

Ilkka Tuurala

KUTTERINLASTUERISTEIDEN RAKENNUSFYSIKAALISET OMINAISUUDET

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja: TkT Juha Vinha
Tarkastaja: DI Eero Tuominen
Toukokuu 2022

TIIVISTELMÄ

Ilkka Tuurala: Kutterinlastueristeiden rakennusfysikaaliset ominaisuudet
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikka
Toukokuu 2022

Tutkimus on osa ECOSAFE-hanketta. Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia hankkeessa käytettyjen kutterinlastueristeiden materiaaliominaisuudet niissä tiheyksissä missä materiaaleja käytettiin hankkeen rakennekokeissa. Näin saatiin materiaaliarvot hankkeen las kentatarkasteluja varten. Toisena tavoitteena oli vertailla, onko eri kutterinlastutuotteiden välillä eroavaisuuksia sekä erityisesti savetuksen vaikutusta materiaaliominaisuuksiin.

Materiaaliominaisuuksista tutkittiin ilmanläpäisevyys, lämmönjohtavuus, hygroskoop- pinen tasapainokosteus adsorptiossa ja desorptiossa, vesihöyrynläpäisevyys, kapillaarinen veden imeytymiskerroin ja kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus. Lämmönjohtavuus mitattiin 0–95 % RH kosteusalueella 10 °C keskilämpötilassa sekä 95 % RH kosteudessa myös 5 °C keskilämpötilassa. Tasapainokosteus mitattiin adsorptiossa ja desorptiossa 11–95 % RH kosteusalueella ja 23 °C lämpötilassa. Ilmanläpäisevyys ja veden imeytyminen mitattiin 50 % RH kosteudessa ja 23 °C lämpötilassa. Vesihöyrynläpäisevyys mitattiin märkä- kuppikokeella kosteuspareilla 50/11 ja 95/50 % RH.

Ilmanläpäisevyyden osalta mitattu ilmanläpäisevyys oli välillä $0,6\text{--}5,0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{msPa})$. Ero ilmanläpäisevyydessä määräytyi tiheyden perusteella.

Lämmönjohtavuuden osalta tulokset olivat kaikille mitatuille materiaaleille välillä $0,048\text{--}0,065 \text{ W}/(\text{mK})$. Kosteuden pysyessä normaaleissa olosuhteissa alle 50 % RH erot lämmönjohtavuudessa olivat pieniä. Suhteellisen kosteuden kasvaessa lämmönjohtavuus kasvoi. Erot tuotteiden välillä määräytyivät tiheyden perusteella, mutta tutkituilla tiheyksillä erot olivat marginaalisia.

Hygroskoopin tasapainokosteuskäyrä määräytyi materiaaleille tiheyden mukaan ja, hygroskoopiselle materiaalille tyypillisesti, hystereesi adsorption ja desorption välillä oli selkeästi nähtävissä. Korkeassa suhteellisessa kosteudessa savetetulla kutterinlastulla oli nähtävissä korkeampia tasapainokosteuksia, kuin pelkkä kutterinlastun tiheys selittäisi. Näyttäisi siltä, että savetus lisää korkeassa kosteuspitoisuudessa kutterinlastun tasapaino- kosteutta.

Vesihöyrynläpäisevyys laskee tiheyden kasvaessa. Vesihöyrynvastus Z_v oli välillä $4,2\text{--}9,9 \times 10^3 \text{ s}/\text{m}$ kuivissa olosuhteissa kosteusparilla 50/11 % RH ja $1,28\text{--}3,8 \times 10^3 \text{ s}/\text{m}$ korkeassa suhteellisessa kosteudessa kosteusparilla 95/50 % RH. Diffuusionvastuskerroin μ oli tiheydestä riippuen välillä $1,18\text{--}2,07$ kuivissa olosuhteissa ja $1,02\text{--}1,19$ kosteissa olosuhteissa.

Veden imeytymiskerroin A_w vaihteli välillä $0,2\text{--}1,1 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s}^2)$ ja kapillaarinen kyllästys- kosteuspitoisuus w_{cap} vaihteli välillä $234\text{--}490 \text{ kg}/\text{m}^3$ riippuen tiheydestä.

Avainsanat: Rakennusfysiikka, kutterinlastu, savetettu kutterinlastu, savi, materiaa- liominaisuudet, ilmanläpäisevyys, lämmönjohtavuus, tasapainokosteus, vesihöyrynlä- päisevyys, veden imeytymiskerroin, kapillariiteettikerroin,

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Ilkka Tuurala: "Building Physical Properties of Wood Shavings Insulation Materials"
Diploma Thesis
Tampere University
Civil Engineering
May 2022

The purpose of this study was to determine the material properties for the wood shavings insulation materials used in the ECOSAFE project. The goal was to examine the material properties in those densities that were used in the structural elements. The second aim was to compare results between wood shavings made from spruce and pine. The third goal was to investigate how adding clay in wood shavings affects the physical properties of the building materials in question.

The properties examined were air flow rate, thermal conductivity, hygroscopic sorption and desorption curve, vapor transmission properties, and water absorption coefficient. The thermal conductivity was measured in the 0-95 % RH humidity range and with 5-15 °C temperature difference. Sorption and desorption curves were determined in 11-95 % RH humidity range at the temperature of 23 °C. The air flow rate and water absorption coefficient values were determined at 50 % RH humidity and at the temperature of 23 °C. The water transmission properties were determined with humidity pairs 50/11 and 95/50 % RH.

The measured air flow rate was between $0,6-5,0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{msPa})$. The air flow rate was, as expected, governed by material density.

The thermal conductivity was between $0,048-0,065 \text{ W}/(\text{mK})$ - being lower in dry conditions and with lower material density. A higher material density did cause marginal increase in thermal conductivity, but not as significant as the moisture content. The added clay did not affect the thermal conductivity.

The hygroscopic sorption and desorption curve was also governed by density, and, as typical for hygroscopic material, hysteresis between adsorption and desorption curve was clearly visible. In conditions of high relative humidity, visibly higher moisture content was present in wood shavings with added clay. It seems that added clay does increase the equilibrium moisture content.

The water vapor permeability was found to decrease when material density increased. The water vapor resistance factor Z_v was between $4,2-9,9 \times 10^3 \text{ s}/\text{m}$ in dry conditions (50/11 % RH), and $1,28-3,8 \times 10^3 \text{ s}/\text{m}$ in conditions of high humidity (50/95 % RH). The diffusion resistance coefficient μ was between 1,18-2,07 in dry conditions and 1,02-1,19 in conditions of high humidity.

The capillary water absorption coefficient A_w was between $0,2-1,1 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s}^2)$ and capillary saturation moisture content w_{cap} was between 234-490 kg/m^3 , depending on material density.

Keywords: building physics, wood shavings, clayed wood shavings, wood chips, material properties, air flow rate, thermal conductivity, hygroscopic sorption, hygroscopic desorption, vapor transmission properties, water vapor permeability, water absorption coefficient

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä tutkimus on osa Tampereen yliopiston ECOSAFE – Kosteusturvalliset ja ympäristöystävälliset purueristeiset puurakenteet -hanketta. Hankkeen projektipäällikkönä, työn ohjaajana ja diplomityön toisena tarkastajana toimi DI Eero Tuominen. Hankkeen vastuullisena johtajana, diplomityön vastuujohtajana ja diplomityön toisena tarkastajana toimi professori Juha Vinha.

Kiitän Juha Vinhaa mahdollisuudesta olla osa rakennusfysiikan tutkimusryhmää. Kiitän työn ohjaajaa Eero Tuomista keskusteluista ja ohjauksesta, erityisesti käytännön neuvoista mittausten ja tutkimusten teossa.

Kiitän puolisoani Kirsiä, joka on jaksanut tukea opintojani siitäkin huolimatta, että oman rintamamiestalomme remontti on siinä ohessa hieman venähtänyt. Kiitän myös lapsiani Elisaa ja Lauria, jotka kysymyksillään ovat auttaneet itsellenikin selventämään, mitä olen tekemässä.

Pirkkalassa, 30.5.2022

Ilkka Tuurala

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT.....	4
ALKUSANAT.....	5
SISÄLLYSLUETTELO.....	6
LYHENTEET JA MERKINNÄT.....	9
KÄSITTEET.....	10
1. JOHDANTO.....	12
2. LÄMMÖN- JA KOSTEUDENSIIRRON TEORIA.....	14
2.1 Ilma ja ilman siirtyminen huokoisessa materiaalissa.....	14
2.2 Lämmönjohtavuus huokoisessa materiaalissa.....	15
2.3 Kosteus ja kosteuden siirtyminen.....	17
2.3.1 Kosteus ilmassa.....	18
2.3.2 Kosteus aineessa.....	19
2.3.3 Tasapainokosteus ja hystereesi.....	20
2.3.4 Diffuusio.....	24
2.3.5 Pintadiffuusio.....	26
2.3.6 Kapillaarisuus.....	26
2.3.7 Konvektio.....	29
3. KUTTERINLASTU MATERIAALINA.....	30
3.1 Kutterinlastueristeiden käyttö rakentamisessa.....	30
3.1.1 Rintamamiestalo.....	30
3.1.2 Ohjeita eristeen rakeisuudesta ja tiheydestä.....	31
3.1.3 Nykypäivänä.....	32
3.2 Kutterinlastun mekaaninen rakenne.....	33
3.2.1 Lastun muoto.....	34
3.2.2 Lastun pituus.....	36
3.2.3 Lastun paksuus.....	37
3.3 Puun solurakenne.....	38
3.3.1 Trakeidit.....	39
3.3.2 Ikkunahuokokset.....	40
3.4 Kosteus puussa.....	41
3.4.1 Puun hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä.....	42
3.4.2 Hystereesi.....	44
3.4.3 Veden imeytyminen, massanmuutos kosteuden neliöjuuren funktiona.....	45

3.4.4	Puun maksimikosteuspitoisuus.....	46
4.	MATERIAALIKOKEET.....	48
4.1	Olosuhteiden hallinta.....	48
4.2	Tutkittavat materiaalit.....	51
4.2.1	Esivalmistelut ja tiheyden määrittäminen.....	52
4.3	Ilmanläpäisevyyskoe.....	54
4.3.1	Standardi SFS-EN ISO 9053:2018.....	54
4.3.2	Koelaitteisto.....	55
4.3.3	Mittaukset.....	57
4.3.4	Laskenta.....	57
4.3.5	Virhelähteet ja kokeen onnistumisen arviointi.....	58
4.4	Lämmönjohtavuus.....	59
4.4.1	Standardi SFS-EN ISO 12667:2001.....	59
4.4.2	Koelaitteisto.....	60
4.4.3	Koekappaleiden valmistus.....	63
4.4.4	Mittaukset.....	64
4.4.5	Virhelähteet ja kokeen onnistumisen arviointi.....	67
4.5	Hygroskooppinen tasapainokosteus.....	69
4.5.1	Standardi SFS-EN ISO 12571.....	69
4.5.2	Koekappaleiden valmistus.....	70
4.5.3	Mittaukset.....	71
4.5.4	Kosteuspitoisuuden laskenta.....	71
4.5.5	Tasapainokosteus lämmönjohtavuuskokeiden koekappaleista.....	72
4.5.6	Virhelähteet ja kokeen onnistumisen arviointi.....	74
4.6	Vesihöyrynläpäisevyys.....	76
4.6.1	Standardi SFS-EN ISO 12572.....	77
4.6.2	Reunavirhekorjaus.....	79
4.6.3	Koekappaleiden valmistus.....	80
4.6.4	Mittaukset.....	83
4.6.5	Laskenta.....	87
4.6.6	Virhelähteet ja kokeen onnistumisen arviointi.....	90
4.7	Veden imeytyminen.....	93
4.7.1	Standardi SFS-EN ISO 15148.....	93
4.7.2	Koelaitteisto.....	94
4.7.3	Koekappaleiden valmistus.....	95
4.7.4	Mittaukset.....	96
4.7.5	Laskenta.....	97

4.7.6 Virhelähteet ja kokeen onnistumisen arviointi.....	108
5. TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	110
5.1 Ilmanläpäisevyys.....	110
5.2 Lämmönjohtavuus.....	111
5.3 Hygroskooppinen tasapainokosteus	113
5.4 Vesihöyrynläpäisevyys	116
5.5 Veden imeytymiskerroin	117
6. YHTEENVETO.....	120
LÄHTEET	124
LIITE A1: LÄMMÖNJOHTAVUUSKOKEET, KOESARJA 1.....	127
LIITE A2: LÄMMÖNJOHTAVUUSKOKEET, KOESARJA 2.....	128
LIITE B1: TASAPAINOKOSTEUSKOE, TULOKSET	129
LIITE C1: VESIHÖYRYNLÄPÄISYKOKEET TULOKSET	130
LIITE D1: VEDEN IMEYTYMISKERROIN, KOEKAPPALEET	133
LIITE D2: VEDENIMUKOE $A_{W,24}$ JA W_{CAP}	134

LYHENTEET JA MERKINNÄT

A	pinta-ala	m ²
A _w	veden imeytymiskerroin (kapillareettikerroin)	kg/(m ² s ^{0,5})
A _{w,24}	veden imeytymiskerroin 24 tunnin aikana	kg/(m ² s ^{0,5})
B _w	veden tunkeutumiskerroin	m/s ^{0,5}
δ _v	vesihöyrynläpäisevyys (vesihöyrynpitoisuuserolla laskettuna)	m ² /s
δ _p	vesihöyrynläpäisevyys (vesihöyryn osapaine-erolla laskettuna)	kg/(msPa)
δ _a	ilman vesihöyrynläpäisevyys	kg/(msPa)
μ	vesihöyryn diffuusiovastuskerroin	
φ	ilman suhteellinen kosteus	% RH
d	halkaisija, paksuus	m
g	kosteusvirran tiheys	kg/(m ² s)
h	korkeus	m
λ	lämmönjohtavuus	
k _a	ilmanläpäisevyys	m ³ /(msPa)
m	massa	kg
m _{φ,n}	massa tietyssä suhteellisessa kosteudessa n	kg
p	paine	Pa
p _v	vesihöyryn paine	Pa
r	säde	m
s _d	suhteellinen diffuusiovastus	m
t	aika	h
T	lämpötila	K
u	kosteuspitoisuus (suhteessa aineen kuivamassaan)	kg/kg
w	kosteuspitoisuus (suhteessa tilavuuteen)	kg/m ³
V	tilavuus	m ³
W _v	vesihöyrynläpäisykerroin (vesihöyrypitoisuuksien avulla)	m/s
W _p	vesihöyrynläpäisykerroin (vesihöyryn osapaine-eron avulla lask.)	kg/(m ² sPa)
Z _v	vesihöyrynvastus (vesihöyrypitoisuuksien avulla)	m ² sPa/kg
Z _p	vesihöyrynvastus (vesihöyryn osapaine-eron avulla lask.)	s/m

KÄSITTEET

Diffuusio	Diffuusio on kaasumolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksessa olevia yksittäisen kaasun pitoisuuseroja (tai osapaine-eroja). Diffuusiossa kaasumolekyylit siirtyvät korkeammasta pitoisuudesta pienempään.
Diffuusiovastus	Materiaalin suhteellinen diffuusiovastus s_d kuvaa rakenteen läpi tapahtuvaa diffuusion nopeutta rakenteen paksuuden suhteen. Yksikkönä käytetään [m].
Diffuusiovastuskerroin	Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin μ ilmoittaa ilman vesihöyrynläpäisevyyden ja aineen vesihöyrynläpäisevyyden suhteen.
Hygroskooppisuus	Hygroskooppisuus tarkoittaa aineen kykyä sitoa itseensä kosteutta ilmasta ja luovuttaa sitä takaisin ilmaan.
Hygroskooppinen tasapainokosteus	Hygroskooppinen tasapainokosteus tarkoittaa sitä kosteuspitoisuutta, joka sitoutuu ilmasta huokoiseen aineeseen ympäristön tietyssä suhteellisessa kosteudessa stationääritilassa.
Ilmanläpäisevyys	Ilmanläpäisevyydellä k_a tarkoitetaan materiaalin läpi kulkevaa ilman tilavuusvirtaa, joka jatkuvuustilassa laminaarisena virtauksena läpäisee kohtisuorasti pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen läpi, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen paine-ero on yksikön suuruinen.

Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus	Huokoisen materiaalin suurin mahdollinen kosteuspitoisuus joka on saavutettavissa ilman ulkoisen paineen vaikutusta.
Veden imeytymiskerroin (Kapillariteettikerroin)	Materiaaliominaisuus, joka kuvaa veden imeytymisnopeutta hygroskooppisiin olosuhteisiin tasapainotetussa koekappaleessa, joka laitetaan vesikosketukseen.
Vesihöyrynläpäisevyys	Vesihöyrynläpäisevyys ilmoittaa sen vesimäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien tilojen vesihöyrynpitoisuuksien ero (tai vesihöyryn osapaine-ero) on yksikön suuruinen.
Lämmönjohtavuus	Lämmönjohtavuus ilmoittaa lämpömäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerrosten eri puolilla on yksikön suuruinen lämpötilaero.
Vesihöyrynläpäisykerroin	Vesihöyrynläpäisykerroin ilmoittaa vesimäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen rakenneosan, kun rakenneosan eri puolilla olevien tilojen vesihöyrynpitoisuuksien ero (tai vesihöyryn osapaine-ero) on yksikön suuruinen.
Vesihöyrynvastus	Vesihöyrynvastuksella tarkoitetaan vesihöyrynläpäisykerroimen käänteisarvoa.

1. JOHDANTO

Puurakentamisen ja puupohjaisten tuotteiden käyttö nostaa yhä vahvemmin päätään rakentamisessa. Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi tarvitaan tuotteita, jotka sitovat hiiltä ja menetelmiä, joiden hiilijalanjälki on pieni. Kutterinlastun ja sahanpurun tuotanto sahateollisuuden sivutuotteena on hiilijalanjäljeltään edullista. Ainoan päästön muodostavat varastointi ja kuljetus. Kutterinlastun ja sahanpurun käyttö eristeenä myös varastoi hiiltä vuosikymmeniksi rakenteisiin. Tältä osin, mikäli mahdollisimman vähällä prosessoinnilla saadaan aikaiseksi lämmöneristysvaatimukset täyttäviä rakenteita, on niiden kehittäminen kannattavaa.

Tämä diplomityö on osa ECOSAFE-hanketta jossa tutkitaan kutterinlastutuotteiden ominaisuuksia rakennekokeissa ja laskennallisin menetelmin. Diplomityön tavoitteena on määrittellä ECOSAFE-hankkeen rakennekokeissa käytettyjen kutterinlastutuotteiden materiaaliominaisuudet koerakenteissa käytetyissä tiheyksissä. Toinen tavoite on tutkia, onko eri kutterinlastutuotteiden materiaaliominaisuuksissa eroavaisuuksia. Yhtenä tutkittavana materiaalina tutkimuksessa on savetettu kutteri, jonka osalta tavoitteena on selvittää, parantaako savetus kutterinlastun materiaaliominaisuuksia eristeenä. Tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa vaaditaan rakenteilta yhä enemmän kosteudenkestävyyttä. Eristekerroksen kosteuskapasiteetti parantaa rakenteen kestävyyttä ja vikasietoisuutta. Samoin kosteuskapasiteetti vähentää vaatimuksia höyrytiiviyden osalta (Vinha, et al., 2005).

Suomessa on koko teollisen historian ajan puuteollisuuden sivutuotteena syntynyt suuria määriä sahanpurua ja kutterinlastua. Lämmöneristeenä sahanpurun ja kutterinlastun kulta-aikaa pientalorakentamisessa oli siirtymäaika hirsirunkoisen pientalon ja kaupallisten pientalovalmistajien välissä. Samoihin aikoihin oli jo kehitetty kaupalliset teollisesti valmistetut eristemateriaalit kuten lasivilla ja mineraalivilla. Voinee sanoa, että sahanpuru ja kutterinlastu jäivät elintason noustessa kaupallisten eristetuotteiden jalkoihin sillä ”ilmaisena” luonnontuotteena sillä ei ollut markkinoijaa.

Materiaalina kutterinlastu on puuta. Puu on hygroskooppinen materiaali. Se eroaa kuitenkin esimerkiksi betonista siinä että kun betonissa kosteus liikkuu ainoastaan huokosissa, puussa kosteus liikkuu paitsi solujen muodostamissa huokosissa, myös

soluonteloissa vapaana vetenä ja vesihöyryinä että soluseinämissä vesihöyryinä (Kärkkäinen 2007).

Sahanpurun ja kutterinlastun materiaaliominaisuuksia on mitattu suhteellisen vähän. Tähän on syynä edellä mainittu kaupallisten toimijoiden puute. Ei ole ollut kaupallista toimijaa, joka olisi laboratoriotutkimuksia teettänyt. Tampereen teknillisessä yliopistossa on aiemmin mitattu osana aiempia tutkimushankkeita myös kutterinlastun ja sahanpurun ominaisuuksia (Vinha 2001).

Materiaaliominaisuuksia tässä tutkimuksessa tutkitaan neljälle kutterinlastutuotteelle. Tuotteista Ehta on kuudesta valmistettu kutterinlastu, josta on hienoaines erotettu. Ehta-tuote on käytössä ECOSAFE-hankkeen yhteydessä tehtävissä yläpohjarakenteiden kokeissa, joten tässäkin tutkimuksessa kokeet on sille pääosin tehty ns. yläpohjatiheydellä. Toinen yläpohjakokeissa käytettävä kutterinlastu on nimetön ”puusepän lastu”, joka edustaa tutkimuksessa satunnaista purua, jota voi olettaa saatavan miltä tahansa höyläämöltä. Seinärakennetiheyksissä kokeet on tehty Pölkky ja tästä jatkojalostetulle savetetulle Pölkky-kutterinlastulle. Savetuksen osalta tutkimuksessa ollaan kiinnostuneita, parantaako savetus entisestään kutterinlastun kosteusominaisuuksia.

Materiaaliominaisuuksista tutkitaan ilmanläpäisevyys, tasapainokosteuskäyrät hygroskoopilla alueella adsorptiossa ja desorptiossa, lämmönjohtavuus eri tasapainokosteuksissa lämpövirtalevylaitteella, vesihöyrynläpäisevyys märkäkuppi-kokeella sekä veden imeytymiskerroin vedenimukokeella.

Luvussa 2 käydään läpi työhön liittyvää rakennusfysiikan teoriaa, ilman siirtymistä, lämpöä ja lämmön siirtymistä sekä kosteuden siirtymismuotoja. Luvussa 3 on käsitelty kutterinlastun käyttöä eristemateriaalina, kutterinlastun mekaanista rakennetta sekä puuta materiaalina. Luvussa 4. ovat tutkimusselostukset materiaalikokeista. Kustakin on tehty koeselostus, jossa käydään läpi keskeiset mitattavat ja laskettavat suureet, kokeessa noudatettava standardi, koelaitteisto, koekappaleiden valmistelu, mittaukset ja laskenta sekä tulosten analysointi. Osassa kokeita on myös kehitetty koejärjestelyjä soveltuviksi irtomateriaalille. Luvussa 5. käydään läpi tulokset, verrataan niitä teoriaosassa käsiteltyihin aiempien kokeiden tuloksiin sekä toisiinsa. Luvussa 6. eli yhteenvedossa, käsitellään tutkimuksen onnistuminen suhteessa tavoitteisiin.

2. LÄMMÖN- JA KOSTEUDENSIIRRON TEORIA

2.1 Ilma ja ilman siirtyminen huokoisessa materiaalissa

Ilma on kaasujen seos. Rakennusfysiikan kannalta kiinnostavia ovat lähinnä sen sisältämät happi, hiilidioksidi sekä erityisesti vesihöyry. Kuiva ilma ilmakehässä sisältää lähinnä typpeä (78 % tilavuudesta) ja happea (21 % tilavuudesta) sekä pienessä määrin muita aineita, mm. hiilidioksidia (0,039 %). Kokonaisilmanpaine p_a [Pa] muodostuu Daltonin osapainelain mukaisesti sen osakaasujen osapaineiden summana.

$$p_a = p_{a.dry} + p_v \quad (2.1)$$

missä $p_{a.dry}$ [Pa] on kuivan ilman osapaine ja

p_v [Pa] on vesihöyryn osapaine

Huokoisessa materiaalissa, jossa materiaalin eri puolilla on paine-ero Δp , paine-erot pyrkivät tasoittumaan ja ilma kulkeutuu materiaalin läpi. Ilman tilavuusvirta materiaalikerroksen läpi voidaan ilmaista Darcyn lain avulla kaavalla 2.2

$$R_a = A \frac{k \Delta p}{\mu_a d} \quad (2.2)$$

missä k [m²] on materiaalille ominainen läpäisevyys, permeabiliteetti,

A [m²] on ilmavirralle altis materiaalin poikittaispinta-ala,

d [m] on materiaalikerroksen paksuus ja

μ_a [Ns/ m²] on ilman dynaaminen viskositeetti

Ilman dynaaminen viskositeetti μ_a on sen kinemaattisen viskositeetin ν ja tiheyden ρ tulo

$$\mu_a = \nu \rho \quad (2.3)$$

Viskositeetti on suure joka kuvaa nesteen tai kaasun, tässä tapauksessa ilman, kykyä vastustaa liikettä. Se voidaan tulkita ilman sisäiseksi kitkaksi.

Materiaalikerroksen ilmanläpäisyvastus S_a [$Pa \cdot s/m^3$] ilmaistaan kaavalla 2.4

$$S_a = \frac{\mu_a \cdot d}{\lambda \cdot l} \quad (2.3)$$

Ilman tilavuusvirta voidaan esittää ilmanläpäisyvastuksen avulla

$$R_a = \frac{\Delta p}{S_a} \quad (2.5)$$

Ilmanläpäisyvastuksen käänteisluku on ilmanläpäisevyyskerroin k_a [$m^3/(Pa \cdot s)$], joka lasketaan tässä diplomityössä tehtävässä ilmanläpäisy-kokeessa.

2.2 Lämmönjohtavuus huokoisessa materiaalissa

Lämpö on energiaa, joka esiintyy lämpöliikkeenä tai lämpösäteilynä. Lämpöä voi siirtyä sekä ilman aineen siirtymistä (johtuminen ja säteily), että siirtyvän aineen mukana (diffuusio, kapillaarisuus, konvektio). Johtumisessa molekyylien liike-energiaa siirtyy molekyylistä toiseen. Lämpötila-erot pyrkivät tasoittumaan. Lämpövirta voidaan merkitä Fourierin lain mukaisesti

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.4)$$

missä q [W/m^2] on lämpövirran tiheys.

λ [$W/(m \cdot ^\circ C)$] tai [$W/(m \cdot K)$] on materiaalin lämmönjohtavuus ja

∇T on lämpötilagradientti kuhunkin lämpövirran suuntaan.

Lämpötilagradientti on suure, joka kuvaa lämpötilan asteittaista muutosta kahden eri lämpötilassa olevan pisteen välillä. Yleisessä muodossa lämpötilagradientti on kolmiulotteinen vektorisuure, mutta tarkasteltaessa materiaalikerrosta, ollaan

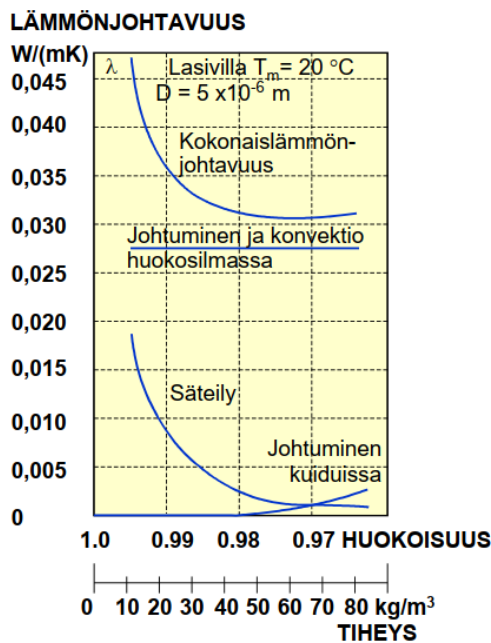
kiinnostuneita lämpötilagradientista materiaalikerroksen läpi ja yksinkertaistetaan lämpötilagradientti yksiulotteiseen muotoon

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}, 0, 0\right) = \left(\frac{\Delta T}{d}\right) \quad (2.5)$$

missä ΔT on lämpötilaero materiaalikerroksen eri puolilla x-suunnassa ja

d on materiaalikerroksen paksuus.

Mitattaessa lämmönjohtavuutta mitataan lämpövirtaa. Tällöin mitatussa kokonaislämmönjohtavuuden arvossa ovat mukana kaikki lämmönsiirtymisen muodot, johtuminen kiinteän materiaalin kautta, johtuminen ilman kautta, konvektio materiaalissa sekä lämpösäteily. Kuvassa 2.1 on esitetty eri siirtymismuotojen osuus lasivillassa eri tiheyksillä (Vinha, 2011).



Kuva 2.1 Kokonaislämmönjohtuminen lasivillassa (D =kuidun läpimitta). (Vinha, 2011).

Huokoisessa lasivillassa yli 50 kg/m^3 tiheyksillä merkittävin osuus lämmön siirtymisestä tapahtuu johtumalla kuiduissa sekä johtumalla ja konvektiolla huokosilmassa. Säteilyn merkitys on pieni. Vaikka kuva 2.1 käsittelee lasivillaa, saman voi olettaa ainakin jossain määrin pätevän myös puumateriaalille. Konvektion vaikutus kasvaa a) lämpötilaeron kasvaessa b) materiaalikerroksen paksuuden kasvaessa ja c) materiaalin ilmanläpäisevyyden kasvaessa (Shankar & Hagentoft, 2000).

Rakennusfysiikassa mitattaessa lämmönjohtavuutta ei ole suurta merkitystä, mistä siirtymisen muodosta on kyse, koska samat siirtymismuodot pätevät rakenteessakin. Mutta todellisuudessa materiaalille jossa tapahtuu konvektiota, mittaaminen eri paksuiselle koekappaleelle voi muuttaa tulosta. Toisaalta konvektio aiheuttaa kosteuden tiivistymistä, kondenssia kylmässä pinnassa kokeen aikana, mikä nostaa materiaalin lämmönjohtavuutta ja vääristää tulosta. Tällä virheellä on merkitystä mikäli tiivistymistä tapahtuu enemmän kuin materiaalin normaalissa käyttötarkoituksessa. Konvektion vaikutus tulisi huomioida niin kutterinlastulla kuin muillakin lämmöneristeillä, mutta sen vaikutusta on vaikea arvioida materiaalikoikkeessa, missä materiaalikerrokset ei vastaa todellista rakennetta.

2.3 Kosteus ja kosteuden siirtyminen

Kosteudella tarkoitetaan veden tai vesihöyryn määrää toisessa aineessa. Vesi voi olla joko aineeseen sitoutuneena (absorptio), aineen tai aineen huokosten pinnalle sitoutuneena (adsorptio), huokosilmatilassa tai aineen pinnalla. Vesi on kahden vetyatomien ja yhden happiatomin muodostama kemiallinen yhdiste. Vettä esiintyy kolmessa olomuodossa: nestemäisenä vetenä, kiinteässä muodossa jäänä sekä kaasuna eli vesihöyrynä.

Vesimolekyyli muodostuu kahdesta vetyatomista ja yhdestä happiatomista. Jokaisella vetyatomilla on positiivisesti varautunut protoni keskellä, eli ydin, ja tämän ympärillä negatiivisesti varautunut elektroni. Happiatomilla on kahdeksan protonia ytimessä ja kahdeksan elektronia ytimen ympärillä. Hapen elektroneista kaksi sitoutuu vetyjen elektronien kanssa ja muodostuu $H-O-H$, jossa vetyatomit muodostavat $104,45$ asteen kulman keskenään. Hapella on tämän jälkeen vielä neljä vapaata elektronia elektronipilvessä. (Jyväskylän Yliopisto, 2013)

Sitoutuminen vetyjen kanssa aiheuttaa vesimolekyylissä pienen varausjakauman. ”Vetypäät” saavat positiivisen varauksen ja hapelle jää negatiivinen varaus. Vesimolekyylistä tulee taittunut ja varauksellinen, eli polaarinen. Nämä taittuneet vesimolekyylit voivat sitoutua toisiinsa vetysidoksen avulla. Vedessä vetysidoksen vastaanottajana ja luovuttajana on happi. Vesimolekyyli pystyy muodostamaan happiatominsa avulla neljä vetysidosta. Näin tapahtuu kun vesi on jäässä. Huoneenlämmössä ja tavanomaisessa ilmanpaineessa vesi muodostaa muiden vesimolekyylien kanssa keskimäärin 3,4 vetysidosta. (Jyväskylän Yliopisto, 2013)

Vesi on hyvä liuotin. Ioniset ja polaariset aineet liukenevat veteen hyvin. Veteen liukenevia aineita kutsutaan hydrofiilisiksi, kun taas vettä hylkiviä aineita hydrofobisiksi.

2.3.1 Kosteus ilmassa

Ilmankosteus kuvaa vesihöyryn määrää ilmassa. Veden haihtuessa ilmaan, vesimolekyylien määrä kasvaa, jolloin vesihöyrypitoisuus ja vesihöyryn osapaine kasvavat. Vesimolekyylien määrän kasvaessa, ne ovat myös lähempänä toisiaan. Vesimolekyylit muodostavat sidoksia toistensa kanssa ja tietyssä vaiheessa toisiinsa sitoutuneet vesimolekyylit muodostavat vesipisaroita. Tällöin tapahtuu vesihöyryn kondensoitumista eli tiivistymistä. Vaihetta, jossa kondensoituminen alkaa kutsutaan vesihöyryn kyllästyspitoisuudeksi v_{sat} tai kyllästysosapaineeksi $p_{v,sat}$. Kyllästysosapaineelle on määritelty kokeellisia kaavoja, mutta yleisesti käytetään myös valmiiksi taulukoituja arvoja.

Kun tunnetaan vesihöyryn osapaine p_v [Pa] ja lämpötila T [K], voidaan sen ja ideaalikaasun tilanyhtälön avulla määritellä vesihöyrypitoisuus v [kg/m³].

$$v = \frac{M_w p_v}{RT} \quad (2.6)$$

missä M_w on veden moolimassa, 0,01802 kg/mol

R on yleinen kaasuvakio, 8,3143 J/(mol·K)

Vesihöyrypitoisuus ilmaisee vesihöyryn määrän tietyssä tilavuudessa toista ainetta. Se kuvaa siis vesihöyryn määrää, eikä muutu lämpötilan tai ilmanpaineen mukaan.

Suhteellinen kosteus φ [% RH] on todellisen vesihöyrypitoisuuden ja vesihöyryn kyllästyspitoisuuden tai toisaalta vesihöyryn osapaineen ja vesihöyryn kyllästysosapaineen välinen suhde tietyssä lämpötilassa.

$$\varphi = \left(\frac{v}{v_{sat}} \right) \cdot 100\% = \left(\frac{p_v}{p_{v,sat}} \right) \cdot 100\% \quad (2.7)$$

Puhtaasta vesipinnasta haihtuu vettä, kunnes ympärillä olevassa ilmassa vallitsee vesihöyryn kyllästyspitoisuus ja siis lähes 100 % RH suhteellinen kosteus. Käytännössä

kosteuden tiivistymistä alkaa tapahtua kuitenkin jo noin 98 % RH ilman suhteellisessa kosteudessa. Samalla ilmatilan kanssa kosketuksissa oleviin pintoihin tiivistyy vettä. Vesihöyryn kyllästyspitoisuudessa pintaan tiivistyvien ja siitä haihtuvien vesimolekyylien määrä on sama eli nettovirta ilman ja pinnan välillä on nolla.

Mikäli vedessä on liuenneena toista ainetta, esimerkiksi suolaa, tämä toinen aine sitoo osan vesimolekyyleistä. Ylikylläisessä suolavesiliuoksessa osa suolasta on jäänyt ilman vesimolekyyliä. Tällöin suolamolekyylit pyrkivät sitomaan ilmatilasta vesimolekyylejä, jolloin ilmatilan kosteuspitoisuus asettuu tietylle tasolle. Tähän ilmiöön perustuu ilmankosteuden säätäminen kylläisellä suolaliuoksella. Osa vesimolekyyleistä sitoutuu suolaan ja suola kiteytyy.

2.3.2 Kosteus aineessa

Huokoisessa aineessa kosteus on joko vapaana vetenä tai sitoutuneena. Vesi voi aineessa olla sitoutuneena fysikaalisesti tai kemiallisesti. Kemiallisesti sitoutuneen veden poistamiseksi vaaditaan yleensä hyvin korkea lämpötila. Aineita, joissa vesi on sitoutunut kemiallisesti, kutsutaan hydraateiksi. Kemiallisesti sitoutunut vesi on materiaalin kiinteä osa, eikä sitä ole tarpeen erikseen mitata rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa. Päinvastoin, kuivatettaessa materiaalia uunissa on pyrittävä siihen, että kemiallisesti sitoutunut vesi ei lähde pois. Tällöin materiaaliominaisuudet muuttuisivat siitä miten materiaali käyttäytyy rakenteessa.

Fysikaalisesti sitoutunut vesi on se jota pidetään materiaalin kosteuspitoisuutena. Se ei ole osa materiaalia ja höyrystyy tavanomaisessa uunikuivauksessa 105 °C lämpötilassa. Fysikaalisesti vesi voi sitoutua adsorboitumalla huokosseinämiin, kapillaari-imuvoimien vaikutuksesta, huokosilmaan vesihöyrynä tai osmoottisesti (Vinha, 2011). Materiaalin kosteuspitoisuus u voidaan ilmaista massojen suhteena kaavalla 2.10

$$u = \frac{m_w}{m_0} \quad (2.8)$$

missä m_w [kg] on sitoutuneen kosteuden määrä ja

m_0 [kg] on materiaalin kuivamassa

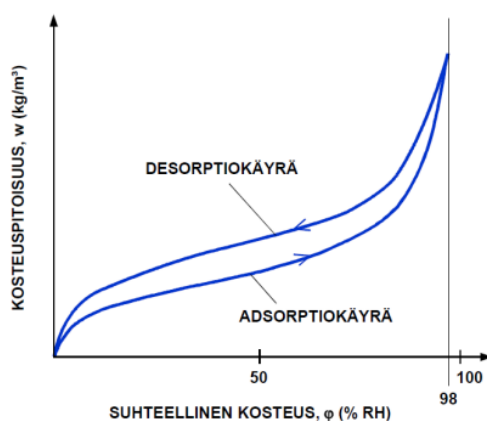
Vesimäärä m_w saadaan erotuksena $m - m_0$, missä m on punnittu massa mitattavassa olosuhteessa. Vesimäärä w [kg/m^3] voidaan myös ilmaista tilavuutta V kohden kaavalla 2.11

$$w = \frac{m_w}{V_0} \quad (2.9)$$

Yleisesti lähtötilavuus V_0 on materiaalin tilavuus kuivana. Materiaalikoikeissa kuitenkin lähtötilavuutena käytetään tilavuutta tietyssä määritellyssä kosteudessa ennen koetta. Tässä diplomityössä kosteusmäärä suhteessa tilavuuteen on ilmoitettu suhteessa 50 % RH tasapainotetun materiaalin tilavuuteen, ellei olosuhdetta ole erikseen mainittu. On myös huomattava, että tilavuus tässä tarkoittaa irtotilavuutta eli materiaalin tilavuutta ainevälit ja aineen sisäiset huokokset mukaan luettuna. Vastaavasti tiheys tarkoittaa tässä diplomityössä irtotiheyttä, materiaalin tiheyttä aineen välit mukaan luettuna.

2.3.3 Tasapainokosteus ja hystereesi

Huokoisen materiaalin kosteuspitoisuus riippuu ympäristön suhteellisesta kosteudesta. Kun ympäristön olosuhteet (suhteellinen kosteus, lämpötila ja ilmanpaine) ovat vakioita, tasapainottuu materiaali tiettyyn materiaalille ominaiseen tasapainokosteuteen $w(\varphi)$ [kg/m^3]. Tasapainokosteuspitoisuuksista (joko kg/kg tai kg/m^3) voidaan piirtää suhteellisen kosteuden funktiona tasapainokosteuskäyrä (kuva 2.2).



Kuva 2.2 Esimerkki tasapainokosteuskäyristä ((Vinha, 2011).

