
LISÄLÄMMÖNERISTETYN HIRSISEINÄN KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA

Kalle Manninen

Opinnäytetyö

Ammattikorkeakoulututkinto

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Kalle Manninen	
Työn nimi Lisälämmöneristetyh hirsiseinän kosteustekninen toiminta	
Päiväys 4.5.2011	Sivumäärä/Liitteet 31/10
Ohjaaja(t) lehtori Harry Dunkel, lehtori Ville Kuusela	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Kaukoranta Hirsitalot Oy	
Tiivistelmä <p>Tämän insinööritöyön tavoitteena oli tutkia lisälämmöneristetyh hirsiseinän kosteusteknistä toimintaa. Ulkopuolista lisäeristystä pidetään yleisesti toimivana ratkaisuna. Kokemuksia nykyaikaisesti eristetyistä rakenteista on kuitenkin melko vähän. Työn tarkoituksena oli saada tuloksia rakenteen toimivuudesta käytännön testissä, rakenteen eristepaksuuden ollessa suuri.</p> <p>Testattavaksi rakenteeksi valittiin 180 mm paksu lamellihirsiseinä, missä 200 mm:n paksuinen lämmöneriste sijoitettiin rakenteen ulkopuolelle. Testissä vertailtiin rakenteen toimivuutta käyttämällä sekä puukuitueristettä että mineraalivillaa. Testi tehtiin Savonia-ammattikorkeakoulun rakennusfysiikan laboratorion testikontissa. Testijakso oli noin kuukauden mittainen. Kontti keräsi tuloksia rakenteeseen sijoitettujen anturien perusteella tunnin välein. Testitulokseksi saatiin lämpö- ja kosteuskuvaajat. Testituloksia verrattiin rakenteen laskennalliseen toimintamalliin.</p> <p>Tulosten perusteella arvioitiin kosteuden kertymistä rakenteeseen sekä rakenteen toimivuutta. Testituloksia ja laskentamallien tuloksia vertailemalla määritettiin myös kyseisen hirsiseinän todellinen vesihöyrynläpäisevyys, mikä osoittautui yleisesti laskennassa käytettyä arvoa suuremmaksi.</p>	
Avainsanat Rakennusfysiikka, lisälämmöneristys	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Building and Structural Engineering			
Author(s) Kalle Manninen			
Title of Thesis Humidity properties of a log wall with additional isolation			
Date	May 4, 2011	Pages/Appendices	31/10
Supervisor(s) Mr Harry Dunkel, Principal Lecturer; Mr Ville Kuusela, Principal Lecturer			
Project/Partners Kaukoranta Hirsitalot Ltd.			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to study the humidity properties of a log wall with additional isolation. External additional isolation is widely considered a well functioning solution. Practical experience on these modern isolation methods is however limited. The goal of this study was to test the functionality of a structure which has a thick isolation.</p> <p>A 180 mm thick lamella log wall to which a 200 mm thick isolation was installed on the exterior side of the wall was selected as a test structure. The structural functionality was compared between wood fiber isolation and mineral wool. The test was performed in the test container in the building physics laboratory of Savonia University of Applied Sciences. The test lasted approximately one month. The container gathered test results by one hour intervals and by using sensors placed in the structure to be tested. The temperature and humidity graphs were produced as a test result. The test results were then compared to a calculated model.</p> <p>The functionality of the structure as well as the increase of humidity in the structure were analyzed based on the results. By comparing the test results with the calculated model it was possible to determine also the true water vapour permeability of the log wall. The water vapour permeability value for the tested structure was found to be greater than the value commonly used in calculations.</p>			
Keywords Structural physics, Additional heat insulation			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO.....	6
2	RAKENNUSFYSIKKAA	7
2.1	Konvektio.....	7
2.2	Diffuusio	7
2.3	Kosteuden aiheuttamat haitat	8
3	TESTIKAPPALE.....	10
3.1	Testikappaleen rakenteen määrittäminen	10
3.2	Testikappaleen rakentaminen.....	12
3.3	Testikappaleen teoreettinen toimintamalli	17
4	TESTI.....	20
4.1	Testikontti.....	20
4.2	Testin kulku	20
5	TULOKSET	24
6	POHDINTA.....	26
6.1	Heikentynyt lämmöneristyskyky	26
6.2	Käytännön ja teorian ero.....	26
6.3	Hirsiseinän todellinen vesihöyrynläpäisevyys.....	28
6.4	Yhteenveto	29
	LÄHTEET.....	31

LIITTEET

- Liite 1 U-arvolasku 150 mm:n eristepaksuudella
- Liite 2 U-arvolasku 175 mm:n eristepaksuudella
- Liite 3 U-arvolasku 200 mm:n eristepaksuudella
- Liite 4 Testikappaleen kosteuspitoisuuskuvaaja
- Liite 5 U-arvolasku 200 mm:n eristepaksuudella kostealle eristeelle
- Liite 6 Testikappaleen lämpötilakuvaaja

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia lisälämmöneristetyin hirsiseinän kosteusteknistä toimintaa. Paksujen lisäeristettyjen seinärakenteiden toiminta on herättänyt paljon kysymyksiä. Nykyiset lämmöneristysvaatimukset edellyttävät hyvinkin paksujen eristemäärien käyttämistä. Tämä johtaa varsinkin korjausrakentamisessa tilanteeseen, missä rakenteen toimivuudesta ei voida olla enää täysin varmoja. Varsinkin sellaisten rakenteiden toimivuuteen, joissa ei voi käyttää ilman- tai höyrynsulkua, tulee suhtautua varauksella.

Tärkeimpinä ongelmien aiheuttajina rakenteen toimivuudessa voidaan pitää seinien eri puolilla vaikuttavaa kosteuseroa ja ilmanpaine-eroa. Nämä olosuhde-erot pyrkivät tasaantumaan itsestään, ja jos muuta reittiä ei ole, niin tasaantuminen tapahtuu seinärakenteen läpi. Tällöin rakenteeseen saattaa johtua myös ilmassa vesihöyryn muodossa oleva kosteus. Joissain tapauksissa tämä kosteus pääsee myös tiivistymään rakenteen sisällä, jolloin riski kosteusvaurion syntyyn kasvaa huomattavasti. Kaikilla erilaisilla rakenteilla on oma teoreettinen käyttäytymismallinsa, mikä saadaan selvitettyä laskennallisesti. Tässä työssä tutkitaan erään seinärakenteen käyttäytymistä käytännön testissä, mikä tehdään rakennusfysikaalisiin testeihin tarkoitettua lämpökonttia käyttäen.

Kiristyvien lämmöneristysvaatimusten paineessa myös hirsivalmistajat joutuvat valmistautumaan lisälämmöneristeiden käyttöön hirsirakentamisessa, vaikka hirsiseinille onkin laadittu väljemmät lämmöneristysvaatimukset kuin muille seinärakenteille. Kaukoranta Hirsitalot Oy tilasi opinnäytetyönä toteutettavan tutkimuksen, missä tutkittaisiin heidän tuotteidensa toimivuutta myös nykyaikaisesti eristetyssä rakenteessa. Savonia-ammattikorkeakoulun rakennusfysiikan laboratorio lämpökontteineen tarjosi oivat puitteet testin tekemiseen oppilastyönä.

Kaukoranta Hirsitalot Oy on vuonna 1992 perustettu yritys, joka toimii Varpaisjärvellä. Kaukoranta Hirsitalot toimittaa sekä lamelli- että pyöröhirsikehikoita useilla eri hirsipaksuuksilla. Lamellihirttä on saatavilla 115 mm:n paksuudesta aina 240 mm:n paksuuteen saakka. Yritys tunnetaan muun muassa myös Saksassa, Ruotsissa ja Japanissa.

2 RAKENNUSFYSIKKAA

2.1 Konvektio

Rakenteiden kosteus- ja lämpötekniiseen toimintaan vaikuttavia tekijöitä lämmön ja kosteuden ohella ovat rakenteen eri puolilla vaikuttavat ilmanpaineet sekä niiden vaihtelut. Rakenteiden eri puolilla vaikuttavilla ilmapaine-eroilla on vaikutusta rakenteen lämpö- ja kosteustekniiseen toimintaan lähinnä kylmänä vuodenaikana, jolloin lämpötila- ja kosteuspitoisuuserot ovat suurimmillaan sisätilan ja ulkoilman välillä. Tämä ilmapaine-ero saa aikaan ilman virtausta rakenteen läpi, mikäli rakenteessa on sellaista epätiiveyttä, että ilman virtaus on mahdollista. Tätä kutsutaan konvektioksi. (Siikanen 1996, 31.)

Rakenteen tiivydellä eli ilmanpitävyydellä on suuri merkitys siirtyviin kosteusmääriin. Harvassa rakenteessa ilmavirtaukset ovat voimakkaampia kuin tiiviissä. Siksi myös konvektion aiheuttamat kosteusongelmat keskittyvät juuri näihin harvoihin kohtiin mitä voivat olla esimerkiksi raot, reiät, epäjatkuuskohdat ja läpiviennit yms. (RIL 107 2000, 27.)

Konvektio on pakotettua, mikäli sen aiheuttaa esimerkiksi ilmanvaihtokone, savupiippuvaikutus tai tuuli. Ilmanvaihtokoneen aiheuttama pakotettu konvektio johtuu siitä, että useimmissa tapauksissa se luo sisätilan lievästi alipaineiseksi (Rakentamismääräyskokoelma D2 2003, 3.7.6.1, 14). Sisäilman lämmitessä sen tiheys pienenee ja näin keventyneenä pyrkii nousemaan ylöspäin muodostaen tilan yläosaan ylipainetta ja alaosaan alipainetta. Jos tilasta johtaa ulos ilmanvaihtohormi tai savupiippu, niin lämmin keventynyt ilma nousee hormia pitkin ulos aiheuttaen sisätilaan alipaineen, mikä puolestaan aiheuttaa pakotetun konvektion rakenteen läpi ulkoa sisälle. Tuulen aiheuttamat paineen vaihtelut ovat melko lyhytaikaisia ja riippuvat suuruudeltaan tuulen voimakkuudesta. Luonnollinen konvektio puolestaan aiheutuu ilman tiheyseroista johtuvien ilmapaineen vaihteluiden vuoksi. (Siikanen 1996, 31- 33.)

2.2 Diffuusio

Kaasujen osapainelain mukaan epätasaisesti jakautunut kaasuseos pyrkii tasaantumaan. Tätä kaasuseoksen tasaantumista kutsutaan diffuusioksi. Yleensä kosteuden tasaantumisen eli diffuusion suunta on lämpimästä kylmempään. Tämä johtuu siitä,

että lämpimään ilmaan mahtuu enemmän kosteutta, jolloin myös vesihöyryn osapaine on lämpimässä ilmassa suurempi kuin kylmässä. Vesihöyryn osapaine tasaantuu puolestaan luonnollisesti korkeasta paineesta matalampaan. Diffuusion suuntaan vaikuttava tärkein tekijä on tilojen välillä vallitseva kosteusero. (Siikanen 1996, 56.)

