

Tuomo Ojanen & Mikael Salonvaara

Kuivumiskykyiset ja sateenpitävät rakenteet

Kuivumiskykyiset ja sateenpitävät rakenteet

Tuomo Ojanen & Mikael Salonvaara

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka



ISBN 951-38-6091-4 (nid.)
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-6092-2 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)
ISSN 1235-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © VTT 2002

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Rakennustekniikka, Lämpömiehenkuja 3, PL 1804, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 455 2408

VTT Byggnadsteknik, Värmemansgränden 3, PB 1804, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 455 2408

VTT Building Technology, Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 1804, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 455 2408

Toimitus Leena Ukskoski

Otamedia Oy, Espoo 2002

Ojanen, Tuomo & Salonvaara, Mikael. Kuivumiskykyiset ja sateenpitävät rakenteet [Structures with high drying efficiency and resistance against rain penetration]. Espoo 2002. VTT Tiedotteita – Research Notes 2168. 66 s. + liitt. 3 s.

Avainsanat construction, structures, moisture insulation, driving rain, water proofing, ventilation, water vapour, drying, wind barrier, rain penetration, rainproof structures

Tiivistelmä

Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden eräänä kriteerinä pidetään lämmöneristeen sisä- ja ulkopuolisten kerrosten vesihöyrynvastusten suhdetta. Tälle on rakentamismääräyksissä annettu vähimmäisvaatimus 5, josta voidaan poiketa, mikäli rakenteiden toimivuus on erikseen osoitettu. Lisäksi määräykset korostavat rakenteen hyvän kuivumiskyvyn merkitystä. Suurimmat kosteusriskit liittyvät ulkopuolisen kosteuden tunkeutumiseen rakenteen sisään ja rakenteen kykyyn selviytyä siihen rakentamisen tai rakennuksen käytön aikana kohdistuvista kosteuskuormista.

Kuivumiskyvyn kokeellinen määrittäminen ja siihen liittyvä laitteisto tuoteistettiin rakenteiden ja niiden tuulensuojakerrosten kuivumistilanteen aikaisten kosteudensiirt ominaisuuksien tutkimus- ja testauskäyttöön soveltuviksi. Rakennetulla laitteistolla voidaan tutkia ja vertailla yhtä aikaa 20 rinnakkaista rakennekomponenttia, jotka ovat tyyppillisiä kuivumistilanteita vastaavissa lämpötilaoloissa. Lämpimällä puolella on huoneilmaa vastaavat olosuhteet, ja kylmän puolen lämpötila voidaan asettaa halutuksi. Kokeilla voidaan määrittää kosteuden tiivistymisen ja jäätyksen vaikutus tuulensuojan kykyyn läpäistä vesihöyryn diffuusiota. Rakenteisiin asetetun alkukosteuden kuivumista seurataan, ja tuloksena saadaan tutkittujen rakenteiden kuivumiskyky tarkasteluoloissa, ja lisäksi voidaan määrittää vesihöyryn tehollinen läpäisevyys kuivumistilanteessa.

Sadeveden tunkeutumisriskin määrittäminen kokeiltiin laitteistolla, joka normaalista sadekoelaitteistosta poiketen tuottaa tuulen paineen tutkittavan rakenteen ulkopinnalle eikä vain paine-eroa rakenteen yli. Menetelmän etuna on ulkoverhouksen sateenpitävyyden testaaminen mahdollisimman hyvin todellisia tuulen tuottamia painesuhteita vastaavissa oloissa, jolloin paikallisen painegradientin vaikutus rakennekerroksen tai -detaljin sateenpitävyyteen tulee otettua huomioon.

Hyvä kuivumiskyky ja sadeveden tunkeutumisen estäminen parantavat rakenteen viikastietoisuutta ja kosteusriskien hallintaa. Jos rakenteen uloimman kerroksen diffuusiovastus on suuri, voidaan rakenteen kuivumiskykyä olennaisesti parantaa rajoitetulla tuuletuksella tämän kerroksen läpi. Suhteellisen pienikin tuuletusilmavirtaus voi parantaa tällaisen rakenteen kuivumiskykyä huomattavasti ilman, että sen lämpötekniinen toiminta heikkenee.

Ojanen, Tuomo & Salonvaara, Mikael. Kuivumiskykyiset ja sateenpitävät rakenteet [Structures with high drying efficiency and resistance against rain penetration]. Espoo 2002. VTT Tiedotteita – Research Notes 2168. 66 p. + app. 3 p.

Keywords construction, structures, moisture insulation, driving rain, water proofing, ventilation, water vapour, drying, wind barrier, rain penetration, rainproof structures

Abstract

The Building Code of Finland requires five times higher vapour resistance for the material layers inside the thermal insulation as those outside the insulation. Exceptions for this rule are allowed in case the moisture performance of the structure is proved to be safe. The code emphasises also the importance of good drying ability. The highest risks in the moisture performance of a structure are engaged with water or rain penetration from outdoors into the structure and with limited drying efficiency of the structure when compared to the possible moisture loads during the construction and use of the building.

An experimental method to study the drying efficiency of structures was developed and a test device was built. This method will be used to analyse and test the moisture transport outwards through the wind barrier layer during the drying phase. Altogether 20 parallel intersection of structures or structure components can be studied simultaneously. The drying of the initial moisture load is monitored under selected warm and cold side temperatures corresponding to realistic conditions. The results show how the moisture that condenses and possibly also freezes on the inner surface of the wind barrier layer affects the drying efficiency. The effective vapour permeability of the wind barrier layer can also be solved.

Rain penetration into structure was studied experimentally with a device that produces pressure difference by high air flow hitting the structure surface. The benefit of this method is that the pressure gradients along the siding and at the outer parts of the structure are relatively similar to those caused by the wind. This allows a more liable study of the effects of local pressure gradients on the rain water penetration through structure details.

High drying efficiency and rainproof structures improve the control and elimination of moisture risks. If the water vapour diffusion resistance of the wind barrier or other outer layer of the structure is high, the drying efficiency can be significantly improved by arranging limited ventilation through this layer. Even a very low ventilation flow can improve the drying efficiency without affecting the thermal resistance of the structure.

Alkusanat

Tässä julkaisussa esitetään projektissa *Kuivumiskykyiset ja sateenpitävät rakenteet* saadut tulokset. Tutkimuksessa kehitettiin kuivumiskykyisten rakenteiden kokeellinen tutkimus- ja testausmenetelmä sekä arvioitiin ja esitettiin vikasietoisten rakenteiden toteutusperiaatteita.

Tutkimus kuului Tekesin Terve Talo -tutkimusohjelmaan. Sen rahoittivat Teknologian Kehittämiskeskus Tekes, Paroc Oyj Abp, Rautaruukki Oyj, Saint Gobain Isover Oy, Termex-Eriste Oy, Suomen Selluvilla-Eriste Oy, Ekovilla Oy, Suomen Muoviteollisuusliitto – EPS-jaos, Gyproc Oy ja VTT.

Tutkimus tehtiin VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikassa. Tutkimuksen vastuullinen johtaja oli toimialajohtaja Juho Saarimaa. Tutkimusryhmään kuuluivat Rakennusfysiikka- ja sisäilmastoryhmästä erikoistutkija Tuomo Ojanen (projektipäällikkö) ja tutkija Mikael Salonvaara. Rakenteiden kuivumiskyvyn laitteiston suunnittelusta, rakentamisesta ja sillä tehdyistä kokeista vastasi tutkimusinsinööri Hannu Hyttinen ja sateenpitävyyden kokeista teknikko Tapio Paananen.

Projektin johtoryhmään kuuluivat:

Veli-Matti Pölkki (puheenjohtaja, Termex-eriste Oy), Ilmari Absetz (29.11.2001 saakka) ja Lasse Pöyhönen (29.11.2001 alkaen) (Tekes), Katja Outinen (Suomen Muoviteollisuusliitto, EPS-jaos), Tarmo Mononen (Rautaruukki Oyj), Harri Kemppainen (Saint Gobain Isover Oy), Juha Krankka (Paroc Oyj Abp), Jukka Pråhl (Suomen Selluvilla-Eriste Oy), Reijo Louko (Ekovilla Oy), Karl-Johan Söderlund (Gyproc Oy) ja Ismo Heimonen (VTT). Johtoryhmä kokoontui kuusi kertaa. Haluamme lausua parhaat kiitokset johtoryhmän aktiivisesta osallistumisesta projektin seurantaan ja ohjaukseen.

Espoo, elokuu 2002

Tekijät

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
1. Johdanto.....	9
1.1 Kuivumiskyvyn merkitys.....	10
1.2 Sateen tunkeutumisen aiheuttama kosteuskuormitusriski.....	10
2. Rakenteiden kuivumiskyky.....	11
2.1 Kuivumiskyvyn kriteerien tarkastelu.....	11
3. Kuivumiskyvyn testausmenetelmä.....	12
3.1 Menetelmän kuvaus.....	12
3.1.1 Sisäilman kosteuskuormituksen huomiointi.....	12
3.2 Laitteisto.....	13
4. Kuivumiskokeet.....	15
4.1 Koerakenteet.....	15
4.2 Koeolosuhteet.....	16
4.3 Tulokset.....	16
4.3.1 Kosteusvirrat ja vesihöyrynläpäisevyydet.....	16
4.3.2 Kosteusjakaumat.....	19
4.3.3 Johtopäätökset.....	19
5. Viistosateen määrän arviointimenetelmät.....	25
5.1 Viistosade rakennuksen vaipan eri osissa.....	25
5.2 Mittausmenetelmät kentällä ja laboratoriossa.....	25
5.3 Laskentamenetelmät.....	27
5.4 Yhteenvedo viistosateen arviointimenetelmistä.....	30
6. Sateenpitävyyden kokeellinen tutkimus.....	31
6.1 Kokeiden tavoitteet.....	31
6.2 Koejärjestelyt.....	31
6.3 Kokeissa tutkitut rakenteet.....	31
6.4 Koeohjelma.....	32
6.5 Mittaussuureet.....	33
6.6 Kalibrointikokeet.....	33
6.7 Varsinaiset kokeet.....	35
6.8 Johtopäätökset sadetuskokeista.....	40

7. Laskennallinen tarkastelu.....	43
7.1 Tavoitteet.....	43
7.2 Kuivumiskyvyn laskennallinen analysointi.....	43
7.3 Kevyt puurunkoinen seinä.....	43
7.4 Tulokset.....	45
7.4.1 Tuulensuojan diffuusiovastus kosteuspitoisuudesta riippuvilla ominaisuuksilla ja vakioarvoilla.....	45
7.4.2 Lämmöneristepaksuuden vaikutus.....	47
7.5 Sisäpuolelta eristetty hirsiseinä.....	50
7.5.1 Tuuletusvirtaus hirren rakojen kautta.....	51
7.5.2 Sisäpuolelta lämmöneristetyh hirsiseinän kuivumiskyky.....	53
7.6 Eristerappausrakenne.....	54
7.6.1 Tuuletuksen vaikutus rakenteiden kuivumiseen.....	56
7.6.2 Rappauksen paksuuden vaikutus kuivumisnopeuteen.....	58
8. Yhteenveto.....	60
8.1 Sateenpitävyyden määrittäminen ja riskiarviot.....	60
8.2 Rakenteen kuivumiskyvyn merkitys.....	61
8.3 Jatkotutkimustarpeet.....	63
Lähdeluettelo.....	65
Liite A: Katsaus julkisivujärjestelmien sadetiiviuden määrittämisen standardeihin ja määräyksiin	

1. Johdanto

Rakenteiden kosteustekniset toimintaedellytysten analysointi laskennallisilla ja kokeellisilla menetelmillä mitoitettavissa sisä- ja ulkoilman oloissa hallitaan kohtuullisen hyvin silloin, kun kyseessä on vesihöyryn diffuusiona ja konvektiivisesti rakennetta kuormittava kosteus.

Keskeinen tekijä rakenteen kosteusteknisestä toiminnasta kannalta on rakenteen kuivumiskyky. Ulkoilman lämpötila- ja kosteusolot vaikuttavat rakenteen kuivumiskykyyn ja homeutumisalttiuteen. Homeen kasvu on ensimmäinen liiallisen kosteuden aiheuttama muutos rakenteessa. Rakentamisen jälkeinen alkukosteus, voimakkaan tuulen aiheuttama sadeveden tunkeutuminen tai muu satunnainen rakenteeseen päässyt vesi voivat aiheuttaa mitoitustilannetta huomattavasti suuremman kosteusrasituksen. Hyvä kuivumiskyky ja sadeveden tunkeutumisen estäminen parantavat rakenteen vikasietoisuutta ja kosteusriskien hallintaa.

Rakenteille ja rakenneosille tulee voida asettaa erilaisia vaatimuksia sen mukaan, millaisissa kuormitus- ja ilmasto-oloissa niiden tulee toimia [1]. Rakenteiden kosteusteknisestä toimivuuden tutkimuksen ja tuotekehityksen tueksi tarvitaan vakiomuotoisia analysointimenetelmiä, joilla voidaan selvittää kosteustekninen toimivuus eri ilmasto- ja rasitusoloissa.

Merkittävä tarve on kehittää materiaaliominaisuusmääritysten ja koerakenteiden vaatiman raskaamman kokeellisen tutkimuksen väliin sijoittuva pelkistetty kokeellinen analysointimenetelmä rakenteiden kuivumiskyvyn määrittämiseksi todellisissa käyttöoloissa. Tässä työssä tuoteistettiin aiemmin kokeiltu menetelmä, jossa rakenteiden kuivumiskyky voidaan määrittää kokeellisesti pelkistetyllä koemenetelmällä, jossa kuivumisen kannalta tärkeimmät materiaalikerrokset (yleensä tuulensuoja) ovat kuivumistilannetta vastaavissa käyttöoloissa. Menetelmällä voidaan arvioida eri rakenneratkaisujen kuivumisnopeutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä esimerkiksi silloin, kun tuulensuojan pintaan kondensoitua kosteus jäätyy.

Toinen tärkeä tekijä rakenteiden kosteusteknisestä turvallisuuden kannalta on sadeveden tunkeutumisriskin arviointi kokeellisesti. Työssä testattiin ja arvioitiin tähän liittyvän koemenetelmän toimivuutta ja soveltuvuutta rakenteiden tutkimukseen.

Käytännön oloissa määritetyn kuivumiskyvyn ja voimakkaissa tuulioloissa määritetyn sateen tunkeutumisesta syntyvän kosteuskuormituksen tietoja voidaan käyttää laskennallisten menetelmien yhteydessä. Laskennan avulla rakenteiden toimivuuden arviointi voidaan tehdä valitussa sää- ja sisäilmasto-oloissa. Kuivumiskyky antaa tarvittavaa täydentävää tietoa materiaalikerrosten toimivuudesta käytännön kuivumisoloissa ja sateenpitävyyskokeiden tuloksia voidaan tulkita rakenteiden kastumisriskinä. Yhdessä kokeelliset ja laskennalliset menetelmät muodostavat työkalupaketin, jolla voidaan arvioida

rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden riskinsieto- ja selviytymiskykyä pelkistetyissä (ääri)oloissa ja halutuissa ilmasto-oloissa.

Kokeellisten menetelmien lisäksi tavoitteena oli esittää ja arvioida rakennusten ulkovai-pan rakenteiden kuivumiskykyyn vaikuttavia tekijöitä, joiden avulla voidaan parantaa niiden kosteusteknistä turvallisuutta.

1.1 Kuivumiskyvyn merkitys

Lähtökohtana on Suomen Rakentamismääräyskokoelman osan C2 vaatimus, jonka mukaan rakenteen tulee voida kuivua haittaa aiheuttamatta. Määräyksissä ei kuitenkaan ole esitetty määrällisiä vaatimuksia kuivumiskyvyille. Avoimia kysymyksiä jää useita, mm: Mikä on se rakentamisen jälkeinen hyväksyttävä kosteustaso, joka tulee voida kuivua rakenteesta, mikä on ensimmäinen haitaksi tulkittava tapahtuma tai muutos rakenteessa, mikä vesihöyrynläpäisevyys rakenteen uloimmilla kerroksilla tulee olla tai mikä kosteuden massavirrantiheys vaaditaan rakenteesta ulos tietyissä olosuhteissa ja mitkä ovat kuivumisolosuhteet rakenteen sisä- ja ulkopuolella (kuivumisajan mitoittavat ilmasto- ja kosteusrasitusolot).

Kaikkiin avoimiin kysymyksiin ei voida löytää yksiselitteistä ratkaisua, mutta kehitetyllä ja tuotteistetulla rakenteiden kuivumiskyvyn analysointimenetelmällä voidaan arvioida peruseinärakenteiden kuivumiskykyä rakentamiskosteuden tai kertaluonteisen, käytön-aikaisen kastumisen jälkeisessä tilanteessa. Menetelmällä voidaan verrata eri rakenne-ratkaisujen selviytymiskykyä kosteusrasituksesta eri oloissa ja tuottaa tuotekehityksen tueksi tietoa eri tekijöiden vaikutuksesta rakenteiden kuivumiskykyyn.

1.2 Sateen tunkeutumisen aiheuttama kosteuskuormitusriski

Sateen tunkeutuminen rakenteeseen aiheuttaa merkittävän kosteusriskin. Usein veden-tunkeutumista tuulen vaikutuksesta esiintyy silloin, kun tuulen nopeuden ja suunnan aiheuttama painegradientti rakenteen ulkopinnassa johtaa veden jonkin rakennedetaljin, esimerkiksi kahden eri komponentin, liitoskohdan kautta rakenteeseen. Tällöin raken-teeseen tunkeutuvat kosteusmäärät voivat olla suuria. Työssä esitetään katsaus sateen-pitävyysvaatimusten standardointiin ja standardien mukaisiin koemenetelmiin, joissa rakenteen yli ylläpidetään paine-eroa samalla, kun rakenteen pintaan suihkutetaan vettä. Tässä työssä kokeiltiin menetelmää, jossa paine-ero aiheutettiin ilmavirtauksella raken-teen ulkopintaan, mikä vastaa paremmin todellisen tuulen aiheuttamia paineoloja. Ta-voitteena oli menetelmän soveltuvuuden arviointi.

2. Rakenteiden kuivumiskyky

2.1 Kuivumiskyvyn kriteerien tarkastelu

Rakenteiden kuivumiskyvylle ei ole asetettu määrällisiä vaatimuksia. Kosteuden massa- virtaus rakenteesta ulos antaa kuvan kuivumisnopeudesta, joka riippuu rakenteen ulkopinnan vesihöyrynläpäisevyydestä määritysoloissa. Kosteusvirtaus rakenteesta riippuu lisäksi siitä, mihin materiaalikerrokseen ylimääräinen kosteus on mahdollisesti sitoutunut. Vapaan veden tai esimerkiksi kuitumaiseen lämmöneristeeseen sitoutuneen kosteuden kuivuminen riippuu pääasiassa rakenteen ulkopinnan läpäisevyydestä toimintaolosuhteissa. Jos rakennekosteus on sitoutunut esimerkiksi puuhun tai betoniin, riippuu kuivuminen lisäksi näiden kerrosten kosteudensiirto-ominaisuuksista. Kuivumisnopeuden ohella kosteusjakauma rakenteessa kuivumistilanteessa vaikuttaa paikallisiin kosteustasoihin ja niiden riskiin aiheuttaa vaurioita tai toimintahäiriöitä rakenteelle. Siten pelkkä kuivumisnopeus ei yksinään anna riittävää kuvaa rakenteen kosteusteknisestä turvallisuudesta.

Kuivumisnopeuden lisäksi tulee tarkastella ylimääräisen kosteuden aiheuttamia riskejä rakenteen toiminnassa tai kestävydessä. Rakenteissa olevan ylimääräisen kosteuden aiheuttamia ensimmäisiä muutoksia on homeen kasvu materiaalipinnoilla. Homeen kasvuriskiä voidaan simuloida laskennallisesti kohtuullisen luotettavasti, joten sen käyttö tarkastelun kriteerinä on perusteltua. Ulkoilmaan rajoittuvissa rakenneosissa ei voida täysin välttää homeen kasvulta, mutta tuulensuojan sisäpuolisissa materiaalikerroksissa ei saisi esiintyä homeen kasvua. Koska kuivumistilanteessa vesihöyry tiivistyy usein rakenteen ulommaisiin kerroksiin, täytyy kosteuden kuivua, ennen kuin homeen kasvu alkaa vallitsevissa lämpötilaoloissa. Tästä saadaan ehto kuivumisajalle ja edelleen rakenteesta kuivattavissa olevalle vapaalle kosteusmäärälle. Rakenteen osiin sitoutuneen kosteuden kuivuminen on hitaampaa eikä välttämättä aiheuta vastaavia kosteusoloja rakenteen kriittisiin osiin, jolloin myös kosteuden kuivumisajat ja määrät voivat olla pelkistettyä vapaan veden kuivumistilannetta suuremmat.

Kuivumiskyvyn kokeellista määrittystä varten kehitettiin tuotteistettu menetelmä, jolla voidaan määrittää rakenteen lämmöneristeen ja sen ulkopuolisen kerroksen vaikutus vapaan veden kuivumiseen käyttöoloissa. Tämän täydentäminen laskennallisesti on tarpeen rakenteiden toiminnan arvioimiseksi erilaisissa käyttöoloissa ja rakennuskosteuden jakaumilla.

3. Kuivumiskyvyn testausmenetelmä

3.1 Menetelmän kuvaus

Menetelmässä rakenteesta tarkastellaan kokeellisesti vain sitä osaa, mikä vaikuttaa kuivumiseen. Suomen ilmastossa rakenteiden kuivuminen tapahtuu pääsääntöisesti ulospäin, joten kuivumiskyvyn arvioinnissa voidaan tarkastella vain sisäverhouksen ja höyrynsulun ulkopuolisia rakenneosia. Kuivumiskyky riippuu pääasiassa rakenteen tuulensuojan tai vastaavan kerroksen vesihöyrynläpäisevyydestä. Periaatteena on tarkastella lämmöneristeen ja sen ulkopuolisen materiaalikerroksen vaikutusta lämmöneristeen sisäpuolella olevan kosteuden kuivumiseen ulos rakenteesta. Tämä alkukosteus kuvaa rakentamisen jälkeistä kosteutta tai muuta ylimääräistä kosteutta rakenteessa.

Menetelmässä kuivumiseen vaikuttavat materiaalikerrokset ovat sellaisissa oloissa, jotka vastaavat käytännössä esiintyviä. Menetelmässä rakenteeseen tuotetaan todellisia käyttöoloja vastaava lämpötilagradientti, joka edistää kosteuden siirtymistä ulospäin. Kuivumistilanteessa lämmöneristeen ja tuulensuojan rajapinnalla on tyypillisesti kondenssiolosuhteet ja talvikauden olosuhteissa rakenteen ulkopuolella on pakkasta, jolloin tuulensuojakerrokseen tiivistyvä kosteus voi jäätymä. Erityisen kiinnostavaa on kondenssin ja mahdollisen jäätymisen vaikutus lämmöneristeen ulkopuolisen kerroksen vesihöyrynläpäisevyyteen ja rakenteen kuivumiskykyyn. Menetelmä eroaa tavanomaisesta ns. kuppimenetelmin tehtävästä vesihöyrynläpäisevyyden määrittämisestä siinä, että tarkasteltavan rakenteen ylitse on (vakio) lämpötilaero ja rakenteen ulkopinnan lämpötila vastaa paremmin todellisia käyttöoloja, jolloin myös jäätymistilannetta voidaan tutkia.

Kuivumiskyvyn mittaus perustuu kunkin tutkittavan rakennekomponentin punnitukseen määräjain. Punnituksessa määritetään koko rakenneleikkauksen painon muutos mukaan lukien rakennekehys ja rakenteen alapuolinen vesiastia, joka sisältää kokeen alussa tunnetun määrän vettä. Tämä alkukosteus kuvaa ylimääräistä, rakenteesta kuivattavaa kosteutta. Punnitusten perusteella voidaan määrittää rakenteesta kuivunut kosteusvirrantiheys. Lämpötila- ja suhteellisen kosteuden olosuhteet mittaamalla voidaan lisäksi määrittää tuulensuojakerroksen (tehollinen) vesihöyrynläpäisevyys mittaushetkillä.

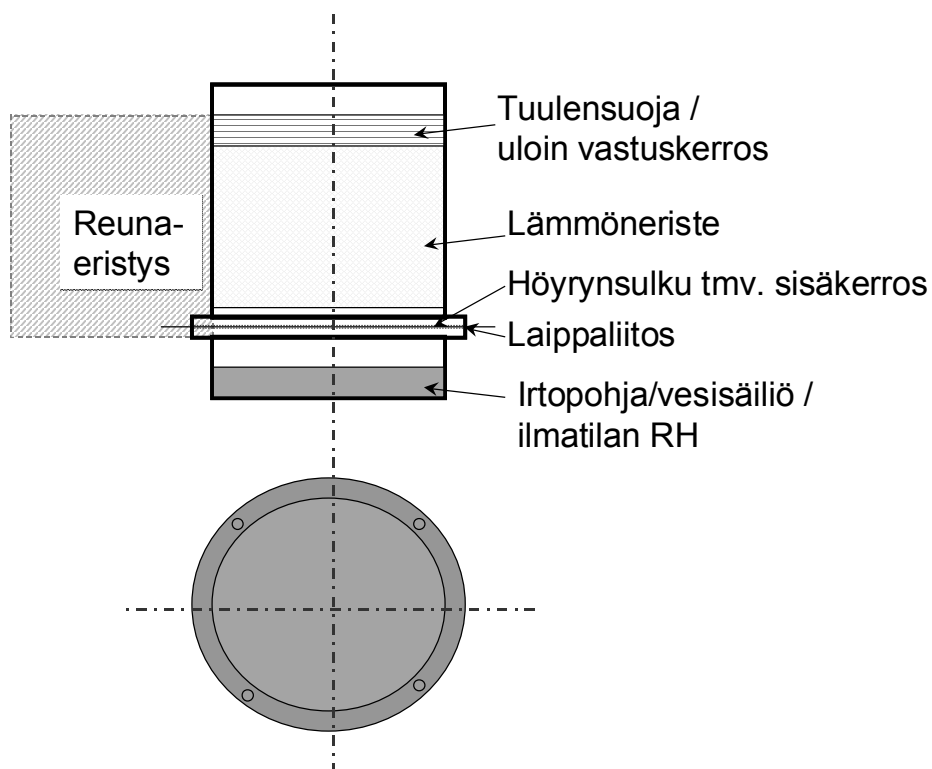
3.1.1 Sisäilman kosteuskuormituksen huomiointi

Toinen tapa käyttää koemenetelmää on tuottaa koerakenteiden sisäpuoliseen ilmatilaan haluttu sisäilman tilaa vastaava suhteellinen kosteus. Tällöin koerakenteessa on myös sisäverhous ja muut lämmöneristeen sisäpuoliset kerrokset. Mahdollinen alkukosteus (rakennuskosteus) on tässä tapauksessa materiaalikerroksissa. Koerakenteiden painon muutosta seuraamalla voidaan arvioida rakenteen kosteuskertymää ja kuivumista sekä

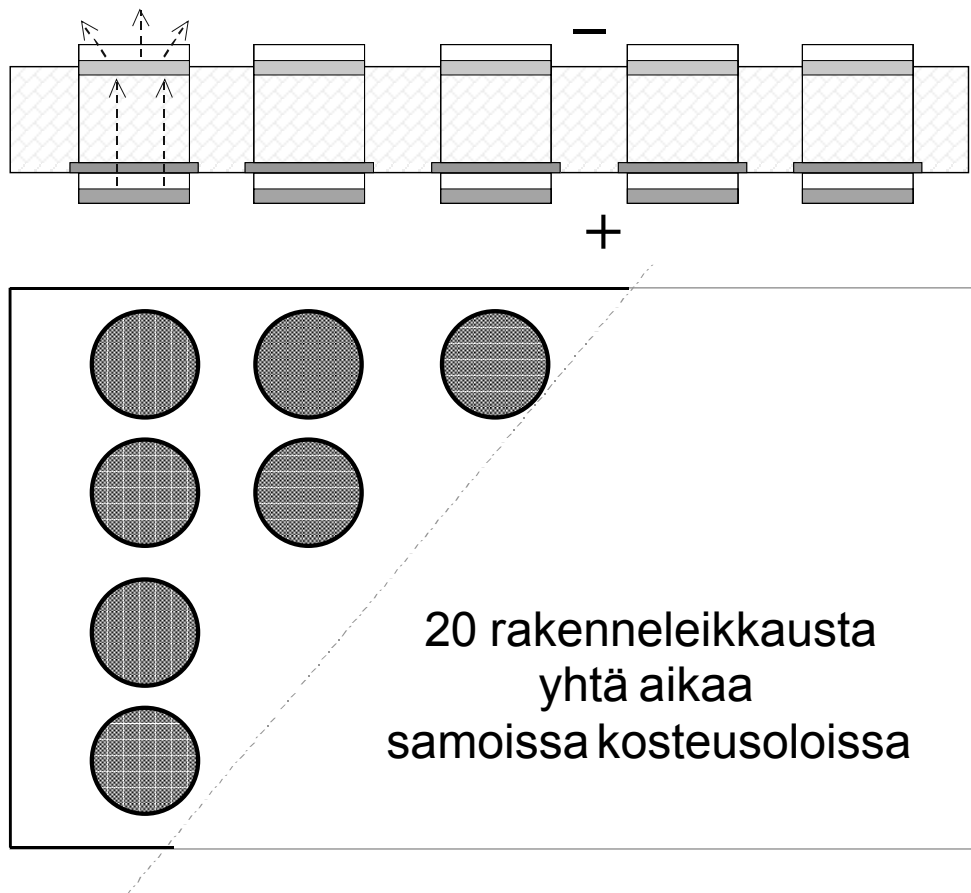
sisään- että ulospäin. Sisäilmaan tapahtuva kuivuminen on useissa tapauksissa merkityksetöntä ulospäin tapahtuvaan verrattuna ja sisäilman kosteuskuormitus on toimivissa rakenteissa pieni verrattuna alkukosteuden kuivumisen tuottamaan kosteusvirtaan rakenteen läpi. Koska kuivumiskokeet edustavat pahinta kosteusrasitusta, on sisäilman kuormituksen käyttö mittaustapana varsinaista kuivumiskoetta vähäisempi.

