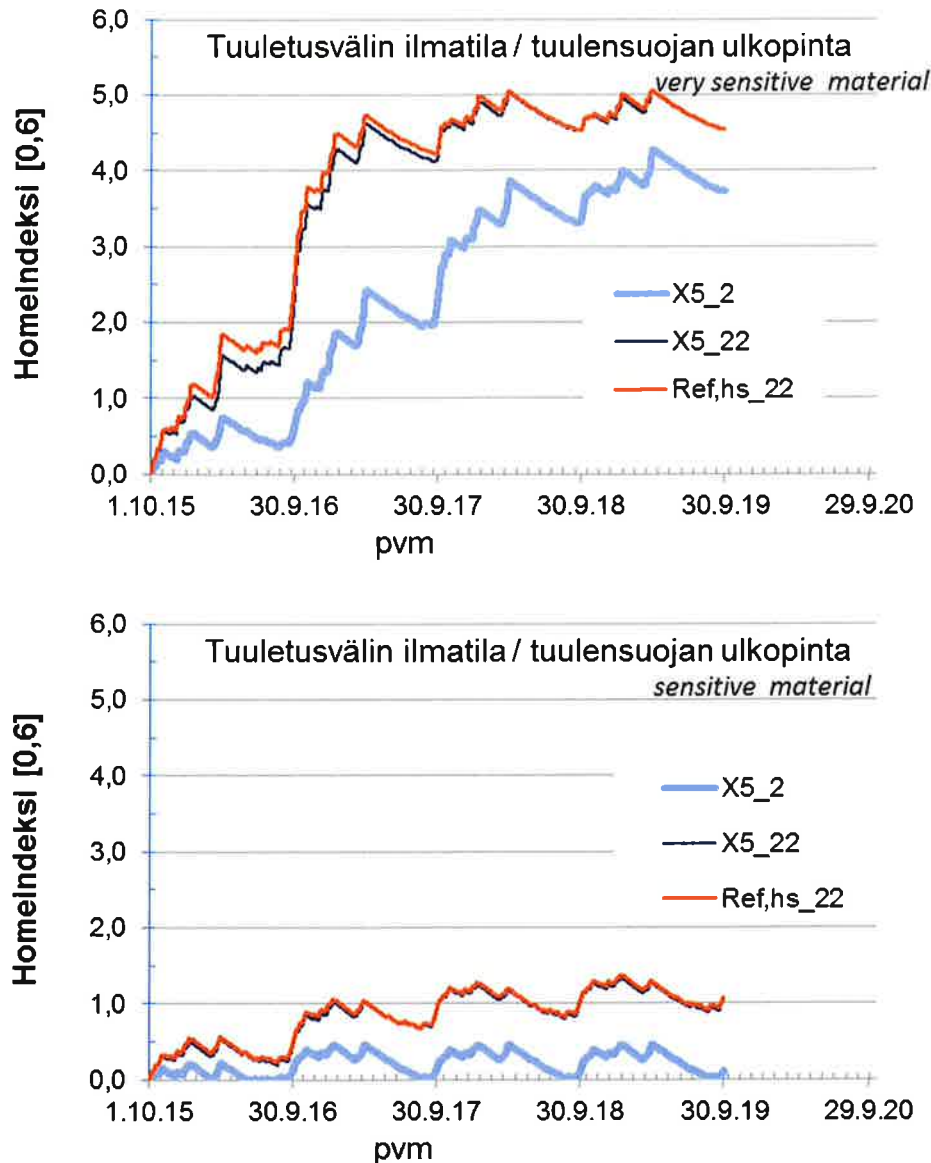


Kuva 22. Yläpohjarakenteen YP1 tuulensuojan sisäpinnan laskennallinen homeindeksi eri rakennetapauksissa. Yllä oletuksena homehtumisherkkyysluokka 'erittäin herkkä' ja alla 'herkkä' materiaali.

Vaakatasoon asennetut yläpohjan eristerakenteet

Kuva 23 esittää yläpohjan vaakaeristerakenteiden YP2 homeindeksit tuuletusilmatilassa tai tuulensuojan ulkopinnalla ja Kuva 24 lämmöneristeen ulkopinnalla tuulensuojaa tai tuuletusvälin ilmatilaa vasten.

Yläpohjassa YP2 oli rakennetta YP1 paksumpi lämmöneriste ja lisäksi vaaka-asennus lisäsi taivaan vastasäteilyn jäähdyttävää vaikutusta, mikä näkyi hieman korkeampina laskennallisen homeindeksin arvoina. *Erittäin herkkä* materiaaluokan tapauksessa X5-ilmansulun ja 550 mm puukuitueristeen tapauksessa tuulensuojan yläpinnan homeindeksin maksimitaso oli neljän vuoden aikana 4,3. Jos rakenteessa ei ollut tuulensuojaa, kasvoi homehtumisriski edelleen ja sai tuuletusilmatilassa arvon 5. Tämä arvo saavutettiin sekä höyrynsulullisessa ja mineraalivillalla eristetyssä rakenteessa, että X5-ilmansulun ja puukuitueristeen rakenteessa.



Kuva 23. Yläpohjarakenteen YP2 (vaakataso) tuuletusvälin laskennallinen homeindeksi eri rakennetapauksissa. Yllä oletuksena homehtumisherkkyysluokka 'erittäin herkkä' ja alla 'herkkä' materiaali.

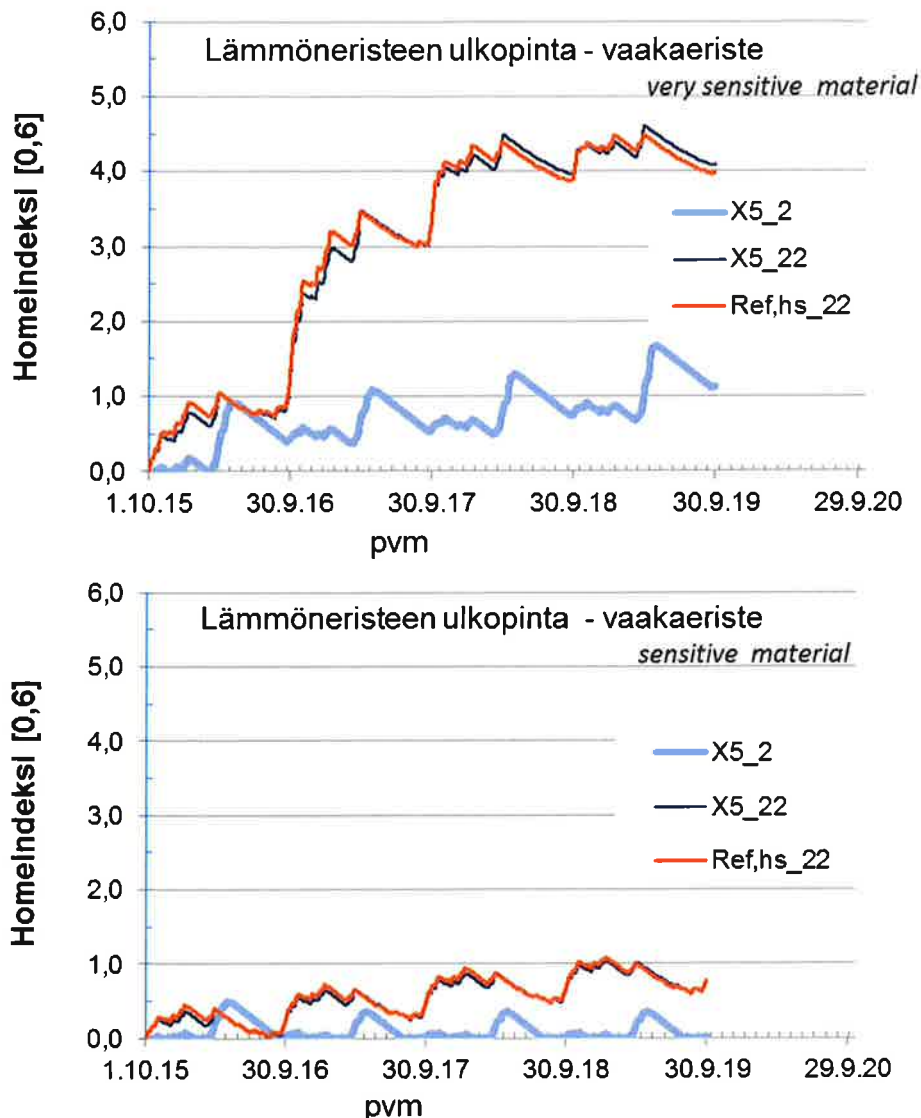
Tulos oli jokseenkin sama lämmöneristeen yläpinnan homeindeksille silloin, kun rakenteessa ei ollut tuulensuojaa. Sekä hygroskooppisen että ei-hygroskooppisen rakenteen tapauksissa oli selvä laskennallinen homehtumisriski (Kuva 24).

Tuulensuojatussa tapauksessa lämmöneristeen ja tuulensuojan rajapinta pysyi 'erittäin herkän' materiaalin tapauksessa lähellä arvoa 1 ja vaihteli sen molemmiin puolin (Kuva 24). Neljän vuoden aikana homeindeksin tason 1 ympärillä vaihteleva ulkopinnan kerroksen homeindeksi ei edusta riskiä rakenteen toimivuuden kannalta.

Yläpohjarakenteella YP1 materiaaliluokka 'herkkä' oli turvallinen käytettäväksi tuulensuojan ylä- ja alapuolisiin kerroksiin, mutta materiaaliluokka 'erittäin herkkä' edusti selvää riskitilannetta tuuletusvälin materiaaleille ja siihen kosketuksessa olevan lämmöneristeen tai tuulensuojan yläpinnalle.

Syy homeindeksin kasvuun oli harvalaudoitettun peltikatteen voimakkaassa jäähtymisessä taivaan vastasäteilyn vaikutuksesta, ts. kirkkaalla säällä kun auringon säteily ei lämmitä

rakenteita. Jäähtyminen johtaa katteen alapuolisten rakennekerrosten jäähtymiseen, jolloin niiden suhteellinen kosteus ja homehtumisriski kasvavat. Havaittu homehtumisriski ei riipu lämmöneristystyksen materiaalista ja se riippuu vain heikosti lämmöneristystasosta. Vasta tarkasteltuja merkittävästi heikompi lämmöneristystaso voisi lämmittää rakenteita niin, että riskitasot *'erittäin herkkien'* materiaalien tapauksessa pienentyisivät merkittävästi.



Kuva 24. Yläpohjarakenteen YP2 lämmöneristeen ulkopinnan laskennallinen homeindeksi eri rakennetapauksissa. Yllä oletuksena homehtumisherkkyysluokka *'erittäin herkkä'* ja alla *'herkkä'* materiaali.