Rakennustekniikassa diffuusio tarkoittaa yleensä vesihöyryn muodossa olevan kosteuden siirtymistä rakenteen läpi. Lähes kaikki rakennusmateriaalit läpäisevät jossain määrin vesihöyryä. (Siikanen 1996, 56.) Tämä määrä vaihtelee eri materiaalien välillä suuresti. Esimerkiksi muovi läpäisee vesihöyryä vähän suhteessa huokoiseen mineraalivillaan. Nykyaikaisissa seinärakennetyypeissä diffuusio on yleensä melko hidasta eikä siksi aiheuta kuivien tilojen rakenteissa juurikaan ongelmia, vaikkei rakenteessa käytettäisi minkäänlaista höyrynsulkua. (Siikanen 1996, 56.)

2.3 Kosteuden aiheuttamat haitat

Ilmavirtauksen mukana siirtyvä kosteuden määrä voi olla jossain kohdassa rakennetta moninkertaisesti suurempi kuin diffuusiolla siirtyvä kosteuden määrä (RIL 107 2000, 27). Tästä voidaan tehdä johtopäätös, että juuri ilmatiiviydellä on suuri merkitys rakenteen toimivuudessa. Ilmavirtauksen hillitsemiseen rakenteessa on käytetty jo pitkään ilmansulkupaperia. Muovia käytetään sen sijaan diffuusion estämiseksi. Tosin se toimittaa samalla myös ilmansulun virkaa rakenteessa ja on ehkä juuri siksi nykyaikana hyvin suosittu materiaali.

Kaikissa rakenteissa, kuten näkyviin jätettävän hirsiseinän sisäpinnassa, muovin käyttö ei kuitenkaan ole mahdollista. Tämä johtaa tilanteeseen, missä kosteudella on täysin vapaa tie kulkeutua rakenteeseen. Rakennetta ei pystytä suojaamaan konvektiolta eikä diffuusiolta. Tämä voi johtaa tilanteeseen, missä rakenteeseen kulkeutuu liikaa kosteutta luoden olosuhteet ongelmien synnylle.

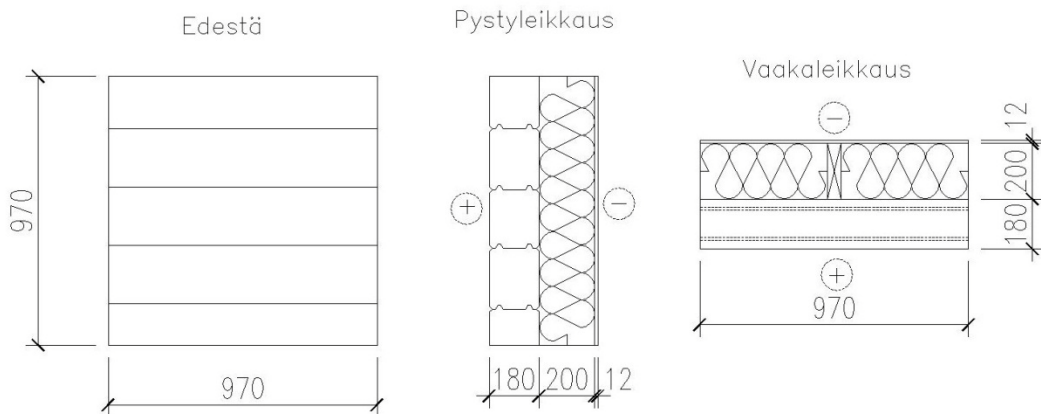
Materiaalien kosteuspitoisuuden noustessa niiden ominaisuudet muuttuvat. Esimerkiksi materiaalien lämmönvastus pienenee, joten myös kosteiden lämmöneristeiden lämmönvastus heikkenee. Kosteus voi vaikuttaa myös rakennusmateriaalien lujuteen. Varsinkin puurakenteissa ongelmia voi ilmetä vielä kostumista seuraavassa kuivumisvaiheessa, jolloin kutistumat voivat aiheuttaa hataruutta liitoksissa ja eristyksissä. (RIL 107 2000, 30.)

Liiallinen kosteus luo myös olosuhteet biologiselle turmeltumiselle. Puulla riskinä on lahoaminen tai homehtuminen. Homeen kasvu havupuiden pinnalla saattaa alkaa jo muutamassa viikossa, mikäli lämpötila on yli 0 °C ja suhteellinen kosteus yli 80 %. Lahoaminen on puolestaan mahdollista, jos puun kosteuspitoisuus on suurempi kuin 20 % sen kuivapainosta ja lämpötila yli 0 °C. Puun ympäristön suhteellinen kosteus on tuolloin noin 90- 95 %. Eräät lahottajat, kuten lattiasieni leviää vielä kuivemmissäkin olosuhteissa. (RIL 107 2000, 30 -31.)

3 TESTIKAPPALE

3.1 Testikappaleen rakenteen määrittäminen

Lähtökohtaisesti ulkopuolista lisälämmöneristystä pidetään rakenteen toimivuuden kannalta turvallisempaa vaihtoehtona sisäpuoliseen lisälämmöneristykseen verrattuna. Siksi Kaukoranta Hirsitalot halusi tutkittavan juuri tällaisen hirsirakenteen toimivuutta käytännön testissä saadakseen todisteita rakenteen toimivuudesta myös heidän tuotteillaan. Kaukoranta Hirsitalojen yleisesti käytetyn 180 mm hirsiseinän lisäksi alettiin suunnitella eristystä, mikä täyttäisi nykyisen $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ U-arvo vaatimuksen (RakMK C3 2010, 3.2.1, 7). Seinärakenne haluttiin suunnitella täyttämään nimenomaan $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ U-arvon, eikä vain hirsiseinille säädetyn kevennetyn arvon. Ensimmäisenä esille nousi kysymys eristemateriaalista. Haluttiin suosia puukuitueristettä sen hyvän kosteuden sitomiskyvyn ansiosta, mutta haluttiin myös tietoa yleisesti käytetyn mineraalivillan toimivuudesta kyseisessä rakenteessa. Siksi päädyttiin ratkaisuun, missä testikappale jaetaan kahteen lohkokoon siten, että toinen lohko eristetään Ekovillan Ekovillalevyllä ja toinen lohko Parocin kivivillalla. Tuulensuojana päätettiin käyttää huokoista puukuitulevyä. Tuulensuojalevyksi valittiin Suomen kuitulevyn 12 mm tuulileijona.



KUVA 1. Testikappaleen rakenne

Seuraava vaihe testikappaleen rakenteen suunnittelussa oli eristepaksuuden määrittäminen. Rakenteessa piti siis olla riittävästi villaa, jotta se täyttäisi $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ U-arvon. Eristeen riittävän paksuuden määrittämiseen käytettiin SFS-EN ISO 6946 mukaista laskentamallia (RIL 225 2004, 99). Lopullista riittävää eristepaksuutta alettiin määrittää haarukoimalla.

Ensimmäisenä U-arvo laskettiin rakenteelle, minkä eristepaksuus oli 150 mm. Laskussa käytettiin ekovillalevyn λ_{desing} (valmistajan ilmoittama lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvo $\text{W/m}^2\text{K}$) arvoa, mikä on kivivillan arvoa suurempi. Ekovilla on siis lämmönvastusarvoltaan kivivillaa pienempi. Tällöin voitiin olettaa, että myös kivivilla, millä on parempi lämmönvastuskyky, ylittää vähintään samaan U-arvoon käytettävän eristepaksuuden ollessa sama. Rakenne saavutti laskennallisesti $0,192 \text{ W/m}^2\text{K}$ U-arvon (LIITE 1).

Tulos ei siis yltänyt vaadittuun $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ arvoon, joten seuraavaksi U-arvo laskettiin rakenteelle, minkä eristepaksuus oli 175 mm. Kuten edellä, myös tässä laskussa käytettiin eristeen λ_{desing} arvona samaa huonommin eristävän villan lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvoa. Rakenteen laskennalliseksi U-arvoksi saatiin $0,174 \text{ W/m}^2\text{K}$ (LIITE 2). Arvo ei aivan yltänyt tavoitteeseen, mutta oli jo hyvin lähellä.

Laskentamalli olettaa hirsiseinän olevan umpipuuta, eli kauttaaltaan 180 mm paksu homogeeninen kerros. Todellisuudessa hirsiseinä koostuu toistensa päälle ladotuista palkeista eli hirsistä. Tällöin hirsien väliin jää väistämättä rako, mikä on kylläkin kehittyneen höylästekniikan ja poikkileikkausprofiilin ansiosta hyvin pieni. Lisäksi hirsisauman reunat on viistetty, mikä ohentaa seinän todellista paksuutta sauman kohdalla. Viiste näkyy rakennekuvassa (KUVA 1). Rako kylläkin tilkitään riveellä (tiivisteellä). Tässä tapauksessa riveenä käytettiin polypropeenieristettä. Siitä huolimatta hirsiseinää ei voida pitää täysin homogeenisena, joten laskun lopputulokseen täytyy suhtautua pienellä varauksella. Käytännössä se tarkoittaa sitä, että hirsiseinälle tyyppillisten ominaisuuksien heikentämä puun lämmönvastusarvo kompensoidaan eristemäärässä.

Edellä mainitusta syystä rakenne laskettiin vielä 200 mm:n eristepaksuudelle. Lasku osoitti rakenteen lämmönläpäisykertoimen olevan $0,159 \text{ W/m}^2\text{K}$ (LIITE 3). Tulos oli nyt selvästi tavoitellun arvon paremmalla puolella, joten testin lopullisten tulosten oletetaan kestävä tuloisuusmahdollisesti kiristyviä lämmöneristysvaatimuksia, sekä hirsiseinän epähomogeenisuudesta johtuvia lämmönvastusarvojen paikallisia heikentymiä.

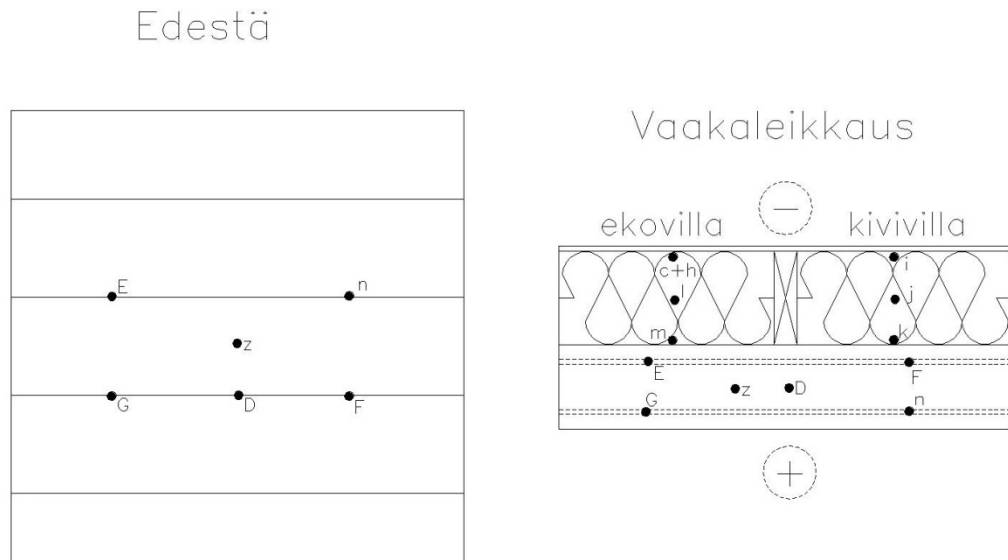
3.2 Testikappaleen rakentaminen

Testikappaleen rakentaminen alkoi rakennusfysiikan laboratoriossa 31.1.2011. Testikappaleen koon määrätti lämpökontin testikappaleaukko ja siihen sovitettu kehys. Kontti on suunniteltu niin, että kehys voidaan nostaa kontista pois testikappaleen rakentamisen ajaksi. Kehys on mitoiltaan 980 mm x 980 mm. Koko testikappaleeseen oli käytettävissä 13 kappaletta testattavaan rakenteeseen sijoitettavia antureita, mistä kukin mittasi sekä lämpötilaa että kosteutta. Antureiden johdot kuljetettiin testikappaleen ja kehyksen väliin jätetyssä kapeassa raossa, mikä lopuksi tiivistettiin.