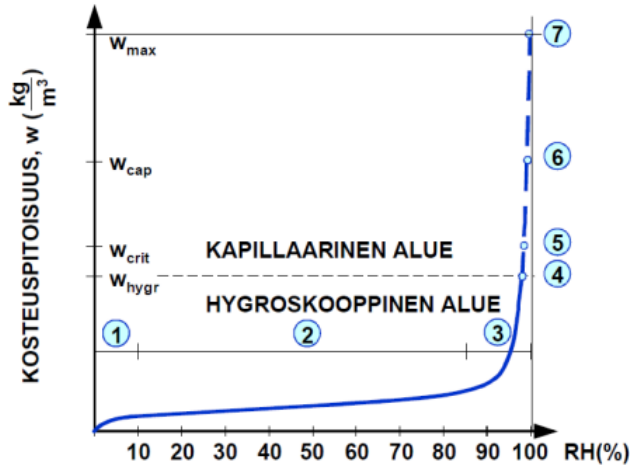
Mitatun massan ja kuivamassan suhteen avulla ilmaistuna tasapainokosteuskäyrä on hyödyllinen homogeeniselle materiaalille, jonka huokosrakenne pysyy samanlaisena eri tiheyksissä. Irtomateriaalilla tai joustavalla materiaalilla, jonka huokosrakenne ”painuu

kasaan” materiaalia tiivistettäessä tasapainokosteus muuttuu tilavuuden ja siten tiheyden muuttuessa, koska huokosten koko pienenee ja huokosvälit kapenevat tiheämmässä materiaalissa. Tällöin on täsmällisempää määrittellä tasapainokosteuskäyrä tilavuuden suhteen [kg/m^3].

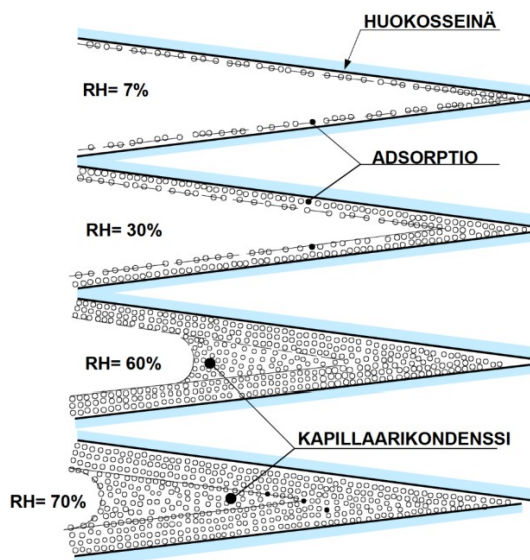
Adsorptiossa voidaan erottaa kolme vaihetta. Nämä on esitetty kuvissa 2.3 ja 2.4. Monomolekylaarisessa adsorptiossa (1) kosteus sitoutuu materiaalin huokosiin yhden molekyylin paksuisena kerroksena Van der Waalsin voimien vaikutuksesta. Vetovoima vesimolekyylin ja materiaalin pinnan molekyylien välillä on suurempi kuin vesimolekyylien välisissä vetysidoksissa. Alhaisessa suhteellisessa kosteudessa vapaata pintaa vesimolekyyille on paljon, ja materiaalin kosteuspitoisuus nousee nopeammin. Vesimolekyylit levittäytyvät materiaalin pinnalle, kunnes pinta on täynnä vesimolekyylijä.

Seuraavassa vaiheessa, polymolekylaarisessa adsorptiossa (2) molekyylikerros kasvaa usean vesimolekyylin paksuiseksi kerrokseksi huokosilman vesimolekyylien muodostaessa vetysidoksia pinnassa kiinni olevien vesimolekyylien kanssa. Tässä vaiheessa kosteusmäärä nousee yleensä tasaisemmin ja hitaammin suhteellisen kosteuden noustessa.

Vähitellen huokostila täyttyy adsorptiovedestä ja vesimolekyylit alkavat tiivistyä huokosilman saavuttaessa vesihöyryn kyllästyspitoisuuden ja vesimolekyylien alkaessa tiivistyä vedeksi. Tätä kutsutaan kapillaarikondenssiksi (3). Ilmatäytteisten huokosten verkosto katkeaa ja kosteus voi siirtyä pienissä huokosissa kapillaarisesti, mutta kapillaariverkosto ei ole vielä yhtenäinen. Tässä vaiheessa tasapainokosteus kasvaa jyrkemmin suhteellisen kosteuden noustessa ja yhä useammat huokokset täyttyvät vedellä.



Kuva 2.3 tasapainokosteuskäyrä, kosteuden sitoutumisen vaiheet (Vinha, 2011).



Kuva 2.4 Huokosten täytyminen vesimolekyyleillä (Vinha, 2011).

Adsorptiolla kokonaisuudessaan sitoutuvan kosteuden määrä riippuu materiaalin huokosten pinta-alasta ja huokostilavuudesta. Hygroskooppisen kosteuden sitoutumisen ylärajana pidetään yleisesti huokosilman suhteellista kosteutta 98 % RH. Tasapainokosteuden mittaamenetelmässä tämä on suurin ympäristön ilman suhteellinen kosteus joka voidaan luoda (Vinha, 2011). Maksimikosteuspitoisuutta hygroskooppisella alueella merkitään w_{hygr} [kg/m³].

Kun materiaalin huokostilassa on yhtenäinen vedellä täyttynyt kapillaarihuokosten verkosto, kosteus kulkeutuu materiaalissa pääosin kapillaarisesti vetenä. Tätä kosteuspitoisuutta merkitään w_{crit} [kg/m³]. Kapillaarisesti imeytyvän kosteuden

ylärajana pidetään kapillaarista kyllästyskosteuspitoisuutta w_{cap} , joka on maksimimäärä kosteutta, jonka materiaali sitoo kapillaarisesti normaaleissa olosuhteissa. Tässä diplomityössä vedenimukokeen yhteydessä mitattiin likimääräisesti kapillaarista kyllästyskosteuspitoisuutta matalassa vesiupotuksessa. Tätä on käsitelty vedenimukokeen yhteydessä kappaleessa 4.7 tarkemmin.

Materiaalin huokoisuus ψ [m^3/m^3 tai -] tarkoittaa huokosten osuutta koko materiaalin tilavuudesta. Kyllästyskosteuspitoisuus w_{sat} [kg/m^3] tarkoittaa kosteuspitoisuutta missä materiaalin koko huokostila on vedellä täyttynyt ja huokokset sisältävät pelkästään vettä. Kyllästyskosteuspitoisuus on tällöin

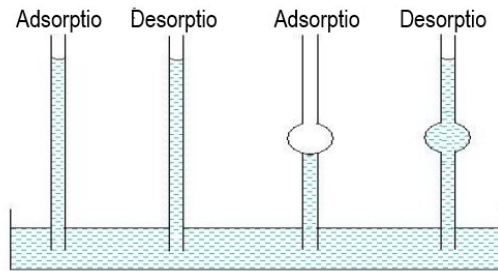
$$w_{sat} = \rho_w \psi \quad (2.10)$$

missä ρ_w on veden tiheys (noin $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$)

Käytännössä kyllästyskosteuspitoisuutta on vaikea saavuttaa, sillä normaaleissa olosuhteissa materiaalin jää aina huokosia, joihin jää ilmaa. Vesiupotuksessa pitäminen ei riitä täyttämään koko huokostilaa. Kyllästyskosteuspitoisuutta voidaan mitata tyhjentämällä huokostila ilmasta voimakkaassa alipaineessa (tyhjiöpumpulla) ja tämän jälkeen johtamalla materiaaliin vettä, jolloin alipaineistetut huokokset täyttyvät vedellä. Muita kapillaarisen alueen kosteuspitoisuuksia voidaan mitata painelevykoelaitteistolla tyhjentämällä vakuumikyllästetystä materiaalista vettä ylipaineen avulla. Tämän diplomityön yhteydessä ei määritetty kapillaarisen alueen kosteuspitoisuuksia materiaaleille.

Tasapainokosteuskäyrä on erilainen riippuen siitä onko materiaali ollut aiemmin korkeammassa suhteellisessa kosteudessa, eli materiaali kuivuu ja on desorptiossa, vai matalammassa suhteellisessa kosteudessa, jolloin materiaali kostuu ja on adsorptiossa. Materiaalilla on eri tasapainokosteus adsorptiossa ja desorptiossa. Tätä hystereesiksi kutsuttua ilmiötä ei täysin tunneta, mutta yleisesti sitä selitetään mustepulloilmiöllä (kuva 2.5). Yksinkertaistetussa tapauksessa, jos ajatellaan huokosta tasaisena putkena, kapillaaristen voimien, eli veden sisäisen koheesion ja veden ja huokosen pinnan välisen adheesion, aiheuttama kapillaarinen jännitys on koko matkalla saman suuruinen. Tällöin materiaalin kosteuspitoisuus tietyssä tilanteessa on sama riippumatta siitä onko kosteuden määrä sen jälkeen vähenemässä tai lisääntymässä. Materiaalin kohdalla näin ei ole.

Huokoskoko ja reitit huokosten välillä vaihtelevat. Materiaalin kosteuspitoisuuden kasvaessa kosteuden jakautumista huokosissa määrittää leveimmät kohdat huokosverkostossa, kun taas materiaalin kuivuessa kosteusjakauman määrittelee huokosten kapeimmat kohdat, joissa kapillaariset voimat vaikuttavat eniten. Syntyy molekyylien ”suma” ja kosteus jää jumiin isompiin huokosiin yhtenäisen kapillaariverkoston katketessa.



Kuva 2.5 Mustepulloilmiö.

2.3.4 Diffuusio

Diffuusio on kaasumolekyylien liikettä, jonka seurauksena kaasuseoksessa oleva kaasupitoisuus ja osapaine-ero pyrkivät tasoittumaan. Kaasupitoisuudet (osapaine-erot) pyrkivät tasaantumaan myös materiaalin läpi. Kosteus siirtyy vesihöyrypitoisuuseron (osapaine-eron) vaikutuksesta alemman pitoisuuden suuntaan (Vinha, 2011).

Diffuusio materiaalikerroksen läpi voidaan kuvata Fickin ensimmäisestä laista johdetulla kaavalla, joka on analoginen edellä esitetyn lämmönjohtumisen kaavan kanssa.

Yleisessä vektorimuodossa kosteusvirran tiheys \mathbf{g} [kg/(m²s)] voidaan esittää kaavalla 2.13

$$\mathbf{g} = -\delta_v \nabla v = -\left(\delta_v \frac{\partial v}{\partial x}, \delta_v \frac{\partial v}{\partial y}, \delta_v \frac{\partial v}{\partial z}\right) \quad (2.11)$$

missä δ_v [m²/s] on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys.

Vastaavasti kosteusvirran tiheys voidaan osapaineiden avulla ilmaista

$$\mathbf{g} = -\delta_p \nabla p_v = -\left(\delta_p \frac{\partial p_v}{\partial x}, \delta_p \frac{\partial p_v}{\partial y}, \delta_p \frac{\partial p_v}{\partial z}\right) \quad (2.12)$$

Yksiulotteisessa tapauksessa, tarkasteltaessa kosteusvirran tiheyttä materiaalikerroksen läpi voidaan kosteusvirran tiheys laskea kaavoilla.

$$g = \delta_v \frac{\Delta v}{d} \quad \text{tai} \quad g = \delta_p \frac{\Delta p_v}{d} \quad (2.13)$$

missä d on materiaalikerroksen paksuus.

Vesihöyrynläpäisevyys voidaan ilmoittaa vesihöyrypitoisuuksien avulla δ_v [kg/m^3] tai vesihöyryn osapaine-eron avulla δ_p [$\text{kg}/(\text{msPa})$]. Näiden välillä on yhteys, jonka avulla vesihöyrynläpäisevyys voidaan muuntaa yksiköstä toiseen.

$$\delta_v = \frac{R(237,15 + T)}{M_w} \delta_p \quad (2.14)$$

missä R on yleinen kaasuvakio ja M_w on veden moolimassa.

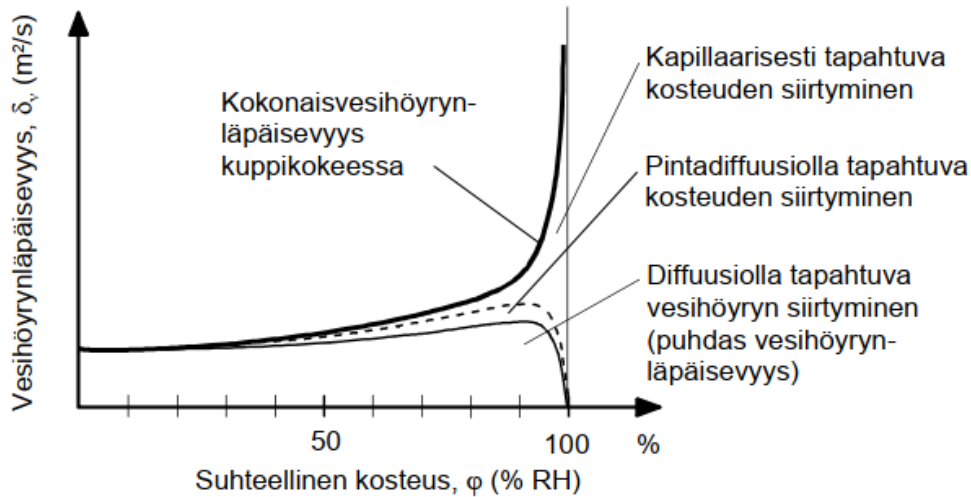
Materiaalin diffuusionvastuskerroin μ kuvaa ilman vesihöyrynläpäisevyyden δ_a ja materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden δ_p suhdetta.

$$\mu = \frac{\delta_p}{\delta_a} \quad (2.15)$$

Materiaalin suhteellinen diffuusionvastus s_d [m] kuvaa sitä, kuinka suuren ilmakerroksen vesihöyrynvastus olisi yhtä suuri kuin materiaalikerroksella d

$$s_d = \mu d \quad (2.16)$$

Materiaalin vesihöyrynläpäisevyys ei ole vakio, vaan riippuu lämpötilasta ja huokosilmassa vallitsevasta suhteellisesta kosteudesta. Todellisuudessa kosteusvirran tiheyden kasvu materiaalin läpi johtuu kuitenkin lähinnä pintadiffuusiosta ja kapillaarivirtauksesta (kuva 2.6). Kaasudiffuusiolla siirtyvän vesihöyryn määrä on sen sijaan hygroskooppisella alueella melko vakio. (Vinha, 2011)



Kuva 2.6 Diffuusion, pintadiffuusion ja kapillaarisen kosteudensiirtymisen osuudet vesihöyrynläpäisevyydestä eri suhteellisissa kosteuksissa (Vinha, 2011).

2.3.5 Pintadiffuusio

Kun materiaalin huokosseinämiin on kertynyt riittävän paksu kerros vesimolekyylejä, niiden keskinäiset sidokset heikkenevät ja ne alkavat irrota takaisin huokosilmaan. Tätä kutsutaan pintadiffuusioksi. Irrottuaan vesimolekyylit kulkeutuvat diffuusion vaikutuksesta ja kiinnittyvät uudelleen kohtaan missä sidosvoimat ovat voimakkaampia, eli missä on pienempi kosteuspitoisuus ja ohuempi molekyylikerros. Huokosilman saavuttaessa kyllästyskosteuden, tapahtuu myös aiemmin mainittua kapillaarikondenssia. Vesimolekyylit kulkeutuvat pintaa pitkin samaan suuntaan kuin kapillaarivirtaus, ja kummankin kosteuspotentiaalina voidaan käyttää materiaalin kosteuspitoisuutta tai suhteellista kosteutta. Tämän vuoksi niiden määrittäminen erikseen on hankalaa, ja niitä käsitellään yhdessä. (Vinha, 2011)

2.3.6 Kapillaarisuus

Tarkastellaan jälleen yksinkertaistettua tapausta, ja oletetaan huokonen ohueksi kapillaariputkeksi. Kun vesi nousee pystysuorassa putkessa koheesion ja adheesion vaikutuksesta, vesimolekyylien ja pinnan molekyylien välinen vetovoima on suurempi kuin vesimolekyylien keskinäiset voimat. Tämä aiheuttaa nestepinnan kaareutumisen ylöspäin seinämiä vasten. Tätä kaareutuvaa vesipintaa kutsutaan meniskukseksi. Tästä aiheutuu paine-ero vedenpinnan ja huokosilman välille. Ilmiötä kutsutaan kapillaarimuksi ja syntynyttä paine-eroa huokosalipaineeksi s [Pa]. (Hagentoft, 2001). Huokosalipaine voidaan esittää kaavalla (2.19)

$$s = \frac{2\sigma}{r} \cos(\theta) \quad (2.17)$$

missä r on putken säde ja

θ on meniskuksen ja putken seinämän välinen kulma

Normaalisti rakennusmateriaaleille tämä kulma θ on lähellä nollaa. Pintajännityksen σ arvo on 0,073 N/m lämpötilan ollessa 20 °C. Kapillaari-imu nostaa vedenpintaa putkessa korkeudelle h , missä imu ja painovoima ovat yhtä suuret. Jos asetetaan $\theta = 0$, saadaan

$$hg\rho_w = s = \frac{2\sigma}{r} \quad (2.18)$$

ja edelleen

$$h = \frac{2\sigma}{gr\rho_w} \quad (2.19)$$

missä h [m] on kapillaarinen nousukorkeus putkessa

g on putoamiskiihtyvyys 9,81 m/s²

ρ_w on veden tiheys (1000 kg/m³)

Kapillaarinen nousukorkeus putken muotoisessa huokosessa riippuu siis teoriassa vain huokosputken säteestä. Yksinkertaistetussa tapauksessa kun materiaali on kontaktissa vesipintaan, kapillaarinen kosteusvirta g_{cap} voidaan laskea kaavalla 2.22

$$g_{cap} = \frac{A_w}{2\sqrt{t}} \quad (2.20)$$

missä A_w [kg/(m²s^{0.5})] on materiaalille ominainen vedenimukerroin tai kapillariteettikerroin.

Veden tunkeutumissyvyys materiaalissa voidaan laskea kaavalla 2.23

$$x_p = B_w \sqrt{t} \quad (2.21)$$

missä B_w [$\text{m/s}^{0.5}$] on materiaalille ominainen veden tunkeutumiskerroin.

Jos tunnetaan materiaalin veden imeytymiskerroin, veden tunkeutumiskerroin sekä materiaalipaksuus, voidaan kapillaarinen kosteusvirta laskea kaavalla 2.24

$$g_{cap} = \frac{A_w \cdot B_w}{2d} \quad (2.22)$$

Yleisessä muodossa kapillaarisen kosteusvirran tiheys voidaan kirjoittaa Darcyn lain avulla

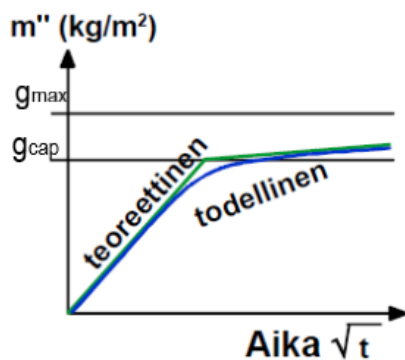
$$g_{cap} = -\rho_w \frac{k}{\eta_w} \frac{\partial p}{\partial x} = -k_w \frac{\partial s}{\partial x} \quad (2.23)$$

missä k [m^2] on materiaalin permeabiliteetti

η_w [Ns/m^2] on veden dynaaminen viskositeetti

k_w [$\text{kg}/(\text{msPa})$] on kosteudenjohtavuus

Kapillaarisella materiaalilla ideaalisessa tapauksessa veden imeytyminen tapahtuu lineaarisesti kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen g_{cap} asti (kuva 2.7). Veden imeytymiskerroin A_w on tällöin lineaarisen osan kulmakerroin.



Kuva 2.7 Veden imeytyminen kapillaarisesti ja kyllästyskosteuspitoisuus.

Koska kapillaarivirtaus pyrkii täyttämään ensimmäisenä kaikkein pienimmät huokokset, kosteus siirtyy yleensä siihen materiaaliin, jonka huokokset ovat ohuempia. Näin ollen

kosteus voi siirtyä myös kuivemmasta suuria huokosia sisältävästä materiaalista kostempaan pieniä huokosia sisältävään materiaaliin (Vinha, 2011).

2.3.7 Konvektio

Kosteus siirtyy myös ilmavirtauksen mukana konvektiolla. Materiaalin sisäinen konvektio voi olla merkittävä kosteudensiirron muoto erityisesti avohuokoisissa eristemateriaaleissa. Aiemmin sivuttiin konvektion vaikutusta materiaalikerroksissa luvussa 2.2. Konvektiolla on erityisesti merkitystä rakenteita tutkittaessa, mutta se sivuutetaan nyt vain maininnalla tässä diplomityössä. Kosteuden siirtymistä konvektiolla käsitellään lämmönjohtavuuskokeen yhteydessä.

3. KUTTERINLASTU MATERIAALINA

3.1 Kutterinlastueristeiden käyttö rakentamisessa

Suomessa on koko teollisen historian ajan puuteollisuuden sivutuotteena syntynyt suuria määriä sahanpurua ja kutterinlastua. Suurin osa siitä on mäntyä ja kuusta. Jo sotia edeltävänä aikana 1920-1930- luvuilla tunnettiin lautarunkoinen talo. Aina 1940-luvulle saakka pientalot rakennettiin kuitenkin pääosin hirsirunkoisina. Puuta oli runsaasti saatavilla ja talot rakennettiin lähiympäristöstä kaadetuista puista. Lautojen kuljetuttaminen sahattavaksi ja takaisin työmaalle olisi ollut työläämpää ja kalliimpaa kuin rakentaa talo hirsistä. Hirsirakentaminen edellyttää vaatimattomankin pirtin osalta käsityötaitoja ja maaseudulla useimmiten talot veisti lähiseudulla vaikuttava kirvesmies. Kaupungeissa 1920- ja 1930- luvuilla tyypillisiä puutaloja olivat kiertävien kirvesmiesporukoiden rakentamat koristeellisin yksityiskohdin varustetut ns. nikkaritalot. Toki jo 1920- ja 30 – lukujen rakentajain kalentereista löytyy sahanpurueristetty lautavuorattu viiden tuuman paksuinen seinärakenne (Rakentajain kalenteri, 1924), mutta vielä tuolloin sahanpuru oli enemmänkin väli- ja yläpohjien eriste.

Lautarunkoisten purueristeisten pientalojen rakentaminen kasvoi merkittävämmiin sotien aikana ja jälkeen, jolloin mm. Tampereella rakennettiin ensimmäiset lautarakenteiset pienkerrostalot. Rakentajainkalenterissa vuodelta 1943 löytyy jo lämmönjohtavuus myös kutterinlastulle ja sahajauholle. Syynä tähän oli pula sekä materiaalista että tekijöistä. Sodan jälkeen tarvittiin nopeasti korvaavia rakennuksia tuhoutuneiden tilalle. Asutettavana oli suuri määrä ihmisiä. Kasvanut tarve uusille taloille tarkoitti, että rakentamiseen tuli keksiä uusia ratkaisuja, jotka eivät edellyttäneet niin korkeaa käsityötaitoa, kuin hirsirakentaminen oli edellyttänyt.

3.1.1 Rintamamiestalo

Purueristeinen lautarunkoinen rintamamiestalo oli rakennettavissa hartiapankkiperiaatteella myös maallikolta. Näissä taloissa vaihteli runsaasti myös käytännöt, mitä laitettiin eristemateriaaliksi. Eristeiksi kelpasivat tarpeen vaatiessa vaikkapa vanhat lumput. Varsinainen suunnitelmissa tarkoitettu eristemateriaali oli sahanpurun ja kutterinlastun sekoitus. Tyypitalot, kuten rintamamiestalot, oli

suunniteltu siten, että rakennuksen runko koostui yleisimmin ”kakkosnelosesta” eli 2x4 tuuman runkotolpista. Nämä pyrittiin sijoittamaan k500 koolausvälillä, mutta välit käytännössä vaihtelevat riippuen rakentajan huolellisuudesta. Runkotolppien ulkopintaan lyötiin paksu paperi. Sen päälle tuli vinolaudoitus, yleensä 23mm laudasta, joka lyötiin runkotolppiin n. 45 asteen kulmassa. Vinolaudoituksen ja yleensä suoraan vinolaudoituksessa kiinni olevan ulkoverhouksen väliin laitettiin tervapaperi. Runkotolppien sisäpuolelle tuli myös paperi, usein tässä on käytetty niin kutsuttua oksapahvia. Sisäpuolen laudoitus lyötiin runkotolppiin vaakasuorassa. Tällä menettelyllä oli rakennuksen jäykistyksen lisäksi oma merkityksensä myös rakenteen eristävyuden kannalta. Lautakerrosten ollessa ristikkäin, ei syntynyt niin helposti mahdollista seinän mittaista rakoja, josta ilma olisi päässyt suoraan virtaamaan. Paperien väli sullottiin täyteen purua. Ohje oli sulloa puru tiiviiksi, jolloin vähennettiin purun painumista ajan myötä. Seinien yläpäätt jätettiin sivuvinteillä myös auki, jotta myöhemmin voitiin tarvittaessa lisätä purua. Kun sisäseinät vielä pinnoitettiin pinkopahvilla, rakenteessa oli käytännössä neljä paksua paperikerrosta. Sisimpänä pinkopahvi, vaakalaudoituksen ja rungon välissä oksapahvi, jälleen rungon ja ulkovinolaudoituksen välissä paksu paperi tai oksapahvi ja vinolaudoituksen ja ulkoverhouksen välissä tervapaperi. (Eskola, et al., 1957).

1950-luvun rintamamiestalojen tyypipiirustuksissa on usein ollut betonista tehty kellari ja betoniholvi. Holvin päällä on ollut 5x20 cm palkkirakenne, jonka päällä poikittain 5x10 cm vasat. Samanlainen rakenne on ollut välipohjassa. Palkkien pohja on laudoitettu ja alle levitetty paperi tai sanomalehtiä, jonka päälle on välit sullottu täyteen purua, jolloin ala- ja välipohjien eristepaksuudeksi on tullut n. 30 cm. Huolellisesti toteutettuna tällainen rakenne on ollut ilmaa pitävä ja hyvin kosteutta tasaava. Ongelmia on tullut lähinnä siitä johtuen, että rakentamisen aikaan on ollut lähes kaikesta pula. Tällöin on nipistetty myös purutäyttöjen huolellisesta sullomisesta tai täyttämistä. Esimerkiksi portaikkojen kohdalla on voitu jättää ulkoseinästä purutäyttö vähemmälle, kun on ajateltu, että portaikko voi olla puolilämmintä tilaa (Eskola, et al., 1957).

3.1.2 Ohjeita eristeen rakeisuudesta ja tiheydestä

Vuoden 1956 rakentajainkalenterista (Rakentajain kalenteri, 1956) löytyy tarkat ohjeet purueristeen rakenteen valmistukseen. Seinätäyte neuvotaan sullomaan matalina kerroksina, jotta vältetään purun laskeutuminen, joka johtuu siitä, että alaosa purutilasta

jää liian löyhäksi. Ohjeissa kiinnitetään myös huomiota siihen, että erityisesti lattiarakenteisiin sullottava purueriste on oltava kuivaa (kosteus alle 18 painoprosenttia). Seiniin on neuvottu voitavan laittaa myös kosteampaa purua (kosteus alle 20...30 painoprosenttia). Oletettavasti tämä ohje perustuu paitsi purun painumisen välttämiseen, myös siihen ettei tapahdu homehtumista. Seinärakenteessa purun katsottiin pääsevän paremmin kuivumaan lämpövirran vaikutuksesta kuin lattian alla. Ohjeissa kehoitetaan kiinnittämään huomiota myös rakennusaikaisen kosteuden (valu- ja rappaustyöt) välttämiseen purun asennuksen jälkeen.

Jälleenrakentamisen vuosina tunnettiin kyllä hyvin sahanpurun ja kutterinlastun ominaisuudet ja tiedettiin että näiden sekoite on ominaisuuksiltaan parempaa kuin esimerkiksi pelkkä sahanpuru. Kutterinlastu lisäsi eristeeseen ilmavuutta ja rakennetta. Sahanpuru seassa taas pienirakeisempana vähensi suoraa ilmavirtausta eristekerroksen läpi. Olennainen ero oli myös se, että kutterinlastu saatiin jo kuivatusta puusta, kun taas sahanpuru saattoi olla suoraan tuoreesta puusta sahattua. Pelkkä sahanpuru olisi helposti ollut liian kosteaa ja alkanut umpinaisessa rakenteessa lahota. Yleinen nyrkkisääntö oli sekoittaa sahanpurua ja kutterinlastua 1:1 suhteessa (Rakentajain kalenteri, 1956).

Samaan aikaan kuitenkin rakentamistarve oli suuri ja pula materiaaleista ja kuljetuskapasiteetista. Materiaaleina hyödynnettiin sitä mitä oli läheltä saatavissa ja paikkakunnalla sattui saamaan. Osassa taloja käytetty eristemateriaali on ollut pelkkää sahanpurua. Aikakauden ohjeissa mainitaan puruna käytettävän halkaisusahanpurua, joka on saatu havupuutavaran halkaisusahauksessa, eli siis käytännössä raamisahassa tai sirkkelissä tuotettua.

3.1.3 Nykypäivänä

1960-luvulla ja sen jälkeen kutterinlastu jäi pois rakentamisesta kaupallisten eristetuotteiden lasi- ja kivivillan korvatesa sen, mutta erityisesti viimeisten kymmenen vuoden aikana se on nostanut uudelleen päätään perinnerakentamisessa vaihtoehtona selluvillalle.

Pientalojen lisäeristäminen tapahtui aina 2000-luvulle asti pääosin lasivillalla ja usein sisäpuolelta eristäen. Tämä on aiheuttanut paikalleen jätetyissä purueristeissä kosteuden lisääntymistä ja vaurioitumista. Sen myötä kutterinlastun maine eristeenä huononi entisestään. Kutterinlastu katsottiin korjausrakentamisessa pitkään poistettavaksi ja

paremmiksi mainostetuilla eristemateriaalilla korvattavaksi sille ilmoitetun huonon lämmönjohtavuusarvon vuoksi ja koska virheellisesti korjatuissa rakenteissa kutterinlastu pääsi kostumaan ja homehtumaan. Vanhojen pientalojen korjausrakentamisessa luonnonmukaisten materiaalien ja hengittävien rakenteiden paluu tapahtui ensin kierrätetystä paperista valmistetun selluvillan muodossa.

Nykyään erityisesti viimeisen kymmenen vuoden aikana kutterinlastu ja puukuitueristeet ovat herättäneet enemmän kiinnostusta. Kutterinlastua on alettu käyttää sellaisessa korjausrakentamisessa, jossa aiempi rakenne on toteutettu kutterinlastulla selluvillan sijaan vanhan eristeen lisänä tai korvaajana. Puukuitueristeillä ja kutterinlastujen etuna pidetään parempaa kosteuskapasiteettia ja hiilijalanjälkeä, joka kompensoi huonompaa eristävyyttä. Kutterinlastustakin on saatavilla kaupallista eristetarkoitukseen tuotteistettuja kutterinlastua ja uusia kutterinlastutuotteita kehitetään. Esimerkiksi Saksassa on kehitetty savetettuja kutterinlastutuotteita, jolla pyritään parantamaan kutterinlastun kosteusominaisuuksia (Holz Lehmhaus GmbH, 2022). Myös Suomessa on kehitetty tuotteita saven ja kutterinlastun seoksesta, joita tutkitaan osana ECOSAFE-projektia.

3.2 Kutterinlastun mekaaninen rakenne

Nykyaikainen kutterinlastu on höyläkoneen tai oiko-/tasohöylän lastua. Höylättäessä puutavaran kosteus voi olla enintään 15-18 %, käyttötarkoituksesta riippuen jopa alle 10 %, joten kutterinlastu on jo valmistettaessa tarpeeksi kuivaa käytettäväksi eristeenä.

1950-luvulla kutterinlastu haettiin läheiseltä höyläämöltä tai puusepän verstaalta. Se oli lähtöisin usein kaksikutterisesta höylästä, jossa teräpää oli höyläyspöydän levyinen tela, telan halkaisija suurempi sekä kierrosnopeudet nykyistä alhaisempia. Tällainen höylä teki isompaa lastua kuin nykyiset höyläkoneet. Usein vanhojen talojen kutterinlastu onkin merkittävästi isolastuisempaa kuin nykyinen kutterinlastu. Kuvassa 3.1 on vierekkäin 1950-luvun kutterinlastueristettä ja uutta Pölkky-kutterinlastua.



Kuva 3.1 1950-luvun kutterinlastua ja Pölkky-kutterinlastua vierekkäin.

Kutteri on konehöylän lastuava terä. Terien määrä, teräpään halkaisija sekä kierrosnopeus ja materiaalin syöttönopeus määrittävät pitkälti höylänlastun muodon, sen paksuuden ja pituuden. Nykyaikaisessa höyläkoneessa on useita, yleisesti 4-8 samanaikaisesti pyörivää teräpäätä (kuva 3.2). Kierrosnopeudet ovat suurempia ja lastukoko pyritään työstöenergian ja työstölaadun vuoksi pitämään optimaalisena. Höyläkone työstää yhdellä kertaa puutavarakappaleen kaikki sivut, mahdolliset pontit sekä halutun poikkileikkausmuodon (Siikanen, 2008).

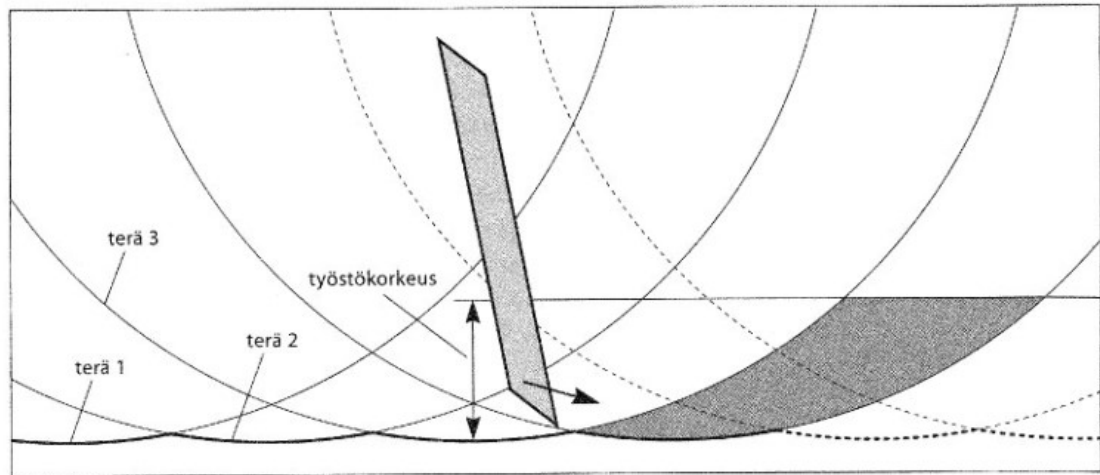


Kuva 3.2 höyläkoneen teräpäitä (Weinig).

3.2.1 Lastun muoto

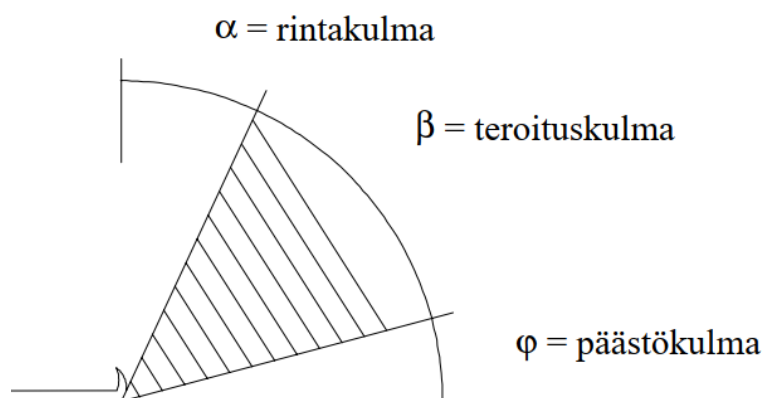
Höyläyksessä työstö muodostuu työstöliikkeestä ja syöttöliikkeestä. Työstöliike on terän liike, joka irrottaa lastun. Syöttöliike syöttää kappaletta terään uuden lastun irrottamiseksi. Lastun perusmuoto riippuu terän liikeradasta ja syöttönopeudesta, joka määrää kuinka paksu lastu on irrotettava. Lastun poikkipinta-ala riippuu vain leikkauksen korkeudesta ja syötöstä. Leikkauksen korkeus tarkoittaa höyläyksessä poistettavan kerroksen paksuutta.

Kun terä pyörii akselinsa ympäri ja syöttöliike on suoraviivainen, muodostaa terän liikerata evolventtikäyrän (kuva 3.3). Kun terä irroittaa lastun puun pinnasta, lastun paksuus kasvaa nolasta ylöspäin ja työstöjälki on aaltomainen.



Kuva 3.3 evolventtikäyrä ja lastun muoto. (Hemmilä, et al., 2001).

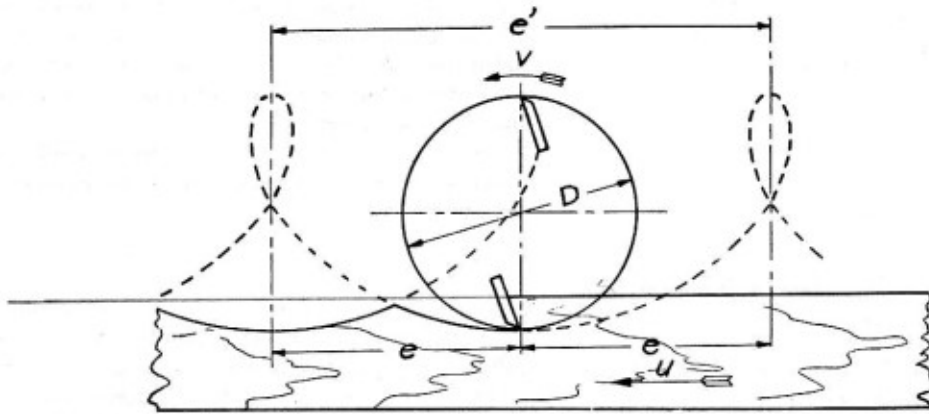
Syiden suuntaan höylättäessä teränsuu tunkeutuu puunsyiden väliin irroittaen kuidut toisistaan. Höyläyksessä tietysti vältetään kuitujen repeytymistä. Sileämpi työstöjälki muodostuu kun rintakulma (kuva 3.4) on pieni ja leikkausvoima suuri, tai kun käytetään lastunmurtajaa. Lastunmurtajan tai lastunleikkaajan ja terän välinen etäisyys vaikuttaa siihen kuinka paljon lastu kaareutuu ennen lastun murtumista. Tähän vaikuttaa myös se kuinka kuivaa höylättävä puu on, kuten myös puulaji.



Kuva 3.4 Rintakulma, teroituskulma ja päästökulma (Hemmilä, et al., 2001).

3.2.2 Lastun pituus

Myös lastunpituuteen vaikuttaa kulma, kita-aukko ja lastunmurtaja, mutta käytännössä kuitenkin konehöylän tuottaman lastunpituus määräytyy aaltovälin (kuva 3.5) perusteella.



Kuva 3.5 aallonpituus e . (Hemmilä, et al., 2001).

Teräpään tuottama aaltoväli (aallonpituus) e [m], ja siten myös kutterinlastun pituus, voidaan laskea kaavan 3.1 mukaisesti (Hemmilä, et al., 2001).

$$e = \frac{u}{n \times z} \quad (3.1)$$

missä u [m/min] on syöttönopeus,

n [1/min] on teräpään (kutteripään) kierrosnopeus ja

z on terien määrä teräpäässä.

Lastunpituus lyhenee kierrosnopeuden ja terien määrän kasvaessa ja pitenenee vastaavasti syöttönopeuden kasvaessa. Höyläyksessä pyritään lyhentämään aaltoväliä, koska tämä parantaa työstön jälkeä.

Kuvassa 3.6 on esitetty terävalmistajan Weinigin ohjeesta lastunpituus millimetreinä yleisesti käytössä olevilla höyläkoneiden syöttönopeuksilla ja terämäärillä. Lastunpituudeksi tulee 2-6 mm (Weinig, 2021).

V = 800										6,67	4,76	4,17
V = 600								6,25	5,56	5	3,57	3,13
V = 400						5,56	4,76	4,17	3,7	3,33	2,38	2,08
V = 280					4,67	3,89	3,33	2,92	2,59	2,33	1,67	1,46
V = 200				4,17	3,33	2,78	2,38	2,08	1,85	1,67	1,19	1,04
V = 180		5	3,75	3	2,5	2,14	1,88	1,67	1,5	1,07		
V = 160		4,44	3,33	2,67	2,22	1,9	1,67	1,48	1,33			
V = 140		3,89	2,92	2,33	1,94	1,67	1,46	1,3	1,17			
V = 120	5	3,33	2,5	2	1,67	1,43	1,25	1,11				
V = 100	4,17	2,78	2,08	1,67	1,39	1,19	1,04					
V = 80	3,33	2,22	1,67	1,33	1,1							
V = 60	5	2,50	1,67	1,25	1							
V = 40	3,33	1,67	1,11									
V = 20	1,67											
Z =	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	28	32

Kuva 3.6 Aaltoväli (lastunpituus mm) eri terämäärille (z) ja syöttönopeuksilla (V) [m/min] terän kierrosnopeudella 6000 1/min (Weinig, 2021).