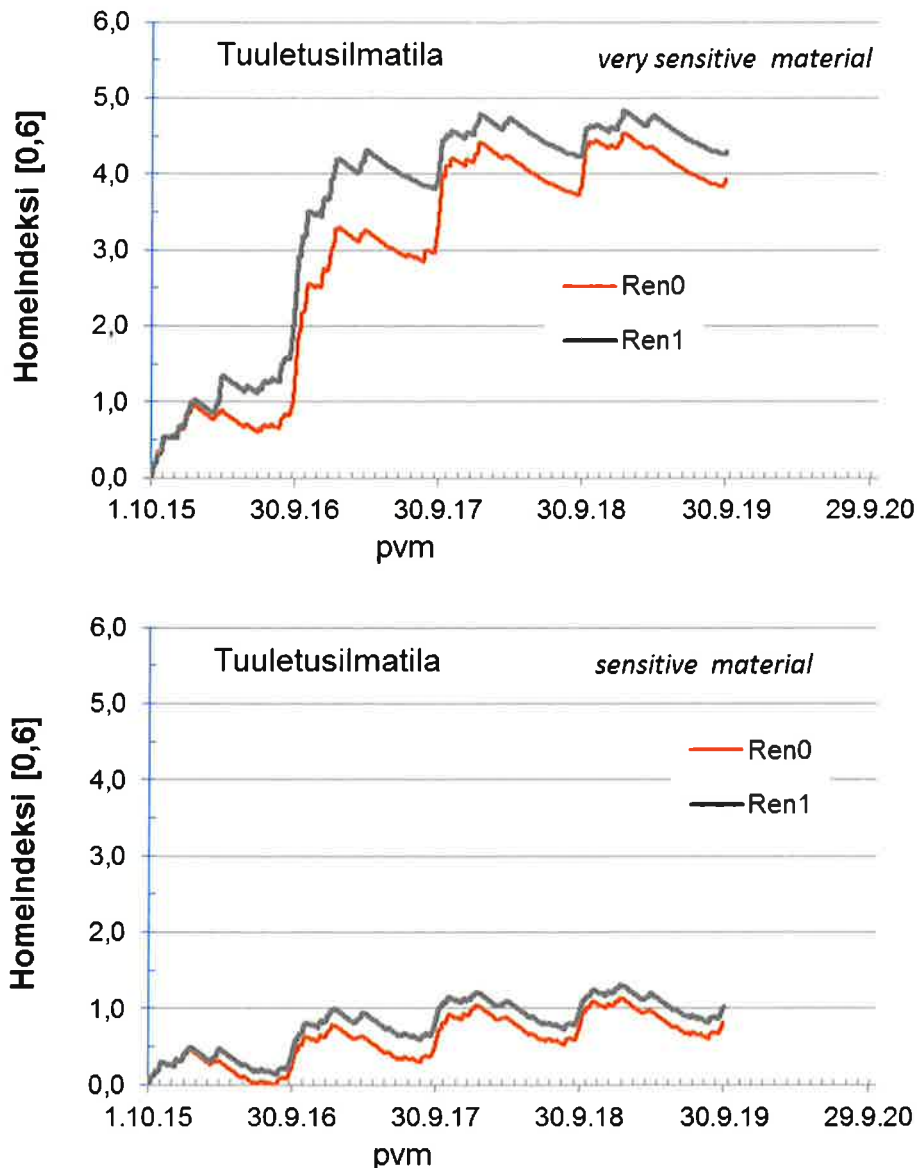
Hygroskooppisten ja ei-hygroskooppisten rakenteiden homehtumisriskin välillä ei ollut eroa, kun tarkasteltiin tuuletustilan olosuhteita. Sisäilman kosteuskuormituksen vaikutus on siten olematon näiden rakennetapausten tuuletusvälin toimivuuden kannalta.

Eräs keino välttää yläpohjarakenteiden liiallinen jäähtyminen ja kosteustasojen kohoamisen aiheuttama homehtumisriskin lisääntyminen on peltikatteen alapuolinen lämmöneristys esimerkiksi kattavalla laudoituksella tmv. kerroksella, joka toisaalta tuo tarvittavan lisäeristystyksen tähän rakennosaan ja voi toimia hygroskooppisena ja termisenä massana tasoittamassa lämpötila- ja kosteusmuutoksia.

Toinen keino välttää homehtumisriskit on käyttää riittävän hyvin homeen kasvua vastustavia materiaaleja.

4.7.2 Case - Yläpohjan vaakaerityksen lisäeristys

Tavoitteena oli selvittää puhalletulla puukuitueristeellä lisäeristetyin yläpohjan vaakaerityksen kosteustekninen toimivuus. Kattorakenne oletettiin pohjoiseen päin 20 astetta kallistetuksi. Alkuperäisessä rakenteessa oli 250 mm mineraalivillaa ja höyrnsulku (ren0). Lisälämmöneristyksessä tämän päälle asennettiin 200 mm puukuitueristettä puhallettuna (ren1). Oletuksena tässä, niin kuin muissakin tarkasteluissa oli, ettei rakenteen läpi ole ilmavuotoja ja höyrin/ilmansulku toimii suunnitellulla tavalla. Rakennedetaljien mahdollisia virheitä ei ole tarkoitus tai mahdollista simuloida. Saadut tulokset tuuletusvälin ja lämmöneristeen yläpinnan laskennalliselle homeindeksille esitetään Kuva 25 ja Kuva 26.



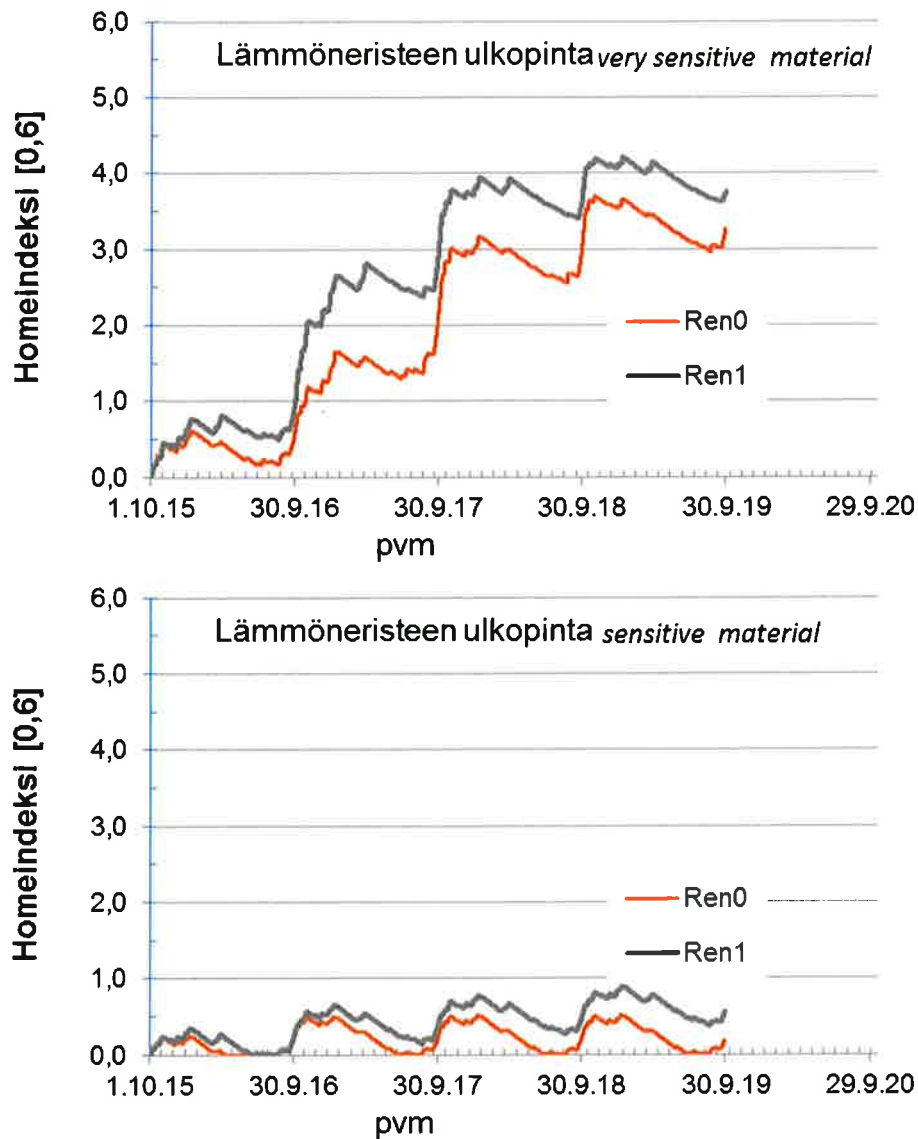
Kuva 25. Alkuperäisen ja lisälämmöneristetyin yläpohjarakenteen tuuletusvälin laskennallinen homeindeksi. Yllä oletuksena homehtumisherkkyysluokka 'erittäin herkkä' ja alla 'herkkä' materiaali.

Lisälämmöneristystason parantuminen toi vain marginaalisen lisäriskin rakenteen toimivuuteen. Edes alkuperäisen yläpohjarakenteen 250 mm mineraalivillaeristeen lämpöhäviöt eivät riittäneet pitämään yläpohjan tuuletustilan lämpötilaa niin korkeana, ettei vastasäteilystä aiheutuva jäähtyminen olisi aiheuttanut laskennallista homeen kasvuriskiä tuuletustilaan, kun sen materiaalien homehtumisherkkyysluokka oli 'erittäin herkkä'. Hyvä

lämmöneristystaso ei siten ollut laskennassa havaitun homehtumisriskin aiheuttaja vaan syyt olivat rakenteen muussa toiminnassa. Homehtumisherkkyyssluokan 'herkkä' materiaaleilla toimivuus on turvallista myös nyt tarkastelluissa tapauksissa.

Suurin riski tarkastelutapauksissa liittyi tässäkin tapauksessa katon peltipinnan jäähtymisen aiheuttamiin lämpötilatasoihin ja sen paikalliseen kosteustasoihin. Toimivuuden kannalta kriittinen kohta oli eristeen yläpinta ja erityisesti tuuletustila.

Puukuitueristeen ja mineraalivillan rajapintaan ei muodostunut kosteuskertymää eikä korkeita kosteuksia. Rajapinnan suhteellinen kosteus oli lyhyen alkukosteuden kuivumisvaiheen jälkeen korkeimmillaan noin 70 % RH, joten se ei ole toimivuuden kannalta riskikohta.



Kuva 26. Alkuperäisen ja lisälämmöneristetyin yläpohjarakenteen lämmöneristeen yläpinnan laskennallinen homeindeksi. Yllä oletuksena homehtumisherkkyyssluokka 'erittäin herkkä' ja alla 'herkkä' materiaali.

4.7.3 Yhteenveto yläpohjarakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta

Tarkastelluissa tapauksissa vesikatteena oli harvalaudoitettu pelti. Pellille asetetut säteilyominaisuudet, 1-dimensioisesta tarkastelusta puuttuva harvan aluslaudituksen ja muiden kantavien rakenneosien terminen ja hygroskooppinen massa johtivat rakenteen korostuneeseen alijäähtymiseen taivaan vastasäteilyn vaikutuksesta. Rakenteiden tuuletus oli asetettu kohtuullisen suureksi, joten sen mukana rakenteeseen pääsi ulkoilman kosteutta, joka piti yllä alijäähtyneiden rakenneosien korkeaa kosteustasoa. Tarkastelun tulokset antavat siten varmuutta sisältävän ja todellista jonkin verran kriittisemmän kuvan rakenteen toimivuudesta. Tarkastelun ensisijaisena tavoitteena oli verrata keskenään hygroskooppisten ja ei-hygroskooppisten rakenteiden kosteusteknistä toimintavarmuutta keveissä kattorakenteissa.

Tarkasteltujen yläpohjien kosteusteknisen toimivuuden kannalta kriittisiä kohtia ovat tuuletustila ja siihen rajoittuvat kerrokset.

Ero hygroskooppisen lämmöneristerakenteen vaikutus (lämmöneristeen tyyppi ja erityisesti rakenteen ilmansulun vesihöyryn läpäisyominaisuudet) näkyi tulosten perusteella vain rakenteen tuulensuojan ulkopinnan oloissa. Tuulensuojan alapuolisessa kerroksessa, tuulensuojaamattoman tapauksen eristeen yläpinnalla tai tuuletustilassa eroa ei ollut. Ero tuulensuojan yläpinnan oloissa näkyi hygroskooppisen rakenteen höyrynsulullista rakennetta nopeampana homeen kasvuna. Molemmissa rakennetapauksissa homehtumisherkkyydeltään *'erittäin herkkä'* materiaali johti homeen kasvun kannalta kriittisiin olosuhteisiin. Tässäkin tapauksessa ero hygroskooppisen ja ei-hygroskooppisen rakenteen toimivuuden välillä oli marginaalinen: Molemmissa tapauksissa homeen kasvuriski oli ilmeinen tehdyillä oletuksilla, vain kasvunopeudessa oli eroa. Ero johtui paitsi rakenteen ilmansulun vesihöyryn läpäisevyydestä, myös hygroskooppisen eristemateriaalin ei-hygroskooppista suuremmasta alkukosteudesta (tasapainokosteus alkutilassa 80 % RH).