Testikappaleen rakentaminen alkoi hirsiseinän teolla. Hirsiseinä koostui viidestä 180 mm paksusta kolmilamellisesta lamellihirrestä. Hirsiseinään antureita sijoitettiin kuusi kappaletta. Hirsiseinä rakennettiin ensin lattialle, jolloin antureiden paikkojen tekeminen oli helpompaa. Jokaiseen saumaan laitettiin polypropeenirivettä kahdeksan senttimetrin leveydeltä (KUVA 2). Ensimmäiset kaksi anturia G ja F asennettiin toiseen hirsisaumaan siten, että ensimmäinen anturi laitettiin noin 4 senttimetrin päähän hirren sisäpinnasta ja toinen noin 4 senttimetrin päähän ulkopinnasta. Kolmas anturi D laitettiin toiseen hirsisaumaan keskelle hirttä ja neljäs anturi z porattiin hirren sisään, sekin noin puoliväliin hirttä. Anturit E ja n laitettiin kolmanteen hirsisaumaan antureiden G ja F peilikuvana. Antureiden sijoittelua on selvennetty kuvassa 3.



KUVA 2. Polypropeeniriveen asennusta. Valokuva Eemeli Lehmusoksa 2011.



KUVA 3. Testikappaleeseen sijoitettujen antureiden sijainnit. Vasemman puoleisessa kuviossa näkyy hirsiseinään sijoitetut kuusi anturia. Oikealla on kuvattu kaikkien antureiden sijainnit.

Antureiden edellä selvitetyllä sijoittelulla pyrittiin saamaan mahdollisimman tarkka kuva kosteuden ja lämmön liikkeestä hirsisaumassa. Mikäli kaikki kolme anturia olisi laitettu hirsisaumaan samalle linjalle, olisi antureiden paikkojen työstö aiheuttanut hirsiseinään harvan kohdan, mikä olisi todennäköisesti muodostunut otolliseksi kohdaksi vesihöyryn ja lämmön kulkeutumiselle rakenteen läpi. Tämä olisi puolestaan vääristänyt saatuja tuloksia.

Hirsiseinän ollessa kasattuna saumaeristeineen ja antureineen, kiristettiin hirsipino vannekiskoilla (KUVA 4). Kisko kiinnitettiin ensin alimpaan hirteen toisesta päästään ja kiskon toinen pää kiinnitettiin puiseen kankeeseen. Kankea käännettiin hirsipinon päälle laitettua tallaa vasten, jolloin pino tiivistyi noin yhden senttimetrin verran. Pingotettu vanne naulattiin kiinni nyt myös ylimmän hirren kohdalta, jolloin vanteen jännitys säilyi vaikka kanki poistettiin. Kiristys tehtiin luonnollisesti kappaleen molempiin päihin. Kiristyksellä pyrittiin jäljittelemään todellista tilannetta, missä ylempien rakenteiden massa painaa hirsiseinää tiiviiksi.



KUVA 4. Vannekiskoilla kiristetty hirsiseinäelementti. Valokuva Eemeli Lehmusoksa 2011.

Valmis hirsiseinäelementti nostettiin kehykseen sisäpinnan tasalle. Elementti tiivistettiin ulkoreunoistaan polyuretaanivaahdolla, mikä myös kuivuttuaan piti elementin paikallaan kehyksessä. Hirren ulkopuolelle kehyksen sisään tehtiin 50 mm x 200 mm puutavarasta runko. Rungon tehtävänä oli kuvata todellisen tapauksen koolausta, toimia kiinnitysalustana tuulensuojalevyille, sekä jakaa villatila kahteen osaan. Tuulensuojalevyn kiinnitysteknisistä syistä 8" lankut täytyi laittaa myös kehyksen ylä- ja alapintaan varsinaisen pystykoolauksen lisäksi. Näiden saumat tiivistettiin myös ure-

taanivaahdolla. Villatilojen osastoinnin varmistamiseksi pystykoolauksen kylkeen kiinnitettiin kaista höyrynsulkumuovia. Muovin reunat tiivistettiin vielä Sika-tiivistysmassalla. Tällä pyrittiin estämään mahdollinen villatilojen keskinäinen vesihöyryn osapaine-eron tasaantuminen.



KUVA 5. Hirsielementti ja koolaus asennettuna kehykseen. Valokuva Eemeli Lehmusoksa 2011.

Anturat m ja k kiinnitettiin hirsiseinän ulkopintaan villatilaan. Tämän jälkeen villoitus voitiin aloittaa. Molemmille puolille pystykoolausta laitettiin ensin 100 mm eristettä. Toiselle puolelle laitettiin Ekovillan ekovillalevyä ja toiselle puolelle Parocin eXtra kivi-villaa. Seuraavat anturit l ja j laitettiin asennettujen villojen pintaan, jolloin ne jäisivät lopullisessa rakenteessa keskelle villatilaa. Antureiden päälle laitettiin toinen 100 mm:n eristekerros, jolloin suunniteltu 200 mm:n kokonaiseristepaksuus täyttyi. Villojen pintaan laitettiin jäljellä olevat kolme anturia siten, että anturi i sijoitettiin kivivillan puolelle ja anturit c ja h ekovillan puolelle noin 20 cm:n etäisyydelle toisistaan. Yksikin anturi puolellaan olisi varmasti ollut riittävä, mutta en nähnyt ylimääräisestä anturista olevan haittaakaan. Eristeiden suojaksi kiinnitettiin 12 mm:n Tuulileijona-tuulensuojalevy.



KUVA 6. Eristeiden asennusta kehykseen. Vuorossa Ekovillalevy. Valokuva Eemeli Lehmuksoksa 2011.

Testikappale oli nyt valmis nostettavaksi konttiin. Kappale kiinnitettiin ja kiristettiin kontin testausaukkoon kehyksestään kontin varustukseen kuuluvilla kierretangoilla ja muttereilla. Kehyksen ja kontin välinen sauma tiivistettiin tiivistysmassalla lämpimältä puolelta kosteus- ja lämpövuotokohtien ehkäisemiseksi. Antureiden johdot kytkettiin kiinni. Lisäksi sekä lämpimän puolen hirsipintaan että kylmän puolen tuulensuojalevyn pintaan kiinnitettiin laboratorioinsinööri Eemeli Lehmuksoksa kokeilussa olevat langattomat anturit, mitkä nekin mittaavat lämpöä ja kosteutta. Luukkujen ja ovien sulkemisen jälkeen testi oli valmis käynnistettäväksi.



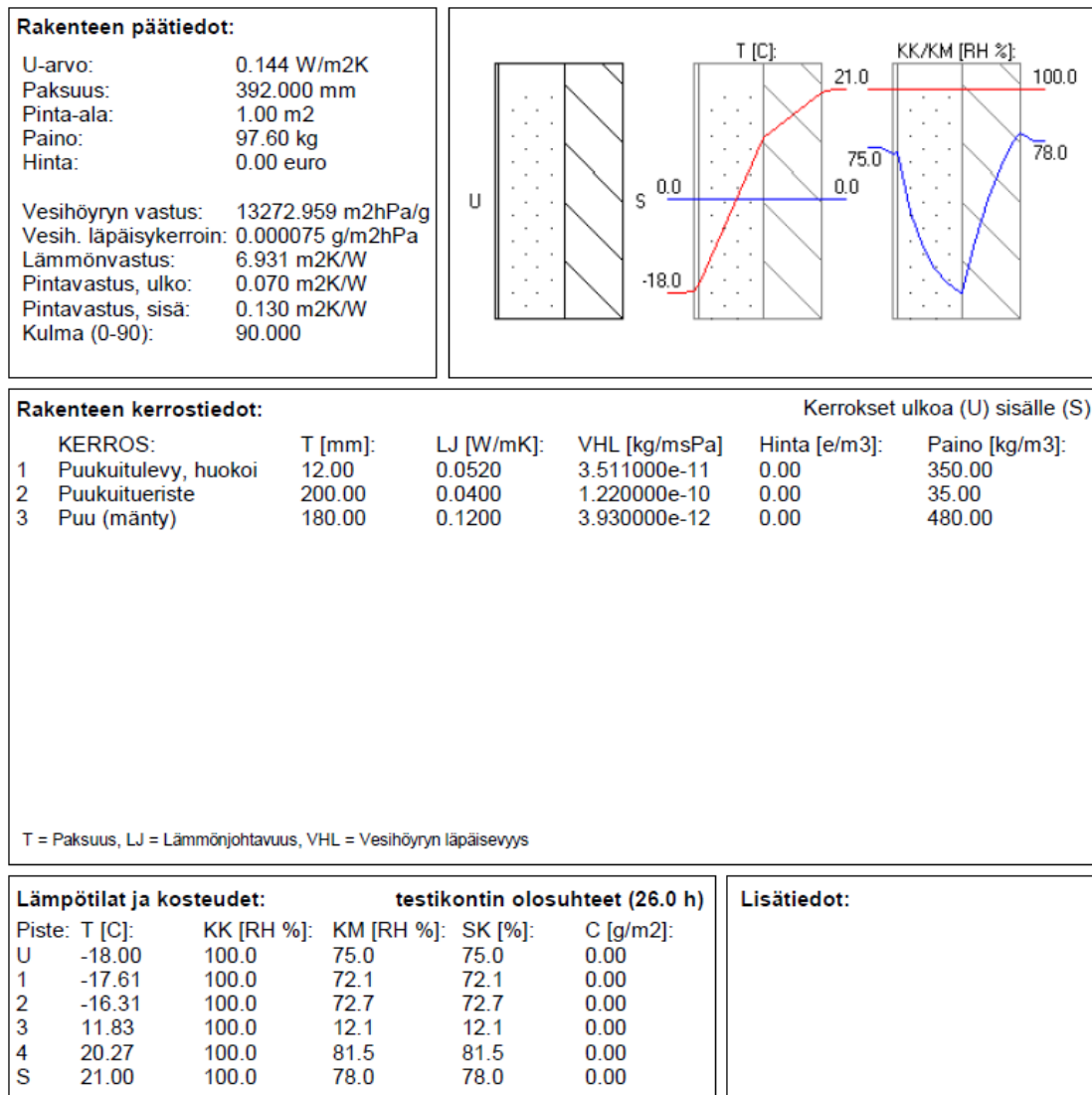
KUVA 7. Testielementti on nostettu konttiin ja koe on valmis aloitettavaksi. Valokuva Eemeli Lehmusoksa 2011.

