

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Rakennustekniikan koulutus

Ville Seppänen

ERISTEIDEN KOSTEUSKÄYTTÄYTYMINEN OSANA
HENGITTÄVÄÄ RAKENNETTA

Opinnäytetyö
Tammikuu 2020



OPINNÄYTETYÖ
Tammikuu 2020
Rakennustekniikan koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600

Tekijä
Ville Seppänen

Nimeke
Eristeiden kosteuskäyttäytyminen osana hengittävää rakennetta

Toimeksiantaja
Karelia-ammattikorkeakoulu

Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia erilaisten lämmöneristeiden kosteuskäyttäytymistä, ja selvittää niiden kykyä toimia hengittävän rakenteen periaatteiden mukaisesti. Tutkimuksen lähtökohtana toimi hengittävien rakenteiden oletettu kyky vastaanottaa, sitoa ja vapauttaa kosteutta ympäristössä tapahtuvien muutosten perusteella. Vertailtavien lämmöneristeiden tarkastelu painottui nimenomaan näiden ominaisuuksien ympärille.

Opinnäytetyö koostuu teoriaosasta sekä kokeellisesta osasta. Teoriaosan tarkoituksena on tarjota lukijalle tietoa hengittävän rakenteen toiminnasta sekä erilaisten lämmöneristetyyppien ominaisuuksista. Kokeellinen osa koostuu kahdesta laboratoriotutkimuksesta, joissa kerättiin tietoa valittujen lämmöneristeiden toiminnasta kosteusrasituksen alaisena.

Opinnäytetyössä on analysoitu laboratoriotutkimuksien avulla kerättyä tietoa ja tehty johtopäätöksiä tutkittujen lämmöneristeiden soveltuvuudesta osaksi hengittävää rakennetta. Lisäksi opinnäytetyössä on pohdittu jatkotutkimusmahdollisuuksia ja laajennuksia suoritettuihin laboratoriotutkimuksiin.

Tutkittujen puukuitueristeiden todettiin olevan kosteusominaisuuksiltaan hengittävän rakenteen periaatteen mukaisia. Puukuitueristeet pystyivät varastoimaan hyvin niihin syötettyä kosteutta ja vapauttivat imeytyneen kosteuden tehokkaasti takaisin ympäristöön olosuhteiden muuttuessa.

Kieli
suomi

Sivuja 37
Liitteet 6
Liitesivumäärä 7

Asiasanat
hengittävä rakenne, lämmöneristeet, kosteus



THESIS
January 2020
Degree Programme in Civil
Engineering

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600

Author
Ville Seppänen

Title
Moisture Behavior of Insulations as a Part of a Breathable Structure

Commissioned by
Karelia UAS

Abstract

The objective of this thesis was to study the moisture behavior of various insulation products and to investigate their ability to operate under the principles of breathable structure. The supposed ability of breathable structure to receive, absorb and release humidity based on changes in environment worked as the basis for this thesis. The examination of the selected insulation products was focused around these qualities.

This thesis is comprised of a theoretical part and an experimental part. The objective of the theoretical part is to inform the reader about the theory behind breathable structure and about the properties of various insulation products. The experimental part of this thesis involved two different laboratory tests in which data of the selected insulation products under humidity stress was gathered.

The data gathered from the laboratory tests was analyzed in this thesis and conclusions were made regarding the suitability of the tested products to operate as a part of a breathable structure. Additionally, the possibility of follow-up tests or expansions to current tests has been considered.

The results show that the moisture behavior of wood fiber insulation products was coherent with the principles of breathable structure. Wood fiber insulation products were able to store the added humidity and they also released humidity efficiently after the changes in the environment.

Language

Finnish

Pages 37

Appendices 6

Pages of Appendices 7

Keywords

breathable structure, humidity, insulation

Sisältö

1	Johdanto	5
2	Hengittävä rakenne	6
2.1	Rakennusfysikaalisia käsitteitä	6
2.2	Hengittävän rakenteen toiminta	8
2.3	Rakennekuvaus	9
3	Lämmöneristeet	11
3.1	Yleistä	11
3.2	Mineraalivillat	12
3.3	Luonnonkuitupohjaiset lämmöneristeet	13
4	Kuivatuskoe	15
4.1	Lähtötiedot	15
4.2	Tutkimuksen suorittaminen	16
4.3	Tulokset	19
4.4	Johtopäätökset	23
5	Dynaaminen koe	25
5.1	Lähtötiedot	25
5.2	Tutkimuksen suorittaminen	27
5.3	Tulokset	29
5.4	Johtopäätökset	33
6	Analysointi	35
7	Pohdinta	36
	Lähteet	37

Liitteet

Liite 1	Kuivatuskoe pintaruiskutus: Eristeiden sisäiset vesimäärät taulukoituna
Liite 2	Kuivatuskoe pintaruiskutus: Eristeiden sisäiset kosteusprosentit taulukoituna
Liite 3	Kuivatuskoe sisään ruiskutus: Eristeiden sisäiset vesimäärät taulukoituna
Liite 4	Kuivatuskoe sisään ruiskutus: Eristeiden sisäiset kosteusprosentit taulukoituna
Liite 5	Testirakenteen suunnitelmat ja mitat
Liite 6	Tasapainokosteuskäyrät

1 Johdanto

Rakennusten sisäilmaongelmat ovat herättäneet rakennusosalalla paljon keskustelua. Huonolla sisäilmalla on suora vaikutus viihtyvyyteen ja joissain tapauksissa jopa sille altistuvan henkilön terveydentilaan. Eräänä sisäilman laatua parantavana vaihtoehtona esitetään usein rakenteen hengittävyttä. Hengittävyydellä pyritään tasaamaan sisäilman suhteellisten kosteuksien vaihteluvoimakkuuksia ja estämään ääritilanteiden syntyä. Hengittävä rakenne on kuitenkin terminä usein väärinymmärretty esimerkiksi ilmatiiveyden osalta, ja se aiheuttaa mielipide-eroja eri rakennustapojen kannattajien välillä.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia erilaisten lämmöneristeiden kosteuskäyttäytymistä osana hengittävää rakennetta. Työ sisältää teoretietoa hengittävän rakenteen periaatteista kokonaisuutena toiminnallisena yksikkönä sekä teoretietoa yleisimmistä eristetyypeistä ja niiden ominaisuuksista. Suoritetuissa tutkimuksissa perehdytään kuitenkin ainoastaan lämmöneristeiden kosteustekniseen toimintaan. Lämmöneristeiden kosteuskäyttäytymistä ja vertailua tehdään kahden laboratoriotutkimuksen avulla, joissa tutkitaan niiden kykyä vastaanottaa, sitoa ja vapauttaa kosteutta hengittävän rakenteen periaatteen mukaisesti. Opinnäytetyön tarkoituksena ei ole ottaa kantaa hengittävän rakenteen tai minkään muun rakennetyypin paremmuuteen, vaan tutkia rakenteen hengittävyyden oikeaoppista toteutumista erilaisilla eristevaihtoehdoilla.

Toimeksiantajana opinnäytetyössä toimii Karelia-ammattikorkeakoulu. Kaikki laboratoriotutkimukset on suoritettu Karelia-ammattikorkeakoulun rakennuslaboratoriossa käyttäen kyseisen laboratorion laitteistoa.

2 Hengittävä rakenne

2.1 Rakennusfysikaalisia käsitteitä

Vesihöyry

Vesihöyry on kaasumaista ja näkymätöntä vettä, jota esiintyy ilmassa sekä aineiden huokosissa.

Ilman absoluuttinen kosteus

Absoluuttisella kosteudella tarkoitetaan ilman tietyllä ajanhetkellä sisältämää vesihöyrypitoisuutta. Absoluuttisen kosteuden yksikkö on g/m^3 .

Ilman suhteellinen kosteus

Suhteellisella kosteudella tarkoitetaan ilman sisältämän vesihöyrymäärän ja suurimman mahdollisen ilman sisältämän vesihöyrymäärän eli kyllästystilassa olevan ilman välistä suhdetta. Tätä suhdetta kuvaava yksikkö on RH%, joka on 100 % vesihöyrypitoisuuden saavuttaessa kyllästyspisteen. Suurin mahdollinen vesihöyrymäärä, jonka ilma pystyy sisältämään, riippuu ilman lämpötilasta. Lämpimään ilmaan mahtuu enemmän vesihöyryä kuin kylmään, eli samalla absoluuttisella kosteudella saavutetaan kylmässä ilmassa suurempi RH% kuin lämpimässä ilmassa.

Diffuusio

Molekyylien itsenäistä siirtymistä väkevämmästä pitoisuudesta laimeampaan pitoisuuteen kutsutaan diffuusioksi. Vesihöyryn tapauksessa höyrymolekyylit pyr-

kivät siirtymään ilmassa tai aineen huokosissa kohti pienempää vesihöyryn osapainetta. Diffuusion avulla molekyylit pyrkivät tasoittamaan paikallisia vesihöyrypitoisuuksissa ja osapaineissa esiintyviä eroja. Tämä ilmiö on tärkeä ottaa huomioon, kun tehdään materiaalivalintoja ja suunnitellaan rakenteita.

Vesihöyrynläpäisevyys

Vesihöyrynläpäisevyys on materiaalin ominaisuus, joka määrittää sen, miten hyvin vesihöyry pystyy kulkemaan aineen läpi diffuusion avulla. Mitä suurempi vesihöyrynläpäisevyys materiaalilla on, sitä helpommin vesihöyry läpäisee sen. Vesihöyrynläpäisevyyden yksikkö on kg/(msPa).

Konvektio

Ilman sisältämän vesihöyryn siirtymistä ilmavirtauksen mukana kutsutaan konvektioksi. Ilmavirtaus kohdistuu aina suuremmasta osapaineesta kohti pienempää osapainetta, ja voi näin kuljettaa sisätilojen kosteutta rakenteiden kylmiin osiin, mikäli rakenteiden tiiveydessä on puutteita. Konvektion avulla vesihöyryä pystyy siirtymään suurempina määrinä kuin diffuusion avulla, ja näin ollen konvektio voi muodostua hyvin vaaralliseksi ilmiöksi.

Hygroskooppisuus

Hygroskooppisuudella tarkoitetaan aineen kykyä sitoa vesihöyryä itseensä, ja ilman suhteellisen kosteuden muuttuessa vapauttaa sitä vesihöyrynä takaisin ympäristöön. Sorptiokäyrillä eli tasapainokosteuskäyrillä kuvataan materiaalin hygroskooppisuutta. Käyrät ilmaisevat, kuinka paljon aineessa voi olla kosteutta hygroskooppisesti sitoutuneena tasapainotilassa eri suhteellisen kosteuden arvoilla.

2.2 Hengittävän rakenteen toiminta

Dynaamisella eli hengittävällä rakenteella tarkoitetaan sellaista rakennetta, johon voi siirtyä diffuusion avulla ympäristössä olevaa vesihöyryä ja jossa siirtynyt vesihöyry pystyy sitoutumaan hygroskooppiseen materiaaliin. Sitoutuneen vesihöyryn on myös pystyttävä vapautumaan helposti takaisin ympäristöön olosuhteiden vaihtelun seurauksena. Tällaiseen rakenteeseen pystyy myös sitoutumaan muitakin kaasuja kuten esimerkiksi hiilidioksidia. [1, 1.] Hengittävässä rakenteessa käytetään perinteisesti luonnonkuituihin pohjautuvia tuotteita niiden hygroskooppisuuden vuoksi [2, 5].

Ilmankosteudella on merkittävä vaikutus huoneilman laatuun ja liian kuiva tai kostea huoneilma voi aiheuttaa ongelmia, jotka ilmenevät epäviihtyisyytenä tai jopa terveyshaittoina. Tyypillisesti huoneilman kosteus ei ole vakio, vaan se muuttuu sisätiloissa tuotetun kosteuden vaihdellessa ja voi olla huomattavasti erilainen huonetilojen välillä. Suomen olosuhteissa huoneilmankosteus on yleensä suurimmillaan kesäaikaan, kun ulkoilma on kosteaa ja vastaavasti pienimmillään talvella, kun ulkoilma on kuivaa. Sisäilman hyvän laadun kannalta olisi toivottavaa, että sisäilman lämpötilaa ja kosteutta pystyttäisiin hallitsemaan joko koneellisen ilmanvaihdon tai rakenteellisten ratkaisujen avulla. [3, 6].

Rakenteellisten ratkaisujen osalta vaihtoehdoksi sisätilojen kosteudenhallintaan nousee rakenteen hengittävyys. Rakenteen hengittävyydellä on myös jossain määrin vaikutusta sisäilman lämpötilaan. Hengittävyydellä pyritään vaimentamaan suhteellisen kosteuden suuria vaihteluita, ja näin ollen välttämään mahdolliset kosteat ja kuivat ääritilanteet. [3, 6-9.] Tähän tilanteeseen päästään, kun voimakkaan kosteudentuoton aikana syntyvä vesihöyry pääsee turvallisesti siirtymään ja sitoutumaan hygroskooppiseen rakenneosaan. Kosteudentuoton pienentyessä tai loppuessa rakennuksen ilmanvaihto kuivattaa sisäilman, jolloin rakenteisiin sitoutunut kosteus vapautuu höyrynä takaisin huoneilmaan estäen suhteellisen kosteuden laskemisen liian alhaiseksi. [2, 8.] On tärkeä ymmärtää, että vaikka rakenteen hengittävyydellä on selvä kosteudenhallinnallinen rooli se ei yksin riitä takaamaan riittävän hyvää lopputulosta, vaan sen rinnalle tarvitaan toimiva ja tehokas ilmanvaihto [1, 1].

2.3 Rakennekuvaus

Hengittävän rakenteen toimivuuden kannalta on ensiarvoisen tärkeää, että valittavat materiaalit ovat luonteeltaan hyvin vesihöyryä läpäiseviä sekä korkean tehollisen kosteuskapasiteetin omaavia. Korkean kosteuskapasiteetin omaavana ja kosteutta sitouttavana rakenneosana toimii yleensä luonnonkuitupohjainen lämmöneriste. [2, 5.] Tällaisessa tapauksessa lämmöneriste on yhteydessä sisäilman kosteuteen vesihöyryä diffuusiolla läpäisevien pintakerrosten välityksellä. Toisessa mahdollisessa ratkaisussa kosteuskapasiteetti sijoitetaan rakenteen sisäpintaan, jolloin se on suorassa yhteydessä sisäilman kosteuteen. Tällaisessa ratkaisussa kosteutta sitovana osana voi toimia esimerkiksi vanerilevy. Hengittävän rakenteen toimivuuden kannalta on tärkeää, että vesihöyryn siirtymistä rakenteen sisään ei estetä ainekerroksella, joka vastustaa voimakkaasti diffuusiota. Tämä tarkoittaa esimerkiksi höyrynsulkukalvon asentamista. [3, 9-10.]