Tuulensuojatuiissa rakenteissa tuulensuojan alapuoliset kerrokset olivat turvallisia myös homehtumisherkkyydeltään *'erittäin herkkien'* materiaalien tapauksissa.

Muissa rakenneosissa ja homehtumisherkkyysluokan *'herkkä'* materiaaleilla erot hygroskooppisen ja ei-hygroskooppisen rakenteen välillä olivat marginaaliset. Puukuitueriste tai sen ilmansulun vesihöyrynläpäisevyys eivät aiheuttaneet käytännön kannalta merkittävää homeen kasvun lisääntymistä. Esimerkiksi tuuletusilmatilan tai tuulensuojaamattoman vaakaeristeen ulkopinnan olosuhteet johtivat jokseenkin samoihin laskennallisen homeindeksin arvoihin.

Tarkasteluun valittujen rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen vaikuttivat eniten taivaan vastasäteilyn aiheuttama tuuletustilan jäähtyminen ja tuuletuksen tuoma ulkoilman kosteus. Peltikate jäähtyy taivaan vastasäteilyn vaikutuksesta, mikä jäähdyttää tuuletustiloja ja sen rakenteita ja kasvattaa suhteellisen kosteuden tasoa näissä. Jos alijäähtyminen voidaan estää eristämällä peltikate, voidaan tuuletustilojen olosuhteet pitää ulkoilman oloja vastaavina, eikä tuuletus aiheuta enempää ongelmia kuin seinärakenteissa.

Materiaalin homehtumisherkkyys vaikuttaa merkittävästi homekasvun esiintymiseen. Vaikeissa rakennetapauksissa materiaalivalinta tulee tehdä olosuhteita sietäviksi.

Puukuitueristettä voidaan käyttää mineraalivillaeristeiden päällä yläpohjan lisäeristeenä ilman ongelmia. Puukuitueristeen ja alkuperäisen mineraalivillan rajalle ei muodostunut kosteuskertymää eikä kohonneita kosteuksia. Lisäeristämisenä on aina otettava huomioon rakenteen yleiset toimivuuden edellytykset: Tuuletuksen säilyminen riittävänä, vanhan rakenteen riittävä ilma/höyrytiivisyys, vesikaton ja aluskatteen toimivuus, jne.

Kun yläpohjan lämmöneristeen paksuutta lisättiin alkuperäisestä 250 mm mineraalivillasta 200 mm kerroksella puukuitueristettä, sai lämmöneristeen ulkopinnan homeindeksi

alkuperäisellä rakenteella laskennallisen maksiarvon 3,6 kun se lisäeristetyssä tapauksessa oli 4,1. Tällöin oletuksena oli homeutumisherkkyydeltään 'Erittäin herkkä' materiaali. Ero johtui alkuperäisen rakenteen suuremmista lämpöhäviöistä yläpohjan tuuletustilaan. Edes alkuperäisen rakenteen suhteellisen suuret lämpöhäviöt eivät riittäneet pitämään rakennetta homeen kasvun kannalta turvallisena, kun rakenteen muussa toimivuudessa oli ongelmia. Tässä laskentatapauksessa ongelmana oli kevyen rakenteen korostuneen voimakas jäähtyminen taivaan vastasäteilyn vaikutuksesta.

5. Rakenteiden ja sisäilman vuorovaikutus

Hankkeen tässä osassa selvitettiin sisäilman ja rakenteen kosteusvuorovaikutusta sisäilman suhteellisen kosteuden ja seinän lämpöhäviöiden kannalta. Tarkastelu tehtiin valitulle esimerkkirakenteelle. Tarkastelu pelkistettiin asettamalla askelmuutos sisäilman suhteelliselle kosteudelle tarkastelun alkuhetkellä, kun rakenteen kosteus oli ainakin sisäpinnan viereisiltä osiltaan tasoittunut vastaamaan askelmuutoksen alkutilannetta. Sisäilman kosteuden muutos näkyy kosteusvirtauksena rakenteen ja sisäilman välillä. Kosteusvirtauksen suuruus korreloi sisäilman kosteuden muutoksen kanssa.

Rakenteeseen lauhtuva kosteus lämmittää rakenteen pintaa ja pinnasta haihtuva jäähdyttää sitä. Kun rakennuksen johtumislämpöhäviöiden taserajana käytetään rakenteiden sisäpintaa, näkyy pinnan kosteusmuutos lämpövirrassa sen läpi. Lauhtumistilanteessa lämpöhäviöt pienenevät ja haihtumistilanteessa kasvavat verrattuna tilanteeseen, jossa rakenteen ja sisäilman välillä ei ole kosteusvirtausta.

Tarkasteltavaksi rakenteeksi valittiin seinärakenne US1 (Kuva 12 ja Kuva 27). Sen sisäpinnalle asetettiin perustapauksessa pienin tunnettu käsittelyn tuottama vesihöyrynvastus, $S_d = 0,02$ m, jolloin tilanne kuvaa suurinta realistista rakenteen kosteuskapasiteetin hyödyntämispotentiaalia.



Kuva 27. Tarkastellun rakenteen leikkaus WUFI:sta.

5.1 Sisäilman kosteuden askelmuutos 30 % RH – 60 % RH

Tässä tapauksessa rakenteen lämmöneristekerrosten ja sisäverhouslevyn alkukosteus oli melko kuivaa tilaa vastaava, 30 % RH, ulommat kerrokset olivat 80 % RH alkukosteutta vastaavassa tasapainotilassa. Tarkastelun alussa sisäilman kosteus nousee tasolle 60 % RH

ja pysyy vakiona koko tarkastelujakson ajan. Sisälämpötila on vakion (+20 °C) koko tarkastelun ajan ja ulkoilman olosuhteet ovat Vantaan sää tietoja vastaavat ja laskenta alkoi lokakuun 1:stä päivästä. Tarkastelu tehtiin 10 vuorokauden jaksolle.

Tilanne kuvaa pelkistetysti sisäilman nopeasti muuttuvan kosteuskuormituksen vaikutusta kosteusvirtoihin sekä rakenteen sisäpinnan lämpötilaan ja lämpöhäviöihin rakenteen kautta. Kuvattu tilanne ei edusta todellisia käyttöoloja nopean muutoksen ja sen keston osalta. Käytetyt suhteellisen kosteuden arvot vastaavat kuitenkin käytännössä mahdollisia tasoja. Muutostilanteen jatkuminen antaa kuvan rakenteiden toimivuudesta myös vuorokausisykliä pidemmän jakson aikana.

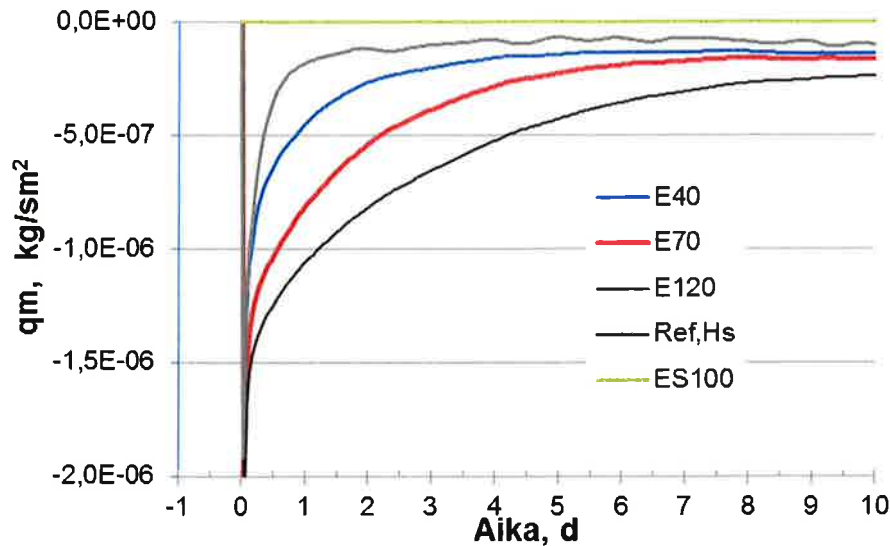
Tarkasteltavana oli seinärakenne US1 (Kuva 12) ja eri tarkastelutapaukset esitetään Taulukko 7. Tapausten avulla selvitettiin lämmöneristeen ja ilman/höyrynsulun sekä sisäpintoituksen vaikutus kosteusvirtoihin ja lämpöhäviöihin rakenteen kautta. Referenssitapauksena oli mineraalivillalämmöneristys (20 kg/m³) sisä- ja ulkopuolen eristysonteloissa (Ref,hs). Muissa tapauksissa rakenteen 350 mm eristeontelossa oli puukuitueristettä (40 kg/m³). Puukuitulämmöneristeen tiheyden vaikutusta selvitettiin käyttämällä sisemmän 48 mm ontelon eristeenä kuvitteellisia 70 kg/m³ ja 120 kg/m³ lämmöneristeitä, joiden kosteuskapasiteetit oletettiin suoraan verrannolliseksi tiheyteen.

Sisäverhouslevyn (kipsilevy 13 mm) pinnoitteena oli pienimmän vesihöyryn kosteudensiirtovastuksen tuottava savimaali, S_d = 0,02 m. Toinen referenssitapaus oli rakenne, jossa lämmöneriste oli puukuitua, ilmansulku X5-tuotetta, mutta sisäpinta oli lähes täysin höyrytiivis, S_d = 0,02 m (ES100).

Taulukko 7. Seinärakenteiden tarkastelutapaukset sisäilman suhteellisen kosteuden askelmuutoksen tapauksessa.

Tunnus	Lämmöneriste	Höyryn/ ilmansulku	Lämmöneriste, sisäpuolen 48 mm tila	Sisäpinnan kosteudensiirtovastus S _d (m)
E40	350 mm puuk.	X5	puukuitu 40 kg/m ³	0,02
E70	350 mm puuk.	X5	puukuitu 70 kg/m ³	0,02
E120	350 mm puuk.	X5	puukuitu 120 kg/m ³	0,02
Ref,hs	350 mm mw	HS	mineraalivilla 20 kg/m ³	0,02
ES100	350 mm puuk.	X5	puukuitu 40 kg/m ³	100

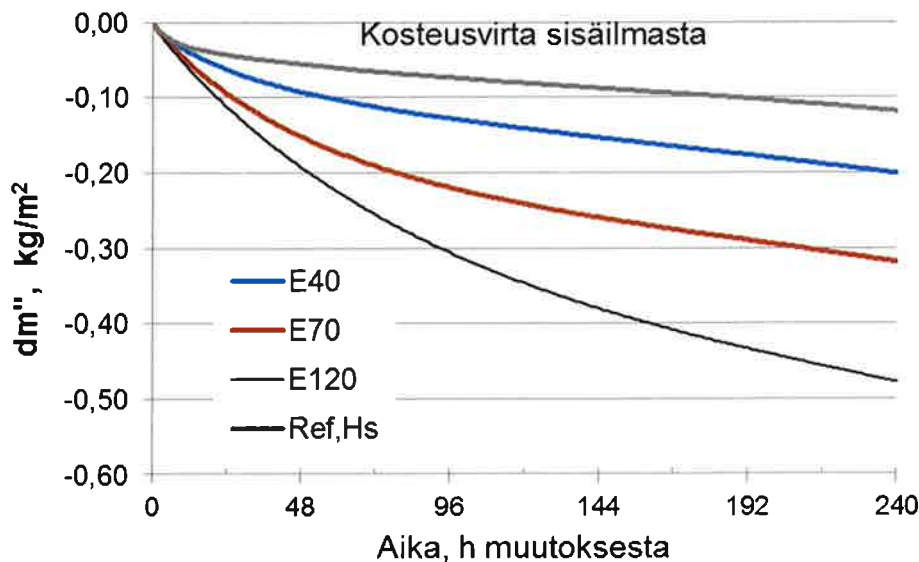
Sisäilman kosteuden noustessa pyrkii kosteus siirtymään vesihöyryn diffuusiona rakenteeseen, jonka tasapainokosteus vastaa alkuperäistä, alempaa suhteellista kosteutta. Kuva 28 esittää kosteusvirrantiheydet sisäilmasta rakenteeseen muutostilanteen jälkeen ja Kuva 29 rakenteeseen siirtyneen kokonaiskosteusmäärän pinta-alayksikköä kohden. Askelmuutos sisäilmassa aiheuttaa voimakkaan huipun kosteudensiirrosta heti muutostilanteessa. Kosteusvirtaus pienentyy tästä ja sen muutos riippuu rakenteen kosteuskapasiteetista ja sisäpuolen kerrosten vesihöyrynläpäisevyydestä.