3.2.3 Lastun paksuus

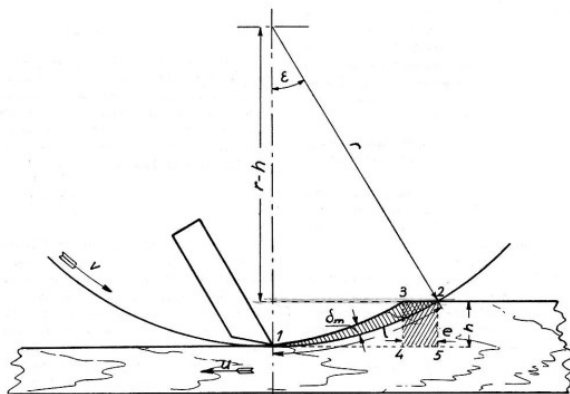
Lastun paksuus s (kuva 3.7) määräytyy kaavalla 3.2. (Hemmilä, et al., 2001)

$$s = e \sqrt{\frac{h}{D}} \quad (3.2)$$

missä h on työstökorkeus (työstösyvyys) ja

D on teräpään halkaisija.

Keskimääräinen lastunpaksuus em. aaltovälillä on näin ollen noin 0,5 mm.



Kuva 3.7 Lastun paksuus. (Hemmilä, et al., 2001).

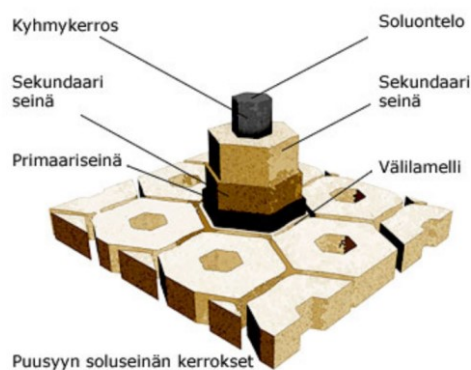
Kutterinlastu, kuten myös höylätty pinta, on ehjää. Puu on joustava materiaali. Puu painuu kasaan leikkuusärmän edessä, kunnes paine kasvaa niin suureksi, että puun kuidut leikkuusuunnasta riippuen katkeavat tai repeytyvät irti toisistaan. Kuidut itsessään eivät käytännössä halkea silloinkaan, kun leikkaava särmä on syysuuntainen, vaan kimppu kuituja irtoaa ehjänä. (Virolainen, et al., 2002)

Suurin osa teollisesti tuotetusta kutterinlastusta muodostuu höyläsahatavaran taso- ja oikohöyläyksestä. Piensahoilla ja puusepänverstailla käytettävissä höylissä, kuten myös listakursoissa lastun muoto saattaa vaihdella suurestikin. Teollisessa sahatuotannossa käytettävät höyläkoneet, ja siten teräpäät ja käytetyt kierrosnopeudet eivät suuresti eroa toisistaan. Näin ollen voinee olettaa, että myös sahoilla syntyvä kutterinlastu on pitkälti tasalaatuista ja rakenteeltaan samanlaista.

3.3 Puun solurakenne

Solutasolla kutterinlastu käyttäytyy kuin puu. Puun solujen rakenne on hyvin pitkälti kaikilla puulajeilla samanlainen. Eroavaisuutta on erityisesti havu- ja lehtipuiden solujen välillä. Tässä työssä keskitytään havupuiden, männyn ja kuusen solurakenteeseen.

Soluseinät koostuvat sekundääriseinästä ja primääriseinästä. Elävän nuoren puusolun primääriseinämen puutuessa, seinämä paksunee sisäänpäin ja muodostuu sekundääriseinästä. Soluseinämen pääaines on selluloosaa (40–50 % soluseinästä). Hemiselluloosa (20–25 % soluseinästä) on soluseinän täyteaine, joka vahvistaa seinän rakennetta. Samalla soluseinämiin muodostuu ligniiniä (20–30 %). Ligniini täyttää soluseinämen välit, liimaa kuidut toisiinsa ja saa seinän puutumaan. Solujen välinen välilamelli koostuu myös pääosin ligniinistä.



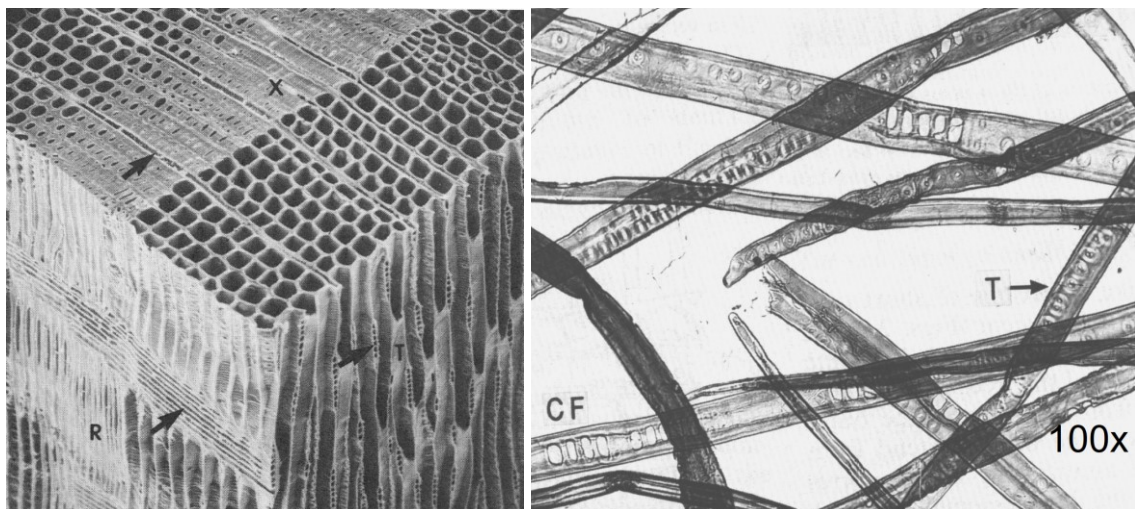
Kuva 3.8 Puusyn soluseinän kerrokset (Pro Puu-keskus, 2021).

Selluloosa on ketjumainen molekyyli koostuen glukoosimolekyylien muodostamista polysakkarideista. Selluloosa ja hemiselluloosa ovat hydrofiilisiä ja muodostavat veden kanssa vetysidoksia, kun taas ligniini on hydrofobista.

3.3.1 Trakeidit

Solu erikoistuu kasvaen rungon suuntaiseksi putkimaiseksi vettä kuljettaviksi trakeidiksi, jotka puutuessaan kuolevat tai ydinsäteiden vettä ja uuteaineita varastoiviksi pitkään elossa pysyviksi typpysoluiksi. Havupuilla suurin osa 93 % soluista on trakeideja (vesisoluja, putkisoluja). Ne hoitavat veden kuljetuksen puussa ja niillä on suurin vaikutus puun mekaanisiin ominaisuuksiin ja lujuuteen. Ydinsädemuodostumat ovat kaikilla puulajeilla kohtisuorassa rungon pituusakselin suuntaan nähden. Kuusella ja männyllä on rungon tilavuudesta ydinsäteitä noin 6 %. (Kärkkäinen).

Kuvassa 3.9a on männyn puusolukkoa. Trakeidit näkyvät poikkileikkauksessa säteen suuntaisina jonoina. Kuvasta näkyy suuriontelaisen ja ohutseinämäisen kesäpuun ja pieniontelaisen paksuseinämäisen kevätpuun (x) ero. Kuvassa näkyvät myös ydinsädemuodostumat R. Kuvassa 3.9b näkyy männyn trakeideja ja soluhuokosia T ja ikkunahuokosia CF. 100x



Kuva 3.9 a) Männyn puusolukko ja b) Männyn trakeideja 100 kertaisena suurennoksena (Sundqvist & Jääskeläinen, 2007).

Kehän laajentumisen vuoksi trakeidijonojen lukumäärä kasvaa ytimestä pintaan päin. Kevät- ja kesäpuun trakeidien läpimitta on tangentin suunnassa suunnilleen sama, mutta säteen suunnassa kevätpuun trakeidien läpimitta on huomattavasti suurempi. Kuusella trakeidien läpimitta vaihtelee enemmän kuin männyllä (taulukko 3.1).

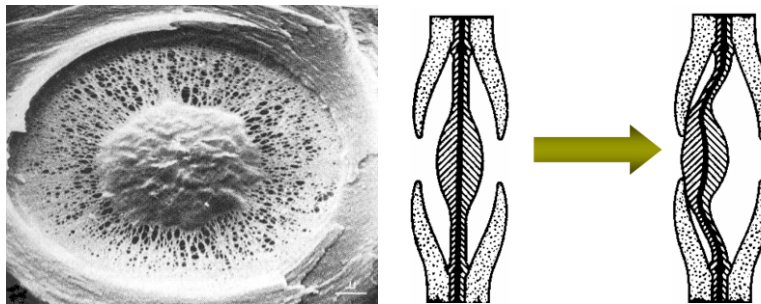
Taulukko 3.1. Trakeidien läpimitta (Kärkkäinen).

Puulaji	Trakeidien läpimitta [μm]			
	Tangentiaalinen		Säteen suuntainen	
	Kevätpuu	Kesäpuu	Kevätpuu	Kesäpuu
Mänty	25,3	23,5	30,2	20,8
Kuusi	32,7	32,1	39,3	13,1

Myös trakeidien pituus vaihtelee välillä 1,5-6mm. Nuofrella puulla, ja siis puun ytimestä trakeidien pituus on noin 1,5 mm, mutta 80 mm etäisyydellä ytimestä (noin 24 vuotiaalla puulla) yli 3 mm. (Kärkkäinen, 2007)

3.3.2 Ikkunahuokokset

Trakeidien päissä on huokosia, joiden kautta puussa vesi siirtyy solusta toiseen. Huokonen koostuu vettä läpäisemättömästä paksunnoksesta, läpistä (torus), sitä ympäröivästä vettä läpäisevästä margosta sekä solupihasta (porus). Havupuilla trakeidien väliset huokokset ovat kaksipihaisia huokosia (kuva 3.9b) jotka sulkeutuessaan ja avautuessaan kontrolloivat veden pääsyä trakeidista toiseen. Havupuun tyyppisolujen huokokset ovat pihattomia, jolloin vesi pääsee niissä kulkemaan vapaasti (Sundqvist & Jääskeläinen, 2007).



Kuva 3.10 a) Huokonen, keskellä torus, jonka ympärillä margo, jonka läpi vesi virtaa solusta toiseen. b) kaksipihainen torus, joka sulkeutuessaan painuu solupihan (poruksen) seinämää vasten (Sundqvist & Jääskeläinen, 2007).

Kuusella ja männyllä on se ero, että kuusella nämä soluseinämien huokosten läpät eli torukset jäävät puun kuivuessa kauttaaltaan kiinniasentoon ja männyllä pintapuussa aukiasentoon. Tämän seurauksena kuusi reagoi kosteudenvaihteluihin hitaammin kuin mänty ja kuusen kyllästäminen on vaikeampaa. Kyllästysaine tunkeutuu vain pintaan. Kuusi myös kestää kosteissa olosuhteissa mäntyä paremmin. Tämän voi havaita siinä, että kuusen oksat säilyvät maastossa jopa vuosikymmeniä hakkuun jälkeen. Männyn

sydänpuussa trakeidien huokoset sulkeutuvat ja typpysolujen kuollessa huokoset tukkeutuvat pihkalla. Männyllä on selkeä ero kosteuden kestävyudessa sydänpuun ja pintapuun välillä.

3.4 Kosteus puussa

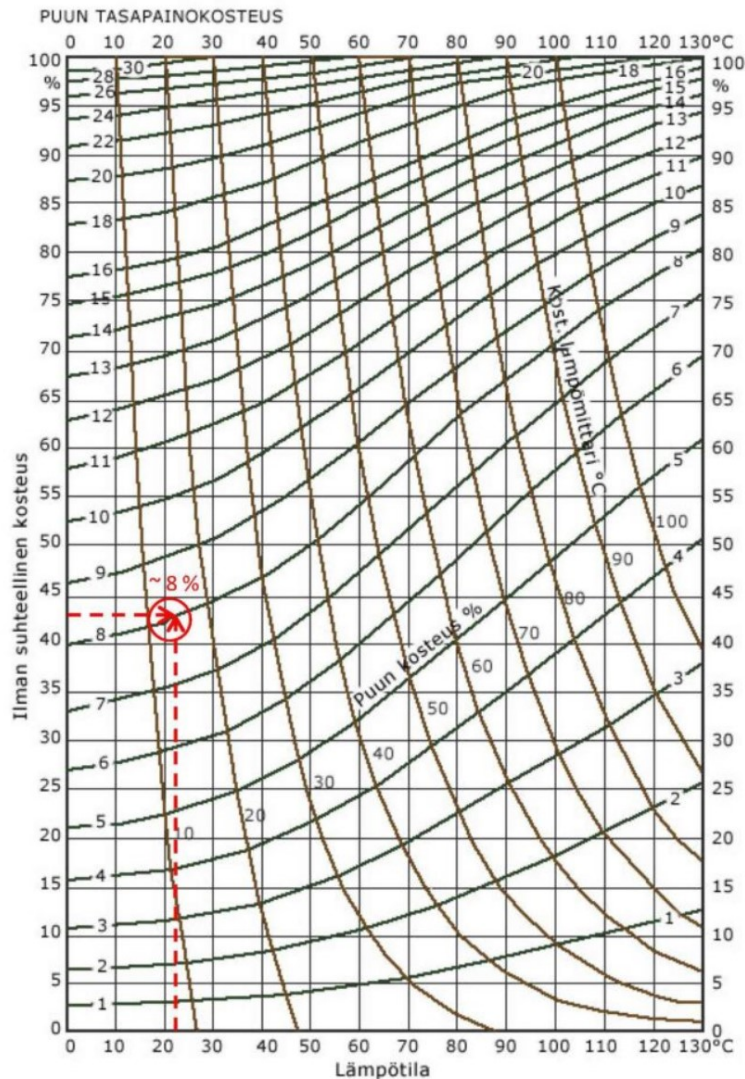
Puuaines on hygroskooppista. Käyttökuivassa puutavarassa vesi on joko soluonteloissa olevaa vapaata vettä tai soluonteloissa ja seinämissä olevaa vesihöyryä. Alhaisissa lämpötiloissa vesi voi olla jäänä soluonteloissa tai soluväleissä, mutta ei juuri soluseinämässä (Kärkkäinen 2007).

Kyllästyskosteuspitoisuudella eli kyllästymispisteellä (taulukko 3.2) tarkoitetaan sitä maksimaalista kosteussuhdetta, jonka puuaines voi saavuttaa vesihöyrystä jossakin lämpötilassa suhteellisen kosteuden ollessa 100 % RH (Kärkkäinen 2007, Browning 1963). Puun kyllästymispiste on eri puulajeilla lähes sama noin 30 %.

Taulukko 3.2. Puun syiden kyllästymispiste (%) eri puulajeilla ja lämpötiloissa (Kärkkäinen 2007).

Puulaji	Lämpötila °C		
	20	40	65
Mänty, pintapuu	29,1	23,9	17,7
Mänty, sydänpuu	27,1	22,1	15,2
Kuusi	29,3	23,7	17,6
Koivu	30,6	23,5	17,0

Puun kosteus muuttuu ilmankosteuden ja lämpötilan mukaan (kuva 3.11). Esimerkiksi huoneolosuhteissa 40-45 % RH kosteudessa ja 20-23 °C lämpötilassa puun tasapainokosteus on noin 8-9 paino-%. Puun kosteuspitoisuus kasvaa ilman suhteellisen kosteuden noustessa ja 95-100 % RH suhteellisessa kosteudessa puu saavuttaa kyllästyskosteuspitoisuutensa.



Kuva 3.11 Puun kosteuspitoisuus ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan funktiona.

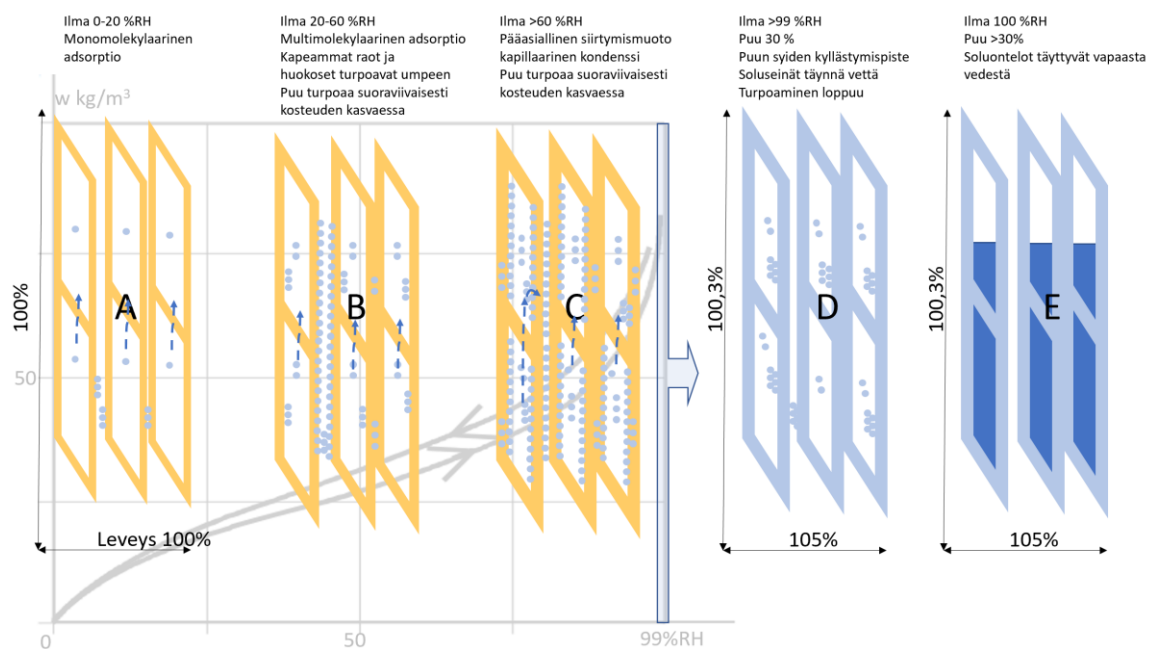
3.4.1 Puun hygroσκοoppinen tasapainokosteuskäyrä

Kuvassa 3.12 on kuvattuna puun hygroσκοoppinen tasapainokosteuskäyrä ja veden pääasiallinen sitoutumismuoto eri ilman suhteellisissa kosteuksissa. Puun tasapainokosteuskäyrä nousee jyrkemmin ilman suhteellisen kosteuden ollessa välillä 0 - 20 % RH (A). Kuivissa olosuhteissa puun ollessa kutistunut, siinä on enemmän kapeita kapillaarihuokosia. Puussa on paljon pintoja, jotka pystyvät adsorboimaan yhden molekyylikerroksen paksuisen vesimäärän (monomolekulaarinen adsorptio).

Tämän jälkeen muutosnopeus tasaantuu (B). Kapeat huokokset ovat täynnä ja multimolekulaarisessa adsorptiossa suuremmat huokokset täyttyvät. Puun syiden turvotessa, kapeammat halkeamat ja huokokset solujen välissä sulkeutuvat. Tämä tapahtuu ilman suhteellisen kosteuden ollessa välillä 20-60 % RH.

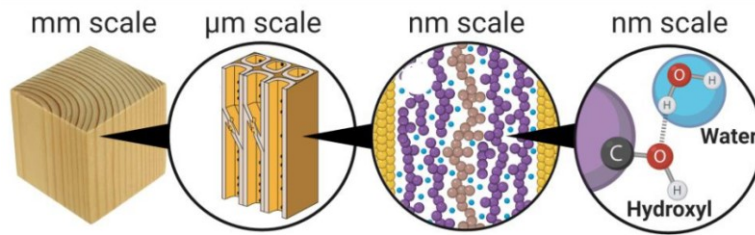
Kosteuden ylittäessä 60 % RH, pääasiallinen veden sitoutumisen muoto on kapillaarinen kondensaatio (C). Kun puussa on läpimitaltaan eri kokoisia huokosia, kuvaaja saa sille tyypillisen muotonsa, jolloin vähäinen ilman suhteellinen kosteuden lisääntyminen aiheuttaa huomattavan lisäyksen puuaineen tasapainokosteudessa (Kärkkäinen 2007).

Puun syiden kyllästymispisteessä 30 paino-% kosteuspitoisuudessa (D) puun soluonteloissa ei ole vielä vapaata vettä, mutta soluseinämät sisältävät enimmäismäärän vettä. Kyllästymispisteen jälkeen tilavuuden muutos hidastuu huomattavasti. Vesi ei sitoudu enää soluseinämiin vaan soluontelot täyttyvät vedellä (E).



Kuva 3.12 Kosteuden sitoutumismuodot eri kosteuksissa ja puun turpoaminen kyllästykosteuspitoisuuteensa asti.

Puun ollessa kuivaa, myös sen soluseinämiästä on vähentynyt vettä. Täysin uunikuivatussakin puussa on vettä, sillä kemiallisesti selluloosaan sitoutunutta vettä ei normaalissa uunikuivauksessa saa poistettua (Kärkkäinen, 2007). Kun puu kostuu, vesi muodostaa sidoksia puun soluseinämiä selluloosan ja hemiselluloosan kanssa ja puu turpoaa (kuva 3.13) (Fredriksson, et al., 2021). Mänty ja kuusipuu turpoaa puun kosteuspitoisuuden kasvaessa 10-30 paino-% vuosirenkään suunnassa 5–6 %, säteen suunnassa 2–3 % ja puun pituuden suunnassa vain 0,2–0,3 %, Kuivuessaan puu kutistuu vastaavassa suhteessa (Kärkkäinen, 2007).



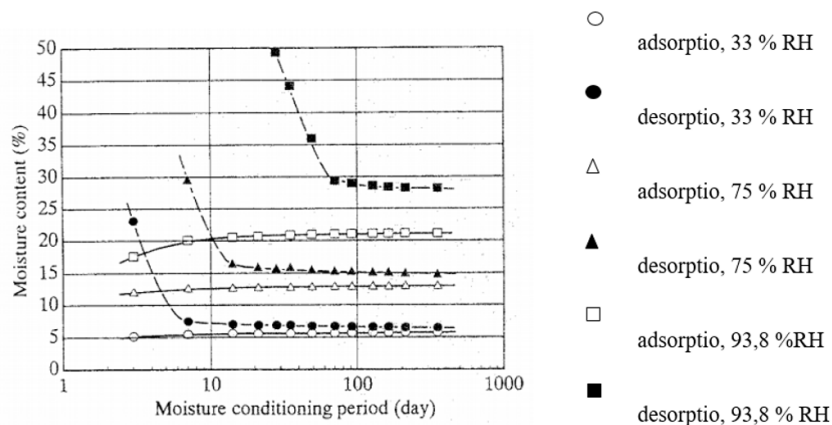
Kuva 3.13 a) Vesi muodostaa kemiallisia sidoksia selluloosan ja hemiselluloosan kanssa.

3.4.2 Hystereesi

Hystereesi, eli adsorptio- ja desorptiokäyrien ero puulla on suuri. Klassinen selitys puun hystereesille on ollut 1920-luvulta alkaen, että puun kuivussa se on ollut aiemmin kosteammassa ja puun huokostila (ja soluontelot) ovat suurentuneita. Vastaavasti puun kostuessa vesimolekyyleille on vähemmän sitoutumispintaa. (Ishimaru, 2001). Puun kuivussa, kun soluontelot jäävät vielä tyhjiksi ei puuainees aluksi kutistu, ennen kuin soluseinämistä poistuu vettä. Puuhun jää huokostilaa, mistä vesi ei poistu desorptiossa.

Puun hygroskooppiselle tasapainokosteuskäyrälle on saatu tuloksia, joissa käyrä on yläpäästään avoin Mikäli tämä ei johdu mittausvirheistä, merkitsee se sitä, että syiden kyllästymispiste on erilainen riippuen siitä, onko puu kastumassa vai kuivumassa (Kärkkäinen 2007, Spalt 1958, Wangaard ja Granados 1967). Tasapainokosteuskäyrän määrittäminen lähellä kyllästyspistettä sisältää kuitenkin paljon epävarmuutta pientenkin olosuhdevaihteluiden vaikuttaessa tulokseen.

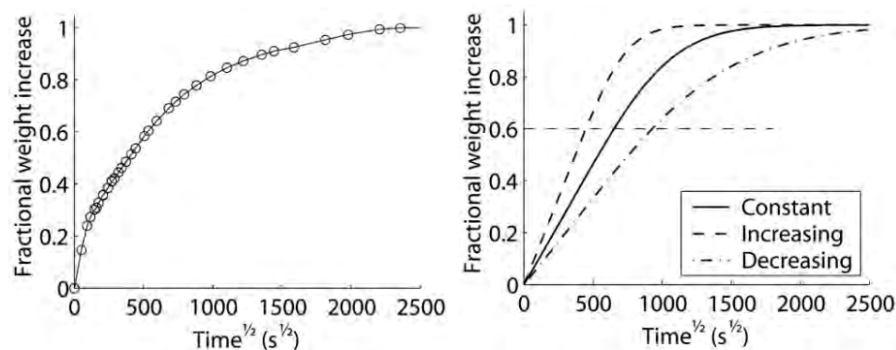
Tutkimuksissa on myös havaittu, että hystereesi, eli adsorptio- ja desorptiokäyrän suhde pienenee ajan kuluessa olosuhteiden pysyessä vakiona (Ishimaru 2001). Tämä pieneneminen on kuitenkin hidasta ja suuremmissa kosteuksissa ero säilyy.



Kuva 3.14 Muutos kosteuspitoisuudessa ajan funktiona kosteusolosuhteen pysyessä vakiona. (Ishimaru 2001).

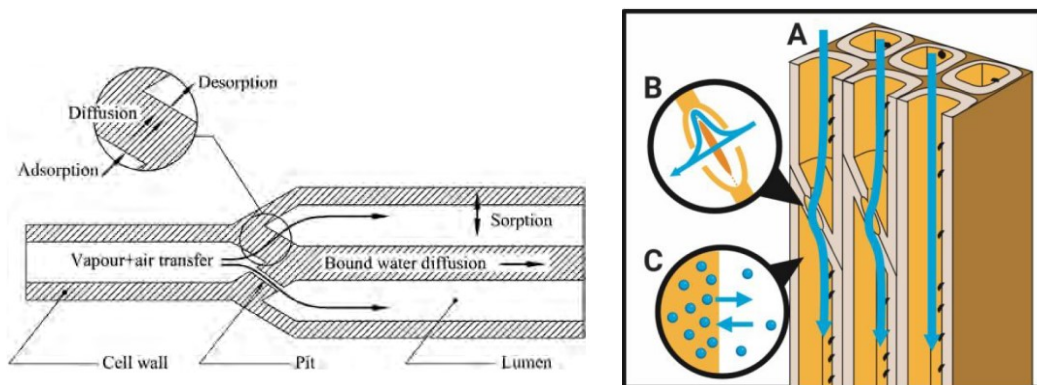
3.4.3 Veden imeytyminen, massanmuutos kosteuden neliöjuuren funktiona

Puun kosteusmuutokset ovat ilmiönä monimutkaisia. Krabbenhøftin mukaan teoreettinen Fickin lakiin perustuva diffuusioteoria ei täysin selitä puun kokeellisia sorptiokäyriä (kuva 3.15) (Krabbenhøft, 2004). Esimerkiksi kokeissa, joissa puu asteittain nostettiin 75 % RH:stä 84 % RH: kosteuteen ja piirrettiin massanmuutos ajan neliöjuuren funktiona, kuvaten kasvunopeutta, havaittiin, että puun kosteuspitoisuus ei noudata teoreettista mallia, vaan kulmakerroin lähtee laskemaan jo hyvin varhain kokeen alusta. (Krabbenhøft, 2004)



Kuva 3.15 Vertailu, a) kokeellinen puun sorptiokäyrä ja b) Fickin malliin perustuvat teoreettinen malli (Krabbenhøft, 2004).

Krabbenhøft selittää tätä sillä, että riippuu kosteuspitoisuudesta onko kosteuden siirtyminen vesihöyrynä soluonteloissa vai sitoutuneen veden diffuusio soluseinämissä dominoiva siirtymismuoto. Vapaa vesi liikkuu soluontelosta toiseen huokosten kautta. Puun syiden kyllästymispistettä alhaisemmissa kosteuksissa vesi liikkuu vesihöyrynä diffuusiolla sekä tapahtumaketjuna adsorptio-diffuusio-desorptio (Krabbenhøft, 2004).



Kuva 3.16 a) Kosteudensiirtyminen ennen puun syiden kyllästymispistettä (Krabbenhøft, 2004) b) vesi siirtyy solusta toiseen soluseinämiä läpi (C) sekä ikkunahuokosten (B) kautta (Fredriksson, et al., 2021).

3.4.4 Puun maksimikosteuspitoisuus

Puun kosteuspitoisuus ja kosteussuhde riippuvat puun tiheydestä. Kuten on jo todettu, puu on hygroskooppinen materiaali, jonka tilavuus ja siten myös tiheys määräytyy kosteuspitoisuuden mukaan. Määritellään kaksi tärkeintä puun tiheyden käsitettä. Puun kuiva-tuoretiheydellä R (tai $r_{0,g}$) (kaava 3.3) tarkoitetaan tiheyttä, jossa puun massa m_0 on mitattu kuivana ja tilavuus V_g puun syiden kyllästymispistettä korkeammassa kosteudessa, jossa puu on siis täysin paisunut, eikä tilavuus enää olennaisesti muutu. (Kärkkäinen, 2007)

$$R = \frac{m_0}{V_g} \quad (3.3)$$

Puun kuivatiheys $r_{0,g}$ (kaava 3.4) taas määritellään tiheytenä, jossa sekä massa että tilavuus on mitattu kuivasta puusta. (Kärkkäinen, 2007)

$$r_0 = \frac{m_0}{V_0} \quad (3.4)$$

Puun suurin mahdollinen kosteuspitoisuus voidaan esittää puun tiheyden funktiona. Kärkkäinen on esitellyt seuraavan johtamisen kaavalle. (Kärkkäinen, 2007)

Puussa soluseinämissä olevan veden tilavuus voidaan laskea puun tuoretilavuuden V_g ja kuivatilavuuden V_0 erotuksena kaavalla 3.5

$$V_{w.soluseinät} = V_g - V_0 \quad (3.5)$$

Soluseinämissä oleva veden tilavuus voidaan lausua myös soluseinämien tilavuutena paisuneena $V_{s,g}$ ja kuivana $V_{s,0}$ erotuksena kaavalla 3.6

$$V_{w.soluseinät} = V_{s,g} - V_{s,0} \quad (3.6)$$

Kun soluontelot ovat täysin veden kyllästämiä, soluonteloissa olevan veden tilavuus on tuoretilavuuden ja soluseinämien tilavuuden erotus

$$V_{w.ontelot} = V_g - V_{s,g} \quad (3.7)$$

Puussa olevan veden tilavuus on tällöin

$$V_{w.puu} = V_g - V_{s,g} + V_{s,g} - V_{s0} = V_g - V_{s,0} \quad (3.8)$$

Kun tämä veden tilavuus jaetaan puun kuivamassalla m_0 , saadaan suurin mahdollinen veden määrä V_{wx} . Tämä voidaan esittää myös kuivatuoretiheyden R ja ainestiheyden $r_{s,0}$ (ainestiheys kuivana) avulla kaavalla 3.9

$$V_{wx} = \frac{V_g - V_{s0}}{m_0} = \frac{1}{R} - \frac{1}{r_{s0}} = \frac{r_{s0} - R}{R \cdot r_{s0}} \quad (3.9)$$

Kun kuiva-tuoretiheys R ja ainestiheys r_{s0} muutetaan ominaispainoiksi, eli suhteellisiksi tiheyksiksi veden tiheyteen nähden, voidaan kaava kirjoittaa muotoon ja määritellä puun maksimaalinen kosteussuhde $u_{max}[\%]$ kaavalla 3.10

$$u_{max} = \frac{100}{\frac{1}{d_R} - \frac{1}{d_{s0}}} \quad (3.10)$$

Puun soluseinämien suhteellinen kuivatiheys d_{s0} on likimain sama riippumatta puulajista, noin 1,5457 (Kärkkäinen, 2007). Suomalaisen havupuun kuiva-ainestiheys on 1517-1529 kg/m³ (Kärkkäinen, 2007). Tällöin edellinen kaava voidaan yksinkertaistaa muotoon jossa puun maksimaalinen kosteussuhde voidaan laskea kuiva-tuoretiheyden avulla kaavalla 3.11

$$u_{max} = \frac{100}{d_R} - 64,696 \quad (3.11)$$

Männyn ja kuusen kutterinlastun kuivatuoretiheys vaihtelee välillä 380-480 kg/m³ (Alakangas, 2000). Tällöin edellä mainitulla kaavalla 3.11 maksimaalinen kosteussuhde olisi 198-143 %. Jos puun tiheys on 380 kg/m³, puun maksimaalinen kosteuspitoisuus olisi tällöin 752 kg/m³.

4. MATERIAALIKOKEET

4.1 Olosuhteiden hallinta

Materiaalikoeket suoritettiin Tampereen yliopiston rakennusfysiikan materiaali-laboratoriossa ja olosuhdehuoneessa. Kokeissa joissa vaadittiin myös ympäristön osalta hallittuja kosteusolosuhteita kokeiden aikana, käytettiin myös kosteuskaappeja ja kosteuslaatikoita. Kokeiden aikana olosuhteita seurattiin, että ne täyttävät materiaalien tasapainotuksen, koekappaleiden valmistuksen sekä itse kokeiden aikana määritellyt vaatimukset. Pääosin hallittavat olosuhteet ovat lämpötila ja suhteellinen kosteus. Joissain kokeissa tuli seurata myös ilmanpainetta sekä riittävää ilmavirtausta tilassa.

Materiaalilaboratorio

Materiaalikoeket tehtiin pääosin tavanomaisissa laboratorio-olosuhteissa noin 23 °C lämpötilassa. Laboratoriotilojen ilmanvaihto, lämpötila ja suhteellinen kosteus säädettiin ilmalämpöpumpulla. Ilman suhteellista kosteutta, lämpötilaa ja ilmanpainetta seurattiin Olosuhteita seurattiin Miran DLS loggerilla. Antureiden tarkkuudet on esitelty yhteisesti myöhemmin taulukossa 4.6. Materiaalilaboratorion lämpötila ja ilman suhteellisen kosteudessa oli ajoittain merkittäviäkin vaihteluja vuodenajan mukaan. Olosuhteet tutkimuksen aikana on esitetty taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1. Olosuhteet tutkimuksen aikana, materiaalilaboratorio.

Materiaali-laboratorio	Lämpötila [°C]	Suhteellinen kosteus [% RH]	Ilmanpaine [mBar]
Minimi	18,09	7,3	965,96
Maksimi	23,47	68,34	1016,26
Keskiarvo	20,66	32,21	996,84
Keskihajonta	0,95	12,88	9,57
Luottamusväli 95 %	±0,01	±0,14	±0,10

Olosuhdehuone

Materiaalien ja koekappaleiden alkutasapainotus sekä osa kokeista, joissa vaadittiin tarkempaa olosuhteiden hallintaa tehtiin alalaboratorion isossa olosuhdehuoneessa. Olosuhdehuoneessa lämpötila, ilmanvaihtuvuus ja suhteellinen ilmankosteus säädetään koneellisesti. Olosuhteita seurattiin Miran DLS loggerilla, jossa oli sekä sisäinen anturi, että ulkoinen HMP110 mittapää. Antureiden tarkkuudet on esitelty taulukossa 4.6.

Olosuhteet tallennettiin tutkimuksen aikana MiranLink-pilvipalveluun. Olosuhteet tutkimuksen aikana on esitetty taulukossa 4.2.

Taulukko 4.2. Olosuhteet tutkimuksen aikana, olosuhdehuone.

Materiaali-laboratorio	Lämpötila [°C]	Suhteellinen kosteus [% RH]	Ilmanpaine [mBar]
Minimi	20,93	46,06	957,64
Maksimi	23,36	54,3	1017,87
Keskiarvo	21,27	50,85	996,38
Keskihajonta	0,12	0,73	10,47
Luottamusväli 95 %	±0,001	±0,01	±0,11

Olosuhdekaappi

Olosuhteet 11 % RH ja 95 % RH, 23 °C toteutettiin olosuhdekaapeissa materiaali-laboratoriossa. Kaapin suhteellista kosteutta ja lämpötilaa seurattiin Rotronic HL-3 tallentavalla loggerilla ja HC2-S anturilla. Olosuhdetiedot tallentuivat loggeriin ja niitä seurattiin punnitusten yhteydessä. Taulukossa 4.3 on esitetty kokeiden aikana punnitusten yhteydessä tarkistetuista olosuhteista otanta. Antureiden tarkkuudet on esitelty taulukossa 4.6. Kaappien suhteellista kosteutta säädettiin ylikylläisellä suolaliuksella ja ilmaa kierrättävällä tuulettimella. Käytetyt suolaliuokset on esitetty taulukossa 4.7.

Taulukko 4.3. Olosuhteet tutkimuksen aikana, kosteuskaapit.

Kosteuskaappi 94,5 % RH	Lämpötila [°C]	Suhteellinen kosteus [% RH]
Minimi	19,80	93,90
Maksimi	21,60	95,00
Keskiarvo	20,84	94,57
Keskihajonta	0,62	0,34
Luottamusväli 95 %	±0,31	±0,17
Kosteuskaappi 11 % RH	Lämpötila [°C]	Suhteellinen kosteus [% RH]
Minimi	20,20	10,30
Maksimi	22,50	11,90
Keskiarvo	21,44	11,20
Keskihajonta	0,75	0,43
Luottamusväli 95 %	±0,42	±0,24

Olosuhdelaatikko

Kosteusolosuhteet 33 % RH ja 75 % RH toteutettiin muovilaatikoissa, joita säilytettiin olosuhdehuoneessa. Laatikoiden olosuhteita seurattiin kokeiden aikana Olosuhteita seurattiin Miran DLS loggerilla, jossa oli sekä sisäinen anturi, että ulkoinen HMP110 mittapää. Antureiden tarkkuudet on esitelty taulukossa 4.6.

Olosuhdelaatikoita käytettiin tasapainokosteuskokeissa. Niiden olosuhteita seurattiin kokeiden yhteydessä. Olosuhdelaatikot säilytettiin ensimmäisten (Ehta, Pölkky, Pölkky-savetettu) kokeiden aikana toisessa olosuhdehuoneessa, jossa oli alhaisempi lämpötila. Ne siirrettiin ennen myöhemmin tehtyjä Nimetön kutterinlastun kokeita samaan olosuhdehuoneeseen, jota käytettiin muutoinkin kokeissa.

Taulukko 4.4 Olosuhteet Pölkky, Ehta ja Pölkky-savetettu tasapainokosteuskokeiden aikana.

Olosuhdelaatikko 33 % RH	Lämpötila [°C]	Suhteellinen kosteus [% RH]
Minimi	17,97	36,67
Maksimi	18,30	39,00
Keskiarvo	18,00	38,02
Olosuhdelaatikko 75 % RH	Lämpötila [°C]	Suhteellinen kosteus [% RH]
Minimi	17,97	75,00
Maksimi	18,30	79,00
Keskiarvo	18,00	76,72

Taulukko 4.5 Olosuhteet Nimetön kutterinlastun tasapainokosteuskokeiden aikana. *)
Lämpötila sama kuin olosuhdehuoneessa, kts. taulukko 4.2.

Kosteuslaatikko 33 % RH	Lämpötila [°C]	Suhteellinen kosteus [% RH]
Minimi	20,93 *)	37,00
Maksimi	23,36 *)	37,60
Keskiarvo	21,27 *)	37,27
Kosteuslaatikko 75 % RH	Lämpötila [°C]	Suhteellinen kosteus [% RH]
Minimi	20,93 *)	75,00
Maksimi	23,36 *)	75,70
Keskiarvo	21,27 *)	75,40

Käytetyt mittausanturit ja suolaliuokset

Taulukko 4.6. Loggerit ja anturit, tarkkuudet.

Loggeri ja anturi	Olosuhde ja tarkkuus
Miran DLS sisäinen anturi	lämpötila $\pm 0,3$ °C suht. kosteus $\pm 1,8$ % RH (0–85 %RH) ilmanpaine $\pm 1,0$ mbar (abs.) $\pm 0,12$ mbar (suht).
Miran DLS ja HMP110 mittapää	lämpötila $\pm 0,15$ °C suht. kosteus $\pm 1,5$ % RH (0–90 %RH) suht. kosteus $\pm 2,5$ % RH (90–100 %RH)
Rotronic HL-3 ja HC2-S mittapää	lämpötila $\pm 0,1$ °C suht. kosteus $\pm 0,8$ % RH Rotronic-anturit kalibroitiin ennen tutkimuksen aloitusta

Taulukko 4.7. Suolaliuokset ja vastaava suhteellinen kosteus.