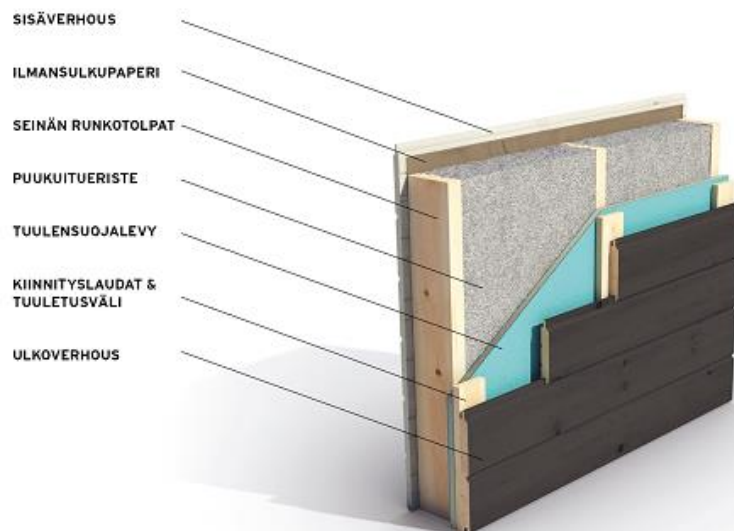
On kuitenkin huomioitava, että ilmantiiveyden kannalta hengittävä rakenne on suunniteltava yhtä lailla pitäväksi kuin mikä tahansa muu rakenne. Ilmantiiveydellinen hataruus on aina riski ja rakenteellinen heikkous, eikä tarkoita rakenteen hengittävyttä. Huonon ilmanpitävyyden seurauksena voidaan menettää hallinta esimerkiksi painesuhteiden, ilmanvaihdon toimivuuden sekä ääneneristävyyden osalta. Lisäksi ongelmiksi muodostuu energiankulutuksen lisääntyminen, paikallinen vetoisuus sekä vesihöyryn kulkeutuminen rakenteisiin konvektion avulla. [3, 9.] Hengittävän rakenteen ilmanpitävyys ja kuivumispotentiaali varmistetaan diffuusion mahdollistavalla ilmansulkukalvolla, ja sen oikeaoppisella asennuksella [2, 10].

Dynaamiset rakenteet mielletään usein ulkoseiniksi ja yläpohjiksi, mutta näiden ohella myös väliseinät ja välipohjat voivat toimia samaa periaatetta noudattaen. Paras mahdollinen lopputulos saavutetaankin nimenomaan silloin, kun kaikki rakenneosat toimivat hengittävän rakenteen määritelmien mukaisesti. [3, 9.]

Yleinen rakenneratkaisu hengittävälle seinärakenteelle ainekerrokset sisältä ulospäin lueteltuna:

- sisäverhous (esimerkiksi puukuitulevy, puupaneeli tai maalaamaton kipsilevy)
- ilmansulkupaperi
- puukuitueriste
- tuulensuojalevy
- tuuletusväli
- ulkoverhous

Hygroskooppisen materiaalin käyttö sisäverhouksessa ei ole välttämätöntä, vaan vaihtoehtoisesti voidaan käyttää tuotetta, joka on hyvin vesihöyryä läpäisevä. Sisäverhouksen taakse on syytä jättää asennustila, joka toteutetaan ristiin koolauksella. Tällöin ilmansulku on sopivalla etäisyydellä sisäpuolisia kiinnityksiä ajatellen, eikä se puhkea rakennusaikana tai asumiskäytössä. [2,10.] Esimerkkileikkaus edellä kuvatusta rakenneratkaisusta on esitetty alla olevassa kuvassa (kuva 1).



Kuva 1. Hengittävä puurunkoinen seinärakenne [4].

3 Lämmöneristeet

3.1 Yleistä

Lämmöneriste on ainekerros, jonka tarkoituksena on estää lämmönsiirtyminen rakenteen puolelta toiselle. Lämmönsiirtymiseen eristeessä voi vaikuttaa useat tekijät, joista yksi tärkein on alhainen lämmönjohtavuus. Tämä ilmenee kaikilla perinteisillä lämmöneristeillä niiden sisällä paikallaan olevan ilman alhaisena lämmönjohtavuutena. Merkittävin tekijä lämmönjohtavuuden paikallisiin muutoksiin eristeissä on lämpötila ja sen vaihtelut. Tämä ilmenee lämmöneristeiden lämmönjohtavuuden alenemisena lämpötilan laskiessa. Kosteuskäyttäytymisen osalta merkittävä tekijä on materiaalin hygroskooppisuus, joka vaihtelee merkittävästi erilaisten eristetyyppien välillä. Osa lämmöneristeistä sitoo kosteutta erittäin huonosti tai ei lainkaan, kun taas paremmat hygroskooppiset ominaisuudet sisältävät lämmöneristeet kykenevät sitomaan kosteutta huomattavasti enemmän. [5, 260-261.]

Yleisiä lämmöneristetyyppejä valmistetaan mm. mineraalivillasta, luonnonkuidusta, muovikuidusta ja solumuovista. Asennuksen kannalta lämmöneristeet voidaan karkeasti jakaa eristelevyihin ja puhallettaviin eristeisiin. Monissa tapauksissa samaa tai vastaavanlaista tuotetta on mahdollista saada kummassa muodossa tahansa riippuen kohteen tarpeesta. Perinteisten lämmöneristeiden lisäksi rakennuksen kantava runko tai jokin rakennusosa voi toimia lämmöneristeenä. Tällaisia materiaaleja tai rakenneosia voivat olla esimerkiksi tiili, kevytbetoni, hirsi ja tuulensuojalevy. [5, 260.]

Edellä mainituista eristetyypeistä huonosti kosteutta sitovia ovat mineraalivillat, muovikuitu- ja solumuovieristeet, toisaalta luonnonkuitueristeet ovat ominaisuuksiltaan hygroskooppisia ja hyvin kosteutta sitovia [5, 261]. Tämän tutkimuksen laboratoriokokeissa keskitytään ainoastaan erilaisten levy muodossa olevien lämmöneristeiden kosteuskäyttäytymiseen.

3.2 Mineraalivillat

Mineraalivillaeristeen valmistus perustuu yleisesti epäorgaanisen kuidun ja orgaanisen sideaineen yhdistämiseen sekä eristeen pölynsitomista ja vedenhylkivyyttä parantavaan öljykäsittelyyn [5, 261]. Mineraalivillatyyppejä on useita, ja ne jakautuvat kolmeen pääryhmään, joita ovat lasi-, kivi- ja kuonavillat. Lisäksi on myös olemassa kivivillan ja kuonavillan välimuoto, jota kutsutaan silikaattivillaksi. [6, 1.] Kivivillan valmistukseen käytetään emäksisiä kivilajeja kuten gabroa, anortosiittiä ja dolomiittia. Lisäksi käytetään pieniä määriä kovetettua hartsia ja öljyä. Lasivillan valmistukseen käytetään yleisimmin kierrätyslasia, joskin osa valmistuksesta tehdään suoraan lasin raaka-aineista kuten kvartsihiekkasta, soodasta ja kalkkikivestä. [5, 261.]

Lämmönsiirtyminen voi tapahtua mineraalivillassa johtumalla pitkin kuituja tai ilmahuokosten kautta, säteilemällä tai ilmavirtauksen avulla sisäisenä konvektiona. Mineraalivillan lämmöneristysominaisuudet perustuvat säteilyllä siirtyvän lämpövirran vähentämiseen ja eristeen sisällä tapahtuvan ilman liikkumisen mahdollisimman tehokkaaseen estämiseen. Eristeen tiheys vaikuttaa suoraan verrannollisesti sen ilmanläpäisevyyteen. Mitä suurempi eristeen tiheys, sitä pienempi ilmanläpäisevyys on. Lisäksi on huomioitavaa, että mineraalivillaeristeessä pinnan suuntainen ilmanläpäisevyys on usein jopa kaksinkertainen tuotteen keski-osan ilmanläpäisevyyteen. [5, 261.]

Kosteusominaisuuksiltaan mineraalivilla eroaa merkittävästi luonnonkuidusta valmistetuista eristeistä, sillä se ei ime kosteutta kapillaarisesti ja sitoo kosteutta hygroskooppisesti vain hyvin vähän. Diffuusinen vesihöyrynläpäisevyys sen sijaan on erittäin suuri, jolloin kosteus pääsee liikkumaan rakenteessa tapahtuvien ilmavirtojen ja diffuusion avulla. Ilman suhteellisen kosteuden vaihtelulla ei ole merkittävää vaikutusta mineraalivillan lämmöneristyskykyyn. [5, 261-262.] Epäsuotuisissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa mineraalivillassa voi syntyä sieni- ja homekasvustoa, mutta se ei kuitenkaan biologisten ominaisuuksiensa vuoksi lahoa tai mätäne. Mineraalivillan vesihöyrynläpäisevyyden ollessa melko suuri on

eristeen lämpimällä puolella käytettävä höyrynsulkua, mikäli kosteuden poistumista ulospäin ei voida varmistaa. [6, 3-4.]

Tämän opinnäytetyön laboratoriotesteissä on tutkittu yhden kivivillan sekä yhden lasivillan kosteuskäyttäytymistä. Tutkittavat tuotteet olivat eristelevyjä.



Kuva 2. Lasivillalevy [7].

3.3 Luonnonkuitupohjaiset lämmöneristeet

Luonnonkuitupohjaisia eristeitä ovat esimerkiksi puukuitueristeet, pellavaeristeet, kaisla, hamppu, olki ja lampaanvilla. Tässä tutkimuksessa keskitytään ainoastaan puukuitueristeisiin.

Puukuitueristeet muodostuvat orgaanisista kuiduista, ja niitä valmistetaan sekä kierrätysmateriaaleista että uudesta puukuidusta. Yleensä eristeisiin lisätään esimerkiksi boorimineraaleja, jotka toimivat palon- ja lahonestoaineina. Kierrätysmateriaaleista valmistettujen eristeiden raaka-aineena käytetään puhdasta sanoma-lehtikeräyspaperia. Uudesta puukuidusta valmistetussa eristeessä käytetään happivalkaistua ja bakteerivapaata sellukuitua. [5, 262-263.] Puukuitueristeitä on saatavilla puhallettavassa ja ruiskutettavassa muodossa sekä eristelevyinä. Pääasiallinen käyttökohde on ylä- ja alapohjien sekä seinien lämmön- ja ääneneristyksenä. [8, 1.]

Ilmanläpäisevyyssarvoon vaikuttaa ennen kaikkea eristeen tiheys, joka on puukuitueristeillä suuri. Suuri tiheys johtuu puukuidun hienojakoisuudesta, ja se saa aikaan pienen ilmanläpäisevyyden. Ilman liikkeen estämiseksi eristeen sisällä on kuitenkin käytettävä apuna myös tuulensuojalevyä rakenteen kylmällä puolella sekä ilmansulkua rakenteen lämpimällä puolella. Puukuidusta valmistettu eriste on hygroskooppinen materiaali eli sillä on suuri kosteuskapasiteetti ja vesihöyrynläpäisevyys sekä kyky sitoa ja luovuttaa kosteutta. Näiden ominaisuuksien ansiosta eriste asettuu aina kosteustasapainoon ympäristön ja siinä tapahtuvien muutosten kanssa, mikäli toimiva molemminpuolinen kuivuminen on varmistettu. Tästä syystä puukuitueristeet toimivat hyvin osana dynaamista eli hengittävää rakennetta, eikä höyrynsulun käytölle ole tarvetta. Äärimmäisissä tilanteissa kuten vesivahingon sattuessa puukuitueriste pystyy sitomaan itseensä vettä jopa 5-10 kertaisen määrän omasta painostaan, mutta täysin kastuneena se painuu kaasaan ja menettää lämmöneristys ominaisuutensa. Normaalitilassa Suomen ilmastossa puukuitueristeellä ei kuitenkaan pitäisi olla mahdollisuutta menettää lämmöneristävyttään ollessaan kosteustasapainossa ulkoilman kanssa. Tämä edellyttää, että rakenne on hyvän rakennustavan ja vaatimusten mukainen. [8, 2.]

Tämän opinnäytetyön laboratoriotesteissä on tutkittu yhden kierrätysmateriaalista valmistetun puukuitueristeen sekä yhden uudesta puukuidusta valmistetun eristeen kosteuskäyttäytymistä. Tutkittavat tuotteet olivat eristelevyjä.



Kuva 3. Ekovillalevyn asennus [9].

4 Kuivatuskoe

4.1 Lähtötiedot

Tutkitut lämmöneristelevyt:

- Hunton Nativo 150x565x870 mm (uusipuukuitu)
- Ekovilla 150x565x870 mm (pukuitu kierrätysmateriaalista)
- Isover KL-33 150x560x870 mm (lasivilla)
- Rockwool Flexibatts 150x565x1170 mm (kivivilla)

Opinnäytetyön ensimmäisessä laboratoriotutkimuksessa testattiin valittujen lämmöneristeiden kykyä imeä niihin syötettyä kosteutta sekä kykyä vapauttaa tämä kosteus takaisin ympäristöön. Eristeiden kostuttaminen tapahtui syöttämällä kaikkiin eristeisiin manuaalisesti saman verran vettä. Tutkimuksessa ei näin ollen tarkasteltu eristeiden vaiheittaista kostumista, vaan pääasiallinen mielenkiinnon kohde oli kuivuminen. Tiedonkeruu kuivumisen osalta tapahtui punnitusmenetelmällä, missä tietyllä aikavälillä mitattua painoa verrattiin eristeen kostutuksen jälkeiseen painoon. Tähän kostutuksen jälkeiseen painoon viitataan tutkimuksessa termillä märkäpaino, ja kostutusta edeltävään painoon termillä alkupaino. On hyvä huomioida, että tässä tutkimuksessa käytetty termi alkupaino ei tarkoita sitä, että eristeessä ei olisi lainkaan kosteutta. Alkupaino muodostuu eristeen todellisesta kuivapainosta, sekä sisäilmaolosuhteissa eristeeseen tasapainokosteutena varastoituneesta vedestä.

Kuivatusolosuhteena tutkimuksessa oli alun perin tarkoitus käyttää kuivatusuunia, joka olisi säädetty muuttumattomaan ja seinärakenteen sisäisiä olosuhteita vastaavaan lämpötilaan sekä suhteelliseen ilmankosteuteen. Testiä suorittaessa kuitenkin ilmeni, että uunissa voimakkaasti kiertävä ilma kuivatti eristeiden pinnalla olevan kosteuden lähes välittömästi, eikä vastannut rakenteen sisäisiä olo-

suhteita. Lopullinen testi suoritettiin huoneolosuhteissa, jolloin lämpötilassa ja il-
mankosteudessa pystyi tapahtumaan muutoksia (kuva 5). Nämä muutokset kui-
tenkin otettiin muistiin jokaisen punnituksen yhteydessä.