3.2 Laitteisto

Edellä kuvattua mittausmenetelmää on kokeiltu aiemmissa tutkimuksissa [2–4] ja tässä työssä kokeellinen menetelmä ja siihen liittyvä laitteisto tuoteistettiin mahdollisimman pelkistetyksi ja helppokäyttöiseksi. Koelaitteisto rakennettiin purettavaksi ja siihen sijoitettiin 20 mittauskohtaa rinnakkaisia rakennekomponenttien mittauksia varten (kuvat 1 ja 2). Tutkittavat rakennekomponentit ovat jokseenkin samoissa kosteus- ja lämpötiloissa koko kokeen ajan, jolloin niiden toimivuuden vertailu suoraan on mahdollista.



Kuva 1. Kuivumiskoelaitteiston periaatekuvaus yhden rakenneosan mittausjärjestelyjen osalta.



Kuva 2. VTT:n kuivumiskoelaitteiston periaatekuvaus. Mittauskannen alapuolella on sisäilmatilaa vastaava lämpötila ja yläpuolella ulkoilmaa kuvaavat olosuhteet. Alukosteus on kunkin rakenneosan alapuolisessa vesitilassa.

4. Kuivumiskokeet

4.1 Koerakenteet

Koelaitteiston 20:een rakennekomponentin asennuspaikkaan asennettiin erilaisia koerakenteita, joista rinnakkaisia oli 2–3 kutakin rakennetta [11]. Tuulensuojalevynä oli joko huokoinen kuitulevy (12 mm) tai kipsilevy (9 mm). Lämmöneristeenä oli kipsilevytuulensuojan tapauksessa joko puukuitueriste tai lasivilla. Neljässä eristerappauksessa selvitettiin kolmikerrosrappauksen ja sen takana olevan 50 mm:n mineraalivillan tai EPS lämmöneristeen vaikutusta rakenteen kuivumiskykyyn. Eristerappauksen takana oli joko kevyt rakenne (kipsilevy + villa) tai kohtuullisen raskas rakenne (50 mm kevytbetonia ja 50 mm villaa). Jälkimmäinen kuvaa parhaiten eristerapattua betonirakennetta, jollaista ei koekappaleen painon ja kuivumisaikataulun takia tässä kokeessa käytetty.

Referenssirakenteina käytettiin tuulensuojatonta, ulkopinnaltaan avointa lasivillakerrosta, tuulensuojavaneria (9 mm:n havuvaneria) ja tapausta, jossa tuulensuojakipsilevyn ulkopuolella oli avoin 30 mm:n mineraalivillakerros.

Taulukko 1. Kuivumiskokeen koerakenteet. Lämpötilamittaus oli koerakenteissa alleviivatun materiaalikerroksen lämpimällä pinnalla.

Tunnus	Rakenne	kpl
Pwfb25+cfi	Huokoinen puukuitulevy 25 mm + puukuitueriste 100 mm	3
G9 cfi	Kipsilevy 9 mm + puukuitueriste 100 mm	2
G9 gw	Kipsilevy 9 mm + lasivilla 100 mm	2
S+mw+G9	Rappaus + RAL 4 + kipsilevy 9 mm + 100 mm lasivilla	3
S+EPS+G9	Rappaus + 50 mm EPS + kipsilevy 9 mm + 100 mm lasivilla	2
S+EPS+AAC	Rappaus + EPS 50 mm + kevytbetoni 50 mm + kivivilla 50 mm	3
S+mw+AAC	Rappaus + RAL 4 + kevytbetoni 50 mm + kivivilla 50 mm	1
REF open	Lasivilla 100 mm, avoin ulkopinta	1
mw30+G9	Kivivilla 30 mm + kipsilevy 9 mm + lasivilla 100 mm	1
Ply 9	Vaneri, 9 mm 3-ply + lasivilla 100 mm	2

4.2 Koeolosuhteet

Kokeet tehtiin kolmessa eri lämpötilaolosuhteessa, jotka kuvasivat talvikauden pakkasjaksoa, lämmityskauden keskimääräistä ulkolämpötilaa vastaavaa tilannetta ja pienen lämpötilaeron tapausta (taulukko 2).

Taulukko 2. Kuivumiskokeissa käytetyt lämpötilaolosuhteet tutkittujen rakenteiden eri puolten ilmatiloissa.

Lämpötilaolot	Kesto, vrk
+20 °C / -10 °C	38
+20 °C / +3 °C	37
+20 °C / +12 °C	20

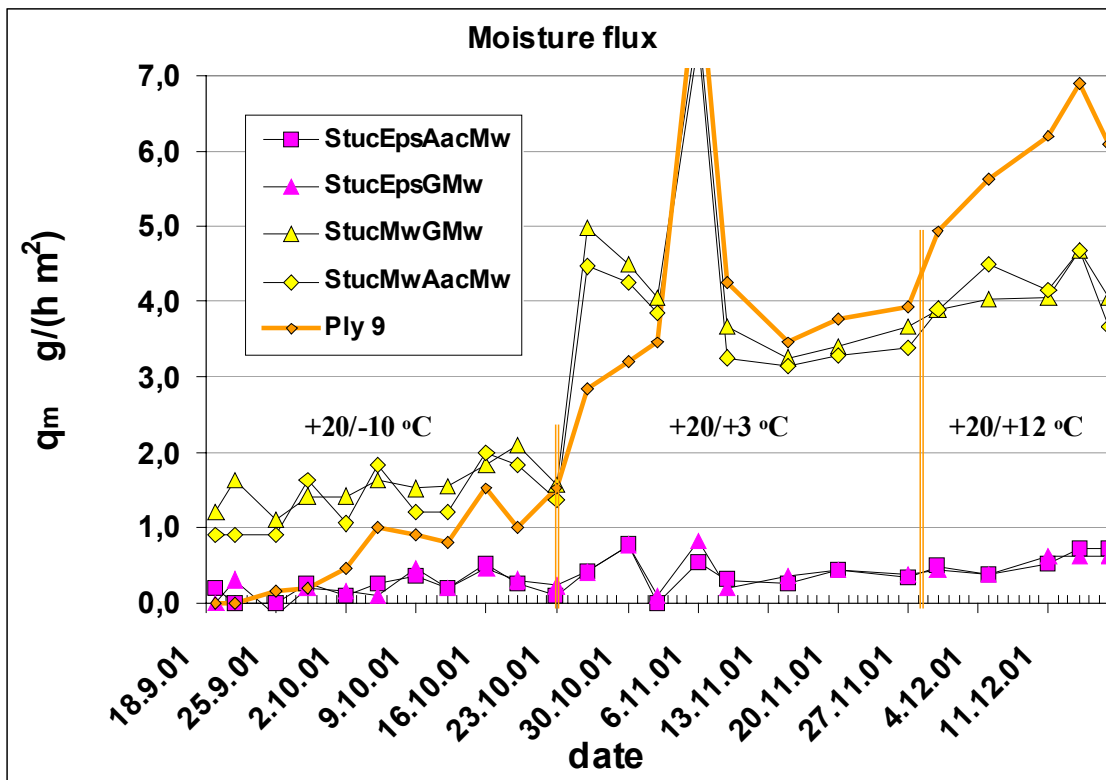
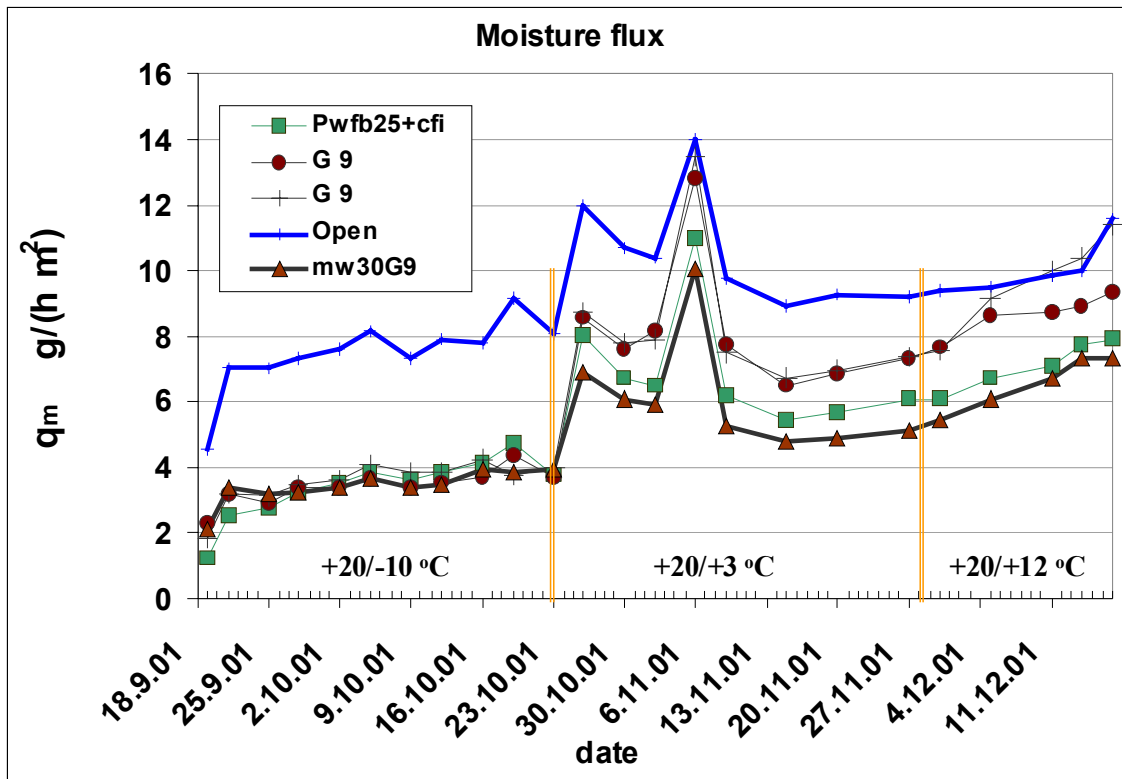
Kunkin rakenteen sisäpinnan puoleiseen vesitilaan asetettiin kokeen alussa 1,2 kg vettä, joka vastaa noin 17 kg/m² ylimääräistä vesimäärää rakenteen otsapinta-alaa kohden. Alkukosteusmäärä oli suuri koska haluttiin ylläpitää jatkuva kosteuslähde koko kuivumiskokeen ajan. Käytännössä tällainen vesimäärä ei vastaa rakenteilta turvallisessa, haittaa aiheuttamattomassa ajassa edellytettävää kuivumiskykyä, vaan tavoitteena oli selvittää kosteusvirtaus rakenteesta ulos käytetyissä olosuhteissa, kun kosteusvirtaus oli asettunut jokseenkin tasapainotilaan.

4.3 Tulokset

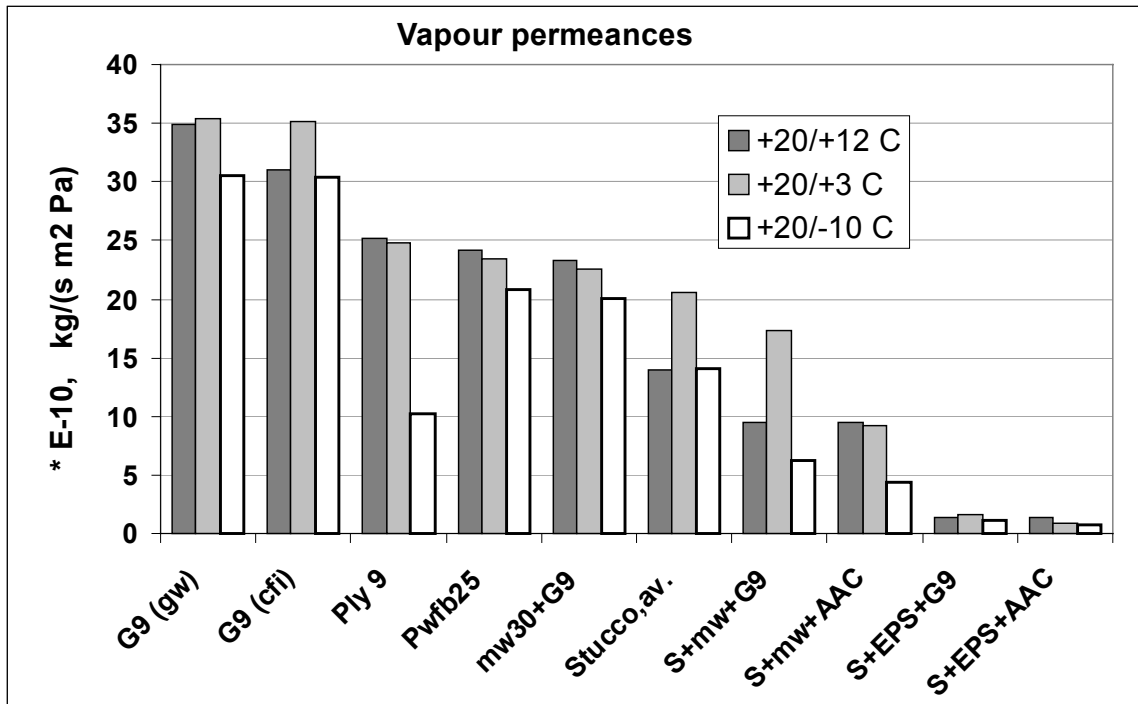
4.3.1 Kosteusvirrat ja vesihöyrynläpäisevydet

Kokeissa tutkittujen rakenteiden painonmuutosta seurattiin jatkuvin punnituksin. Tulosten perusteella voitiin määrittää kosteusvirrantiheydet rakenteesta kokeen eri jaksoissa (kuva 3).

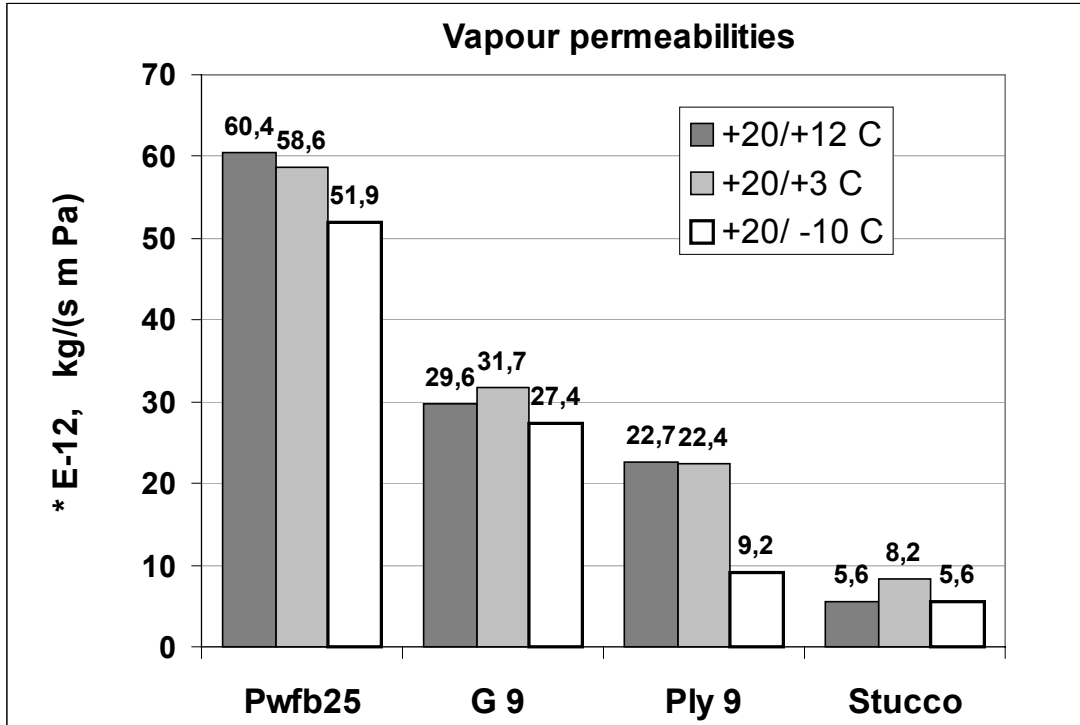
Kokeen aikana mitattiin rakenteen eri kerrosten lämpötilat. Oletuksen mukaisesti tuulensuojan tai vastaavan, lämmöneristeen ulkopuolisen kerroksen sisäpinnalla on kuivumistilanteessa kondenssiolot, ts. suhteellinen kosteus on noin 100 % RH. Kun lisäksi ulkopuolen ilmatilan lämpötila- ja kosteusolot tunnettiin, voitiin ratkaista tämän kerroksen vesihöyrynläpäisevyys (kuva 4) ja edelleen materiaalin aineominaisuutta kuvaava vesihöyrynohtavuus (kuva 5).



Kuva 3. Koerakenteista kuivuneen kosteuden massavirran tiheydet kokeen aikana.



Kuva 4. Koetulosten perusteella määritetyt vesihöyrypitoisuuteen perustuvat kosteudenläpäisykertoimet (vesihöyrynläpäisykertoimet) eri rakenteilla lämmöneristeen ulkopuolisille kerroksille.



Kuva 5. Rakenteen uloimman (tuulensuoja)kerroksen vesihöyrynjohdavuudet.

Huokoisen kuitulevylle kuivumistilanteessa määritetty vesihöyrynjohtavuus oli jokseenkin sama, kuin mitä se on materiaalilla tyypillisesti materiaaliominaisuustietojen perusteella kosteusalueen määrässä päässä lähellä kyllästystilaa, ts. noin $6 \cdot 10^{-11}$ kg/(s m Pa). Seuraavassa luvussa esitettävistä tuloksista nähdään, että eri koejaksojen jälkeen määritetyt keskimääräiset kosteudet tuulensuojalevyissä olivat jokseenkin kyllästystilaa vastaavat, joten vertailukohtana kuivumiskokeissa määritetyille arvoille voidaan käyttää ns. kuppimenetelmin kosteassa tilassa mitattuja vesihöyrynläpäisevyyksiä. Tuulensuojakipsilevylle kuivumistilanteessa määritetty vesihöyrynläpäisevyys, noin $3 \cdot 10^{-11}$ kg/(s m Pa), sijoittui lähemmäs tunnettujen materiaaliominaisuusarvojen jakauman alemmaa tasoa kostealla alueella. Tyypilliset arvot kosteassa päässä ovat olleet tuotteesta riippuen $2,7\text{--}6,5 \cdot 10^{-11}$ kg/(s m Pa), kun lämpötila on yli $+10$ °C. [8].

Referenssinä olleen paksuviiluisen havuvanerin vesihöyrynläpäisevyys vastasi hyvin aiempien tutkimusten perusteella tunnettua materiaalin toimintaa pakkasalueella ja sulassa tilassa [3].

4.3.2 Kosteusjakaumat

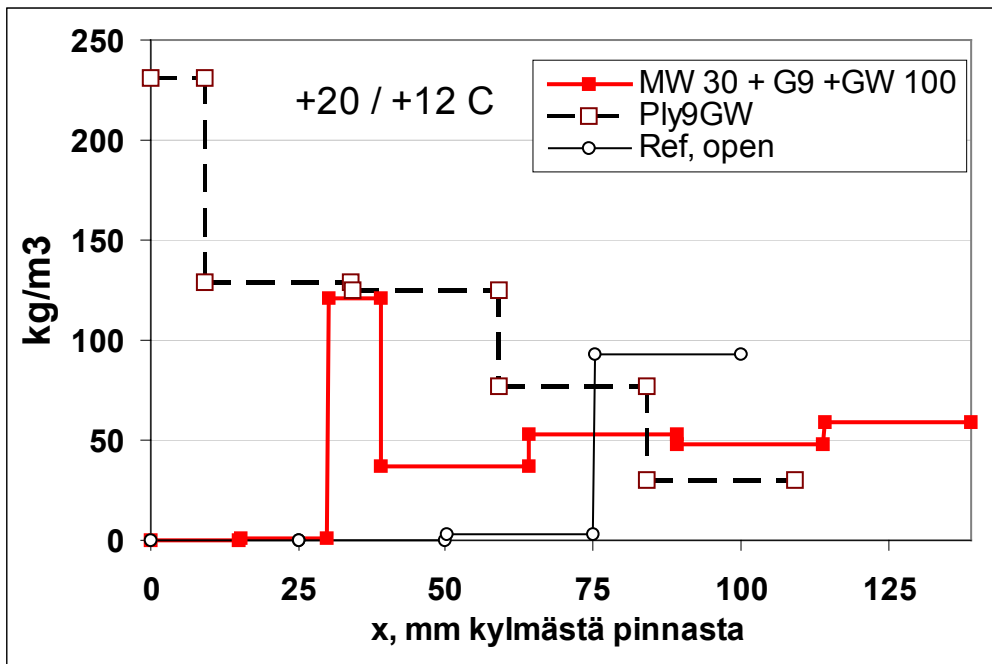
Rakenneleikkausten kosteusjakaumat määritettiin purkamalla valittuja rakenteita eri mittaajaksien jälkeen (kuvat 6–9). Lämmöneristekerrokset jaettiin noin 25 mm:n paksuisiin kerroksiin, ja muut kerrokset punnittiin kokonaispaksuudessaan ennen ja jälkeen kuivatuksen. Kosteusjakaumat antavat kuvan siitä, mihin kohtaan rakennetta kosteus kertyy kuivumisen aikana ja kuinka suuriksi paikalliset kosteuspitoisuudet nousevat. Paikalliset kosteuspitoisuudet kuvaavat kosteusriskin sijoittumista ja antavat osittain kuvan myös niiden suhteellisesta riskistä.

4.3.3 Johtopäätökset

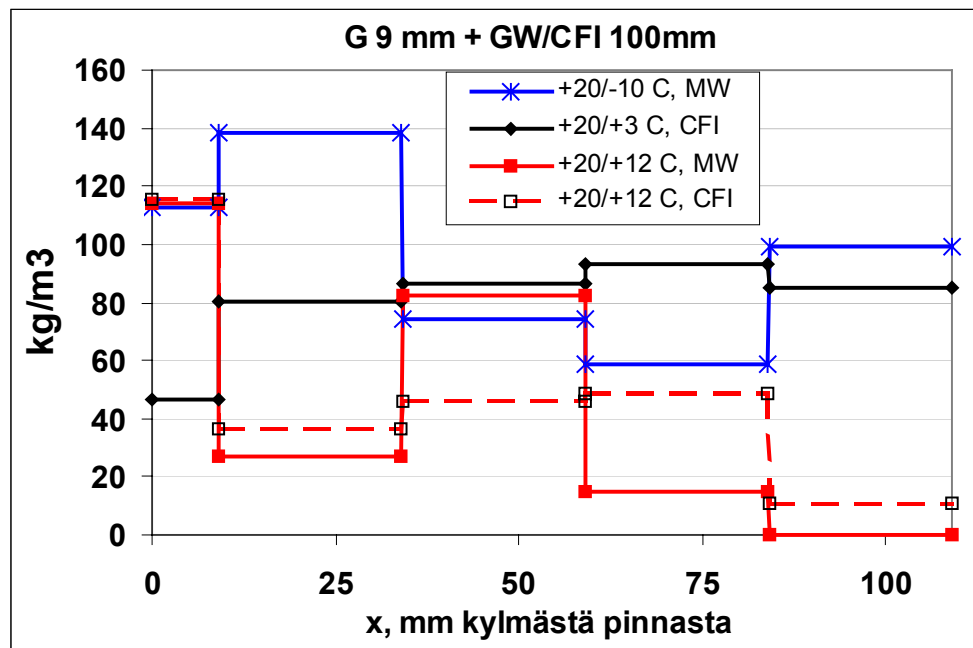
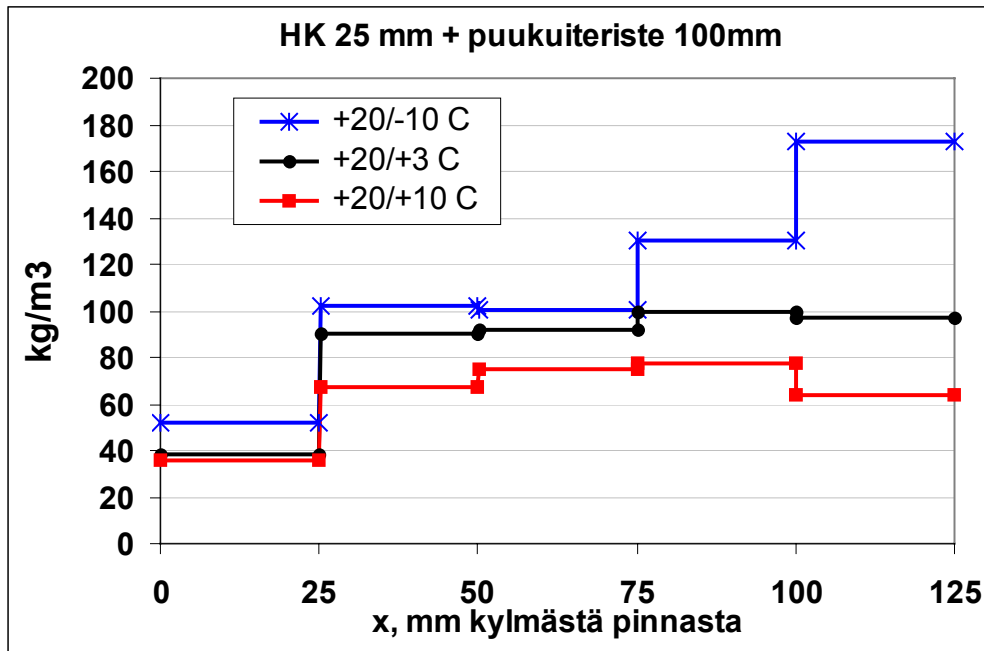
Kokeissa käytetty kosteusmäärä oli suuri ja kuivumisajat siten kaikissa tapauksissa pitkät, mutta kuivumisolot vastasivat hyvin todellisia.

Tutkittujen rakenteiden kuivumisnopeudessa oli oletetusti suuria eroja. Tuulensuojan tai vastaavan materiaalikerroksen vesihöyrynläpäisevyys käyttöoloissa (kondenssialueen lähellä ja myös jäätymisalueella) on rakenteen kuivumiskyvyn kannalta ratkaiseva. Suurempi kuivumiskyky parantaa rakenteen kykyä selviytyä ylimääräisen kosteuden aiheuttamista riskeistä. Kosteuden aiheuttamat riskit liittyvät ensimmäisessä vaiheessa rakenteen homeutumisherkkyyteen, joka riippuu materiaaleista kuivumisen kannalta kriittisissä kohdin, yleensä tuulensuojan ja lämmöneristeen rajapinnalla. Homeutumisen riski riippuu lisäksi kriittisen kohdan lämpötilaoloista.