Nro	Olosuhde (kylläinen suolaliuos, T=23 °C)		ϕ [% RH]
1	Litiumkloridi	LiCl, 1H ₂ O	11
2	Magnesiumkloridi	MgCl ₂ ·6H ₂ O	33
3	Magnesiumnitraatti	Mg(NO ₃) ₂ , 6H ₂ O	50
4	Natriumkloridi	NaCl	75
6	Kaliumnitraatti	KNO ₃	93

4.2 Tutkittavat materiaalit

Materiaalikoeksissa tutkittiin kutterinlastueristeet Pölkky (koekappaleiden tunnuksena P_), Pölkky savetettu (tunnuksena PS_), Ehta (tunnuksena E_) ja Nimetön (tunnuksena R_).



Kuva 4.1 Tutkittavat materiaalit, vasemmalta oikealle Pölkky, Pölkky-sav., Ehta ja Nimetön.

PölkkyFarm -kutterinlastu on Pölkky Oyn valmistama kutterinlastutuote, jonka raaka-aineena käytetään keinokuivatun mänty- ja kuusisahatavaran höylänlastua. Materiaali toimitettiin laboratorioon muovisäkeissä. Materiaalikokeet pyrittiin tekemään samalle toimituserälle. Toimitetulla erällä ei ollut tuotantokoodia.

Pölkky-savetettu on Pölkky-kutterinlastun ja saven sekoitus. Materiaali toimitettiin laboratorioon muovisäkeissä. Kutterinlastu oli sekoitettu tasosekoittajalla savilietteen kanssa suhteella 20 kg Pölkky kutterinlastua paalista, 10 kg Tiilerin savijauhoa ja 10 kg vettä. Tämän jälkeen seos oli kuivattu kevytpeitteen päällä. Kyseessä on kokeellinen, ei siis tuotannossa oleva tuote, eikä erällä ole tuotantokoodia. Savetettu Pölkky oli toimittajan mukaan valmistettu samasta erästä, kuin kokeissa käytetty Pölkky kutterinlastu.

Ehta-eriste on Ehta Oyn valmistama kutterinlastueriste. Se on valmistajan mukaan suomalaista kuusisahatavaran höylänlastua, josta on hienoaines seulottu pois. Valmistajan ilmoittama lämmönjohtavuus on 0,0429 W/(mK). Materiaali saapui laboratorioon ilmatiiwiissä 20 kg painavissa ja 70 x 40 x 30 cm kokoisissa myyntipakkauksissa.

Nimetön kutterinlastu edusti kokeissa suoraan sahalta tai puusepänteollisuudesta saatavaa sekalaista tuotetta. Materiaali saapui laboratorioon muovisäkeissä. Materiaali eri toimituksissa erosi huomattavasti sekä kooltaan, että myös puumateriaaliltaan. Materiaalikokeissa käytettiin samasta säkistä otettua lastua. Materiaalin puulajista ei ollut tietoa, mutta materiaalikokeissa käytetty erä vaikutti olevan mäntyä. Nimetön kutterinlastu oli lastun kooltaan hieman muita isompaa ja lastu oli enemmän ”rullalla”, kuten näkyy kuvassa 4.1.

4.2.1 Esivalmistelut ja tiheyden määrittäminen

Puumateriaalin tilavuus muuttuu suhteellisen kosteuden funktiona. Korkeammassa suhteellisessa kosteudessa joko materiaalivilavuus tai tiheys koekappaleessa kasvaa, riippuen siitä pääseekö materiaali laajenemaan koekappaleessa kokeiden aikana. Vertailukelpoisen tiheyden määrittäminen ja tiheydeltään mahdollisimman tasalaatuisten koekappaleiden tuottaminen hygroskooppiselle luonnonmateriaalille, joka luontaisesti sisältää eroja ainestihedessä ei ole yhtä suoraviivaista kuin teolliselle tasalaatukselle materiaalille.

Tavoitteena materiaalikokeissa oli toteuttaa ne samassa tiheydessä, kuin materiaalit olivat projektin rakennekokeissa. Seinäkoe-elementtejä tehtäessä niistä arvioitiin elementin massan perusteella toteutunut tiheys. Yläpohjakokeita varten Ehta ja Nimetön kutterinlastujen tiheys selvitettiin ripottelemalla kutterinlastua laatikkoon. Nämä tiheydet on esitetty taulukossa 4.6.

Seinäkoe-elementtien valmistuksen ja yläpohjakokeiden koepuhalluksen yhteydessä kutterinlastu oli ollut varastoituna rakennushallissa varasto-olosuhteissa. Suhteellinen kosteus hallissa vaihtelee, mutta hyvin todennäköisesti varastointikosteuspitoisuus on ollut alle 50 % RH. Materiaalikokeissa tiheys määritetään 50 % RH kosteudessa, joten oletettavaa on että seinäkoerakenteissa toteutunut tiheys kuiva-ainespitoisuutena laskettuna oli korkeampi kuin materiaalikokeissa. Yläpohjarakenteissa materiaali pääsee vapaasti laajenemaan.

Materiaalikokeissa käytetty materiaali tuotiin varastointiolosuhteista olosuhdehuoneeseen (50 % RH ja 21 °C), missä sitä säilytettiin kokeiden suoritukseen asti. Tiheyttä mitattaessa materiaali oli siis adsorptiossa. Materiaalit todettiin tasapainottuneeksi, kun massanmuutos oli 0,1 % kolmessa vähintään 24 tunnin välein tehdyssä punnituksessa. Käytännössä massanmuutoksen mittaaminen ei ole näin suoraviivaista. Materiaali saattaa tasapainottua hitaasti, tai tasaantumisessa olla vaihtelua. Tämän vuoksi massanmuutoksesta piirrettiin kuvaaja ja todettiin tämän avulla massan tasapainottuminen.

Kutterinlastut olivat toimitettaessa eri tavoin pakattu. Pölkky ja Nimetön kutterinlastut olivat säkeissä ja Ehta puristetussa paalissa. Säkeissä pohjalla oli painuneempaa kutterinlastua. Kaikki kokeissa käytetyt kutterinlastut siirrettiin aluksi muovilaatikoihin, joissa niiden annettiin tasaantua ja paakut purettiin. Materiaaleille pyrittiin selvittämään myös vertailukelpoinen ominaistiheys ripoteltuna 50 % RH kosteudessa ja kuivana. Myös nämä tiheydet on esitetty taulukossa 4.6.

Taulukko 4.8. Materiaalien kuivatiheys vs tiheys tasapainokosteuskokeessa (tiheys ripoteltuna).

Materiaali	Rakenne- koe	Tavoitetiheys (tiheys rakennekokeessa) [kg/m ³]	Tiheys ripoteltuna kuivana [kg/m ³]	Tiheys ripotel- tuna 50 % RH [kg/m ³]
Pölkky-savetettu	seinä	266	140	151
Ehta	yläpohja	100	75	83
Pölkky	seinä	175	111	124
Nimetön	yläpohja	66,5	60	63

Materiaaleille määritettiin 50 % RH kosteudessa punnitun massan ja kuivamassan suhde tasapainokosteuskokeen yhteydessä. Kuivamassan määrittämistä varten yksi koe-erä (3 kappaletta per materiaali) kuivattiin uunissa 105 °C lämpötilassa, jonka perusteella määritettiin kuivatiheys materiaalin näytteille. Uunikuivaus tehtiin desorptiomittausten lopuksi. Koska uunikuivaus saattaa vaikuttaa materiaaliominaisuuksiin, kuivaus tehtiin vasta kokeen lopuksi, jotta mahdollisten muutosten vaikutukset eivät näkyisi tuloksissa. Pitkällisessä uunikuivauksessa puumateriaalista lähtee myös sellaista kosteutta ja ainetta, joka siitä ei muuten rakenteessa irtoaisi. Kolmen kappaleen vastaavan suhteen keskiarvona saatiin kerroin, jota käytettiin muiden koekappaleiden kuivamassan määrittämiseen.

4.3 Ilmanläpäisevyyskoe

Ilmanläpäisevyyskokeessa määritettiin materiaalin ilmanläpäisevyys k_a [m³/(m·s·Pa)]. Ilmanläpäisevyys on ilman tilavuus, joka stationääritilassa laminaarisena virtauksena läpäisee kohtisuorasti pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen paine-ero on yksikön suuruinen (RIL-255-1, 2014).

4.3.1 Standardi SFS-EN ISO 9053:2018

Standardi SFS-EN ISO 9053:2018 (SFS-9053, 2018) määrittelee yleisen laboratoriomenetelmän ilmanläpäisevyyden määrittämiseen rakennusmateriaaleille, kun materiaalin ylä- ja alapuolen välille luodaan paine-ero. Paine-ero katsotaan positiiviseksi, kun materiaalin ulkopinnaksi tarkoitettulla puolella on suurempi paine kuin sisäpuolella.

Standardinmukaisessa koelaitteistossa koekappaleen läpi johdetaan tunnettu ilmavirta ja mitataan paine-ero koekappaleen yli. Laitteisto tulee olla kalibroitu referenssiolosuhteissa

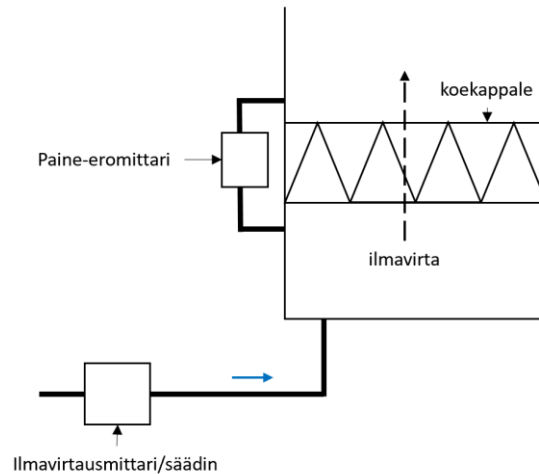
(20 °C, 101 325 Pa, 50 % RH) tarkkuuteen ± 5 %. Standardin mukaan laitteisto tulisi kalibroida vähintään kerran vuodessa tai aina mikäli laitteisto puretaan. Tässä yhteydessä ilmatiiviys tarkistetaan tiivistämällä kehys ilmatiiviillä koekappaleella ja suorittamalla koe sekä negatiivisella, että positiivisella paine-erolla. Kokeiden yhteydessä laitteiston tiiviys katsotaan riittäväksi, jos vuotava ilmavirta on alle 5% pienimmästä mitattavasta ilmavirrasta. Mikäli laitteiston tiiviys ei ole riittävä, mitataan ilmavirta sekä positiivisella, että negatiivisella paine-erolla.

Koekappaleen tulee edustaa materiaalia sellaisena kuin sitä käytetään rakenteessa. Koekappaleen mitat määräytyvät käytettävän testilaitteiston kammion mukaan. Nelikulmaiselle koekappaleelle pienemmän sivun pituus tulee olla vähintään 90 mm. Koemateriaalin paksuus määräytyy materiaalin käyttötilanteen tai laitteiston kammion korkeuden mukaan. Koekappale tulee pyrkiä saamaan tiiviiksi kammion reunoja vasten. Tavanomaisesti testi suoritetaan positiiviselle paine-erolle ja mikäli materiaali ei ole ilmanpaineen suunnassa symmetrinen myös negatiiviselle paine-erolle.

Ilman lämpötila laitteistossa tulee mitata ± 2 °C tarkkuudella. Paine tulee olla määritetty ± 1 kPa tarkkuudella ja suhteellinen kosteus ± 10 % RH tarkkuudella. Nämä tulee pysyä tasaisina kokeen ajan. Ympäristön lämpötila tulee olla 15-30 °C ja ilman suhteellinen kosteus 25-75 % RH. Koeolosuhteissa ilmanpaineen tulee olla välillä 100-102 kPa, lämpötilan tulee olla välillä 18-22 °C, ja suhteellisen kosteuden välillä 25-50 % RH. Ellei näin ole, lasketaan tiheyskorjattu ilmavirta. (SFS-9053, 2018)

4.3.2 Koelaitteisto

Materiaalilaboratorion testilaitteisto koostuu metallikehyksestä, jonka sivumitat ovat 200 mm x 200 mm, sekä paine-eromittarista WIKA DP-10 ja ilmavirtausmittarista/säätimestä Kytölä L-8SR.



Kuva 4.2 Ilmanläpäisevyyslaitteiston toimintaperiaate.

Kalibrointiohjeen (Ilmanläpäisevyyskoe, Toimintatapaohje, 2017) mukaan laitteisto ei tarvitse erillistä kalibrointia kokeiden yhteydessä. Kokeiden aikana laitteiston tiiviys tarkistettiin. Todettiin, että tiivisteiden kautta vuotava ilmamäärällä ei ole havaittavaa vaikutusta tulokseen. Vuoto on pienempi (paine-ero on suurempi) kuin laitteen mittausalue.



Kuva 4.3 ilmanläpäisevyyskoelaitteisto.

Mitattavia koekappaleita tulee olla vähintään kolme. Irtomateriaalin tapauksessa, koetta varten ei valmistella varsinaisia koekappaleita, vaan materiaali sullotaan suoraan kehykseen. Irtomateriaalin tapauksessa materiaali on yleensä niin hyvin ilmaa läpäisevää, että luotettavampien tuloksien saavuttamiseksi koko laitteiston kehys pyritään täyttämään materiaalilla. Ennalta punnittu, tavoiteteiheyttä vastaava määrä materiaalia sullotaan matalina n. 20mm kerroksina suoraan kehykseen. (Ilmanläpäisevyyskoe, Toimintatapaohje, 2017)

4.3.3 Mittaukset

Kokeet tehtiin olosuhdehuoneessa 50 % RH suhteellisessa kosteudessa tasapainotetulle materiaalille. Koe tehtiin materiaalilaboration olosuhteissa. Kutterinlastu voidaan olettaa homogeeniseksi materiaaliksi, jolloin koetta ei ollut tarvetta toistaa eri suunnissa. Koeolosuhteet, materiaalilaboratoriossa vallitseva ilmanpaine, lämpötila ja suhteellinen kosteus on esitetty taulukossa 4.7. Taulukossa oleva ilmasto-olosuhteiden korjauskerroin on $\sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}}$, ilmavirran tiheyskorjausta varten. Tämä laskenta on esitetty kaavoissa 4.1-4.3.

Tiheyskorjaus edellytetään, koska ilmanpaine koeolosuhteissa on alle 100 kPa.

Taulukko 4.9. Ilmanläpäisevyyskoe, olosuhteet.

Mittauksen aikaiset olosuhteet	
Ilmanpaine (Pa)	99028
Lämpötila (°C)	21,13
Suhteellinen kosteus (%)	43,46
Ilmasto-olosuhteiden korjauskerroin	0,98636

Tasapainottunutta irtomateriaalia punnittiin erä, joka vastaa tavoitetiheyttä, kun ilmanläpäisylaitteen sivumitat ja näytekorkeus tunnetaan. Välittömästi punnituksen jälkeen erä sullottiin suoraan koelaitteistoon tavoitetiheyteen. Alle ja päälle asetettiin tiheäilmäinen metalliverkko. Metalliverkon ilmanläpäisevyys testattiin ennen koetta ja se todettiin niin suureksi ettei se vaikuta koetulokseen. Ilmavirtaa kasvatettiin viiden yksikön askelin aloitustasosta 10 litraa minuutissa tasosta 60 litraa minuutissa tasoon asti. Taulukkoon merkittiin paine-eromittarin lukema.

Koe toistettiin kolmella erällä materiaalia. Edellä mainitulla menettelyllä mitattiin paine-ero mittauspisteissä välillä 10-60 Pa, kun ilmavirtausta nostettiin 5 l/min askelin.

4.3.4 Laskenta

Koetilanteessa mitattu tilavuusvirta muutettiin tiheyskorjatuksi ilmavirraksi kaavalla 4.1

$$V'_0 = V' \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} \quad (4.1)$$

missä V'_0 on korjattu ilmavirran määrä,

V' mitattu ilmavirran määrä,

ρ ilman tiheys mittaolosuhteissa ja

ρ_0 ilman tiheys standardin referenssiolosuhteissa (1,1988 kg/m³).

Ilman tiheys mittaolosuhteissa laskettiin kaavalla 4.2

$$\rho = \frac{p_{a,tot} - 0,378802p_v}{287,055T} \quad (4.2)$$

missä $p_{a,tot}$ [Pa] oli ilmanpaine mittaolosuhteissa,

T [K] oli ilman lämpötila mittaolosuhteissa ja

p_v [Pa] oli vesihöyrynpaine mittaolosuhteissa laskettuna kaavalla (4.3)

$$p_v = 610,5\phi \exp\left(\frac{21,875 \cdot (T - 273,15)}{(T - 7,65)}\right) \quad (4.3)$$

Saatu tiheyskorjattu tilavuusvirta [l/min] muutettiin yksikköön 1/s, Tämän perusteella piirrettiin kuvaaja, jossa tiheyskorjattu ilmavirta [1/s] esitettiin kyseisellä ilmavirralla saadun paine-eron [Pa] funktiona. Samalla mittaustuloksena saatu lukema millibaareina [mbar] muutettiin Pascaleiksi [Pa]. Ilmanläpäisevyys saatiin nyt lineaarisen regressiosuoran kulmakertoimen arvona.

4.3.5 Virhelähteet ja kokeen onnistumisen arviointi

Ilmanläpäisevyyskokeessa merkittävin virhelähde on laitteiston kehyksen ja materiaalin välistä mahdollisesti tapahtuva ilmavuoto. Käytetyssä laitteistossa on sileä metallikehys. Tällä on vaikutusta erityisesti tiiviimmillä materiaaleilla, jolloin kehyksen ja kappaleen välistä saattaa päästä merkittävä määrä ilmaa purkautumaan ohi materiaalin. Kutterinlastun kaltaisella hyvin ilmaa läpäisevällä materiaalilla, reunavuodolla materiaalin ja kehyksen välistä ei ole yhtä merkittävää vaikutusta, kuin tiiviimmällä materiaalilla.

Laitteiston tiivisteiden kunto testattiin teippaamalla ja tiivistämällä laitteiston kehys umpeen ja mittaamalla että se oli tiivis. Näin saatiin poissuljettua se mahdollisuus, että

laitteisto vuotaa ja tuottaa systemaattisen virheen tuloksiin. Laitteisto todettiin niin tiiviiksi, että paine-ero ylitti paine-eromittarin mittausalueen jo pienellä ilmavirralla.

Sullottaessa irtomateriaalia laitteeseen tavoitetiheyteen, on mahdollista, että täyttö jää vajaaksi tai toisaalta materiaali ei tiivisty tarpeeksi. Materiaalia punnittiin erillisessä astiassa oikea määrä ja pyrittiin sullomaan tasaisesti. Jokainen koe-erä tehtiin erillisellä erällä materiaalia, jolloin se ei ollut valmiiksi painunutta. Kokeessa Nimettömän kutterinlastun tavoitetiheys oli $66,5 \text{ kg/m}^3$. Tämä osoittautui käytännössä liian harvaksi tiheydeksi. Tuloksen saamiseksi Nimetön kutterinlastulle koe tehtiin tiheydellä 100 kg/m^3 , joka oli sama tiheys kuin Ehta-eristeellä.

Kaikilla mitatuilla materiaaleilla, saman materiaalin ja materiaaliheyden koe-erien väliset mittaustulokset olivat samat. Tämä tarkoittaa, että laitteiston mittaustarkkuus ei riitä mittaamaan pieniä paine-eroja koe-erien välillä. Koska koe-erien välillä ei ollut hajontaa, ei voida hajonnan perusteella arvioida mittauserävarmuutta ja luottamusväliä tuloksille. Eri materiaaliheyksillä tulokset olivat kuitenkin johdonmukaisia ja ilmanläpäisevyys laski materiaaliheyden kasvaessa, joten koe katsottiin onnistuneeksi.

4.4 Lämmönjohtavuus

Lämmönjohtavuuskokeessa mitattiin materiaalien lämmönjohtavuus $[\text{W}/(\text{mK})]$ eri kosteuspitoisuuksissa. Lämmönjohtavuuskokeet suoritettiin standardin SFS-EN ISO 12667 mukaisesti LaserComp FOX304 lämpövirtalevylaitteen avulla.

4.4.1 Standardi SFS-EN ISO 12667:2001

Standardi SFS-EN ISO 12667 (SFS-12667, 2001) määrittelee vaatimukset käytettävälle lämpövirtalevylaitteelle ja lämmönjohtavuuskokeelle. Laitteen täyttäessä standardin vaatimukset erilliselle tulosten virheanalyysille ei ole tarvetta, vaan tulosten tarkkuutena voidaan käyttää laitteiston ilmoittamaa virhetarkkuutta. Tuloksissa tulee ilmoittaa käytetty laitteisto.

Lämmönjohtavuuden mittaaminen lämpövirtalevylaitteella perustuu yksiulotteiseen Fourierin lakiin (2.4). Kun kappale on sijoitettu kahden eri lämpötiloissa olevan levyn väliin ja näiden välille on vakiintunut yksiulotteinen lämpötilakenttä, lämpötilakentän pitäisi olla vakiintunut koko kappaleen paksuudelta. Tällöin lämpötilagradientti saadaan

määritettyä laskemalla levyjen välinen lämpötilaero $\Delta T = T_{kuuma} - T_{kylmä}$ ja koekappaleen paksuus Δx , sillä keskimääräinen lämpötilagradientti dT/dX on sama kuin $-\Delta T/\Delta x$.

Standardin mukaisessa tavanomaisessa mittauksessa materiaalin suhteellinen kosteus on (50 ± 10) % RH ja lämpötila (23 ± 2) °C. Lämpövirtalevyn todellinen mitta-alue määrittää mitattavan koekappaleen paksuuden.

Erityisesti hygroskooppisilla materiaaleilla lämpövirran suunta, lämpötilaero ja suhteellinen kosteus voivat vaikuttaa merkittävästi saatuihin tuloksiin. Tutkimusryhmän toteutusohjeen mukaisesti, asetettaessa ylälevy kylmäksi levyksi hygroskooppisessa materiaalissa suurella lämpötilaerolla syntyy koekappaleeseen sisäinen konvektio, joka kuljettaa kosteutta ylöspäin. Kohdatessaan kylmän ylälevyn, tapahtuu kondensoitumista ja tiivistynyt vesi valuu kohti kappaleen keskustaa. Tämä tuottaa korkeampia lämmönjohtavuuden arvoja. (Valovirta, 2005)

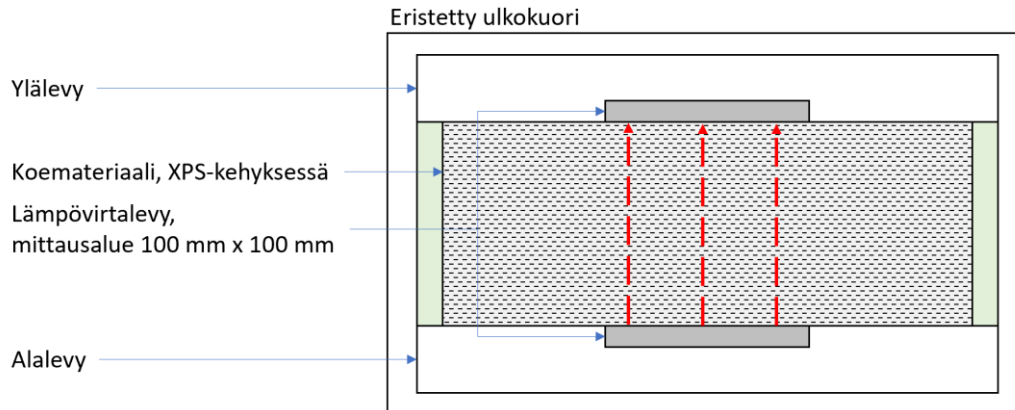
Hygroskooppiselle materiaalille suositeltavampaa onkin, että alalevy on säädetty kylmäksi levyksi. Tällöinkin tapahtuu kondensoitumista alalevyn kohdalla, mutta kappaleen kostuminen on vähäisempää. Kondensoitumista voidaan ehkäistä myös säätämällä lämpötilaeroa pienemmäksi ja käyttämällä aluetta, jossa kondensoitumista tapahtuu vähemmän (vähintään 10 °C keskilämpötila ja 10 °C lämpötilaero). Kosteuden vaikutuksesta johtuen hygroskooppisilla materiaaleilla materiaaliominaisuutena ilmoitettava lämmönjohtavuus mitataan usein kuivalle kappaleelle. (Valovirta, 2005)

Koska tässä tutkimuksessa tavoitteena oli tutkia materiaaleja rakenteissa esiintyvissä olosuhteissa, lämmönjohtavuudet mitattiin eri suhteellisia kosteuksia vastaavissa kosteuspitoisuuksissa.

4.4.2 Koelaitteisto

Kokeet tehtiin LaserComp FOX304 lämpövirtalevylaitteella (sarjanumero 00060355). Laitteen mittaustarkkuus on 1 %, kalibrointiepävarmuus huomioiden absoluuttinen tarkkuus on 3 %. Laitteen (kuva 4.4) pääosat ovat ylä- ja alalevy, kaksi lämpövirtalevyä sekä suojakuori. Koekappale asetetaan ylä- ja alalevyjen väliin. Lämpövirtalevyt on integroitu ylä- ja alaosan keskiosaan siten, että ne tulevat kokeessa koekappaleen pintoja vasten. Pintojen lämpötilat säädetään erisuuruiseksi, jolloin niiden välille muodostuu

lämpötilagradientti. Tämä aiheuttaa pintojen välille lämpövirran lämpimämmältä levyltä kylmempää kohti, jonka suuruutta kokeessa mitataan.



Kuva 4.4 Lämpövirtalevylläite, periaatekuva.

Lämpövirtalevyjen mittausalue laitteessa on 102 mm x 102 mm. Lämpövirtalevy koostuu termoelementtiketjusta, joka on kiedottu ohuen levyn ympärille. Lämpövirtaa mitattaessa levyjen pintojen välille muodostuu lämpötilaero. Tämä aiheuttaa termoelementtiketjuun jännitteen, jonka suuruus on verrannollinen levyn läpi kulkevaan lämpövirtaan (Valovirta, 2005).

Lämpövirtalevylläitteessä anturien sähkösignaali Q [μV] on yhteydessä lämpövirran tiheyden kaavalla (4.4), jossa esiintyvä lämmönjohtavuus λ_{cal} tunnetaan absoluuttisesti. Alaviite cal viittaa kalibrointiin.

$$q = \frac{\lambda_{cal}(T_{cal})\Delta T_{cal}}{\Delta x_{cal}} = S_{cal}(T_{cal})Q \quad (4.4)$$

Koska anturien fysikaaliset ominaisuudet muuttuvat lämpötilan muuttuessa, on lämpötilasta riippuvan kalibroitetermin $S_{cal}(T)$ selvittämiseksi laite aina kalibroitava lämpötilojen mukaan. Kalibroitetermin yksikkö on $W/(m^2 \cdot \mu V)$ tai $W/(m^2 \cdot mV)$. Kummallakin laitteen anturilla on oma lämpötilansa, joten molemmilla on myös oma anturin todellisesta lämpötilasta riippuva kalibroiteterminsä. Nämä on määritetty kalibroinnin yhteydessä. Mittauksissa laite laskee lämmönjohtavuuden kaavalla (4.5). (Lasercomp, 2009)

$$\lambda_{\text{test}} = S_{\text{cal}}(T_{\text{test}})Q \frac{\Delta x_{\text{test}}}{\Delta T_{\text{test}}} \quad (4.5)$$

Koska laitteessa on kaksi lämpövirtalevyä, tulee kaksi tulosta. Laite ilmoittaa tutkittavan materiaalin lämmönjohtavuudeksi näiden kahden tuloksen keskiarvon (Lasercomp, 2009).

Kalibroinnin tarkistus

Kokeiden yhteydessä laitteen kalibrointi tarkistettiin. Kalibroinnissa kriittisiä asioita ovat käytetty vertailutaso, kalibrointiketjun pituus, kalibroinnin huolellinen suoritus sekä kalibrointikappaleen lämmönjohtavuuden suhde mitattavan kappaleen lämmönjohtavuuteen. Eurooppalainen vertailutaso on määritetty IRMM:n (Institute of Reference Materials and Measurements, Belgium) toimesta (Valovirta, 2005).

Tarkistukseen käytettiin IRMM-standardille hyväksyttyä mineraalivilla-referenssikoe kappaletta Vertailukappale 1, jonka lämmönjohtavuutta pidetään tunnettuna ja on merkitty kappaleeseen (0,03184 W/(mK)). Tarkistus tehtiin myös Thermisol Platina-levyllä, jolle valmistaja ilmoittaa lämmönjohtavuudeksi 0,031 W/(mK). (Jackon Finland Oy, 2021).

Tarkistuksessa käytetyt koe kappaleet mitattiin koesarjoissa käytetyillä keskilämpötiloilla ja lämpötilaerolla (taulukko 4.10). Koe kappaleet mitattiin laboratorio-olosuhteissa tasapainotettuina. Koska materiaalit eivät ole hygroskooppisia, niiden kosteudella ei katsota olevan merkittävää vaikutusta lämmönjohtavuuteen.

Kalibroinnin tarkistus tehtiin kahdella kokeiden aikana käytössä olleella laitteiston kalibrointitiedostolla; IRMM-PTS-2011-04-14.cal ja NIST1450bCalibration_355.cal. Kyseisellä laitteistolla tavanomaisesti käytettävä IRMM-kalibrointitiedosto ei kata lämpötila-aluetta, jossa alalevyn lämpötilaksi on asetettu alle 10 °C lämpötila. Tämän vuoksi toisessa koesarjassa oli käytettävä NIST1450b-kalibrointitiedostoa, joka kattoi alalevylle 5 °C lämpötila-asetuksen. Laitteen kalibrointi tarkistettiin myös tällä kalibrointitiedostolla.

Taulukko 4.10. vertailu kalibrointikappaleilla (IRMM = IRMM-PTS-2011-04-14 ja NIST = NIST1450bCalibration_355).

Koekappale	Pvm	ϕ [%RH]	$T_{ylä}$ [°C]	T_{ala} [°C]	T_{ka} [°C]	Kalibrointi-tiedosto	Mitattu λ [W/(mK)]	Odotus-arvo λ_{odotus} [W/(mK)]	Ero %
Thermisol Platina	29.4.2020	lab	0	20	10	IRMM	0,031	0,031	0,00
Vertailukappale 1	5.5.2020	lab	0	20	10	IRMM	0,03210	0,03184	0,82
Vertailukappale 1	5.5.2020	lab	15	5	10	NIST	0,03169	0,03184	0,47
Vertailukappale 1	5.5.2020	lab	0	20	10	NIST	0,03191	0,03184	0,22

Tarkistuksessa mitatuille koekappaleille saatiin tulokseksi kolmen merkitsevän numeron tarkkuudella odotusarvon mukainen tulos, tarkkuus katsottiin riittäväksi. Tulos oli standardin SFS-12667 asettamissa $\pm 2\%$ rajoissa (SFS-12667, 2001).

4.4.3 Koekappaleiden valmistus

Lämmönjohtavuuskoetta varten irtomateriaali tasapainotettiin ensin olosuhdehuoneessa 50 % RH suhteellisessa kosteudessa ja 23 °C lämpötilassa. Irtomateriaali valmistettiin XPS-levystä valmistettuun kehykseen, jonka sivun sisämitta oli 242 ± 3 mm ja syvyys 101 ± 2 mm. Kehyksen tilavuus oli tällöin $0,0047 \text{ m}^3 \pm 7\%$ ja massa 171 g. Materiaali sullottiin rakennekokeita vastaaviin tavoitetiheyksiin. Materiaalitiheydet on ilmoitettu tarkemmin luvun 4.5 taulukossa 4.12. Kustakin materiaalista valmistettiin kolme koekappaletta adsorptiokäyrän mittauksia varten ja kolme koekappaletta desorptiokäyrän mittauksia varten. Valmistuksen jälkeen koekappaleet annettiin tasapainottua vielä 50 % RH kosteudessa. Tämän jälkeen adsorptiokäyrän koekappaleet siirrettiin 11 % RH kosteuskaappiin ja desorptiokäyrän koekappaleet 95 % RH kosteuskaappiin.



Kuva 4.5 Lämmönjohtavuuskoekappaleita valmistettuina.

4.4.4 Mittaukset

Kokeet tehtiin lämpövirran suunnalla molempiin suuntiin. Ensimmäinen koesarja (koesarja 1) tehtiin toteutusohjeen tavanomaisen käytännön mukaisesti siten, että lämpövirran suunta oli ylöspäin (alalevy lämmin, ylälevy kylmä).

Koska koesarjassa 1 havaitut lämmönjohtavuudet olivat suurempia kuin samoille materiaaleille muualla mitatut arvot, selvitettiin voiko tähän olla syynä kosteuden kondensoituminen kylmän levyn pintaan. Koska kutterinlastu on voimakkaasti hygroskooppinen materiaali, tällöin voi muodostua merkittävä virhe mittaustuloksiin.

Suosittelavaa hygroskooppiselle materiaalille on testata se siten, että alalevy on kylmä levy ja pienentämällä levyjen välistä lämpötilaeroa (Valovirta, 2005). Koe toistettiin (koesarja 2) siten, että lämpövirran suunta oli alaspäin (alalevy kylmä, ylälevy lämmin).

Mittaukset, koesarja 1

Kalibroitiedostona käytettiin IRMM-PTS kalibroitiedostoa. Ylälevyn lämpötilaksi asetettiin 0 °C ja alalevyn lämpötilaksi 20 °C, keskilämpötilan ollessa tällöin 10 °C. 94 % RH kosteudessa lämmönjohtavuuskoe tehtiin myös ylälevyn arvolla 10 °C (alalevy 0 °C). Tämän alemmassa keskilämpötilassa tehty koe tehtiin, koska oletettavasti samaan aikaan kun eristekerroksessa vallitsee korkea suhteellinen kosteus, myös lämpötila on alempi. Alempi lämpötila alentaa myös lämmönjohtavuutta.

Koekappaleille käytettiin auto thickness-ominaisuutta, jolloin laite määrittää koekappaleen paksuuden. Kova irtokaulus, jonka yläpinnassa on pehmeä tiivistenauha, estää materiaalin liiallisen kokoonpuristumisen. Yksittäisen mittauksen kesto oli noin viisi tuntia.

Laitteen antama tulostiedosto antoi suoraan lämmönjohtavuuden arvon erikseen ylä- ja alalevylle, sekä näiden keskiarvona mitatun lämmönjohtavuuden. Tuloksista koostettiin taulukko 4.9, johon on laskettu adsorptio- ja desorptiosarjojen keskiarvona lämmönjohtavuus eri suhteellisissa kosteuksissa. Koekappalekohtaiset tulokset on esitetty liitteessä (LIITE A1). Taulukkoon on laskettu myös Studentin t-jakaumalla keskihajonta, 95 % luottamusväli ala- ja ylärajoineen.

Taulukko 4.11. Lämmönjohtavuus, keskihajonta, luottamusväli koesarja 1.

Materiaali	ϕ [% RH]	λ [W/(mK)]	K.hajonta	L.väli 95 %	Alaraja	Yläraja
Ehta 100 kg/m ³	13	0,052	0,00020	±0,00051	0,052	0,053
	50	0,055	0,00023	±0,00057	0,054	0,056
	94	0,068	0,00085	±0,00211	0,066	0,070
Pölkky 180 kg/m ³	13	0,052	0,00053	±0,00132	0,051	0,054
	50	0,058	0,00046	±0,00115	0,057	0,059
	94	0,069	0,00022	±0,00054	0,069	0,070
Pölkky-sav. 266 kg/m ³	13	0,055	0,00072	±0,00179	0,053	0,057
	50	0,059	0,00074	±0,00184	0,057	0,061
	94	0,069	0,00109	±0,00270	0,066	0,072

Lämpötilaeron ja kosteuden vaikutus mittaustuloksiin

Mitatut lämmönjohtavuudet erityisesti koesarjassa 1 olivat korkeampia kuin Ehta-eristeelle tuotesertifikaatissa mitatut arvot sekä Brnon teknillisessä yliopistossa mitatut arvot (Fedorik, 2021) (Paibira. Oulun Ammattikorkeakoulu, 2020). Tämän vuoksi kokeiltiin vaikuttavatko tiheys ja materiaalin kosteuspitoisuus tuloksiin. Samoin kokeiltiin lämpövirran suunnan vaikutusta koetuloksiin. Tulokset näistä neljästä kokeesta erilaisilla asetuksilla on esitetty taulukossa 4.12.

Ensimmäisessä kokeessa (koe 1) pyrittiin mittaamaan lämmönjohtavuus löyhimmällä mahdollisella tiheydellä, johon koekappaleen sai valmistettua. Kehys ripoteltiin varovasti täyteen ja löyhin tiheys 50 % RH suhteellisessa kosteudessa, jolla kappaleen sai valmistettua oli 80 kg/m³. Koe tehtiin samoilla asetuksilla kuin koesarja 1, toteutusohjeen mukaisesti ylälevyn ollessa kylmä levy. Tulos oli vastaava kuin koesarjassa 1, jopa korkeampi.

Koe 2 tehtiin uunikuivatulla materiaalilla 100 kg/m³ tiheydellä. Samalla vaihdettiin levyjen lämpötiloja, siten että ylälevy oli lämmin levy ja samalla pienennettiin lämpötilaeroa levyjen välillä. Uunikuivatulle materiaalille tulos oli tällöin tuotesertifikaattia vastaava 0,045 W/(mK). Tuotesertifikaatin mittaukset on tehty kuivatulle materiaalille. Tämä on normaali käytäntö hygroskooppeiden materiaalien tuoteominaisuuksia mitattaessa. Esimerkiksi ruotsalaiset käyttävät lämmöneristeiden tyyppihyväksyntä- ja laadunvalvontamittauksissa alalevyä kylmänä levynä (Valovirta, 2005).

Koe 3 tehtiin koesarjaa 1 vastaavalle 50 % RH kosteudessa tasapainotetulle koekappaleelle siten, että levyjen välistä lämpötilaeroa laskettiin 20 °C asteesta 10 °C asteeseen. Pienempi lämpötilaero oletettavasti pienentää ilman liikettä levyjen välillä ja siten kondenssia. Tällä ei havaittu olevan vaikutusta koetulokseen. Päinvastoin, lämmönjohtavuus kasvoi.

Koe 4 tehtiin siten, että keskilämpötilaa nostettiin 10 °C asteesta 15 °C asteeseen ja alalevy vaihdettiin kylmäksi levyksi. Tällöin saatiin alempia lämmönjohtavuuden arvoja. Tämän perusteella voi päätellä, että ylälevyn ollessa kylmä levy, kondenssi on vaikuttanut koetuloksiin koesarjassa 1.

Taulukko 4.12. Ehta, vertailu erilaisilla tiheyksillä, suhteellisilla kosteuksilla ja kalibrointitiedostolla.

Koe	Koekappale	ϕ [% RH]	$T_{ylä}$ [°C]	T_{ala} [°C]	T_{ka} [°C]	Kalibrointi	$\lambda_{mitattu}$ [W/(mK)]
1	Ehta 80 kg/m ³	50	0	20	10	IRMM-PTS- 2011-04-14	0,0562
2	Ehta 100 kg/m ³	0	15	5	10	NIST1450bCa- libration_355	0,0447
3	Ehta 100 kg/m ³	50	5	15	10	IRMM-PTS- 2011-04-14	0,0596
4	Ehta 100 kg/m ³	50	20	10	15	IRMM-PTS- 2011-04-14	0,0499

Koska tässä diplomityössä tavoitteena oli tutkia materiaaliominaisuuksia ECOSAFE-projektin rakenne-elementtien asennustiheyksissä ja niissä kosteusolosuhteissa, joita rakenteessa esiintyy, kuivana mitatulla lämmönjohtavuudella ei tavoitteen kannalta ole merkitystä. Tulosten perusteella päätettiin lämmönjohtavuuskokeet toistaa siten että ylälevy on lämmin ja alalevy kylmä.

Mittaukset, koesarja 2

Kokeet toistettiin siten, että lämpövirran suunta oli alaspäin ja lämpötilaeroa levyjen välillä pienennettiin. Kappaleet olivat samoja, joita käytettiin ensimmäisessä koesarjassa.

Kalibrointitiedostona käytettiin laitteen omaa NIST1450bCalibration_355 -tiedostoa. Ylälevyn lämpötilaksi asetettiin 15 °C ja alalevyn lämpötilaksi 5 °C, keskilämpötilan ollessa sama kuin koesarjassa 1 eli 10 °C. Muutoin kokeet toistettiin samoin kuin koesarjassa 1.

Taulukossa 4.11 on esitetty koesarjan 2 lämmönjohtavuusmittausten tulokset, keskihajonta ja luottamusväli. Koekappalekohtaiset tulokset on esitetty liitteessä A2.