4.2 Tutkimuksen suorittaminen

Ennen testin aloittamista valituista eristelevyistä tehtiin koekappaleet, jotka olivat
kooltaan 150x300x520 mm. Tämän jälkeen punnittiin kunkin koekappaleen alku-
paino.

Koekappaleiden kostutus tapahtui lisäämällä jokaiseen kappaleeseen 250ml
vettä. Veden lisääminen koekappaleeseen suoritettiin suihkupullolla, jolla ruisku-
tettiin kosteutta tasapuolisesti eristeen kaikille pinnoille. Ruiskutuksen jälkeen
koekappaleet suljettiin tiiviiksi varmistettuihin jätessäkeihin, joissa kosteuden an-
nettiin imeytyä eristeisiin vuorokauden ajan (kuva 4). Imeytymisen jälkeen mitat-
tiin koekappaleiden painot, jolloin saatiin kunkin kappaleen märkäpaino. Tämän
märkäpainon ja alkupainon erotuksena pystyttiin tarkastelemaan eristeiden kykyä
sitoa itseensä syötetty 250ml vesimäärä.



Kuva 4. Kosteuden imeyttäminen jätessäkeissä.

Kuivumisen edistymistä seurattiin punnitsemalla eristeet tarkoituksenmukaiseksi katsotuin väliajoin. Kuivumisprosessin alkuvaiheessa punnitusta tehtiin useampia kertoja päivässä kuin prosessin loppuvaiheessa, sillä alkuvaiheessa kuivumisen oletettiin olevan voimakkaampaa ja tiheämpien mittauspisteiden saaminen tärkeää kuivumiskäyrien tarkkuuden kannalta. Punnitusajankohdat sekä niistä saadut arvot käyvät ilmi 4.3 Tulokset-luvussa esitetyistä taulukoista ja kuvaajista. Punnitustuloksia ei voitu kerätä yöaikaan, sillä punnitus tapahtui manuaalisesti Karelia-ammattikorkeakoulun rakennuslaboratorion tiloissa (kuva 6). Tämä seikka on hyvä huomioida tarkastellessa kuvaajien tarkkuutta, vaikka sillä ei olisiakaan suurta merkitystä eristeiden keskinäiseen vertailuun. Mittaustuloksettomia ajanjaksoja pyrittiin kuitenkin pienentämään varsinkin kuivumisprosessin alkuvaiheessa tekemällä päivän viimeiset punnitukset myöhempään illalla.



Kuva 5. Eristeiden kuivatus.



Kuva 6. Eristeiden punnitus.

Lasi- ja kivivillan osalta huomattiin, että pintaruiskutusmenetelmällä kosteus jäi lähes kokonaisuudessaan eristeen pintaan, josta se kuivui hyvin nopeasti. Tällöin märkävainon ja alkupainon erotus oli myös pieni kosteuden imeytyessä eristeseen huonosti ja osittain jäädessä jätesäkin pohjalle imeytysjakson jälkeen. Näille

kahdelle eristeelle päätettiin tehdä myös toinen tutkimus, jossa sama 250ml vesimäärä syötettiin eristeen sisään lääkeruiskulla (kuva 7). Tällä jatkotutkimuksella pyrittiin tarkastelemaan tilannetta, jossa kosteus on päässyt imeytymään eristeen sisään huolimatta eristeen luonnollisesta ominaisuudesta vastustaa imeytymistä. Luonnonkuitueristeiden osalta tätä jatkotutkimusta ei suoritettu, sillä alkuperäisellä pintaruiskutuksella syötetty vesi imeytyi niihin hyvin. Edellä mainittu jatkotutkimus suoritettiin muilta osin täysin samalla tavalla kuin ensimmäinenkin tutkimus. Molempien tutkimusten tulokset löytyvät luvusta 4.3 Tulokset.

Kerätyt mittaustiedot taulukoitiin ja niiden perusteella laadittiin kuivumiskäyrät eristeiden sisäisen vesimäärän (kg/m^3) mukaan sekä kosteusprosenttikäyrät. Vesimäärät ja kosteusprosentit on laskettu suhteessa alkukosteuteen.



Kuva 7. Kosteuden syöttö sisään ruiskuttamalla.

4.3 Tulokset

Vesimäärän (kg/m³) laskemiseen on käytetty kaavaa:

$$(\text{Mitattu paino [g]} - \text{Alkupaino [g]}) / (52\text{cm} \times 30\text{cm} \times 15\text{cm}) \times 1000$$

52cm, 30cm ja 15cm ovat koekappaleen mitat.

Kosteusprosentin laskemiseen on käytetty kaavaa:

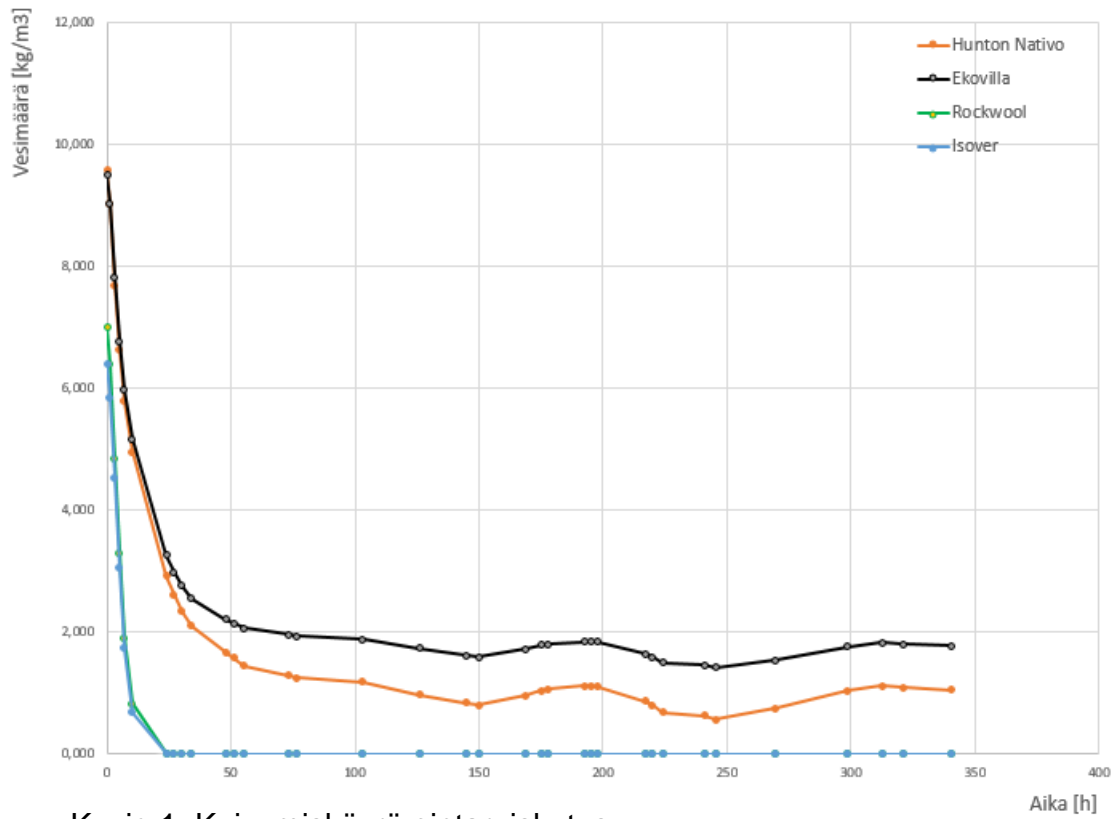
$$((\text{Mitattu paino} - \text{Alkupaino}) / \text{Alkupaino}) \times 100$$

Pintaruiskutus

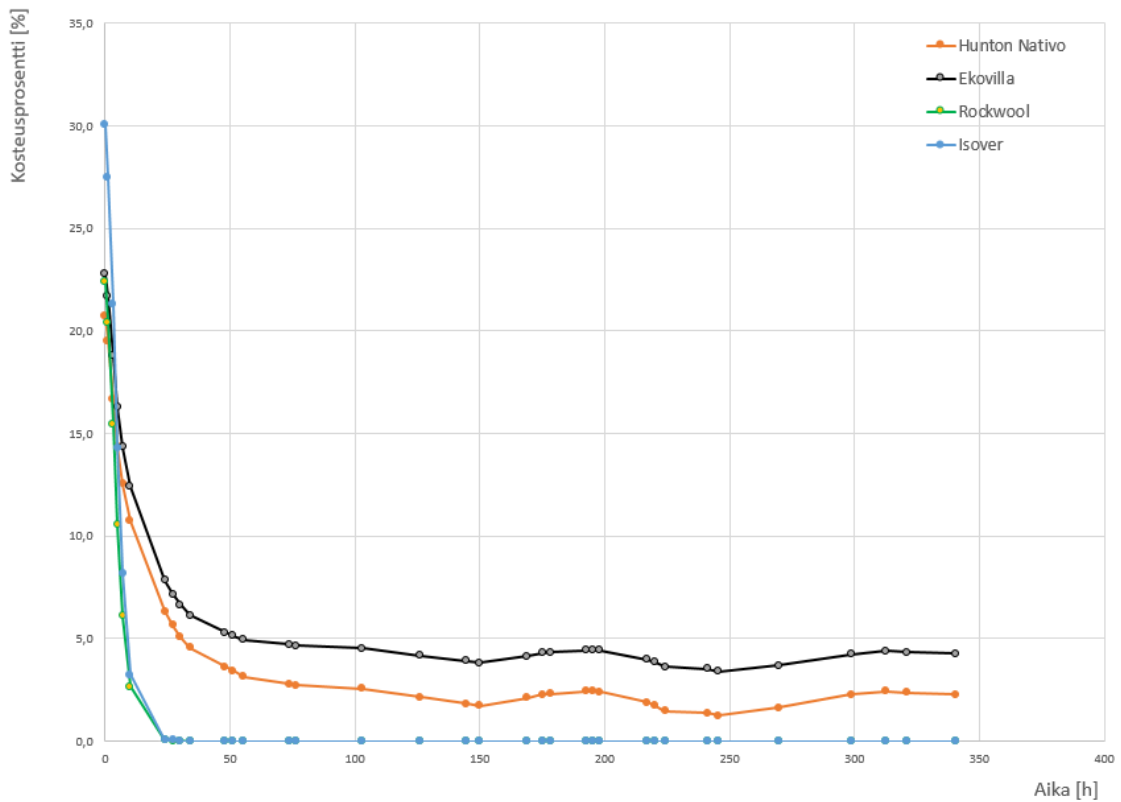
Taulukko 1. Mitatut painot.

Mitatut painot								
Koekappaleiden mitat 520x300x150mm								
1. koe		Hunton Nativo [g]	Ekovilla [g]	Rockwool [g]	Isover [g]			
Alkupaino		1080,7	974,9	732,3	498,5			
Päivä	Mittaus					Kellonaika	T huone [°C]	RH% huone
1.pv	Märkäpaino	1304,8	1197,0	896,3	648,4	9:00	22,5	27,0
	1. mittaus	1291,8	1186,3	881,9	635,4	10:00	22,5	25,0
	2. mittaus	1260,8	1157,9	845,6	604,7	12:00	22,6	27,0
	3. mittaus	1235,8	1133,6	809,5	569,9	14:00	22,6	24,0
	4. mittaus	1216,3	1114,6	777,0	539,3	16:00	22,5	23,0
2.pv	5. mittaus	1196,7	1095,8	751,7	514,7	19:00	22,3	25,0
	6. mittaus	1149,1	1051,4	732,6	498,8	9:00	22,2	18,0
	7. mittaus	1141,9	1044,9	732,5	498,7	12:00	22,4	19,0
	8. mittaus	1135,6	1039,6	732,4	498,5	15:00	22,3	18,0
	9. mittaus	1130,0	1034,8	732,3	498,5	19:00	22,2	21,0
3.pv	10. mittaus	1119,8	1026,7	732,3	498,5	9:00	21,9	23,0
	11. mittaus	1117,8	1025,0	732,3	498,5	12:00	22,4	23,0
4.pv	12. mittaus	1114,5	1023,2	732,3	498,5	16:15	22,5	23,0
	13. mittaus	1110,9	1021,0	732,3	498,5	10:30	22,5	26,0
5.pv	14. mittaus	1110,1	1020,3	732,3	498,5	13:30	22,6	25,0
	15. mittaus	1108,4	1019,1	732,3	498,5	16:00	22,1	27,00
6.pv	16. mittaus	1103,7	1015,5	732,3	498,5	15:00	22,2	18,00
	17. mittaus	1100,5	1013,0	732,3	498,5	9:30	22,3	17,00
7.pv	18. mittaus	1099,5	1012,2	732,3	498,5	15:00	22,5	18,00
	19. mittaus	1103,4	1015,2	732,3	498,5	10:00	22,3	30,00
8.pv	20. mittaus	1105,2	1016,7	732,3	498,5	16:00	22,5	29,00
	21. mittaus	1105,6	1017,1	732,3	498,5	19:00	22,3	30,00
9.pv	22. mittaus	1106,9	1018,2	732,3	498,5	9:30	22,4	30,00
	23. mittaus	1106,9	1018,2	732,3	498,5	12:00	22,5	29,00
10.pv	24. mittaus	1106,7	1018,0	732,3	498,5	15:00	22,7	27,00
	25. mittaus	1101,0	1013,6	732,3	498,5	10:00	22,4	16,00
11.pv	26. mittaus	1099,4	1012,3	732,3	498,5	13:00	22,5	16,00
	27. mittaus	1096,7	1010,1	732,3	498,5	17:00	22,3	17,00
12.pv	28. mittaus	1095,5	1009,2	732,3	498,5	10:00	22,3	14,00
	29. mittaus	1094,1	1008,1	732,3	498,5	14:30	22,5	15,00
13.pv	30. mittaus	1098,2	1011,0	732,3	498,5	14:30	22,0	28,00
	31. mittaus	1105,1	1016,3	732,3	498,5	19:30	22,0	30,00
14.pv	32. mittaus	1107,0	1017,7	732,3	498,5	9:30	22,3	32,00
	33. mittaus	1106,2	1017,2	732,3	498,5	18:00	22,6	31,00
15.pv	34. mittaus	1105,4	1016,4	732,3	498,5	13:30	22,6	25,00

Taulukosta 1 käy ilmi kunkin mittaustapahtuman ajankohta, olosuhteet sekä koekappaleiden punnitustulokset.



Kuvio 1. Kuivumiskäyrä pintaruiskutus.