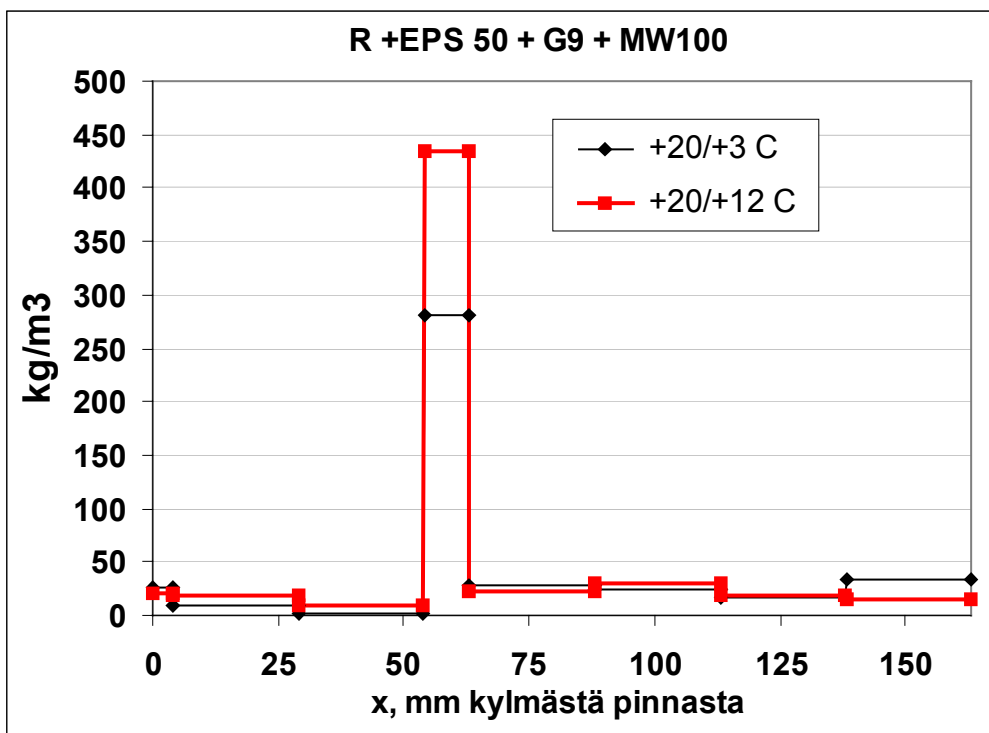
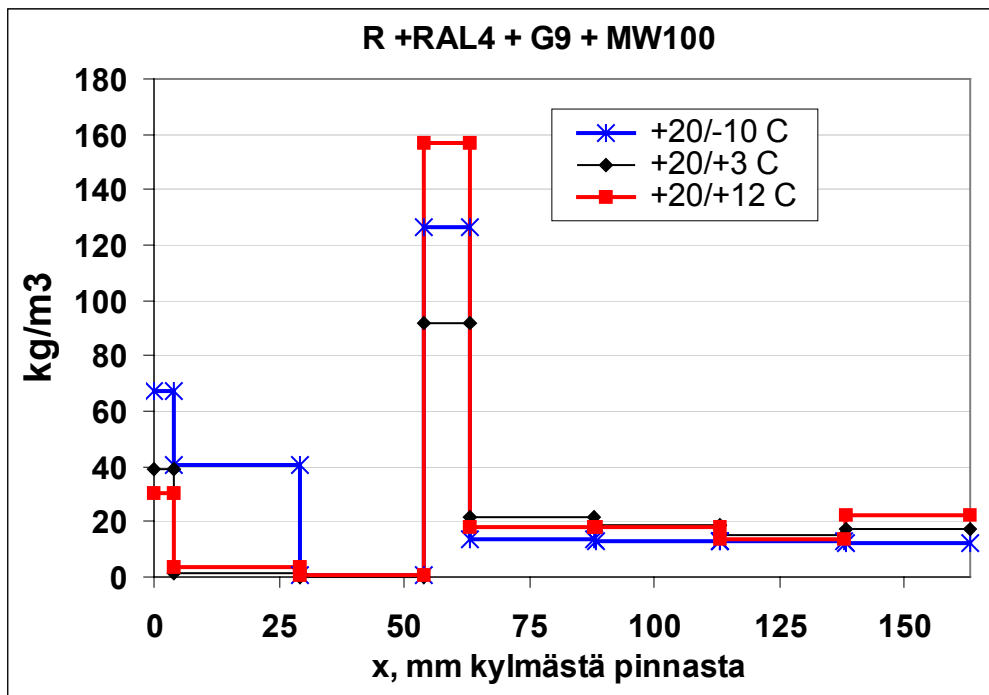
Home ei varsinaisesti vaurioita rakenteita vaikka se muuttaakin kasvualustansa pinnan ulkonäön. Rakenteen sisäkerroksissa tällä taas ei ole merkitystä. Olennaista on, alkaako homehtumista ylipäänsä tapahtua rakenteen sisällä ja pääseekö rakenteen sisällä oleva home vaikuttamaan sisäilman laatua heikentävästi. Suuret kosteuspitoisuudet ja pitkäaikainen kosteusrasitus voi edelleen johtaa rakenteen vaurioitumiseen, joka ilmenee mm. lahona, jäätymis-sulamissykliä aiheuttamana rapautumisena, korroosiona jne.



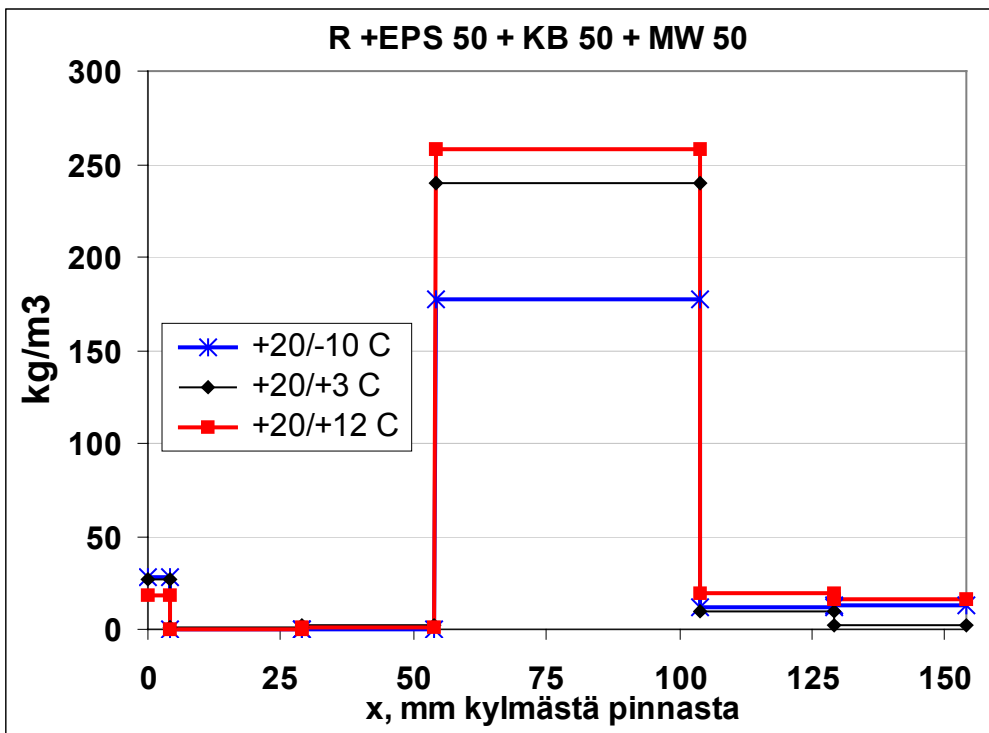
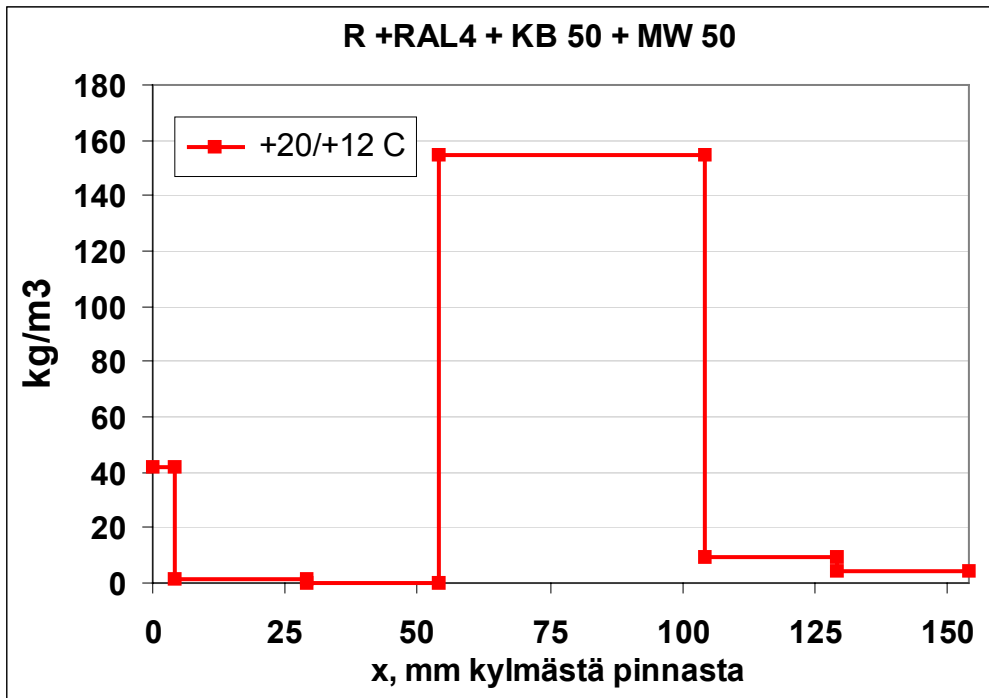
Kuva 6. Kosteusjakaumat avoimessa referenssirakenteessa, ulkopuolelta eristetyssä kipsituulensuojarakenteessa ja vanerituulensuojatapauksessa.



Kuva 7. Kosteusjakaumat seinissä, joissa on 25 mm tuulensuojan huokoinen puukuitulevy (yllä) tai 9 mm kipsilevy (alla). Kipsilevyn tapauksessa lämmöneristeenä oli joko lasivilla tai puukuitueriste.



Kuva 8. Kosteusjakaumat ulkopuolisen eristerappauksen tapauksissa, kun ulko- ja sisäpuolisen lämmöneristeen välissä on 9 mm kipsituulensuoja. Rappauksen takana oli joko mineraalivillaeriste (yllä) tai EPS.



Kuva 9. Kosteusjakaumat ulkopuolisen eristerappauksen tapauksissa, kun ulko- ja sisäpuolisen lämmöneristeen välissä on 50 mm kevytbetonikerros. Rappauksen takana oli joko mineraalivillaeriste (yllä) tai EPS.

Hitaasti kuivuvien rakennetapausten vesihöyrynvastus toimii myös toiseen suuntaan, ts. se rajoittaa ulkopuolelta rakenteeseen tulevia kosteusvirtoja. Siten eristerappausten tapauksissa kosteuden siirtyminen sateella kastuneen rappauspinnan kautta rakenteeseen on hyvin pientä, mikä johtuu rappauskerroksen suhteellisen suuresta vesihöyrynvastuksesta. Lisäksi tähän vaikuttaa rappauksen takana olevan lämmöneristeen vesihöyrynvastus.

EPS-lämmöneriste rappauksen sisäpuolella rajoittaa kosteuden siirtymistä sekä sisään että ulospäin. Mineraalivillaeristeistä tapausta pienemmän kuivumisnopeuden vastapainona on pienempi kosteusvirtaus rappaukseen ja pienempi riski rappauksen ja lämmöneristeen rajapinnan kosteuskertymästä kuivumistilanteessa. Kosteuden paikalliset maksimit olivat tässä tapauksessa pääosin rappauksen ja EPS-kerroksen sisäpuolella, jossa esimerkiksi jäätymis-sulamissyklejä esiintyy huomattavasti vähemmän kuin rakenteen ulkopinnassa.

Tarvittava kuivumiskyky riippuu mm. rakenteen rakentamisen jälkeisen tilanteen kuivaustarpeesta, sisäilman kosteuskuormituksesta, materiaalien herkkyydestä ylimääräisen kosteuden vaikutuksille, kosteuden kannalta kriittisistä kohdista rakenteessa ja kosteuskajakaumasta kuivumisen aikana sekä ulkoilman kosteuskuormituksen edellyttämästä suojaustarpeesta, joka voi olla ristiriidassa kuivumiskyvyn kanssa. Parhaimman kuvan näiden tekijöiden yhtäaikaisesta toiminnasta saa laskennallisen tarkastelun avulla, jossa otetaan huomioon kuivumiskyky arvioitujen muiden kuormien ja sään aiheuttaman rasituksen kanssa.

5. Viistosateen määrän arviointimenetelmät

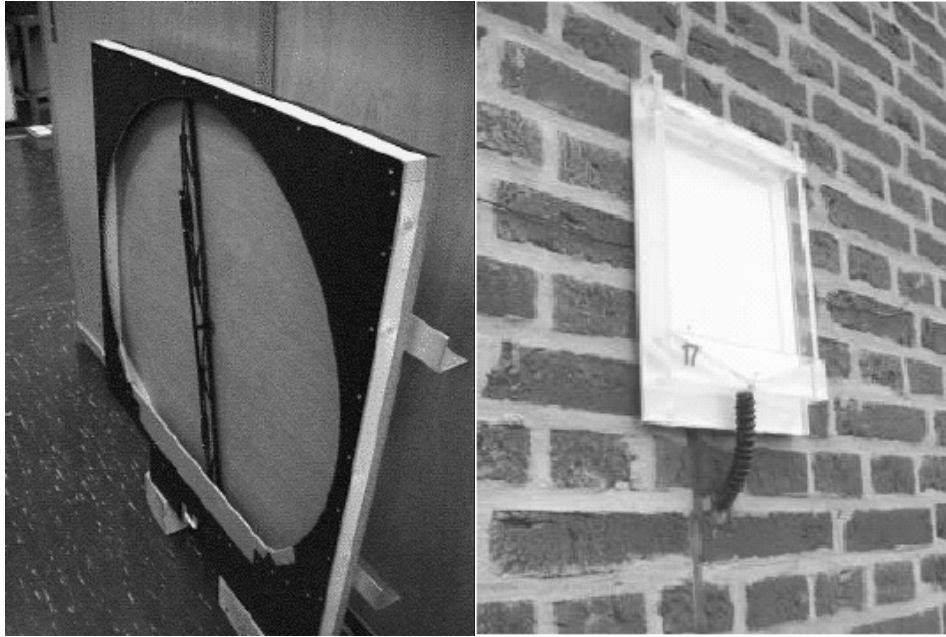
Viistosade on yksi tärkeimmistä rakennuksen kosteustekniseen toimivuuteen vaikuttavista kosteudenlähteistä. Viistosateen aiheuttama veden valuminen pinnoilla aiheuttaa pääasiassa esteettisiä vaurioita julkisivuun. Veden tunkeutuminen julkisivuun tai jopa julkisivun läpi sen alla oleviin rakenteisiin voi aiheuttaa vakavampia rakenteellisia ongelmia. Viistosateen käyttäytyminen tulee tuntea, jotta siltä voitaisiin suojautua parhaalla mahdollisella tavalla.

5.1 Viistosade rakennuksen vaipan eri osissa

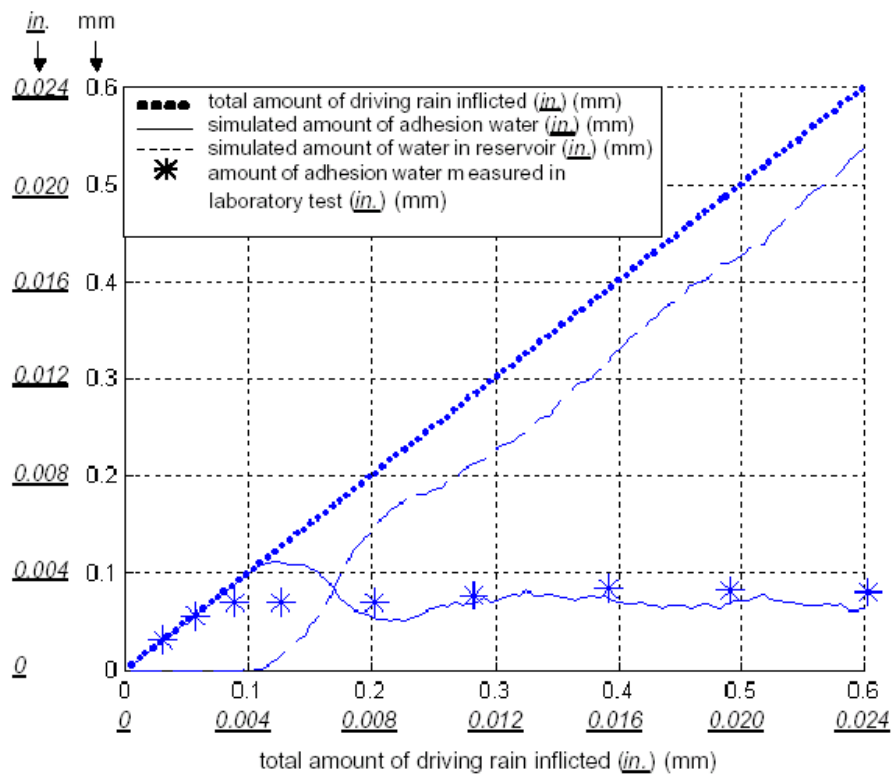
Rakennuksen vaipan eri osat saavat erilaisen viistosadekuormituksen, mikä johtuu rakennetta suojaavista esteistä (räystäistä, toisista rakennuksista ym.), jotka ohjaavat tuulta ja mahdollisesti estävät sateenvarjon lailla viistosadetta osumasta rakenteen pinnalle. Valumavedet vettä absorboimattomilta pinnoilta (ikkunat, räystäät ym.) voivat tuulen paineen ja tuulenpuuskien vaikutuksesta lisätä paikallista sadekuormitusta tiettyjen rakenteiden osalta.

5.2 Mittausmenetelmät kentällä ja laboratoriossa

Viistosateen mittaukseen käytetään erityyppisiä seinään asennettavia mittakulhoja tai vastaavia, eikä niiden valmistukseen ole olemassa mitään standardia, vaan tutkijat rakentavat usein omat laitteensa, jolloin mittalaitteita on yhtä monta kuin on tutkijoitakin. Kuva 10 on yksi esimerkki tällaisesta mittalaitteesta. Mittalaitteiden virheet aiheutuvat usein siitä, että kaikki vesi ei valu mittauskulhoon vaan jää erityisesti heikommilla sateilla adheesion vaikutuksesta pintaan ja haihtuu siitä pois, jolloin tätä vettä ei kerätä ja vesimäärä jää mittaamatta. Virheen selvittämiseksi on tehty mittalaitteita, joissa on esimerkiksi käytetty tuulilasinpyyhkijöitä pintaan kerääntyneen kosteuden rekisteröimiseksi. Erityisen virhealttiiksi adheesion liittyvän kosteuden virheen osalta on todettu teflonpintaiset kerääjät. Plexipintaiset kerääjät ovat tämän suhteen toimineet paremmin. Hydrofobiset materiaalit (esim. teflon) ovat tämän pinta-adheesion vuoksi altteimpia mittausvirheille. Kevyt sade – alle 0,1 mm – jää kokonaan havainnoimatta, ellei vettä kerätä pinnalta erikseen. Mittalaitteiden virheet ovatkin yleensä viistosadetta aliarvioivia, eli todellinen viistosade on todennäköisesti mitattua hieman suurempi.



Kuva 10. Esimerkki seinään asennettavasta viistosateen mittalaitteesta [12]. Vasemmallalla pinnalta pyyhkivä malli [13].



Kuva 11. Kulhosta keräävän mittalaitteen ja lisäksi mittalaitteen pinnalta keräävän mittalaitteen mittaustulosten erot. Virheen suuruus on n. 0,008 mm/m², mikäli pinnalle adheesivoimin jäänyttä vettä ei kerätä erikseen [14].

5.3 Laskentamenetelmät

Jos oletetaan, että sadepisarat ovat kaikki samankokoisia ja ilmavirtaukset ja sade ovat vakiintuneessa tilassa, voidaan pystysuoran pinnan läpi menevä viistosade laskea kaavalla

$$R_v = R_h \cdot \frac{V}{V_t} \quad (1)$$

missä R_v on viistosateen intensiteetti (mm/h), R_h on vaakapinnalle tuleva sateen intensiteetti (mm/h), V tuulen nopeus kohtisuoraan pintaa vasten (m/s) ja V_t sadepisaran putoamisnopeus (m/s). Tämä kaava kuvastaa ns. vapaata viistosadetta eli mikään rakenne tai virtauseste ei häiritse viistosadetta.

Lacy kehitti ns. viistosadeindeksin [16, 17] ja täsmensi edellä olevaa yhtälöä luomalla empiirisiin kokemuksiin perustuvan korrelaation pisaran keskimääräiselle koolle ja jakaumalle ja sen putoamisnopeudelle

$$R_v = 0.222 V \cdot R_h^{0.88} \approx 0.222 V \cdot R_h \quad (2)$$

Tämä yhtälö tarkoittaa sitä, että sateen puuska koostuu pääasiassa pisaroista, joiden putoamisnopeus on $V_t = (1/0,222) \text{ m/s} = 4,5 \text{ m/s}$, mikä vastaa pisarakokoa 1,2 mm. Tämä on realistinen arvo kohtuullisille sateen intensiteeteille. Straube and Burnett määrittivät kirjallisuuden ja mittausten perusteella viistosadekertoimen olevan 0,20:n ja 0,25 s:n/m välillä keskimääräisille olosuhteille, mutta eri sateen intensiteeteille ja myrskysateille arvo voi vaihdella 0,5 s:sta/m (kevyt sade) ja 0,1 s:iin/m intensiivisille sateen puuskille (vastaavat 0,5 mm:n ja 5 mm:n pisarakokoa).

Tuulen virtaukset rakennuksen ympärillä aiheuttavat tuulen ja sadepisaroiden suunnan vaihteluita, mistä johtuen viistosateen määrä rakennuksen pinnalla on erilainen kuin vapaassa tuulen virtauksessa. Tämän arvioimiseksi on kehitetty ns. viistosadekerroin, joka ottaa huomioon rakenteelliset ja tuulen virtauksen vaikutukset rakennuksen pintaan osuvan viistosateen määrään. Viistosateen määrä voidaan esittää muodossa

$$R_v = \alpha \cdot V \cdot R_h \cdot \cos\theta \quad (3)$$

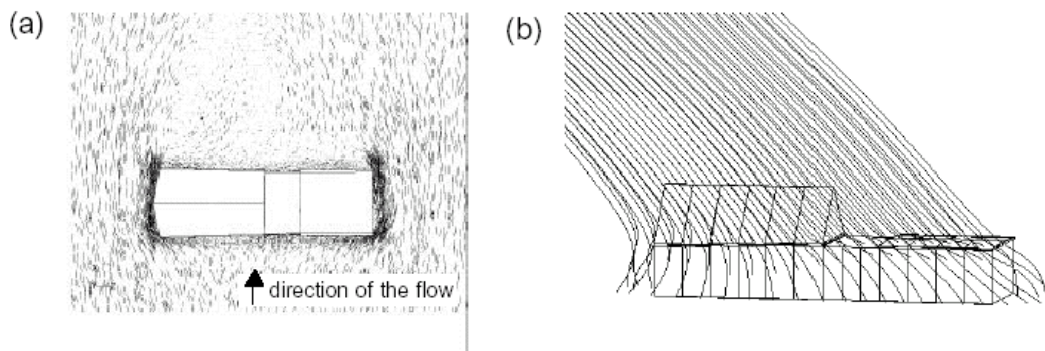
missä

α on viistosadekerroin ja

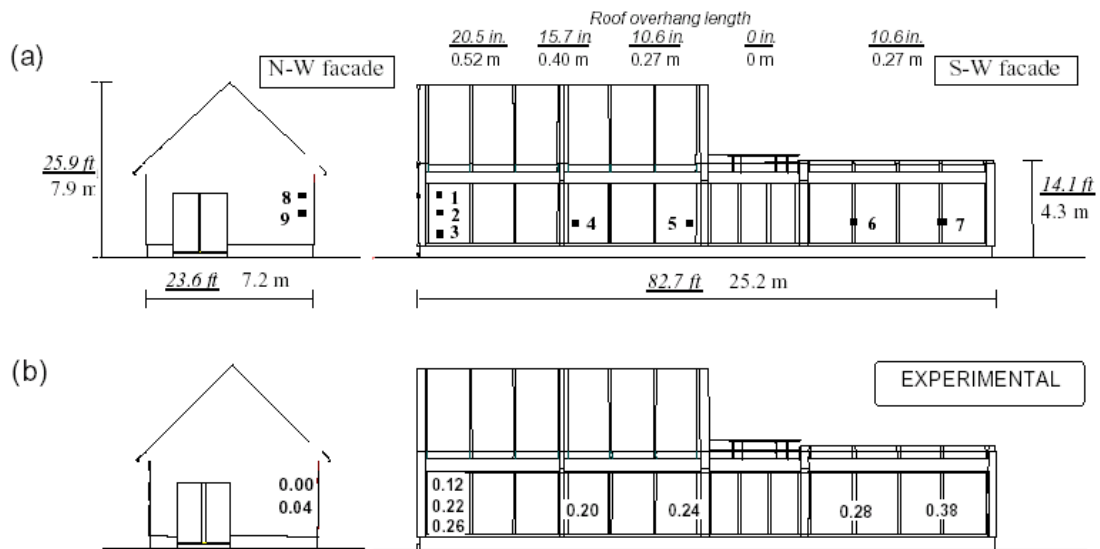
θ on kulma viistosadetta tuovan tuulen suunnan ja seinäpinnan normaalin välillä.

Tämän kaavan heikkous on viistosadekerroimen määrittäminen, koska koko viistosateen kompleksisuus on yhdistetty tähän yhteen kertoimeen. Tämä kerroin vaihtelee rakennuksen eri osissa ja se tulisi määrittää joko lyhytaikaisilla mittauksilla tai kokemusten perusteella. Kertoimen tulisi lisäksi kuvata keskimääräistä toimivuutta. Viistosadekerroin vaihtelee merkittävästi rakennuksen koon mukaan sekä eri osissa rakennuksen seinäpintaa: 0,02 s/m – 0,26 s/m.

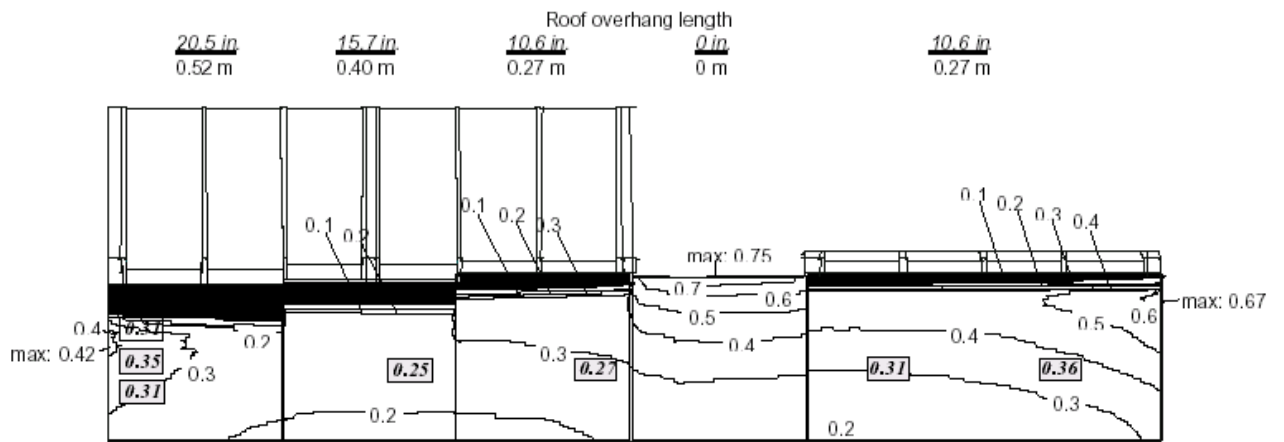
Viistosateen käyttäytymistä on mahdollista arvioida myös laskennallisesti kolmiulotteisilla ilmapvirtauslaskentaohjelmilla (CFD-laskenta). Kuva 12 on esimerkki tuulen pyörteilystä ja sadepisaroiden radoista eräässä laskentatapauksessa (KU Leuven). Kuva 13 esittää mitatut viistosadekerroimet kyseiselle tapaukselle ja kuva 14 CFD-laskennassa saadut tulokset.