Kuva 28. Kosteusvirran tiheys rakenteen ja sisäilman välillä askelmuutoksen ($t = 0$) jälkeen. Negatiivinen arvo kuvaa kosteusvirtausta rakenteeseen.

Sisäpinnaltaan höyrytiivissä rakenteessa ei ole kosteusvirtausta rakenteeseen. Ref,hs – tapauksessa kosteusvirtausta on hieman kipsilevyyn ja höyrinsulun sisäpuoliseen mineraalivillaonteloon. Mitä suurempi sisemmän eristeontelon puukuitueristeen tiheys oli, sitä pidempään kosteusvirtaus rakenteen jatkui. Tämä vastaa oletuksia, sillä rakenteen sisempien kerrosten ominaisuuksilla on suurin merkitys kosteusvuorovaikutukseen sisäilman kanssa. Lämmöneristeen vaikutus alkaa näkyä 1 – 2 tuntia muutoksen alusta, ensin kosteus siirtyy kipsilevyyn ja tasoittaa sen kosteuden.

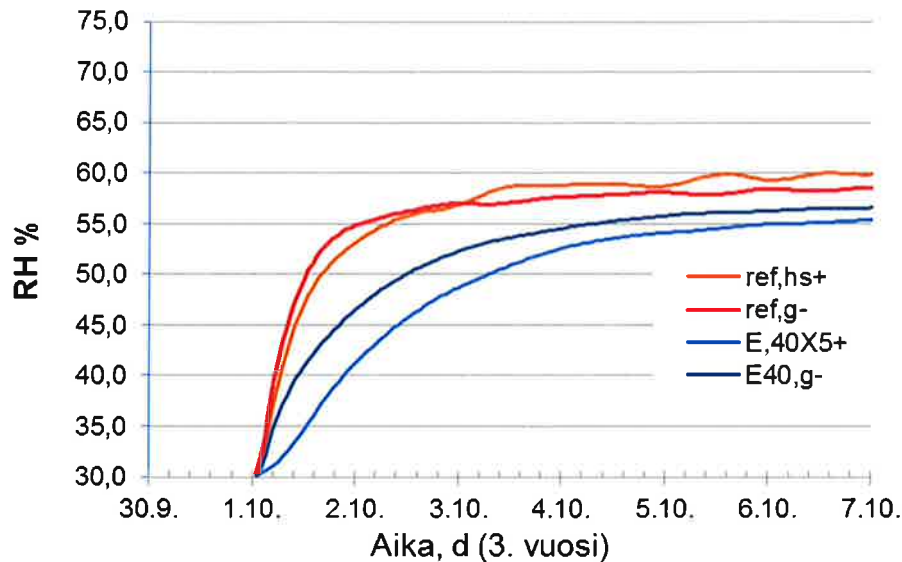
Suurimmat erot näkyvät muutaman vuorokauden kuluttua muutoksen alusta, kun vähemmän hygroskooppisten rakenteiden kosteus on saavuttanut jokseenkin vakiotason ja suuremman kosteuskapasiteetin rakenteissa on edelleen käynnissä kosteuden muutos.



Kuva 29. Sisäilmasta rakenteeseen siirtynyt kosteusmäärä askelmuutoksen alusta.

Kuva 30 havainnollistaa suhteellisen kosteuden muutosta sisemmän lämmöneristeontelon eri puolilla referenssitapauksessa (Ref,hs) ja puukuitueristeen rakenteen perustapauksessa (E40). Pienemmän kosteuskapasiteetin tapauksessa kosteudet tasoittuvat nopeasti lähelle

lopullista tilannetta. Vaihtelu johtuu ulkoilman lämpötilan vaihteluista, mikä näkyy rakenteen lämpötiloissa ja vastaavasti tasapainokosteuden arvoissa.



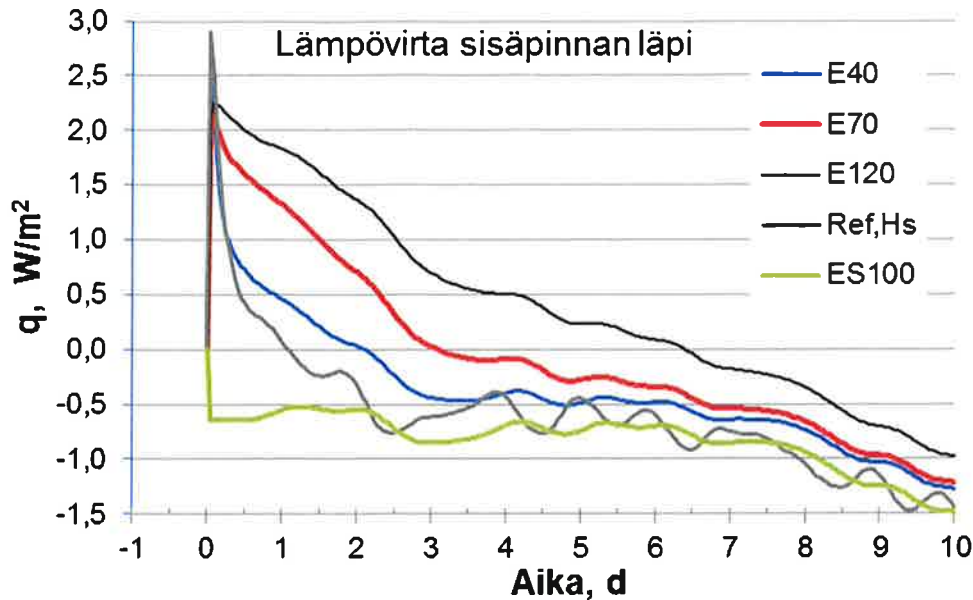
Kuva 30. Suhteellisen kosteuden muutos sisäverhouslevyn takana (g-) ja ilmansulun sisäpinnassa (X5+ ja hs+) kahdessa eri rakennetapauksessa: hygroskooppisesti avoin puukuitueristetty rakenne (E40) ja höyrynsulullinen mineraalivillaeristeinen rakenne (ref,hs).

Kun kosteus siirtyy sisäilmasta diffuusiona seinään ja lauhtuu siinä, lämpenee rakenteen pintakerros. Rakenteen sisäpinnan kautta tapahtuvat johtumislämpöhäviöt kuvaavat rakenteen lämpöteknistä toimintaa. Kun rakenne lämpenee, sen lämpöhäviöt pienenevät lämmitystilanteessa. Kuva 31 esittää laskennallisesti ratkaistut lämpövirrantiheydet [W/m^2] rakenteen sisäpinnan taserajan läpi ja Kuva 32 johtumislämpöhäviöt 10 vuorokauden tarkastelujakson aikana [kWh/m^2].

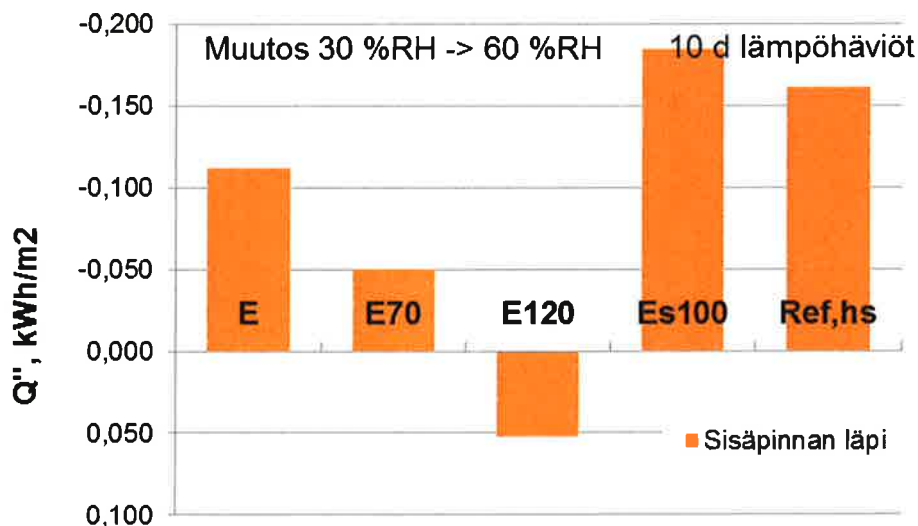
Kun rakenteeseen siirtyi sisäilmasta merkittävästi kosteutta, aiheutti kosteuden lauhtuminen lämpöhäviöiden muuttumisen lämpövirraksi rakenteesta sisäilmaan. Lämpövirta sisäänpäin jatkui siihen saakka kunnes lauhtuvan kosteuden tuoma lämpövirta oli pienempi kuin rakenteen johtumislämpöhäviöt.

Sisäpinnaltaan höyrytiivin rakenteen tapauksessa kosteuden vaikutus lämpöhäviöihin oli merkityksetön. Höyrynsulullisen Ref,hs –rakenteen tapauksessa lämpövirrantiheys muuttui negatiiviseksi (lämpöhäviöiksi) noin 1 vrk:n kuluttua muutoksesta ja puukuitueristeen perustapauksessa noin 2 vrk:n kuluttua. Suurimman tiheyden puukuitueristeellä (tapaus E120), lämpövirran suunta oli rakenteesta sisäilmaan noin 6,5 vrk:n ajan.

Tarkastellun 10 vrk:n lasketut johtumislämpöhäviöt (Kuva 32) olivat sisäpuoliselta kosteudelta suljetun rakenteen tapauksessa noin $-0,18 kWh/m^2$, Ref,hs-tapauksessa noin $-0,16 kWh/m^2$, puukuitueristeen perustapauksessa E40 noin $-0,11 kWh/m^2$ ja korkeimman kosteuskapasiteetin tapauksessa E120 seinästä tuli sisäilmaan jakson aikana lämpömäärä $+0,05 kWh/m^2$.