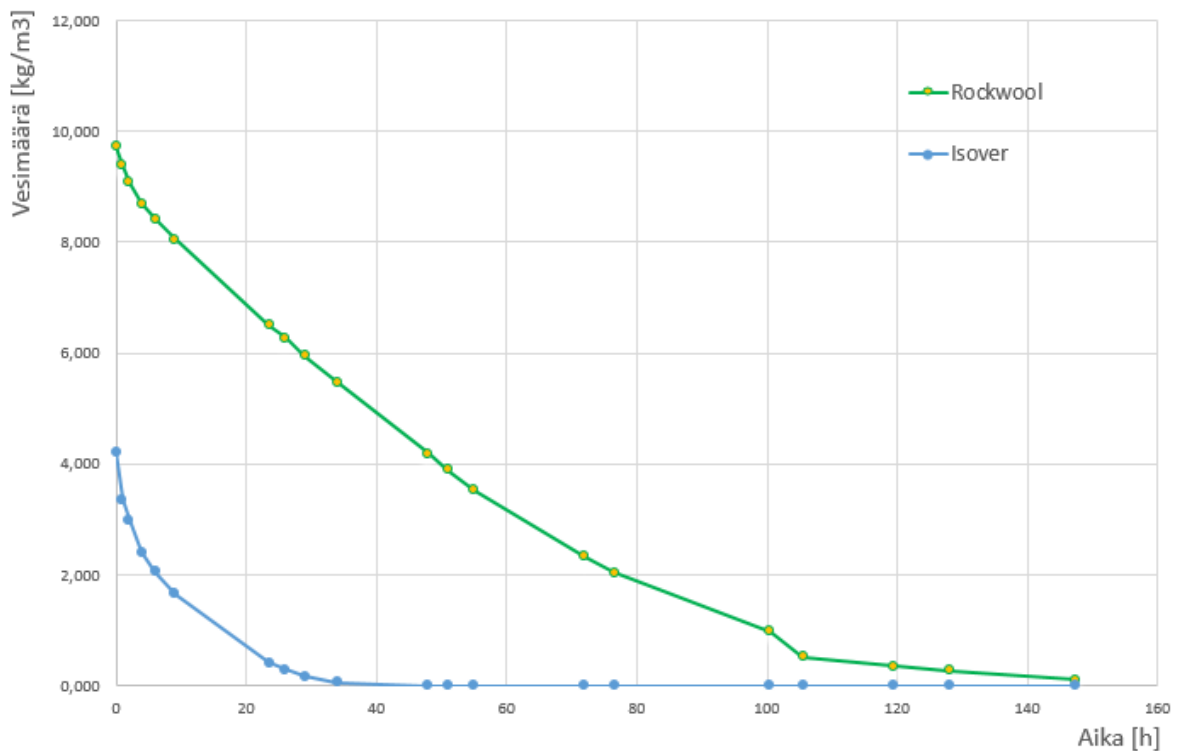
Kuvio 2. Kosteusprosenttikäyrä pintaruiskutus.

Sisään ruiskutus

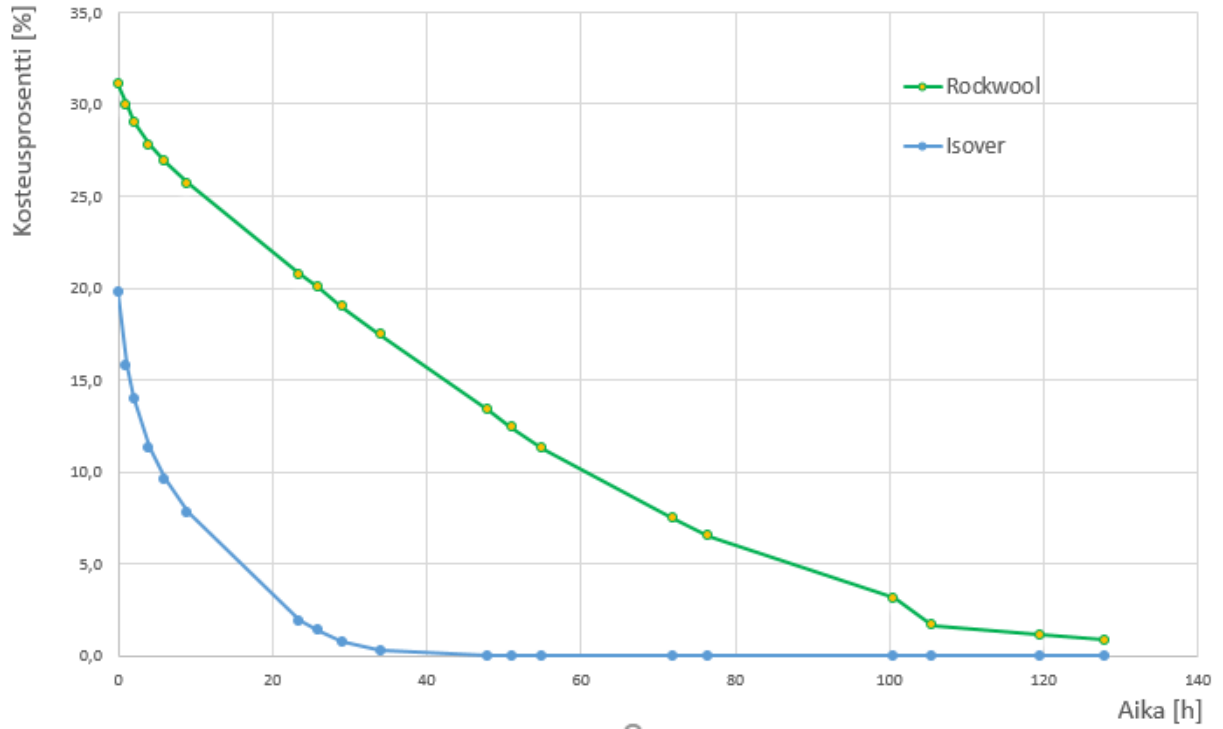
Taulukko 2. Mitatut painot.

Mitatut painot Koekappaleiden mitat 520x300x150mm						
1. koe (Sisään ruiskuttamalla)		Rockwool [g]	Isover [g]			
Alkupaino		732,3	498,4			
Päivä	Mittaus			Kellonaika	T huone [°C]	RH% huone
1.pv	Märkäpaino	959,7	596,9	10:00	22,3	30,0
	1. mittaus	951,8	577,1	11:00	22,4	30,0
	2. mittaus	944,8	568,2	12:00	22,4	30,0
	3. mittaus	935,8	554,8	14:00	21,8	31,0
	4. mittaus	929,2	546,4	16:00	22,5	29,0
2.pv	5. mittaus	920,5	537,2	19:00	22,3	30,0
	6. mittaus	884,3	507,9	9:30	22,4	30,0
	7. mittaus	878,9	505,2	12:00	22,5	29,0
	8. mittaus	871,4	502,3	15:00	22,7	27,0
3.pv	9. mittaus	860,2	499,7	20:00	22,4	26,0
	10. mittaus	830,2	498,4	10:00	22,4	16,0
	11. mittaus	823,3	498,4	13:00	22,5	16,0
4.pv	12. mittaus	814,9	498,4	17:00	22,3	17,0
	13. mittaus	786,9	498,4	10:00	22,3	14,0
5.pv	14. mittaus	779,9	498,4	14:30	22,5	15,0
	15. mittaus	755,3	498,4	14:30	22,0	28,00
6.pv	16. mittaus	744,5	498,4	19:30	22,0	30,00
7.pv	1. mittaus	740,7	498,4	9:30	22,30	32,00
	2. mittaus	738,6	498,4	18:00	22,60	31,00
8.pv	1. mittaus	734,7	498,4	13:30	22,60	25,00

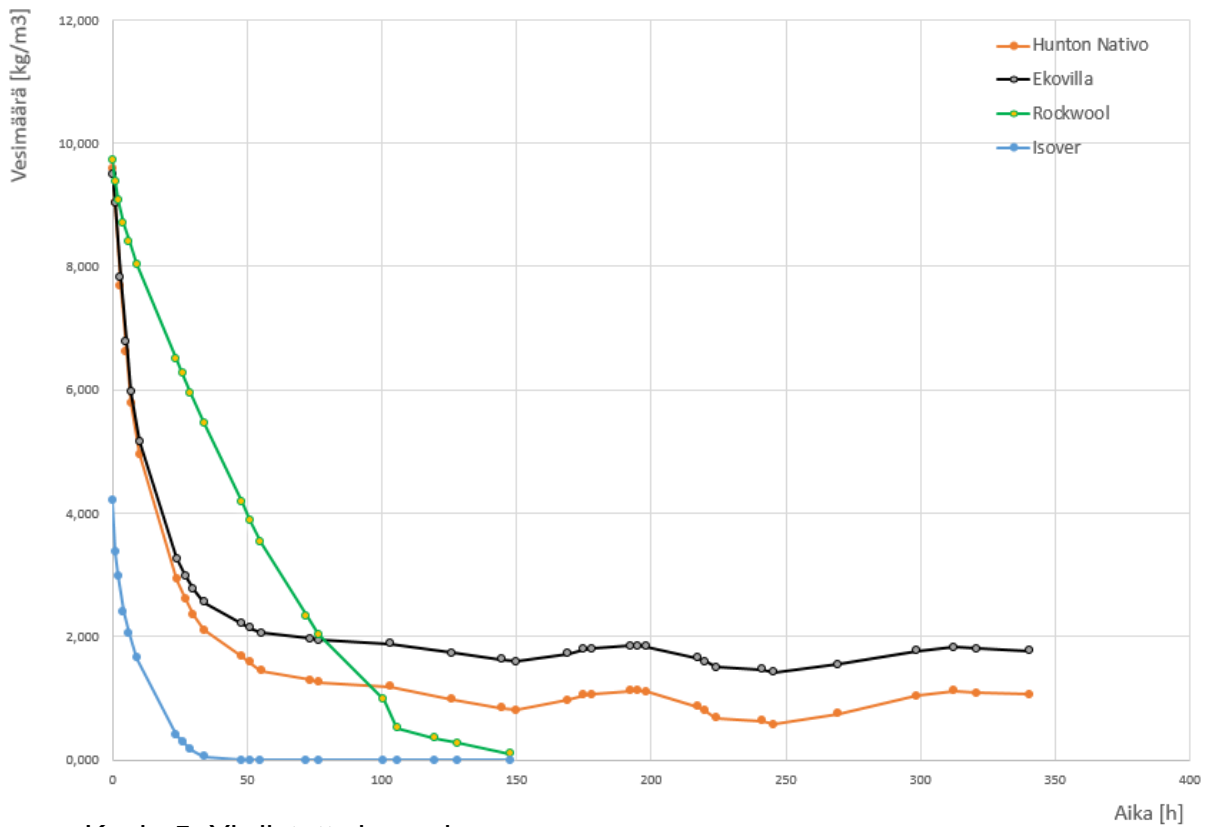
Taulukosta 2 käy ilmi mineraalivilloille sisään ruiskuttamalla tehdyn jatkotutkimuksen mittausajankohdat, olosuhteet sekä koekappaleiden punnitustulokset.



Kuvio 3. Kuivumiskäyrä sisään ruiskutus.



Kuvio 4. Kosteusprosenttikäyrä sisään ruiskutus.



Kuvio 5. Yhdistetty kuvaaja.

Kuviossa 5 on yhdistetty luonnonkuitueristeiden pintaruiskutuksen sekä mineraalivillojen sisään ruiskutuksen kuivumiskäyrät. Kosteusprosenttien sekä vesimäärien taulukoidut arvot löytyvät kohdasta liitteet 1-4.

4.4 Johtopäätökset

Mitattujen alkupainojen ja märkápainojen erotuksena voidaan huomata, että Hutton Nativo sekä Ekovilla pystyivät imemään käytännössä kaiken niihin syötetyn kosteuden. Imeytymättä jäänyt kosteus on luultavasti ruiskutuksen aikaisen hukkaan menneen kosteuden sekä kostutetun eristeen käsittelyn ja pussittamisen yhteydessä hukkaan menneen kosteuden yhdistelmä.

Mineraalivillojen osalta punnitut erotukset ovat huomattavasti suuremmat, ja niiden kyky imeä ja sitoa kosteutta huonompi. Suurin osa pintaan ruiskutetusta kosteudesta jäi näiden eristeiden pintaan, eikä imeytynyt kunnolla. Tämä pintaan jäänyt kosteus myös kuivui nopeasti pois. Sisään ruiskutettaessa huomattiin, että Rockwool-eristeeseen syötetty kosteus jäi eristeen sisään, ja imeytymättä jääneen kosteuden määrä oli jopa yhtä pieni kuin luonnonkuitueristeiden pintaruiskutuksessa mitattu. Isoverin osalta huomattiin, että sisään ruiskutettaessa imeytymättömän kosteuden määrä oli suurempi kuin pintaan ruiskutettaessa. Isoverin sisään syötetty kosteus valui siis suoraan ulkopinnoille ja sitä kautta pois eristeestä. Tämä havainto oli yllättävä, ja yhtenä mahdollisena syynä sille voi olla lääkeruiskulla syötetyn veden massiivisuus verrattuna suihkupullolla syötetyn veden hienojakoisempaan ja enemmän vesihöyryä muistuttavaan muotoon. Tällöin raskaampi ja tietylle alueelle keskittyneempi vesipatsas voisi poistua painovoimaisesti eristeestä helpommin.

Taulukko 3. Imeytynyt vesimäärä.

Syötetty 250 g	Imeytynyt vesimäärä [g]			
	Hunton	Ekovilla	Rockwool	Isover
Pintaruiskutus	224,1	222,1	164,0	149,9
Sisään ruiskutus			227,4	98,5

Kuviosta 1 huomataan, että mineraalivilloihin syötetty kosteus poistui niistä kokonaisuudessaan hyvin nopeasti, ja noin 24 tunnin aikana eristeet olivat palanneet alkupainoonsa. Pintaruiskutuksessa Isover ja Rockwool käyttäytyivät lähes identtisesti. Molemmat kykenivät estämään syötetyn vesimäärän imeytyminen syvälle eristeen sisään. Hunton Nativon ja Ekovillan kyvyssä sitoa kosteutta ei havaittu eroa kyseisellä vesimäärällä, vaan ne pystyivät sitomaan itseensä kaiken syötetyn kosteuden. Kuivuminen ensimmäisen vuorokauden aikana oli myös hyvin samanlaista eristeiden välillä, jolloin molemmista eristeistä oli kuivunut noin kaksi kolmasosaa syötetystä kosteudesta. Tämän jälkeen Ekovillan kuivuminen hidastuu hieman nopeammin kuin Huntonin, jonka kuivuminen jatkuu vähän pidemmälle. Aikavälillä 100h–150h molemmat eristeet ovat saavuttaneet tasapainokosteuden, mikä ilmenee hyvin huoneolosuhteiden RH prosentin noustessa 150 tunnin kohdalla, jolloin myös molempien eristeiden vesimäärä alkaa kasvaa. Viimeistään tästä eteenpäin molempien eristeiden kosteustilanne elää huoneessa tapahtuvien muutosten mukana, eivätkä ne enää saavuta alkupainoaan. Kuviosta 1 huomataan Ekovillan asettuvan korkeampaan tasapainokosteuteen kuin Huntonin.