Taulukko 4.13. *Lämmönjohtavuudet, keskihajonta, luottamusväli, koesarja 2.*

Materiaali	φ [% RH]	λ [W/(mK)]	Keski- hajonta	L.väli 95 %	Alaraja	Yläraja
Ehta 100 kg/m ³	13	0,048	0,0005	±0,0012	0,047	0,049
	50	0,053	0,0001	±0,0003	0,053	0,053
	94	0,067	0,0009	±0,0023	0,064	0,069
Pölkky 180 kg/m ³	13	0,051	0,0002	±0,0004	0,051	0,052
	50	0,059	0,0002	±0,0004	0,058	0,059
	94	0,070	0,0003	±0,0007	0,069	0,070
Pölkky-sav. 266 kg/m ³	13	0,055	0,0014	±0,0034	0,052	0,059
	50	0,060	0,0006	±0,0015	0,058	0,061
	94	0,071	0,0012	±0,0031	0,068	0,074
Nimetön 66,5 kg/m ³	50	0,054	0,0006	±0,0014	0,052	0,055

4.4.5 Virhelähteet ja kokeen onnistumisen arviointi

Kun laitteen kalibrointi on tarkistettu, laitteen antaman tuloksen virhe standardinmukaisessa kokeessa huonelämpötilassa on alle 3 %.

Hygroskooppisella materiaalilla suurin virhe tulokseen muodostuu kosteudesta. Erityisesti 50 % RH ja 94 % RH kosteuksissa mitatuissa lämmönjohtavuuden arvoissa ja harvemmillä materiaalitiheydellä (Ehta) voi olla virhettä. Koekappaleessa kokeen aikana höyrystyvä vesi pyrkii siirtymään pienempää osapainetta, eli kylmää levyä kohti. Tämä vaikutus on suurempi harvemmillä materiaalitiheydellä. Mikäli ylälevy on kylmempi, saattaa sen pintaan kertynyt kosteus kondensoitua ja avohuokaisen eristemateriaalin kyseessä ollessa valua keskelle koekappaletta. Kosteus lisää lämmönjohtavuutta. Myös veden höyrystymisessä sitoutuva faasimuutosenergia ja vesihöyryn siirtyminen takaisin kohti kylmempää pintaa eli ns. lämpöputki-ilmiö aiheuttaa lisän kappaleen läpi kulkevaan lämpövirtaan. Tällöin mitatut lämmönjohtavuusarvot ovat suurempia kuin todellisessa käyttötilanteessa (Valovirta, 2005). Koesarjassa 2 vaihdettiin alalevy kylmäksi levyksi, koska tämä pienentää kondenssin ja ns. lämpöputki-ilmiön vaikutusta.

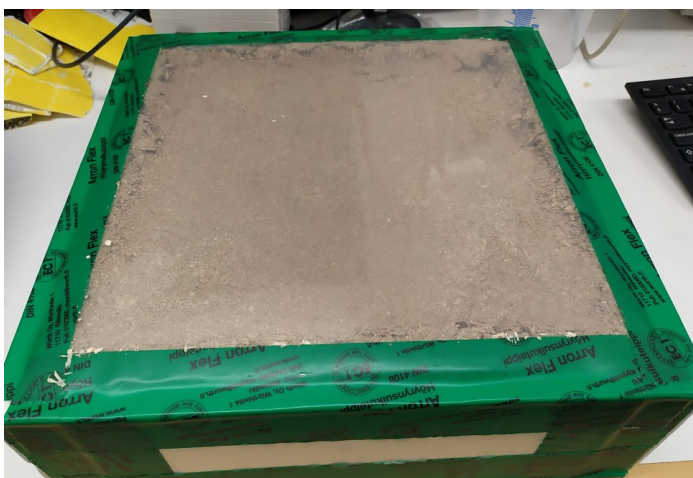
Kokeessa kosteuden siirtymistä ja kondenssia pyrittiin myös pienentämään alentamalla levyjen välistä lämpötilaeroa tavanomaisesta 20 °C lämpötilaerosta 10 °C lämpötilaeroon. Liian pientä lämpötilaeroa käytettäessä mittaustarkkuus kuitenkin kärsii lämpötila-anturien ja lämpövirtalevyjen mittaustarkkuuden tullessa vastaan (Valovirta, 2005).

Suuressa 94 % kosteudessa mitatuissa arvoissa on oletettavasti kosteudesta aiheutunutta virhettä ja todellista korkeampi mitattu lämmönjohtavuus.

Yksiselitteisten tulosten saamiseksi lämpövirtalevyllä, sekä muilla termiseen jatkuvuustilaan perustuvilla laitteilla, tulisi mitata vain kuivia koekappaleita. Käytännössä puupohjaiset sitovat huoneolosuhteissakin jo 5-10% painoprosenttia kosteutta. Tällainen kosteusmäärä riittää vaarantamaan mittausten yksikäsitteisyyden. Kosteilla kappaleilla lämpövirran tasoittuminen kestää lisäksi kauemmin kuin kuivilla. (Valovirta, 2005). Koska kokeessa oli nimenomaan tarkoitus tutkia materiaalin lämmönjohtavuutta eri kosteuksissa, tätä virhelähdettä ei voitu välttää.

Ilmarako koekappaleen ja lämpövirtalevyn välissä aiheuttaa virhettä tulokseen. Kostuminen ja kuivuminen näkyivät kokeen aikana siinä, että materiaali turposi ja toisaalta kutistui jättäen ilmaraon. Valmistettaessa koekappale 50 % RH kosteudessa ja mittauskosteuden ollessa 11 % ja 94 % koekappaleen tiheys muuttui ja ilmarakoa kokeessa ei voinut täysin välttää. Lisäksi koekappaleiden liikuttelu aiheutti painumista erityisesti harvemmillä tiheyksillä.. Ilmaraolla ja huonolla kontaktilla ei lämmöneristemateriaalilla kuitenkaan ole samalla tavoin merkittävä kuin suuremman lämmönjohtavuuden omaavalla materiaalilla, eikä tuloksissa näkynyt että tästä olisi aiheutunut merkittävää virhettä.

Lämmönjohtavuuskokeen Pölkky-savetettu eristeen koekappaleissa oli lisäksi havaittavissa, että savijauhoa valui kehyksen pohjalle. Näin tapahtui oletettavasti, koska koekappaleita liikutettiin punnitusten yhteydessä.



Kuva 4.6 Lämmönjohtavuuskoe, savijauhoa irtosi materiaalista kehyksen pohjalle.

Lämmönjohtavuuskokeen tuloksina raportoitiin koesarjan 2 tulokset. Tuloksissa on laskettu lämmönjohtavuuskokeiden tuloksista keskihajonta ja luottamusväli Studentin jakaumana.

4.5 Hygroskooppinen tasapainokosteus

Hygroskooppisessa tasapainokosteuskokeessa määritettiin materiaalinäytteen tasapainokosteuskäyrä; kosteus määrä tilavuuden funktiona [kg/m^3] tai kosteus määrä suhteessa kuivamassaan [kg/kg]. Tasapainokosteuskäyrä määritettiin erikseen adsorptiossa eli ympäristöä kuivemmalle kappaleelle, joka imee kosteutta ympäristöstä ja desorptiossa eli ympäristöä kosteammalle kappaleelle, joka luovuttaa kosteutta ympäristöön. Koe suoritettiin standardin SFS-EN ISO 12571 (SFS-12571, 2014) mukaisesti. Poikkeuksista standardin vaatimukseen on mainittu tässä esityksessä erikseen.

Tasapainokosteuskokeet toteutettiin ripotellulle irtotiheydelle. Tasapainokosteus määritettiin lisäksi lämmönjohtavuuskokeiden koekappaleista, jotka tehtiin rakennekokeita vastaavilla tiheyksillä.

4.5.1 Standardi SFS-EN ISO 12571

Standardin SFS-EN ISO 12571 (SFS-12571, 2014) mukaisessa kokeessa kosteuspitoisuus lasketaan punnitsemalla koekappale sekä kuivattuna, että eri kosteusolosuhteissa. Koekappale tai koe-erä tulee punnita 0,1 % tarkkuudella ja koekappaleen mitat määrittää 0,5 mm tarkkuudella. Koe tehdään tavallisesti laboratoriolämpötilassa ($23 \pm 0,5$) °C. Koekappaleen kuivamassa määritetään kuivaamalla kappaletta (105 ± 2) °C lämpötilassa, mikäli materiaalin ominaisuudet eivät rajoita lämpötilaa. Kuivattu kappale jäädytetään, kunnes sen lämpötila on 30-40 °C ja sen jälkeen kappale punnitaan.

Tasapainotila kussakin kosteudessa tulkitaan saavutetuksi, kun kappaleen massa muuttuu korkeintaan 0,1 % kolmessa perättäisessä 24 tunnin välein tehdyssä punnituksessa. Materiaalilla joka imee tai luovuttaa kosteutta hitaasti, massanmuutos voi kuitenkin olla niin hidasta, että käytännössä tasapainottuminen on määritettävä graafisesti kuvaajasta.

Standardinmukaisessa kokeessa kappale punnitaan vähintään neljässä kosteuspisteessä, jotka valitaan mahdollisimman tasavälein väliltä 30-90 % RH. Koekappaleen

vähimmäispaino on 10 grammaa ja materiaalille, jonka kuivatiheys on alle 300 kg/m^3 , koekappaleen avoin pinta-ala tulee olla vähintään $100 \times 100 \text{ mm}^2$. (SFS-12571, 2014)

4.5.2 Koekappaleiden valmistus

Kokeet tehtiin kahdessa osassa, ensin aiemmin saapuneille Ehta, Pölkky ja Pölkky-savetettu kutterinlastuille yhdessä ja myöhemmin saapuneelle Nimetön kutterinlastulle erikseen. Koekappaleet valmistettiin alumiiniastioihin (kuva 4.7). Alumiiniastiat olivat alaosastaan kapenevia sivumittojen ollessa yläosasta $131 \pm 1 \text{ mm} \times 192 \pm 1 \text{ mm}$, joka täyttää standardin vaatimukset. Astioiden tilavuudeksi määritettiin $0,000958 \text{ m}^3 \pm 7,5 \%$.



Kuva 4.7 Tasapainokosteuskoekappaleita valmistettuna, etualalla tyhjiä astioita.

Tasapainokosteuskokeen yhteydessä pyrittiin määrittämään materiaaleille mahdollisimman tarkasti niiden ominaisirtotiheys $50 \% \text{ RH}$ kosteudessa. Koekappaleet valmistettiin ripottelemalla ja tasaamalla $50 \% \text{ RH}$ kosteuteen tasapainotettua lastua alumiiniseen astiaan. Valmistuksen jälkeen koekappaleet vielä tasapainotettiin uudestaan $50 \% \text{ RH}$ kosteudessa.

Ehta, Pölkky ja Pölkky-Savetettu materiaaleille tehtiin neljä kolmen koekappaleen erää kustakin materiaalista: kaksi erää adsorptiokäyrän mittausta varten ja kaksi erää desorptiokäyrän mittausta varten. Nimetön kutterinlastun osalta valmistettiin kokeen nopeuttamiseksi kahdeksan erää, yksi kutakin adsorptio- ja desorptiokäyrän pistettä kohti. Koekappaleiden valmistuksen jälkeen ne tasapainotettiin vielä uudestaan $50 \% \text{ RH}$ kosteudessa ja punnittiin, jotta kaikille koekappaleille saatiin punnittua niiden massa samoissa olosuhteissa.

4.5.3 Mittaukset

Materiaalin tasapainokosteus määritettiin 13, 39, 50, 75 ja 94 % RH suhteellisissa kosteuksissa ja 23 °C lämpötilassa. Adsorptiokäyrän koekappaleet vietiin valmistuksen ja alkutasapainotuksen jälkeen tasapainottumaan 11 % RH olosuhdekaappiin ja desorptiokäyrän kappaleet vastaavasti 94 % RH kosteuteen olosuhdekaappiin.

Käytännössä kosteuskaapin kosteus tasapainottui hieman eri kosteuteen riippuen materiaalilaboratorion kosteudesta. Olosuhdevaihtelu oli kuitenkin standardin vaatiman vaihteluvälin sisällä ja pysyi riittävän vakaana. Olennaista kokeen kannalta on, että kappale pysyy adsorptiossa tai desorptiossa riippuen kumpaa tilaa ollaan mittaamassa.

Koekappaleiden saavutettua tasapainotilan kyseisessä kosteudessa ne siirrettiin seuraavaan kosteuteen. 50 % RH kosteusolosuhde toteutettiin olosuhdehuoneessa, 33 % RH ja 75 % RH olosuhteet toteutettiin kosteuslaatikoissa olosuhdehuoneessa.

Kussakin kosteusolosuhteessa kappale voitiin katsoa tasapainottuneeksi, kun kolmessa perättäisessä vähintään 24 tunnin välein tehdyssä punnituksessa kappaleen massan muutos oli alle 0,1 %. Käytännössä tasapainotusta vielä jatkettiin ja varmistuttiin että kappale oli tasapainottunut kyseisessä kosteudessa.

Kustakin materiaalista kuivattiin uunissa 105 °C lämpötilassa kolmen koekappaleen erä, jonka jälkeen niiden annettiin jäähtyä n. 30 °C lämpötilaan ja ne punnittiin.

4.5.4 Kosteuspitoisuuden laskenta

Uunikuivattujen koekappaleista määritettiin kuivamassan m_0 [kg] ja alkutasapainotuksessa punnitun massan m_{alkutp} suhde ja näiden suhteiden keskiarvona kullekin materiaalille kerroin k kaavalla 4.6

$$k = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^{n=3} \frac{m_{n,0}}{m_{n,alkutp}} \quad (4.6)$$

Muille koekappaleille laskettiin kuivamassa kertomalla alkutasapainotuksessa saatu massa suhdeluvulla k , jolloin niille saatiin määritettyä kaavalla 4.7 niiden laskennallinen kuivamassa

$$m_0 = k \cdot m_{alkutp} \quad (4.7)$$

Koekappaleen massa m kussakin kosteusolosuhteessa määritettiin tasapainottuneeksi tulkittujen kolmen punnituksen keskiarvona. Mittaustuloksista kunkin kappaleen kosteuspitoisuus [kg] laskettiin kaavalla (4.8).

$$u_v = m - m_0 \quad (4.8)$$

missä u_v [kg] on kappaleen kosteuspitoisuus kosteusolosuhteessa ja

m [kg] on koekappaleen massa kosteusolosuhteessa

Kosteuspitoisuus tilavuuden suhteen [kg/m^3] laskettiin jakamalla kosteuspitoisuus u_v koeastian tilavuudella u_v/V_{astia} . Suhteellinen kosteuspitoisuus laskettiin kosteuspitoisuuden suhtena kuivamassaan u_v/m_0 . Tämän jälkeen materiaalin kosteuspitoisuus laskettiin koekappaleiden kosteuspitoisuuksien keskiarvona.

4.5.5 Tasapainokosteus lämmönjohtavuuskokeiden koekappaleista

Materiaalitiheydellä on vaikutusta tasapainokosteuskäyrään, jos se muuttaa merkittävästi materiaalin huokosrakennetta. Tämän vuoksi tiheyden vaikutus oli tarpeen tutkia erikseen.

Lämmönjohtavuuskokeet tehtiin rakennetiheyksiä vastaavissa tiheyksissä ja ne tasapainotettiin 11, 50 ja 95 % RH kosteuksissa. Lämmönjohtavuuskokeen koekappaleita voitiin hyödyntää tiheyden vaikutuksen selvittämiseen. Vertailun tulokset on esitetty taulukossa 4.12. Taulukossa tähdellä merkityt kuivatiheydet on laskettu aiemmin esitetyllä kaavalla 4.7.

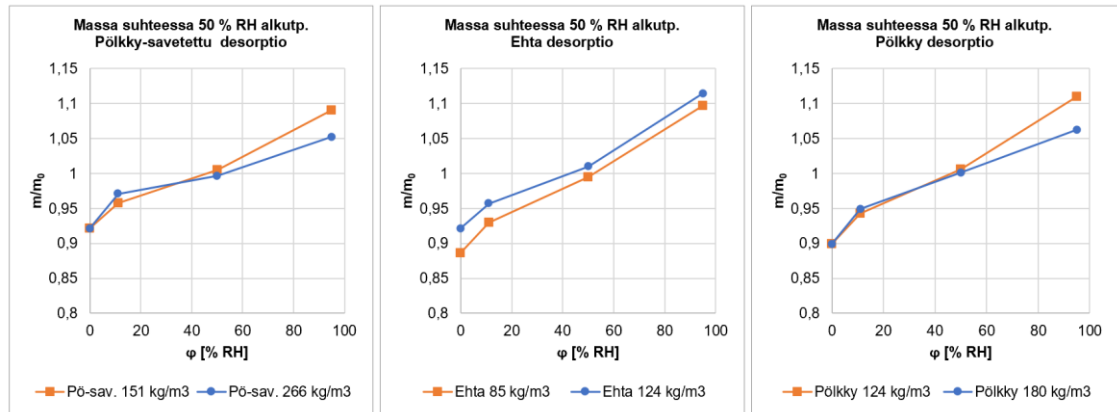
Taulukko 4.14. Tiheysvertailu ja kuivatiheydet, tasapainokosteuskoe ja lämmönjohtavuuskoe.

Tiheydet tasapainokosteuskokeessa kg/m ³						
	Desorptio			Adsorptio		
	Pölkky-sav	Ehta	Pölkky	Pölkky-sav	Ehta	Pölkky
φ [% RH]	3.x	3.x	3.x	1.x	1.x	1.x
0	139,50	74,92	111,11	140,41*	76,59*	110,84*
11	144,96	78,64	116,56	146,50	78,55	116,68
50	152,15	84,08	124,30	150,51	81,68	121,19
95	165,04	92,75	137,21	166,73	93,00	137,05
alkutp-50	151,39	84,55	123,57	152,38	83,12	123,27

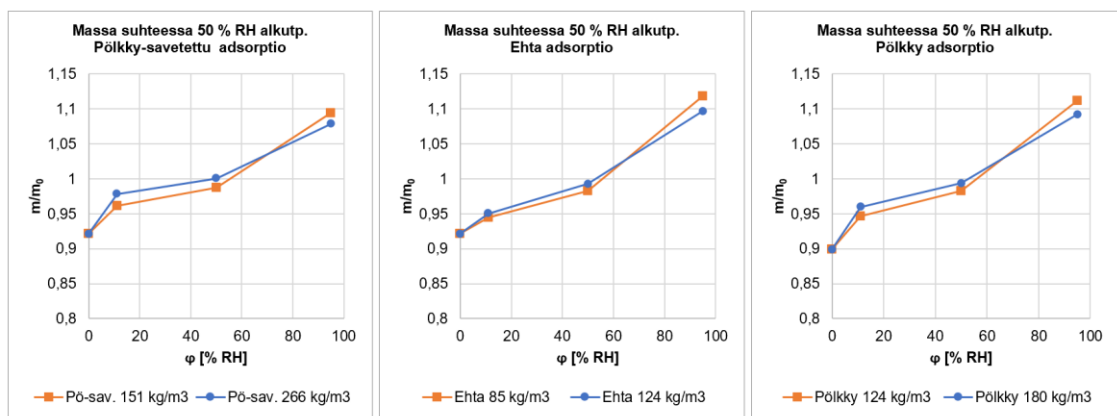
Tiheydet lämmönjohtavuuskokeissa kg/m ³						
	Desorptio			Adsorptio		
	Pölkky-sav	Ehta	Pölkky	Pölkky-sav	Ehta	Pölkky
φ [% RH]	4.x	2.x	4.x	3.x	1.x	3.x
0	244,69*	114,28*	161,76*	243,63*	113,15*	162,48*
11	257,80	118,69	170,78	258,68	116,72	173,45
50	264,61	125,25	180,12	264,62	121,91	179,57
95	279,43	138,21	191,10	285,17	134,66	197,32
alkutp-50	265,55	124,02	179,90	264,40	122,79	180,71

Kuvissa 4.8 ja 4.9 on esitetty taulukon arvoista laskettuna eri kosteusolosuhteissa sitoutuneen kosteuden määrän suhde alkutasapainotuksessa sitoutuneeseen kosteuden määrään (alkutp-50). Mikäli tiheydellä ei ole vaikutusta tasapainokosteuteen, kuvaajissa ei pitäisi olla eroa.

Pölkky ja Pölkky-savetettu kohdalla on nähtävissä, että korkeassa suhteellisessa kosteudessa kosteuden määrä suhteessa alkutasapainotuksessa mitattuun kosteuden määrään laskee, kun tiheys on ollut suurempi. Eroa 95 % RH kosteudessa laskennallisen kosteuden ja punnitun kosteuspitoisuuden välillä on noin 5 %. Tämä tarkoittaa, että tasapainokosteuskäyrän muoto on loppuosaltaan jyrkemmin nouseva. Ero on kuitenkin niin pieni, että muutos olosuhteissa tasapainokosteuskokeen ja lämmönjohtavuuskokeiden välillä (laboratorion ja kosteuskaapin kosteus ja lämpötila) saattaa jo selittää eroja. Suurilla kosteuksilla kosteuskaapeissa saattoi myös kondenssi vaikuttaa tuloksiin.



Kuva 4.8 Koekappaleisiin sitoutunut kosteuden määrä desorptiossa suhteessa alkutasapainotuksessa sitoutuneeseen kosteuden määrään.



Kuva 4.9 Koekappaleisiin sitoutunut kosteuden määrä adsorptiossa suhteessa alkutasapainotuksessa sitoutuneeseen kosteuden määrään.

4.5.6 Virhelähteet ja kokeen onnistumisen arviointi

Tasapainokosteuden määrittäminen on yksinkertainen, mutta pitkäkestoinen koe. Pitkäkestoisesta kokeesta aikana merkittävin virhelähde on olosuhteiden muuttuminen.

Ennen koetta mitattavia suureita olivat koekappaleen massa alkutasapainotuksen yhteydessä ja koeastian mitat ja massa. Koeastioiden tilavuus määritettiin sekä laskennallisesti mitoista, että täyttämällä 10 koeastiaa vedellä ja laskemalla veden tiheyden perusteella näiden tilavuuksien keskiarvo. Tulokseksi saatiin molemmilla tavoilla $0,000958 \text{ m}^3$. Laskennallinen virhe tilavuudelle on $\pm 7,5 \%$. Virhe koeastian tilavuudessa vaikuttaa ainoastaan arvioituun materiaaliitiheyteen, ei kosteusmäärään astiassa. Koeastioiden massa laskettiin 10 koeastian keskiarvona.

Kokeiden aikana mitattava suure oli koekappaleiden massa. Standardin vaatimus vaadittu tarkkuus $0,1 \%$. Käytettyjen vaakojen tarkkuus oli vähintään $0,01 \text{ g}$. Jos

mahdollista, punnitukset tulisi tehdä samalla vaa'alla. Tässä tutkimuksessa tämä ei ollut käytännössä mahdollista. Kaikki koekappaleet punnittiin alkutasapainotuksen yhteydessä samalla vaa'alla. Punnitusten yhteydessä vaakojen tarkkuutta testattiin kalibrointipunnuksilla. Kalibrointipunnituksissa suurin virhe oli 0,15 g, jolloin koekappaleiden massan ollessa 150 g jolloin punnitustarkkuus oli 0,1 %. Punnitustuloksille ei tehty kalibrointikorjausta.

Kosteuspitoisuuden laskentaa varten koekappaleille määritettiin kuivamassa. Kuivamassan määrittäminen tapahtui yhdestä kolmen kappaleen erästä kullekin materiaalille desorptiokäyrän lopuksi. Kuivamassan määrittäminen puulle, jossa on myös kemiallisesti sitoutuneena kosteutta, ei ole yksiselitteistä. Uunikuivauksella kaikki kosteus ei ole poistettavissa. Toisaalta se ei ole tarkoituksenmukaistakaan, sillä kuivassa puussa oleva kosteus on osa materiaalia. Liian pitkä uunikuivaus poistaa puusta myös uuteaineita. Uunikuivauksen vaikutusta kokeiltiin erikseen ja havaittiin, että kutterinlastun massa kyllä jatkaa putoamista kuukausienkin uunikuivauksen jälkeen. Kirjallisuudessa todetaan, että kappale katsotaan kuivaksi kun se on ollut 105 °C lämpötilassa uunissa vähintään 24 tuntia. Koekappaleita kuivattiin uunissa viikko ja punnittiin tänä aikana useaan kertaan. Kuivamassaksi tulkittiin massa, kun massanmuutoksen alun jyrkkä lasku oli tasaantunut käytännössä lineaariseksi.

Tasapainokosteuteen vaikuttavat ympäröivä todellinen suhteellinen kosteus ja lämpötila. Pitkäkestoisen kokeen aikana olosuhteita on syytä seurata. Hitaammin reagoiville materiaaleille (kuten betoni) lyhytaikaiset kosteusvaihtelut eivät ole merkittäviä, mutta puumateriaali reagoi nopeasti kosteusvaihteluihin. Mikäli kosteuskaapissa pääsee suhteellinen kosteus muuttumaan, kun kappale on jo saavuttamassa tasapainokosteutta, kappale ei välttämättä enää olosuhteiden muuttuessa olekaan tavoitellussa tilassa, joko adsorptiossa tai desorptiossa, vaan jotain siltä väliltä. Suhteellisen kosteuden vaihdellessa kosteuspitoisuus koekappaleessakin asettuu jonnekin adsorptio- ja desorptiokäyrien välille. Suurissa kosteuksissa myös kosteuskaapissa tai laatikossa tapahtuva kondenssi vaikuttaa tulokseen.

Myös lämpötila vaikuttaa tasapainokosteuteen. Lämpötila oli kuitenkin helpommin hallittavissa ja oli eri olosuhteissa standardin vaatimalla välillä. Koska eri kosteusolosuhteet toteutettiin tarkkuudeltaan erilaisissa olosuhteissa, eri olosuhteissa on

erilainen virhe. Punnitusten yhteydessä vallitseva olosuhdetieto merkittiin punnituspäiväkirjaan.

Mittaustuloksista laskettiin kussakin kosteudessa punnituista tuloksista keskihajonta ja 95 % luottamusväli käyttäen Studentin t-jakaumaa. Liitteessä (Liite B1) on esitetty mittausepävarmuus kokeiden osalta. Esimerkiksi Ehdan osalta 50 % RH kosteudessa 95% varmuudella kosteuspitoisuus on $(7,00 \pm 0,04) \text{ kg/m}^3$, eli hyvin pieni vaihtelu. Tuloksista on nähtävissä, että koekappaleiden välinen hajonta kasvaa suuremmissa kosteuksissa. Tämä vastaa hyvin kirjallisuudessa esitettyä puun käyttäytymistä. Suurissa kosteuksissa kapillaarisuus korostuu ja pienilläkin kosteuseroilla on suurempi vaikutus tasapainokosteuteen. Tämä lisää myös hajontaa. Toisaalta eri kosteusolosuhteita toteutettaessa oli erilainen tarkkuus, millä suhteellinen kosteus saatiin ylläpidettyä tasaisena, joten se näkyy myös tuloksissa hajontana. Suuressa 95 % RH kosteudessa tapahtui helpommin myös kondensoitumista jo pienelläkin kappaleen ja kosteuskaapin ilman välisellä lämpötilaerolla.

4.6 Vesihöyrynläpäisevyys

Vesihöyrynläpäisevyys ilmoittaa sen vesimäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen vesihöyrynpitoisuuksien tai vesihöyryn osapaine-ero on yksikön suuruinen.

Vesihöyrynläpäisykoe tehtiin märkäkuppikokeella, kuivia olosuhteita kuvaavalla 11-50 % RH kosteusparilla ja kosteita olosuhteita kuvaavalla 50-95 % RH kosteusparilla. Kosteusparilla 50-95 % RH koe suoritettiin olosuhdehuoneessa. Kosteusparilla 11-50 % RH koe suoritettiin olosuhdekaapissa.

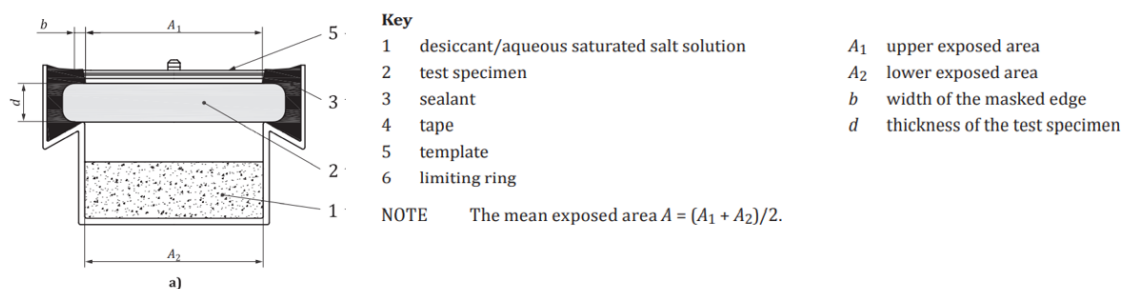
Osana tutkimusta täydennettiin vesihöyrynläpäisykokeen koemenetelmää irtomateriaalin testaamiseen sopivaksi. Tukilevynä kokeiltiin ensimmäisessä koesarjassa fermacell-kuitukipsilevyä ja toisessa koesarjassa tukilevyn ja vahauksen sijasta muoviverkkoa, korotettua materiaalitilaa ja teippausta.

4.6.1 Standardi SFS-EN ISO 12572

Märkäkuppikokeessa noudatettiin soveltuvin osin standardia SFS-EN ISO 12572:2016 (12572:2016, 2016). Märkäkuppikokeessa koekupin sisälle luodaan haluttu kosteuspitoisuus kylläisellä suolaliuoksella. Koekupin ympäristössä ylläpidetään tasaiset lämpötila- ja kosteusolosuhteet. Märkäkuppikokeessa kosteusvirran suunta on kupista ulospäin. Koekuppina käytetään lasista tai metallista astiaa. Suositeltavaa on käyttää pyöreää läpinäkyvää kuppia, sillä se on helpompi tiivistää ja läpinäkyvyys helpottaa suolaliuoksen tarkkailua kokeen aikana.

Koekappaleen mitat tulee mitata 0,2 mm ($\pm 0,5$ %) tarkkuudella. Ilmatilan suolaliuoksen ja koekappaleen välissä tulee olla (15 ± 5) mm. Ilmatila tulisi mitata 1 mm tarkkuudella. Koekappaleen yläpuolisen ilmatilan vesihöyrynvastus tulee minimoida riittäväällä ilmanvaihtuvuudella koekupin ympärillä. Ilmatilan vaikutus matalan vesihöyrynvastuksen ($S_d < 0,1$ m) omaavilla materiaaleilla on merkittävä. Materiaalin annetaan ennen koekappaleen valmistusta tasapainottua 28 päivää (23 ± 5) °C lämpötilassa ja (50 ± 5) % RH kosteudessa.

Standardin liitteessä A määritetään soveltuva menetelmä koekupin valmistukseen kiinteille materiaaleille (kuva 4.10). Koemateriaalin tiivistämiseen kuppiin voidaan käyttää esimerkiksi 60 % mikrovahaa ja 40 % parafiinia sisältävää sekoitusta. Tiivistemateriaalin tulisi pysyä joustavana testin ajan. Sula tiiviste saattaa tunkeutua huokoiseen materiaaliin vaikuttaen testin tulokseen. Tällaisten materiaalien reunat tulisi tiivistää teipillä tai epoksilla ennen varsinaista tiivistämistä.



Kuva 4.10 Märkäkuppikoe kiinteälle materiaalille (SFS-EN ISO 12572:2016).

Standardin liitteessä B määritetään soveltuva menetelmä irtomateriaalille (kuva 4.11). Testattavan materiaalinäytteen tulee olla partikkelikooltaan ja jakaumaltaan edustava otos

koko materiaalista käyttötarkoituksessaan. Koekappale tuetaan verkolla tai hyvin vesihöyryä läpäisevällä kalvolla kauluksellisen testikupin kaulukselle. Mikäli käytetään verkkoa tai kalvoa, joka itsessään vaikuttaa vesihöyrynläpäisevyyteen, määritetään tukikerroksen vesihöyrynläpäisevyys tällaiselle koekappaleelle ilman materiaalitäyttöä.

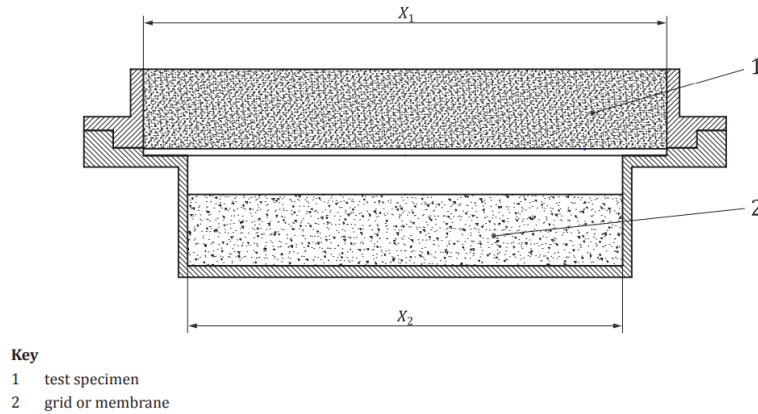


Figure B.1 Suitable cup for loose fill

Kuva 4.11 Vesihöyrynläpäisykokeen koekuppi irtomateriaalille (12572:2016, 2016).

Irtomateriaalilla materiaalipaksuuden tulisi olla vähintään 100 mm, jotta rajoitetaan virhettä, joka aiheutuu epätarkkuudesta materiaalin paksuuden mittaamisessa. Koska irtomateriaalia ei voida tiivistää koekuppiin, materiaalin reunaylityksen tulee olla vähintään 20 mm. Tyypillisesti irtomateriaalin vesihöyrynläpäisevyys on niin suuri, että reunavuodosta aiheutuvan virheen katsotaan olevan pieni.

Verkkoa käytettäessä tehollinen alue lasketaan mittojen X_1 ja X_2 keskiarvona. Käytettäessä tukikalvoa tai tukilevyä, sen vesihöyrynvastus Z_m vähennetään yhteisestä vesihöyrynvastuksesta Z_t ja materiaalin vesihöyrynvastus Z_s on erotus $Z_t - Z_m$.

$$Z_s = Z_t - Z_m \quad (4.9)$$

Kupissa olevan ilmatilan vastus on otettava huomioon. Kupin sisällä oleva ilma on materiaalikerros, samoin kuin tukilevy tai muut materiaalikerrokset. Suolaliuos muodostaa kupin sisälle tietyn suhteellisen kosteuden. Tämä suhteellinen kosteus on voimassa aivan lähellä suolaliuoksen pintaa. (12572:2016, 2016)

4.6.2 Reunavirhekorjaus

Standardin SFS-EN ISO 12572 liitteessä F esitellään reunavirhekorjaus, joka on tärkeä tehdä erityisesti paksulle koekappaleelle ja koekupille, joka on tehty käyttäen vahatiivistystä. Mikäli korjausta ei tehtäisi, tuottaisi koe materiaalille todellisuutta suuremman vesihöyrynläpäisevyyden. Tämä johtuu siitä, että laskennassa vesihöyrynläpäisevyys lasketaan suhteessa avoimeen pinta-alaan, mutta peitetyn reunan alueen kautta kiertäen, pääsee materiaalin läpi kosteusvirta, joka jäisi ilman korjausta huomioimatta. Virheeseen vaikuttaa koekappaleen, tai oikeammin peitetyn reunan paksuus suhteessa avoimen alueen halkaisijaan (Joy & Wilson, 1966). Kuvassa 4.12 on esitetty kosteusvirran prosentuaalinen lisä koekappaleen paksuuden ja läpimitan suhteen sekä peitetyn reunan ja paksuuden suhteen funktiona.

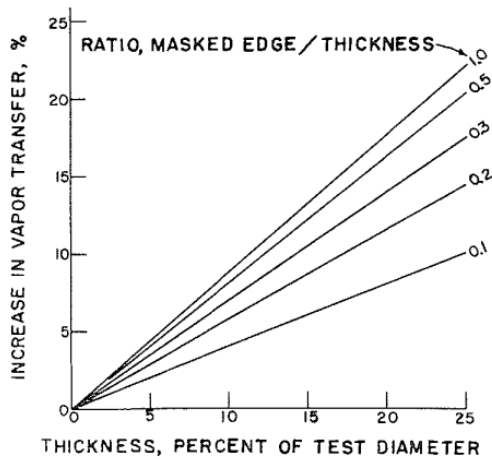


Fig. 3. Edge error due to masking.

Kuva 4.12 Peitetyn reunan aiheuttama reunavirhe (Joy & Wilson, 1966).

Tutkimusryhmän vesihöyrynläpäisykokeen toteutusohjeessa ja laskentapohjassa reunavirhekorjaus tehdään rutiininomaisesti aina. Korjattu kosteusvirta g_k lasketaan mitatusta kosteusvirrasta g standardin SFS-EN ISO 12572 mukaisella kaavalla (4.10).

$$\frac{g_k}{g} = 1 + \frac{4d}{\pi S} \ln\left(\frac{2}{1 + \exp\left(\frac{-2\pi b}{d}\right)}\right) \quad (4.10)$$

missä d on koekappaleen paksuus [m]

b on peitetyn reunan leveys [m]

S on avoimen alueen läpimitta [m]

Reunavirhekorjaus on suoraviivainen laskutoimitus tavanomaiselle koekappaleelle, jossa sekä koekappaleen, että mahdollisen tukilevyn osalta reuna on tiivistetty vahakerroksella. Kun tutkittava materiaali on irtomateriaalia, vain tukilevyn osalla on vahatiivistys. Vähennystä ei voi tehdä koko koekupille, sillä tämä aiheuttaisi virheen toiseen suuntaan ja todellista alhaisemman vesihöyrynläpäisevyyden. Toisaalta tarkan tuloksen saamiseksi tukilevyn osalta reunavirhekorjaus tukilevyn osalta kuitenkin tulisi tehdä. Tämän vuoksi tutkittavan materiaalin paksuuteen nähden paksun tukilevyn käyttäminen irtomateriaalille on ongelmallista. Ongelmaa käsitellään mm. Joyn ja Wilsonin artikkelissa (Joy & Wilson, 1966), jossa todetaankin että monikerrokselliselle koekappaleelle reunavirhekorjaus normaalilla vähennyksellä saattaa antaa virheellisen tuloksen. Keinoksi välttää virhettä mainitaan, että vahatiivistetty reuna tulisi pitää mahdollisimman kapeana (Joy & Wilson, 1966).

4.6.3 Koekappaleiden valmistus

Materiaali tasapainotettiin ennen kokeita 50 % RH kosteudessa ja 23 °C lämpötilassa olosuhdehuoneessa. Koekuppeina käytettiin kauluksellisia lasikuppeja, joiden materiaalitilan sisähalkaisija oli 142 mm, materiaalitilan korkeus 50 mm sekä alaosan, johon tuli suolaliuos, sisähalkaisija oli 123 mm. Kauluksen leveys oli tällöin noin 9,5 mm.

Kuppeihin laitettavat suolaliuokset (kaliumnitraatti 95 % RH ja magnesiumnitraatti 50 % RH) valmistettiin ensin suljettuun muoviasiaan, jossa ilman suhteellinen kosteus mitattiin ja todettiin sen vastaavan tavoiteltua suhteellista kosteutta. Kun koekuppeihin oli lisätty suolaliuosta, niihin lisättiin ruokalusikallinen suolaa liuoksen ylikylläisyyden varmistamiseksi. Suolan annostelua varten kupin reunaan merkittiin tussilla viiva 15 mm kohdalle kauluksesta. Näin ilmaväli kupissa saatiin tarkasti mitattua ja suolaliuoksen määrää voitiin kokeen aikana tarkkailla.

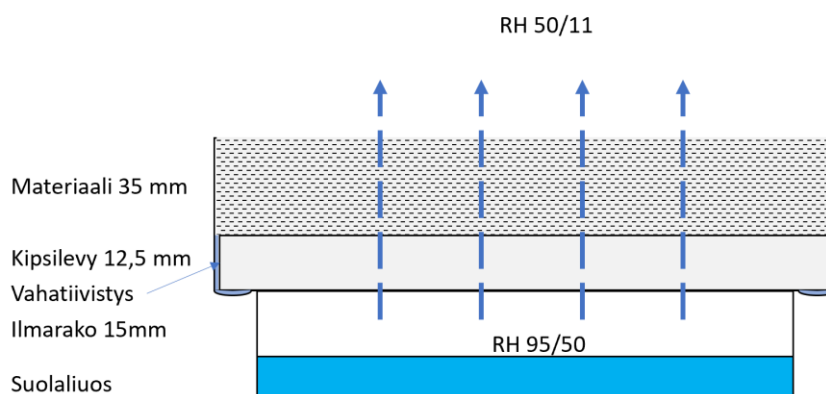
Koekappaleita valmistettaessa tulee koekuppia punnita joka vaiheen välissä. Muutoin irtomateriaalin tiheyttä ei saada tarkasti määriteltyä sullottaessa se suoraan koekuppiin. Punnitsemalla ja merkitsemällä ylös massa eri valmistusvaiheissa voitiin jälkikäteen laskea koemateriaalin massa ja tiheys. Samoin tukilevyn avoin pinta-ala ja paksuus vahatiivistyksineen ja materiaalitilan korkeus tukilevyn lisäämisen tulee merkitä muistiin.