Kuva 12. CFD-laskennan hyödyntäminen viistosateen arvioinnissa. Tuulen ilmapirtaukseen syötetään sadepisaroita vastaavia partikkeleita. Partikkeleiden kulkeutuminen ilmapirran mukana lasketaan ja iskeytyminen pintoihin rekisteröidään.



Kuva 13. Mitatut viistosadekertoimet rakennuksen seinäpinnoilla.



Kuva 14. CFD-laskentaohjelmalla lasketut viistosadekertoimet rakennuksen vaipan eri osille.

5.4 Yhteenveto viistosateen arviointimenetelmistä

Viistosadetta mitataan harvoin muuhun kuin tutkimustarkoitukseen. Viistosateen mittaamisessa virhemahdollisuudet ovat suuret. Empiirisillä menetelmillä voidaan arvioida keskimäärin odotettavissa oleva viistosateen määrä rakennuksen julkisivuilla. Tämä ei kuitenkaan riitä, kun tarvitaan keskimääräistä yksityiskohtaisempaa tietoa rakenteen osien viistosaderasituksista. Numeerisilla menetelmillä voidaan tuottaa tätä yksityiskohtaisempaa tietoa rakennedetaljien vaikutuksista. Laskennallisten menetelmien soveltaminen on kuitenkin hyvin vaativaa, eikä niitä tavanomaisissa tapauksissa ole tarpeen käyttää.

Empiiristen ja numeeristen menetelmien käytön edellytyksenä on hyvä tietämys tuulesta ja sateesta rakennuksen ympärillä. Käytännössä on havaittu, että paikallisten olosuhteiden ja tarkastelukohteen lähellä olevan sääaseman olosuhteiden välillä voi esiintyä suuria eroja. Paikalliset maan pinnan vaihtelut ja esteet vaikeuttavat asiaa vielä entisestään.

6. Sateenpitävyyden kokeellinen tutkimus

6.1 Kokeiden tavoitteet

Kokeiden tavoitteena oli selvittää, miten VTT:n Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan yksikön ilmatekniikan mittausvalmius soveltuu rakenteiden sateenpitävyyismäärittelyyn. Käytetty laitteisto on tarkoitettu pääasiassa ilmanvaihtolaitoksen raitisilmasäleikköjen sateenpitävyyden testaukseen.

Tyypillisissä sateen tunkeutumisen testauslaitteistoissa tutkittavan rakenteen ylitse tuotetaan paine-ero, jonka vaikutuksesta rakenteen ulkopintaa suihkutettu vesi voi tunkeutua rakenteen sisään. Tämän edellytyksenä on, että rakenteen läpi voi olla ilmavuotoa. Nyt tutkimuksessa käytetyn laitteiston erona tyypillisiin laitteistoihin verrattuna on, että tutkittavan rakenteen ulkopinnalle aiheutetaan ulkopuolisella ilmavirtauksella patopaine ja painegradientti rakenteen pinnan suunnassa, mikä vastaa paremmin tuulen aiheuttamaa tilannetta. Tällöin rakenteen kokonaisilmatiivisyys ei vaikuta veden tunkeutumisriskiin esimerkiksi uloimman tuuletusraon tai muiden uloimpien rakennekerrosten läpi.

Tavoitteena oli tutkia tuulen paineella tuotetun painekentän vaikutusta sadeveden tunkeutumiseen rakenteisiin ja yleensä rakenteiden kosteuspitoisuuksia rankan tuuli- ja sadejakson jälkeen.

6.2 Koejärjestelyt

Kuva 15 esittää kokeissa käytetyn laitteiston periaatteen.

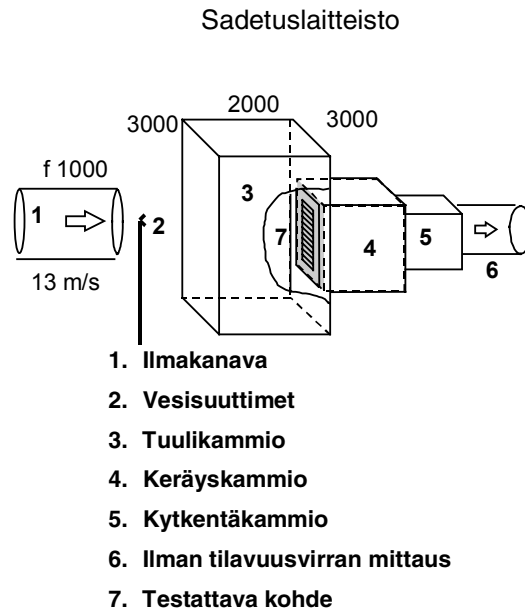
Koerakenteeseen kohdistuva tuuli johdetaan ϕ 1 000 mm:n kanavan kautta suojakammion takaseinän keskelle asennettua (1 x 1 m²:n) koeseinää päin. Kanavan edessä on neljä vesisuutinta, jotka aukeavat vuorotellen tuottaen vaihtelevan pisarakoon ilmavirtausta.

6.3 Kokeissa tutkitut rakenteet

Kokeissa tutkitaan neljää rakennetta:

1. eristerappausseinää (ehjää)
2. eristerappausseinää, jossa pintavaurio,
3. peltielementtijulkisivua
4. pinnoitettua tuulensuojavillaa ilman ulkoverhousta.

Eristerappausseinän rappausvaurio aiheutettiin lyömällä vasaralla rappausta siten, että rappaus painui iskun osumiskohdasta 2–3 mm muuta pintaa sisemmäs mutta kuitenkin niin, ettei rappaukseen syntynyt selvää rakoa.



Kuva 15. Sateenpitävyyuskokeiden mittausjärjestelyt.

6.4 Koeohjelma

Kokeissa rakenteen pintaa kohdistuu jatkuva tuuli- ja sadekuormitus. Tuulen virtausnopeutta nostettiin kokeen kuluessa noin 7 m/s alkutasolta (rakenteen edessä) 10 m/s nopeuteen ja edelleen noin 13 m/s lopputasoon (taulukko 3). Ilmakanavan halkaisija oli 1 000 mm, joten virtaamat eri kokeissa olivat noin 5,5, 8 ja 10 m³/s. Kahdelle suurimmalla virtausnopeudella käytettiin suoran kanavapuhalluksen lisäksi ns. dynaamista puhallusta, jossa kanavaan oli asennettu yläosastaan kanavan sisäseinämään liikkuvasti kiinnitetty läppä. Läpän avulla suora virtaus muuttui jo kanavan päässä dynaamisesti vaihtelevaksi ja painekenttä koeseinän kohdalla vaihteli voimakkaasti, minkä arvioitiin kasvattavan viistosateen aiheuttamaa tunkeutumiseriskää seinään.

Taulukko 3. Eri rakennetapausten kokeissa käytetyt tuulen nopeudet ja rasitusajat eri tilanteille. Veden suihkutuspaine oli joka kokeessa noin 100 kg/h. Dynaamisissa tapauksissa paine- ja virtauskentän muoto vaihteli voimakkaasti.

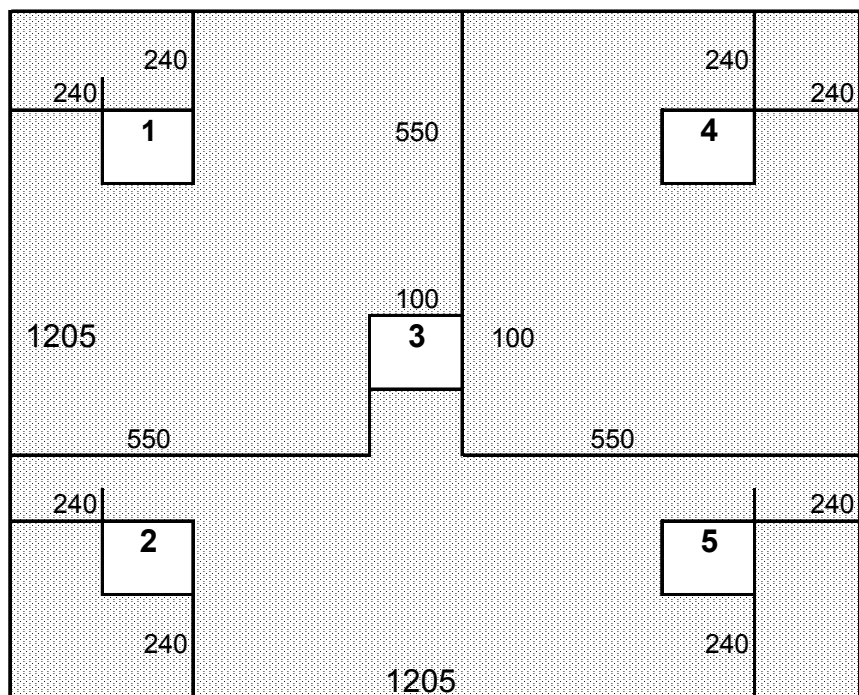
Rakenne	Ilman virtausnopeuksien rasitusajat, h				
	7 m/s	10 m/s	10 m/s dyn	13 m/s	13 m/s dyn.
Eristerappaus	1	1	1	1	18
Peltijulkisivu	–	1	–	1	2
Tyvek	–	1	–	1	4
Eristerapp.vaurio	1	1	1	1	20

6.5 Mittaussuureet

Jokaiseen koeseinään asennettiin kaksi omavoimaista tiedonkeruuyksikköä, jotka mittaavat paikallista suhteellista kosteutta. Sadeveden tunkeutuminen selvitettiin ns. kondenssiantureita käyttäen. Kondenssiantureita asennettiin kuusi joka rakenteeseen. Nämä anturit reagoivat niiden pintaan tulevaan veteen, jolloin pienikin vesimäärä rakenteessa näkyi mittauksissa. Ennen ja jälkeen kokeen rakenteet punnittiin niiden kokonaiskosteyden muutoksen selvittämiseksi. Kokeen lopuksi rakenteet purettiin ja eri materiaalikerrosten kosteusjakaumat selvitetään punnitsemalla valituista kohdista otetut näytteet.

6.6 Kalibrointikokeet

Kalibrointikokeet tehtiin koetilanteita vastaaville ilmavirtausnopeuksille, ja veden suihkutuspaine oli niin ikään sama kuin varsinaisissa kokeissa, noin 100 kg/h. Koeseinien mittausalueelle sijoitettiin viisi keruustastia, joiden vapaan aukon koko oli 100 mm x 100 mm (kuva 16). Näihin kertynyt vesi punnittiin eri koetilanteissa ja kertymä esitetään tunnissa pinta-alayksikköä kohti skaalattuna (taulukko 4).



Kuva 16. Kalibrointikokeiden vedenkeräysastioiden sijoittelu koeseinän mittausalueelle.

Taulukko 4. Kalibrointikokeissa mitattujen vesimäärien kertymät viiteen eri kohtaan koerakenteen mittausalaa.

Koetilanne	Kosteuskertymä eri mittauskohtiin, kg/(h m ²)				
	Kohta 1	Kohta 2	Kohta 3	Kohta 4	Kohta 5
7 m/s	2	9	7	3	6
10 m/s	2	76	10	3	32
10 m/s dyn.	3	102	15	3	40
13 m/s	24	132	138	7	98
13 m/s dyn.	46	90	68	4	220

Veden kertymässä eri kohdille koeseinän alaa oli suuria eroja erityisesti kahdella suurimmalla ilman virtausnopeudella. Veden kerääntyminen toiseen ylemmistä keräysastioista säilyi lähes samalla tasolla kaikissa tilanteissa, kun taas toiseen ylemmistä astioista alkoi vettä kertyä 13 m/s tuulen nopeudella. Ilman virtausnopeudella 10 m/s suurin kertymä oli kohtaan 2 (vasen alanurkka) sekä suoralla puhalluksella että dynaamisessa paineenvaihtelutilanteessa. Oikean alaosan kertymä oli tässä tilanteessa noin 40–50 % toisen puolen kertymästä, ja keskelle rakennetta kertyi selvästi vielä vähemmän kuin alempiin kohtiin.

Jos sade jakautuisi tasaisesti vain koeseinän alueelle (noin 1 m²:lle) ja suuntautuisi kohti seinää, olisi keskimääräinen viistosademäärä noin 100 kg/(h m²). Koska keräilyastiat olivat jonkin verran seinäpintaa ulompana, kohdistuu viistosade niihin ilmeisesti voimakkaammin kuin seinäpinnan tasoon. Mittaukset antavat kuitenkin kuvan viistosateen jakaumasta seinän pinnan lähellä.

Kun virtausnopeus nostettiin tasolle 13 m/s, ylitti keskikohdan kosteuskertymä suorassa puhalluksessa alempien vastaavan. Dynaamisessa tilanteessa oikean puolen alaosan kertymä sai suurimman arvon, joka oli 2,2-kertainen suoran puhalluksen antamaan kertymään samassa paikassa ja 60 % suurempi kuin keskikohdan kertymä suorassa puhalluksessa. Dynaamisessa tilanteessa vasemman puolen alaosan kertymä aleni yli 30 % suoran puhalluksen tasosta ja keskikohdan tasosta jopa lähes 50 %.

Tulokset kuvaavat viistosateen aiheuttamaa kosteuskuormitusta rakenteen ulkopinnalle ja sitä, kuinka se riippuu voimakkaasti tuulen nopeudesta ja lisäksi (dynaamisen) painekentän aiheuttamista, paikallisesti voimakkaista virtauksista. Täsmällisen viistosateen kosteuskuormituksen aikaansaaminen on vaikeaa, ja lisäksi tilanne ei ole suoraan verrattavissa käytännön oloihin, joissa painekenttä riippuu voimakkaasti ympäröivien rakenteiden ja muiden virtausta ohjaavien muiden tekijöiden vaikutuksesta eikä siten ole tarkasti kuvattavissa yleispätevästi.

Voimakas dynaaminen virtaustilanne kuvanee parhaiten myrskysään aiheuttamia olosuhteita rakenteeseen tapahtuvan veden paikallisen tunkeutumiskin arvioimiseksi.

6.7 Varsinaiset kokeet

Rakenteiden periaatepiirroksat ja instrumentointi esitetään kunkin tuloskuvan yhteydessä.

Kokeiden lopussa määritettiin rakenteiden kokonaiskosteudet ja paikalliset kosteudet valituista kohdista. Taulukko 5 esittää kokonaiskosteudet ja paikallisen suurimman kosteuden esiintymispaikan ja kosteuspitoisuuden (% kuivapainosta). Kokonaisuutena rakenteisiin päässeet kosteusmäärät olivat varsin pieniä. Erilaisista rasitusajoista johtuen kosteustasot eivät ole keskenään vertailukelpoisia. Lähinnä vertailukelpoinen tekijä on suurimman kosteuden esiintyminen. Kaikissa kokeissa suurimmat kosteudet löytyivät rakenteen alaosasta.

Kosteuden vuodossa rakenteeseen voitiin havaita myös koejärjestelyistä johtuvia tekijöitä, esimerkiksi ehjän eristerappausseinän tapauksessa oli havaittavissa selvä vesivuoto rakenteen kehyksen ja varsinaisen rakenteen välillä, jonka vaikutus siis sisältyi myös mitattuun kokonaiskosteustasoon.

Kokeen aikaisina mittaustuloksina esitetään tuulensuojan molemmin puolin sijoitettujen suhteellisen kosteuden anturien mittaustulokset ja kondenssianturien osoittamat kondenssin havaitsemisajankohdat.

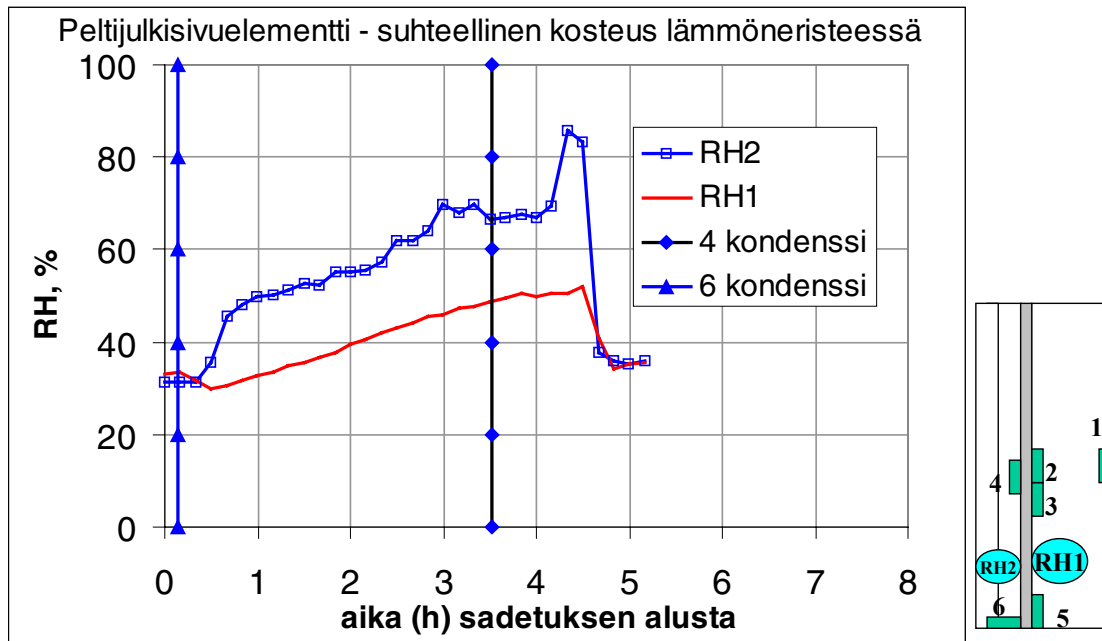
Peltielementtijulkisivun (kuva 17) ilmatilan suhteellinen kosteus nousi kokeessa vain 85 %:n RH tasolle, vaikka ilmavälin alaosan kondenssianturi havaitsi vapaata vettä jo alle kymmenessä minuutissa sadetuskokeen alusta. Ilmeisesti vesi tunkeutui elementin saumoista pieninä pisaroina, jotka aiheuttivat kondenssin anturin kohdalle ilmatilan kosteuden ollessa keskimäärin selvästi kondenssiolosuhteita alemmalla tasolla. Rakenteen kokonaiskosteus kasvoi kokeessa 1,36 kg, josta pääosa oli kasetin alaosassa vapaana vetenä. Koerakenteen normaalista rakenteesta poikkeavan rakenteen takia vesi ei päässyt poistumaan elementin alaosasta. Kertynyt kosteusmäärä kuvaa saumojen läpi tullutta vettä.

Taulukko 5. Rakenteiden mitatut kokonaiskosteut ja valitusta mittauskohdista suurimman paikallisen kosteuden esiintymispaikka ja kosteustaso.

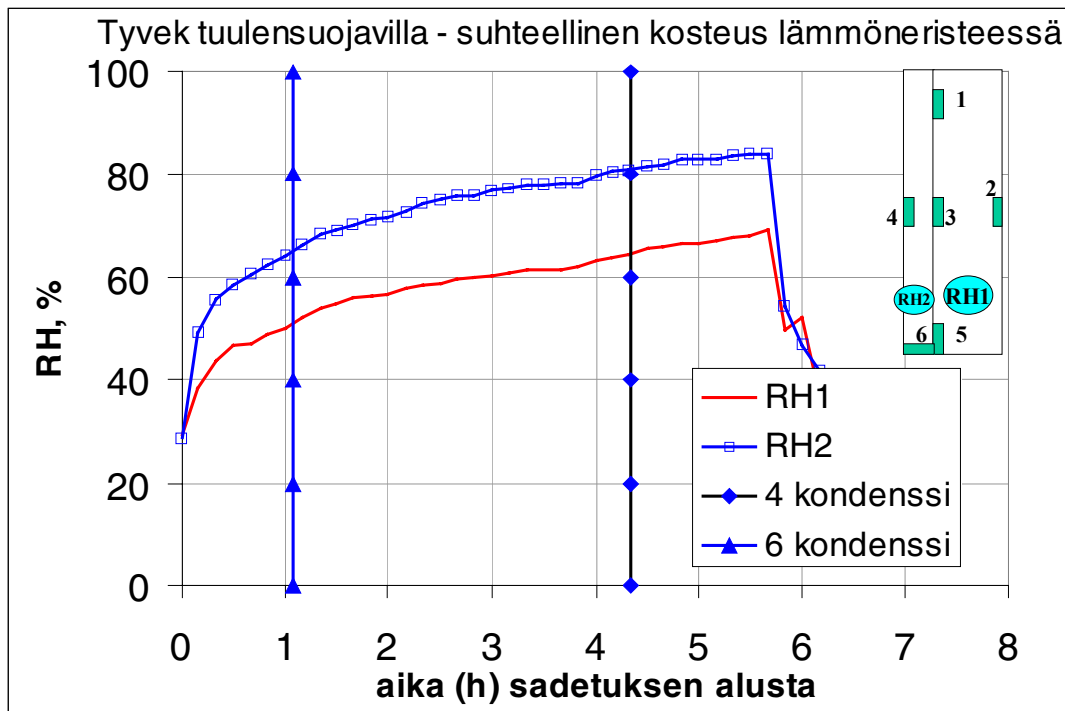
Rakenne	Kosteusmäärä kokeen lopussa, kg	Suurin paikallinen kosteus	
		Sijainti	% (paino)
Peltielementtijulkisivu	1,36	Kipsilevytuulensuoja, alaosa	26
Pinnoitettu tuulensuojavilla ilman ulkoverhousta	0,59	Tuulensuojavillan alaosa	27
Eristerappausseinä, ehjä	2,42	Rappaus, alaosa	25
Eristerappausseinä, vaurio ulkopinnassa	1,81	Rappaus, alaosa	23
		Kipsilevytuulensuoja, alaosa	31

Kun rakenteessa oli Tyvek-tuulensuojakalvolla pinnoitettu tuulensuojavilla ilman ulkoverhousta (kuva 18) ja pinnoitteen saumat olivat teipatut, oli veden tunkeutuminen lyhyen koejakson aikana rakenteeseen vähäistä. Kokonaiskosteus kasvoi 0,6 kg, ja suurin osa kosteudesta löytyi tuulensuojavillan alaosasta.

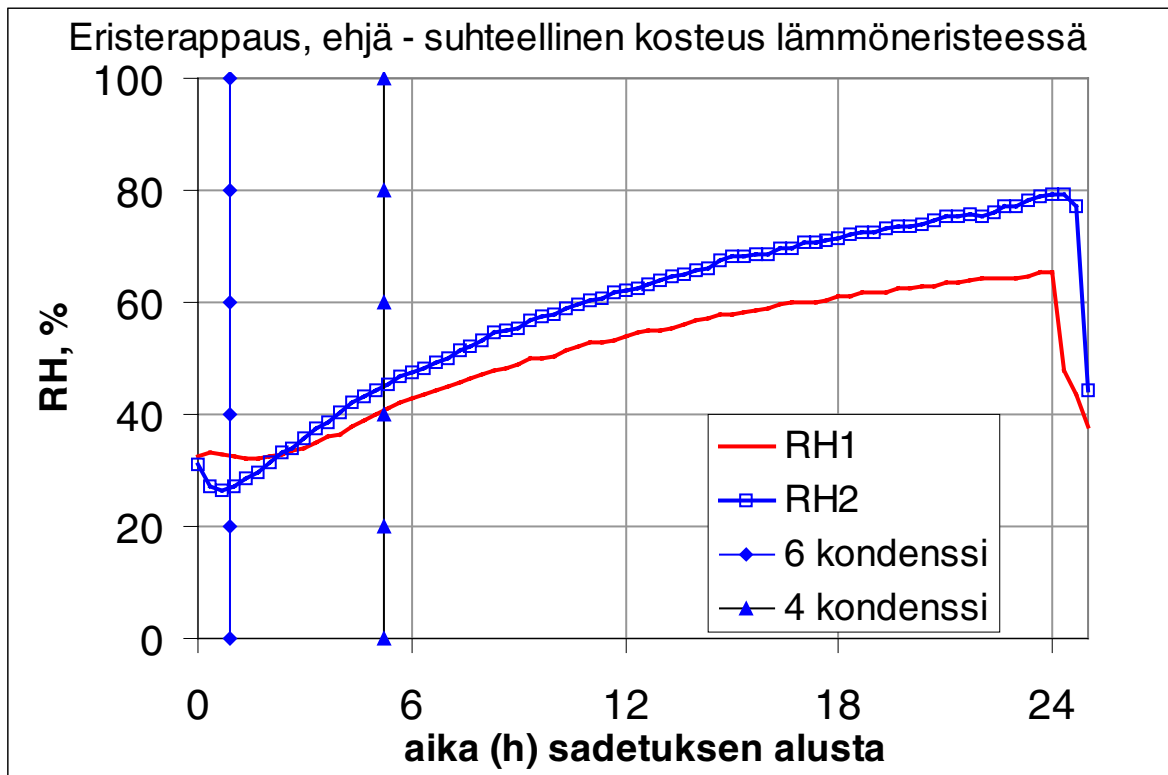
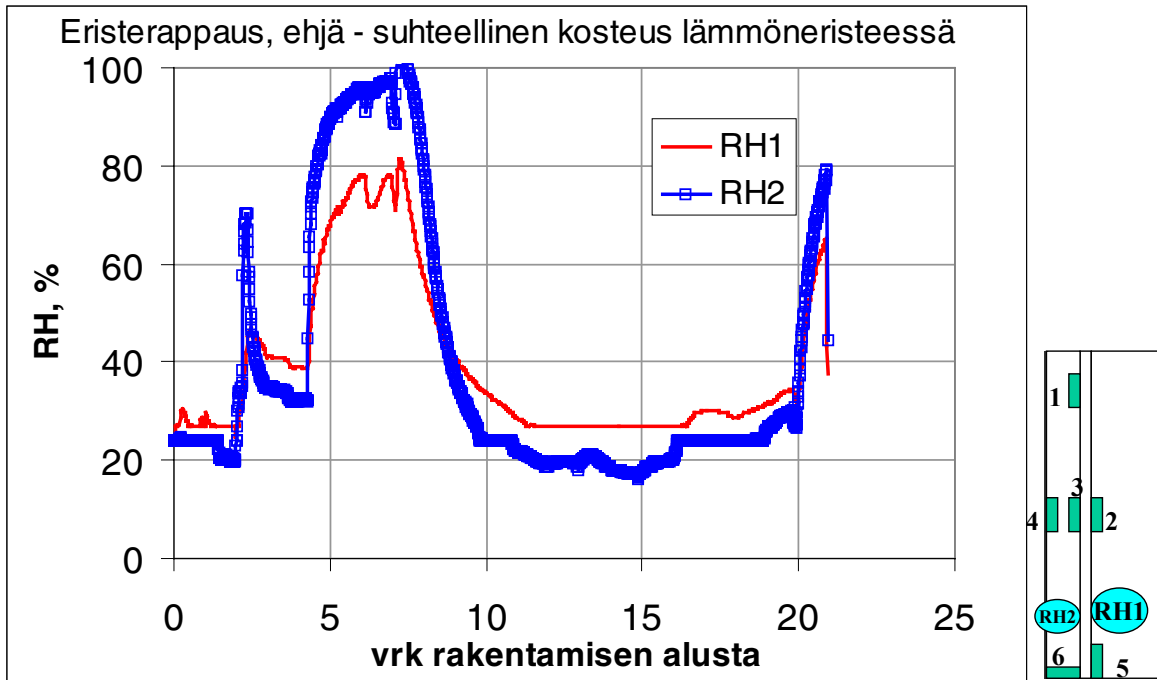
Eristerapatuissa seinissä suhteellisen kosteuden monitorointi aloitettiin jo ennen rappauksen tekoa. Rakenteen suhteellisen kosteuden taso oli korkea rappauksen teon aikana, jolloin voitiin huomata pohjustuksen ja kolmikerrosrappauksen eri vaiheiden aiheuttamat huiput suhteellisessa kosteudessa (maksimiarvo rappausasteissa on 100 % RH).