Kuviosta 3 nähdään, kuinka Rockwoolin kuivuminen hidastuu merkittävästi kosteuden ollessa eristeen sisällä. Pintaan ruiskutettaessa vesimäärän 7 kg/m³ kuivuminen kesti noin 24 tuntia, kun taas sisään ruiskutettaessa saman vesimäärän kuivumiseen aikaa meni noin 70 tuntia. Alkupainonsa Rockwool saavutti vasta noin 150 tunnin kohdalla. Myös Isoverin kuivuminen hidastui merkittävästi huolimatta huonommasta kosteuden imeytymisestä. Pintaan ruiskutettaessa ensimmäisen 4 kg/m³ vesimäärän kuivumiseen aikaa meni noin kuusi tuntia, kun taas sisään ruiskuttamalla sama määrä kosteutta kuivui noin 27 tunnin aikana. Isover saavutti alkupainonsa noin 40 tunnin kohdalla. Menetelmiä verrattaessa huomataan, että Rockwoolin kyvyssä vapauttaa imeytynyttä kosteutta tapahtuva muutos

on huomattavasti suurempi kuin Isoverillä. Molempien eristeiden kuivuminen sisään ruiskutettaessa hidastuu kuitenkin suhteessa merkittävästi.

Tarkasteltaessa kuviota 5 nähdään Rockwoolin kuivumisen olevan sisään ruiskutettaessa huomattavasti hitaampaa kuin puukuitueristeillä pintaruiskutuksessa. Kuviosta 5 huomataan myös Rockwoolin, Huntonin ja Ekovillan kuivumisen alkavan lähes samasta vesimäärästä.

Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta Hunton Nativon ja Ekovillan kosteuskäyttäytymisen olevan hengittävän rakenteen periaatteiden mukaista. Kumpikin eriste imee ja sitoo itseensä hyvin kosteutta ja pystyy vapauttamaan sitoutuneen kosteuden nopeasti takaisin ympäristöön olosuhteiden muuttuessa. Mineraalivillojen osalta tulos oli odotetun mukainen, eivätkä ne kosteuskäyttäytymisensä perusteella sovellu rakenteeseen, johon on mahdollistettu kosteuden siirtyminen. Hypoteettisessa tapauksessa, jossa kivivilla tai lasivilla olisi asennettu kyseisenlaiseen rakenteeseen tapahtuisi runkorakenteissa ja muissa rakenneosissa haitallista kostumista eristeiden hylkiessä vettä.

5 Dynaaminen koe

5.1 Lähtötiedot

Tutkitut lämmöneristelevyt:

- Hunton Nativo 150x565x870 mm (uusipuukuitu)
- Ekovilla 150x565x870 mm (puukuitu kierrätysmateriaalista)
- Isover KL-33 150x560x870 mm (lasivilla)
- Rockwool Flexibatts 150x565x1170 mm (kivivilla)

Opinnäytetyön toisen laboratoriotutkimuksen tarkoituksena oli mitata ja tarkkailla valittujen eristeiden kostumista ja kuivumista. Tutkimus koostui kahdesta vai-

heesta, joista ensimmäisessä eristeet olivat kostumisen mahdollistavissa olosuhteissa ja toisessa vaiheessa kuivumisen mahdollistavissa olosuhteissa. Olosuhteiden ylläpitoon ja muuttamiseen käytettiin Karelia-ammattikorkeakoulun laboratoriossa sijaitsevaa sääkaappia (kuva 8), jonka oviaukon kohdalle rakennettiin puurunkoinen testirakenne. Testirakenteeseen varattiin lokerot jokaiselle testattavalle lämmöneristeelle. Kostutusjakson aikana sääkaapin sisälle luotiin sellaiset lämpö- ja kosteusolosuhteet, että kaapin sisällä oleva kosteus lähti siirtymään testirakenteen sisään. Tämä ilmiö perustuu vesihöyrymolekyylien pyrkimykseen siirtyä kohti pienempää vesihöyryn osapainetta, eli tässä tapauksessa kohti sääkaapin ulkopuolista huoneilmaa.

Kuivatusjakson aikana sääkaapin lämpö- ja kosteusolosuhteet muutettiin sellaisiksi, että testirakenteen sitoma kosteus lähti siirtymään takaisin sääkaappiin, mistä se kuivatettiin pois. Kuivumisjakson aikainen molekyylien siirtyminen perustuu samaan edellä mainittuun periaatteeseen ja tässä tapauksessa sekä huoneilman, että sääkaapin vesihöyrynosapaineet olivat testirakenteen sisäistä osapainetta pienemmät, eli molemminpuolinen kuivuminen oli mahdollista.

Tutkimuksessa vertailtiin kunkin valitun lämmöneristeen kosteusteknistä käyttäytymistä edellä mainituissa olosuhteissa. Tiedonkeruu tapahtui eristeiden sisään asennettujen etäluettavien kosteusantureiden avulla. Tietoa saatiin kerättyä ainoastaan eristeiden sisäisten suhteellistenilmankosteuksien (RH%) osalta, sillä kosteusantureilla ei voitu mitata eristeiden vesimääriä. Vesimäärät olisi voitu mitata punnitusmenetelmällä esimerkiksi kummankin jakson lopuksi, mutta tämä oli työteknisesti mahdotonta testirakenteen luonteen vuoksi. Tämän lisäksi kosteusantureita asennettiin myös sääkaapin sisälle sekä ulkopuolelle mittaamaan valittujen olosuhteiden toteutumista.

On tärkeää huomata, että tässä tutkimuksessa käytetty testirakenne ei vastaa kokonaista seinärakennetta, vaan tutkimuksen kohteena ovat ainoastaan lämmöneristeet niille asetetuissa rasiuksissa. Kokonaisen seinärakenteen tutkiminen voisi olla hyvä jatkotutkimuksen aihe.



Kuva 8. Sääkaappi.



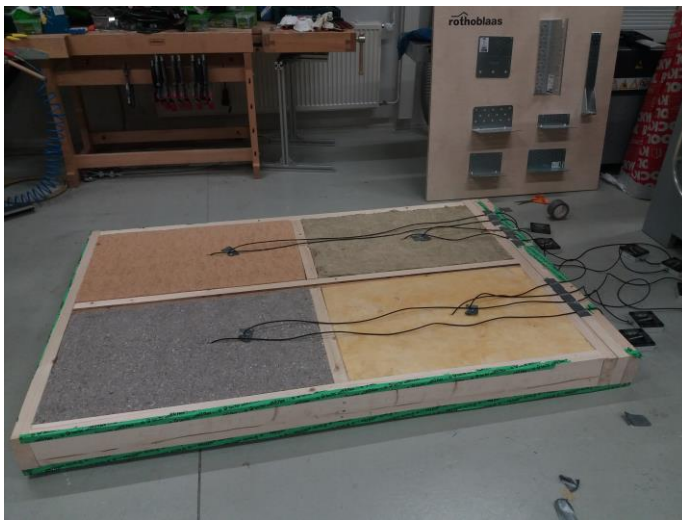
Kuva 9. Testirakenteen runko.

5.2 Tutkimuksen suorittaminen

Ennen varsinaisen tutkimuksen aloittamista rakennettiin sääkaapin oven kohdalle tuleva nelilokeroinen puuristikko, ja eristelevyistä tehtiin lokeroihin sopivat 557 x 869 mm kokoiset koekappaleet (kuva 9). Koekappaleita varastoitettiin huoneolosuhteissa useita viikkoja, jolloin mahdollinen aikaisemman varastoinnin tai kuljetuksen aikainen kosteus pääsi poistumaan eristeistä. Jokaiseen koekappaleeseen keskiosaan asennettiin kaksi kosteusanturia, joista toinen asennettiin 80 mm syvyyteen ulkopinnasta ja toinen 40 mm syvyyteen ulkopinnasta (Kuva 10). Testirakenne viimeisteltiin molemminpuolisella ilmansululla, johon käytettiin Perinneilmansulkupahvi Paavo-nimistä tuotetta. Ilmansulkupahvin tiivistämiseen sekä testirakenteen ja sääkaapin ovenkarmin väliseen tiivistämiseen käytettiin Sitko Flex-höyrynsulkuteippiä, jolla varmistettiin kosteuden siirtyminen rakenteeseen (kuva 11). Sääkaapin sisään asennettiin kaksi kosteusanturia, joista ensimmäinen asennettiin vasemmanpuoleiseen sisäseinään ja toinen oikeanpuoleiseen sisäseinään. Näillä antureilla pystyttiin tarkastelemaan kaapin sisäisten olosuhteiden halutunlaista toteutumista sekä tasapuolista kostumista. Tasapuolista kostumista haluttiin tarkastella siitä syystä, että sääkaapin kostutin sijaitsi vasemmanpuoleisella sisäseinustalla. Sääkaapin ulkopuolelle asennettiin myös yksi

kosteusanturi, jonka avulla pystyttiin tarkastelemaan laboratorion sisäilman olosuhteita tai niiden muutoksia.

Kostutusjakson olosuhteiksi valittiin lämpötila 30°C ja suhteellinen kosteus RH 80%. Kuivatusjakson olosuhteiksi valittiin lämpötila 30°C ja suhteellinen kosteus RH 10%. Kummankin yksittäisen jakson pituudeksi valittiin 24480 minuuttia eli 17 vuorokautta. Nämä tiedot syötettiin sääkaapin ohjausohjelmaan, joka huolehti olosuhteiden ylläpidosta ja jakson automaattisesta vaihtamisesta aikamäärään täytyessä.



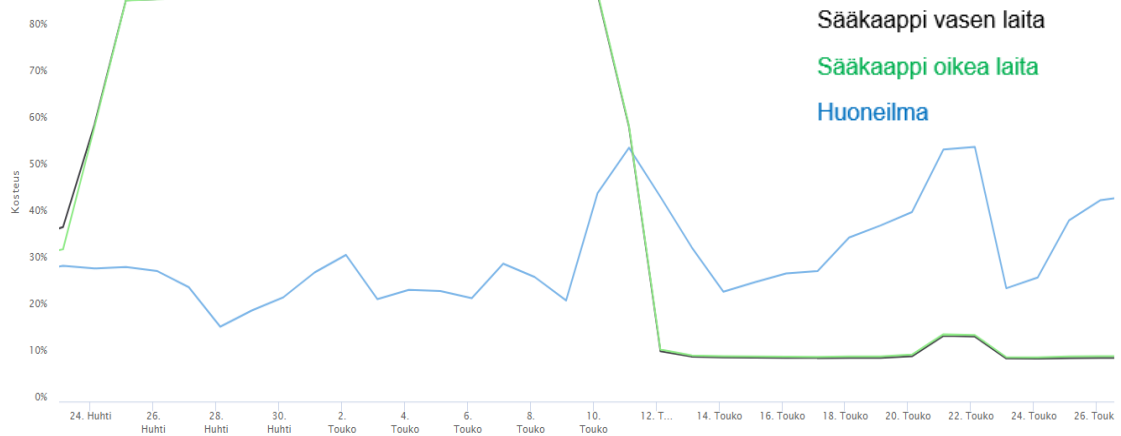
Kuva 10. Kosteusantureiden asennus eristeisiin.



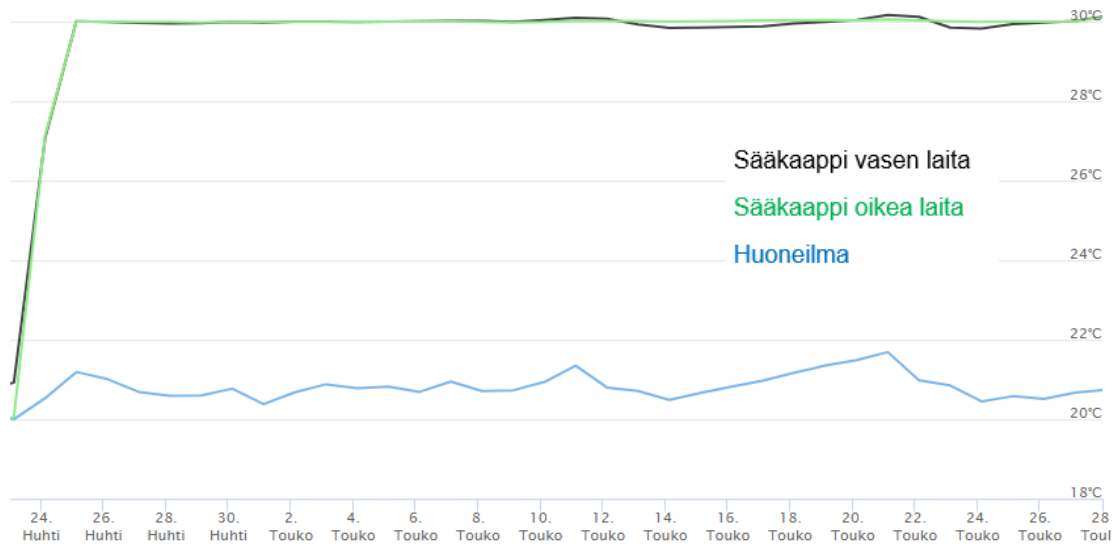
Kuva 11. Testirakenne.

5.3 Tulokset

Olosuhteet



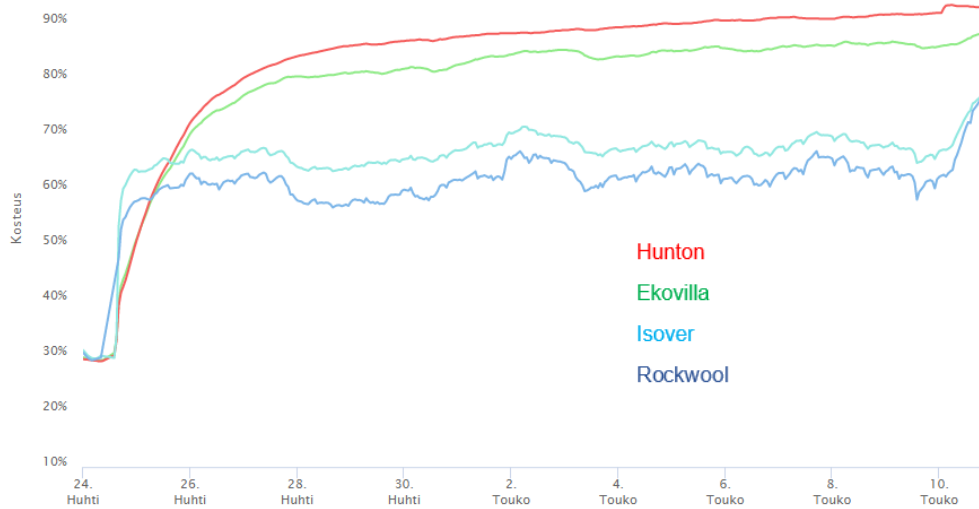
Kuvio 6. Kosteusolosuhteet.