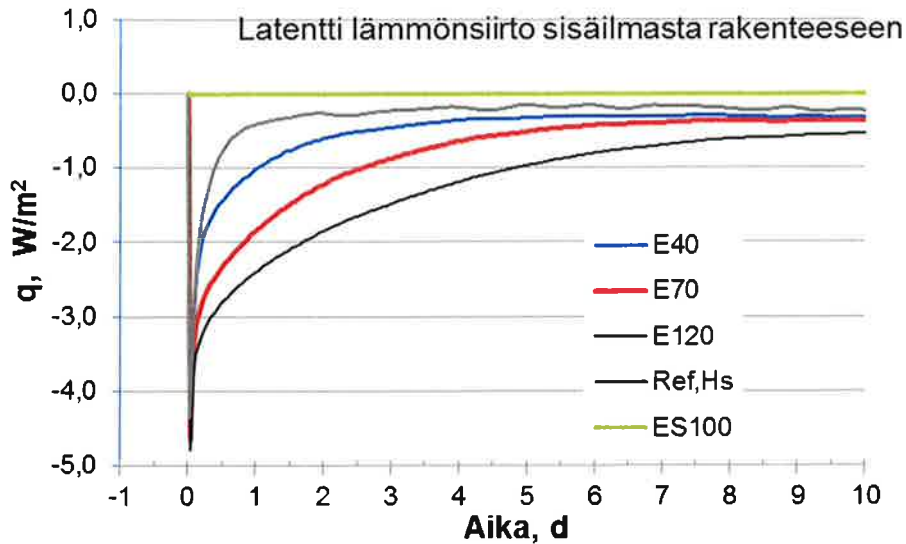


Kuva 31. Johtumislämpövirta sisäpinnan läpi. Tarkastelun alku 1. lokakuuta.

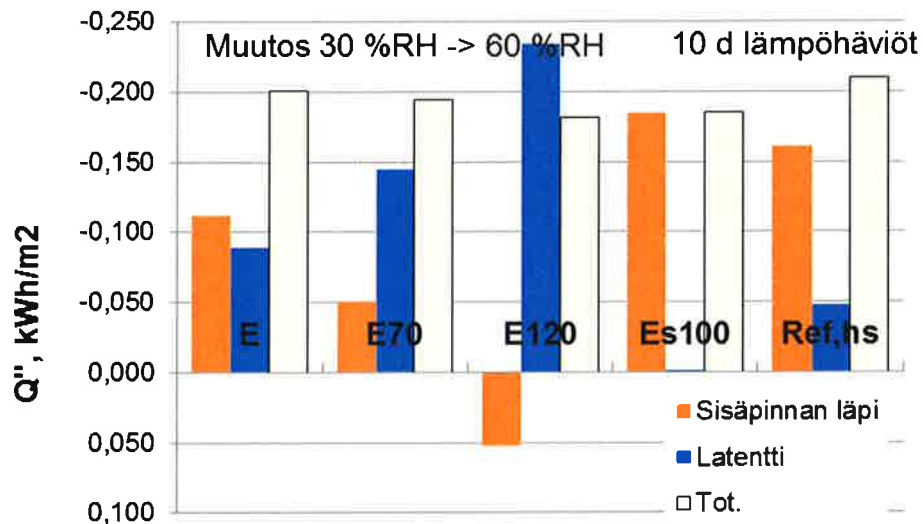


Kuva 32. Johtumishäviöt rakenteiden läpi sisäilman suhteellisen kosteuden askelmuutoksen (30 % RH -> 60 % RH) jälkeen 10 vuorokauden tarkastelujakson aikana.

Johtumislämpöhäviöiden muutos johtuu sisäilman kosteuden lauhtumisesta rakenteeseen. Kuva 33 esittää kosteusvirran tiheyden perusteella laskettua lämpövirtaa ja Kuva 34 esitetään eriteltynä tarkastelujakson johtumis-, latentti- ja kokonaislämpömäärät. Vaikka johtumishäviöt pienenevät olennaisesti, on huoneilman kokonaislämpötase jokseenkin sama eri tapauksissa. Tässä siis hyödynnetään huoneilman ylimääräisiä kosteuskuormia, joiden avulla voidaan pienentää johtumislämpöhäviöitä sisäilman muutostilanteessa. Hyödynnettävä lämpöenergia saadaan sisäilman ylimääräisestä kosteudesta ja sen tasoittaminen kosteuskuormituksen aikana voi lisäksi parantaa sisäilman olosuhteita.



Kuva 33. Latentti lämmönsiirto sisäilmasta rakenteeseen.



Kuva 34. Lämpöhäviöt 10 vuorokauden aikana sisäilman suhteellisen kosteuden askelmuutoksen (30 % RH -> 60 % RH) jälkeen. Johtumishäviöt seinärakenteen läpi, rakenteeseen sisäilmasta siirtyneen kosteuden faasimuutoksen aiheuttama latentti lämmönsiirto sekä näiden summa eri rakennetapauksissa.

Ilmiön hyödynnettävyys riippuu siitä kuinka paljon tai usein ylimääräistä kosteutta on saatavilla ja mihin kosteustasoon rakenteen sisäkerrokset ovat tasoittuneet kuormitusta ennen. Lisäksi rakenteisiin sitoutunut kosteus pyrkii poistumaan niistä ainakin osittain takaisin sisäilmaan. Toisaalta tämä tasoittaa sisäilman kosteutta, jolloin olosuhteet pysyvät tasaisempina ja todennäköisesti viihtyisämpiä kuin ei-hygroskooppisissa tapauksissa. Samalla rakenteesta sisäilmaan siirtyvä kosteus sitoo lämpöä höyrystyessään materiaaleihin sitoutuneesta ilman vesihöyryksi. Tämä ilmiö kasvattaa rakenteen johtumislämpöhäviöitä, mitä havainnollistetaan seuraavassa askelmuutostarkastelussa, jossa muutos sisäilmassa tapahtuu kuivaan suuntaan.

5.2 Sisäilman kosteuden askelmuutos 60 % RH – 30 % RH

Tässä tapauksessa rakenteen lämmöneristekerrosten ja sisäverhouslevyn alkukosteus oli kauttaaltaan noin 60 % RH ja alkuhetkellä sisäilman suhteellinen kosteus muuttuu 30 % RH tasolle. Tarkastelu vastaa muuten edellistä askelmuutostarkastelua, jossa muutoksen suunta oli toinen.

Edellisen askelmuutostarkastelun tapausten lisäksi selvitettiin tarkemmin sisäpinnan vesihöyrynvastuksen vaikutusta kosteusvirtaan rakenteen ja sisäilman välillä. Lisätarkastelut esitetään Taulukko 8.

Taulukko 8. Seinärakenteiden tarkastelun lisätapaukset sisäilman suhteellisen kosteuden askelmuutoksessa. Tapauksessa Ec ei ollut faasimuutoslämpöä numeerisessa ratkaisussa.

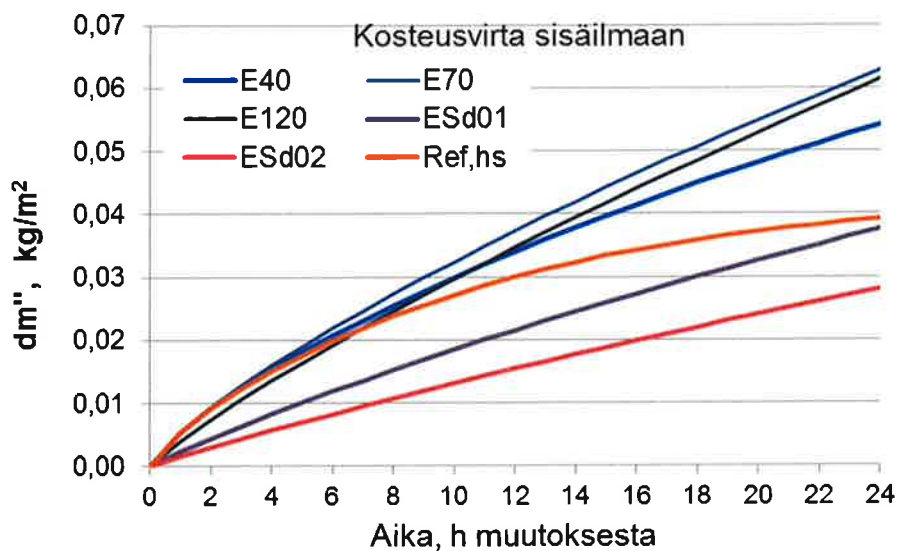
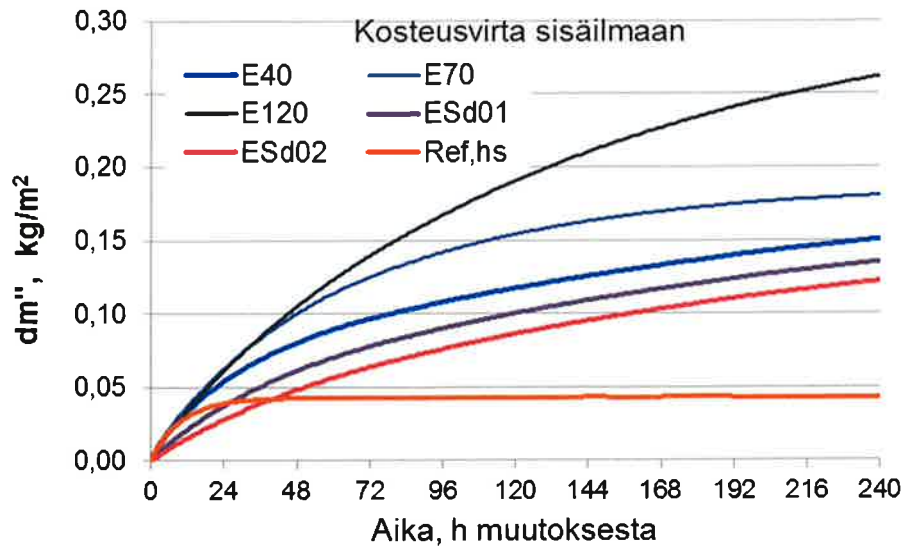
Tunnus	Lämmöneriste	Höyryn/ ilmansulku	Lämmöneriste, sisäpuolen 48 mm tila	Sisäpinnan kosteudensiirtovastus S_d (m)
ESd01	350 mm puuk.	X5	puukuitu 40 kg/m ³	0,10
ESd02	350 mm puuk.	X5	puukuitu 40 kg/m ³	0,20
Ec	350 mm puuk.	X5	puukuitu 40 kg/m ³	0,02

Kuva 35 esittää rakenteesta sisäilmaan kertyneen kosteusvirran kokonaismäärän eri rakennetapauksissa koko 10 vrk:n tarkastelujakson aikana ja sen ensimmäisten 24 h aikana. Kun sisäverhouksen pinnan kosteudensiirtovastus kasvaa, näkyy sen vaikutus erityisesti kosteudensiirron alkuvaiheessa. Pintavastuksen $S_d = 0,1$ m tapauksessa kosteusmäärä ylitti referenssirakenteesta (Ref,hs) siirtyneen kosteusmäärän noin 28 h kuluttua muutostilanteen alusta ja tapauksessa $S_d = 0,2$ m kului vastaavan tason saavuttamiseen aikaa noin 40 tuntia.

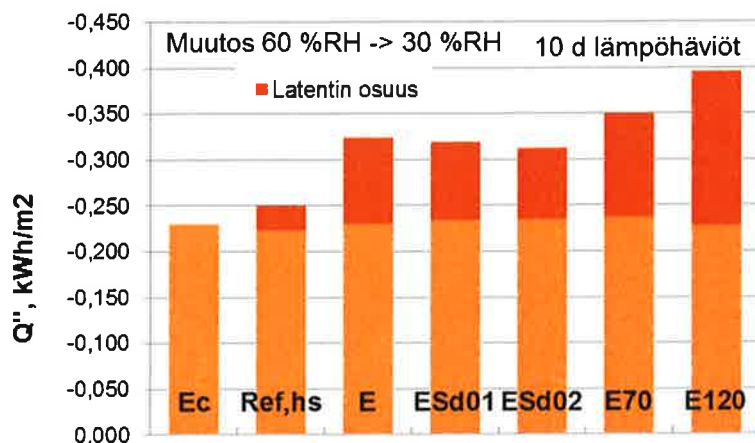
Pinnan kosteudensiirtovastuksen merkitys on ratkaiseva kosteuskapasiteetin hyödyntämisen kannalta. Tavoitteena on mahdollisimman pieni vastus, jotta kapasiteettia voidaan hyödyntää tehokkaasti. Vastuksen kasvaessa kosteusvirta pienenee ja jakautuu pidemmälle ajalle.