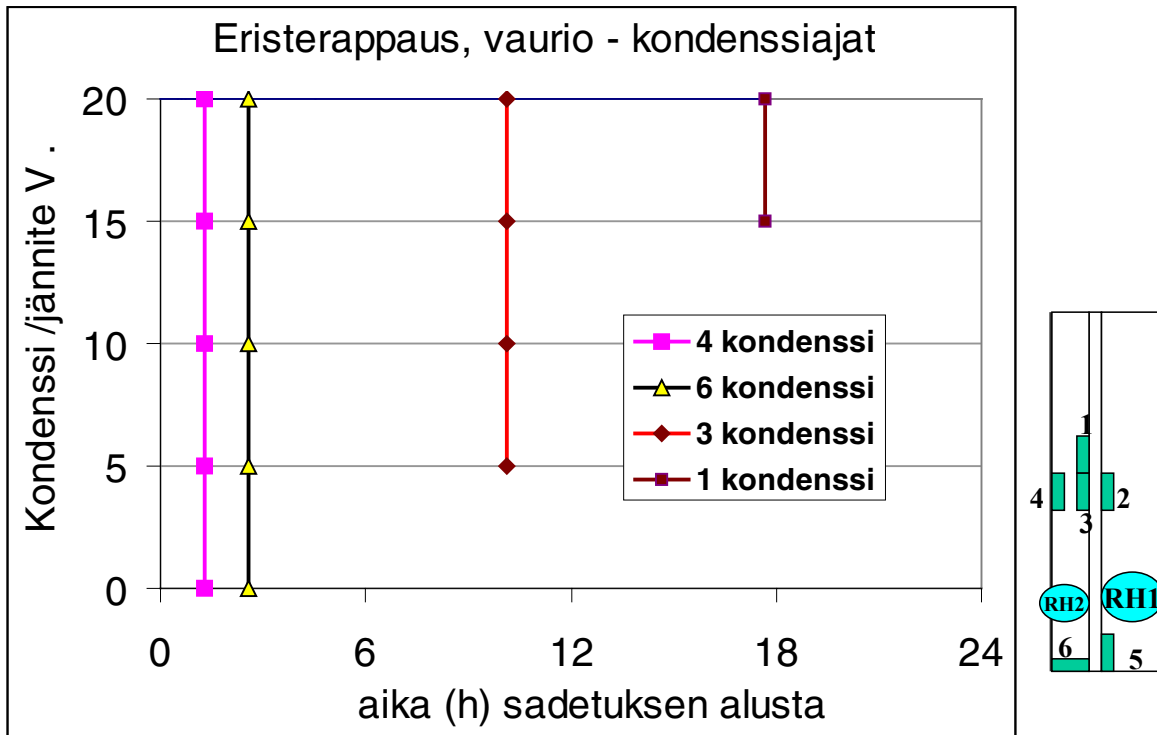
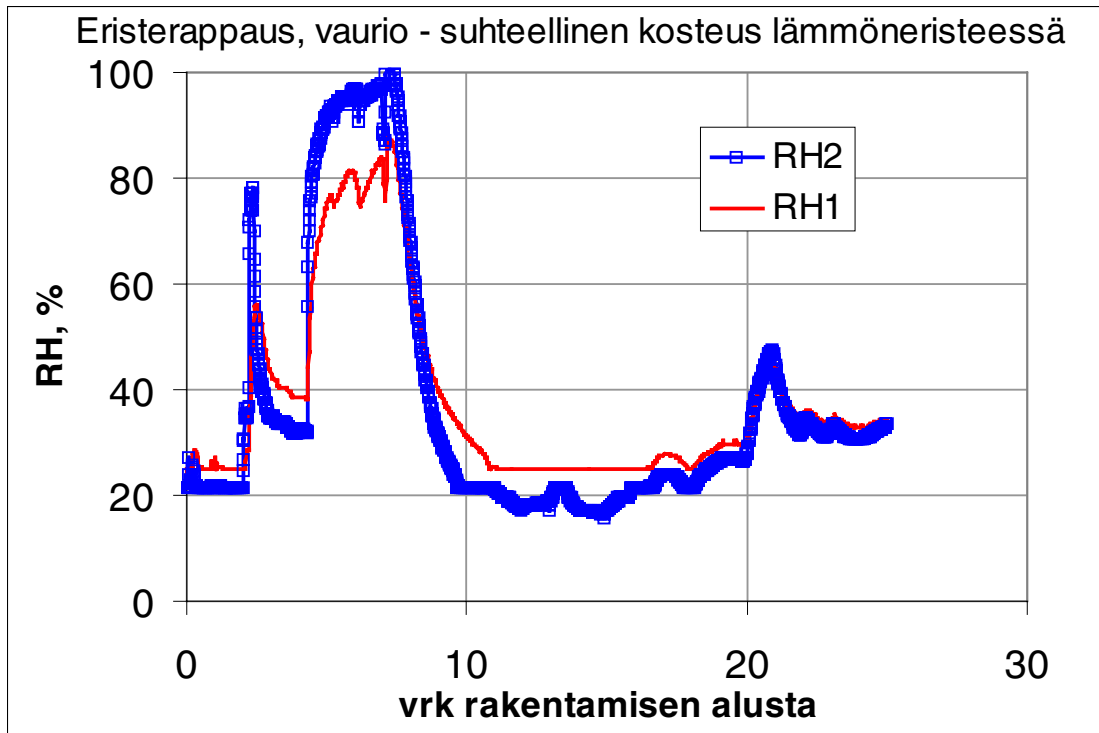
Kuva 17. Mitatut suhteelliset kosteudet peltijulkisivuelementtiseinän kipsilevytuulensuojan molemmin puolin ja kondenssin esiintymisajankohta kahdessa mittauspisteessä.



Kuva 18. Mitatut suhteelliset kosteudet Tyvek-pintaaisessa tuulensuojavillassa ja kipsilevytuulensuojan takana varsinaisessa lämmöneristevillassa sekä kondenssin esiintymisajankohta kahdessa mittauspisteessä.



Kuva 19. Mitatut suhteelliset kosteudet eristerappausseinän lämmöneristeissä tuulen-
suojan molemmin puolin ja kondenssin esiintymisajankohta kahdessa mittauspisteessä.



Kuva 20. Mitatut suhteelliset kosteudet pinnaltaan vaurioituneen eristerappausseinän lämmöneristeissä tuulensuojan molemmiin puolin ennen sadetuskokeen alkua (yllä) ja kondenssin esiintymisajankohta neljässä mittauspisteessä sadetuksen alusta (alla).

Ennen ehjän rappausseinän (kuva 19) sadetuksen alkua kosteustasot olivat 20–30 % RH ja ne kohosivat kokeen aikana tuulensuojan ulko- ja sisäpuolella 80 % RH ja 65 % RH tasoille. Kondenssia havaittiin rakenteen eristerappauksessa sen alaosassa noin tunnin ja keskellä seinää noin viiden tunnin kuluttua sadetuksen aloituksesta. Rakenteen loppukosteusmäärä 22 tunnin sadetuksen jälkeen oli 2,4 kg, mikä johtui osittain seinän ja sen kiinnitysraamin välisestä vuodosta eikä siten kuvaa pelkästään rakenteen viistosateenläpäisevyyttä.

Vauriorappausseinän (kuva 20) suhteellisia kosteuksia ei mitattu enää sadetuksen aikana, koska keräävän mittausanturin muistikapasiteetti loppui ennen sadetuksen aloitusta. Ennen koetta suhteelliset kosteudet alkoivat kohota koetilan korkean kosteustason vuoksi. Vaurioseinälle esitetään sadetuskoetilanteesta vain kondenssianturien tulokset, jotka osoittavat paikallisesti rekisteröidyt ensimmäiset merkit vesihöyryn kondenssista (kuva 20). Kondenssia havaittiin neljässä anturissa. Kaksi anturia (rappauksen vauriokohdan alapuolella rappauseristeessä ja rappauseristeen alaosassa) osoittivat kondenssia kolmen tunnin sisällä kokeen alusta. Kipsilevytuulensuojan ja rappauseristeen rajapinnalla vauriokohdan takana olevat anturit osoittivat kondenssia 10 ja 18 tuntia kokeen alusta. Lopukosteusmäärä 24 tunnin sadetuksen jälkeen oli 1,8 kg.

Kaikissa seinissä havaittiin kondenssia (jokseenkin samoihin paikkoihin sijoitetuissa) kahdessa anturissa sadetuksen vertailukelpoisen jakson (6 tunnin) aikana. Vauriorappausseinässä kondenssia havaittiin neljässä kohdassa, kun vertailujakson (22 tuntia) aikana vastaavassa ehjässä seinässä vain kaksi anturia osoitti kondenssia. Samoin vauriorappausseinän tuulensuojakipsilevystä löytyi huomattavan korkea kosteuspitoisuus (31 % paino) kokeen lopussa, kun vastaavassa kohdassa ehjässä seinässä oli kosteuspitoisuus noin puolet tästä (17 % paino).

6.8 Johtopäätökset sadetuskokeista

Kokeiden tavoitteena oli selvittää käytetyn mittausmenetelmän soveltuvuus rakenteiden sateenpitävyysmäärittäisiin.

Menetelmän etuna on se, että painekenttä tuotetaan ilmavirtauksella rakenteen ulkopintaan, jolloin patopaine aiheuttaa paine-eron rakenteen ylitse ja (dynaamisen) painekentän aiheuttamat virtaukset voivat kuljettaa vesipisaroita myös uloimpien rakenneosien läpi taakse, vaikka rakenne kokonaisuutena olisikin ilmatiivis. Useissa menetelmissä vettä kuljettava paine-ero saadaan aikaiseksi tutkittavan rakenteen yli tuottamalla rakenteen sisäpuolen ilmatilaan alipaineine.

Tehdyt kokeet olivat suhteellisen lyhyitä, kestoltaan 5–24 tuntia. Portaittain nostettu tutkittavaan rakenteeseen kohdistuva ilman virtausnopeus riitti suurimmilla arvoilla aiheuttamaan kosteuden kulkeutumista rakenteen sisään.

Tutkittujen rakenteiden toimintaa ei voitu suoraan verrata keskenään mm. erilaisista koejaksoista johtuen, eikä selkeitä eroja eri rakenteiden toiminnassa edes voitu havaita. Vaurion vaikutus rapatun rakenteen toiminnassa näkyi kondenssin laajempina esiintymisenä ja paikallisesti suurempina kosteuspitoisuuksina, vaikkakin kokonaiskosteus jäi ehjää rakennetta alemmalle tasolle.

Kosteuden tunkeutumisen kriteereinä käytettiin rakenteista mitattuja suhteellisia kosteuksia, kondenssiantureiden näyttämää kosteuden esiintymistä, punniten selvitettyä kokonaiskosteusmäärää kokeen lopussa ja paikallisia kosteuspitoisuuksia valituissa kohdin rakennetta.

Kokonaiskosteut eivät kuvanneet luotettavasti veden läpäisevyyttä ainakaan kaikissa tapauksissa. Esimerkiksi rapatun rakenteen reunakehyksen kiinnityssaumaus vuoti ja peltikasettijulkisivun läpäissyt vesi ei päässyt viemäroitymään normaalisti kasetin takaa ulos, joten kokonaiskosteut sisälsivät myös muusta kuin varsinaisten tutkittavien rakenteiden sateenläpäisevyyksistä johtuvaa kosteutta.

Kokeen jälkeen määritetyt materiaalikerrosten paikalliset kosteuspitoisuudet eivät kuvaa kosteuskestien kehittymistä vaan lopputilannetta. Paikalliset kosteut antavat kuvan veden vuotokohdista rakenteeseen, mutta niihin voi sisältyä samanlaisia virheitä kuin kokonaiskosteuksienkin, ts. paikalliset rakenteen asennustavasta riippuvat vesivuodot voivat vääristää tulosta.

Kondenssianturit havaitsevat hyvinkin pienet vesimäärät anturin pinnalla. Esimerkiksi peltielementtijulkisivun tapauksessa elementin takana olevan ilmatilan suhteellinen kosteus pysyi koko sadetuksen ajan alle 85 % RH:ssa, mutta ilmapälin alaosan kondenssianturi havaitsi heti ensimmäiset merkit veden tunkeutumisesta ilmatilaan. Kondenssianturit eivät myöskään kuvaa ilmassa tai anturin pinnalla olevan veden määrää. Anturien herkkyyys ja niiden on-off-tyyppinen toiminta eivät sovellu parhaalla mahdollisella tavalla sateen tunkeutumisen määrittämiseen. Rakenteeseen pääsee helposti pieniä määriä vettä ilman, että kyseessä olisi vielä rakenteen toimintaa heikentävän vesimäärän kulkeutuminen. Kondenssianturit antavat kuvan aivan ensimmäisistä merkeistä ylimääräistä kosteutta, mutta kosteustaso voi tällöin olla vielä täysin turvallinen.

Suhteellisen kosteuden anturit kuvaavat rakenteen ilmatilan tai eristeontelon ilman olosuhteita. Tehtyjen kokeiden aikana suhteelliset kosteut pysyivät kaikissa tapauksissa 80–85 % RH:n tason alapuolella, vaikka sekä kondenssianturit että paikalliset kosteuspitoisuudet osoittivat, että rakenteisiin siirtyi vettä. Suhteellisen kosteuden mittausta antaa

ilmeisesti kondenssiantureita paremman kuvan rakenteen keskimääräisen kosteustason kehityksestä mittauskohdissa.

Tavoitteena on, että kokeet vastaavat mahdollisimman hyvin todellisia oloja. Tehdyissä kokeissa seinän ulkopinta oli ympäröivän kehysrakenteen pinnan tasolla. Jos koeseinä asennettaisiin ulkonevaksi ympäröivästä kehysrakenteesta, voitaisiin rakenteen asennus toteuttaa käytäntöä vastaavalla tavalla. Tällöin esimerkiksi rakenteen alaosan mahdollinen tuuletus ja liittyminen muihin rakenteisiin saataisiin vastaamaan paremmin todellista käytäntöä.

Kokeissa käytettyä menetelmää voidaan soveltaa, jos rakenteen sateenläpäisevyydelle voidaan asettaa kriteerit tai sellaisena voidaan käyttää esimerkiksi tunnetun vertailurakenteen toimintaa samoissa rasitusoloissa. Tarkasteltavina tekijöinä voidaan käyttää suhteellisen kosteuden mittausta ja lopputilanteen kosteusmäärän ja -jakauman selvitystä. Kondenssianturit ovat suuntaa-antavia, täydentäviä mittauksia, joiden perusteella sateenläpäisevyyttä ei pelkästään voida arvioida. Kondenssitietojen lisäksi tulee aina tuntea rakenteeseen tunkeutunut kosteusmäärä ja sen jakautuminen eri materiaalikerroksiin.

7. Laskennallinen tarkastelu

7.1 Tavoitteet

Tavoitteena oli selvittää tarkasteluun valittujen rakenteiden kuivumiskyky, kun ulkoilman sääolot ovat todellisia vastaavat (mitatut) ja sisäilman kosteusrasitusolot sekä rakenteiden alkukosteus on valittu edustamaan tyypillistä tilannetta. Sisäilman rakenteeseen aiheuttama kosteuskuormitus ei aiheuta merkittävää kosteuskertymää, kun rakenteen lämmöneristeen sisä- ja ulkopuolisten kerrosten vesihöyrynläpäisevyydet ovat keskenään oikeassa suhteessa eikä rakenteen kautta ole pitkäaikaista sisäilman ulosvirtausta. Vesihöyryn diffuusiovastuksen tulisi suositusten mukaan olla sisäpinnalla viisinkertainen ulkopuoliseen verrattuna, mutta tätä pienemmilläkin vastusten suhteilla rakenteet voivat olla kosteusteknisesti turvallisia.

Rakentamisen jälkeinen alkukosteus ja vesihöyryn siirtymistä heikosti rajoittava sisäpuolinen kerros voivat yhdessä johtaa pitkiin kuivumisaikoihin. Hidas kuivuminen voi aiheuttaa mm. homeen kasvua, jonka ensimmäiset merkit esiintyvät tavallisesti tuulensuojakerroksen sisäpinnalla.

Laskennallisesti tarkasteltiin kevyttä puurunkorakennetta, jossa on lämmöneristeenä ruiskuasennettu puukuitueriste ja höyryn-ilmansulkukerros on tehty vesihöyryä kohtuullisesti läpäisevistä materiaaleista. Toisena tarkastelukohteena oli hirsiseinä, jonka sisäpinnalla on ruiskuasennettu puukuitueriste. Lisäksi tarkasteltiin betoni-sandwich-seinän korjaustapausta, jossa vanhan rakenteen ulkopintaan asennetaan lisäeristykseksi EPS-eristerappaus. Tässä tapauksessa sekä vanha rakenteen että eristerappauskerroksen vesihöyrynvastukset ovat suhteellisen suuret.

7.2 Kuivumiskyvyn laskennallinen analysointi

Laskennassa käytettiin rakenteiden kosteusteknisen analysointiin VTT/RTE:ssä kehitettyjä ohjelmia TCCC2D [5, 6] ja LATENITE [6, 7]. Rakenteiden toimivuuden kriteereinä käytettiin mmm. homeen kasvua kuvaavaa homeindeksiä [9, 10].

7.3 Kevyt puurunkoinen seinä

esittää kevyen puuseinärakenteen laskennassa tarkastellut tapaukset. Lämmöneristeenä oli kaikissa tapauksissa ruiskuasennettu puukuitueriste (35 kg/m^3). Lämmöneristerokoksen paksuudet olivat 150, 200 ja 250 mm.

Taulukko 6. Laskennassa tarkastellut, puurunkoisen, puukuitueristeisen seinärakenteen tapaukset.

Tunniste	TS-levy / vakio diffuusiovastus (m ² sPa)/kg	Sisäverhouksen diffuusiovastus (m ² sPa)/kg	Lämmön-eriste (cfi)	Alku	Alku-kosteus kg/m ³ (cfi)
HK1	huok. kuitul. 12 mm, f(RH)	1,63E+09	150 mm	1.1.1979	12
HKRL1	25 mm huok. kuitul., f(RH)	1,63E+09	150 mm	1.1.1979	12
G1	kipsi, 9 mm, f(RH)	1,63E+09	150 mm	1.1.1979	12
HKTL	0,42E + 09 (m² s Pa)/kg	1,63E+09	150 mm	1.1.1979	12
HKRL	0,6E+09	1,63E+09	150 mm	1.1.1979	12
G	0,25E+09	1,63E+09	150 mm	1.1.1979	12
Gp	0,25E+09	1,63E+09	200 mm	1.1.1979	12
HK1p	huok. kuitul. 12 mm, f(RH)	1,63E+09	200 mm	1.1.1979	12
HKRLp	0,6E+09	1,63E+09	200 mm	1.1.1979	12
Gpp	0,25E+09	1,63E+09	250 mm	1.1.1979	12
HK1pp	huok. kuitul. 12 mm, f(RH)	1,63E+09	250 mm	1.1.1979	12
HKRLpp	0,6E+09	1,63E+09	250 mm	1.1.1979	12
Gp8	0,25E+09	1,63E+09	200 mm	1.8.1979	12
HK1p8	huok. kuitul. 12 mm, f(RH)	1,63E+09	200 mm	1.8.1979	12
HKRLp8	0,6E+09	1,63E+09	200 mm	1.8.1979	12
Gpb	0,25E+09	1,63E+09	200 mm	1.1.1979	koko määrä = 150 mm eristeessä
HK1pb	huok. kuitul. 12 mm, f(RH)	1,63E+09	200 mm	1.1.1979	- " -
HKRLpb	0,6E+09	1,63E+09	200 mm	1.1.1979	- " -
HKRLpHs	0,6E+09	1,0E+11	200 mm	1.1.1979	12
GpHs	0,25E+09	1,0E+11	200 mm	1.1.1979	12
HK1pHs	huok. kuitul. 12 mm, f(RH)	1,0E+11	200 mm	1.1.1979	12
HKRLpHs	0,6E+09	1,0E+11	200 mm	1.8.1979	12
GpHs	0,25E+09	1,0E+11	200 mm	1.8.1979	12
HK1pHs	huok. kuitul. 12 mm, f(RH)	1,0E+11	200 mm	1.8.1979	12

Tuulensuojalevyinä käytettiin laskennassa kipsilevyä (9 mm) tai huokoista kuitulevyä (12 mm ja 25 mm). Tuulensuojalevyt kuvattiin joko kosteuspitoisuudesta riippuvain ai-neominaisuuksin tai näille käytettiin asetettuja vakiosuuruisia vesihöyryn diffuusiovas-tuksia.

Laskennassa rakenneleikkauksen alkukosteudeksi oletettiin puukuitulämmöneristeelle noin 12 kg/m^3 kosteuspitoisuus (arvio kosteudesta ruiskutuksen jälkeen) ja tuulensuojalevyn alkukosteus vastasi noin 70–75 % RH tasapainokosteutta.

Sisäverhouksen vastuksena käytettiin eri käytännön vaihtoehtoista sellaista, jonka vesihöyryn diffuusiovastus oli pienin, ts. joka edustaa sisäilmasta rakenteeseen siirtyvän kosteuden kannalta suurinta riskiä. Diffuusiovastukseksi rakenteen sisäpinnalle valittiin maalatun kipsilevyn ja verkkovahvistetun pahvin muodostaman kerroksen vesihöyrynvastus: $1,63 \cdot 10^{+9} (\text{m}^2 \text{ s Pa})/\text{kg}$. Lisäksi laskelmat tehtiin joissain tapauksissa käyttäen sisäpinnalla jokseenkin PE-muovista höyrynsulkua vastaavaa vastusta: $1 \cdot 10^{+11} (\text{m}^2 \text{ s Pa})/\text{kg}$. Vastuksen arvossa on huomioitu materiaaliominaisuuteen verrattuna lievänä heikennyksenä muovin asennuksesta johtuva läpäisevyyden kasvu.

7.4 Tulokset

Seuraavassa esitetään laskennan tulokset kokonaiskosteusmäärinä tarkastellussa rakenneleikkauksessa rakenteen otsapinta-alaa kohden (kg/m^2) ottaen huomioon sisäverhouksen ulkopuoliset materiaalikerrokset (lämmöneriste ja tuulensuojakerros) ilman puurungon kosteutta. Tarkastelussa verrataan eri tekijöiden vaikutusta rakenteen kuivumiskykyyn.

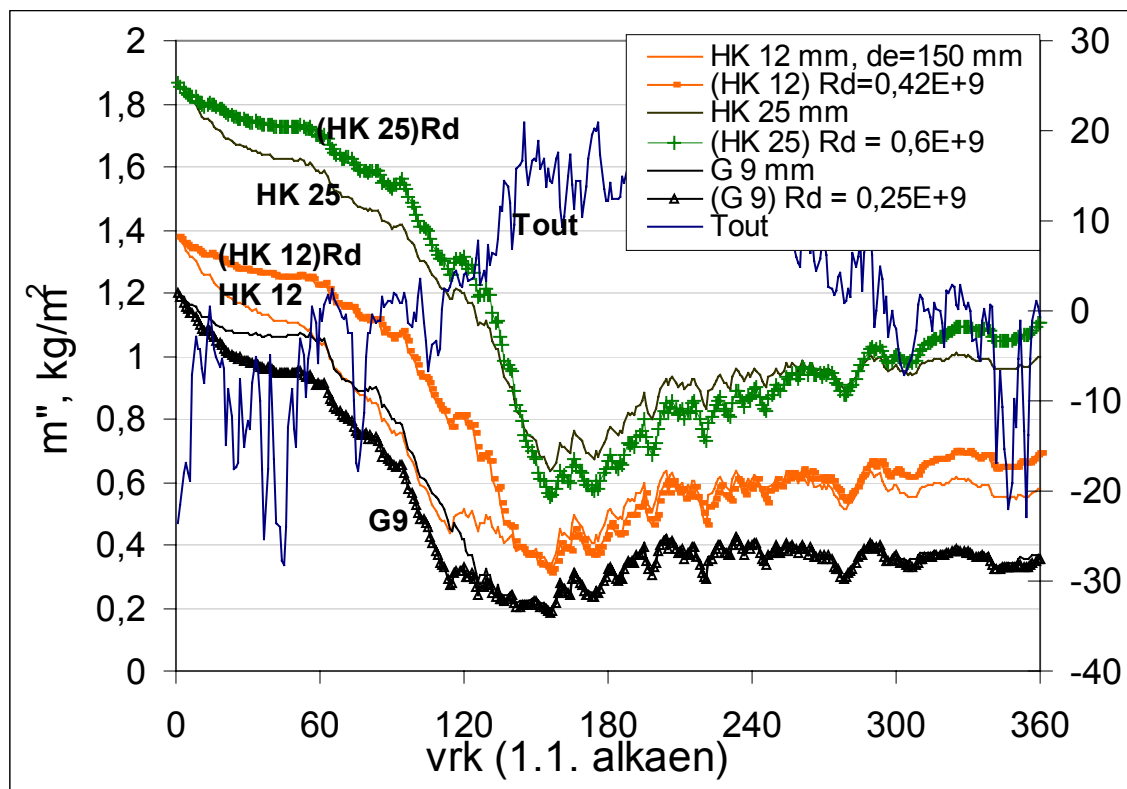
Kokonaiskosteusmäärän kehitys kuivumistilanteessa ei suoraan osoita kosteusteknisesti turvallisen toiminnan rajoja, mutta näyttää parhaiten eri tekijöiden vaikutuksen rakenteiden kuivumiskykyyn. Kokonaiskosteusmäärän lisäksi laskennan tuloksina tarkasteltiin mm. tuulensuojan ja lämmöneristeen rajapinnan homekasvun indeksiä. Laskennassa tarkasteltiin tuulensuojan ja lämmöneristeen rajapinnan molemmilla puolilla olevia kohtia, jotka olivat varsinaisessa materiaalikerroksessa. Pääpaino tarkastelussa oli tuulensuojakerroksen ensimmäisen sisäpisteen toiminnassa. Tämän kerroksen homekasvun simulointi perustui vastaaville materiaaleille määritettyihin ominaistietoihin. Homekasvun simulointi lämmöneristeessä perustui puun homehtumistietoihin eikä siten kuvaa tarkasti materiaalin toimintaa. Lämmöneristeen tuulensuojaa korkeampi kosteustaso kuivumistilanteessa johti suurempaan laskennalliseen homehtumisriskiin tässä kerroksessa. Kokonaisuuden arvioinnin tulee perustua rajapinnan molemmiin puolin olevien materiaalikerrosten toimivuuden arviointiin.

7.4.1 Tuulensuojan diffuusiovastus kosteuspitoisuudesta riippuvilla ominaisuuksilla ja vakioarvoilla

Tavoitteena oli vertailla sitä, kuinka paljon valitut vakioarvot ja olosuhteista riippuvat ominaisuudet (7) jokseenkin vastaavalla tuulensuojamateriaalilla aiheuttavat eroja rakenteen kuivumiseen. Kuva 21 esittää rakenteen kuivumisnopeuden vertailun eri tuulen-

suoja-levyillä, kun tuulensuojan vesihöyryn diffuusiokerroin oli esitetty kosteudesta riippuvana arvona tai vakioarvona ja lämmöneristyskerros oli 150 mm paksu. Vesihöyryn diffuusiovastuksen tuoteominaisuuksia kuvaavat vakioarvot olivat laskennassa seuraavat:

Huokoinen kuitulevytuulensuoja 25 mm: $0,60 \cdot 10^{+9} \text{ (m}^2 \text{ s Pa) /kg}$
 Huokoinen kuitulevytuulensuoja 12 mm: $0,42 \cdot 10^{+9} \text{ (m}^2 \text{ s Pa) /kg}$
 Kipsilevytuulensuoja 9 mm: $0,25 \cdot 10^{+9} \text{ (m}^2 \text{ s Pa) /kg}$.