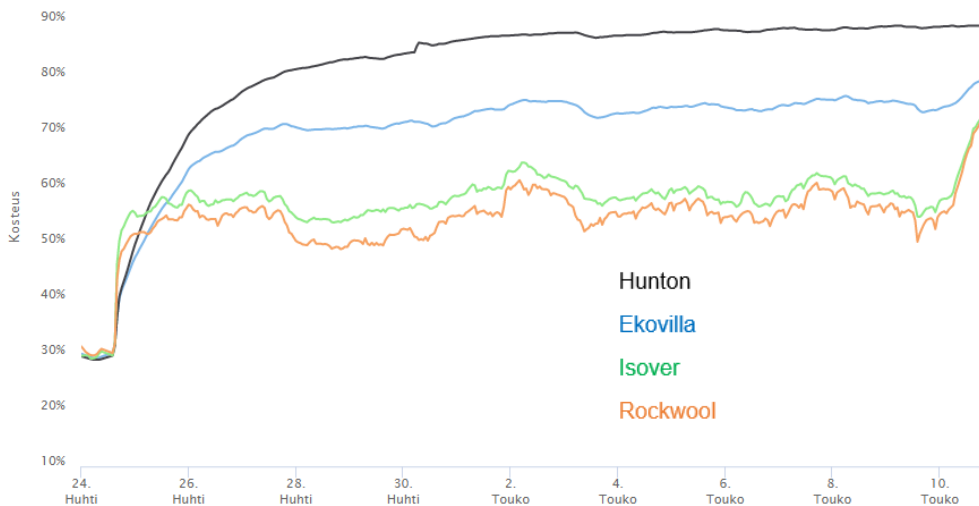
Kuvio 7. Lämpöolosuhteet.

Olosuhdekäyriellä on pyritty kuvaamaan sääkaapin sisäisten olosuhteiden toteutumista asetettujen lähtöarvojen suhteen. Kuviosta 6 huomataan, että sääkaapin vasemman laidan ja oikean laidan välillä ei ole merkittävää eroa, joten kosteuden jakautuminen testirakenteeseen on ollut tasaista.

Kostutusjakso



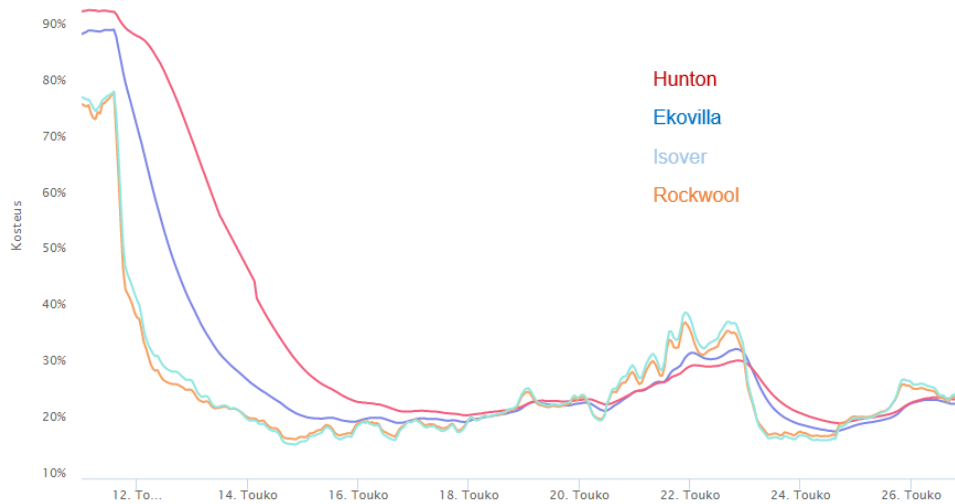
Kuvio 8. Anturit 80 mm ulkopinnasta.



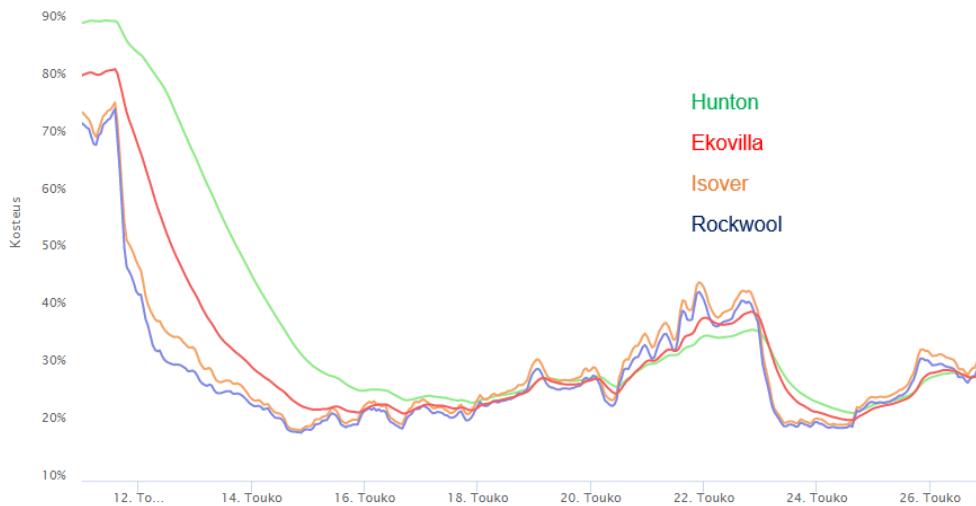
Kuvio 9. Anturit 40 mm ulkopinnasta.

Kostutusjakson alkaessa huomataan kaikkien eristeiden kosteusprosenttien nousevan nopeasti. Mineraalivillojen osalta kostuminen on nopeampaa, mutta lopulliset kosteusprosentit jäävät huomattavasti puukuitueristeitä pienemmiksi. Puukuitueristeiden sääkaapin puoleiset anturit osoittavat kosteusprosenttien nousevan jopa sääkaapin olosuhteiden tasolle. Ekovillan kosteusprosentit jäävät Huntonia matalammiksi molemmilla tarkastelusyvyyksillä, mutta ero on merkittävämpi huonetilan puoleisten antureiden osalta.

Kuivatusjakso



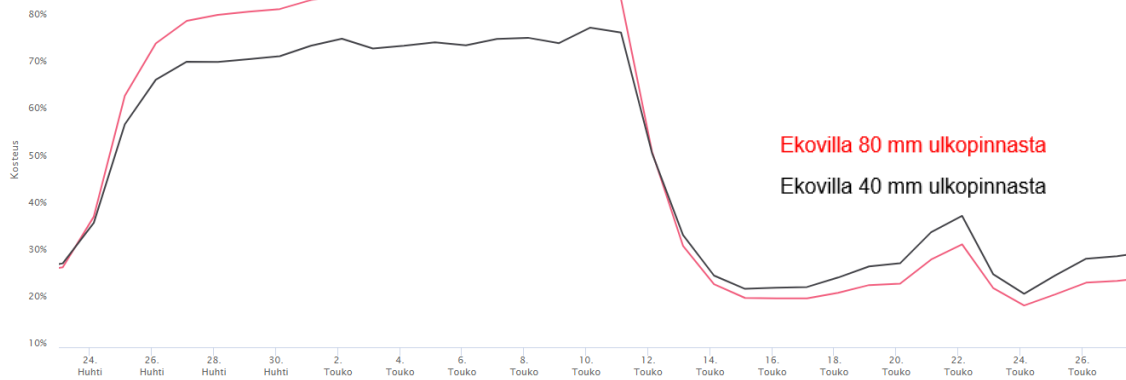
Kuvio 10. Anturit 80 mm ulkopinnasta.



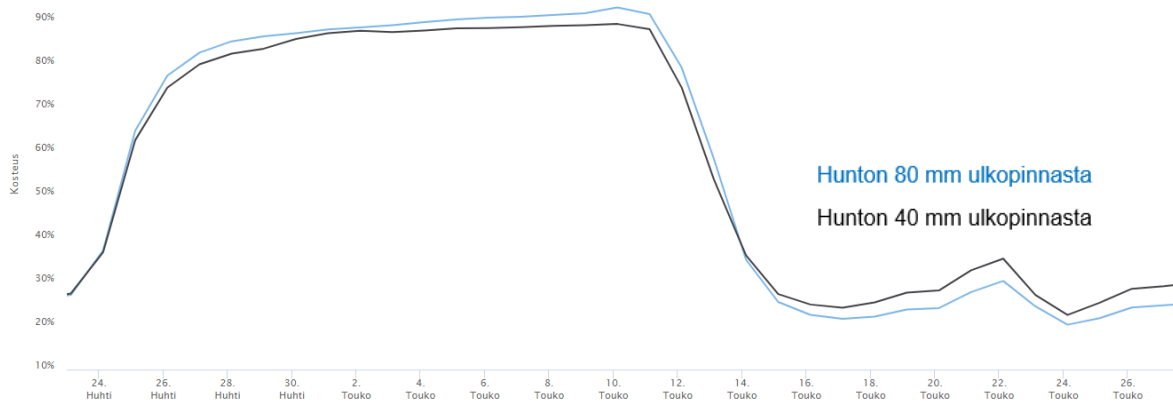
Kuvio 11. Anturit 40 mm ulkopinnasta.

Kuivatusjakson kuviot osoittavat mineraalivillojen kuivumisen olevan huomattavasti puukuitueristeitä nopeampaa välittömästi jakson alkaessa, mutta viimeisen kuivuvan 10% osalta mineraalivillojen kuivuminen vaikuttaa olevan puukuitueristeitä hitaampaa. Puukuitueristeiden kuivuminen on mineraalivilloihin nähden tasanaisempaa ja Huntonin osalta hiukan Ekovillaa hitaampaa.

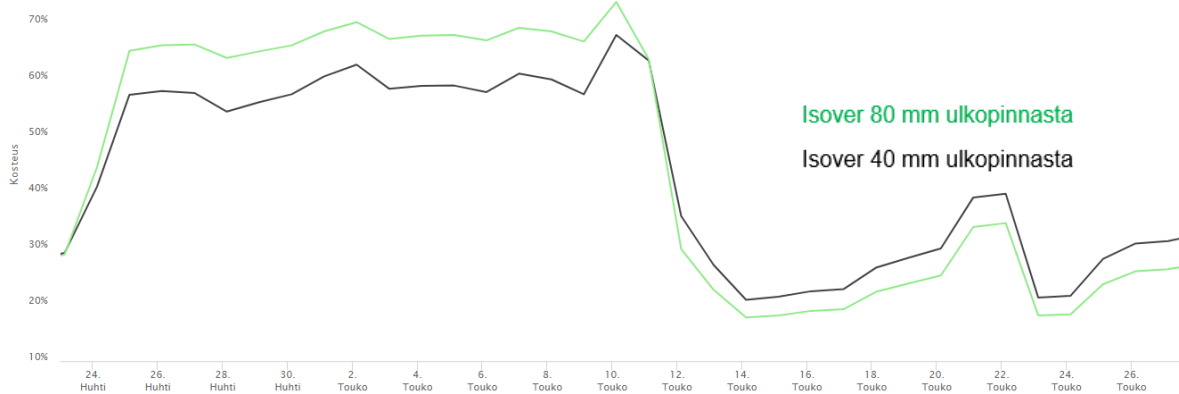
Eristekohtaiset tulokset



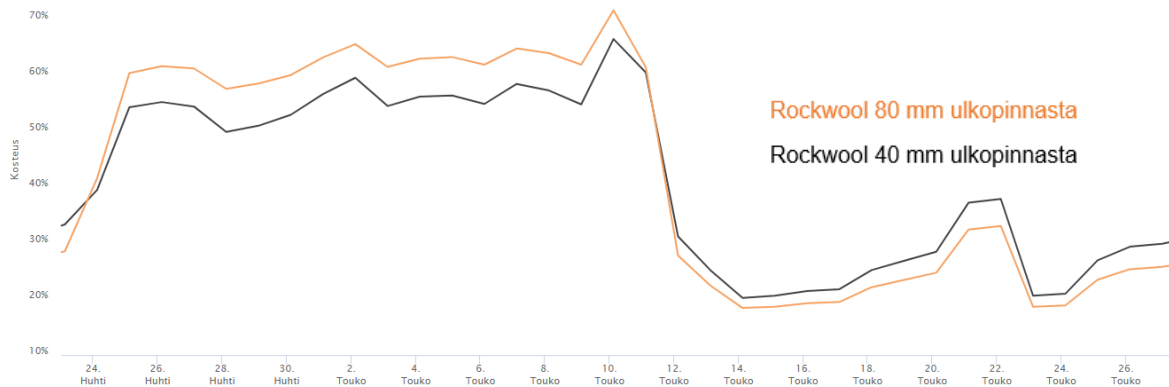
Kuvio 12. Ekovillan antureiden vertailu.



Kuvio 13. Hunton Nativo antureiden vertailu.



Kuvio 14. Isover antureiden vertailu.



Kuvio 15. Rockwool antureiden vertailu.

Eristekohtaisten tulosten tarkoituksena on kuvata kosteuden jakautumista kunkin eristeen sisällä. Kosteuden jakaantumisen tasaisuutta voidaan arvioida eri mittaussyvyyksiltä saatujen arvojen erotuksena.

5.4 Johtopäätökset

Kuvaajista huomataan, että Huntonin ja Ekovillan sisälle muodostui mineraalivilloja korkeammat kosteusprosentit. Tämä tarkoittaa, että kyseiset eristeet onnistuivat vastaanottamaan ja sitomaan vesihöyryä paremmin testin aikana. Molempien luonnonkuitueristeiden kostumis- ja kuivumisprosessit näyttävät käyriä hyvin samanlaisilta, mutta Huntonin osalta päästiin hieman korkeampiin kosteusprosentteihin. Mineraalivillojen keskinäisessä vertailussa huomataan myös niiden käyttäytyneen hyvin samalla tavalla toisiinsa nähden. Mineraalivillojen kuvaajia tarkastellessa nähdään paljon teräviä nousuja ja laskuja, eikä niiden käyttäytyminen ole yhtä tasaista kuin luonnonkuitueristeillä. Tämä todentaa mineraalivilloja käsittelevän luvun 3.2 väitteen siitä, että ilmanläpäisevyys kasvaa tiheyden ollessa pienempi ja, että kosteus pääsee liikkumaan helposti ilmavirtojen ja diffuusion avulla huokoisemmassa materiaalissa.