3.3 Testikappaleen teoreettinen toimintamalli

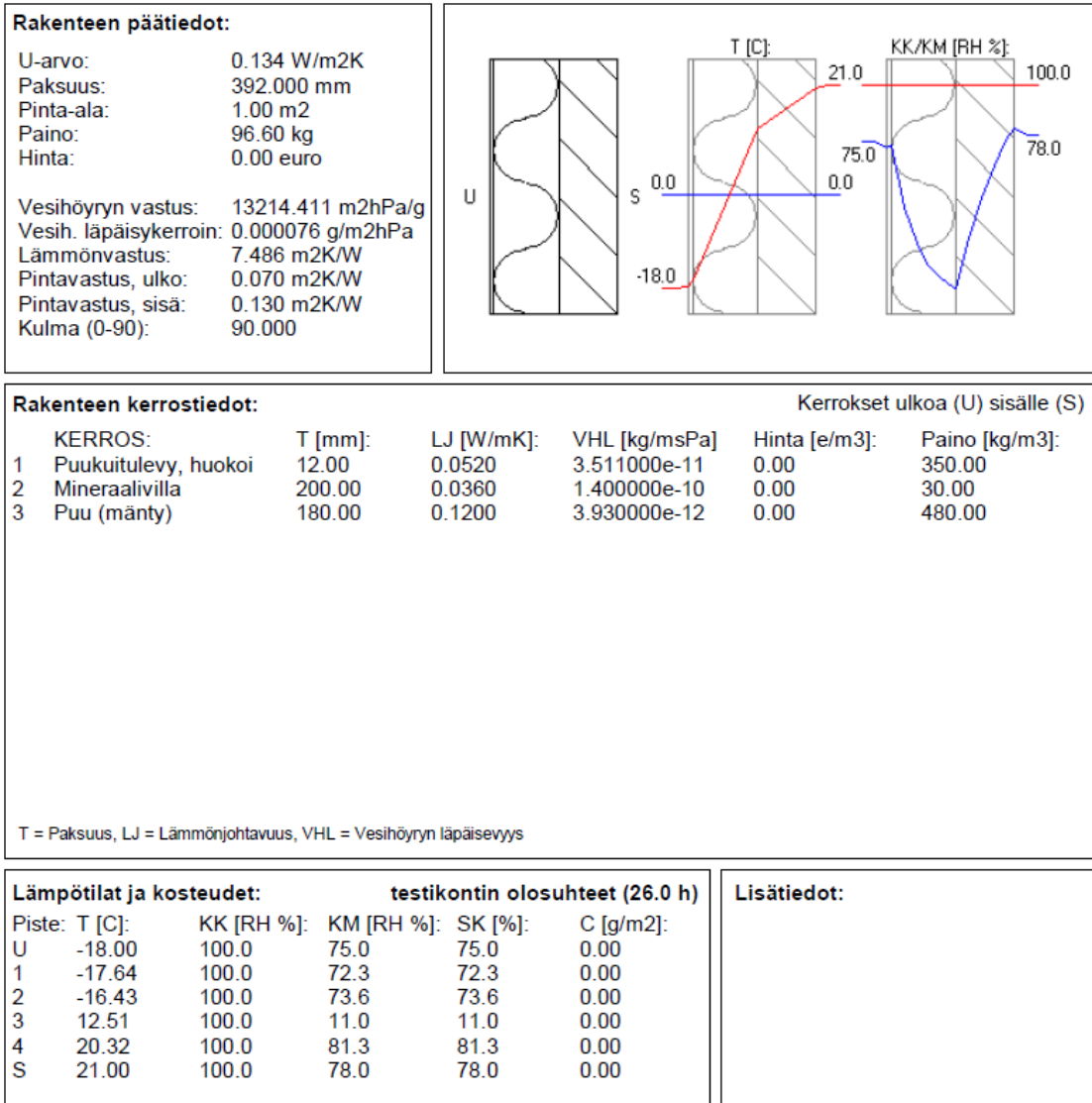
Testikappaleen toimintaa voidaan arvioida laskennallisesti. Laskemalla voidaan selvittää rakenteeseen diffuusion takia siirtyvän kosteuden määrä. Rakenteen teoreettisen toimintamallin määrittämiseen käytettiin Doftec laskentaohjelmaa. Se ilmoittaa rakenteen U-arvon, materiaalien vesihöyrynvastusten ja annettujen olosuhdetietojen perusteella rakenteessa olevat kosteuspitoisuudet eri kohdissa. Ohjelma käyttää materiaalien ominaisuuksille oletusarvoja, joita voi kuitenkin halutessaan muuttaa. Ohjelmaan syötettiin testikontissa vallinneet olosuhdearvot sekä U-arvolaskuissa käytetyt materiaalien lämmönjohtavuuden suunnitteluarvot. Materiaalien vesihöyrynvastusarvot kerättiin SFS-EN ISO 10456 standardista, sekä Tampereen teknillisen yliopiston tutkintaraportista 129.

Laskentaohjelman mukaan rakennetta voidaan pitää toimivana. Tuloksista voidaan havaita, ettei kosteuspitoisuus nouse missään vaiheessa lähelle kyllästymiskosteutta, jolloin rakenteeseen alkaisi tiivistyä kosteutta. Ohjelman ekovillalla eristetylle rakenteelle laskema U-arvo poikkeaa liitteessä 3 käsin lasketuista arvoista. Tämä johtuu siitä, että käsin lasketuissa arvoissa on huomioitu lopulliseen rakenteeseen sijoitettavan pystykoolauksen vaikutus U-arvoon. Ohjelma ei tätä huomioi. Ohjelman laskema

rakenteen teoreettinen toimintamalli sekä ekovillaseinälle että kivivillaseinälle on havainnollistettu kuvissa 8 ja 9.



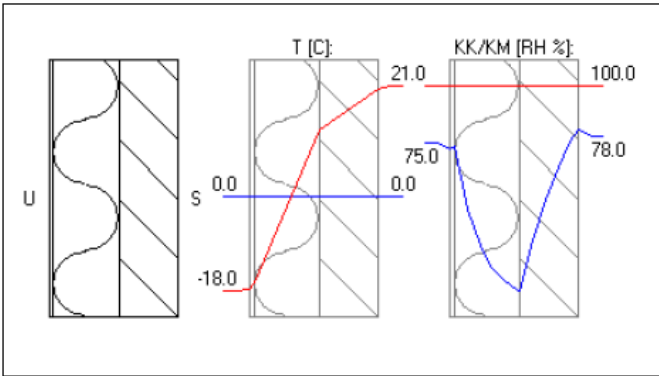
KUVA 8. Ekovillalla eristetyin hirsiseinän teoreettinen toimintamalli.



Rakenteen päätiiedot:

U-arvo: 0.134 W/m2K
Paksuus: 392.000 mm
Pinta-ala: 1.00 m2
Paino: 96.60 kg
Hinta: 0.00 euro

Vesihöyryn vastus: 13214.411 m2hPa/g
Vesih. läpäisykerroin: 0.000076 g/m2hPa
Lämmönvastus: 7.486 m2K/W
Pintavastus, ulko: 0.070 m2K/W
Pintavastus, sisä: 0.130 m2K/W
Kulma (0-90): 90.000



KUVA 9. Kivivillalla eristetyn hirsiseinän teoreettinen toimintamalli.

4 TESTI

Testivaiheen alussa testijakson kokonaispituudeksi suunniteltiin noin yhtä kuukautta. Suunnitteilla oli, että testauskontissa olevia olosuhteita voitaisiin muuttaa testin edessä rakenteen käyttäytymisen mukaan. Eemeli Lehmusoksen kokemusten mukaan konttiin asetetut olosuhteet tasaantuvat noin viikon tai kahden aikana. Tämän perusteella suurpiirteisesti laskien kuukauden testijaksoon olisi siis mahtunut kolmet eri olosuhdeasetukset.

4.1 Testikontti

Savonia-ammattikorkeakoululla on siis Kuopiossa tekniikan yksikössä rakennusfysiikkaan tutkimuksiin kehitetty lämpökontti. Tämä rakennusfysiikan laboratoriossa sijaitseva kontti on käytettävissä oppilastöihin, sekä yritysten tilaamiin testauksiin. Vahvasti eristetyn kontin ulkoseinien pohjapinta-ala on noin kuusi neliömetriä. Kontilla on korkeutta noin 2,5 metriä. Kontin sisätila on jaettu kahteen osaan, kylmään tilaan ja lämpimään tilaan. Kylmässä tilassa on ilmaa jäähdyttävä kylmäkone ja lämpimässä tilassa lämpötilaa säätelee pieni rakennuslämmitin. Molempiin tiloihin on sijoitettu ilmankostuttimet. Lisäksi kontti on kytketty omaan ilmanvaihtokoneeseensa, millä pystytään säätelemään ilman vaihtuvuutta kummallakin puolella ja näin myös säätelemään tilojen välistä ilmanpaine-eroa. Kontin kaikkia laitteita ohjataan tietokoneelta. Halutut olosuhdearvot syötetään ohjelmistoon, mikä sitten ohjaa laitteita haluttujen olosuhteiden saavuttamiseksi ja ylläpitämiseksi. Kontissa kiinteänä kummallakin puolella olevat anturit mittavat olosuhdetietoja joiden perusteella ohjelmisto osaa toimia halutulla tavalla. Testikappaleeseen sijoitetut anturit keräävät tietoa rakenteen sisällä vallitsevista olosuhteista. Tiedot tallentuvat Excel-laskentataulukon tunnin välein. Tallennusvälin voi määrittää itse kutakin testiä varten sopivaksi.

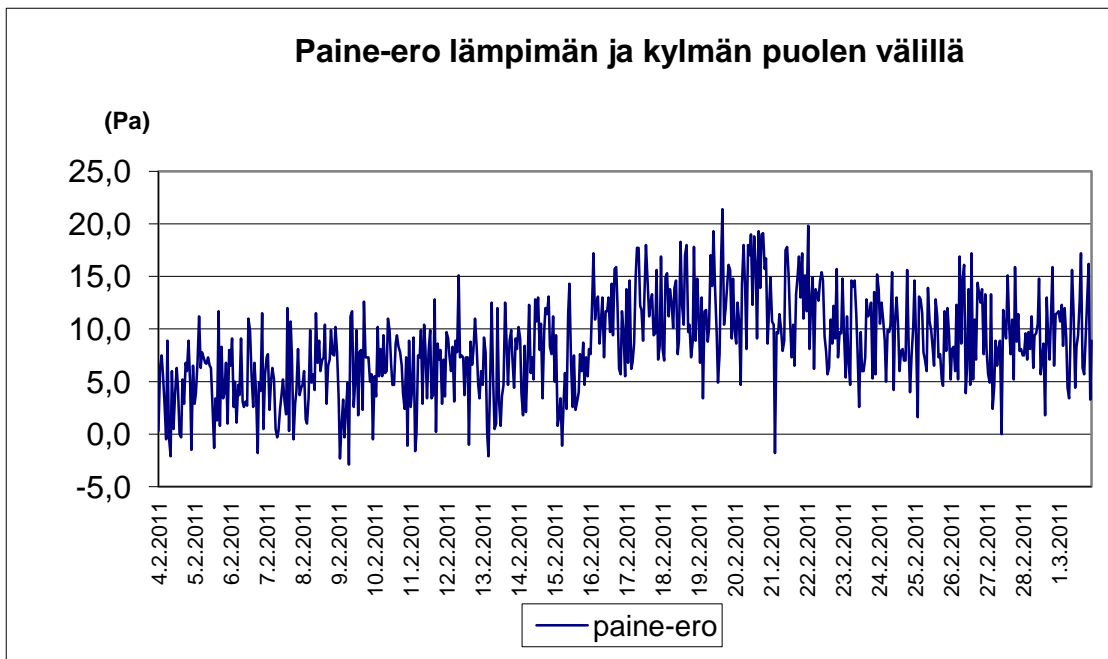
4.2 Testin kulku

Testaus aloitettiin 4.2.2011 noin kello 13. Olosuhteet määritettiin alusta alkaen rakenteelle ankariksi, koska haluttiin saada tietoa rakenteen käyttäytymisestä nimenomaan pahimmassa mahdollisessa tilanteessa. Lisäksi puolaboratorioinsinööri Juha Lehtikannon (31.1.2011) käsitys lamellihirren hyvästä kyvystä vastustaa vesihöyryä, puolsi olosuhdeasetusteni valintaa. Lamellihirren vesihöyrynvastuskyky perustuu Lehtikan-