Koesarja 1

Ensimmäinen koesarja kosteusparilla 50–94 % RH kosteudessa tehtiin vastaavasti kuin aiemmat kokeet. Tutkimusryhmässä on tehty aiemmin vesihöyrynläpäisykokeita irtomateriaaleille ja kalvomaisille materiaaleille (mm. muovimatot) siten, että tukilevynä on käytetty kipsilevyä. Tavallista kipsilevyä käytettäessä oli siinä kuitenkin havaittu runsastakin homehtumista. Homehtumisen välttämiseksi tässä tutkimuksessa päätettiin kokeilla Fermacell-kuitukipsilevyä tavallisen kipsilevyn sijaan.

Tukilevy tiivistettiin vahalla noudattaen standardin liitteen A periaatekuvaa (kuva 4.11). Vahana käytettiin sekoitusta, jossa oli 60 painoprosenttia Sasolvax -mikrovahaa ja 40 painoprosenttia puhdistettua parafiinia (SFS-EN ISO 12572:2016). Tukilevyn vahatiivistyksen ja punnituksen jälkeen koekuppiin lisättiin itse koemateriaali, tiivistäen tasaisesti painelemalla tavoitetiheyteen, vastaavasti kuin muissakin kokeissa.

Tukilevynä käytettiin 12,5 mm kipsilevyä. Tämän johdosta koekuppiin jäi mitattavalle kutterinlastulle ainoastaan 33,5 mm. Tukilevyn paksuus materiaalitalaan nähden oli suuri, 25 % kokonaispaksuudesta ja 37 % kutterinlastukerroksen paksuudesta. Tällöin tukilevyllä oli merkittävä vaikutus kosteusvirran suuruuteen. Materiaalille jäävä tila ei myöskään täyttänyt standardin vaatimaa 100 mm kerrospaksuutta. Koska koekappaleessa ainoastaan tukilevyn osalla olivat vahatut reunat, reunavirhevähennyksen tekeminen ei ollut suoraviivaista kosteusvirran läpäisemän pinta-alan muuttuessa tukilevyn ja materiaalin osuuksilla. Reunavuodolla ei irtomateriaalin kohdalla standardin mukaan ole merkittävää vaikutusta, mutta virheellisellä reunavirhevähennyksellä on merkittävä vaikutus lopputulokseen.



Kuva 4.13 Vesihöyrynläpäisykoe, koekuppi koesarjassa 1.

Koesarjat 2 ja 3

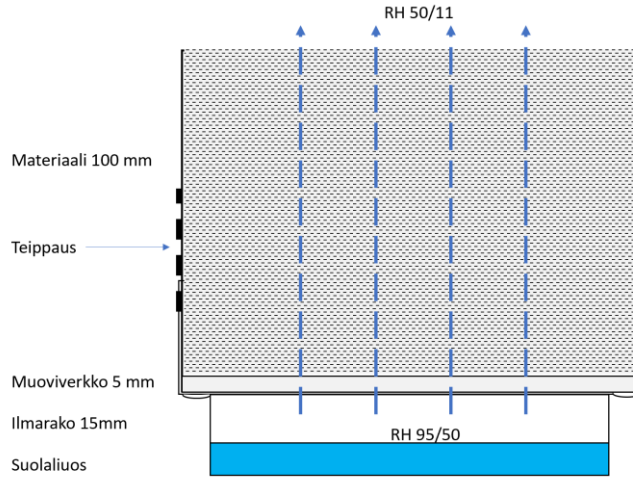
Toisessa koesarjassa 11–50 % RH kosteusparilla käytettiin kipsilevyn ja vahatiivistyksen sijasta 5 mm paksua tukevaa muoviverkkoa (kuva 4.14) ja ohutta paperia. Myös ritilän osalta vesihöyrynvastus mitattiin pelkälle ritilä-paperi yhdistelmälle erikseen. Koekupissa käytettiin lisäksi korotettua teipillä tiivistettyä 105 mm korkeaa ja paksuudeltaan 1,5 mm polykarbonaattimuovista valmistettua kaulusta. Kummassakin tapauksessa koe toistettiin myös kolmella tyhjällä kupilla tukilevyn vesihöyrynvastuksen määrittämiseksi. Muoviverkon tapauksessa tarkistettiin teipillä tiivistetyllä kupilla, että reunavuoto ei vaikuttanut merkittävästi tuloksiin.

Koesarjojen vertailtavuuden vuoksi Ehta-eristeelle toteutettiin myös 50–94 % RH kosteusparin koe muoviverkkoa tukilevynä käyttäen. Myöhemmin Nimetön kutterinlastulle tehdyissä kokeissa käytettiin muoviverkkoa tukilevynä molemmilla kosteuspareilla.



Kuva 4.14 Vesihöyrynläpäisevyys, koesarja 2, muoviverkko.

Ritilää käyttämällä vältettiin myös työläs ja siten virhealtis tukilevyn vahatiivistys syvään lasikuppiin. Koekupin valmistaminen oli nopeampaa. Valmistuksessa ei ollut kiire ja koekuppi ei mennyt yhtä helposti kokonaan pilalle vahan valuessa suolaliuokseen tai koekappaleen päälle.



Kuva 4.15 Vesihöyrynläpäisykoe, koekuppi koesarjoissa 2 ja 3.

4.6.4 Mittaukset

Kokeen aikana koekappaleita punnittiin toistuvasti noin kahden vuorokauden välein. Kosteusvirran laskemiseksi mitattiin massanmuutos (Δm_{12}) ajan funktiona

$$\Delta m_{12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \quad (4.11)$$

missä t_1 ja t_2 ovat peräkkäisten punnituskertojen ajanhetkiä kokeen alusta [s]

m_1 ja m_2 ovat vastaavien punnituskertojen punnitustulokset [kg]

Punnitusten aikana seurattiin kosteusvirran tasaantumista ja sen suuruutta, Näin havaittiin nopeasti, mikäli tuloksissa tapahtui odottamattomia muutoksia. Esimerkiksi reunavuoto kupissa näkyy kosteusvirran kuvaajassa siten, että kosteuvirta kasvaa aluksi suuremmaksi, kuin toisilla koekappaleilla ja lähtee myös laskemaan muita aiemmin johtuen siitä, että kosteusero kupin sisällä ja ulkopuolella laskee. Myös suolaliuoksen läikkyminen näkyy äkillisenä kosteusvirran kasvuna ja tämän jälkeen putoamisena. Kupin ulkopuolella tapahtuva muutos suhteellisessa kosteudessa näkyisi kaikissa koekappaleissa samalla tavalla.

Kosteusvirran G [g/h] (massanmuutoksen nopeuden) tasaannuttua, laskettiin liukuva keskiarvo vähintään viiden peräkkäisen punnitusvälin massanmuutoksista. Tavoitteena

on laskea tasaantunut kosteusvirta siten, että vähintään viiden perättäisen punnituksen massanmuutos eroaa niiden keskinäisestä keskiarvosta korkeintaan $\pm 5\%$.

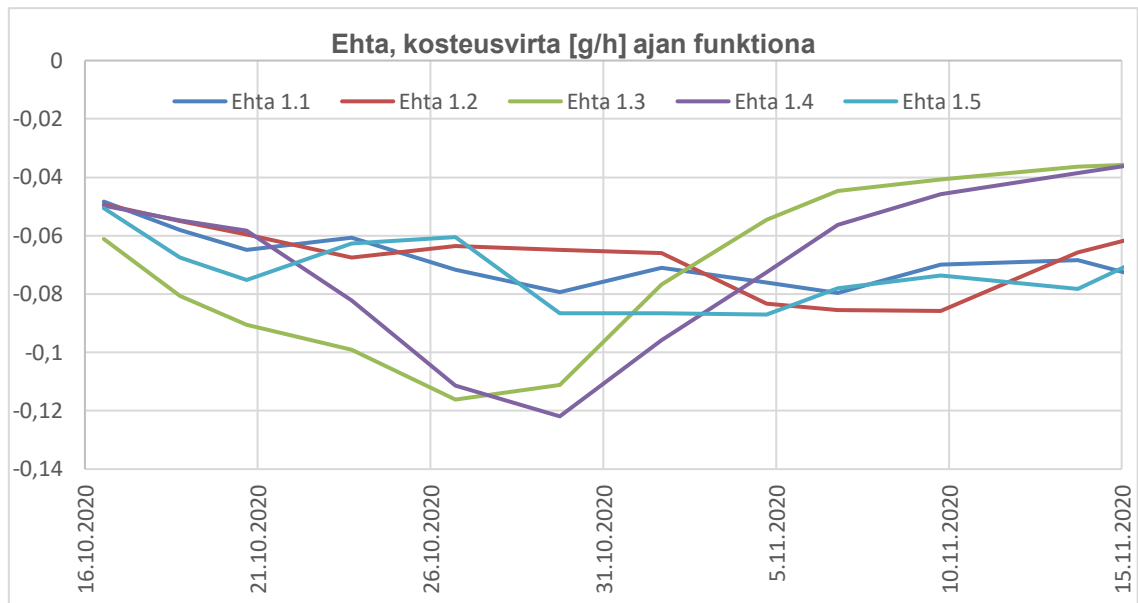
Koesarja 1, 50–95 % RH, kipsilevy tukilevynä

Valmistuksen jälkeen koekappaleet siirrettiin välittömästi olosuhdehuoneeseen (50 % RH, 23 °C), missä niille punnittiin ensimmäinen itse kokeessa punnittu massa. Tämän jälkeen kuppeja punnittiin 3–4 kertaa viikossa kuukauden ajan. Koe lopetettiin kun suurimmassa osassa kuppeja suolaliuos oli kuivunut.



Kuva 4.16 Ensimmäisen koesarjan 50–95 % RH kosteusparin kuppeja olosuhdehuoneessa.

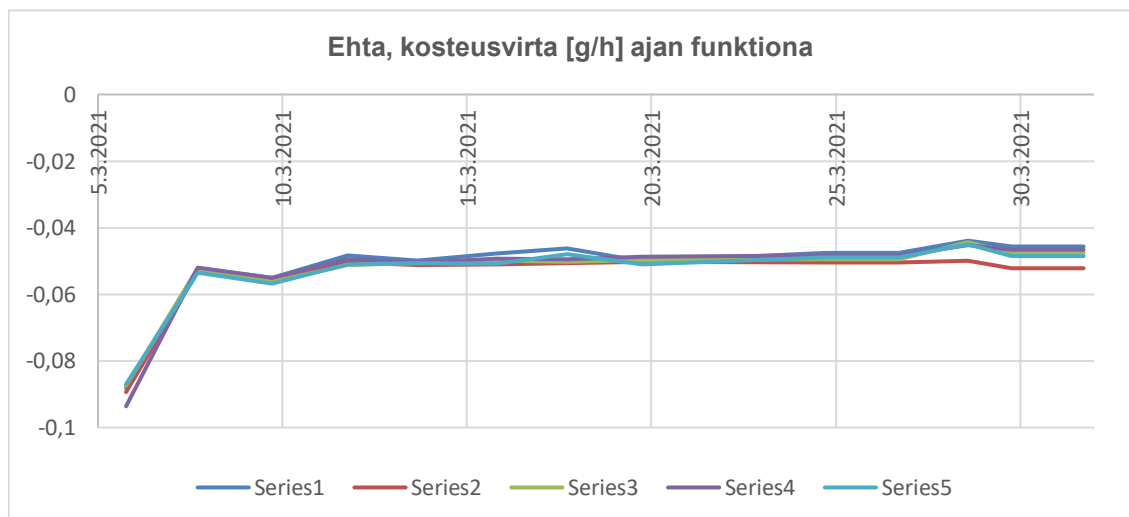
Punnitusten aikana seurattiin kosteusvirran tasaantumista. Ensimmäisessä koesarjassa koekappaleiden välillä oli eroja ja kosteusvirta vaihteli. Kuvassa 4.17 on esitetty Ehtaristeen kosteusvirta ensimmäisessä kokeessa. Kosteusvirta koekappaleiden välillä vaihtelee suuresti ja koekappaleiden 1.3 ja 1.4 osalta näkyy, kuinka tasaista vaihetta ei saavuteta oikeastaan lainkaan, vaan kosteusvirta pienenee, kun liuos kupissa kuivuu nopeasti. Nämä pudotettiin laskennasta pois ja laskenta tehtiin kupeille 1.1, 1.2 ja 1.5. Näidenkin osalta hajonta oli liian suuri, noin 6–8 % välillä. Standardin vaatimus on kuitenkin korkea ja käytännössä 5 % hajontaan on vaikea päästä. Hajonta kuppien välillä tulkittiin johtuvaksi reunavuodoista vahatiivistyksessä ja ohuesta materiaalikerroksesta, jolloin tukilevyn ja sen reunavuodon merkitys korostuivat.



Kuva 4.17 Kosteusvirta [g/h] ajan funktiona.

Koesarja 2, 11–50 % RH, muoviverkko tukilevynä

Punnitusten ja punnitustiheyden osalta meneteltiin samoin kuin koesarjassa 1. Punnitusten aikana seurattiin kosteusvirran tasaantumista. Kosteusvirta oli nyt huomattavasti tasaisempi kuin ensimmäisessä koesarjassa (kuva 4.20). Hajonnassa päästiin nyt alle 5 % standardin vaatimuksen mukaisesti.



Kuva 4.18 Ehta, koesarja 2 11–50 % RH kosteusparilla, kosteusvirta ajan funktiona [g/h].

Koesarja 3, 50–95 % RH, muoviverkko tukilevynä

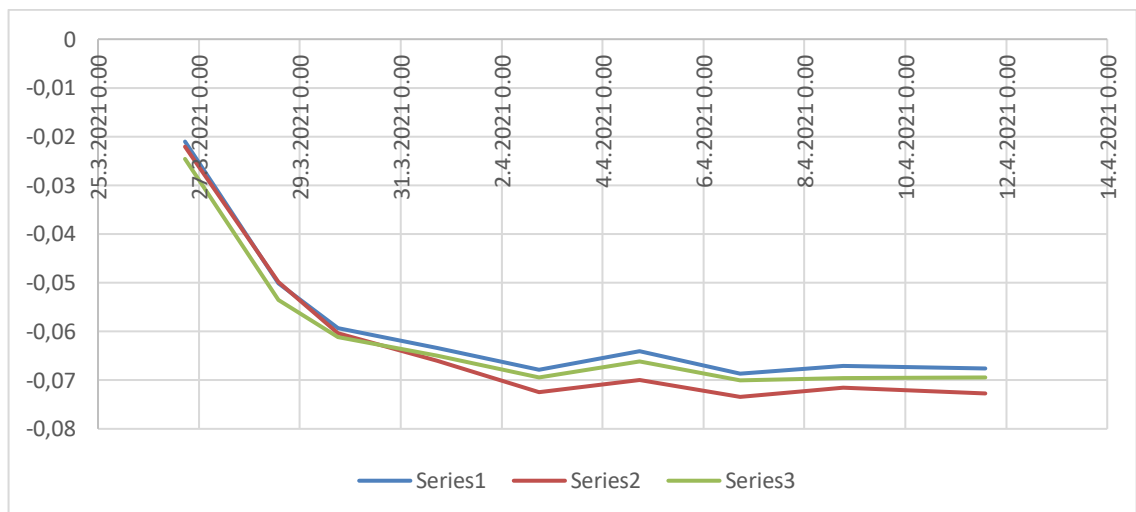
Ehta- ja Nimetön-kutterinlastuille toistettiin vielä koesarja 3, 50–95 % RH kosteusparilla käyttäen muoviverkkoa, jotta voitiin verrata eroavaisuuksia eri koemenetelmien välillä.

Nimetön-kutteria ei testattu aiemmassa koesarjassa olosuhdekaapin tilanpuutteen vuoksi, joten sille molemmat kosteusparit tehtiin muoviverkkoa käyttäen.

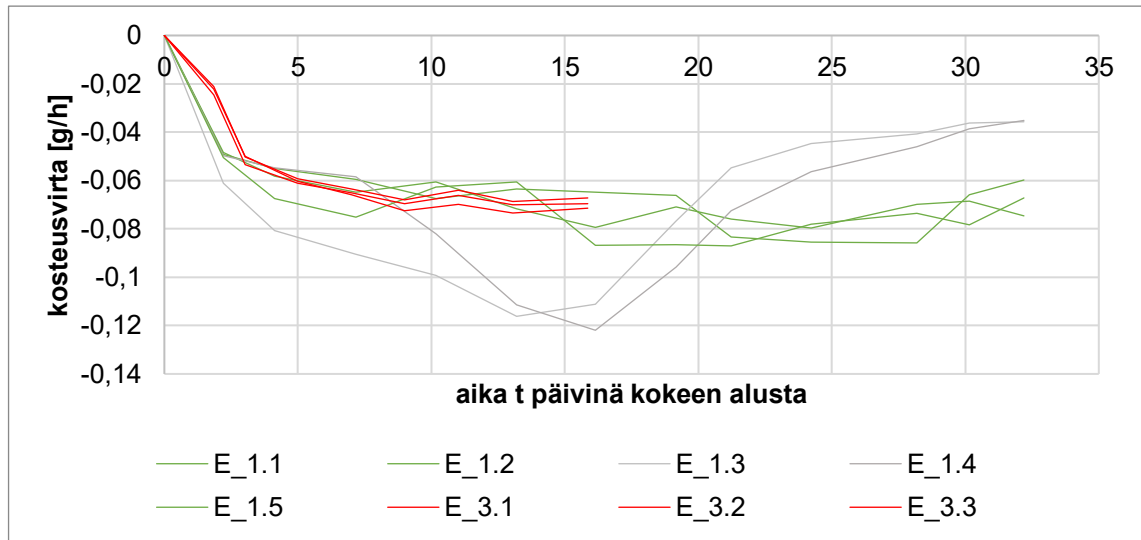


Kuva 4.19 Koesarja 3, koekuppeja valmistettuna.

Koesarjan tuloksista näkyi, että myös kosteusvirta oli samaa luokkaa 0,07 g/h sekä koesarjassa 1 että koesarjassa 3, mutta koesarjalla 3 kosteusvirta oli tasaisempi (kuva 4.20) Koekuppien väliset erot kosteusvirran vaihtelussa olivat myös huomattavasti pienempää (kuva 4.21).



Kuva 4.20 Ehta, koesarja 3, 50-95 % RH kosteusparilla, kosteusvirta ajan funktiona [g/h].



Kuva 4.21 Ehta, vertailu koesarjan 1 ja koesarjan 3 välillä 50-95 % RH kosteusparilla [g/h]

4.6.5 Laskenta

Kosteusvirran korjattu tiheys

Kosteusvirran tiheys g [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$] laskettiin kaavalla (4.12), jakamalla kosteusvirta G poikkipinta-alalla A , jonka se läpäisi. Ideaalitulanteessa pinta-ala A [m^2] on kappaleen ylä- ja alapuolella sama, mutta koska näin ei ollut, se laskettiin ylä- ja alapuolen avoimien pintojen keskiarvona. Kaavassa (4.12) on lisätty itseisarvomerkit. Etumerkki, eli kosteusvirran suunta määräytyy sen mukaan, onko kosteampi olosuhde kupin sisäpuolella (yleisesti märkäkuppikokeessa) vai ulkopuolella (kuivakuppikoe). Laskentaohjelmassa itseisarvomerkkien unohtuminen ja negatiivinen arvo aiheuttaa helposti laskentavirheen, joka on vaikeasti havaittavissa. Massavirran suunta oli tiedossa, joten etumerkkiä ei laskennassa tarvittu.

$$g = \left| \frac{G}{A} \right| \quad (4.12)$$

Kokeessa, jossa koeoppien reunat on sinetöity vahalla, korjataan kosteusvirran tiheys g aiemmin esitetyllä kaavalla (4.10), jolloin saadaan korjattu kosteusvirran tiheys g_k .

Vesihöyrynläpäisykerroin

Vesihöyrynläpäisykerroin W_v [s/m] vesihöyrypitoisuuksien avulla (4.14) ilmaisee kosteusvirtaa tunnetun pinta-alan läpi, kun vesihöyrypitoisuusero $\Delta v_{\text{koe-kappale}}$ [kg/m^3]

kappaleen eri puolilla on 1 kg/m^2 suuruinen. Vesihöyrynläpäisykerroin laskettiin ensin koko koekappaleelle kaavalla 4.13

$$W_v = \frac{g_k}{A \cdot \Delta v_{\text{koekappale}}} \quad (4.13)$$

Kaavaa 4.13 varten tarvittava vesihöyrypitoisuusero laskettiin kaavalla (4.14), missä $\Delta\varphi_{\text{koekappale}}$ [%] oli suhteellisen kosteuden muutos kappaleen eri puolilla ja v_{sat} [kg/m^2] oli ilman kyllästyskosteuspitoisuus.

$$\Delta v_{\text{koekappale}} = \frac{\Delta\varphi_{\text{koekappale}}}{v_{\text{sat}}} \quad (4.14)$$

Edelleen suhteellisen kosteuden muutos kappaleessa voitiin laskea olosuhdehuoneessa vallitsevan suhteellisen kosteuden φ_{huone} [% RH] ja kupin sisäisen suhteellisen kosteuden φ_{kuppi} [% RH] sekä kupin ilmatilan kosteudenmuutoksen $\Delta\varphi_{\text{ilmatila}}$ [% RH] erotuksena. Itseisarvomerkit kaavassa 4.15 poistavat mahdollisen virheen laskentakaavoissa, jos kosteusvirran suunta on eri ja kupissa huonetta pienempi kosteus (kuivakuppikoe).

$$\Delta\varphi_{\text{koekappale}} = |\varphi_{\text{huone}} - \varphi_{\text{kuppi}}| - \Delta\varphi_{\text{ilmatila}} \quad (4.15)$$

Koekupin ilmatilan suhteellinen kosteuden muutos $\Delta\varphi_{\text{ilmatila}}$ laskettiin kaavalla 4.16

$$\Delta\varphi_{\text{ilmatila}} = \frac{\Delta v_{\text{ilmatila}}}{v_{\text{sat}}} \quad (4.16)$$

Missä koekupin ilmatilan vesihöyrypitoisuuden muutos ($\Delta v_{\text{ilmatila}}$) laskettiin kaavalla 4.17

$$\Delta v_{\text{ilmatila}} = \frac{\Delta p_{\text{ilmatila}} \cdot R \cdot M_w}{273,15 + T} \quad (4.17)$$

missä R on yleinen kaasuvakio ja M_w on veden moolimassa

ja edelleen eli vesihöyryn osapaineen muutos $\Delta p_{ilmatila}$ koekupin ilmatilassa saatiin laskettua kaavalla 4.18

$$\Delta p_{ilmatila} = \frac{g_k \cdot d_a}{\delta_a} \quad (4.18)$$

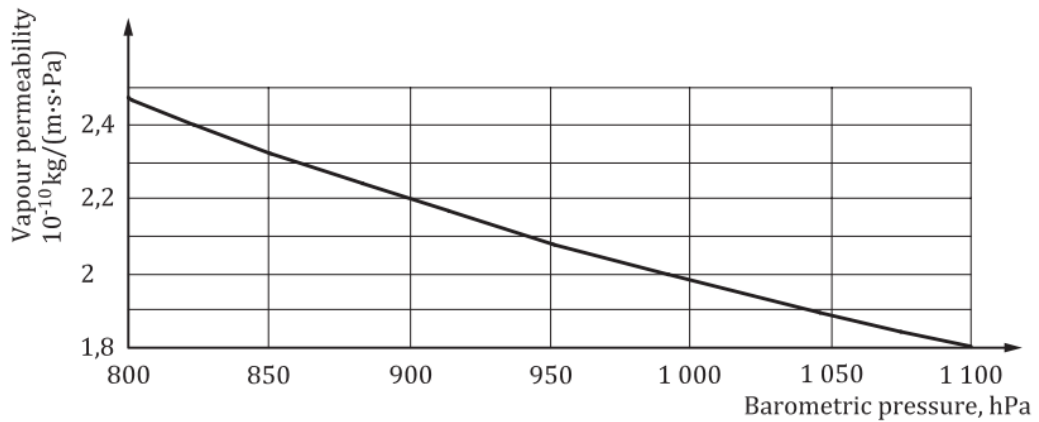
missä d_a on koekupin ilmatilan korkeus [m]

δ_a on ilman vesihöyrynläpäisevyys

Ilman vesihöyrynläpäisevyys δ_a riippuu ilman lämpötilasta T [K] ja normaali ilmanpaineesta P_n kaavan 4.19 mukaisesti

$$\delta_a = \frac{2 \times 10^{-7} T^{0,81}}{P_n} \quad (4.19)$$

Ilman vesihöyrynläpäisevyys laboratoriolämpötilassa on myös standardissa taulukoituna (**Kuva 4.22**)



Kuva 4.22 Ilman vesihöyrynläpäisevyys ilmanpaineen funktiona 23°C lämpötilassa.

Tämän jälkeen laskettiin vesihöyrynläpäisykerroin osapaineiden avulla ilmaistuna W_p [$\text{m}^2\text{sPa/kg}$] kaavalla 4.20

$$W_p = \frac{W_v}{\frac{R}{M_w} \cdot (273,15 + T_{huone})} \quad (4.20)$$

Vesihöyrynvastus testattavalle materiaalille (tukilevyn vastuksen vähennys)

Vesihöyrynvastukset Z_v [s/m] ja Z_p [m²sPa/kg] laskettiin koko kukepille vastaavien vesihöyrynläpäisykertoimien käänteislukuna (4.21)(4.22).

$$Z_v = \frac{1}{W_v} = \frac{d}{\delta_v} \quad (4.21)$$

$$Z_p = \frac{1}{W_p} = \frac{d}{\delta_p} \quad (4.22)$$

Koska kokeessa käytettiin tukilevyä tai tukiverkkoa, tässä vaiheessa täytyi poistaa tukilevyn osuus. Tätä varten punnittiin koekappaleiden punnitusten yhteydessä erikseen sarja koekuppeja, joissa oli pelkkä tukilevy vahatiivistyksellä tai tukiverkko.

Näille laskettiin edellä esiteltyllä tavalla vesihöyrynvastus joka vähennettiin varsinaisille materiaalien koekupeille saaduista vesihöyrynvastuksista kaavalla (4.10). Vesihöyrynläpäisykertoimet materiaalikerrokselle laskettiin pelkälle materiaalin osuudelle uudestaan edellä esiteltyillä kaavoilla (4.21) ja (4.22) samoin kuin vesihöyrynläpäisevyudet. Diffuusionvastuskerroin μ ja suhteellinen diffuusionvastus s_d laskettiin aiemmin esitetyillä kaavoilla (2.19) ja (2.20).

Koekappalekohtaiset tulokset on esitetty liitteessä A. Taulukoissa on laskettuna myös keskihajonta, sekä keskihajonnan 95 % luottamusväli Studentin t-jakaumalla laskettuna. Suuressa kosteudessa 50-95 kosteusparilla osalla Ehta ja Nimetön-koekappaleista diffuusionvastuskerroin alittaa arvon 1,0. Tämä tarkoittaisi sitä, että vesihöyrynläpäisevyys olisi suurempi kuin pelkällä seisovalla ilmalla, mikä ei voi pitää paikkaansa. Vastaava on havaittu myös aiemmissa tutkimuksissa (Vinha, et al., 2005).

4.6.6 Virhelähteet ja kokeen onnistumisen arviointi

Vesihöyrynläpäisykokeessa on runsaasti työvaiheita ja mitattavia suureita, jotka vaikuttavat lopputuloksen tarkkuuteen. Taulukossa 4.13 on havainnollistettu mitattavissa suureissa tapahtuvan mahdollisen virheen vaikutusta laskettaviin suureisiin koesarjan 2 koekappaleissa. Esimerkiksi 100 mm materiaalipaksuudellakin koekappaleen paksuudessa 1 mm muutos vaikuttaa vesihöyrynläpäisevyysarvoon 1 %. Irtomateriaalilla

on helposti useamman millimetrin ero materiaalipaksuudessa eli useamman prosentin virhemarginaali tuloksessa.

Taulukko 4.15. Mitattavan virheen vaikutus laskettavaan suureeseen prosentteina.

Mitattava suure →	Paksuus	Ilmatila	RH	Kosteus- huone T	Kosteus- virta g/h	Kosteus- virta g/h
Virhe →	-1 mm	+1 mm	+1 % RH	+1 °C	-1 %	-10 %
Laskettava suure						
Vesihöyrynvastus Z_v	0,00	0,73	3,53	-8,30	-1,40	-15,38
Vesihöyrynvastus Z_p	0,00	0,73	3,53	-8,76	-1,40	-15,38
Vesihöyrynläpäisevyys δ_v	1,05	-0,74	-3,66	7,66	1,38	13,33
Vesihöyrynläpäisevyys δ_p	1,05	-0,74	-3,66	7,98	1,38	13,33
Vesihöyryn diffuusiovas- tuserroin μ	-1,06	0,73	3,53	-8,97	-1,40	-15,38

Koekappaleen paksuuden osalta standardin vaatimus on $\pm 0,2$ mm tai $\pm 0,5$ % tarkkuus ja irtomateriaalilla vähintään 100 mm materiaalipaksuus. Koesarjassa 1 tämä tarkoittaisi 0,25 mm tarkkuutta ja koesarjoissa 2 ja 3 paksuus tulisi mitata ± 5 mm tarkkuudella. Irtomateriaalilla paksuuden määrittäminen 0,2 mm tarkkuudella ei ole mahdollista. Sullottu materiaali jo palautuu sullomisen jälkeen helposti useampia millimetrejä. Arvioitu virhe oli enintään 5 mm. Koesarjoissa 2 ja 3 standardin vaatimus toteutui. Koesarjassa 1 50 mm koekappaleen paksuudella ± 5 mm virhe tarkoittaa 10 % virhettä vesihöyrynläpäisevyyden arvossa ja koesarjoissa 2 ja 3, koekappaleen paksuuden ollessa 105 mm ± 5 mm virhe tarkoittaa 5 % virhettä vesihöyrynläpäisevyyden arvossa.

Olosuhdehuoneen (koesarjat 1 ja 3) lämpötila ja suhteellinen kosteus oli kokeen aikana mitattavissa ± 2 % tarkkuudella. Koesarjalla 2, joka tehtiin 11 % RH kosteuskaapissa kosteusolosuhde säilyi kokeiden aikana, mutta mitattu olosuhde saattaa sisältää virhettä johtuen vapaasta vedestä kaapissa. Kaapissa olevista 50 % RH suhteellisesta kosteudesta tuoduista koekappaleista vapautuu kosteutta kaapin ilmaan, ja jos suolaliuos ei ole riittävän ylikylläinen, se ei sido kaikkea kosteutta. Kaappiin päätyi myös ilmaa ympäröivästä laboratoriotilasta, jonka ilman suhteellinen kosteus oli kaappia korkeampi. Mitattu kosteus kaapissa oli enimmillään 14 % RH. Tämä tarkoittaisi 10 % virhettä lopputuloksissa. Myös materiaalilaboratoriossa, jossa kosteuskaappi sijaitsee, lämpötila vaihteli yli vaaditun ± 2 %. Myöskään kupin sisällä vallitseva todellinen suhteellinen kosteus ei ole tarkasti tiedossa. Kupissa olevan suolaliuoksen tuottama suhteellinen kosteus pyrittiin varmistamaan mittaamalla suhteellinen kosteus ensin erillisessä astiassa ja varmistamaan liuoksen ylikylläisyys lisäämällä suolaa jokaiseen kuppiin.

Koekappaleet koesarjassa 1 ja 3 punnittiin 0,001g tarkkuuteen yltävällä vaa'alla ja lisäksi käytössä oli tuulisuoja estämään ilmavirtauksia vaikuttaen vaa'an lukemaan. Koesarjassa 2 käytössä ollut vaaka ylsi 0,01g tarkkuuteen eikä käytössä ollut tuulisuojaa. Virhe punnitustuloksessa suhteessa muihin virhelähteisiin oli kuitenkin pieni. Punnitusten yhteydessä vaakojen kalibrointia testattiin kalibrointipunnuksella ja mitattu virhe oli.

Kosteusvirrassa [g/h] 1 % muutos vaikuttaa jo 1,4 % koetulokseen. Kosteusvirran osalta erot koekappaleiden välillä ja kosteusvirran tasaantuminen ovat merkittävä tekijä tuloksen tarkkuuden kannalta. Kosteusvirrassa koesarjassa 1 hylättiin kaksi koekappaletta, joiden kosteusvirta oli selvästi muista poikkeava. Niissä näkyi selvästi reunavuodon aiheuttama alun jyrkkä kosteusvirran nousu ja sen jälkeen muita aikaisempi lasku. Edelleen kolmen laskentaan otetun koekappaleen erot kosteusvirrassa olivat enimmillään jopa 20 %. Kosteusvirta laskettiin kolmen koekappaleen keskiarvosta, mutta näin suuri vaihteluväli edellyttäisi suurempia koekappalemääriä. Koesarjassa 2 kaikki viisi koekappaletta olivat 1,2 % vaihteluvälin sisällä toisistaan.

Laskennan osalta suureet, joissa oli eniten mittausepävarmuutta olivat ilmaväli kupissa ja reunavirhekorjauksen vaikutus.

Lasikupissa oli etuna, että suolaliuos oli näkyvässä ja näin ollen sen läikkyminen oli helpommin vältettävissä. Merkitsemällä suolaliuoksen taso kokeen alussa lasikuppiin voitiin seurata suolaliuoksen vähenemistä kupissa. Kutterinlastulla täytetyissä kupeissa suolaliuoksen haihtuminen oli kuitenkin nopeaa ja suolaliuoksen haihtumisen takia aika jolloin punnitustulokset voi tulkita luotettavasti oli suhteellisen lyhyt, noin kuukauden ajanjakso.

Koekappaleelle, missä vain osalla koekappaletta on vahatiivistys, reunavirhekorjauksen laskeminen ei ollut suoraviivaista. Laskentapohjan oletus on, että koko koekappaleen osalla on sama reunavirhe. Reunavirhevähennys jätettiin tekemättä, jolloin virhe on pienempi kuin että se tehtäisiin virheellisesti koko paksuudelle.

Koekuppeja myöhemmin purettaessa havaittiin, että Fermacell-kipsilevyn alapinnassa oli mustaa hometta. Lyhytkestoisen kokeen aikana homehtumisella ei katsottu olleen merkitystä. Lisäksi Fermacell-kipsilevyssä oli havaittavia muodonmuutoksia ja paisumista kokeiden aikana (kuva 4.23).

Reunavuotoa teippauksen läpi testattiin Ehta-koekupeilla. Kokeen lopuksi koekupin kanneksi teipattiin muovikalvo. Tämän jälkeen punnituksia jatkettiin. Kosteusvirran keskiarvoksi kolmella kupilla saatiin keskimäärin 0,003 g/h. On otettava huomioon, että tässä tuloksessa oli mukana myös vuoto muovikalvon teippauksen läpi, joten varsinaisten koekuppien vuoto oli tätä pienempi. Kun kokeissa koekuppien kosteusvirraksi mitattiin 0,07 g/h, teippauksen läpi tapahtunut vuoto oli noin 4 % luokkaa.

Kaikenkaikkiaan yksinkertaisempi rakenne ja helpommin toistettavissa ja korjattavissa olevat työvaiheet tekivät teippauksesta hyvän vaihtoehdon. Vaikka teippaus toimii hyvin vesihöyryä läpäisevillä materiaaleilla, hyvin tiiviillä materiaaleilla, kuten muovimatoilla se ei toimi. Teippauksen läpi tapahtuva kosteusvirta on kuitenkin helppo varmistaa ja sen poistaminen tuloksista on suoraviivaista.



Kuva 4.23 muodonmuutoksia Fermacell-kipsilevyssä.

Vesihöyrynläpäisevyys on koe johon sisältyy pienellä koekappalemäärällä paljon epävarmuustekijöitä ja siten myös mittausepävarmuutta.

4.7 Veden imeytyminen

Vapaan veden imeytyskokeessa mitattiin, kuinka nopeasti ja paljon materiaali imee kosteutta, kun kappaleen pohja on vesikosketuksessa. Vedenimukoe tehtiin standardin SFS-EN ISO 15418:2002 mukaisesti automaattisella vedenimukolaitteistolla. Mittausten perusteella laskettiin materiaalin veden imeytymiskertoimet $A_{24,w}$ ja A_w sekä kyllästyskosteuspitoisuus w_{cap} .

4.7.1 Standardi SFS-EN ISO 15148

Standardi SFS-EN ISO 15418:2002 (SFS-15148, 2003) määrittelee menetelmän veden imeytymiskertoimen määrittämiseen osittaisessa vesiuotuksessa. Kokeessa mitataan

kappaleen massanmuutosta, kun kappaleen alapinta on kosketuksissa veteen. Tavoitteena on punnita kappaletta vähintään 24 tunnin ajan. Koelaitteisto koostuu vaa'asta, jonka tulisi pystyä punnitsemaan kappaletta 0,1 % tarkkuudella kappaleen massasta, sekä vesitankista, jossa koekappaleen vesiupotuksen syvyyttä voidaan säätää ± 2 mm tarkkuudella.

Koekappaleen paksuuden tulisi vastata, mikäli mahdollista materiaalin täyttä paksuutta käyttötarkoituksessaan. Homogeenisella materiaalilla koekappaleen suositeltava paksuus on vähintään kymmenen kertaa materiaalipartikkelin paksuus. Koekappaleita valmistetaan vähintään kolme kappaletta, mikäli koekappaleen vesiupotuksessa oleva pinta-ala on yli 100 cm^2 . Muutoin koekappaleita tulee olla kuusi kappaletta siten että niiden yhteispinta-ala on vähintään 300 cm^2 .

Koekappaleet leikataan tuotteesta siten, että ne eivät sisällä tuotteen pintoja. Mikäli materiaali ei ole isotrooppista, koe tulee toistaa kutakin materiaalisuuntaa vasten erikseen. Kiinteiden kappaleiden reunat tiivistetään kosteutta läpäisemättömäksi. Koekappaleen yläpinta peitetään myös esimerkiksi pleksillä siten, että jätetään pieni ilmarako, jotta kappaleen yläpinnan ja pleksin välillä paine pääsee tasaantumaan samaksi kuin ympäristössä.

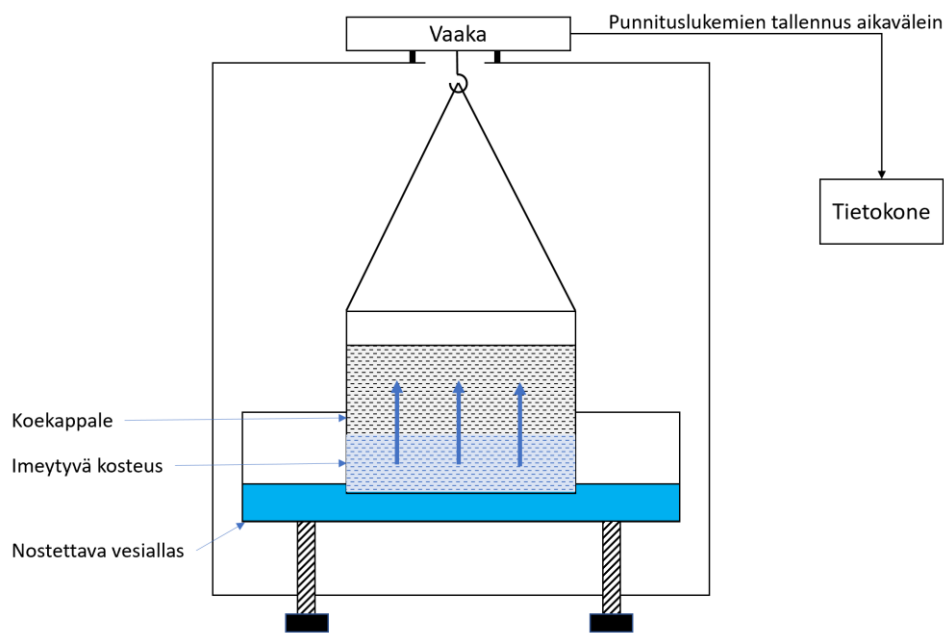
Irtomateriaaleilla näyte valmistetaan esimerkiksi muoviputkeen, jonka suu on peitetty verkolla. Vesikontaktissa olevan pinnan tulee olla tasainen. Sallittua on kuitenkin materiaalille ominainen karkeus.

Testiympäristön suhteellisen kosteuden tulee olla välillä 40-60 % RH ja vaihteluvälin kokeen aikana ± 5 % RH sekä lämpötilan välillä 18-28 °C vaihteluvälin ollessa ± 2 °C. Suhteellisen kosteus saa siis olla kohtalaisen isolla alueella, mutta pysyä hyvin stabiilina kokeen ajan. Tämän vuoksi on oleellista kokeen aikana sallia testikammion olosuhteiden tasaantua veden lisäämisen jälkeen ennen koetta. (SFS-15148, 2003)

4.7.2 Koelaitteisto

Koe tehtiin rakennusfysiikan materiaalilaboratoriossa vedenimukoelaitteistolla. Laitteisto (kuva 4.24) on päivitetty versio koemenetelmästä, joka on esitelty Eero Tuomisen diplomityössä (Tuominen, 2016). Laitteisto koostuu kolmesta hyvin kosteutta läpäisemättömästä tiiviistä kaapista. Kunkin kaapin yläpuolelle on sijoitettu 0,01g

tarkkuudella punnitseva Precisa-vaaka, jonka pohjassa on ripustinkoukku roikkuvan taakan punnitsemiseen. Ripustinkoukku ulottuu kaapin puolelle reiän kautta. Reikä on tiivistetty vaa'an pohjaan, jotta kaappi on tiivis. Kaapissa on kierretappien varassa vesiallas, jolloin voidaan tarkasti säätää astian ja siten vedenpinnan korkeutta. Vaa'at on yhdistetty tietokoneeseen, joka lukee vaakojen lukemia ohjelmiston kautta asetetuin aikaväleihin. Kokeessa punnitukset tehtiin alussa ja lopussa 5 sekunnin välein tarkan upotushetken ja lopetushetken määrittämiseksi, ja kokeen aikana 50 sekunnin välein.