Luonnonkuitueristeiden kuivuminen oli myös tässä testissä hieman hitaampaa kuin mineraalivillojen, mikä mahdollisesti johtuu jo edellä mainitusta tiheyden vaikutuksesta eristeen sisäisiin ilmavirtoihin. Kaikki testatut eristeet kuitenkin kuivui-
vat hyvinkin nopeasti Huntonin kuivumisen ollessa hitainta. Kuviosta 6 huoma-
taan sääkaapin olosuhteiden muuttuvan välillä 20.5.–24.5. Tämä muutos ei ollut
ohjelmoitu sääkaapin ohjausohjelmaan, vaan tapahtui tuntemattomista syistä.
Kuivatusjakson kuvaajissa näkyvä eristeiden kosteuksien kasvaminen johtuu
tästä poikkeamasta.

Kahden eri syvyyteen asennetun kosteusanturin käytöllä oli tarkoitus tutkia kos-
teuden etenemistä eristeen sisällä. Tähän liittyvät tulokset löytyvät sivulta 32 koh-
dasta eristekohtaiset tulokset. Kuvaajista huomataan, että kosteuden leviäminen
on ollut tasaisinta Hunton Nativon osalla, jossa antureiden välillä on vain muuta-
man prosentin ero. Muiden testattujen eristeiden osalta ero on noin kymmenen
prosentin luokkaa, eli kosteutta on enemmän kosteuslähteen puoleisessa osassa
eristettä. Kuivumisen aikana kuvaajien viivat vaihtavat paikkaa toisiinsa nähden
kaikkien eristeiden osalta, jolloin kosteusprosentit jäävät suuremmiksi eristeiden
ulommassa osassa. Tämä tarkoittaa sitä, että kuivuminen sääkaapin suuntaan
on ollut voimakkaampaa kuin kuivuminen huonetilaan.

Testirakenteen purkamisen yhteydessä tarkasteltiin sekä puuristikon, että läm-
mönneristeiden kuntoa silmämääräisesti ja pyrittiin löytämään mahdollisia kos-
teusrasituksesta aiheutuneita homevaurioita. Silmämääräisellä tarkastelulla ei
löydetty homekasvustoa tai muuta vauriota.

6 Analysointi

Laboratoriotutkimusten perusteella voidaan todeta molempien puukuitueristeiden noudattavan hengittävän rakenteen periaatteita. Ensimmäisessä kokeessa havaittiin, että uudesta puukuidusta valmistettu Hunton Nativo sekä kierrätysmateriaalista valmistettu Ekovilla pystyivät sitomaan hyvin niihin syötetyn kosteuden ja vapauttamaan sen nopeasti takaisin ympäristöönsä. Ensimmäisen kokeen perusteella Ekovilla näyttäisi asettuvan hiukan korkeampaan tasapainokosteuteen kuin Hunton. Toisessa kokeessa huomattiin, että Huntonin sisäinen ilman suhteellinen kosteus kohosi hieman korkeammalle kuin Ekovillalla, ja kosteuden jakautuminen eristeen ulompiin osiin oli tasaisempaa. Kuivumiskäyrien kulmakeroin oli Ekovillalla aavistuksen Huntonia jyrkempi eli kuivuminen oli hieman nopeampaa. Kokonaisuutta ajatellen kyseiset lämmöneristeet käyttäytyivät laboratoriotutkimuksissa melko yhdenmukaisesti.

Mineraalivillojen ominaisuuksien voidaan todeta olevan hengittävän rakenteen periaatteen vastaisia. Tämä tulos ei ollut yllättävä sillä niiden alhainen hygroskooppisuus oli tiedossa jo etukäteen. Hygroskooppisuuden puute ilmeni jo ensimmäisen kokeen kostutusvaiheessa pelkällä silmämääräisellä tarkastelulla, ja se varmistui märkäpainon punnituksessa. Kumpikaan lämmöneriste ei kyennyt sitomaan niihin syötettyä kosteutta vaaditulla tavalla. Ensimmäisen kokeen pintaruiskutuksessa molempien eristeiden kuivuminen oli erittäin nopeaa kosteuden ollessa lähes täysin pintakosteutta. Sisään ruiskutuksella syötetty vesi jäi kivivillasta valmistetun Rockwoolin sisälle, jolloin Rockwoolin kuivuminen oli kaikista testatuista eristeistä hitainta. Samalla menetelmällä syötetty vesi ei kuitenkaan jäänyt lasivillasta valmistetun Isoverin sisälle, vaan valui todennäköisesti painovoimaisesti ulos eristeestä jo imeytymisjakson aikana johtuen eristeen pienestä tiheydestä. Toisessa kokeessa mineraalivillojen kuivuminen oli lähes identtistä, mutta kostutusjaksolla Isoverin sisäinen suhteellinen ilmankosteus kohosi noin viisi prosenttiyksikköä Rockwoolia korkeammalle. Tämä ero selittyy mahdollisesti Isoverin pienemmällä tiheydellä, jolloin ilmavirtojen liike eristeen sisällä helpottuu

7 Pohdinta

Työn tarkoituksena oli tutkia valittujen lämmöneristeiden kosteuskäyttäytymistä kahden laboratoriotutkimuksen avulla, ja analysoida tuloksia hengittävän rakenteen toimintaperiaatteiden kannalta. Toteutettujen tutkimusten avulla saatiin tietoa lämmöneristeiden kostumis- ja kuivumiskäyttäytymisestä sekä kosteuden jakautumisesta eristeiden sisällä.

Laboratoriotutkimukset onnistuivat suunnitellulla tavalla, eikä niiden toteutuksessa ilmennyt merkittäviä ongelmia. Sääkaapin avulla suoritetussa tutkimuksessa saadut tulokset olisivat voineet olla monipuolisempia, mutta tutkimusta suunniteltaessa ei löydetty toimivaa työtekniistä toteutusta muiden määreiden kuin eristeiden sisäisten ilman kosteuksien mittaamiseen.

Tämän opinnäytetyön pohjalta voitaisiin kehittää jatkotutkimuksia, joissa Karelia-ammattikorkeakoulun sääkaappia hyödynnettäisiin kokonaisen seinärakenteen tutkimiseen. Tällöin voitaisiin tutkia jokaisen rakenneosan käyttäytymistä osana hengittävää rakennetta. Jatkotutkimuksissa voitaisiin myös laajentaa mittauksia kattamaan muitakin kosteusmääreitä, kuin rakenteiden sisäisiä ilman kosteuksia tai jopa yhdistämään tutkimuksiin lämmöneristyskyvyn tarkkailua.

Lähteet

1. Rakennustieto Oy. 2017. RT 38901 Ekovilla-lämmöneristeet - Ekovilla Oy. https://www.ekovilla.com/fileadmin/user_upload/dokumentit/RT-kortti_2107_38901.pdf. 27.8.2019
2. Dynaamiset Rakenteet ry. 2016. Dynaaminen Rakenne: Opas suunnittelun ja valintojen tueksi. http://dynaamisetrakenteet.fi/data/documents/Dynaaminen_Rakenne_Opas_suunnittelun_ja_valintojen_tueksi.pdf. 27.8.2019
3. Erkki Kokko. 2002. Hengittävä puukuiturakenne – Fysikaalinen toimintaperiaate ja vaikutukset sisäilmaan. <https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/hengittava-puukuiturakenne/koko-ohje.pdf>. 15.9.2019
4. Sunhouse. Puutalon hengittävä seinärakenne <https://www.sunhouse.fi/opi/hengitt%C3%A4v%C3%A4-sein%C3%A4rakenne>. 22.6.2019
5. RIL 255-1. 2014. Rakennusfysiikka 1 – Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki.
6. Rakennustieto Oy. 1999. RT 36-10689 Mineraalivillaeristeet - Lämmöneristystarvikkeet.
7. Kotiapp. Lasivillalevy. <https://kotiapp.fi/termi/lasivilla/>. 23.10.2019
8. Rakennustieto Oy. 2012. RT 36-11090 Puukuitueristeet – Lämmöneristystarvikkeet.
9. Puuinfo. Ekovillalevyn asennus. <https://www.puuinfo.fi/tuote/ekovillalevy>. 23.10.2019

Kuivatuskoe pintaruiskutus:

Eristeiden sisäiset vesimäärät taulukoituna.

Vesimäärä									
Koekappaleiden mitat 520x300x150mm									
1. koe		Hunton Nativo	Ekovilla	Rockwool	Isover				
Alku		[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]				
Päivä	Mittaus	0	0	0	0	Kellonaika	T huone [°C]	RH% huone	
1.pv	Märkä	9,577	9,491	7,009	6,406	9:00	22,5	27,0	
	1. mittaus	9,021	9,034	6,393	5,850	10:00	22,5	25,0	
	2. mittaus	7,697	7,821	4,842	4,538	12:00	22,6	27,0	
	3. mittaus	6,628	6,782	3,299	3,051	14:00	22,6	24,0	
	4. mittaus	5,795	5,970	1,910	1,744	16:00	22,5	23,0	
2.pv	5. mittaus	4,957	5,167	0,829	0,692	18:00	22,3	25,0	
	6. mittaus	2,923	3,269	0,013	0,013	9:00	22,2	18,0	
	7. mittaus	2,615	2,991	0,009	0,009	12:00	22,4	19,0	
	8. mittaus	2,346	2,765	0,004	0,000	15:00	22,3	18,0	
	9. mittaus	2,107	2,560	0,000	0,000	19:00	22,2	21,0	
3.pv	10. mittaus	1,671	2,214	0,000	0,000	9:00	21,9	23,0	
	11. mittaus	1,585	2,141	0,000	0,000	12:00	22,4	23,0	
	12. mittaus	1,444	2,064	0,000	0,000	16:15	22,5	23,0	
4.pv	13. mittaus	1,291	1,970	0,000	0,000	10:30	22,5	26,0	
	14. mittaus	1,256	1,940	0,000	0,000	13:30	22,6	25,0	
5.pv	15. mittaus	1,184	1,889	0,000	0,000	16:00	22,1	27,0	
6.pv	16. mittaus	0,963	1,735	0,000	0,000	15:00	22,2	18,0	
	17. mittaus	0,846	1,628	0,000	0,000	9:30	22,3	17,0	
7.pv	18. mittaus	0,803	1,594	0,000	0,000	15:00	22,5	18,0	
	19. mittaus	0,970	1,722	0,000	0,000	10:00	22,3	30,0	
8.pv	20. mittaus	1,047	1,786	0,000	0,000	16:00	22,5	29,0	
	21. mittaus	1,064	1,803	0,000	0,000	19:00	22,3	30,0	
9.pv	22. mittaus	1,120	1,850	0,000	0,000	9:30	22,4	30,0	
	23. mittaus	1,120	1,850	0,000	0,000	12:00	22,5	29,0	
10.pv	24. mittaus	1,111	1,842	0,000	0,000	15:00	22,7	27,0	
	25. mittaus	0,868	1,654	0,000	0,000	10:00	22,4	16,0	
	26. mittaus	0,799	1,598	0,000	0,000	13:00	22,5	16,0	
	27. mittaus	0,684	1,504	0,000	0,000	17:00	22,3	17,0	
	28. mittaus	0,632	1,466	0,000	0,000	10:00	22,3	14,0	
11.pv	29. mittaus	0,573	1,419	0,000	0,000	14:30	22,5	15,0	
	30. mittaus	0,748	1,543	0,000	0,000	14:30	22,0	28,0	
13.pv	31. mittaus	1,043	1,769	0,000	0,000	19:30	22,0	30,0	
	32. mittaus	1,124	1,829	0,000	0,000	9:30	22,3	32,0	
14.pv	33. mittaus	1,090	1,808	0,000	0,000	18:00	22,6	31,0	
	34. mittaus	1,056	1,774	0,000	0,000	13:30	22,6	25,0	

Kuivatuskoe pintaruiskutus:

Eristeiden sisäiset kosteusprosentit taulukoituna.

Eristeiden kosteusprosentit									
Koekappaleiden mitat 520x300x150mm									
1. koe		Hunton	Mativo	Ekovilla	Rockwool	Isover			
Alku		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]			
Päivä		Mittaus	Märkä	Kellonaika			T huone [C]	RH% huone	
1.pv	1. mittaus	20.7	22.8	22.4	30.1	22.5	27.0		
	2. mittaus	19.5	21.7	20.4	27.5	22.5	25.0		
	3. mittaus	16.7	18.8	15.5	21.3	22.6	27.0		
	4. mittaus	14.4	16.3	10.5	14.3	22.6	24.0		
	5. mittaus	12.5	14.3	6.1	8.2	22.5	23.0		
2.pv	6. mittaus	10.7	12.4	2.6	3.2	22.3	25.0		
	7. mittaus	6.3	7.8	0.04	0.1	22.2	18.0		
	8. mittaus	5.7	7.2	0.03	0.0	22.4	19.0		
	9. mittaus	5.1	6.6	0.01	0.0	22.3	18.0		
	10. mittaus	4.6	6.1	0.00	0.0	22.2	21.0		
3.pv	11. mittaus	3.6	5.3	0.00	0.0	21.9	23.0		
	12. mittaus	3.4	5.1	0.00	0.0	22.4	23.0		
	13. mittaus	3.1	5.0	0.00	0.0	22.5	23.0		
	14. mittaus	2.8	4.7	0.00	0.0	22.5	26.0		
	15. mittaus	2.7	4.7	0.00	0.0	22.6	25.0		
4.pv	16. mittaus	2.6	4.5	0.00	0.0	22.1	27.00		
	17. mittaus	2.1	4.2	0.00	0.0	22.2	18.00		
	18. mittaus	1.8	3.9	0.00	0.0	22.3	17.00		
	19. mittaus	1.7	3.8	0.00	0.0	22.5	18.00		
	20. mittaus	1.7	4.1	0.00	0.0	22.3	30.0		
5.pv	21. mittaus	2.3	4.3	0.00	0.0	22.5	29.00		
	22. mittaus	2.4	4.4	0.00	0.0	22.3	30.00		
	23. mittaus	2.4	4.4	0.00	0.0	22.4	30.00		
	24. mittaus	2.4	4.4	0.00	0.0	22.5	29.00		
	25. mittaus	1.9	4.0	0.00	0.0	22.7	27.00		
6.pv	26. mittaus	1.7	3.8	0.00	0.0	22.4	16.00		
	27. mittaus	1.5	3.6	0.00	0.0	22.5	16.00		
	28. mittaus	1.4	3.5	0.00	0.0	22.3	17.00		
	29. mittaus	1.2	3.4	0.00	0.0	22.3	14.00		
	30. mittaus	1.6	3.7	0.00	0.0	22.5	15.00		
7.pv	31. mittaus	2.3	4.2	0.00	0.0	22.0	28.00		
	32. mittaus	2.4	4.4	0.00	0.0	22.0	30.00		
	33. mittaus	2.4	4.4	0.00	0.0	22.3	32.00		
	34. mittaus	2.4	4.3	0.00	0.0	22.6	31.00		
	15.pv	34. mittaus	2.3	4.3	0.00	0.0	22.6	25.00	

Kuivatuskoe sisään ruiskutus:

Eristeiden sisäiset vesimäärät taulukoituna.