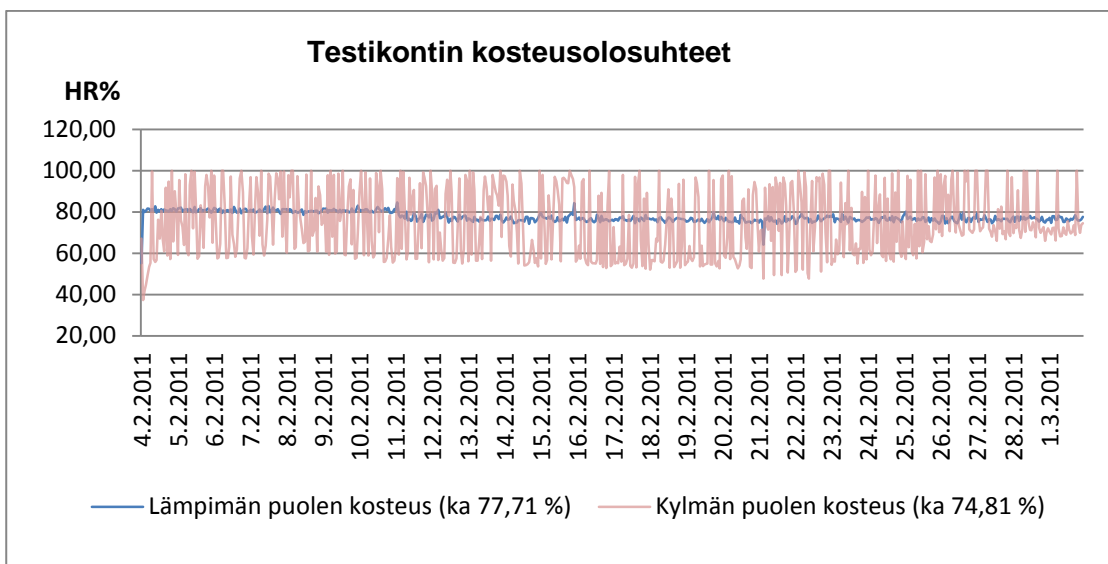
non mukaan liimasaumoihin, mitkä toimivat puun sisällä muovikalvon tavoin. Lehtikanto epäili myös kosteuden kulkeutumista itsensä puun läpi kyseessä olevan testijakson aikana, varsinkaan kun hirren paksuus on niinkin suuri kuin 180 mm:ä. Tätä hän perusteli puun kostumisen hitaudella, mikä on puulle ominaista sen solurakenteen takia. Oletettavissa oli, että mikäli hirsiseinän läpi kulkeutuisi kosteutta, kulkeutuisi se hirsisaumojen kohdalta.

Mikäli olosuhteet olisi asetettu keveämmiksi, olisi todennäköisesti päädytty tulokseen, missä rakenne selviytyy testistä ilman vaikeuksia. Tämä ei taasen palvelisi tavoitettamme löytää tästä toimivaksi vannotusta rakennemallista sen heikompia kohtia. Ankarilla olosuhteilla pyrittiin siis varmistamaan vesihöyryn pääsy massiivisesta hirsiseinästä läpi.

Testin alkaessa lämpimän puolen olosuhteet mukailivat teoriassa kylpyhuoneen olosuhteita saunomisen jälkeen. Lämpötila asetettiin 21 °C:seen ja kosteuspitoisuudeksi säädettiin noin 75 % suhteellista kosteutta. Kylmän puolen lämpötila laskettiin -18 °C:een ja suhteelliseksi kosteuspitoisuudeksi asetettiin 55 %. Lämpötilan laskiessa kylmällä puolella, sen suhteellinen ilmankosteus alkoi heti luonnollisesti nousta. Tämän vuoksi ilmanvaihtokone asetettiin poistamaan lievästi kylmän puolen ilmaa, jotta kontti saavuttaisi tavoitellun kosteuspitoisuuden helpommin. Tämä johti siihen, että lämpimän ja kylmän tilan välille syntyi pieni paine-ero, mikä pyrki siis tasoittumaan lämpimältä puolelta kylmempään päin. Ilmanvaihdosta huolimatta kosteuspitoisuutta ei saatu riittävästi laskettua. Kylmän puolen kosteuspitoisuuden keskiarvoksi koko testijakson ajalta saatiin 75 %. Seuraavissa kuvaajissa on havainnollistettu tilojen paine-ero ja kosteusolosuhteita ja niiden muutoksia testauksen aikana (KUVIOT 1-2).



KUVIO 1. Paine-ero lämpimän ja kylmän puolen välillä.



KUVIO 2. Lämpimän ja kylmän puolen kosteusvaihtelut.

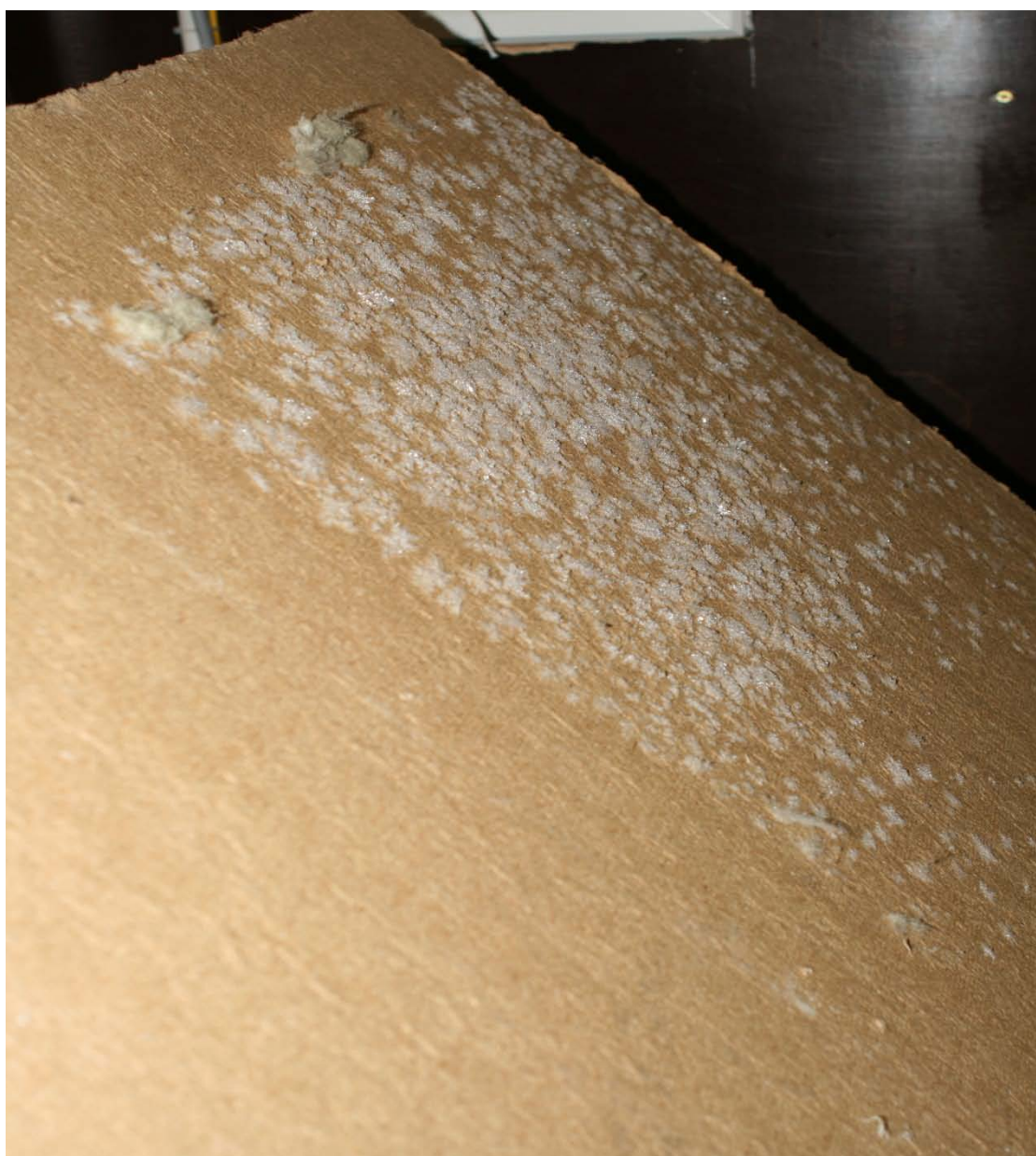
Viikon kuluessa saadut tulokset osoittivat, että kosteutta oli alkanut siirtyä hirsiseinän läpi. Olosuhteet rakenteessa olivat tasaantuneet, eikä muutosta suuntaan eikä toiseen ollut havaittavissa. Siitä syystä tilojen välistä paine-eroa päätettiin kasvattaa, jotta ilmavirtaus rakenteen läpi voimistuisi ja siten aiheuttaisi arvojen muutosta myös tuloksissa. Olosuhteita säädettiin 16.2.2011. Paine-eron kasvu on havaittavissa kuviossa 1.

23.2.2011 päätettiin demonstroida hirsiseinän pystytysvaiheessa mahdollisesti tapahtuva asennusvirhe, missä hirsisaumaan laitettava rive unohtuu tai hirsiseinää tapitettaessa kuroutuu joltain osin pois. Demonstraatio toteutettiin poraamalla hirren läpi

yhteensä neljä 10 mm:ä halkaisijaltaan olevaa reikää eri kohdista testielementtiä. Tällä toivottiin jälleen heilahtelua tuloksissa ennen testijakson loppumista. Tuloksia saatiinkin, mikä näkyy kuvaajassa villatilan kosteuden heilahduksena (LIITE 4). Testaus lopetettiin 2.3.2011 kello 13.

5 TULOKSET

Laitteiden sammutuksen jälkeen testielementin purkaminen aloitettiin välittömästi, jottei mahdollisesti jääksi tiivistynyt kosteus ehtisi sulaa ja kuivua. Purku aloitettiin kontin sisällä kylmältä puolelta. Testielementistä irrotettiin tuulensuojalevy, jotta voitiin tehdä silmämääräiset havainnot. Havaittavissa oli, että tuulensuojalevyyn oli tiivistynyt kosteutta etenkin kivivillan puolella (KUVA 10). Tästä voitiin päätellä, että kosteutta oli selvästi kulkeutunut rakenteeseen. Havaittavissa oli myös se, että kivivilla oli läpäissyt kosteutta huomattavasti enemmän kuin ekovilla.



KUVA 10. Tuulensuojalevyyn tiivistynyttä kosteutta. Valokuva Eemeli Lehmusoksa 2011.