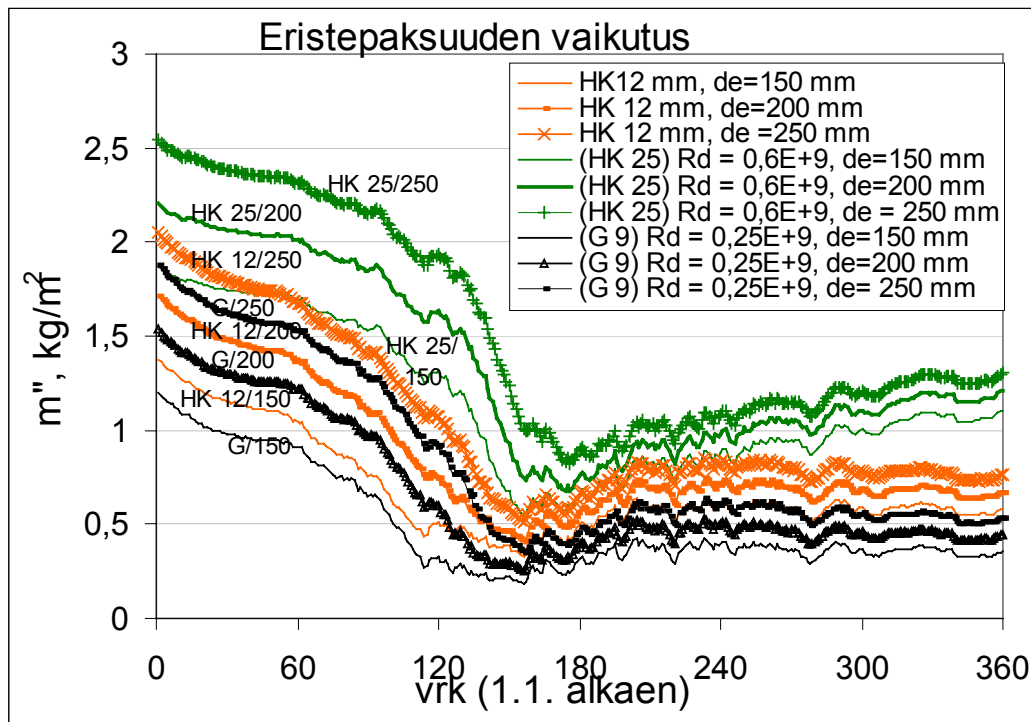
Kuva 21. Vesihöyryn vakiovastusten ja kosteudesta riippuvien vastusten antaman kuivumiskyvyn vertailu.

Tulosten perusteella käytetyt vakioarvot kuvaavat riittävän hyvin tuulensuojan vesihöyrynläpäisevyyttä kuivumistilanteessa. Huokoisen kuitulevyn vesihöyrynläpäisevyys on laskentaohjelmassa käytettyjen aineominaisuuksien perusteella jonkin verran parempi kuivumistilanteessa kuin vakioarvojen perusteella, ja kipsituulensuojalla vakioarvolla lasketut tapaukset antoivat hieman kosteudesta riippuvia aineominaisuuksia paremman kuivumiskyvyn. Suurin ero oli 12 mm:n paksuisen huokoisen kuitulevyn tapauksessa. Kun tilanne laskettiin vakiovastuksen avulla kesti kosteustason $0,6 \text{ kg/m}^2$ saavuttaminen noin kuukauden kauemmin kuin kosteudesta riippuvilla arvoilla laskettaessa. Valitut vakioarvot kuvaavat tuoteominaisuuksia, ja siten niiden ominaisuudet voivat poiketa vastaavan yleisnimikkeen mukaiselle materiaalille esitetyistä arvoista.

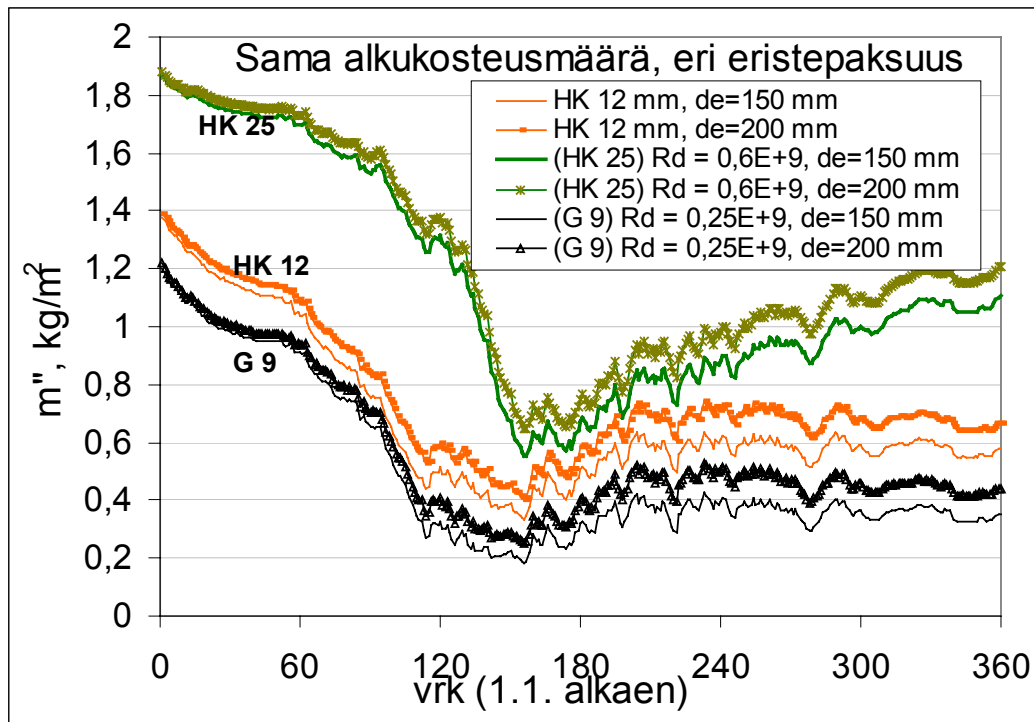
7.4.2 Lämmöneristepaksuuden vaikutus

Kuva 22 esittää lämmöneristepaksuuden vaikutuksen rakenteen kuivumiskykyyn silloin, kun lämmöneristeen kosteuspitoisuus (kg/m^3) oli tarkastelun alussa sama, ts. kokonaiskosteusmäärä riippui eristekerroksen paksuudesta. Kuva 23 esittää tilanteen, jossa lämmöneristeen kokonaiskosteusmäärä (kg/m^2) oli tarkastelun alussa sama 150 mm:n ja 200 mm:n paksuisilla eristeillä.

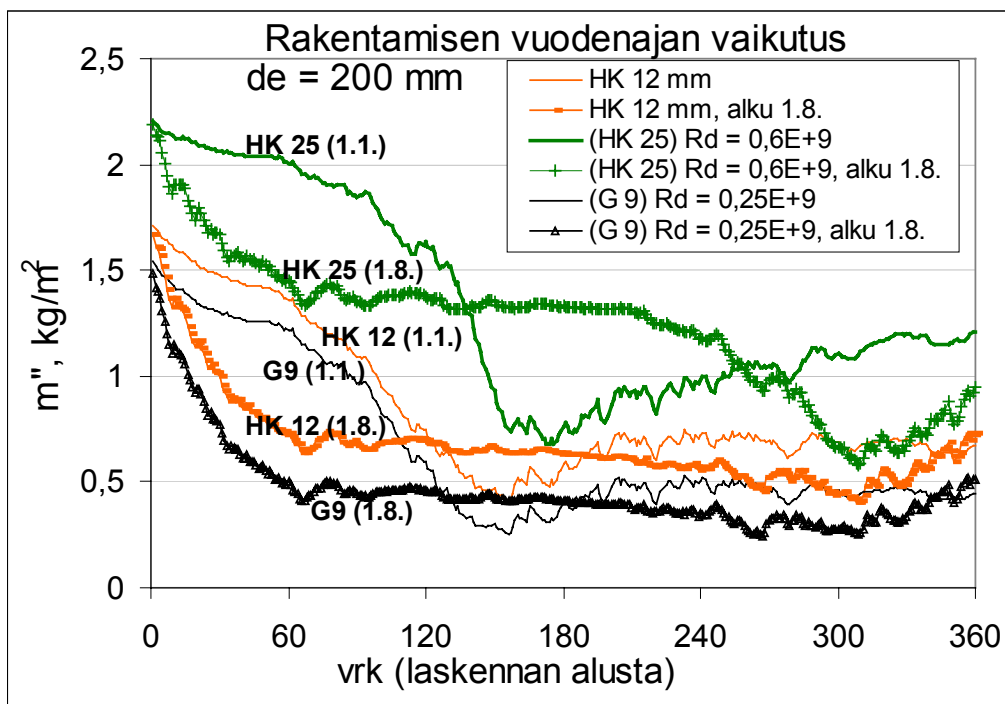
Kuva 24 esittää rakenteen valmistumisajankohdan vaikutuksen rakentamisen jälkeisen alkukosteuden kuivumisnopeuteen. Tarkastelussa käytettiin tammi- ja elokuun alusta alkavia jaksoja. Kuva 25 esittää höyrynsulun vaikutuksen rakenteen kuivumiskykyyn tarkastelun alun ollessa tammi- tai elokuu.



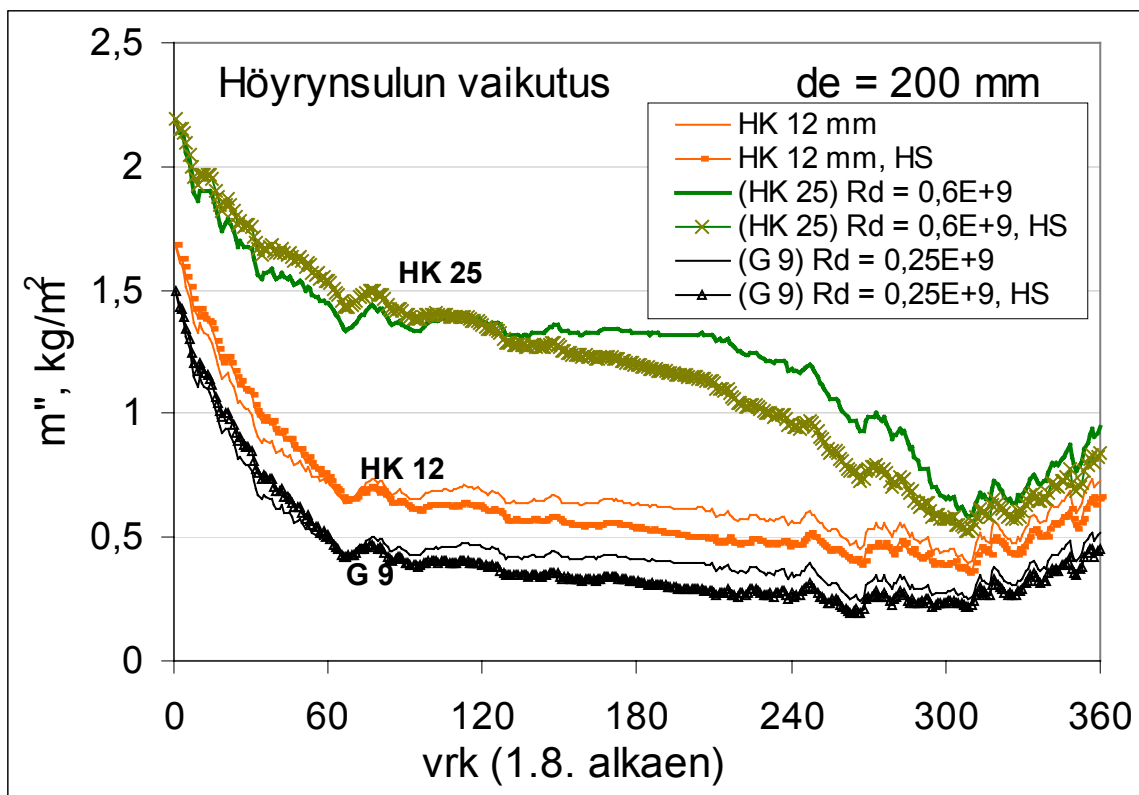
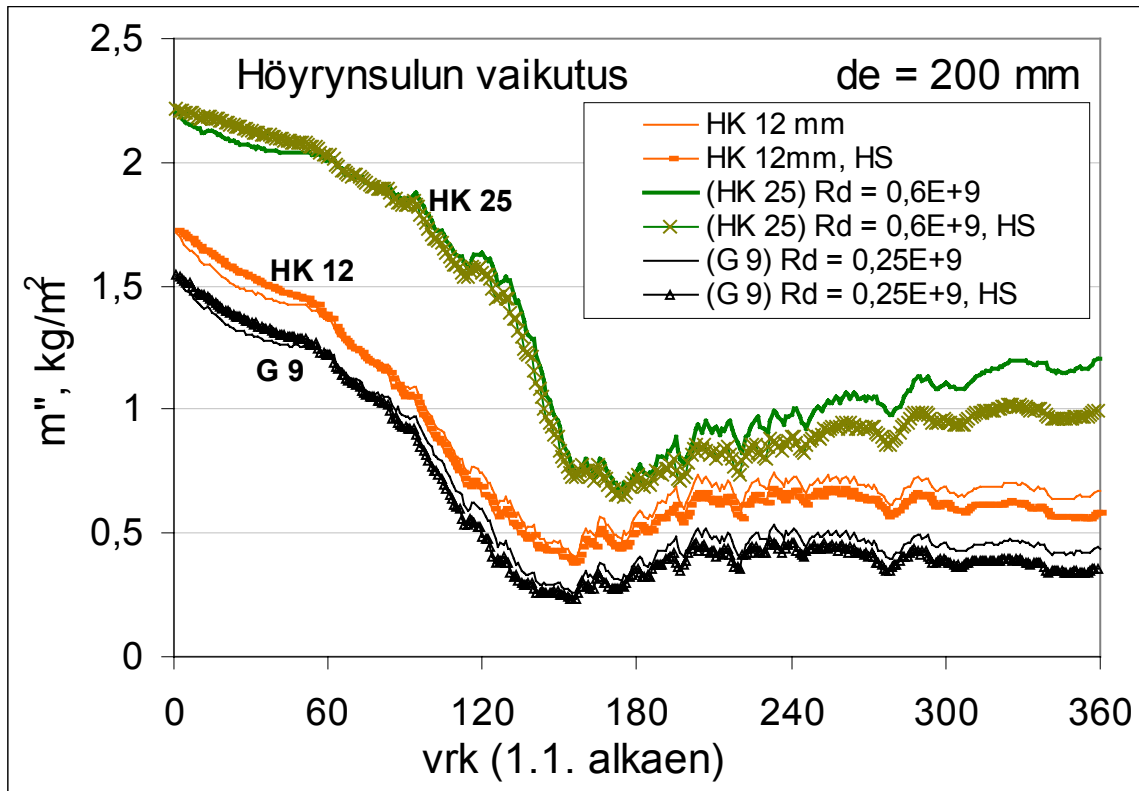
Kuva 22. Lämmöneristyspaksuuden vaikutus rakenteen kuivumiseen, kun rakenteen materiaalien kosteuspitoisuus oli vakio tarkastelun alussa.



Kuva 23. Lämmöneristyspaksuuden vaikutus rakenteen kuivumiseen, kun lämmöneristeen kokonaiskosteusmäärä oli tarkastelun alussa sama molemmilla eristyspaksuuksilla 150 ja 200 mm.



Kuva 24. Rakenteen valmistusajankohdan vaikutus alkukosteuden kuivumisaikaan. Tarkastelun alku joko tammikuun 1. tai elokuun 1. päivä.



Kuva 25. Höyrynsulun vaikutus kuivumiseen tarkastelun alkaessa tammikuun (yllä) tai elokuun (alla) alusta.

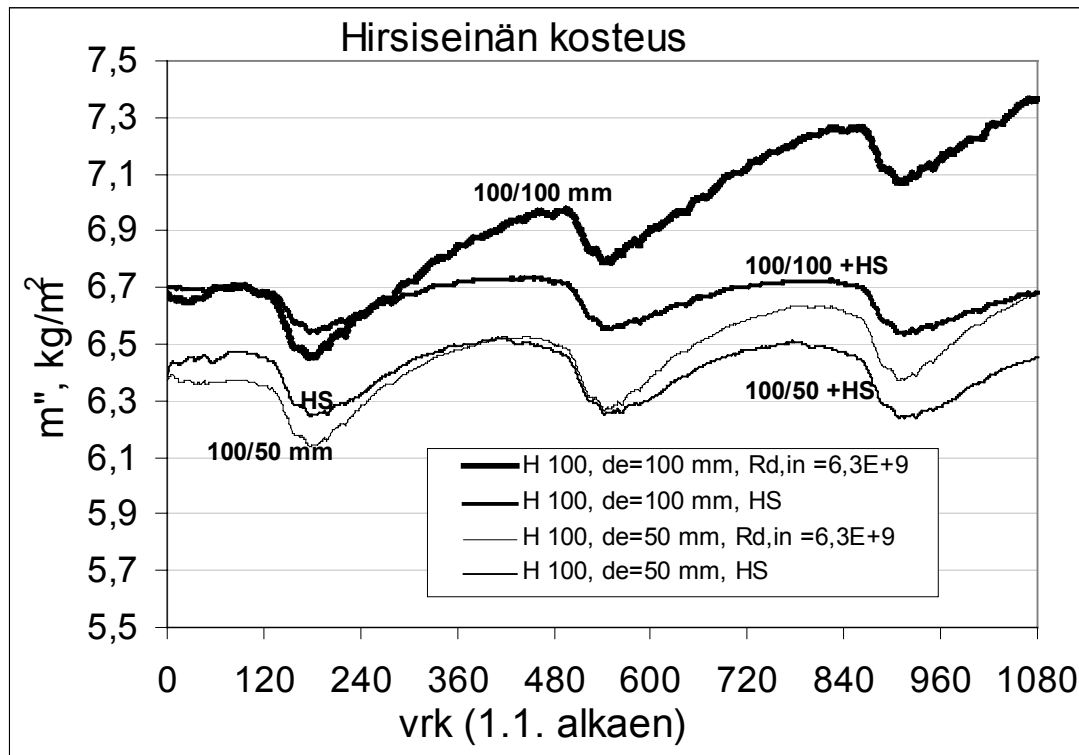
7.5 Sisäpuolelta eristetty hirsiseinä

Laskennassa tarkasteltiin 100 mm:n paksuista hirsiseinää, jonka sisäpuolella oli 100 tai 50 mm paksu puukuitueristekerros (35 kg/m^3). Hirren alkukosteus oli 15 % (paino) ja lämmöneristeen 12 kg/m^3 . Rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastus oli $1,63 \cdot 10^9 \text{ (m}^2 \text{ s Pa)/kg}$ (maalattu kipsilevy ja ilmansulkupaperi) tai $1,0 \cdot 10^{11} \text{ (m}^2 \text{ s Pa)/kg}$ (höyrynsulku).

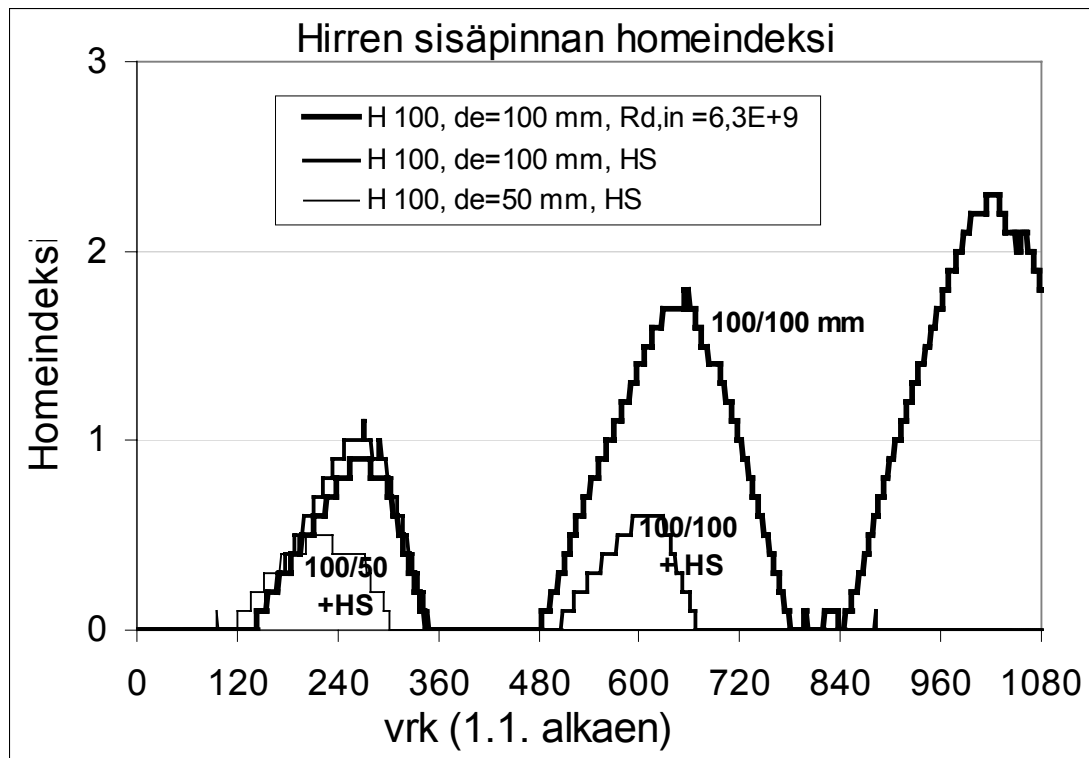
Tarkastelujakso oli kolme vuotta ja se alkoi tammikuussa. Seinään ei kohdistunut aurinгон säteilyä eikä viistosadetta. Tavoitteena oli tutkia alkukosteuden ja sisäilmasta tulevan kosteuskuormituksen vaikutusta rakenteiden kosteustasoon.

Kuva 26 esittää rakenteen kosteustason kehittymistä ja kuva 27 hirren ja lämmöneristeen rajapinnan molemmiin puolin olevien puun ja lämmöneristeen ensimmäisten sisäpisteiden laskennallista homeindeksiä.

Tulosten perusteella hirsiseinän kosteustekninen toimivuus sisältää riskejä, kun 100 mm:n paksuisen hirren sisäpuolella on 100 mm:n lämmöneristekerros ja kerrosten alkukosteudet ovat suhteellisen korkeat, kuten tarkastellussa tapauksessa. Rakenteen sisäpinnan alhainen vesihöyrynvastus lisää sisäilman kosteuskuormituksen aiheuttamia riskejä.



Kuva 26. Hirsiseinän kosteustason kehittyminen rakentamisen jälkeisten kolmen vuoden aikana.



Kuva 27. Hirren sisäpinnan homeindeksin kehittyminen kolmena rakentamisen jälkeisenä vuotena.

7.5.1 Tuuletusvirtaus hirren rakojen kautta

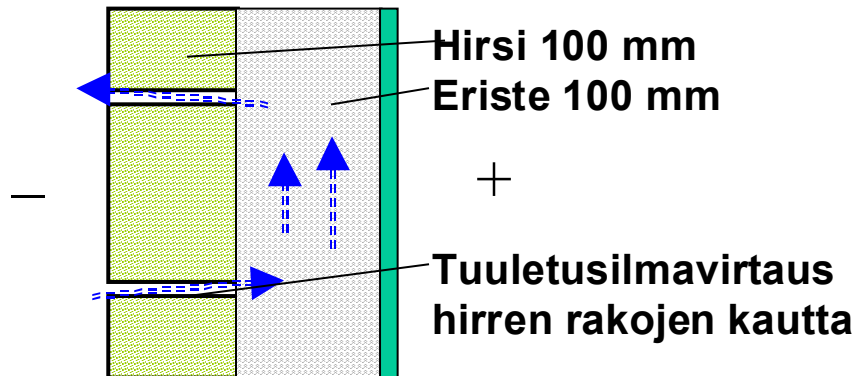
Pelkkien vesihöyryn diffuusioon perustuvien laskelmien lisäksi analysoitiin tapaus, jossa pyrittiin arvioimaan ulkoilmaan rajoittuvan hirsiseinän läpäisevien ilmavirtausten merkitys seinän kuivumiselle. Tavoitteena oli selvittää käytännössä esiintyvän pienen ilmavuodon merkitys hirsiseinän kuivumiselle.

Tarkastelu tehtiin edellisen kohdan heikoimmin toimivalle rakenteelle, jossa 100 mm:n paksuisen hirsiseinän sisäpuolella oli 100 mm puukuitueristettä ja sisäverhouksen ilmansulkupaperi ja maalattu kipsilevy. Tuuletustapauksessa oletettiin, että hirren korkeus on 200 mm ja ulkoilma virtaa hirren alapuolisen raon kautta seinän eristetilaan ja edelleen takaisin hirren yläpuolisen raon kautta ulos rakenteesta (kuva 28). Ilmavirtaus asetettiin vakioksi koko tarkastelun ajalle ja sen osalta käsiteltiin kahta tapausta:

1. Hatara hirsiseinä, jossa 200 mm:n korkuista hirttä kohden oli tuuletusvirtaus vakio $0,15 \text{ L}/(\text{s m})$ (laskettuna seinän leveyttä kohden), mikä vastaa $0,75 \text{ L}/(\text{s m}^2)$ tuuletusvirtausta seinän otsapinta-alaa kohden.

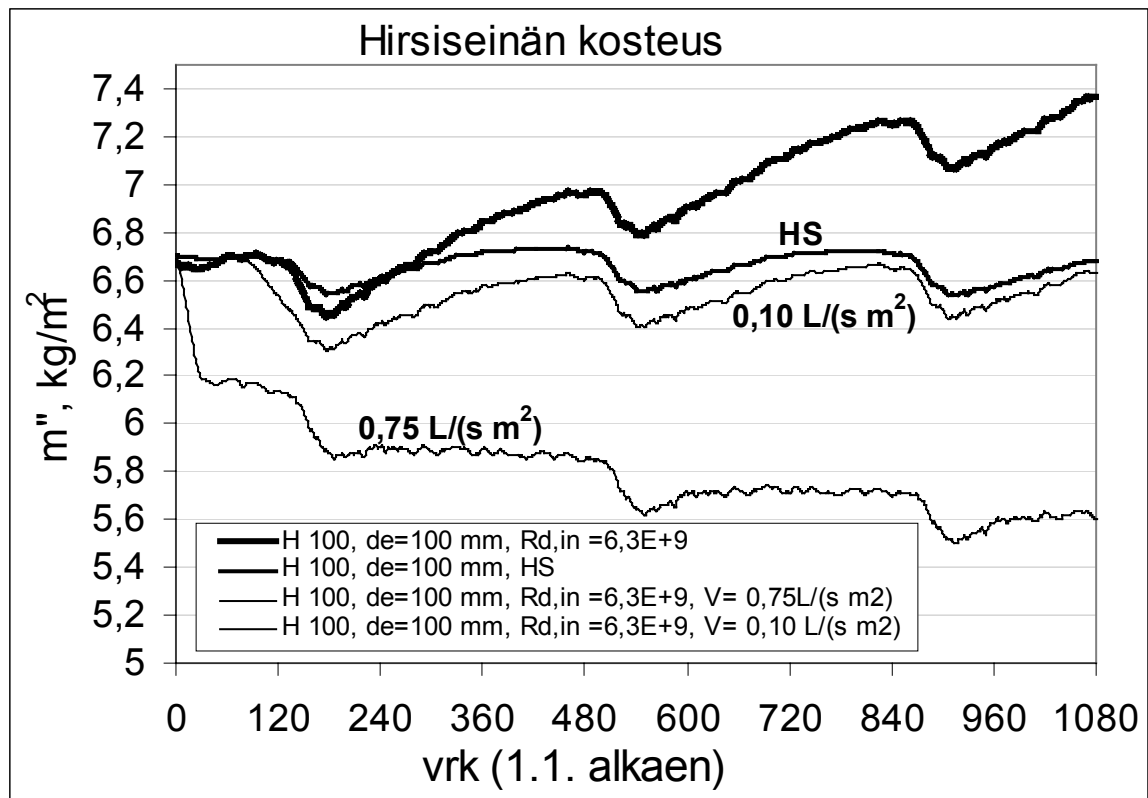
2. Suhteellisen tiivis hirsiseinä, jossa 200 mm:n korkuista hirttä kohden oli tuuletusvirtaus vakio $0,02 \text{ L/(s m)}$ (laskettuna seinän leveyttä kohden), mikä vastaa $0,10 \text{ L/(s m}^2\text{)}$ tuuletusvirtausta seinän otsapinta-alaa kohden. Kuva 29 esittää laskennan tulokset verrattuna vastaavaan ilmatiiviin hirsiseinän tapaukseen.

Jos hirsien välinen sauma oletetaan 1 mm:n korkuiseksi virtausreitiksi, vastaa tiiviimän seinän (2) ilmavuoto noin $0,02 \text{ m/s}$ virtausnopeutta.



Kuva 28. Laskennassa tarkasteltu, raoista tuulettuva hirsiseinä.