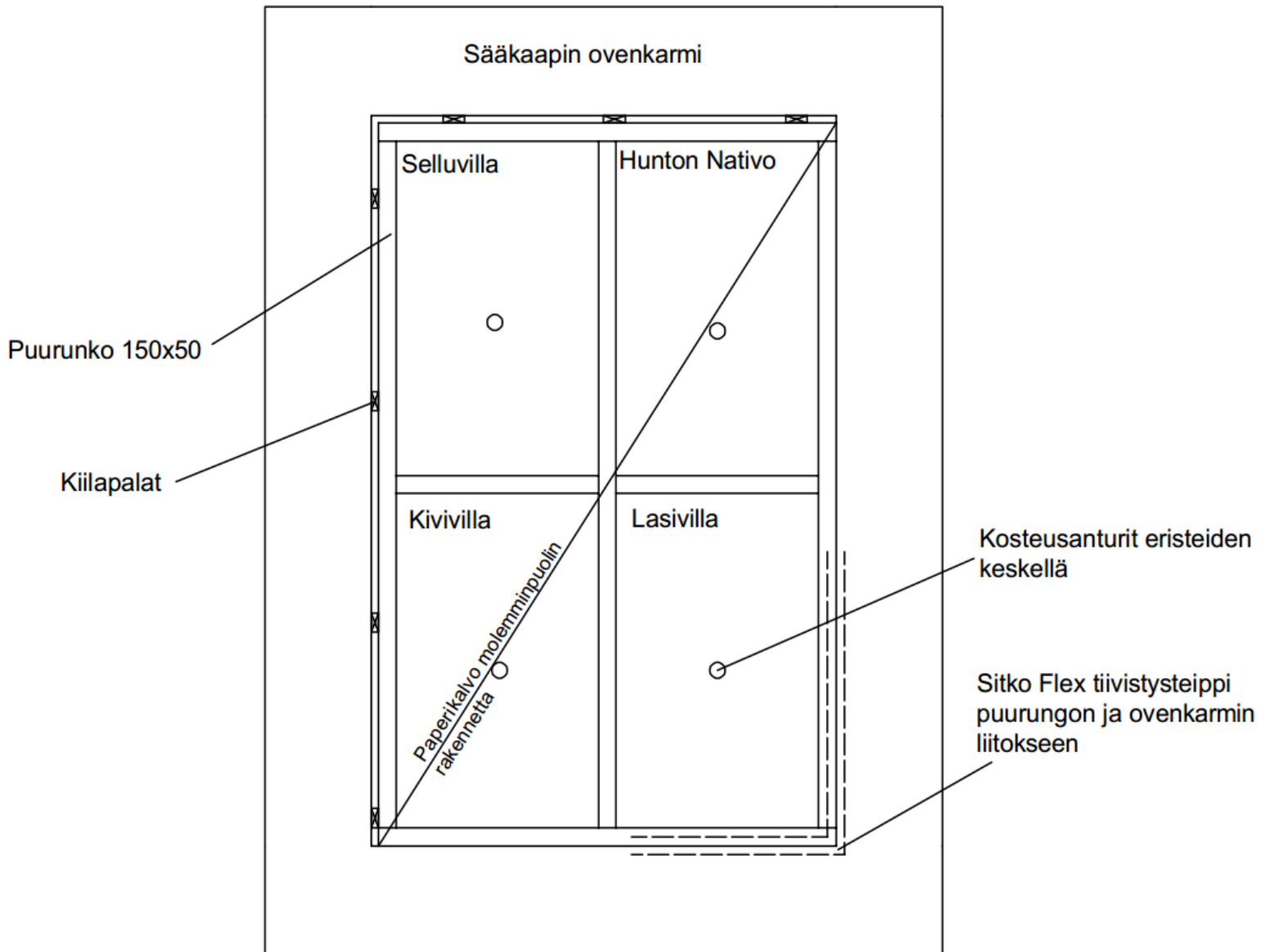
Vesimäärä						
Koekappaleiden mitat 520x300x150mm						
1. koe (Sisään ruiskuttamalla)		Rockwool [kg/m ³]	Isover [kg/m ³]			
Alku	Mittaus	0	0			
Päivä	Mittaus	Märkä	Kellonaika	T huone [°C]	RH% huone	
1. pv	Märkä	9,718	4,209	10:00	22,3	30,0
	1. mittaus	9,380	3,363	11:00	22,4	30,0
	2. mittaus	9,081	2,983	12:00	22,4	30,0
	3. mittaus	8,697	2,410	14:00	21,8	31,0
	4. mittaus	8,415	2,051	16:00	22,5	29,0
	5. mittaus	8,043	1,658	19:00	22,3	30,0
2. pv	6. mittaus	6,496	0,406	9:30	22,4	30,0
	7. mittaus	6,265	0,291	12:00	22,5	29,0
	8. mittaus	5,944	0,167	15:00	22,7	27,0
	9. mittaus	5,466	0,056	20:00	22,4	26,0
	10. mittaus	4,184	0,000	10:00	22,4	16,0
	11. mittaus	3,889	0,000	13:00	22,5	16,0
3. pv	12. mittaus	3,530	0,000	17:00	22,3	17,0
	13. mittaus	2,333	0,000	10:00	22,3	14,0
	14. mittaus	2,034	0,000	14:30	22,5	15,0
5. pv	15. mittaus	0,983	0,000	14:30	22,0	28,00
6. pv	16. mittaus	0,521	0,000	19:30	22,0	30,00
7. pv	1. mittaus	0,359	0,000	9:30	22,30	32,00
	2. mittaus	0,269	0,000	18:00	22,60	31,00
8. pv	1. mittaus	0,103	0,000	13:30	22,60	25,00

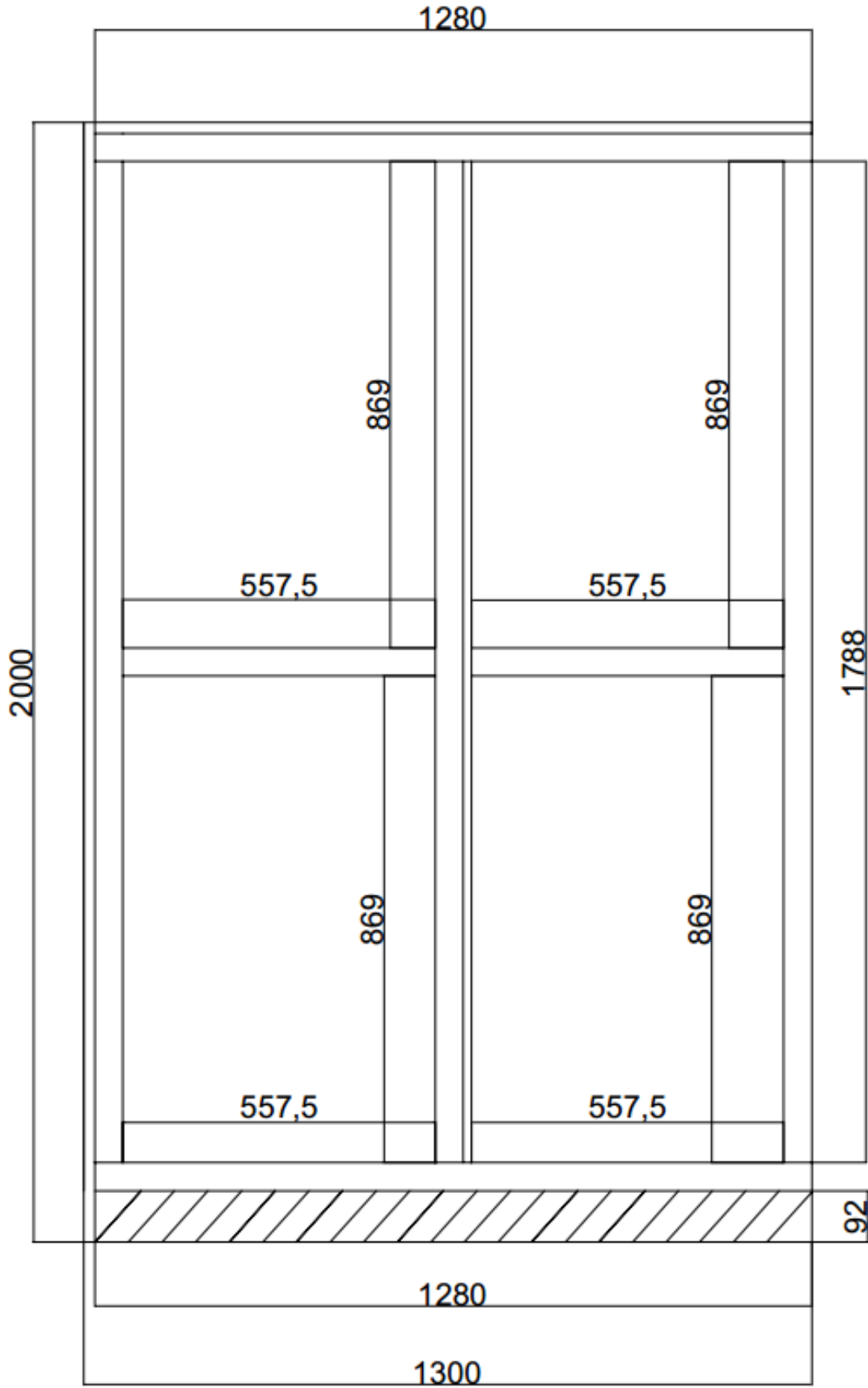
Kuivatuskoe sisään ruiskutus:

Eristeiden sisäiset kosteusprosentit taulukoituna.

Eristeiden kosteusprosentit Koekappaleiden mitat 520x300x150mm						
1. koe (Sisään ruiskuttamalla)		Rockwool [%]	Isover [%]	RH% huone		
Päivä	Mittaus			Kellonaika	T huone [°C]	
	Alku	0	0			
1.pv	Mittaus					
	Märkä	31,1	19,8	10:00	22,3	30,0
	1. mittaus	30,0	15,8	11:00	22,4	30,0
	2. mittaus	29,0	14,0	12:00	22,4	30,0
	3. mittaus	27,8	11,3	14:00	21,8	31,0
2.pv	4. mittaus	26,9	9,6	16:00	22,5	29,0
	5. mittaus	25,7	7,8	19:00	22,3	30,0
	6. mittaus	20,8	1,9	9:30	22,4	30,0
	7. mittaus	20,0	1,4	12:00	22,5	29,0
	8. mittaus	19,0	0,8	15:00	22,7	27,0
3.pv	9. mittaus	17,5	0,3	20:00	22,4	26,0
	10. mittaus	13,4	0,0	10:00	22,4	16,0
	11. mittaus	12,4	0,0	13:00	22,5	16,0
	12. mittaus	11,3	0,0	17:00	22,3	17,0
	13. mittaus	7,5	0,0	10:00	22,3	14,0
4.pv	14. mittaus	6,5	0,0	14:30	22,5	15,0
	15. mittaus	3,1	0,0	14:30	22,0	28,00
5.pv	16. mittaus	1,7	0,0	19:30	22,0	30,00
	17. mittaus	1,1	0,0	9:30	22,3	32,00
7.pv	18. mittaus	0,9	0,0	18:00	22,6	31,00
	19. mittaus	0,3	0,0	13:30	22,6	25

Testirakenteen suunnitelmat ja mitat.

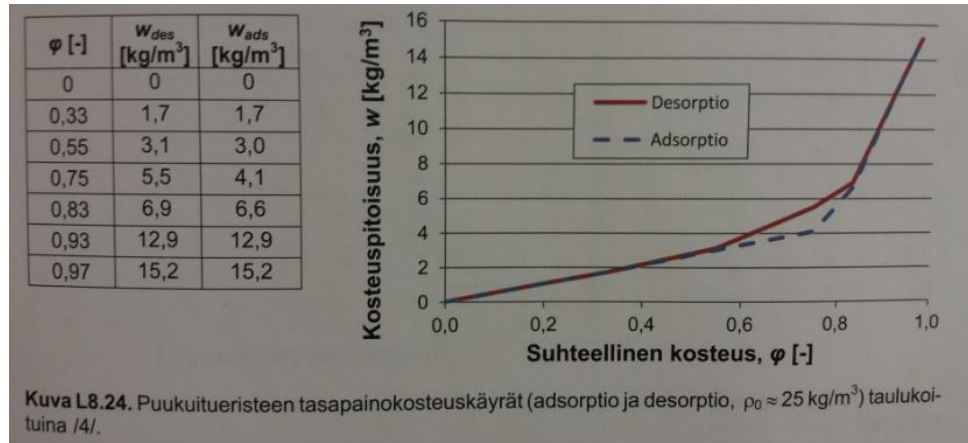




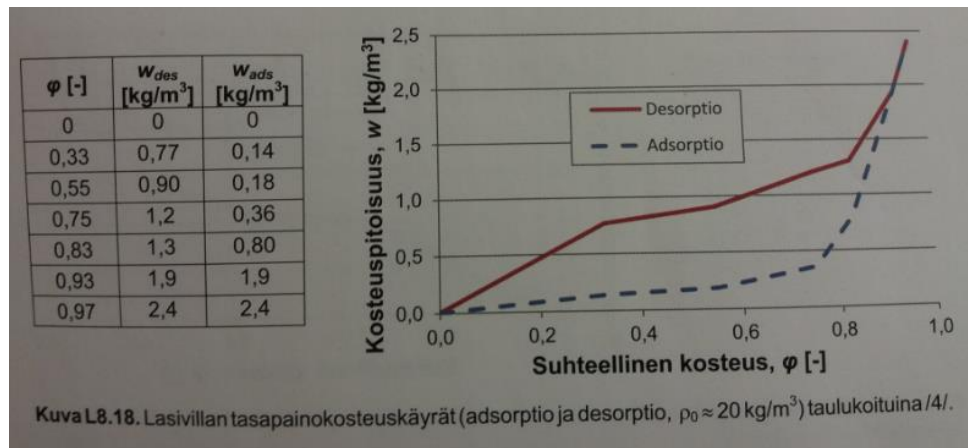
Tasapainokosteuskäyrät

(RIL 255-1-2014 Rakennusfysiikka 1 Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset, s. 469-471) [5, 469-471].

Puukuitueriste



Lasivilla



Kivivilla