Samalla molemmista villapuoliskoista otettiin koepalat punnitusta varten. Paloja verrattaisiin samassa olosuhteissa olleisiin villoihin, missä testielementtiin laitettut villat laitettaessa olivat. Koepalat otettiin siten myös niistä villalevyistä, mistä testikappaleeseen laitettut villat oli leikattu. Kaikki neljä koepalaa punnittiin ja laitettiin kuivatusuuniin 110 °C:seen. Toisen kerran kappaleet punnittiin vuorokauden kuivatuksen jälkeen. Kuivatusta jatkettiin vielä toinen vuorokausi, minkä jälkeen kappaleet punnittiin jälleen. Kappaleiden painoissa ei ollut tapahtunut muutosta toisen ja kolmannen punnituksen välillä, joten voitiin todeta kappaleiden olleen täysin kuivuneita. Saaduista arvoista voitiin laskea villoihin kertynyt kosteuspitoisuus. Punnitustulokset ja kosteuspitoisuudet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Punnitustulokset ja kosteuspitoisuuksien muutokset.

Ekovilla

	kg		kg	kosteus pitoisuus	kosteuspitoisuus uuden muutos
	märkä	kuiva	erotus	kg/kg	kg/kg
Testissä ollut villa	0,746	0,676	0,07	0,094	0,049
Villa ennen testiä	0,381	0,364	0,017	0,045	

Kivivilla 32 kg/m³ (Paroc neuvontapuhelin 7.4.2011)

	kg		kg	kosteus pitoisuus	kosteuspitoisuus uuden muutos
	märkä	kuiva	erotus	kg/kg	kg/kg
Testissä ollut villa	0,705	0,669	0,036	0,051	0,047
Villa ennen testiä	0,452	0,45	0,002	0,004	

	m ³		m ³	kosteus pitoisuus	kosteuspitoisuus uuden muutos
	märkä	kuiva	erotus	m ³ /m ³	m ³ /m ³
Testissä ollut villa	0,0220	0,0209	0,0011	0,0511	0,047
Villa ennen testiä	0,0141	0,0141	0,0001	0,0044	

Punnitustuloksista voidaan havaita, että kosteuspitoisuuden muutoksissa ei kivi- ja ekovillan välillä ole juurikaan eroa. Tulos on hyvin yllättävä ja herättää uusia kysymyksiä, sillä odotettavissa oli, että ekovillan kosteuspitoisuuden kasvu olisi ollut kivivillaa huomattavasti suurempi. Ekovillan etunahan on pidetty sen hyvää kosteudensitomiskykyä.

Testikontin anturien keräämistä tuloksista on tehty kuvaajat. Lämpötilakuvaaja koko testin ajalta on esitetty liitteessä 6 ja kosteuskuvaaja liitteessä 7.

6 POHDINTA

6.1 Heikentynyt lämmöneristyskyky

Eristeen lämmönvastuskyky vaihtelee sen kosteuspitoisuuden mukaan. Kosteuspitoisuuden noustessa eristeen lämmönvastuskyky heikkenee. Tuloksista nähtiin, että eristeiden kosteuspitoisuus on noussut testin aikana. Tämä on siten myös johtanut eristeiden lämmönvastuskyvyn heikkenemiseen eikä seinän U-arvo enää oletettavasti ole liitteessä 3 laskettu $0,159 \text{ W/m}^2\text{K}$. Kostuneen seinän U-arvo voidaan laskea heikentämällä eristeen λ arvoa. SFS- EN ISO 10456 standardin laskentaohjeen mukaan

$$\lambda_2 = \lambda_1 * F_t * F_m * F_a$$

F_t = Lämpötilan muuntotekijä

F_m = Kosteuden muuntotekijä

F_a = Vanhenemisen muuntotekijä

$$F_t = e^{(f_u * (u_2 - u_1))}$$

$$f_u = 0,5$$

$$u_2 = 0,0940$$

$$u_1 = 0,0450$$

$$= 1,0248$$

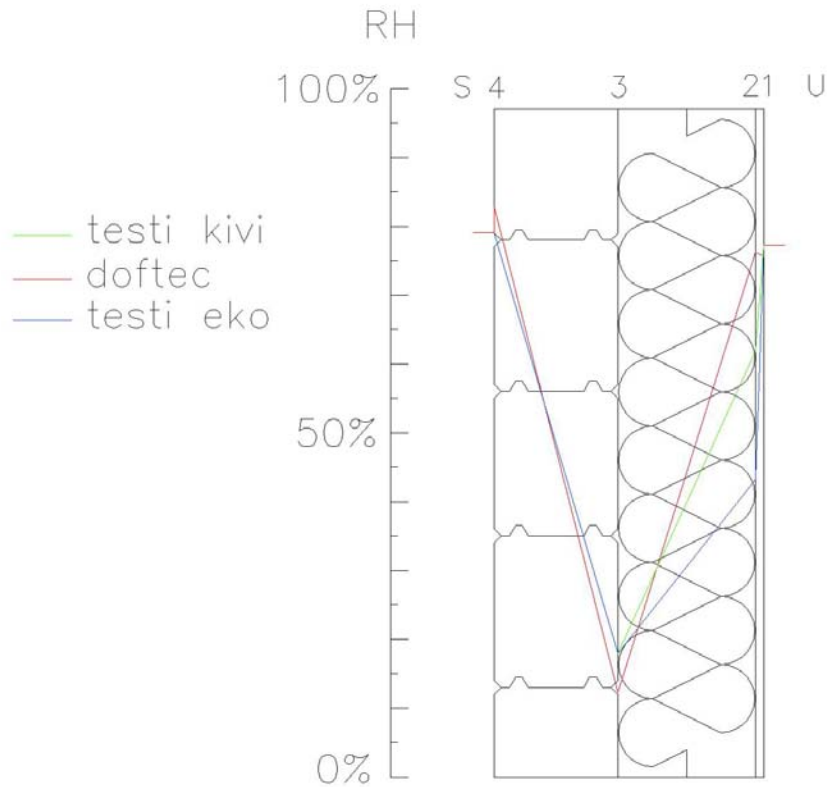
$$\lambda_2 = 0,04 * 1,0248$$

$$= \mathbf{0,041}$$

Kostuneen eristeen λ arvoksi saatiin siis $0,041 \text{ W/m}^2\text{K}$. Edelleen kostuneen rakenteen U-arvoksi saatiin $0,161 \text{ W/m}^2\text{K}$, mistä voidaan todeta, että seinän U-arvo ei ole heikentynyt merkittävästi. Laskelma on esitetty liitteessä 5.

6.2 Käytännön ja teorian ero

Yksi työn tavoitteista oli selvittää toimiiko rakenne käytännössä samalla tavalla kuin laskennallisesti. Tämän selvittämistä varten verrattiin Doftec-laskentaohjelman laskemaa rakenteen toimintamallia testistä saatuihin tuloksiin. Vertailu tehtiin testin alkuvaiheen tulosten arvoilla, jolloin paine-eron kasvun ja reikien poraamisen aiheuttamat arvonmuutokset eivät sisälly tuloksiin. Testitulokset ja laskentaohjelman tulokset kerättiin yhteen ja esitettiin samassa kuvaajassa. (KUVIO 3, TAULUKKO 2).



KUVIO 3. Laskentaohjelman ja testitulosten kosteusarvot vertailussa. Arvot on mitattu materiaalien rajapinnoissa.

TAULUKKO 2. Laskentaohjelman ja testitulosten arvot taulukoituina.

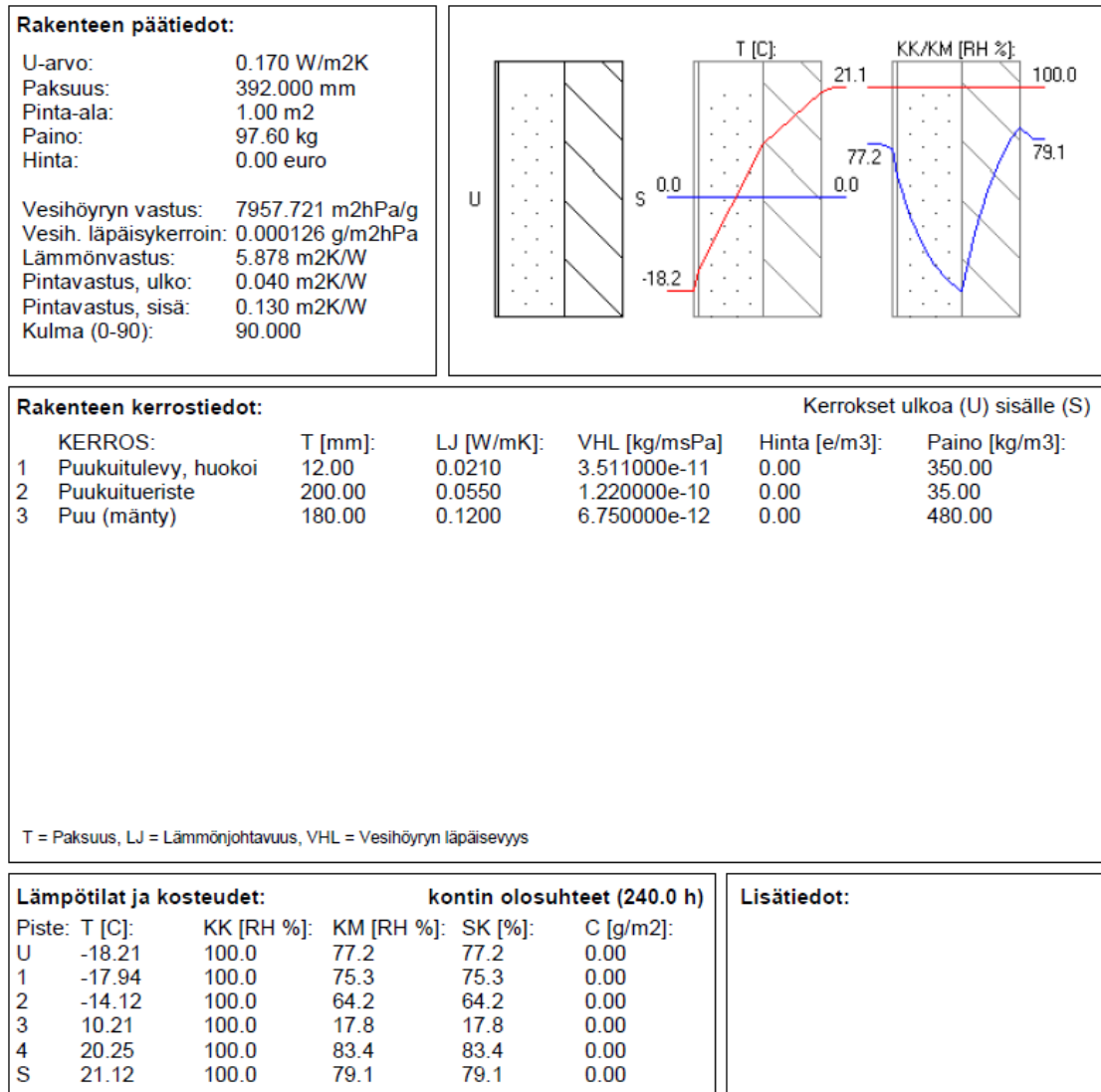
	Doftec		[C°]	Testi	
	[C°]	[RH%]		[RH%]	
				eko	kivi
U	-18,21	77,20	-18,21	77,20	77,20
1	-17,98	75,60			
2	-16,67	76,20	-14,15	43,15	61,94
3	11,83	12,30	10,15	17,89	17,89
4	20,38	82,80			
S	21,12	79,10	21,12	79,10	79,10

Tuloksista voidaan havaita, että suurin ero tulosten ja laskentaohjelman välillä on kosteuspitoisuudessa tuulensuojalevyn ja villan välissä. Tämä ero johtuu osaltaan lämpötilaerosta, mikä vaikuttaa ilman suhteellisen kosteuden prosentuaaliseen arvoon. Eli mikäli lämpötilat olisivat doftecin ja testitulosten välillä samat kyseisessä kohdassa, olisi myös niiden prosentuaalinen kosteusero (suhteellista kosteutta) pienempi.