Kuva 36 esittää 10 vrk:n tarkastelujakson johtumislämpöhäviöt rakenteen sisäpinnan läpi. Diagrammissa on eroteltu latentin lämmönsiirron aiheuttama lisä johtumishäviöihin. Johtumislämpöhäviöt sisäpinnan läpi kasvavat, kun kosteudensiirto rakenteesta sisäilmaan kasvaa. 10 vrk:n jakson aikana sisäpinnan kosteudensiirtokertoimen vaikutus tasoittui verrattuna eri tapausten välisiin eroihin alkuvaiheen kosteudensiirrosta.

Vastaavasti latentti lämmönsiirto kasvattaa sisäilman entalpiaa sinne tulleen vesihöyryyn latentin lämmön osalta.



Kuva 35. Kosteusvirrantiheydet rakenteesta sisäilmaan eri tapauksissa sisäilman askelmuutoksen 60 % RH -> 30 % RH jälkeen. Yllä koko 10 vrk:n jakso ja alla ensimmäisten 24 h jakso.



Kuva 36. Johtumislämpöhäviöt rakenteen sisäpinnan läpi 10 vrk:n tarkastelujakson aikana sisäilman kosteuden askelmuutoksen (60 % RH – 30 % RH) jälkeen. Latentin lämmönsiirron vaikutuksen osuus on eritelty johtumislämpöhäviöistä.

5.2.1 Kosteusvuorovaikutuksen tehostaminen sisäilman tuuletuksella

Tavoitteena oli selvittää, miten sisäilman tuuletusvirtaus rakenteen sisäpuolen 48 mm eristeontelossa voisi tehostaa sisäilman ja rakenteen kosteusvuorovaikutusta. Tätä varten tarkasteltiin kahta tapausta, joissa molemmissa oli 40 kg/m^3 puukuitueriste sisäpuolen 48 mm tilassa (Taulukko 9). Tässä tarkasteltiin samaa askelmuutosta (60 % Rh \rightarrow 30 % RH) kuin edellisessä kohdassa.

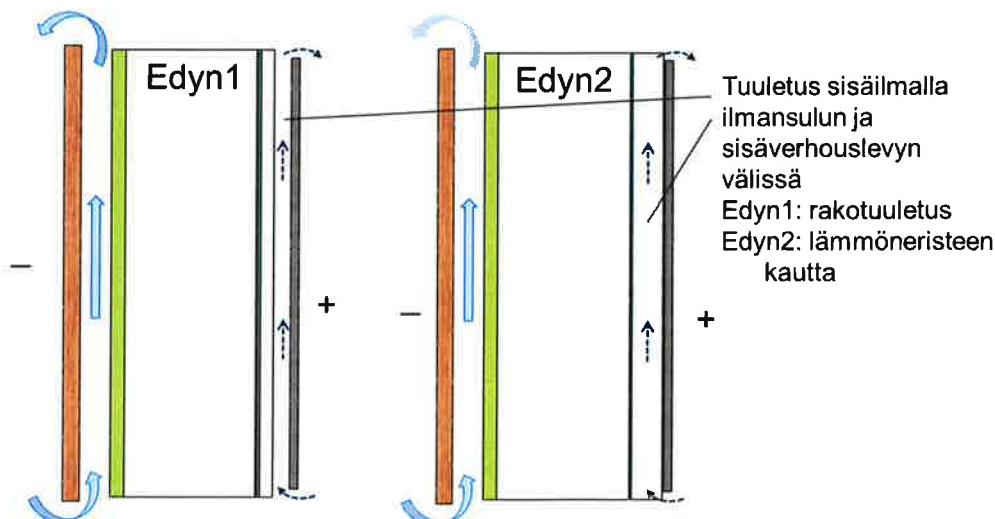
Kuva 37 esittää rakenteiden sisäilman tuuletuksen periaatteet. Tarkastellut tapaukset ovat pelkistettyjä, esimerkiksi lämmöneristeen ja ilmavirtauksen välistä suojausta ei ole esitetty. Tarkoituksena oli arvioida vain kosteuskapasiteetin dynaamisen hyödyntämisen potentiaaleja.

Toisessa tapauksessa (Edyn1) sisäverhouslevyn sisäpinnan vesihöyrynvastus oli $S_d = 0,2 \text{ m}$ ja sisäilman oletettiin virtaavan 20 mm ilmaraossa ilmanvaihtokertoimella 15 1/h. Puukuitueristettä oli 28 mm paksuinen kerros ontelon ulkopinnalla ja ilmarako oli tämän eristekerroksen ja kipsilevyn välissä. Ilmanvaihtokerroin vastaa seinäkorkeudella 2,5 m virtausnopeutta noin 1 cm/s, mikä on hyvin saavutettavissa raossa pienilläkin lämpötilaeroilla.

Toisessa tapauksessa sisäverhouksen pintavastus oli $S_d = 0,02 \text{ m}$ ja rakennetta tuulettava sisäilman virtaus tapahtui suotautumalla 48 mm paksun eristekerroksen läpi ilmanvaihtokertoimen ollessa 10 1/h. Tämä vastaa ilman virtausnopeutta noin 7 mm/s lämmöneristeen läpi.

Taulukko 9. Dynaamisten, sisäilmalla tuulettujen seinärakenteiden lisätapaukset sisäilman suhteellisen kosteuden askelmuutoksessa. Molemmissa tapauksissa 40 kg/m^3 puukuitueriste sisäpuolen 48 mm tilassa.

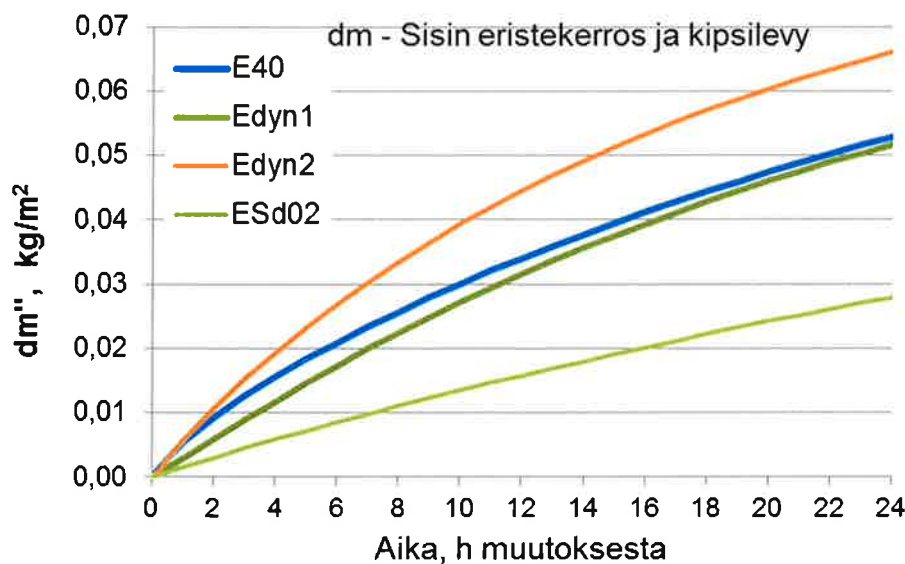
Tunnus	Lämmöneriste	Höyryn/ ilmansulku	Sisäilman kierto rakenteen 48 mm eristetilassa	Sisäpinnan kosteudensiirtovastus S_d (m)
Edyn1	350 mm puuk.	X5	20 mm rako, $n = 15 \text{ 1/h}$	0,20
Edyn2	350 mm puuk.	X5	48 mm eristetilassa ilmanvaihto 10 1/h	0,02



Kuva 37. Rakenteiden ilmansulun sisäpuolisen eristeontelon tuuletus sisäilmalla kahdessa tarkastelutapauksessa.

Kuva 38 esittää tuuletettujen rakenteiden ja niiden vertailurakenteiden tulokset. Tulokset esittävät sisimmän lämmöneristekerroksen ja kipsilevyn kosteustason muutoksen (kosteudensiirto sisäilmaan) ensimmäisen 24 tunnin aikana muutoksesta. Tulosten perusteella tuuletus sisäilmalla tehostaa kosteudensiirtoa sisäilmaan. Sisäverhouslevyn pintavastuksen $S_d=0,2$ m tapauksessa tuuletus tehosti kosteudensiirtoa jokseenkin samalle tasolle kuin se oli $S_d=0,02$ m pintavastuksen tapauksessa ilman sisäilmatuuletusta. Kun ilmavirtaus huuhteli koko lämmöneristekerrosta (Edyn2) ja pintavastus oli $S_d = 0,02$ m, tehostui kosteudensiirto edelleen.

Sisäpuolisen tuuletuksen käyttö rakenteiden ja sisäilman kosteusvuorovaikutuksen tehostamisessa voi olla merkittävä tekijä. Sen toimivuuden selvitys, vaikutuksen maksimointi ja käytännön ratkaisujen esittäminen edellyttää lisäselvityksiä.



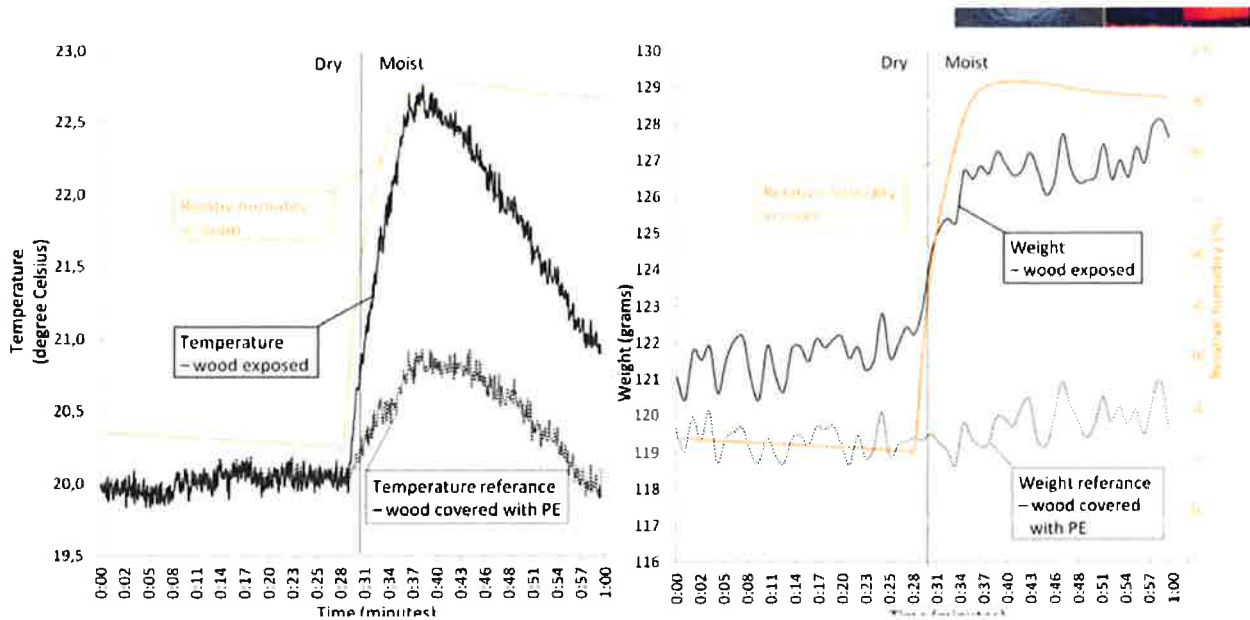
Kuva 38. Sisäpuolen 48 mm eristetilan ja sisäverhouskipsilevyn kosteuden muutos ensimmäisen 24 h aikana muutoksesta kahdessa dynaamisessa tapauksessa ja niiden vertailutapauksissa.