Tulosten perusteella jo pienikin tuuletusvirtaus riittää olennaisesti parantamaan rakenteen kuivumiskykyä. Lämmöneristeen ulkopuolisen hirsiseinän tuuletusilmavirtauksella $0,10 \text{ L/(s m}^2\text{)}$ oli rakenteen kuivuminen ensimmäisen rakentamisen jälkeisen kevät/kesäkauden aikana selvästi nopeampaa ja lopullinen kosteustaso kolmen vuoden jälkeen jokseenkin sama kuin tapauksessa, jossa rakenteen sisäpinnalla oli höyrynsulku. Kun tuuletusvirtaus hirsiseinän läpi oli $0,75 \text{ L/(s m}^2\text{)}$, sujui kuivuminen vielä huomattavasti tätä nopeammin. Kumpikin tarkasteltu tuuletusilmavirtaus riitti estämään hirsiseinän sisäpinnan homehtumisen. Tarkasteltu pienempi tuuletusvirtaus oli siten riittävä varmistamaan lämmöneristeen kuivumisen turvallisesti.



Kuva 29. Hirsiseinän kokonaiskosteus rakojen kautta tuulettuvissa tapauksissa ja täysin ilmatiiviin hirsikerroksen tapauksessa, kun sisäpuolinen hirren paksuus on 100 mm ja eristepaksuus 100 mm.

7.5.2 Sisäpuolelta lämmöneristetyin hirsiseinän kuivumiskyky

Hirsiseinän vesihöyryn siirtovastus lämmöneristeen ulkopuolella on suuri ja kuivuminen pelkästään diffuusiolla sen läpi on hidasta. Jos rakenteen sisäpuolella on ylimääräistä kosteutta, se voi aiheuttaa homeen kasvua hirren sisäpinnalla. Paksuudeltaan 100 mm:n kerros lämmöneristettä, jonka alkukosteus on 12 kg/m^3 , riittää aiheuttamaan homeutumisriskin hirren ja lämmöneristeen rajapinnalle. Auringon säteily seinälle ja hirsirakenteen ilmavuodot edistävät kuivumista huomattavasti, joten käytännössä rakenteet usein kuivuvat nopeammin kuin tarkastelun mukaisissa oloissa, joissa seinä oli täysin varjossa ja perusrakenteiden laskentatapauksissa ei ollut tuuletusta edistäviä ilmavirtauksia läpi rakenteen.

Rajoitetun tuuletuksen vaikutus rakenteen kuivumiseen on huomattava. Tuuletusvirtaus $0,10 \text{ L/(s m}^2\text{)}$ hirsiseinän otsapinta-alaa kohden riitti varmistamaan rakenteen toimivuuden tilanteissa, joissa kosteuskuormitus rakenteeseen aiheutuu diffuusiona sellaisen seinän sisäverhouksen läpi, jonka diffuusiovastus vastaa maalattua kipsilevyä ja rakennus-

paperikerrosta. Seinän kosteustekninen toimintavarmuus lisääntyy, jos sisäpuolen vesihöyrynvastus on tarkastelussa käytettyä suurempi.

Rajoitetun tuuletuksen varmistaminen niin, että rakennuksen U-arvo ei olennaisesti heikkene, voi käytännössä olla ongelmallista. Rajoitettu tuuletusvirtaus hirsiseinän läpi hirren ja lämmöneristeen rajapinnan tasolle vaikuttaa U-arvoon vain suhteellisen vähän, mutta itse lämmöneriste tulisi suojata ulkoilman virtauksilta, mikä asettaa rakenteelle ja lämmöneristeen asennustavalle vaatimuksia. Erillinen, hirren ja lämmöneristeen rajapintaan asennettava, hyvin diffuusiota läpäisevä tuulensuoja varmistaisi lämmöneristeen suojauksen ulkoilman konvektiovirtauksilta. Tällöin rakenne lähestyy kosteusteknisen toimivuuden osalta tuuletettua seinää, jossa on ulkoverhouksena hirsiseinä.

7.6 Eristerappausrakenne

Betoni-sandwich-elementtirakenteen kuivumista tarkasteltiin laskennallisesti lämmön-, ilman- ja kosteudensiirron laskentaohjelma LATENITella. Rakenteen kuivumiseen vaikuttavina tekijöinä tarkasteltiin

- rakenteen tuulettumista
- eristevaihtoehtoa (mineraalivilla, polystyreeni)
- rappauspinnan paksuus.

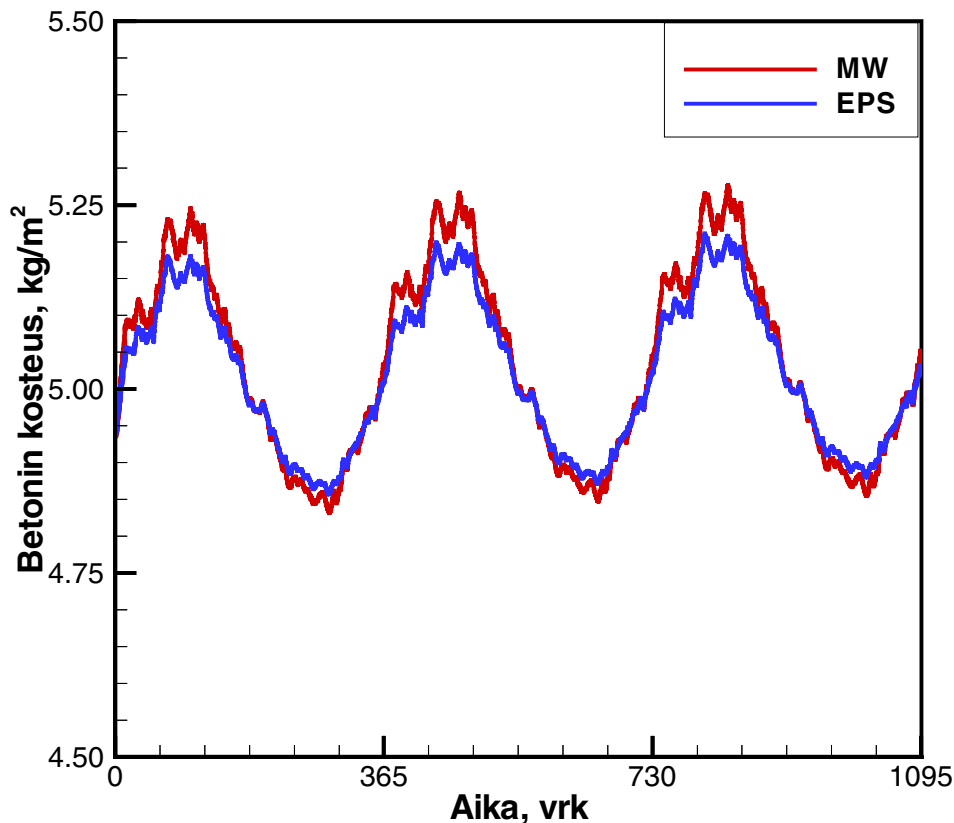
Rakenteen toimivuus analysoitiin kosteasta alkutilanteesta sekä ns. normaalitilanteessa, missä alkukosteus vastasi pitkän ajan keskiarvoa. Laskennan alkuhetki oli 1. heinäkuuta ja ulkoisina olosuhteina Espoon VTT:n koetaloalueen sää 1995–1996.

Analysoidut rakennevaihtoehdot olivat seuraavat (kerrokset ulkoa sisälle päin):

- perusrakenne
 - 70 mm betoni
 - 90 mm mineraalivillaeristys
 - 120 mm betoni
- lisäeristysvaihtoehdot
 - rappaus 4 mm tai 20 mm
 - 50 mm mineraalivilla tai EPS.

Rakenteen alkukosteutena käytettiin suhteellista kosteutta 98 %, 85 % tai 65 %.

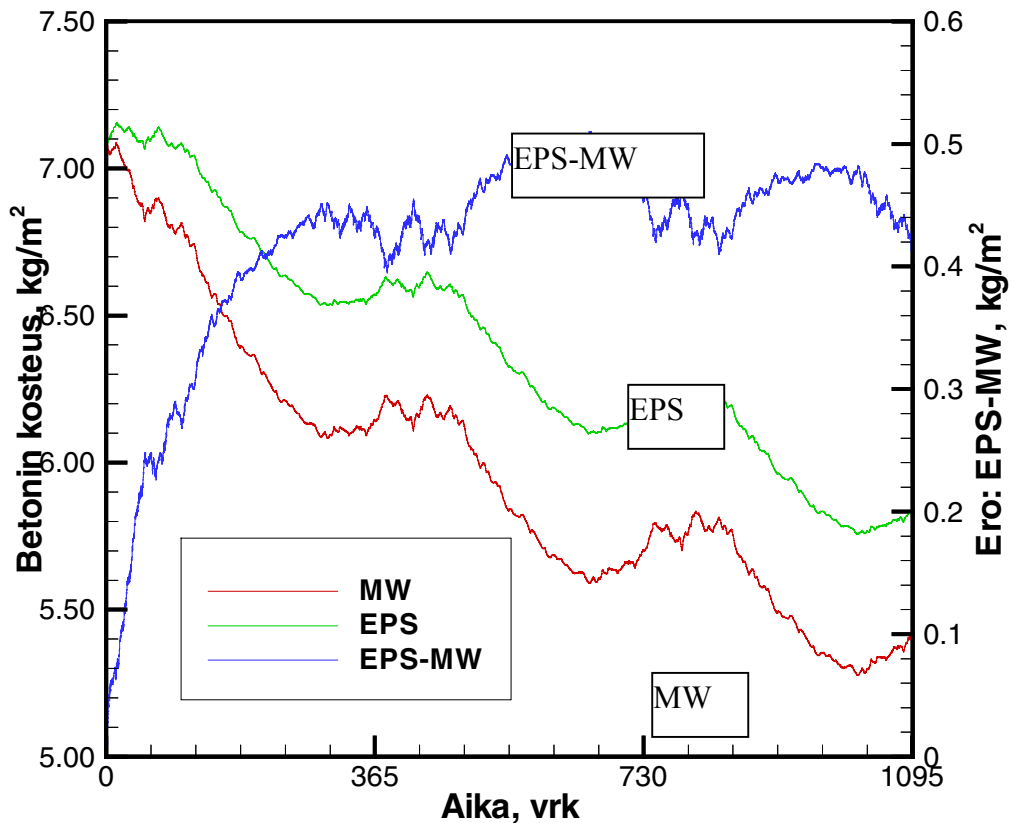
Kuvassa 30 esitetään betonikerrosten kosteus ilman ylimääräisiä kosteusvuotoja Espoon ilmastossa, kun rakenteen alkukosteus on jo kuivunut. Mineraalivillalla eristetty tapaus sallii kosteuden liikkeitä uloimman eristekerroksen läpi paremmin kuin EPS-eristetty rakenne, jolloin betonin kosteudessa on nähtävissä laajemmat vaihtelut vuodenaikojen välillä kuin mineraalivillalla lisäeristetyssä tapauksessa.



Kuva 30. Betoni-sandwich-seinän betonikerrosten kosteuspitoisuuden vaihtelut kolmen vuoden ajanjaksolla Espoon ilmastossa, kun betonin alkukosteus on 65 % RH. Mineraalivillalla eristetyssä rakenteessa betonin kosteus vaihtelee laajemmin eri vuodenaikoina.

Betonin kuivumista verrattiin mineraalivilla- ja EPS-eristetyn rakenteen tapauksessa, kun alkutilanteen (1. heinäkuuta) suhteellinen kosteus oli 85 % (mikä vastasi noin kolmen vuoden kuivumisen jälkeistä tasoa alkukosteudesta 98 %). Tuloksista on havaittavissa (kuva 31), että mineraalivillalla eristetty rakenne kuivuu alussa hieman nopeammin, mutta kun kosteusjakauma on asettunut betonikerrokseen siten, että kuivuva kosteus sijaitsee syvemmällä betonissa, alkavat rakenteiden kuivumisnopeudet muistuttaa toisiaan. Kuivumisnopeus on noin vuoden jälkeen samalla tasolla kummassakin tapauksessa. Tässä on kuitenkin jälleen havaittavissa mineraalivillan suurempi vesihöyrynläpäisykyky: kesäaikana mineraalivillarakenteen ja EPS-rakenteen betonikerrosten kosteuspitoisuuksien ero pienenee verrattuna talvitilanteeseen, mikä johtuu siitä, että mine-

raalivillakerros päästää ulkoilman (ja viistosateen ulkopintaa kuormittavan) kosteuden tehokkaammin pintaa syvemmälle rakenteeseen.



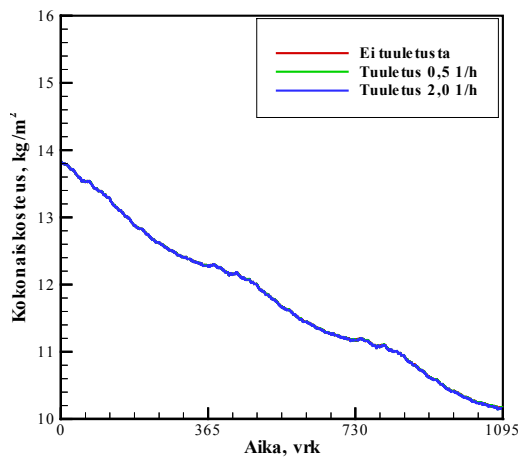
Kuva 31. Rakenteen alkukosteus 85 % suhteellista kosteutta mineraalivilla- ja polystyreenieristetyissä betoni-sandwich-rakenteissa. Kuivumisnopeudet tasaantuvat samalle tasolle ensimmäisen vuoden jälkeen mineraali- ja polystyreenieristetyissä rakenteissa.

7.6.1 Tuuletuksen vaikutus rakenteiden kuivumiseen

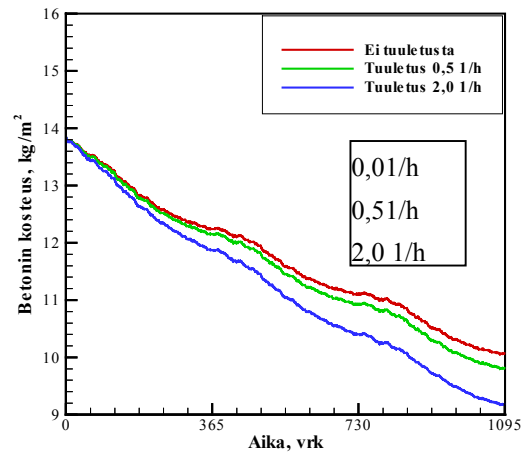
EPS-lisäeristetyin rakenteen kuivumista tarkasteltiin tuulettamattomana sekä kahdella eri pienellä tuuletusvirtaamalla (kuva 32). Tuuletusvirtaama oli joko rappauksen alla eristeen ulkopinnalla tai eristeen ja uloimman betonikerroksen välissä. Tuuletusvälin paksuus oli 5 mm. Ilmanvaihtuvuus 1 l/h merkitsee 2,5 m korkealla seinällä 1,4 mm/s ilmavirran nopeutta tuuletusvälissä.

Rappaus ei hidasta rakenteen kuivumista, eikä tuuletus rappauksen alla pysty nopeuttamaan rakenteen kuivumista. Tämä johtuu osin EPS-eristeen diffuusiota rajoittavasta vaikutuksesta ja osin ohuen rappauksen hyvästä vesihöyrynläpäisevyydestä.

Tuuletuksen ollessa lisäeristyksen sisäpuolella nähdään selvä kuivumisnopeuden muutos ilmavirran funktiona. Laskennassa käytetty tuuletusilmavirta ei vielä näy rakenteen lämpöhäviöissä, mutta vaikutus kuivumiseen on selvä.



Tuuletus eristeen ulkopinnalla



Tuuletus eristeen sisäpinnalla

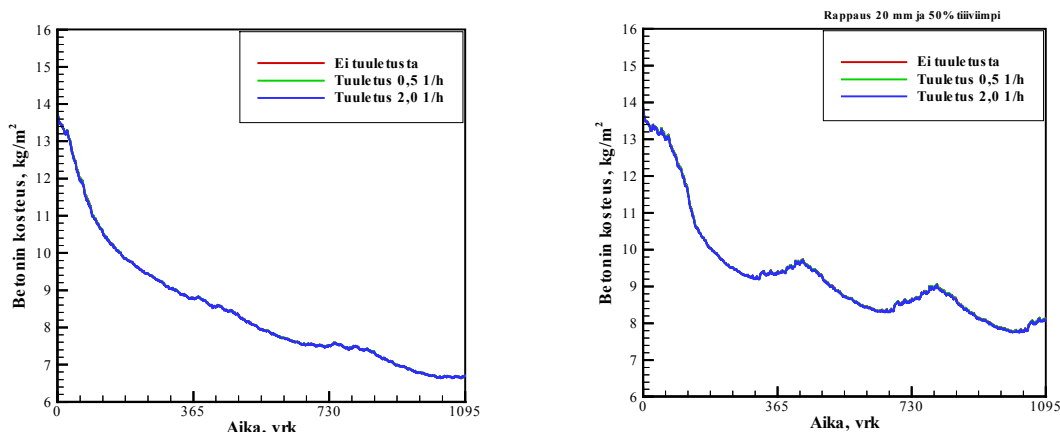
Kuva 32. EPS-eristetyin betoni-sandwich-rakenteen tuulettuminen. Vasemmalla on tuuletus eristeen ulkopinnan ja rappauksen välissä ja oikealla sisäpinnan tuuletus. Rakenteen lievä tuuletus ei vaikuta rakenteen kuivumiseen, jos tuuletus tapahtuu eristeen ulkopinnalta. Lievä tuuletus eristekerroksen lämpimältä puolelta näkyy jo selvästi rakenteen nopeampana kuivumisena. Tuuletuksen vaikutus lämpöhäviöihin oli minimaalinen. Betonin alkukosteus 98 % RH.

Vastaavasti mineraalivillalla lisäeristetyin rakenteen kuivumista analysoitiin tuulettamattomana sekä kahdella erillisellä pienellä tuuletusvirtaamalla (kuva 33). Tuuletusvirtaama oli joko rappauksen alla eristeen ulkopinnalla tai eristeen ja uloimman betonikerroksen välissä. Tuuletusvälin paksuus oli 5 mm.

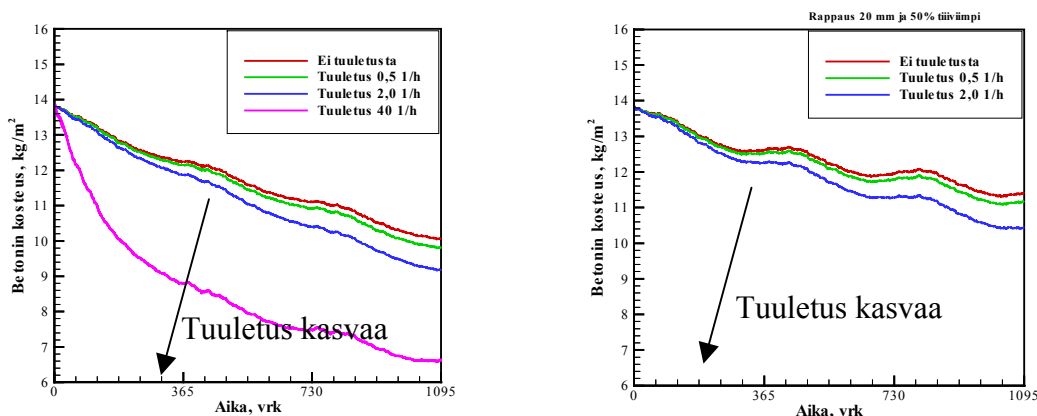
Vaikka mineraalivillan vesihöyrynläpäisykerroin on moninkertainen polystyreenilevyihin verrattuna, ei rappaus silti hidasta rakenteen betonikerrosten kuivumista eikä tuuletus rappauksen alla tai edes ulkopuolisen lisäeristyksen ja uloimman betonikerroksen välissä pysty nopeuttamaan rakenteen kuivumista. Tämä johtuu betonin kuivumista rajoittavasta kosteuden diffuusiosta: kosteuden siirto on betonissa selvästi hitaampaa kuin lisäeristyskerroksessa ja rappauksessa.

7.6.2 Rappauksen paksuuden vaikutus kuivumisnopeuteen

Eristeen pinnalla olevan rappauskerroksen paksuuden merkitystä tarkasteltiin laskennallisesti rakenteen kuivumisen kannalta. Kuvassa 34 esitetään 4 mm ja 20 mm paksujen rappauskerrosten vaikutuksia polystyreenillä eristetyin rakenteen kosteuskäyttäytymiseen. Rappausmateriaalin vesihöyrynläpäisevyys oli laskennassa n. $3 \cdot 10^{-12}$ kg/msPa, mikä vastaa vesihöyrynläpäisevyydeltään suhteellisen tiivistä rappausstyyppiä.

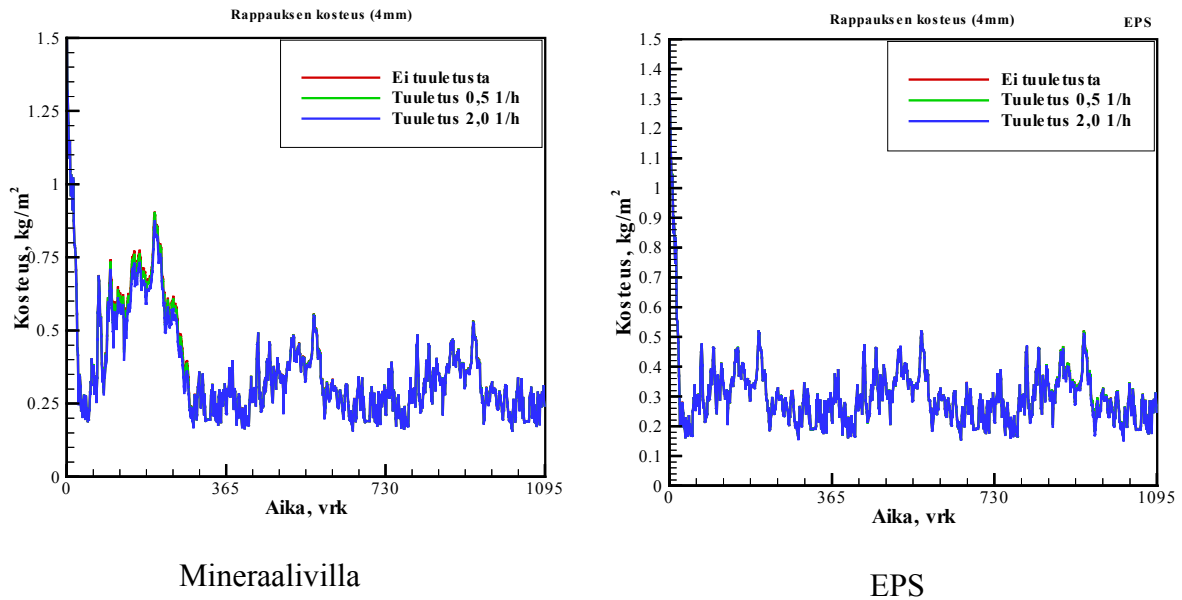


Kuva 33. Mineraalivillaeristeisen betoni-sandwich-elementtiseinän kuivuminen ohuella 4 mm (vasen) ja paksulla 20 mm (oikea) rappauskerroksella ja eri tuuletusilmavaihdoilla. Tuuletus tapahtuu eristeen lämpimältä puolelta. Betonin alkukosteus 98 % RH. Tuuletuksella ei ole vaikutusta kuivumisnopeuteen.



Kuva 34. EPS-lisäeristetyin rakenteen kuivuminen alkukosteudesta 98 % RH, kun tuuletus on eristeen ja uloimman betonikerroksen välissä. Vasemmassa kuvassa rakenteessa on 4 mm:n rappaus ja oikeanpuoleisessa 20 mm:n rappaus. Ilmanvaihtuvuus tuuletusvälissä 40 l/h merkitsee 3 metrin korkuisella seinällä ilmavirran nopeutta 3,3 cm/s. Tämä aiheutti rakenteeseen 4 %:n lisäyksen lämpöhäviöihin. Lisäeristyksellä saavutettava lämmöneristävyyden paraneminen on U-arvosta 0,4 W/m²K arvoon 0,27 W/m²K (-33 %).

Kuva 35 esittää 4 mm paksun rappauskerroksen kosteuspitoisuuden ajan funktiona. Rappauskerroksen kosteudessa on havaittavissa ensimmäisen vuoden aikana betonin kosteuden kuivumisen vaikutukset mineraalivillaeristystapauksessa.



Kuva 35. Rappauskerroksen kosteus eri tuuletusilmavirroilla ja eristevaihtoehdoilla, kun rappauskerroksen paksuus on 4 mm. Mineraalivillaeristetyssä rakenteessa on selvästi nähtävissä eristekerroksen parempi vesihöyrynläpäisykyky – ensimmäisen vuoden aikana rappaukseen tulee betonielementistä kuivuvaa kosteutta merkittävästi enemmän kuin EPS-eristetyssä tapauksessa.

8. Yhteenveto

8.1 Sateenpitävyyden määrittäminen ja riskiarviot

Rakenteiden sateenpitävyys riippuu useimmiten niiden detaljien toteutuksesta eikä niinkään ns. puhtaan seinäosan toimivuudesta. Pelkän ns. puhtaan seinäosan toimivuuden osalta kyse on lähinnä uloimman materiaalikerroksen vedenläpäisevyyssominaisuuksista. Kosteuskuormituksen kannalta materiaalikerrosten vedenläpäisevyyden merkitys on yleensä jokseenkin merkityksetön verrattuna tilanteeseen, jossa rakenteen sisään pääsee vettä viistosateen vaikutuksesta, esimerkiksi ikkunapellityksen takaa tai muusta rakennedetaljista. Rakennedetaljin sateenpitävyyden pettäminen voi johtaa suuriin paikallisiin kosteuskuormiin, joita rakenteen kuivumiskyky ei riitä poistamaan toivotussa ajassa.

Voimakkaan tuulen aiheuttama riski rakenneosien sateenpitävyydelle riippuu mm. rakennuksen sekä sen rakenteiden ja ympäristön aiheuttamista paikallisista ilmavirtauksista ja painegradienteista sekä niiden dynamiikasta, rakenteelle kriittisten paineolojen ylittymisen kestosta ja todennäköisyydestä esiintyä samanaikaisesti merkittävän sademäärän kanssa. Siten viistosateen tunkeutumisen esiintymisriski voi olla varsin pieni, vaikka sen aiheuttama kosteusrasitus rakenteelle onkin huomattava. Riskin tarkka arviointi onkin lukuisista tekijöistä johtuen vaikeaa.

Pelkälle puhtaalle rakenneosalle tehtävät kokeet eivät anna kuvaa koko rakennuksen sateenpitävyydestä vaan kuvaavat lähinnä ideaalisesti toteutetun seinämän materiaalikerrosten toimintaa lyhytaikaisessa viistosateessa. Tuloksen avulla voidaan arvioida sateen aiheuttamaa kosteuskuormitusta rakenteelle silloin, kun rakenteen läpi ei varsinaisesti vuoda vettä viistosateella. Rakennedetaljeille tehtävät kokeet antavat edellistä paremman kuvan sateenpitävyyteen liittyvistä riskeistä, mutta niiden aiheuttamaa kosteuskuormitusta ei voida arvioida tarkasti. Usein se voi kuitenkin olla niin suuri, että se aiheuttaa merkittävän vaurioitumisriskin rakenteelle.

Alhainen viistosateen aiheuttama kosteusrasitusriski edellyttää mm. sateenpitävää tai tuuletettua ulkoverhousta, läpi tunkeutuneen veden viemärointiä tuuletusraosta ulos, mahdollista vettä hylkivää sääsuojakerrosta tuulensuojan pinnalle ja ennen kaikkea rakenteen liitos- ja läpivientidetaljien huolellista suunnittelua ja toteutusta. Rakenteiden ja rakennedetaljien kokeellinen tutkimus auttaa varmistamaan toteutuksen toimivuuden. Tutkimuksessa esitetty koemenetelmä, jossa tutkittavan rakenteen pintaan kohdistuva viistosade tuotetaan virtaavan ilman avulla, antaa mahdollisuuden tutkia esimerkiksi rakenteen ulkoverhouksen detaljien sateenpitävyyttä paremmin todellisia ilman virtausolosuhteita vastaavissa tilanteissa kuin kokeet, joissa paine-ero on koko rakenteen yli.

8.2 Rakenteen kuivumiskyvyn merkitys

Rakenteiden kosteusteknisessä toimivuudessa on varauduttava sisä- ja ulkoilman olosuhteita suurempaan kosteuskuormitukseen, vähintäänkin rakennuskosteuden kuivatukseen riittävässä ajassa haittaa aiheuttamatta.