Havaittavissa on myös kosteuspitoisuuseroa hirren ja villan rajapinnassa. Laskentaohjelma ilmoittaa kosteuspitoisuuden olevan pienempi kuin testitulokset osoittavat sen todellisuudessa olevan. Tämä puoltaa aiempaa arviotani hirsiseinän todellisesta vesihöyrynvastuksesta, mikä johtuu hirsirakenteen epähomogeenisuudesta. Laskentaohjelma käyttää umpipuun vesihöyrynläpäisevyyden arvoa.

6.3 Hirsiseinän todellinen vesihöyrynläpäisevyys

Työn aikana heräsi kysymys hirsiseinän todellisesta vesihöyrynläpäisevyydestä ja sen suuruudesta umpipuuhun verrattuna. Vesihöyrynläpäisevyyden arvoa alettiin määrittää doftec-laskentaohjelmalla. Ohjelmaan asetettiin olosuhteiksi testikontin arvot samalta testin alkuvaiheen ajanjaksolta kuin aiemmissa vertailuissa. Tavoitteena oli saada doftecin luoma tulostäyrä vastaamaan testitulosten arvoja. Ensimmäisenä muokattiin ohjelman käyttämiä lämmönjohtavuuden arvoja siten, että lämpötilat materiaalien rajapinnoissa vastasivat laskentaohjelman ja testitulosten välillä toisiaan. Pelkästään tämä toimenpide sai laskentaohjelman kosteuspitoisuuden arvoa tuulensuojalevyn ja villan rajapinnassa laskemaan lähelle testitulosten arvoa. Lämpötilojen ollessa materiaalien rajapinnoissa lähes samat, vaikutti kosteuspitoisuuteen enää vain materiaalien vesihöyrynläpäisevyyden arvo. Hirren ja villan rajapinnassa olevien kosteuspitoisuuksien arvot laskentaohjelman ja testitulosten välillä saatiin yhtä suureksi nostamalla puun vesihöyrynläpäisevyyden arvo $3,93 \cdot 10^{-12}$ kg/msPa $6,75 \cdot 10^{-12}$ kg/msPa. Tästä voitiin päätellä hirsiseinän vesihöyrynläpäisevyyden olevan todellisuudessa noin 70 % yleisesti laskennassa käytettyä arvoa suurempi. (KUVA 11.)



Kuva 11. Hirsirakenteen toimintamalli testituloksiin sidottuna.

6.4 Yhteenveto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli löytää vastaus kysymykseen: Toimiiko ulkopuolelta lisälämmöneristetty hirsiseinärakenne? Tässäkään tapauksessa ei voida antaa yleispätevää vastausta, vaan rakenteen toimivuus on aina tapauskohtaista. Opinnäytetyössä käytettyä rakennetta voidaan pitää toimivana. Testausolosuhteet olivat hyvin ankarat, lähinnä sisäpuolella vallinneen korkean kosteuspitoisuuden vuoksi. Näitä olosuhteita todellinen rakenne ei todennäköisesti tule kohtaamaan kuin hetkellisesti. Mikäli hirsiseinä on tiivis, rakenne kestää näitä ankaria olosuhteita myös pitempiä ajanjaksoja.

Rakenteen toimivuus perustuu juuri tähän hirsiseinän tiiveyteen. Tapauksissa, missä hirsiseinä on ohuempi, ikääntyessään halkeillut ja hariskoitunut tai sisältää muita epä-

tiivetyiskohtia, muuttuu rakenteen toimintamalli oleellisesti. Tällöin kosteutta pääsee rakenteeseen enemmän, ellei kosteuden siirtymistä estetä muilla keinoin, kuten ilmanvaihdolla. Tällaistaakin kostumaan pääsevää rakennetta voidaan pitää toimivana, mikäli se ehtii talven jälkeen kuivumaan. Nämä muut tapaukset ovat kuitenkin vain oletuksia, sillä tarkkaa rakenteeseen kertyvää kosteusmäärää ei voida tarkasti arvioida. Tämä johtuu siitä, että jokaisella hirsiseinällä on oma vesihöyrynläpäisevyysarvonsa.

LÄHTEET

Lehtikanto, Juha 2011. Laboratorioinsinööri. 31.1.2011. Haastattelu.

Paroc. Rakentajaneuvonta. Virranpuomi, Tero. 7.4.2011. Puhelinkeskustelu.

RakMK C3. 2010. Rakennusten lämmöneristys, määräykset 2010. [verkkajulkaisu]. [viitattu 29.3.2011]. Saatavissa: http://www.finlex.fi/data/normit/34163-C3-2010_suomi_221208.pdf

RakMK D2. 2003. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, Määräykset ja ohjeet 2003. [verkkajulkaisu]. [viitattu 30.3.2011]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/pdf/normit/1921-D2s.pdf>

RIL 107. 2000. Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Tummavuoren Kirjapaino Oy: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL Ry.

RIL 225. 2004. Rakennusten lämmönläpäisykertoimien laskenta, ohje standardien SFS-EN ISO 10456 ja SFS-EN ISO 6946 soveltamiseen. Dark Oy: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL Ry.

Romppainen, Ilkka 2011. Ekovilla. 31.3.2011. Puhelinkeskustelu.

Siikanen, U. 1996. *Rakennusfysiikka perusteet ja sovellukset*. Tammer-Paino Oy: Rakennustieto Oy.

Suomen kuitulevy Oy. [verkkosivu]. [viitattu 7.4.2010]. Saatavissa: www.suomenkuitulevy.fi

Testiseinän U-arvon laskeminen

Komponentti 600mm x 600mm / Ekovilla levy 150 mm

Osat:	sisäpuolinen pinnan vastus		R_{si}	=	0,13	m^2K/W
	hirsi		λ	=	0,12	$W/(mK)$
	koolaus + villa	puu	λ	=	0,12	$W/(mK)$
		villa	λ_{desing}^1	=	0,04	$W/(mK)$
	tuulensuojalevy	tuulileijona	λ_{desing}^2	=	0,052	$W/(mK)$
	ulkopuolinen pinnan vastus		R_{se}	=	0,04	m^2K/W

Alalikiarvo kokonaislämmönvastukselle (R''_T)

$$\begin{aligned}
 R_{si} &= 0,13 \quad m^2K/W \\
 R_1 &= \frac{0,18 \text{ m}}{0,12 \text{ W/(mK)}} = 1,5 \quad m^2K/W \\
 \frac{1}{R_2} &= \frac{f_a}{R_a} + \frac{f_b}{R_b} \\
 R_a &= \frac{0,15 \text{ m}}{0,040 \text{ W/(mK)}} = 3,750 \quad m^2K/W \\
 R_b &= \frac{0,15 \text{ m}}{0,12 \text{ W/(mK)}} = 1,250 \quad m^2K/W \\
 f_a &= \frac{550}{600} = 0,917 \\
 f_b &= \frac{50}{600} = 0,083 \\
 &= \frac{0,917}{3,750} + \frac{0,083}{1,250} = 0,311 \quad W/(m^2K) \\
 \rightarrow R_2 &= \frac{1}{0,311} = 3,21 \quad m^2K/W \\
 R_3 &= \frac{0,012 \text{ m}}{0,052 \text{ W/(mK)}} = 0,23 \quad m^2K/W \\
 R_{se} &= 0,04 \quad m^2K/W \\
 R''_T &= R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{se} \\
 &= 0,13 + 1,5 + 3,21 + 0,23 + 0,04 \\
 R''_T &= 5,115 \quad m^2K/W
 \end{aligned}$$

Yläikiarvo kokonaislämmönvastukselle (R'_T)

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{R'_T} &= \frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} \\
 R_{Ta} &= R_{si} + R_1 + R_{2(villa)} + R_3 + R_{se} \\
 R_{Tb} &= R_{si} + R_1 + R_{2(puu)} + R_3 + R_{se} \\
 R_{Ta} &= 0,13 + 1,5 + 3,750 + 0,23 + 0,04 \\
 &= 5,65 \quad m^2K/W \\
 R_{Tb} &= 0,13 + 1,5 + 1,250 + 0,23 + 0,04 \\
 &= 3,15 \quad m^2K/W
 \end{aligned}$$

$$= \frac{0,917}{5,65} + \frac{0,083}{3,15} = 0,189 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

2(2)

$$R'_T = \frac{1}{0,189} = 5,300 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$$

$$R_T = \frac{R'_T + R''_T}{2} = 5,208 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$$

$$U = \frac{1}{R_T} = 0,192 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

Rakenne ei edellytä U:n korjausta

¹ (Romppainen 31.3.3011)

² (Suomen kuitulevy Oy)

Testiseinän U-arvon laskeminen

Komponentti 600mm x 600mm / Ekovilla levy 175 mm

Osat:	sisäpuolinen pinnan vastus		R_{si}	=	0,13	m^2K/W
	hirsi		λ	=	0,12	$W/(mK)$
	koolaus + villa	puu	λ	=	0,12	$W/(mK)$
		villa	λ_{1}^{desing}	=	0,04	$W/(mK)$
	tuulensuojalevy	tuulileijona	λ_{2}^{desing}	=	0,052	$W/(mK)$
	ulko puolinen pinnan vastus		R_{se}	=	0,04	m^2K/W

Alalikiarvo kokonaislämmönvastukselle (R''_T)

$$\begin{aligned}
 R_{si} &= 0,13 \quad m^2K/W \\
 R_1 &= \frac{0,18 \text{ m}}{0,12 \text{ W/(mK)}} = 1,5 \quad m^2K/W \\
 \frac{1}{R_2} &= \frac{f_a}{R_a} + \frac{f_b}{R_b} \\
 R_a &= \frac{0,175 \text{ m}}{0,040 \text{ W/(mK)}} = 4,375 \quad m^2K/W \\
 R_b &= \frac{0,175 \text{ m}}{0,12 \text{ W/(mK)}} = 1,458 \quad m^2K/W \\
 f_a &= \frac{550}{600} = 0,917 \\
 f_b &= \frac{50}{600} = 0,083 \\
 &= \frac{0,917}{4,375} + \frac{0,083}{1,458} = 0,27 \quad W/(m^2K) \\
 \rightarrow R_2 &= \frac{1}{0,267} = 3,75 \quad m^2K/W \\
 R_3 &= \frac{0,012 \text{ m}}{0,052 \text{ W/(mK)}} = 0,23 \quad m^2K/W \\
 R_{se} &= 0,04 \quad m^2K/W \\
 R''_T &= R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{se} \\
 &= 0,13 + 1,5 + 3,75 + 0,23 + 0,04 \\
 R''_T &= 5,651 \quad m^2K/W
 \end{aligned}$$

Yläikiarvo kokonaislämmönvastukselle (R'_T)