Kuva 4.24 Periaatekuva vedenimukoelaitteistosta.

4.7.3 Koekappaleiden valmistus

Materiaali tasapainotettiin ennen koetta vastaavasti kuin muissakin kokeissa olosuhdehuoneessa 50 % RH kosteudessa ja 23 °C lämpötilassa. Irtomateriaalia varten valmistettiin koeastia muoviputkesta ja metalliverkosta. Koeastian sisähalkaisija oli 186,6 mm ja näytekorkeus astiassa 70 mm. Astian pohja valmistettiin metalliverkosta (silmäkoko n. 2 mm x 2 mm), joka liimattiin liimamassalla muoviputkeen ja kiinnitys varmistettiin ruuveilla. Astian pohjalle asetettiin vielä irtoverkko tiheämmästä sihtiverkosta (silmäkoko n. 0,5 mm x 0,5 mm) estämään materiaalin putoamista veteen. Astian reunoihin kiinnitettiin kolmesta kiinnityspisteestä ketju, jolla astia saatiin roikkumaan tasaisesti vaa'an ripustinlenkistä. Koeastian mitat ja tilavuus on esitetty taulukossa 4.14.

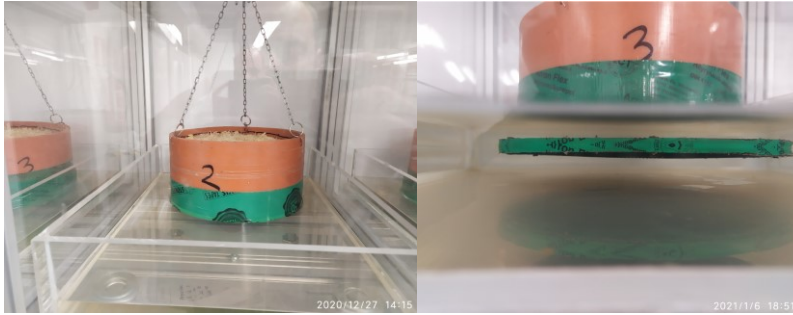
Taulukko 4.16. Vedenimukoe, koeastian mitat.

Halkaisija (mm)	Näytekorkeus (mm)	Pohjan pinta-ala (mm ²)	Näytetilavuus (dm ³)
186,6	70	27300	1,90

Olosuhdehuoneessa tasaannutettu irtomateriaali sullottiin astiaan tavoitetiheyteen. Koska kutterinlastu turpoo huomattavasti kastuessaan, astiaan jätettiin turpoamisvaraa. Tämä vastaa esimerkiksi yläpohjassa olevaa tilannetta, missä kutterieriste pääsee vapaasti turpoamaan. Seinän sisällä kutterinlastu ei aivan samoin pääse turpoamaan ja tällainen tilanne pitäisi tutkia erikseen. Valmistetut koekupit, niiden tavoitetiheydet ja toteutuneet massat on esitetty liitteessä D1. Telineen massa on kaikkien vaa'alle tullut massa ripustimesta ja koeastiasta ilman materiaalia. Punnittava koekappale muodostui koeastiasta ja koemateriaalista.

4.7.4 Mittaukset

Kunkin kokeen alussa ensin käynnistettiin ohjelmisto ja automaattinen vaakalukemien keruu. Tämän jälkeen vaa'at kalibroitiin yksitellen kalibrintipunnuksella, jolloin kalibrintipunnuksella saatu lukema tallentui osaksi mittausdataa. Tämä mahdollisti sen, että tarvittaessa myöhemmin voidaan todentaa mahdollinen virhe vaa'an lukemassa. Tämän jälkeen koekappaleet punnittiin ensin pöydällä olevalla vaa'alla ja tarkistettiin niiden massa ripustinketjuineen. Koekappaleet nostettiin yksitellen kaappien ripustinkoukkuihin ja suljettiin kaapit. Tämän jälkeen, kun koekappaleiden mahdollinen heilunta ripustimissa oli lakannut, nostettiin vedenpinta kaapeissa siten, että koko koemateriaalin pohja oli vesiupotuksessa. Koska kutterinlastu imee runsaasti vettä, tämä otettiin huomioon upottamalla koeastia noin 10 mm veteen. Liian syvään upottamista tulisi välttää, sillä tämä aiheuttaa kokeen alussa sen, että upotettuun osaan vesi tunkeutuu hydrostaattisen paineen vaikutuksesta, eikä kapillaarisesti. Kutterinlastulla veden imeytyminen on kuitenkin niin suurta, että upotus 10 mm oli välttämätöntä; muutoin koekappale ei olisi pysynyt vesikosketuksessa kokeen ajan. Koska veden imeytyminen oli suurta, ei myöskään voitu varmistaa, että standardin vaatimus ± 2 mm vedenpinnan korkeuden vaihtelusta täyttyisi. Koekappaleet kuitenkin pysyivät vesiupotuksessa riittävän kauan kokeen aikana.

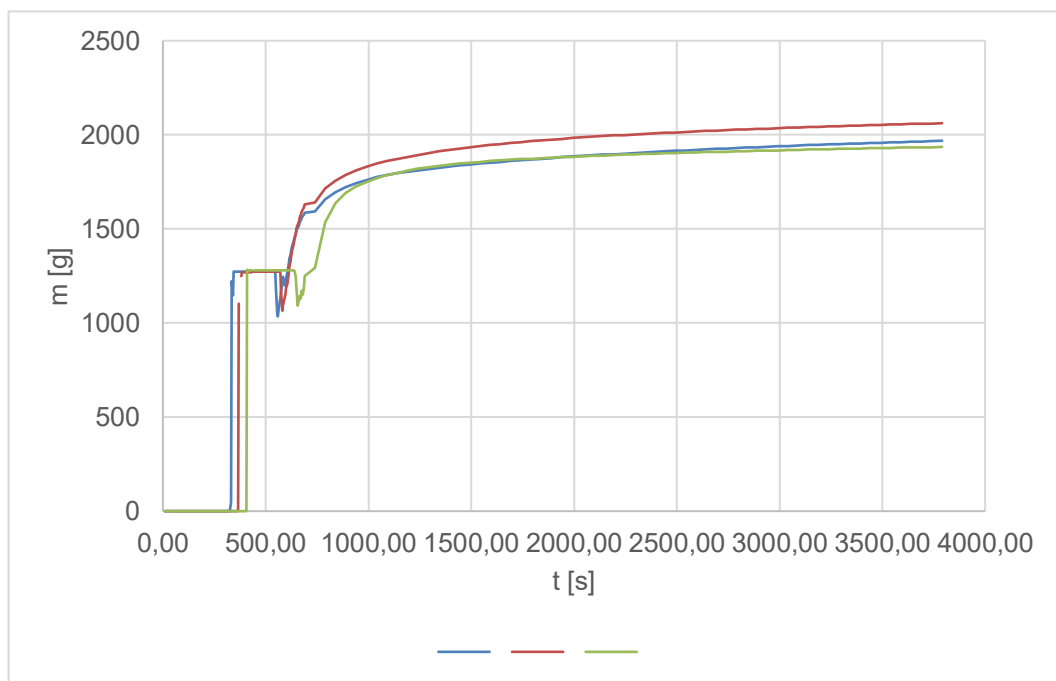


Kuva 4.25 Veden imeytyminen, koekappaleet ripustimissa ja upotuksen alussa.

4.7.5 Laskenta

Veden imeytymiskerroin $A_{w,24}$

Kokeen aikana todettiin, että kosteus saavutti materiaalin yläpinnan ennen standardin määrittämää 24 tunnin määräaika. Mittausdatasta piirrettiin koekappaleittain kuvaaja, jossa esitetään koekappaleen massa kuluneen ajan funktiona. Kuvassa 4.26 on esimerkkinä Pölkky-savetettu kokeen kuvaaja. Kuvaajasta pystyi määrittämään ajanhetken m_0 [kg], jolloin koekappale oli laskettu vesikosketukseen. Tämä näkyi datassa massan hetkellisenä putoamisena nosteen vaikutuksesta. Tämä ajanhetki merkittiin kokeen alkamisajankohdaksi.



Kuva 4.26 Pölkky-savetettu, massa ajan funktiona vedenimukokeen aikana.

Saadusta punnitusdatasta piirrettiin kuvaajat 4.27, 4.28 ja 4.29. Kuvaajissa pystyakselilla on koekappaleen massanmuutos $\Delta m_{kpl}(t)$ [kg] (4.23), ja vaaka-akselilla vesiupotuksen alusta kuluneen ajan [s] neliöjuuri (4.24)

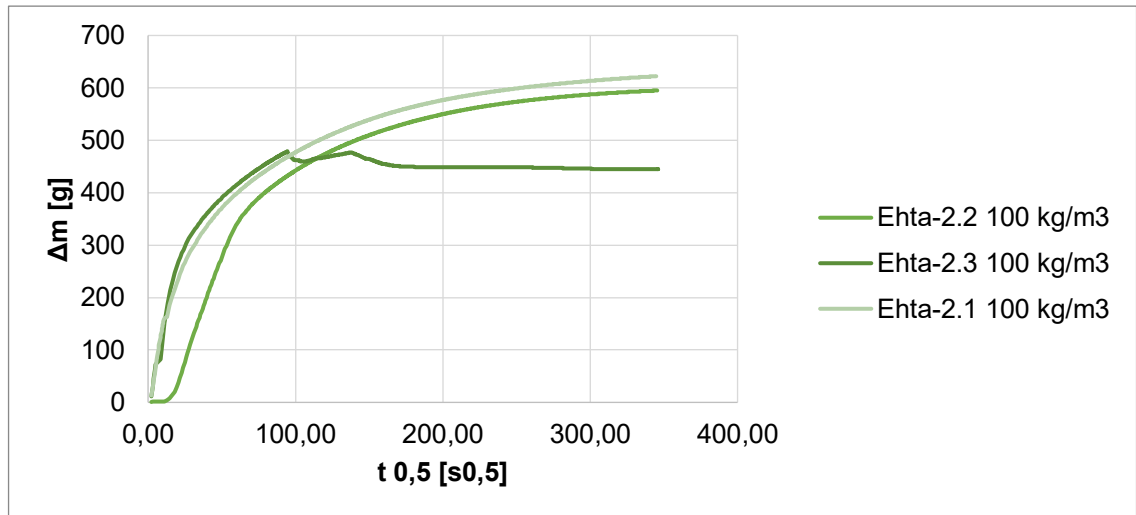
$$\Delta m_w(t) = \frac{m_{kpl}(t) - m_{kpl}(0)}{k_{noste}} \quad (4.23)$$

$$\Delta t^{0,5} = \sqrt{t_t - t_0} \quad (4.24)$$

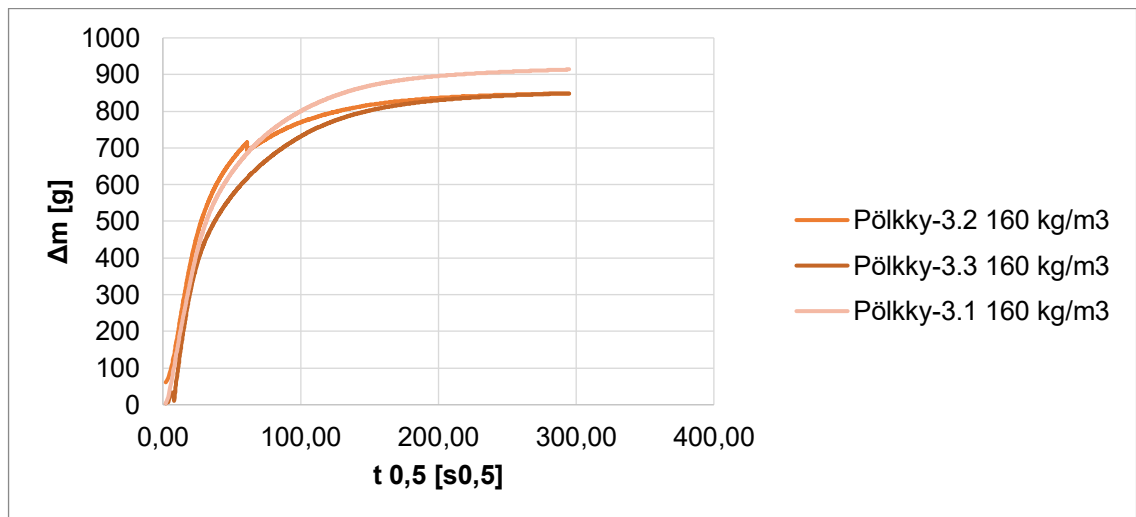
Massanmuutoksen kaavassa (4.23) on huomioitu nostekorjaus k_{noste} . Vesiupotuksessa kappaleeseen vaikuttaa noste. Automaattisella laitteistolla kappale punnittiin upotuksessa, joten nosteen vaikutus on otettava huomioon. Nosteen korjauskerroin on johdettu Eero Tuomisen diplomityössä (Tuominen, 2016). Käytännössä nosteen vaikutus määräytyy suoraan vesiupotuksessa olevan kappaleen pinta-alan A_{kpl} ja vesialtaan vapaan vesipinta-alan $A_{vesi} = A_{allas} - A_{kpl}$ mukaan.

$$k_{noste} = \frac{A_{kpl}}{A_{vesi}} + 1 \quad (4.25)$$

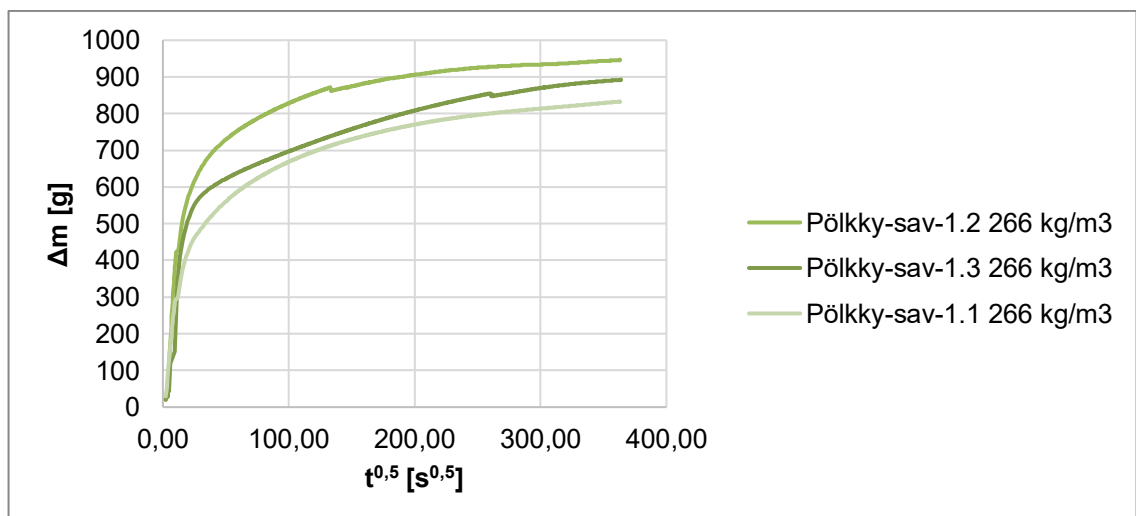
Koska kappaleen pinta-ala suhteessa vesialtaan pinta-alaan oli suuri, nosteen vaikutus oli merkittävä ja se oli otettava huomioon. Myös haihtuminen vaikuttaa pidempiaikaisessa kokeessa ja sellaisella materiaalilla, jolla veden imeytyminen on pientä. Tämän kokeen kesto oli lyhyt ja imeytyvän veden määrä oli niin suuri, että kokeen aikaisella haihtumisella ei katsottu olevan merkitystä tulokseen. Haihtuminen jätettiin yksinkertaistuksen vuoksi huomioimatta. Haihtuminen kuitenkin selvitettiin erillisellä kalibrintimittauksella.



Kuva 4.27 Veden imeytyminen, Ehta 100 160 kg/m³, massanmuutos ajan neliöjuuren funktiona



Kuva 4.28 Veden imeytyminen, Pölkky 160 kg/m³, massanmuutos ajan neliöjuuren funktiona.



Kuva 4.29 Veden imeytyminen, Pölkky-sav. 266 kg/m³, massanmuutos ajan neliöjuuren funktiona.

Materiaalille, jolla imeytymisen alussa on selvä kapillaarinen alue, kuvaajan alkupää on lineaarinen. Teoreettisesti täysin lineaarisen kuvaajan tuottaisi materiaali, jonka huokosverkosto koostuisi täysin tasaisesti jakautuneista samankokoisista huukosista tai huukosputkista, Tällöin kapillaarinen veden imeytyminen tapahtuisi suoraviivaisesti joka suuntaan ja vesirintama etenisi läpi materiaalin alhaalta ylöspäin. Tällöin kuvaajan alku olisi täysin lineaarinen ja kosteuden saavutettua kappaleen yläpinnan imeytyminen loppuisi hetkessä ja kuvaaja kääntyisi vaakasuoraan. Käytännössä tällaista materiaalia ei ole. Materiaalissa on huukosia eri suuntiin. Kutterinlastussa lastut eivät ole järjestäytyneet tiettyyn suuntaan. Kukin lastu koostuu huukosputkista (trakeidit) ja lastut ovat eri suuntiin. Vesimolekyylit imeytyvät ensin monomolekylaarisesti eli yhden molekyylin paksuisena kerroksena kutterinlastujen pintoihin ja huukosväleihin. Toisin kuin esimerkiksi betoni, jossa vesi imeytyy vain huukosissa, kutterinlastu koostuu puusoluista. Ensimmäinen vesi etenee kutterinlastujen välissä kapillaarisesti. Sitten kutterinlastuissa täyttyvät soluseinämät ja materiaali turpoaa voimakkaasti. Tämän jälkeen täyttyvät soluontelot vedellä. Kosteus leviää ensin nopeasti ja kappaleen massa nousee nopeammin. Imeytymisnopeus laskee tasaisesti ja jyrkempi lasku on havaittavissa, kun materiaalin pinnat ovat kauttaaltaan imeneet kosteutta. Vielä tämän jälkeen nousu jatkuu, joskin hitaammin olettavasti solujen täytyessä vedellä. Tämä on hidas prosessi ja verrattavissa vesiupotuksessa olevan puun vettymiseen.

Kuvaajat vastaavat standardissa määritellyä tyypin B kuvaajaa, jossa ei saavuteta selkeää taitekohtaa, vaan kuvaaja kaareutuu loivasti materiaalinäytteen kyllästyessä vedestä. Tällöin, standardin mukaista veden imeytymiskerrointa A_w ei voida laskea lineaarisen osuuden kulmakertoimenä, vaan lasketaan veden imeytyminen 24 tunnin ajanjaksossa $A_{w,24}$ (86400 sekuntia).

$$A_{w,24} = \frac{\Delta m_w(86400)}{A_{kpl} \sqrt{86400}} \quad (4.26)$$

Taulukossa 4.15 on esitetty standardinmukaiset veden imeytymiskertoimen $A_{w,24}$ arvot, kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus laskettuna $A_{w,24}$ mukaisesti, sekä keskihajonta ja luottamusväli. Laskennan tulokset koekappaleittain on esitetty liitteessä B.

Taulukko 4.17. Veden imeytymiskerroin $A_{w,24}$ ja w_{cap} .

Materiaali	$A_{w,24}$ [kg/(m ² s ²)]	w_{cap} [kg/m ³]	$A_{w,24}$ [kg/(m ² s ²)]			
			k.hajonta	90 % l.väli	alaraja $A_{w,24}$ [kg/(m ² s ²)]	yläraja $A_{w,24}$ [kg/(m ² s ²)]
Nimetön 66,5 kg/m ³	0,052	220,37	0,0012	±0,0020	0,050	0,055
Ehta 100 kg/m ³	0,068	239,75	0,0111	±0,0187	0,049	0,087
Ehta 150 kg/m ³	0,094	263,32	0,0020	±0,0034	0,090	0,097
Pölkky 105 kg/m ³	0,070	282,67	0,0013	±0,0021	0,068	0,072
Pölkky 160 kg/m ³	0,108	349,44	0,0047	±0,0079	0,100	0,116
Pölkky-savetettu 170 kg/m ³	0,108	401,49	0,0076	±0,0127	0,096	0,121
Pölkky-savetettu 266 kg/m ³	0,067	454,59	0,0038	±0,0064	0,061	0,074

Veden imeytymiskerroin A_w ja kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus w_{cap}

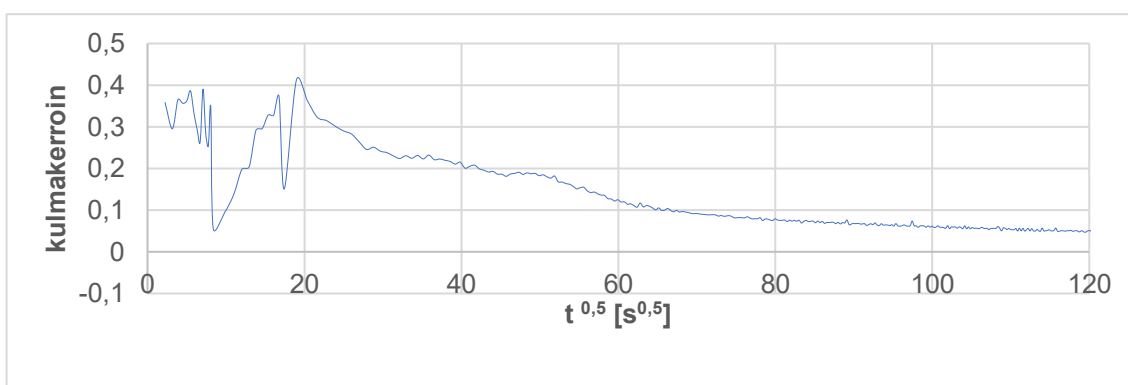
Koska 24 tunnin keskiarvona laskettu arvo on mittauksen alkupisteestä pisteeseen $t^{0,5} \approx 294 s^{0,5}$ piiretty suora, sitä voitaneen käyttää ilmaisemaan tunnusluku eri materiaaleille näiden vertailemiseksi, mutta se ei kerro todellisesta veden imeytymisestä materiaalissa oikeastaan mitään. Laskentatarkasteluja varten oli tarve määritellä veden imeytymiskertoimelle arvo joka kuvaa paremmin kapillaarista veden imeytymistä materiaalissa.

Kullekin materiaalille pyrittiin tästä syystä kuvaajaan sovittamalla hakemaan lineaarista osuutta. Tämä vaihteli materiaaleittain tiheyden mukaan. Tätä varten piirrettiin kuvaaja uudestaan koekappaleiden keskiarvona. Ehta-eristeellä 100 kg/m³ koekappaleen 2.3 kohdalla oli selkeästi tapahtunut jotain kokeen aikana ja se jätettiin huomiotta. Keskiarvo laskettiin sen osalta koekappaleille 2.1 ja 2.2.

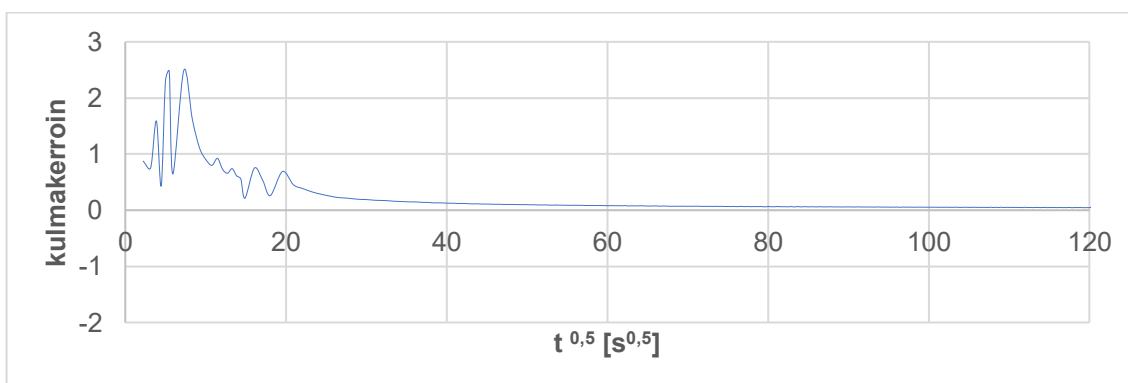
Veden imeytymiskäyrän lineaarisen osan etsimiseksi laskettiin kussakin mittauspisteessä kyseisen pisteen ja seuraavien 5 pisteen kautta piirretyyn lineaarisen regression kulmakerroin ja piirrettiin kulmakertoimista kuvaajat 4.30 - 4.33. Kuvaajista on kuitenkin nähtävissä, että pidempää lineaarista jaksoa jossa kulmakerroin pysyisi samansuuruisena, ei ole. Mutta materiaaleille on nähtävissä, että alussa kulmakerroin heilahtelee voimakkaammin, jonka jälkeen se laskee tasaisemmin ja jyrkemmin. Tämä voidaan todeta myös massanmuutoksen kuvaajissa. Tältä alueelta valittiin väli, jossa

kulmakerroin pysyy mahdollisimman tasaisena ja piirrettiin tältä väliltä lineaarinen regressio.

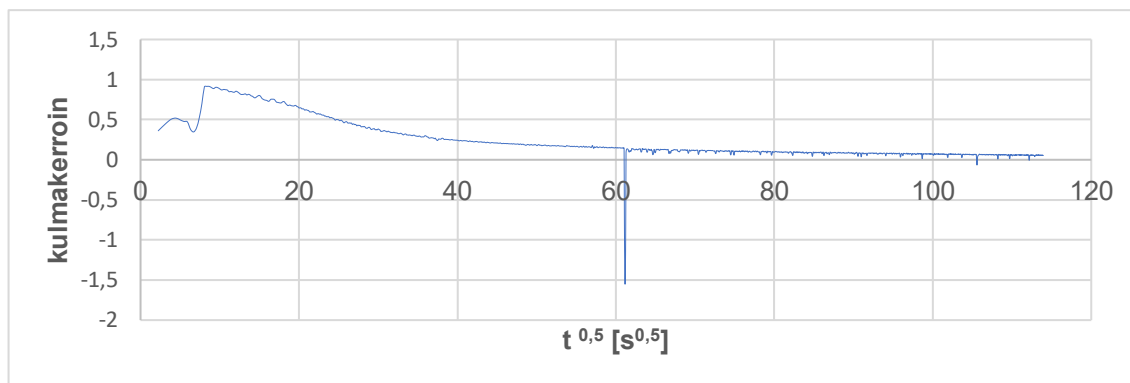
Ehta-eristeellä alun jakso, missä kulmakerroin vaihtelee arvon $k_1 = 0,248$ ympärillä on hieman yllättäen pisin, $t^{0,5}=51,38 \text{ s}^{0,5}$ eli 43 minuuttia kokeen alusta. Pölkky-savetettu eristeellä vastaava jakso on $t^{0,5}=20,94 \text{ s}^{0,5}$ eli noin 7 minuuttia kokeen alusta. Pölkky-eristeellä voi sanoa, että jaksoa missä kulmakerroin pysyisi lähes samansuuruisena, ei ole. Sillä on vesiupotuksen alusta ensin loivempi jakso. Sillekin kuitenkin määritettiin aika väliltä $t^{0,5}=9 \text{ s}^{0,5}$ ja $t^{0,5}=20 \text{ s}^{0,5}$, josta lineaarinen sovite laskettiin. Sama tilanne kuin Pölkky-eristeellä on myös Nimetön-eristeellä. Tasaista jaksoa ei ole, mutta kokeen alusta laskettiin sovite.



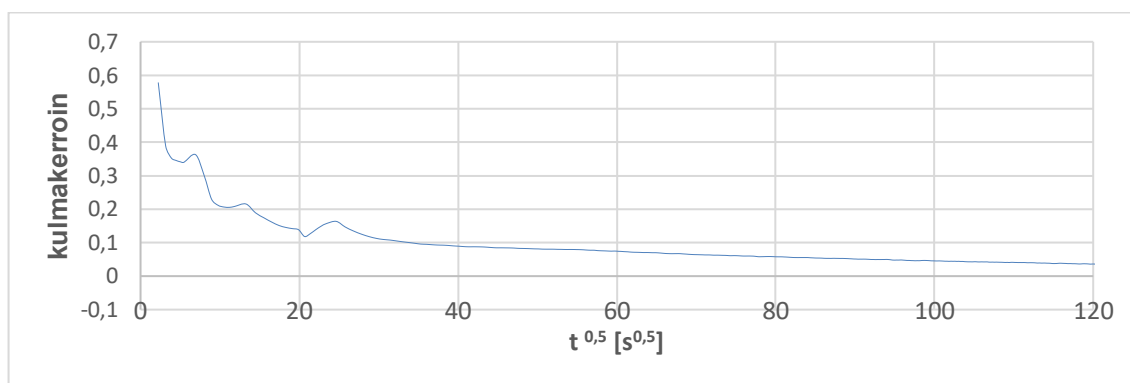
Kuva 4.30 Ehta 100 kg/m^3 , 5 pisteen lineaarisen regression kulmakerroin.



Kuva 4.31 Pölkky-savetettu 266 kg/m^3 , 5 pisteen lineaarisen regression kulmakerroin.

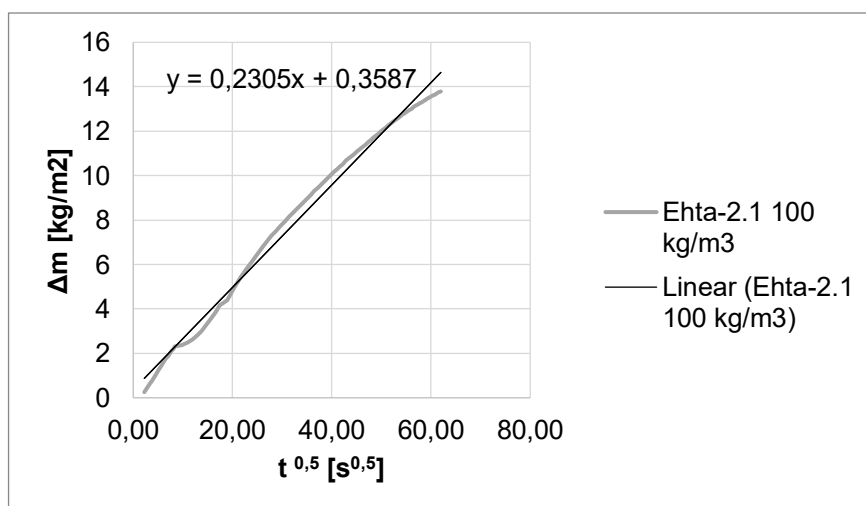


Kuva 4.32 Pölkky 160 kg/m^3 , 5 pisteen lineaarisen regression kulmakerroin.

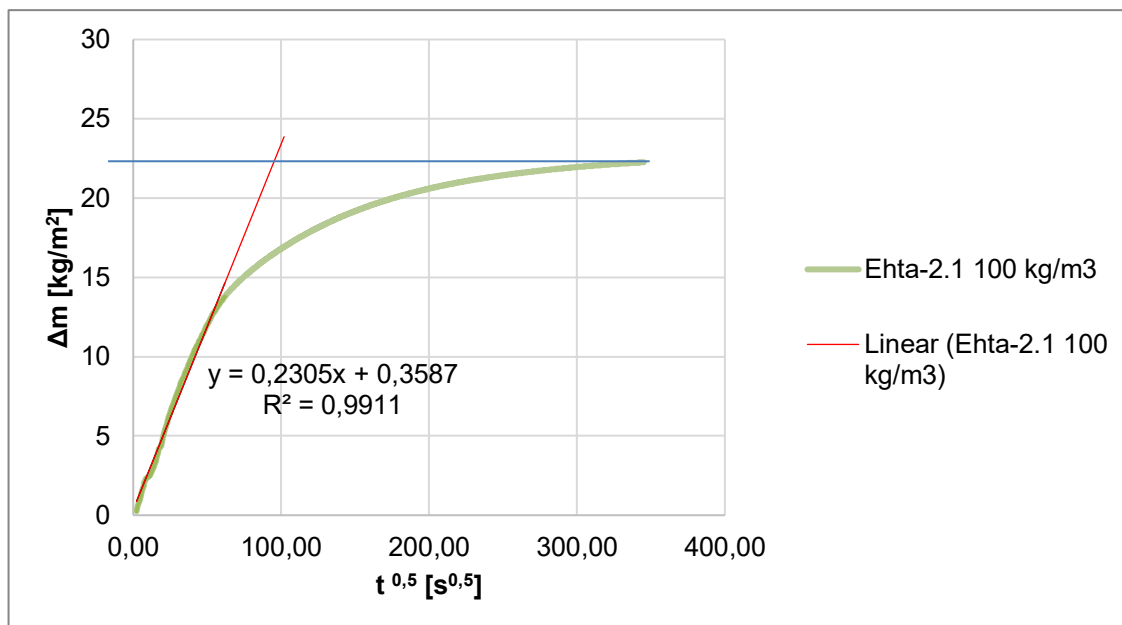


Kuva 4.33 Nimetön $66,5 \text{ kg/m}^3$, 5 pisteen lineaarisen regression kulmakerroin.

Ehta-eristeen kohdalla, tarkasteltaessa tunnin ($\sqrt{3600s} = 60s^{0,5}$) jaksoa vesiupotuksen alusta, saatiin kuvaajasta lähes lineaarinen ja sille lineaarinen regressio ja kulmakerroin (kuva 4.34 ja 4.35). Tämän jälkeen kuvaaja lähtee kaareutumaan voimakkaammin.

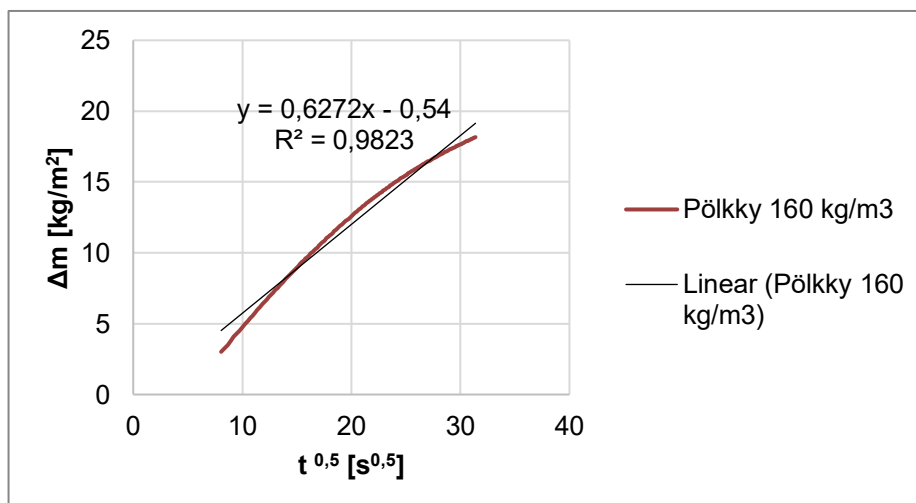


Kuva 4.34 Ehta 100 kg/m^3 , lineaarinen sovite. Veden imeytyminen - massanmuutos ajan neliöjuuren funktiona

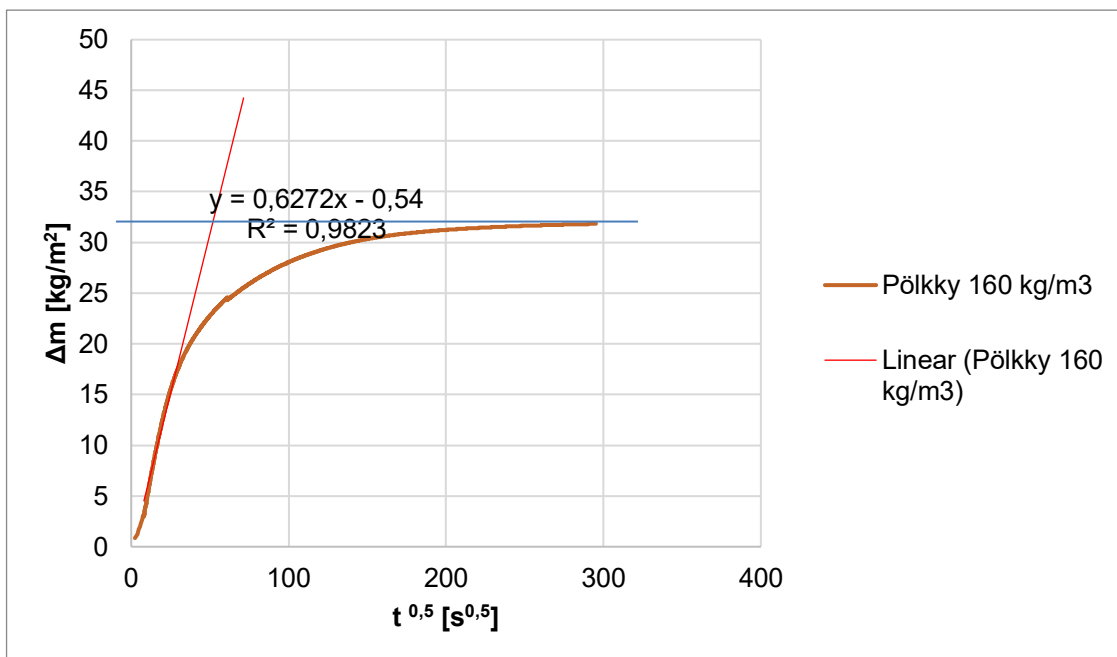


Kuva 4.35 Ehta 100 kg/m³, lineaarinen sovite. Veden imeytyminen - massanmuutos ajan neliöjuuren funktiona

Pölkky-eristeellä tiheydessä 160 kg/m³ lineaarinen osuus ei alkanut kokeen alusta vaan siinä oli noin minuutin kestänyt loivempi jakso. Varsinaista lineaarista jaksoa ei ole, vaan kulmakerroin aleni koko ajan ja massanmuutos kaareutui loivasti (kuva 4.36 ja 4.37).

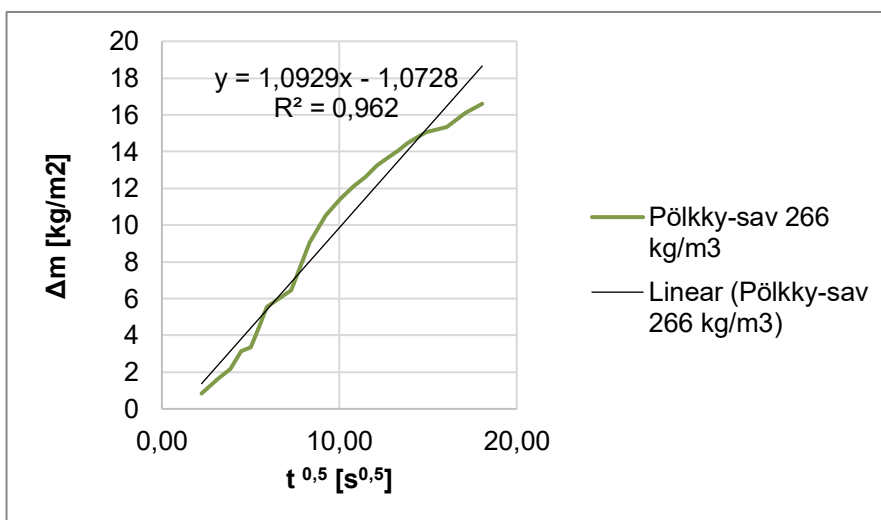


Kuva 4.36 Pölkky 160 kg/m³, lineaarinen sovite. Veden imeytyminen - massanmuutos ajan neliöjuuren funktiona

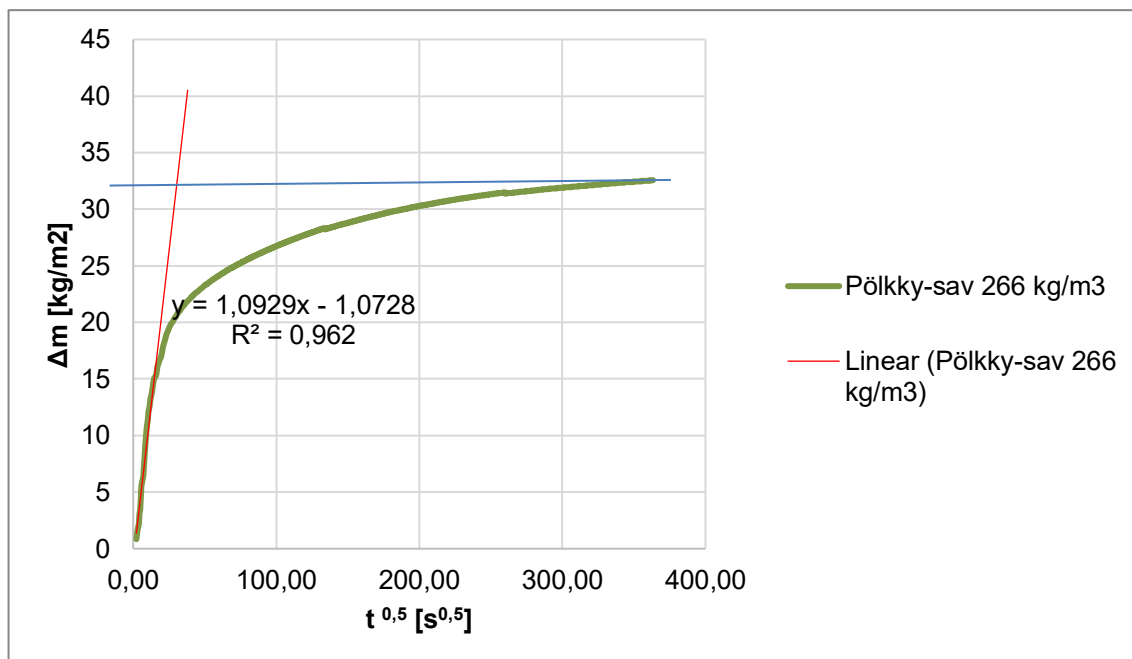


Kuva 4.37 Pölkky 160 kg/m³, lineaarinen sovite. Veden imeytyminen - massanmuutos ajan neliöjuuren funktiona

Pölkky-savetetulle 266 kg/m³ lineaarinen osuus päättyi vielä edellisiäkin nopeammin jo muutaman minuutin kuluessa kokeen alusta. Sovite (kuva 4.38 ja 4.39) on otettu jaksolta 5 minuuttia kokeen alusta.