Rakenteen kuivumiskyvyn arviointi on usein perustunut materiaaliominaisuuksien, lähinnä lämmöneristeen ulkopuolisen kerroksen vesihöyrynläpäisevyyden tason, tarkasteluun ja sen käyttöön laskennassa tai kokeellisella puolella yksittäisen rakenteen kosteusteknisen toiminnan mittauksiin kokeisiin valituissa sää- ja kuormitusoloissa. Vesihöyrynläpäisevyyden määrittäminen ns. kuiva- tai märkäkuppimenetelmin ei välttämättä kuvaa materiaalikerroksen toimintaa kuivumisen aikaisessa tilanteessa, jossa tuulensuojakerrokseen tiivistyy jatkuvasti kosteutta, joka saattaa lisäksi ajoittain jäätymä. Yksittäiset, räätälöidyt rakenneanalyysikokeet ovat kalliita toteuttaa, ja eri rakenteille tehtyjen erillisten kokeiden tulosten suora vertailu on vaikeaa.

Esitetty kuivumiskoemenetelmä, jossa rakenteet testataan pelkistettyinä lämmöneristeen ja sen ulkopuolisen kerroksen leikkauksina ja jossa voidaan tutkia samanaikaisesti useita rinnakkaisia koekappaleita, antaa mahdollisuuden entistä helpommin määrittää rakenteiden kuivumiskyky siten, että tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään ja niiden antamaa tietoa voidaan tarvittaessa käyttää täydentämään materiaaliominaisuustietoa hyvin määritetyn tilassa ja myös jäätymisalueella. Täydennettyä materiaaliominaisuustietoa voidaan käyttää hyödyksi esimerkiksi laskentamalleissa, joilla voidaan arvioida koko rakenteen pitkäaikaistoimintaa normaaleissa kosteusrasitusoloissa.

Esitettyssä mittausmenetelmässä kuivattava kosteus on vapaana vetenä lämmöneristekerroksen lämpimällä puolella, mikä ei aina vastaa tilannetta käytännössä. Kuvattu tapaus edustaa kuivauksen kannalta tilannetta, jossa kosteusvirtaus lämmöneristeen läpi on suuri ja paikalliset kosteuskertymät voivat siten kehittyä korkeiksi. Jos alkukosteus on sitoutuneena materiaaleihin, sen siirtyminen lämmöneristekerroksen läpi tuulensuojan pintaan voi tapauksesta riippuen olla huomattavasti esitettyä menetelmää hitaampaa ja vastaavasti paikalliset kosteuskertymät voivat olla selvästi pienemmät. Tällöin saman ylimääräisen kosteuden kuivumisaika olisi myös pidempi kuin tapauksessa, jossa ylimääräinen kosteus on vapaana vetenä. Lisäksi useilla materiaaleilla kosteudenläpäisevyys kasvaa kosteuspitoisuuden kasvaessa, joten voimakas kosteuskertymä tuulensuojaan lisää kerroksen kuivumiskykyä verrattuna tilanteeseen, jossa tuulensuojan kosteus pysyy alemmalla tasolla.

Koetuloksissa kuivumisaikaan ei ole otettu kantaa, mutta tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia koeoloissa. Esimerkiksi puurunkoisen seinärakenteen tapauksessa kriteerit saadaan laskennan avulla, jossa materiaalikerroksen homeen kasvun alku antaa ensimmäiset raja-arvot rakenteen toiminnalle. Laskennallista homeutumiskriteeriä ei voida

kaikissa tapauksissa soveltaa samalla tavoin. Esimerkiksi tuulettamattomassa eristerappausrakenteessa homehtumisen todellinen riski poikkeaa tuulettun, kevyen rakenteen tapauksesta johtuen mm. materiaaleista sekä ravinteiden ja homeitiöiden kulkeutumis-mahdollisuuksista rakenteeseen.

Kuivumisnopeus ei siten ole yksiselitteisesti ainoa kriteeri, jota rakenteelta edellytetään, vaan tilanne on suhteutettava koko rakenteen kosteuskuormitukseen sekä alkukosteuden uudelleenjakautumisen ja kuivumisaajan aiheuttamiin mahdollisiin riskeihin. Esimerkiksi EPS-eristerappaus oli kokeissa selvästi hitaampi kuivumaan kuin vastaava rappaus mineraalivillaeristeellä. Pidempi kuivumisaika viittaisi suurempiin kosteusriskeihin, mutta toisaalta kosteuden siirtyminen EPS-eristerakenteen läpi rappaukseen rajapintaan oli niin hidasta, että tähän rajapintaan ei muodostunut olennaista kondenssia eikä myöskään jäätä pakkastilanteessa, mikä puolestaan voi alentaa esimerkiksi jäätymis- ja sulamis-syklien aiheuttamaa vaurioitumisriskiä.

Tapauksissa, joissa rakenteen uloimman kerroksen vesihöyrynvastus on suuri ja kuivuminen on siten hidasta, voidaan rakenteen kuivumiskykyä olennaisesti parantaa rajoitetun tuuletuksen avulla. Rakenteen lievä, rajoitettu tuuletus ei olennaisesti heikennä sen lämmöneristävyyttä mutta tuo tarvittavan lisän kuivumisnopeuteen. Esimerkiksi sisäpuolelta eristetty hirsiseinä (100 mm hirttä + 100 mm lämmöneristettä) toimi laskennan mukaan turvallisesti myös silloin, kun höyrynsulku oli korvattu rakennuspaperilla ja kun seinän ulkopuolisen hirsikerroksen läpi oli jatkuva $0,1 \text{ L/(s m}^2\text{)}$ suuruinen tuuletusvirta rakenteen otsapinta-alaa kohden laskettuna. Eristerappausrakenteella suhteellinen kuivumiskyvyn parantuminen tuuletuksen avulla oli niin ikään merkittävä. Rappausten takana olevan 50 mm paksun lämmöneristetilan ilman vaihtuminen tuuletuksella kaksi kertaa tunnissa (ilman tilavuusvirta noin $0,03 \text{ L/(s m}^2\text{)}$) parantaa kuivumiskykyä olennaisesti, mutta lämpöhäviöt koko rakenteen läpi kasvoivat 4 % vasta, kun tuuletus oli 40 kertaa tunnissa ($0,5 \text{ L/s m}^2$). Tärkeää tuuletuksen järjestämisessä on ilman sisään- ja ulosvirtauskohtien suunnittelu ja toteutus siten, että liian suuret tuuletusvirtaamat ja rakenteen paikallinen jäähtyminen voidaan välttää ja että tuuletus jakautuu tasaisesti koko rakenteen alueelle.

Kuivumiskokeiden tulokset antavat ensimmäisen kuvan rakenteen kuivumiskyvystä, mutta kosteusteknisen toimintavarmuuden arviointi edellyttää rakenteiden toiminnan pitkäaikaista numeerista simulointia niiden todellisia käyttöoloja vastaavissa kuormituksissa, mukaan lukien satunnainen tai rakentamisen jälkeinen ylimääräinen kosteus. Kuivumiskyvyn mittausten antama täydentävä tieto materiaalikerroksen toiminnasta kuivumisen aikana auttaa parantamaan laskennallisen analyysin tarkkuutta.

8.3 Jatkotutkimustarpeet

Tutkimuksessa kehitetyllä menetelmällä voidaan arvioida rakenteiden kuivumiskykyä, joka kuvaa osaltaan rakenteen selviytymistä ylimääräisistä kosteusrasituksista. Vaatimuksia kuivumisnopeudelle ei ole olemassa, eikä niitä voida esittää täysin yleispätevästi. Hyvä kuivumisnopeus varmistaa ylimääräisen kosteuden nopean kuivumisen rakenteesta. On kuitenkin ilmeistä, että kuivumiskriteerit vaihtelisivat suuresti eri rakenne- ja materiaaliratkaisuilla, mikä johtuu eri materiaalityyppien erilaisista turmeltumisilmiöistä ja niiden käynnistymisen aiheuttavista olosuhteista.

Rakenteen turmeltumisen alkaminen kosteuden vaikutuksesta on myös kuivumisnopeudelle raja-arvon asettava tekijä. Kosteuteen liittyvä turmeltuminen voi olla rakenteen suoranaista vaurioitumista esimerkiksi lahoamisen, korroosion tai jäätymis- ja sulamis- syklien vaikutuksesta. Rakenteen ulkonäkö tai puhtaus voi muuttua liiallisen kosteuden mahdollistaman homeen tai muun biologisen kasvun vaikutuksesta. Kosteus voi muuttaa rakenteen lämmöneristävyyttä kosteuden faasimuutosten vaikutuksesta ja kasvattamalla materiaalien lämmönjohtavuutta siten, että laskennallinen U-arvo ei enää toteudu. Kuivumisnopeus kuvaa rakenteen kokonaiskosteuden muutosta ylimääräisen kastumisen jälkeen, mutta se ei kuvaa kosteusjakaumaa rakenteessa. Turmeltumismekanismeihin vaikuttavat rakenteen paikalliset kosteuspitoisuudet ja sen lisäksi usein myös paikallinen lämpötilataso ja sen muutokset.

Homeen kasvu voidaan määrittää kokeellisesti ja sitä voidaan ennustaa laskennallisesti, joten sitä käytetään usein kosteustekniselle toimivuudelle raja-arvon antavana kriteerinä. Homehtumisherkkyys riippuu pinnan suhteellisen kosteuden tasosta, lämpötilasta ja näiden vaikutusajasta sekä erityisesti materiaalista. Homehtuminen ei sinällään heikennä tai vaurioita rakennetta. Homeen merkitys kriteerinä riippuu siitä, voiko homehtunut kohta vaikuttaa rakenteeseen rajoittuvan sisäilman laatua heikentävästi tai onko sillä esteettinen vaikutus rakenteen ulkonäköön. Homeen kasvu esimerkiksi täysin tuulettamattoman rakenteen sisärajanpinnoilla on tunnettu huonosti, eikä sille voida perustellusti käyttää samoja oletuksia kuin esimerkiksi tuuletuille tuulensuojarakenteille. Esimerkkinä tuulettamattomista rakenteista ovat mm. tutkimuksessa kokeellisesti ja laskennallisesti tarkastellut eristerappausseinät. Näiden kuivumisnopeus ei yleensä ole puurunkoisten tuulensuojarakenteiden tasoa, mutta homehtumiskriteerien soveltaminen rakenteen sisäisille materiaalirajapinnoille ei ilmeisesti ole perusteltua.

Olennaista rakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta tarkasteluissa on käyttää kullekin rakennetapaukselle sopivia kriteereitä. Kuivumiskyvyn määrittämiseen soveltuva menetelmä antaa kuvan yhdestä kosteusteknisestä turvallisuuteen vaikuttavasta tekijästä, vaikkakaan se ei ole yksinään riittävä vertailtaessa erilaisia rakennusratkaisuja keskenään. Kun toimivuuden tarkastelua täydennetään laskennallisilla menetelmillä, saadaan kattavampi kuva rakenteen todellisista toimintaolosuhteista.

Kosteustekniselle toimivuudelle raja-arvot antavien turmeltumiskriteerien ja niiden todentamismenetelmien kehittäminen vaatii edelleen paljon tutkimusta. Kriteerien määrittäminen mahdollistaisi rakenteiden toimivuuden kattavan ja vertailukelpoisen analysoinnin eri rasitusoloissa.

Lähdeluettelo

1. Lehtinen, T. & Viljanen, M. Rakenteiden lämpö- ja kosteustekninen suunnittelu. TKK-TRT-119. Espoo: 2001. 30 s. + liitt. 69 s.
2. Ojanen, T., Kokko, E. & Pallari, M.-L. Tuulensuojan toimintaperusteet. VTT Tiedotteita 1478. Espoo: 1993. 125 s. + liitt. 24 s.
3. Ojanen, T., Kokko, E., Salonvaara, M. & Viitanen, H. Havuvanerirakenteiden kosteusteknisen toiminnan perusteet. VTT Tiedotteita 1870. Espoo: 1997. 90 s. + liitt. 2 s.
4. Kokko, E., Ojanen, T., Salonvaara, M., Hukka, A. & Viitanen, H. Puurakenteiden kosteustekninen toiminta. VTT Tiedotteita 1991. Espoo: 1999. 160 s.
5. Ojanen, T., Kohonen, R. & Kumaran, M. K. Modeling Heat, Air and Moisture Transport through Building Materials and Components. ASTM Manual Series MNL18, Moisture Control in Buildings. Toim. H. R. Trechsel. Philadelphia: 1994. S. 18–34.
6. Hens, H. Task 1, Modelling, IEA/Annex 24 (Heat, air and moisture transfer in insulated envelope parts). Final Report, Vol. 1. Leuven: 1996. 90 s.
7. Salonvaara, M. & Karagiozis, A. Moisture Transport in Building Envelopes Using an Approximate Factorization Solution Method. Proceedings of the Second Annual Conference of the CFD Society of Canada. Toim. James J. Gottlieb & C. Ross Ethier. Toronto, June 1–3, 1994.
8. Kumaran, K. IEA/Annex 24 (Heat, air and moisture transfer in insulated envelope parts). Final Report, Task 3. Material Properties. Leuven: 1996. 135 s.
9. Viitanen, H. Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden structures. Effect of humidity, temperature and exposure time. The Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala: 1996.
10. Hukka, A. & Viitanen, H. A mathematical model of mold growth on wooden material. Wood Science and Technology 1997.
11. Ojanen, T., Salonvaara, M. & Simonson, C. Integration of Simplified Drying Tests and Numerical Simulation in Moisture Performance Analysis of the Building Envelope. Proceedings of the 6th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries. Trondheim, June 17–19, 2002. S. 151–158.

12. Kragh, M. K. Microclimatic conditions at the external surface of building envelopes. Technical University of Denmark. Department of Buildings and Energy. Ph.D Thesis. Report R-027, 1988.
13. Van Mook, F. J. R. Measurements of driving rain by a driving-rain gauge with a wiper. CIB taskgroup 21 meeting, Gävle, Sweden, June, 1988.
14. Blocken, B., Hens, H. & Carmeliet, J. Methods for the quantification of driving rain on buildings. Seminar 26. ASHRAE Annual Meeting, June 22–26, Honolulu, HI, 2002.
15. Lacy, R. E. A note on driving rain at Garston. C.I.B. Bulletin: 1964, 4, s. 6–9.
16. Lacy, R. E. Driving-rain maps and the onslaught of rain on buildings. Proc. RILEM/CIB Symp. Moisture Problems in Buildings, Helsinki, 1965.

Liite A: Katsaus julkisivujärjestelmien sadetiiviuden määrittämisen standardeihin ja määräyksiin

Eurooppalaisen standardisointijärjestön teknisen komitean, CEN/TC 33:n, piirissä on kehitetty menetelmiä julkisivujärjestelmien toiminnallisten ominaisuuksien määrittämiseksi. Näitä toiminnallisia ominaisuuksia ovat ilman- ja sateenpitävyys sekä tuulenpaineen kestävyys.

Sateenpitävyyttä koskevia menetelmiä on kolme, joista kaksi, prEN 12155 Curtain walling – Watertightness – Laboratory test under static pressure ja ENV 1350 Curtain walling – Watertightness – Laboratory test under dynamic air pressure and water spray, on tarkoitettu laboratoriomenetelmäksi ja kolmas, prEN 13051 – Curtain walling – Watertightness – Field test without air pressure using a water spray bar, on kenttämenetelmä.

Ensiksi mainittuun laboratoriomenetelmään liittyy myös standardiehdotus prEN 12154, Curtain Walling – Watertightness – Performance requirements and classification, jonka perusteella julkisivujärjestelmän vaatimuksenmukaisuus sateenpitävyyden suhteen voidaan luokitella. Seuraavassa esitetään jokaisen menetelmän keskeinen sisältö.

Sadetiiviuden määritysmenetelmät

prEN 12155: Curtain walling – Watertightness – Laboratory test under static pressure

prEN 12154: Curtain walling – Watertightness – Performance requirements and classification

Testattavan julkisivujärjestelmän tulee olla toiminnaltaan käyttövalmis. Sen tulee olla täydessä mittakaavassa ja sisältää samat materiaalit, detaljit sekä rakenne- ja kiinnitystavat kuin käytännön rakenteen. Koekappaleen tulee olla vähintään kahden yksikön levyinen, jotta pystytään kuormittamaan vähintään yksi pystysuora sauma, karmin osa tai molemmat. Korkeuden tulee olla vähintään julkisivujärjestelmän ja seinärakenteen liittymäkohtien välinen etäisyys. Testattavan rakenteen koon tulee olla sellainen, ettei testauslaitteisto jäykistä sitä. Lisäksi tulee huomioida, ettei tällä menetelmällä testata julkisivujärjestelmän ja testilaitteiston välisen sauman vesitiiviyttä eikä myöskään julkisivujärjestelmän ja seinärakenteen välistä liitosta.

Koeperiaate

Koekappale asetetaan testikammioon siten, että ulkopinta tulee kammioon päin, jolloin testin aikana koekappaleen ulkopintaan kohdistuu ylipaine. Koekappaletta sadetetaan vakiomäärällä vettä siten, että koekappaleen ulkopinta kastuu kauttaaltaan. Standardin mukaan tämä vesimäärä on 2 l/min/m². Sadetuksen aikana nostetaan painetta testikammiossa askelittain määräväleihin. Standardin mukaan koekappaletta sadetetaan ensin 15 minuuttia 0 Pa:n testipaineella, jonka jälkeen painetta nostetaan 50 Pa:n välein siten, että jokaisen paineaskeleen kesto on 5 min. 300 Pa:n jälkeen painetta nostetaan 150 Pa:n askelin. Jokaisessa painetasossa tarkastetaan julkisivujärjestelmän vesitiiviys. Käytännössä vesitiiviys tarkoittaa sitä, että vesi ei saa jatkuvasti tai toistuvasti kastella koekappaleen sisäpintaa tai mitään koekappaleen osia, joiden on tarkoitus pysyä kuivana.

Julkisivujärjestelmän vesitiiviys määritellään sen maksimitestipaineen mukaan, missä koekappale on vesitiivis. Standardiehdotuksessa prEN 12154, Curtain Walling – Watertightness – Performance requirements and classification, julkisivujärjestelmät luokitellaan vesitiiviiden suhteen taulukossa 1 esitettyihin luokkiin.

Sadetiiviiden luokitus standardiehdotuksen prEN 12154, Curtain Walling – Watertightness – Performance requirements and classification mukaan.

Maksimitestipaine P_{max}, Pa	Luokitus
150	R4
300	R5
450	R6
600	R7
>600	RE xxx

Käytännössä koekappaleita, jotka vuotavat 150 Pa tai sitä alemmassa paineessa (sadetusaika 0–30 min), ei voi luokitella. Koekappaleet, jotka ovat vesitiiviitä yli 600 Pa:n paineessa (sadetusaika yli 50 min), kuuluvat luokkaan RE (erikoisluokka). Tässä luokassa ilmoitetaan kirjaimen E lisäksi numeroin testipaine, missä koekappale on ollut vesitiivis, esim. RE 750 tai RE900.

ENV 1350 Curtain walling – Watertightness – Laboratory test under dynamic air pressure and water spray

Menetelmän periaate on se, että koekappaleen ulkopintaa sadetetaan vakiomäärällä vettä samalla kun siihen kohdistetaan säännöllisiä paineiskuja ja määrätty turbulenti ilmavirta. Kokeen aikana seurataan koekappaleen vesitiiviyttä. Kokeen lähtökohtana on, että ensin on määritetty staattisessa paineessa painetaso, jossa koekappale on vesitiivis

(prEN 12155), ja tämän painetason ja siitä lasketun alemman painetason dynaamisesti vaihdellessa seurataan koekappaleen vesitiiviyttä. Tämä standardi on ns. koestandardi, josta kerätään määrätty aika käyttökokemuksia, ennen kuin se hyväksytään tai hylätään eurooppalaiseksi standardiksi. Tätä menetelmää ei siten käytetä osoitettaessa julkisivujärjestelmän vaatimuksenmukaisuutta.

prEN 13051 Curtain walling – Watertightness – Field test without air pressure using a water spray bar

Menetelmä on ns. kenttämenetelmä, jolla rakennukseen asennetun julkisivujärjestelmän vesitiiviyttä voidaan testata.

Testattaessa uutta julkisivujärjestelmää tulee odottaa riittävä aika, jotta esim. julkisivujärjestelmässä käytetyt liimaus- ja saumaussmassat ovat kuivuneet. Lisäksi tulee varmistua, että voidaan tarkastaa julkisivujärjestelmän sisäpinnat vesivuotojen suhteen ja tarvittaessa poistaa lattia- ja kattolaatat tai vastaavat sisäverhoukset. Sadetettavan alueen korkeus ei saa olla yli 3,5 m tai 1,5 x kerroskorkeus, kumpi sitten on pienempi. Mikäli julkisivujärjestelmä testataan alue kerrallaan, tulee sadetus aloittaa alimmasta kerroksesta ja edetä rakennuksen yläosiin.

Koeperiaate

Kokeessa julkisivujärjestelmää tai sen osaa sadetetaan suuttimilla, jotka on kiinnitetty määräväleihin tankoon, joka sijaitsee vaakasuorassa 250 mm:n etäisyydellä julkisivujärjestelmän ulkopinnasta. Periaate on, että koeluetta sadetetaan vakiomäärällä vettä siten, että koalueen ulkopinta kastuu kauttaaltaan. Standardin mukaan suuttimista tulevan veden määrän tulee olla 2 l/min ja sadetuskulman 120°. Sadetusaika on 30 min, jona aikana seurataan mahdollisia vesivuotoja sisätiloihin. Sadetuksen jälkeen vedentulo keskeytetään ja seurataan edelleen 30 min. ajan mahdollisia vesivuotoja. Havaittaessa vesivuotoja määritetään mahdollisimman tarkasti kohta tai kohdat, joista vesi pääsee rakenteen läpi. Mikäli vesivuotoja ei havaita, voidaan sadetuslaitteisto siirtää seuraavalle testialueelle.



Tekijä(t) Ojanen, Tuomo & Salonvaara, Mikael			
Nimeke Kuivumiskykyiset ja sateenpitävät rakenteet			
Tiivistelmä <p>Rakenteiden suurimmat rakenteiden kosteusriskit liittyvät ulkopuolisen kosteuden tunkeutumiseen rakenteen sisään ja rakenteen rajalliseen kuivumiskykyyn verrattuna mahdollisiin kosteuskuormiin rakentamisen tai käytön aikana.</p> <p>Rakenteiden kuivumiskyvyn kokeellinen määrittäminen ja siihen liittyvä laitteisto tuotettiin rakenteiden ja niiden tuulensuojakerrosten kuivumistilanteen aikaisten kosteudensiirtominaisuuksien tutkimus- ja testauskäyttöön soveltuvaksi. Koelaitteistolla voidaan tutkia ja vertailla yhtä aikaa 20 rinnakkaista rakennetta tyypillistä kuivumistilannetta vastaavissa oloissa. Menetelmällä voidaan määrittää mm. kosteuden tiivistymisen ja jäätymisen vaikutus tuulensuojan kykyyn läpäistä vesihöyryn diffuusiota. Rakenteisiin asetetun alkukosteuden kuivumista seurataan ja tuloksena saadaan tutkittujen rakenteiden kuivumiskyky tarkasteluoloissa ja lisäksi voidaan määrittää tuulensuojakerroksen vesihöyryn tehollinen läpäisevyys kuivumistilanteessa.</p> <p>Sadeveden tunkeutumisriskin määrittäminen kokeiltiin laitteistolla, joka normaalin sadekoelaitteistosta poiketen tuottaa tuulen paineen tutkittavan rakenteen ulkopinnalle, eikä vain paine-eroa rakenteen yli. Menetelmän etuna on ulkoilman sateenpitävyyden testaaminen mahdollisimman hyvin todellisia tuulen tuottamia painesuhteita vastaavissa oloissa, jolloin paikallisen painegradientin vaikutus rakennekerroksen tai -detaljin sateenpitävyyteen tulee otettua huomioon.</p> <p>Hyvä kuivumiskyky ja sadeveden tunkeutumisen estäminen parantavat rakenteen vikasietoisuutta ja kosteusriskien hallintaa. Jos rakenteen uloimman kerroksen diffuusiovastus on suuri, voidaan rakenteen kuivumiskykyä olennaisesti parantaa rajoitetulla tuuletuksella tämän kerroksen läpi. Suhteellisen pienikin tuuletusilmavirtaus kasvattaa tällaisen rakenteen kuivumiskykyä huomattavasti ilman, että sen lämpötekniinen toiminta heikkenee.</p>			
Avainsanat construction, structures, moisture insulation, driving rain, water proofing, ventilation, water vapour, drying, wind barrier, rain penetration, rainproof structures			
Toimintayksikkö VTT Rakennustekniikka, Lämpömiehenkuja 3, PL 1804, 02044 VTT			
ISBN 951-38-6091-4 (nid.) 951-38-6092-2 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Projektinumero R0SU00656	
Julkaisu-aika Lokakuu 2002	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivu- 66 s. + liitt. 3 s.	Hinta B
Projektin nimi Kuivumiskykyiset ja sateenpitävät rakenteet		Toimeksiantaja(t) Tekes, yritykset	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	



Author(s) Ojanen, Tuomo & Salonvaara, Mikael			
Title Structures with high drying efficiency and resistance against rain penetration			
Abstract <p>The highest risks in the moisture performance of a structure are engaged with water or rain penetration from outdoors into the structure and with limited drying efficiency of the structure when compared to the possible moisture loads during the construction and occupation.</p> <p>A method to experimentally study the drying efficiency of structures was developed and a test device was built. This method can be used to analyse and test the moisture transport through the wind barrier layer out from the structure during the drying phase. Altogether 20 parallel intersection of structures or structure components can be studied simultaneously. The drying of the initial moisture load is monitored under selected warm and cold side temperatures corresponding to realistic conditions. The results show how the condensing and also freezing of moisture on the inner surface of the wind barrier layer affects the drying efficiency, and also the effective vapour permeability of the material layer can be solved.</p> <p>Rain penetration into structure was studied experimentally with a device that produces pressure difference by high air flow hitting the structure surface. The benefit of this method is that the pressure gradients along the siding and at outer parts of the structure are relatively similar to those caused by the wind. This allows a more liable study of the effects of local pressure gradients on the rain water penetration through structure details.</p> <p>High drying efficiency and rainproof structures improve the control and elimination of moisture risks. If the water vapour diffusion resistance of the wind barrier or other outer layer of the structure is high, the drying efficiency can be significantly improved by arranging limited ventilation through this layer. Even a very low ventilation flow can increase the drying moisture flow without affecting the thermal resistance of the structure.</p>			
Keywords construction, structures, moisture insulation, driving rain, water proofing, ventilation, water vapour, drying, wind barrier, rain penetration, rainproof structures			
Activity unit VTT Building Technology, Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 1804, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-6091-4 (soft back ed.) 951-38-6092-2 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Project number R0SU00656	
Date October 2002	Language Finnish, engl. abstr.	Pages 66 p. + app. 3 p.	Price B
Name of project Structure with high drying efficiency and resistance against rain penetration		Commissioned by Tekes, material and building component industry	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back edition) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	

Julkaisussa esitetään kehitetyn rakenteiden kuivumiskyvyn tutkimus- ja testausmenetelmän periaatteet ja sekä tuloksia tarkasteltujen rakenteiden kuivumiskykyyn vaikuttavista tekijöistä. Laitteistolla voidaan tutkia alkukosteuden kuivumista 20 rinnakkaisessa rakenteessa tyypillistä kuivumistilannetta vastaavissa oloissa kosteuden tiivistyessä ja jäätyessä tuulensuojan sisäpintaan. Tuloksista voidaan määrittää vesihöyryn tehollinen läpäisevyys tuulensuojalle ja täydentää näillä laskennallisten menetelmien materiaaliominaisuustietoja. Laskennallisesti tarkasteltiin tuulensuojan vesihöyrynläpäisevyyden vaikutusta kosteustekniseen toimintaan ja arvioitiin menetelmiä parantaa rakenteiden kuivumiskykyä ja kosteusteknistä turvallisuutta.

Tätä julkaisua myy
VTT TIETOPALVELU
PL 2000
02044 VTT
Puh. (09) 456 4404
Faksi (09) 456 4374

Denna publikation säljs av
VTT INFORMATIONSTJÄNST
PB 2000
02044 VTT
Tel. (09) 456 4404
Fax (09) 456 4374

This publication is available from
VTT INFORMATION SERVICE
P.O.Box 2000
FIN-02044 VTT, Finland
Phone internat. + 358 9 456 4404
Fax + 358 9 456 4374