5.2.2 Pintalämpötilojen muutos kokeiden perusteella

Laskennallisissa tarkasteluissa käytetyillä rakenteilla ja olosuhteilla saatiin askelmuutostilanteessa laskennallisesti pintalämpötilan ja sisäilman lämpötilaeroksi noin $0,3$ – $0,4$ °C vesihöyryn lauhtuessa rakenteeseen. Nore /25/ on kuitenkin mitannut laboratorio-oloissa huomattavasti tätä suurempia lämpötilaeroja. Suhteellisen kosteuden muuttuessa noin 20 % RH tilasta noin 90 % RH tilaan, saattoi puupaneeliin absorboitua kosteus nostaa paneelin pintalämpötilaa runsaat $2,5$ °C (Kuva 39). Tosin mittausaika oli lyhyt, huipputaso saavutettiin noin kuudessa minuutissa muutoksen alusta. Laskennassa käytetty aika-askel oli tunnin pituinen, joten laskennallisia tarkasteluja olisi syytä tehdä lyhyillekin muutosjaksoille.

Tulos kuvaa, että ilmiö on nopea ja voimakas. Sillä voidaan vaikuttaa nopeasti sisäilman olosuhteisiin, kun rakenteen pintalämpötila kohoaa kosteuskuorman vaikutuksesta nopeasti. Noren esittämä ajatus on säästää kylpyhuoneen lämmityksessä: Suihkutilanteessa hygroskooppiset seinäpinnat lämpenevät nopeasti, mikä tuntuu heti lämpöviihiyysydessä. Kylpyhuoneen ilman lämpötila voisi siten olla nykyistä alempi. Kun kosteuskuormien vaikutuksesta seinien pintalämpötila nousee kuormituksen ajaksi, pysyy koettu sisäilman termien viihtyisyys hyvänä. Kylpyhuoneiden nykyistä alempi asetustilalämpötila toisi

lämmitysenergian säästöjä. Tämä on eräs jatkoselvitystä edellyttävä asia myös puukuitueristerakenteiden sovellutuksissa.



Kuva 39. Kokeellisesti määritetty pintalämpötilan muutos puupaneelin sisäpinnalla kun sisäilman kosteuden muuttuu noin 20 % RH tilasta 90 %:iin RH /25/.

5.3 Yhteenvedo kosteusvuorovaikutuksesta

Kosteudensiirrolla rakenteen ja sisäilman välillä on aiempien selvitysten perusteella huomattava merkitys sisäilman kosteuteen ja sen viihtyisyyteen. Lisäksi kosteudensiirto voi muuttaa merkittävästi rakenteen johtumislämpöhäviötä dynaamisen tilanteen aikana.

Sisäilmavuorovaikutukset korostuvat hyvin lämmöneristetyillä rakenteilla, joilla lämpötila- ja vesihöyryn osapainegradientit ovat tyypillisesti pienempiä kuin heikommin eristetyillä. Tällöin pienetkin muutokset rakenteen sisäpinnan viereisten kerrosten kosteus- tai lämpötilatasoissa voivat vaikuttaa kosteus- ja lämpövirtoihin rakenteen ja sisäilman välillä ja jopa kääntää virran suunnan toiseksi. Samasta syystä hyvin eristettyjen rakenteiden hygroskooppisesti aktiivinen kerros voi olla heikommin eristettyä suurempi.

Aiempien tutkimusten mukaan hygroskooppisilla rakenteilla voidaan pienentää kuormitustilanteen aiheuttamia sisäilman suhteellisen kosteuden vaihteluita merkittävästi: Vuorokauden aikainen kuormitustilanteen nousu oli laskennan ja kenttäkokeiden perusteella hygroskooppisten rakenteiden huonetilassa korkeimmillaan noin 15 % RH, kun se vastaavissa oloissa ei-hygroskooppisilla rakenteilla oli 30 % RH. Tasaiset olosuhteet ja sisäilman hyvin matalien ja korkeiden suhteellisten kosteuksien esiintymisen rajoittaminen parantaa sisäilman termistä viihtyisyyttä, sen koettua laatua ja terveyteen vaikuttavia tekijöitä.

Rakenteeseen lauhtuva kosteus nostaa rakenteen sisäpinnan lämpötilaa ja vastaavasti pienentää johtumishäviötä rakenteen läpi. Lämpövirran suunta voi jopa muuttua päinvastaiseksi voimakkaiden kosteuden muutostilanteiden vaikutuksesta. Tällöin rakenteen pintalämpötila voi olla huoneilman lämpötilaa korkeampi, jolloin lämpöhäviöt pinnan läpi

kääntyvät lämpövirraksi sisäilmaan päin. Latentin lämmönsiirron vaikutusaika riippuu kosteudensiirron voimakkuudesta ja kestosta.

Tarkastellussa sisäilman suhteellisen kosteuden askelmuutostilanteessa (30 % RH alkutilasta 60 % RH tilaan) tavanomainen puukuitueristeinen rakenne johti lämpöä sisäilmaan lokakuun alun tarkastelujakson aikana noin kahden vuorokauden ajan muutostilanteesta. Kasvattamalla sisäilman puoleisen eristekerroksen hygroskooppista massaa kasvoi lämmön johtuminen sisäilmaan yli kuuden vuorokauden mittaiseksi jaksoksi. Edellytyksenä oli jatkuva sisäilman korkea kosteus muutostilanteesta alkaen ja hyödynnettävissä oleva rakenteen hygroskooppinen massa. Vaikutuksen suuruus ja pituus riippuu myös ulkoilman oloista ja rakenteen U-arvosta.

Kun rakenteen kosteus siirtyy sisäilmaan kasvavat johtumislämpöhäviöt rakenteen läpi. Koska rakenne on vuositasolla jokseenkin vakiokosteudessa, on kosteusvirtausten vaikutus lämpöhäviöihin vuositasolla periaatteessa pieni, koska rakenteen ja sisäilman väliset lauhtuvat ja haihtuvat kosteusvirtaukset kumoavat toistensa vaikutuksia. Sisäilman kosteuskuormien hyödyntäminen oikea-aikaisesti lämpöhäviöiden pienentämiseen voi kuitenkin tuoda huomattavia etuja hygroskooppisten rakenteiden lämpötekniseen toimintaan. Tämä edellyttää sisäilman kuormitusten, ilmanvaihdon ja rakenteiden keskinäisen toimivuuden hallintaa ja sen tarkempi arviointi vaatii tätä tutkimusta laajempia lisäselvityksiä eri ilmastoissa.

Rakenteiden tuuletus sisäilmalla voi tehostaa merkittävästi dynaamisten rakenteiden toimintaa ja se voi olla eräs ratkaisu, jolla voidaan ainakin osittain poistaa rakenteiden pintakäsittelyn kosteudensiirtovastuksen aiheuttama kosteudensiirron dynaamisen toimivuuden vaimentuminen. Toinen tapa on sellaisten uusien pinnoitesovellutusten käyttö, jotka mahdollistavat vesihöyryn vapaan siirtymisen pinnan läpi samalla kun niiden muut ominaisuudet vastaavat mm. puhdistettavuuteen ja ulkonäköön liittyviä vaatimuksia.

6. Jatkoselvitysten tarve - hankkeen sisällön hahmottelu

Tämän selvityksen perusteella puukuitulämmöneristeiden käyttö niille soveltuvien rakenneratkaisujen yhteydessä voi tuoda merkittäviä etuja rakenteiden kosteustekniseen käyttäytymiseen. Olemassa oleva tieto ja nyt tehdyt laskennalliset selvitykset joillekin tapauksille antavat käsityksen hyödyntämispotentiaaleista. Rakennesovellutusten toimivuuden tarkka selvittäminen ja eri tekijöiden mitoitus optimaalisen toimivuuden varmistamiseksi edellyttää lisätarkasteluja numeerisesti ja mahdollisesti kokeellisesti sekä pilot-kohteiden toimivuuden monitorointia.

Selvityksen perusteella voidaan tunnistaa erilaisia tutkimusaiheita, jotka soveltuisivat puukuitueristeen sovellutusten tutkimukseen Euroopan alueella. Nämä on seuraavassa esitetty jaoteltuina aihealueiden perusteella.

1) Rakenteiden ja sisäilman vuorovaikutus – Sisäilman viihtyisyyden parantaminen

Olemassa olevaa tietoa voidaan soveltaa eri ilmasto-oloissa ottaen huomioon niille tyypilliset sisäilman lämpötilan hallinnan ja ilmanvaihdon/tuuletuksen käytännöt. Tavoitteena on osoittaa hygroskooppisten rakennesovellutusten vaikutukset sisäilman viihtyisyyteen sekä kehittää ja esittää eri olosuhteissa parhaiten toimivia sovellutuksia.

2) Rakenteiden ja sisäilman vuorovaikutus – Rakenteiden lämpötilamuutokset ja lämpöhäviöiden pienentäminen

Rakenteiden ja sisäilman välinen kosteudensiirto ja sen faasimuutokset voivat olennaisesti vaikuttaa rakenteen lämpötilakenttään ja lämpövirtoihin sen läpi. Oikea-aikainen kosteus- ja lämpödynamiikan hyödyntäminen voi auttaa sisäilman termisten viihtyisyysolojen ja rakenteiden lämpöhäviöiden hallinnassa. Mahdollisuutena on soveltaa ilmiötä eri ilmasto-oloissa. Lisäksi tarkennetaan nopeissa dynaamisissa tilanteissa esiintyviä kosteus- ja lämpövirtauksia ja arvioidaan niiden hyödyntämismahdollisuuksia.

3) Rakenteiden kosteustekninen toimintavarmuus eri ilmasto-oloissa

Selvitetään puukuitueristerakenteiden kosteusteknisen toimivuuden perusteet ja edut eri ilmasto-oloissa: Keski- ja Etelä-Eurooppa sekä erilaiset sisäilman dynaamiset kosteuskuormitukset.

4) Uudet puukuituiset lämmöneristystuotteet

Arvioidaan puukuituisten tuotteiden ominaisuuksien merkitystä mm. kosteusteknisen toimivuuden kannalta. Esimerkiksi suuren kosteuskapasiteetin tuotteet, niiden muut hyödyt (akustiikka, väliseinärakenteet, jne.).

5) Kokeellinen vertailu eri lämmöneristerakenteiden kesken

Vahvistetaan kokeellisesti puukuitueristerakenteiden toimivuus ja edut ei-hygroskooppiin tuotteisiin verrattuna. Esimerkiksi hot-box –mittaukset hallituissa, todellista tilannetta vastaavissa. Mahdolliset konvektion vaikutukset lämpöhäviöihin.

Edellä esitetyistä viidestä teemasta tullaan kokoamaan ja tarkentamaan hankesuunnitelma eurooppalaiseksi tutkimushankkeeksi. Hanke voi olla eri vaiheissa toteutettava, mitä tarkennetaan valmisteluvaiheessa.

Muita mahdollisia teemoja, jotka eivät ole ensisijaisia kiinnostuksen kohteita eurooppalaisten sovellutusten tai pelkästään lämmöneristevalmistajan kannalta:

- Ilmanvaihdon ja dynaamisten rakenteiden toiminnan yhteensovittaminen viihtyisyyden ja energiatehokkuuden kannalta
- Yläpohjan lisälämmöneristys – vaatimukset vanhalle rakenteelle
- Yläpohjan rakenteet – vastasäteilyn vaimentaminen

7. Yhteenveto

Selvityksessä tarkasteltiin puukuitueristeisten rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden perusteita ja analysoitiin laskennallisesti muutamien esimerkkirakenteiden toimintaa käyttäen kriteerinä homeen kasvun arviointimenetelmää.