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{R'_T} &= \frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} \\
 R_{Ta} &= R_{si} + R_1 + R_{2(villa)} + R_3 + R_{se} \\
 R_{Tb} &= R_{si} + R_1 + R_{2(puu)} + R_3 + R_{se} \\
 R_{Ta} &= 0,13 + 1,5 + 4,375 + 0,23 + 0,04 \\
 &= 6,28 \quad m^2K/W
 \end{aligned}$$

2(2)

$$\begin{aligned} R_{Tb} &= 0,13 + 1,5 + 1,458 + 0,23 + 0,04 \\ &= 3,36 \text{ m}^2\text{K/W} \\ &= \frac{0,917}{6,28} + \frac{0,083}{3,36} = 0,171 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \end{aligned}$$

$$R'_T = \frac{1}{0,171} = 5,852 \text{ m}^2\text{KW}$$

$$R_T = \frac{R'_T + R''_T}{2} = 5,752 \text{ m}^2\text{KW}$$

$$U = \frac{1}{R_T} = 0,174 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

Rakenne ei edellytä U:n korjausta

¹ (Romppainen 31.3.2011)

² (Suomen kuitulevy Oy)

Testiseinän U-arvon laskeminen

Komponentti 600mm x 600mm / Ekovilla levy 200 mm

Osat:	sisäpuolinen pinnan vastus		R_{si}	=	0,13	m^2K/W
	hirsi		λ	=	0,12	$W/(mK)$
	koolaus + villa	puu	λ	=	0,12	$W/(mK)$
		villa	λ_1^{desing}	=	0,04	$W/(mK)$
	tuulensuojalevy	tuulileijona	λ_2^{desing}	=	0,052	$W/(mK)$
	ulkopuolinen pinnan vastus		R_{se}	=	0,04	m^2K/W

Alalikiarvo kokonaislämmönvastukselle (R''_T)

$$\begin{aligned}
 R_{si} &= 0,13 \quad m^2K/W \\
 R_1 &= \frac{0,18 \text{ m}}{0,12 \text{ W/(mK)}} = 1,5 \quad m^2K/W \\
 \frac{1}{R_2} &= \frac{f_a}{R_a} + \frac{f_b}{R_b} \\
 R_a &= \frac{0,2 \text{ m}}{0,040 \text{ W/(mK)}} = 5,000 \quad m^2K/W \\
 R_b &= \frac{0,2 \text{ m}}{0,12 \text{ W/(mK)}} = 1,667 \quad m^2K/W \\
 f_a &= \frac{550}{600} = 0,917 \\
 f_b &= \frac{50}{600} = 0,083 \\
 &= \frac{0,917}{5,000} + \frac{0,083}{1,667} = 0,233 \quad W/(m^2K) \\
 \rightarrow R_2 &= \frac{1}{0,233} = 4,29 \quad m^2K/W \\
 R_3 &= \frac{0,012 \text{ m}}{0,052 \text{ W/(mK)}} = 0,23 \quad m^2K/W \\
 R_{se} &= 0,04 \quad m^2K/W \\
 R''_T &= R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{se} \\
 &= 0,13 + 1,5 + 4,29 + 0,23 + 0,04 \\
 R''_T &= 6,186 \quad m^2K/W
 \end{aligned}$$

Yläikiarvo kokonaislämmönvastukselle (R'_T)

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{R'_T} &= \frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} \\
 R_{Ta} &= R_{si} + R_1 + R_{2(villa)} + R_3 + R_{se} \\
 R_{Tb} &= R_{si} + R_1 + R_{2(puu)} + R_3 + R_{se} \\
 R_{Ta} &= 0,13 + 1,5 + 5,00 + 0,23 + 0,04 \\
 &= 6,90 \quad m^2K/W
 \end{aligned}$$

2(2)

$$\begin{aligned} R_{Tb} &= 0,13 + 1,5 + 1,67 + 0,23 + 0,04 \\ &= 3,57 \text{ m}^2\text{K/W} \\ &= \frac{0,917}{6,90} + \frac{0,083}{3,57} = 0,156 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \end{aligned}$$

$$R'_T = \frac{1}{0,156} = 6,402 \text{ m}^2\text{K/W}$$

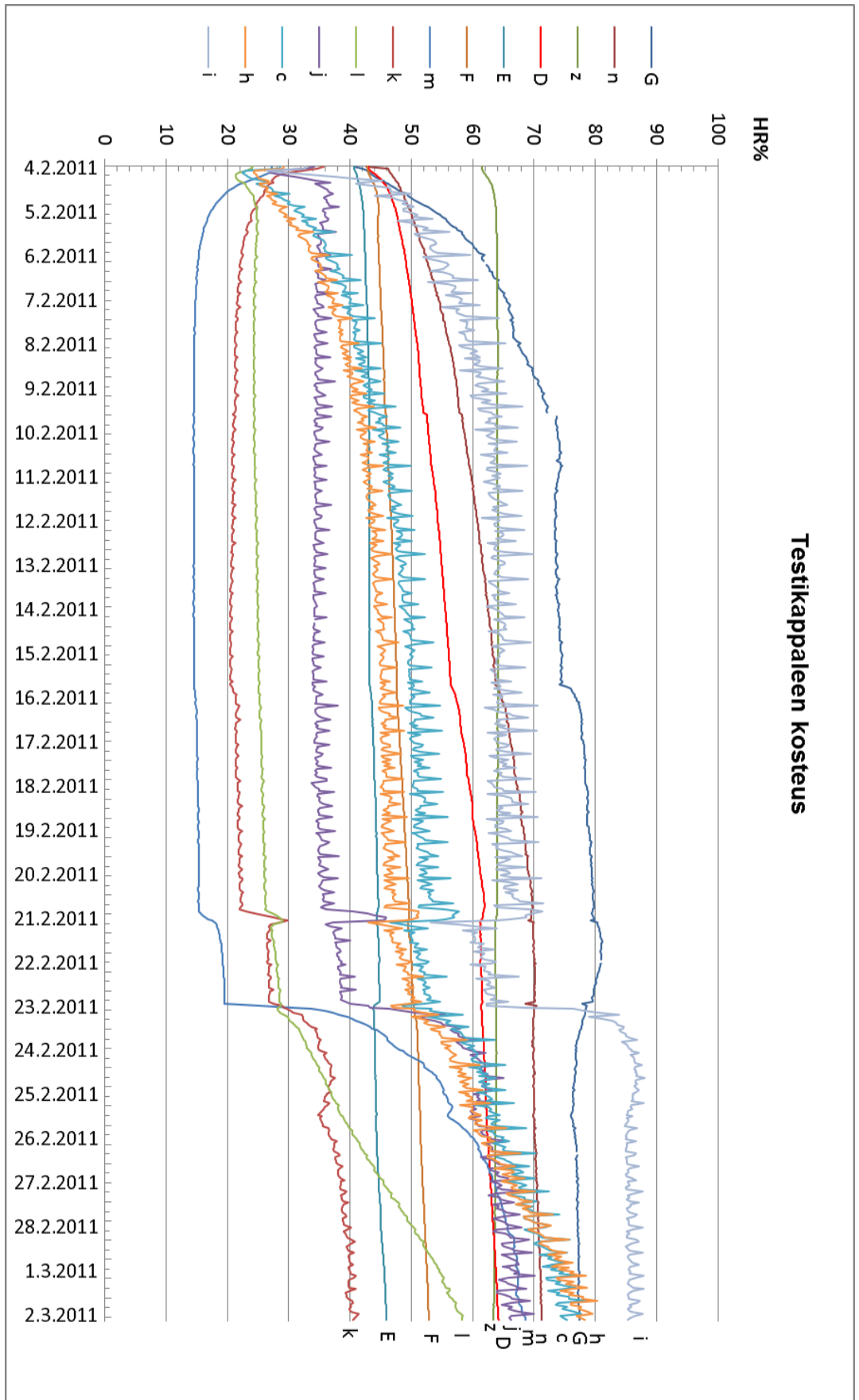
$$R_T = \frac{R'_T + R''_T}{2} = 6,294 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$U = \frac{1}{R_T} = 0,159 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

Rakenne ei edellytä U:n korjausta

¹ (Romppainen 31.3.2011)

² (Suomen kuitulevy Oy)



Testiseinän U-arvon laskeminen

Komponentti 600mm x 600mm / Ekovilla levy 200 mm, kostea eriste

Osat:	sisäpuolinen pinnan vastus		R_{si}	=	0,13	m^2K/W
	hirsi		λ	=	0,12	$W/(mK)$
	koolaus + villa	puu	λ	=	0,12	$W/(mK)$
		villa	λ_{desing}	=	0,041	$W/(mK)$
	tuulensuojalevy	tuulileijona	λ_{desing}	=	0,052	$W/(mK)$
	ulkopuolinen pinnan vastus		R_{se}	=	0,04	m^2K/W

Alalikiarvo kokonaislämmönvastukselle (R''_T)

$$\begin{aligned}
 R_{si} &= 0,13 \quad m^2K/W \\
 R_1 &= \frac{0,18 \text{ m}}{0,12 \text{ W/(mK)}} = 1,5 \quad m^2K/W \\
 \frac{1}{R_2} &= \frac{f_a}{R_a} + \frac{f_b}{R_b} \\
 R_a &= \frac{0,2 \text{ m}}{0,041 \text{ W/(mK)}} = 4,878 \quad m^2K/W \\
 R_b &= \frac{0,2 \text{ m}}{0,12 \text{ W/(mK)}} = 1,667 \quad m^2K/W \\
 f_a &= \frac{550}{600} = 0,917 \\
 f_b &= \frac{50}{600} = 0,083 \\
 &= \frac{0,917}{4,878} + \frac{0,083}{1,667} = 0,24 \quad W/(m^2K) \\
 \rightarrow R_2 &= \frac{1}{0,238} = 4,20 \quad m^2K/W \\
 R_3 &= \frac{0,012 \text{ m}}{0,052 \text{ W/(mK)}} = 0,23 \quad m^2K/W \\
 R_{se} &= 0,04 \quad m^2K/W \\
 R''_T &= R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{se} \\
 &= 0,13 + 1,5 + 4,20 + 0,23 + 0,04 \\
 R''_T &= 6,104 \quad m^2K/W
 \end{aligned}$$

Yläikiarvo kokonaislämmönvastukselle (R'_T)

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{R'_T} &= \frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} \\
 R_{Ta} &= R_{si} + R_1 + R_{2(villa)} + R_3 + R_{se} \\
 R_{Tb} &= R_{si} + R_1 + R_{2(puu)} + R_3 + R_{se} \\
 R_{Ta} &= 0,13 + 1,5 + 4,88 + 0,23 + 0,04 \\
 &= 6,78 \quad m^2K/W \\
 R_{Tb} &= 0,13 + 1,5 + 1,67 + 0,23 + 0,04
 \end{aligned}$$

2(2)

$$\begin{aligned} &= 3,57 \text{ m}^2\text{K/W} \\ &= \frac{0,917}{6,78} + \frac{0,083}{3,57} = 0,159 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \\ R'_T &= \frac{1}{0,159} = 6,306 \text{ m}^2\text{K/W} \\ R_T &= \frac{R'_T + R''_T}{2} = 6,205 \text{ m}^2\text{K/W} \\ U &= \frac{1}{R_T} = 0,161 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \end{aligned}$$

Rakenne ei edellytä U:n korjausta

¹ (Suomen kuitulevy Oy)