Verrattaessa hygroskooppien puukuitueristeiden ja ei-hygroskooppien ilmatäytteisten kuitueristeiden toimintaa, ei näiden välillä ole juurikaan eroa rakenteiden kosteusteknisen toimintavarmuuden kannalta Suomen ilmastossa ja kuivien asuintilojen aiheuttamien kosteusrasitusten kannalta. Rakennesovellutuksissa merkittävin ero on siinä, että puukuitueristeisissä rakenteissa höyrynsulku on usein korvattu paremmin vesihöyryn diffuusiota läpäisevällä ilmansulkutuotteella. Näiden vesihöyrynvastus voi olla hyvinkin pieni (X5-tyyppisellä ilmansulkutuotteella $S_d = 0,7$ m tai se voi olla suhteellisen kosteustason mukaan muuttuva, kuten Intello -tuotteella.

Seinärakenteilla kosteustekninen toimivuus oli kaikissa tapauksissa turvallinen, kun sadevettä ei päässyt tunkeutumaan rakenteen sisään. Tällöin numeerisesti arvioitu homeen kasvu ei ole mahdollinen edes herkimmän homehtumislukon tapauksessa, mikä vastaa männyn pintapuun homehtumisherkkyyttä.

Jos rakenteen lämmöneristekerrokseen tunkeutuu vettä 1 %:n osuus seinään kohdistuvasta viistosateesta, kasvaa tuulensuojan sisäpuolisten rakenneosien homehtumisriski. Kaikissa rakennetapauksissa sateen tunkeutuminen rakenteeseen aiheutti jonkinasteisen homehtumisriskin, kun tuulensuojan sisäpinnalla oli herkimmän homehtumislukon (*erittäin herkkä*) materiaaleja. Tässä tapauksessa hyvin vesihöyryä läpäisevän ilmansulun vaikutus näkyi homekasvua voimistavana tekijänä verrattuna höyrynsululliseen rakenteeseen. Myös lämmöneristeen määrä vaikutti toimivuuteen, kun tuulensuojana oli hyvin lämpöä eristävä ja kosteutta läpäisevä huokoinen kuitulevy. Tässä tapauksessa heikompi lämmöneristys paransi kuivumista ja hidasti homeen kasvua, mutta ei kuitenkaan tehnyt rakenteesta toimivaa näissä oloissa. Kipsilevytuulensuojan rakenteissa oli suurimmat homeenkasvuriskit eikä lämmöneristeen paksuus vaikuttanut tähän.

Yläpohjassa toimivuuden haasteena on tuuletustilan ilman jäähtyminen taivaan vastasäteilyn vaikutuksesta silloin, kun vesikate ja sitä tukevat kerrokset eivät estä lämmönsiirtoa kattoon ja muiden rakenteiden välillä. Kun rakenteissa oli homehtumisen suhteen erittäin herkkiä materiaaleja (männyn pintapuu), oli kaikissa tarkastelluissa tapauksissa homekasvun riski tuuletustilaan rajoittuvassa rakenteessa tai tuuletustilassa. Ilmansulun vesihöyryn läpäisevyys saattoi näkyä joissain tapauksissa, mutta se ei ollut näissäkään tapauksissa ratkaiseva toimivuuden kannalta.

Puukuitueristeisten rakenteiden toimivuuden hyödyntämismahdollisuus liittyy vaihtelevien ilmasto-olojen kosteudenhallintaan. Vesihöyryä molempiin suuntiin hallitusti läpäisevä rakenne ja hygroskooppinen lämmöneriste tuo ilmeisiä etuja tilanteissa, joissa rakenteiden kuivumisen on syytä tapahtua ajoittain myös sisäilmaan päin. Tämä näkyi esimerkiksi kesäaikaisen kosteustilanteen simuloinneissa verrattaessa höyryn-/ilmansulun eri puolten kosteustasoja.

Sisäilman ja rakenteiden kosteusvuorovaikutus edistää termisesti viihtyisien sisäilman olosuhteiden ylläpitämistä. Sisäilman kosteuskuormitustilanteessa rakenteen johtumishäviöt voivat pienentyä rakenteeseen lauhtuvan kosteuden takia. Tämän ilmiön kesto riippuu kuormituksen kestosta, ulkoilman olosuhteista, rakenteen sisäpuolen kerrosten hygroskooppisten materiaalikerrosten ominaisuuksista, niiden olosuhteista kuormituksen alkaessa ja sisäpinnan vesihöyrynvastuksesta. Esimerkkitapauksessa sisäilman suhteellisen kosteuden askelmuutostilanteessa lämpövirta saattoi pysyä lämpöhäviöiden sijaan useita vuorokausia positiivisena lokakuun alun simulointijakson aikana.

Haasteena ja mahdollisuutena on hygroskooppisten materiaalikerrosten, kuten puukuitueristeen ominaisuuksien dynaaminen hyödyntäminen erilaisissa ilmasto-oloissa ja kuormitustilanteissa. Tähän pyritään vastaamaan eri olosuhteisiin suunnatussa jatkotutkimushankkeessa.

Liitteet /Lähdeviitteet

1. Simonson, C.J. Moisture, thermal and ventilation performance of Tapanila ecological house. Reseach Notes 2069, VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo. 2000.
2. Simonson, C.; Salonvaara, M. & Ojanen, T. 2001. Improving indoor climate and comfort with wooden structures. Espoo, VTT Building Technology. 200 s. + liitt. 91 s.

- VTT Publications; 431. ISBN 951-38-5846-4; 951-38-5847-2
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2001/P431.pdf>
3. Simonson, C. J, Salonvaara, M. and Ojanen, T., 2001. Moisture content of indoor air and structures in buildings with vapor permeable envelopes, Proceedings (CD) of Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII: Integration of Building Envelopes, Clearwater Beach, Florida, ASHRAE.
 4. Simonson, C. J, Salonvaara, M. and Ojanen, T., 2002. The effect of structures on indoor humidity - possibility to improve comfort and perceived air quality, Indoor Air, 12, pp. 1 - 9.
 5. Simonson, C., M. Salonvaara, T. Ojanen. 2002. Humidity, Comfort and Air Quality in a Bedroom with Hygroscopic Wooden Structures. Proceedings of the 6th Symposium "Building Physics in the Nordic Countries", Trondheim.
 6. Simonson, Carey J.; Salonvaara, Mikael; Ojanen, Tuomo. 2004. Heat and mass transfer between indoor air and a permeable and hygroscopic building envelope: Part I - Field measurements. Journal of Thermal Envelope and Building Science, vol. 28, 1, ss. 63 – 101. doi:10.1177/1097196304044395
 7. Simonson, Carey J.; Salonvaara, Mikael; Ojanen, Tuomo. 2004. Moderating indoor conditions with hygroscopic building materials and outdoor ventilation. ASHRAE Transactions, vol. 110, 2, ss. 804 – 819.
 8. Rode, C., Salonvaara, M., Ojanen, T., Simonson C. and Grau, K. Integrated Hygrothermal Analysis of Ecological Buildings. Buildings...
 9. VTT:n tutkimuslöstus Nro VTT- S-04065-09 (2009). Uuden Termex Zero - seinärakenteen lämmönläpäisykerroin ja kosteustekninen toimivuus.
http://termex.fi/files/2_@_9457_@_TermexZero_tutkimuslösteste.pdf
 10. ITS, 1999, Information Technology Specialists Inc., The Residential Energy Efficiency Database (designed and created by B. J. Mitchell, M. Ryder and M. Mitchell): Indoor Air Quality - moisture and humidity, <http://www.its-canada.com/reed/iaq/chart1.htm>.
 11. ANSI/ASHRAE Standard 55-1992, Thermal environmental conditions for human occupancy, ASHRAE, Atlanta.
 12. ANSI/ASHRAE 55a-1995, Addendum to Thermal environmental conditions for human occupancy, ASHRAE, Atlanta.
 13. Tuomaala, Pekka; Holopainen, Riikka; Piira, Kalevi; Airaksinen, Miimu. 2013. Impact of individual characteristics - Such as age, gender, BMI, and fitness - on human thermal sensation. Conference proceedings, ss. 2305 - 2311. 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association, BS2013, 26 - 28 August 2013, Chambéry, France. http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_2240.pdf
 14. Rode, C.; Peuhkuri, R.; Hanssen, K.; Time, B.; Svennberg, K.; Arfvidsson, J.A.; Ojanen, Tuomo. 2005. NORDTEST - Projct on moisture buffer value of materials. Ventilation in Relation to the Energy Performance of Buildings. 26th AIVC Conference, Bryssel, 21.-23.9.2005. Air Infiltration and Ventilation Centre Samaa
 15. Rode, C.; Peuhkuri, Ruut; Hanssen, K.; Time, B.; Svennberg, K.; Arfvidsson, J.A.; Ojanen, Tuomo. 2006. Moisture buffer value of building materials. ASTM Special Technical Publication. ASTM, vol. 1495 STP, ss. 33 - 44. ASTM Symposium on heat, air and moisture transport: measurements on building materials. Toronto, 23 April 2006
 16. Rode, C., Peuhkuri, R., Lone, H., Time, B., Gustavsen, A., Ojanen, T, Ahonen, J., Svennberg, K., Harderup L.-E., Arfvidsson, J.. 2006. Moisture Buffering of Building Materials. Report BYG-DTU: R-126, Denmark, Tech. University of Denmark, 50 p. + app. 28 p. ISBN 87-7877-195-1
http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:75984/datastreams/file_2415500/content
 17. WUFI (Wärme und Feuchte instationär - Transient Heat and Moisture) 5.3 Pro software, The Fraunhofer Institute for Building Physics IBP. 2013.
 18. Viitanen, H. Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden structures. Doctoral Thesis. The Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Department of Forest Products. Uppsala (1996), 58 p. + app. 230 p.

19. Viitanen, H. 1997a. Modelling the time factor in the development of brown rot decay in pine and spruce sapwood - the effect of critical humidity and temperature conditions. *Holzforschung*, vol. 51, 1, pp. 6 – 14
20. Viitanen, H. 1997b. Critical time of different humidity and temperature conditions for the development of brown rot decay in pine and spruce. *Holzforschung*, vol. 51, 2, pp. 99 – 106
21. Ojanen, T; Peuhkuri, R; Viitanen, H. Modelling of mould growth on building structures (in Finnish) Timber Day 2009, 11.11.2009, Sibelius-building, Lahti. *Puuinfo* (2009)
22. Ojanen, T; Peuhkuri, R; Viitanen, H; Lähdesmäki, K; Vinha, J. Effect of dynamic conditions on mould modeling and evaluation of mould risk (in Finnish). *Building physics 2009*, Tampere, 27.-29.10.2009.
23. Ojanen, T., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Vinha, J., Salminen, K. Mould growth modeling of building structures using sensitivity classes of materials. *Proceedings (in CD) of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI International Conference*, Dec 5.-9.2010. Clearwater Beach, Florida. 10 p.
24. Peuhkuri, R; Viitanen, H; Ojanen, T. Modelling of mould growth in building envelopes. *Proceedings of the IEA ECBCS Annex 41 Closing seminar*, Copenhagen, June 19, 2008
25. Laminoitu verkkovahvikkeinen ilmansulkupaperi X5.
http://www.ekovilla.com/fileadmin/user_upload/dokumentit/Ilmatiiivystuotteet_2013.pdf
26. Intello höyrynsulkutuotteet. <http://www.tiivistalo.fi/>
27. Nore, K. The hygrothermal Effect – a new standard? Presentatiton in Aalto Wood Winter Seminar. Aalto University, Finland. 15.1.2016. 35 s.