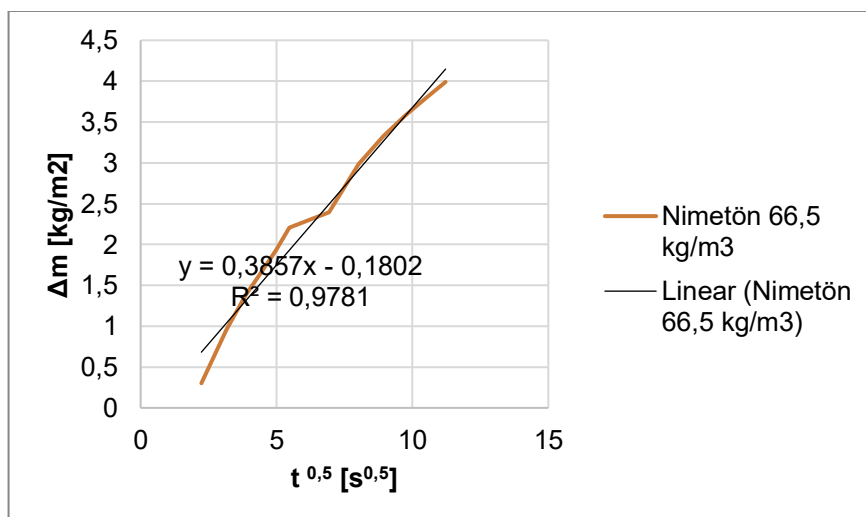


Kuva 4.38 Pölkky-sav. 266 kg/m³, lineaarinen sovite. Veden imeytyminen - massanmuutos ajan neliöjuuren funktiona

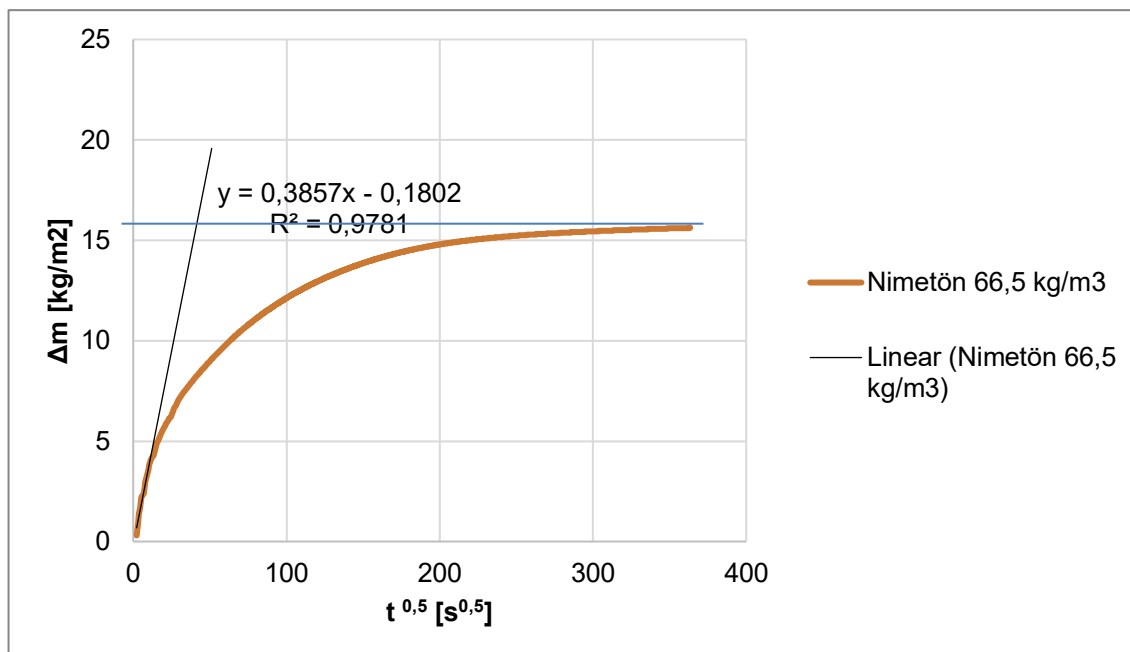


Kuva 4.39 Pölkky-sav 266 kg/m³, lineaarinen sovite. Veden imeytyminen - massanmuutos ajan neliöjuuren funktiona

Nimetön-kutterinlastulle ei löytynyt lineaarista jaksoa ollenkaan. Lineaarinen sovite on tehty alun ensimmäiseltä minuutilta, mutta kuvaajasta 4.41 näkyy että se lähtee jo tällä ajanjaksolla kaareutumaan.



Kuva 4.40 Nimetön 66,5 kg/m³, lineaarinen sovite. Veden imeytyminen - massanmuutos ajan neliöjuuren funktiona



Kuva 4.41 Nimetön $66,5 \text{ kg/m}^3$, lineaarinen sovite. Veden imeytyminen - massanmuutos ajan neliöjuuren funktiona

Laskennallinen arvo veden imeytymiskertoimelle A_w saatiin näiden lineaaristen sovitteiden $f(x)=k_1x+b$ kulmakertoimista k_1 . Kullekin koekappaleelle laskettiin myös kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus w_{cap} (12.6), joka on koekappaleen massanmuutoksen suhde koekappaleen alkuperäiseen tilavuuteen ennen koetta kyllästyskosteuden saavuttamisen hetkellä. Tämä laskettiin piirtämällä vastaavasti lineaarinen sovite tasaiselle osuudelle, ja laskemalla kyllästyskosteuspitoisuus kokeessa imeytyneenä vesimääränä kuutiometriä kohden ja lisäämällä tähän alkutilanteen tasapainokosteuspitoisuus $w_{ads.RH50}$ joka saatiin tasapainokosteuskokeista.

$$w_{cap} = \frac{\Delta m_w(t_{cap})}{A_{kpl} h_{kpl}} + w_{ads.RH50} \quad (12.6)$$

Taulukko 4.18. Veden imeytymiskertoimet ja kyllästyskosteuspitoisuus.

Materiaali	$A_{w.24}$ [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^2)$]	w_{cap} [kg/m^3]
Ehta 100 kg/m^3	0,2305	321
Pölkky 160 kg/m^3	0,6272	464
Pölkky-sav 266 kg/m^3	1,0929	471
Nimetön $66,5 \text{ kg/m}^3$	0,3857	229

Materiaalin veden imeytymiskerroin $A_{w,24}$ ja kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus w_{cap} määritettiin keskiarvona koekappaleiden vastaavista arvoista.

4.7.6 Virhelähteet ja kokeen onnistumisen arviointi

Vedenimukokeessa virhelähteitä aiheuttavia mitattavia suureita olivat punnittu massa ja koekappaleiden mitat. Koekappaleet valmistettiin muoviputkeen, jonka halkaisijan ja materiaalikorkeuden mittavirhe on enintään ± 2 mm. Tällöin vettä imevän pinta-alan tarkkuus on $\pm 2,2$ % ja tilavuuden tarkkuus on 5 %. Vaa'an kalibroinnissa mitattu virhe oli enintään $\pm 0,2$ g ja punnitustarkkuus 0,01 g. Punnittavan materiaalmäärän massan ollessa alimmillaan 125 g punnituisissa massoissa on tällöin arviolta enintään $\pm 0,17$ % virhe. Virhe koskee ainoastaan tiheyden määrittystä. Kokeen aikana mitattavaan kosteusmäärään punnitusvirhe ei vaikuta, sillä kokeessa lasketaan punnitustulosten erotusta, joissa molemmissa on oletettavasti samansuuruinen ja -suuntainen virhe.

Punnituskaapeissa ei ollut kokeen aikana lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mittaavaa anturia. Materiaalilaboratorion olosuhteet olivat kokeiden aikana taulukon 4.17 mukaiset. Ilman suhteellinen kosteus laboratoriossa ei ollut standardin 40-60 % RH välillä. Toisaalta koelaitteiston kaapissa oli vapaa vesipinta ja todennäköisesti laboratoriotilaa korkeampi ilmankosteus. Tuomisen diplomityössä on todettu, että kaappien ollessa suljettuna suhteellinen kosteus on luokkaa 95 % RH, ja lämpötila seurailee mittaushuoneen lämpötilaa (Tuominen, 2016). Standardin vaatimus lämpötilan osalta (yli 18 °C ja ± 2 °C vaihteluväli) toteutui.

Taulukko 4.19. Materiaalilaboratorio, olosuhteet kokeiden aikana.

Olosuhde	alin	ylin	keskiarvo	keskihajonta	95 % luottamusväli
Lämpötila [°C]	19,36	20,87	19,84	0,31	$\pm 0,01$
Suhteellinen kosteus [% RH]	19,84	37,94	27,34	4,33	$\pm 0,13$

Kokeiden kesto-aika oli lyhyt. Haihtumista ei otettu huomioon, mutta koska kokeen kesto oli alle vuorokausi, lineaarisen regression osalta enimmillään 50 minuuttia, haihtumisen voi katsoa olleen merkityksetöntä.

Koekappaleiden pinta oli peittämättä kokeiden aikana, jolloin koekappaleeseen pääsee yläkautta imeytymään ilmasta kosteutta tai kappaleesta haihtumaan kosteutta. Myös

tämän virhelähteen voi katsoa olleen merkityksetön kokeen lyhyen keston ja vesipinnasta imeytyneen merkittävästi suuremman kosteuden vuoksi.

Syvällä vesiupotuksella (jopa 10 mm) oli mahdollisesti merkitystä veden imeytymiseen, koska vesiupotuksessa olleeseen kutterinlastuun on imeytynyt paineenalaisesti vettä. Tästä aiheutuneen virheen suuruutta on vaikea arvioida, mutta imeytyneen veden kokonaismäärään nähden sen voinee katsoa olleen pieni.

Laskennassa veden imeytymiskerroin A_w on pyritty määrittämään lineaarisella regressiolla. Kulmakertoimista (kuva 4.31-4.33) voi kuitenkin havaita, että käytännössä lineaarista osuutta ei ollut. Tällöin sekä veden imeytymiskerroin A_w että kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus w_{cap} ovat karkeita arvioita ja niissä on suuri virhemahdollisuus.

Veden imeytymiskertoimen A_w osalta lineaarisen regression kulmakertoimen määrittämisessä aiheutuva vaihteluväli on niin suuri, että muiden virhelähteiden vaikutus siihen verrattuna ovat pieniä. Kuvaajista arvioitu vaihteluväli veden imeytymiskertoimelle A_w (kulmakertoimen vaihteluväli) ja kapillaariselle kyllästyskosteuspitoisuudelle on esitetty taulukossa 4.18.

Taulukko 4.20 Veden imeytymiskertoimen ja kap. kyllästyskosteuspitoisuuden vaihteluväli.

Materiaali	A_w [kg/m ² s ²]	Vaihteluväli A_w [kg/(m ² s ²)]	w_{cap} [kg/m ³]	Vaihteluväli Δm_w [kg/m ²]	Vaihteluväli w_{cap} [kg/m ³]
Ehta 100 kg/m ³	0,2305	0,15–0,41	329	20–23	288–338
Pölkky 160 kg/m ³	0,6272	0,34–0,9	478	30–33	434–484
Pölkky-sav 266 kg/m ³	1,0929	0,21–2,47	489	31–35	448–518
Nimetön 66,5 kg/m ³	0,3857	0,10–0,39	234	15–17	216–246

5. TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

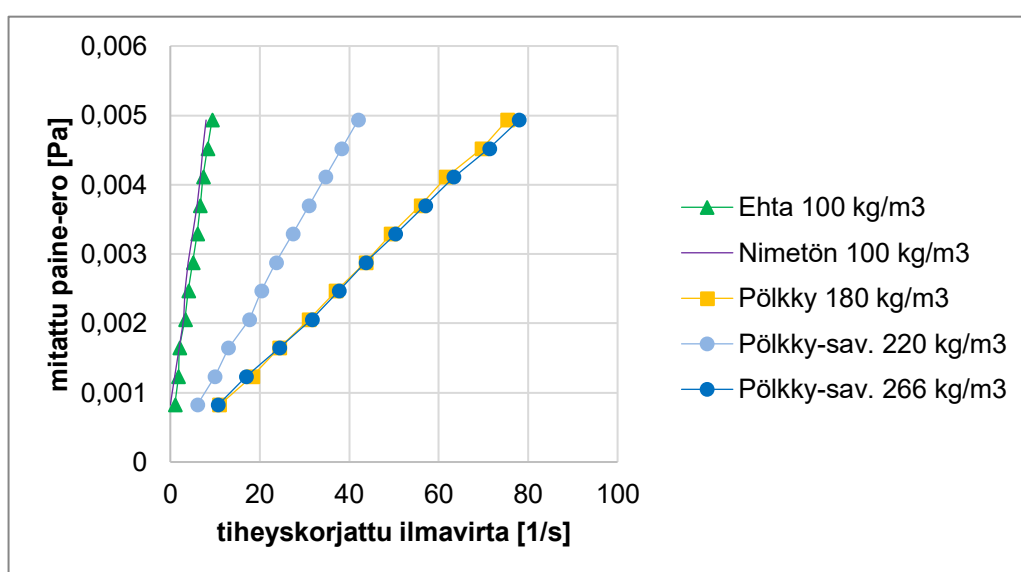
5.1 Ilmanläpäisevyys

Kuvassa 5.1 on esitetty materiaalien mitatut paine-erot ilmavirran funktiona. Käytännössä ilmanläpäisevyydessä ei materiaalien välillä ollut eroavaisuuksia, ja ilmanläpäisevyys määräytyi suoraviivaisesti tiheyden mukaan.

Nimetön kutterinlastun osalta tiheys $66,5 \text{ kg/m}^3$ osoittautui liian harvaksi, eikä riittävää paine-eroa syntynyt, jotta sille olisi saatu tuloksia. Tiheydellä 100 kg/m^3 Nimetön-kutterinlastun ja Ehdan 100 kg/m^3 tulokset olivat samat. Nimetön- ja Ehta-kutterinlastua vertailtaessa näyttäisi siltä, että lastun koolla ja muodolla ei myöskään ollut kokeessa suurta merkitystä.

Tiheydellä 266 kg/m^3 Pölkky-savetettu kutterinlastussa, painosuhteella 2:1 kutterinlastua suhteessa savijauhoon, kutterinlastun määrä vastasi Pölkky-eristeen tiheyttä 180 kg/m^3 . Pölkkyllä ja Pölkky-savetetulla ilmanläpäisevyys olivat samat. Savetuksella ei siis näyttäisi olleen vaikutusta ilmanläpäisevyyteen. Myös Nimetön ja Ehta noin tiheydellä olivat lähellä toisiaan.

Tulosten perusteella kutterinlastustuotteiden ilmanläpäisevyys määräytyy suoraan tiheyden perusteella.



Kuva 5.1 Ilmanläpäisevyys ka $[m^3/(msPa)]$.

Taulukossa 5.1 esitetty ilmanläpäisevyyskerroin on näiden käyrien lineaaristen regressiosovitteiden kulmakerroin. Mittausepävarmuutta ei ole esitetty, koska keskihajontaa koe-erien mittausten välille ei syntynyt. Tämä, johtuu siitä että mittaustarkkuus ei ollut riittävä tuottamaan hajontaa.

Vertailuun on otettu RIL-255-1-2014 oppaasta (RIL-255-1, 2014) puhallettava kivivilla ja puhallettava puukuitueriste, sekä aiemmassa tutkimuksessa saatuja arvoja (Hänninen, et al., 1997). Kokeissa seinärakennetiheyksillä saadut tulokset vertautuvat hyvin aiempiin vastaavilla materiaali- tiheyksillä saatuihin arvoihin.

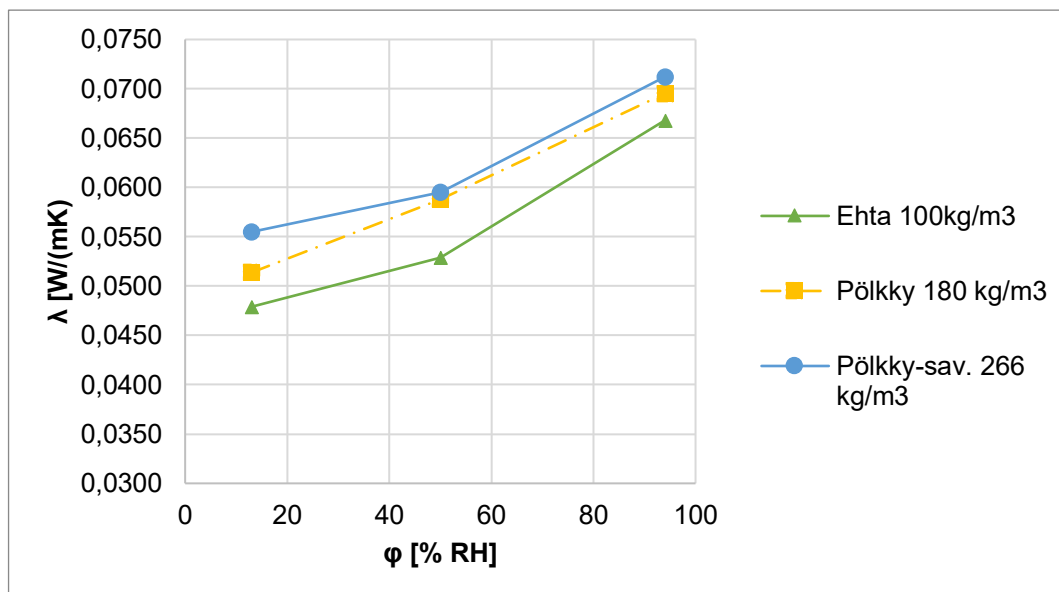
Taulukko 5.1 Ilmanläpäisevyys. *) Nimetön 66,5 kg/m³ ilmanläpäisevyyttä ei saatu mitattua.

Tuote	Ilmanläpäisevyys*10 ⁻⁴ [m ³ /(msPa)]
Pölkky 180,0 kg/m ³ , 50 % RH	0,64
Pölkky-savetettu 220,1 kg/m ³ , 50 % RH	1,15
Pölkky-savetettu 266 kg/m ³ , 50 % RH	0,62
Ehta 100,0 kg/m ³ , 50 % RH	4,87
Nimetön *) 100,0 kg/m ³ , 50 % RH	5,16
puhallettava kivivilla (RIL-255-1, 2014)	2,8
puhallettava puukuitueriste (RIL-255-1, 2014)	2,4
Puru 160 kg/m ³ 5 % RH (Hänninen, et al., 1997)	1,4
Puru 160 kg/m ³ 88 % RH (Hänninen, et al., 1997)	0,8
Kutteri 80 kg/m ³ 11 % RH (Hänninen, et al., 1997)	1,9

Aiemmissä kokeissa arvot on mitattu eri kosteuksissa ja niissä mitattu ilmanläpäisevyys on hiukan korkeampi. Suuruusluokaltaan ne ovat samansuuruisia ja erot saattavat selittyä eroavaisuuksista koemenetelmässä ja sen epätarkkuudesta harvalla tiheydellä. Ilma pääsee virtaamaan lastujen välistä ja reunoilta, eikä paine-eroa synny.

5.2 Lämmönjohtavuus

Kuvassa 5.2 ja taulukossa 5.2 on esitetty lämmönjohtavuuskokeiden tulokset. Lämmönjohtavuus kasvaa suhteellisen kosteuden kasvaessa. Tämä selittyy materiaalin kosteuspitoisuudella. Suurempi kosteuspitoisuus tarkoittaa suurempaa lämmönjohtavuutta.



Kuva 5.2 Lämmönjohtavuus, koesarja 2, 10 °C keskilämpötila, alalevy 5 °C, ylälevy 15 °C.

Lämmönjohtavuuskokeissa saadut arvot vastasivat hyvin sekä aiemmissä tutkimuksissa saatuja tuloksia, että kirjallisuudessa esiintyviä arvoja (RIL-255-1, 2014). Vertailuarvona käytettiin sahanpuru-kutterinlastu-eristeelle 149 kg/m³ aiemmin Tampereen teknillisessä yliopistossa saatua arvoa 0,054-0,060 W/(mK) (Vinha, et al., 2005).

Ehta-eristeelle oli referenssinä myös valmistajan tuotesertifikaatissa ilmoittama arvo 0,0429 sekä osana Paibira-hanketta Brnon Teknillisessä yliopistossa tehdyissä mittauksissa saatuja tuloksia (Fedorik, 2021) (Paibira. Oulun Ammattikorkeakoulu, 2020). Näissä tutkimuksissa on saatu matalampia lämmönjohtavuuden arvoja.

Paibira-hankkeessa saadut matalammat lämmönjohtavuuden arvot on mitattu pienemmälle kappaleelle. Paibira-hankkeessa vastaavalle Ehta koekappaleelle (96 mm x 485 mm x 485 mm, 1828 g) saatiin lämmönjohtavuudeksi 0,048, joka vastaa nyt tässä tutkimuksessa saatua arvoa. Mahdollisesti isommassa ja korkeammassa koekappaleessa voi esiintyä sisäistä konvektiota, joka nostaa lämmönjohtavuuskokeessa mitattavaa arvoa.

Tuotesertifikaatissa Ehta-eristeelle ilmoitettu 0,042-0,045 W/(mK) saattaa selittyä sillä, että nämä mittaukset on tehty hieman alemmilla 60-80 kg/m³ kuivatiheyksillä ja kokeet on tehty uunikuivalle materiaalille. Tässä tutkimuksessa tehty lämmönjohtavuuskoe uunikuivatulle Ehta-eristeellä antoi tulokseksi 0,044 W/(mK). Tuoteominaisuudet

hygroσκοoppisille materiaaleille mitataankin yleisesti kuivana (Valovirta, 2005), jotta saadaan ilmoitettua materiaaliarvo ilman sitoutuneen kosteuden vaikutusta.

Taulukko 5.2. Lämmönjohtavuudet, koesarja 2, 10 °C keskilämpötila, alalevy 5 °C, ylälevy 15 °C.

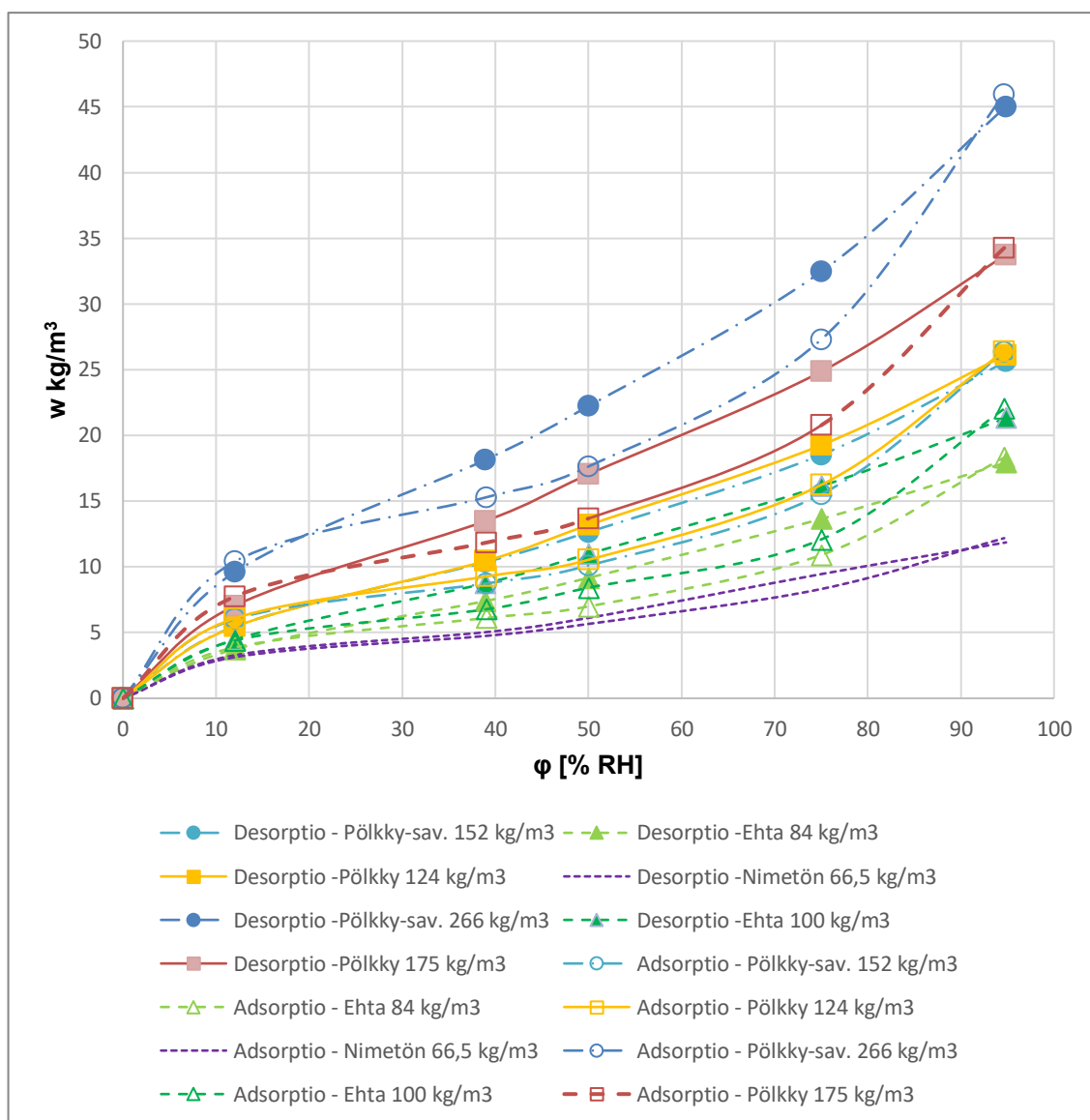
Materiaali	ϕ [% RH]	ρ [kg/m ³]	λ [W/(mK)]	L.väli 95 %
Ehta 124 kg/m ³	13	118	0,048	±0,0012
	50	124	0,053	±0,0003
	94	136	0,067	±0,0023
Pölkky 180 kg/m ³	13	172	0,051	±0,0004
	50	180	0,059	±0,0004
	94	194	0,070	±0,0007
Pölkky-sav. 265 kg/m ³	13	258	0,055	±0,0034
	50	265	0,060	±0,0015
	94	282	0,071	±0,0031
Nimetön 66,5 kg/m ³	50	67	0,054	±0,0014

Lämmönjohtavuudessa Pölkky-eristeen ja savetetun Pölkky-eristeen välillä ei ollut merkitsevää eroa. Savetus ei siis vaikuta lämmönjohtavuuteen.

Vaikka Ehta-eriste on lämmönjohtavuuskokeessa ollut huomattavasti löyhemmässä yläpohjatiheydessä, senkään osalta ei merkittävää eroa ole. Tämä saattaa osittain selittyä myös sillä että varsinkin suuremmissa kosteuspitoisuuksissa Ehta-eristeen tiheys kasvoi sen turvotessa kosteuden vaikutuksesta suhteessa enemmän kuin Pölkky-eristeillä. Sama ero turpoamisessa havaittiin muissakin kokeissa.

5.3 Hygroσκοoppinen tasapainokosteus

Kuvassa 5.3 on esitetty tasapainokosteuskäyrät ja kosteuspitoisuus [kg/m³] eri suhteellisissa ilmankosteuksissa. Kuvaajissa näkyy selvästi kutterinlastun hygroσκοoppisuus ja hystereesi-ilmiö. Aluksi välillä 0-20 % RH adsorptio- ja desorptiokäyrät nousevat nopeasti. Tasapainokosteus muuttuu nopeasti. Tällöin kutterinlastumateriaalissa on paljon pintoja ja huokosia, joihin mahtuu pieni molekyylikerroksen paksuinen vesikerros. Kosteusvälillä 20-60 % RH multimolekylaarisen adsorption alueella tasapainokosteuskäyrä on suhteellisen suora. 60 % RH jälkeen vähäinenkin ilman suhteellisen kosteuden muutos aiheuttaa huomattavan muutoksen tasapainokosteudessa. Tällöin myös keskihajonta ja luottamusväli kasvaa korkeammilla suhteellisilla kosteuksilla.



Kuva 5.3 Hygroskooppinen tasapainokosteus - kg/m^3 . Kutterinlastueristeiden adsorptio- ja desorptiokäyrät [kg/m^3].

Kuvasta näkyy, että savetetulla Pölkky-eristeellä 266 kg/m^3 oli korkeampi tasapainokosteuspitoisuus kuin sitä vastaavalla Pölkky-eristeellä. Pölkky-savetettu-eristeessä oli valmistajan antaman tiedon mukaan ollut 2 paino-osaa Pölkky-kutteria, jolloin sitä oli siinä noin $2/3 \times 266 \text{ kg/m}^3 = 177 \text{ kg/m}^3$. Tätä tiheyttä vastaavalla Pölkky-eristeellä tiheydellä 175 kg/m^3 tasapainokosteus jäi alemmaksi. Savetetun kutterinlastun kosteus valmistuksen yhteydessä ei ollut tiedossa, mutta suhde on likimäärin pätevä myös 50 % RH:ssa, jossa koekappaleiden tiheydet määritettiin. Ero 95 % RH suhteellisessa kosteudessa mitatussa tasapainokosteudessa Pölkky-savetetun (266 kg/m^3) ja sitä vastaavan Pölkky (175 kg/m^3) välillä on niin merkittävä, että mahdollinen virhe laskennallisissa tuloksissa suhteessa mitattuihin (95 % RH kosteudessa noin 5 %) ei selitä

sitä. Savetus siis näyttäisi tämän perusteella lisäävän tasapainokosteutta ja materiaalin kosteudensitomiskykyä hygroskooppisella alueella.

Pölkky-savetettu kutterinlastun tasapainokosteuskäyrä 152 kg/m³ tiheydellä vastasi Pölkky kutterinlastulle 124 kg/m³ tiheydellä mitattuja tasapainokosteuden arvoja. On huomattava, että Pölkky-savetettu oli suhteessa löyhemmässä kuin Pölkky. Laskennallisesti Pölkky-savetetussa oli 152 kg/m³ tiheydessä 101 kg/m³ Pölkky kutterinlastua. Pölkky, Ehta ja Nimetön kutterinlastuilla tasapainokosteus näyttäisi määräytyvän suoraan tiheyden mukaan. Taulukoissa 5.3-5.6 on esitetty tasapainokosteuskäyrien arvot sekä tilavuuden suhteen, että suhteessa kuivamassaan. Tähdellä merkityt arvot on laskettu mitatuista aiemmin luvussa 4.5.4 esitetyllä tavalla. Mittausepävarmuus on esitetty liitteessä (Liite B1).

Tulostaulukossa tulokset on pyöristetty kilogramman tarkkuudella, joka ottaa mittausepävarmuuden huomioon. Tulokset ovat vastaavanlaisia kuin on aiemmissa materiaalikoikeissa saadut arvot (Vinha, et al., 2005).

Taulukko 5.3. Kosteuspitoisuus (kg/m³) – adsorptio.

Kosteuspitoisuus (kg/m ³) - adsorptio								
	ρ [kg/m ³]		φ [% RH]					
	0 % RH	50 % RH	0	12	39	50	75	95
Pölkky-sav.	140 kg/m ³	151 kg/m ³	0	6	9	10	16	26
Ehta	75 kg/m ³	84 kg/m ³	0	4	6	7	11	18
Pölkky	111 kg/m ³	124 kg/m ³	0	6	9	11	16	26
Nimetön	60 kg/m ³	60 kg/m ³	0	3	5	6	9	12
Pölkky-sav. *	245 kg/m ³	266 kg/m ³	0	10	15	18	27	46
Ehta *	90 kg/m ³	100 kg/m ³	0	4	7	8	12	22
Pölkky *	144 kg/m ³	160 kg/m ³	0	8	12	14	21	34

Taulukko 5.4. Kosteuspitoisuus (kg/m³) – desorptio.

Kosteuspitoisuus (kg/m ³) - desorptio								
	ρ [kg/m ³]		φ [% RH]					
	0 % RH	50 % RH	0	12	39	50	75	95
Pölkky-sav.	140 kg/m ³	151 kg/m ³	0	5	10	13	19	26
Ehta	75 kg/m ³	84 kg/m ³	0	4	7	9	14	18
Pölkky	111 kg/m ³	124 kg/m ³	0	5	10	13	19	26
Nimetön	60 kg/m ³	60 kg/m ³	0	3	5	6	9	12
Pölkky-sav. *	245 kg/m ³	266 kg/m ³	0	10	18	22	32	45
Ehta *	90 kg/m ³	100 kg/m ³	0	4	9	11	16	21
Pölkky *	144 kg/m ³	160 kg/m ³	0	7	13	17	25	34

Taulukko 5.5. *Kosteuspitoisuus (kg/kg), adsorptio.*

Kosteuspitoisuus (kg/kg) - adsorptio								
	ρ [kg/m ³]		ϕ [% RH]					
	0 % RH	50 % RH	0	12	39	50	75	95
Pölkky-sav.	140 kg/m ³	151 kg/m ³	0	0,043	0,062	0,072	0,111	0,187
Ehta	75 kg/m ³	84 kg/m ³	0	0,050	0,075	0,094	0,135	0,245
Pölkky	111 kg/m ³	124 kg/m ³	0	0,054	0,082	0,095	0,145	0,239
Nimetön	60 kg/m ³	60 kg/m ³	0	0,052	0,079	0,094	0,138	0,202
Pölkky-sav.*	245 kg/m ³	266 kg/m ³	0	0,042	0,062	0,072	0,111	0,187
Ehta *	90 kg/m ³	100 kg/m ³	0	0,049	0,075	0,094	0,135	0,245
Pölkky *	144 kg/m ³	160 kg/m ³	0	0,054	0,082	0,095	0,145	0,239

Taulukko 5.6. *Kosteuspitoisuus (kg/kg), desorptio.*

Kosteuspitoisuus (kg/kg) – desorptio								
	ρ [kg/m ³]		ϕ [% RH]					
	0 % RH	50 % RH	0	12	39	50	75	95
Pölkky-sav.	140 kg/m ³	151 kg/m ³	0	0,039	0,074	0,091	0,132	0,183
Ehta	75 kg/m ³	84 kg/m ³	0	0,050	0,097	0,122	0,180	0,238
Pölkky	111 kg/m ³	124 kg/m ³	0	0,049	0,094	0,119	0,173	0,235
Nimetön	60 kg/m ³	60 kg/m ³	0	0,055	0,084	0,102	0,157	0,198
Pölkky-sav.*	245 kg/m ³	266 kg/m ³	0	0,039	0,074	0,091	0,132	0,184
Ehta *	90 kg/m ³	100 kg/m ³	0	0,050	0,097	0,122	0,180	0,237
Pölkky *	144 kg/m ³	160 kg/m ³	0	0,049	0,094	0,119	0,173	0,235

5.4 Vesihöyrynläpäisevyys

Taulukossa 5.7 on esitetty vesihöyrynläpäisevyyskokeiden tulokset. Koekappalekohtaiset tulokset on esitetty liitteessä B1. Tähdellä merkityt arvot on mitattu koesarjassa 1, kipsilevy tukilevynä. Vesihöyrynläpäisevyys odotetusti laskee tiheyden kasvaessa. Suurella suhteellisessa kosteudessa vesihöyrynläpäisevyys kasvaa ja diffuusionvastuskerroin laskee. Materiaalin vesihöyrynläpäisevyytenä voidaan pitää alhaisessa suhteellisessa kosteudessa mitattua arvoa. Vesihöyrynläpäisevyyden kasvu suurissa kosteuksissa johtuu suurelta osin muiden kosteuden siirtymismuotojen, kuten pintadiffuusio ja kapillaarinen siirtyminen, lisääntymisestä huokosissa (Luku 2 ja kuva 2.6). Suurissa kosteuksissa osalla Ehta- ja Nimetön-koekappaleita diffuusionvastuskerroin laski arvon 1,0 alle, mikä ei voi pitää paikkaansa, sillä se tarkoittaisi, että vesihöyrynläpäisevyys on suurempi kuin seisovalla ilmalla. Vastaavanlaisia tuloksia on kuitenkin saatu myös aiemmissa tutkimuksissa (Vinha, et al., 2005). Tämä selittynee mittausepä-tarkkuudella harvalla materiaalilla.

Kuivissa olosuhteissa kosteusparilla 11-50 % RH näkyy selvästi eroavaisuuksia vesihöyrynvastuksessa ja johdonmukaisesti tiheimmällä Pölkky-savetettu, vesihöyrynvastus on suurin kun taas Nimetön kutterinlastulla on pienin vesihöyrynvastus.

Korkeassa suhteellisessa kosteudessa erot ovat pienempiä, käytännössä vesihöyrynvastuksessa ei ole eroja. Tämä saattaa selittyä sillä, että korkeassa kosteudessa pintadiffuusio ja kapillaarinen kosteudensiirtyminen korostuvat, joka tasoittaisi tiheämmässä olevien kutterinlastujen Pölkyn ja Pölkky-savetetun eroa muihin harvemmassa tiheydessä oleviin.

Taulukko 5.7. Tulokset vesihöyrynläpäisevyys.

Materiaali	Yksikkö	olo- suhde [% RH]	Pölkky 160 kg/m ³	Ehta, 100 kg/m ³	Pölkky- sav. 266 kg/m ³	Nimetön, 66,5 kg/m ³
Vesihöyrynläpäisykerroin	W_v [m/s]	11–50	1,36E-04	1,90E-04	1,01E-04	2,39E-04
		50–93	7,04E-04*	8,15E-04*	7,27E-04*	2,64E-04
Vesihöyrynläpäisevyys	δ_v [m ² /s]	11–50	12,9E-6	18,1E-6	9,6E-6	22,7E-6
		50–93	2,36E-05*	2,73E-05*	2,43E-05*	2,50E-05
Vesihöyrynvastus 100 mm (* merkityissä 46 mm)	Z_v [s/m]	11–50	7,40E+03	5,26E+03	9,89E+03	4,20E+03
		50–93	1,49E+03*	1,28E+03*	1,45E+03*	3,80E+03
Diffuusionvastuskerroin	μ	11–50	2,07	1,48	2,79	1,18
		50–93	1,19*	1,02*	1,16*	1,07

Diffuusionvastuskertoimen osalta, vaikka keskiarvoa on yli 1, osalla Ehta ja Nimetön koekappaleita kerroin oli alle 1 (Liite C1). Käytännössä tämä tarkoittaisi, että materiaalin vesihöyrynvastus on pienempi kuin seisovan ilman, mitä se ei voi olla. Vastaavia tuloksia on saatu korkeissa kosteuspitoisuuksissa myös aiemmissa tutkimuksissa kutterinlastulle (Vinha, et al., 2005).

5.5 Veden imeytymiskerroin

Taulukossa 5.8 on esitetty vedenimukokeessa saadut tulokset ja lasketut veden imeytymiskertoimet A_w ja 24 tunnin keskiarvona saatu $A_{w,24}$, sekä kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus w_{cap} . Taulukossa on suluissa esitetty vaihteluväli A_w ja w_{cap} osalta. Vaihteluvälinä veden imeytymiskertoimen osalta on lineaarisen regression kulmakertoimen vaihteluväli ja kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden osalta laskettu kyllästyskosteuspitoisuus kuvaajasta arvioidulla vaihteluvälillä.

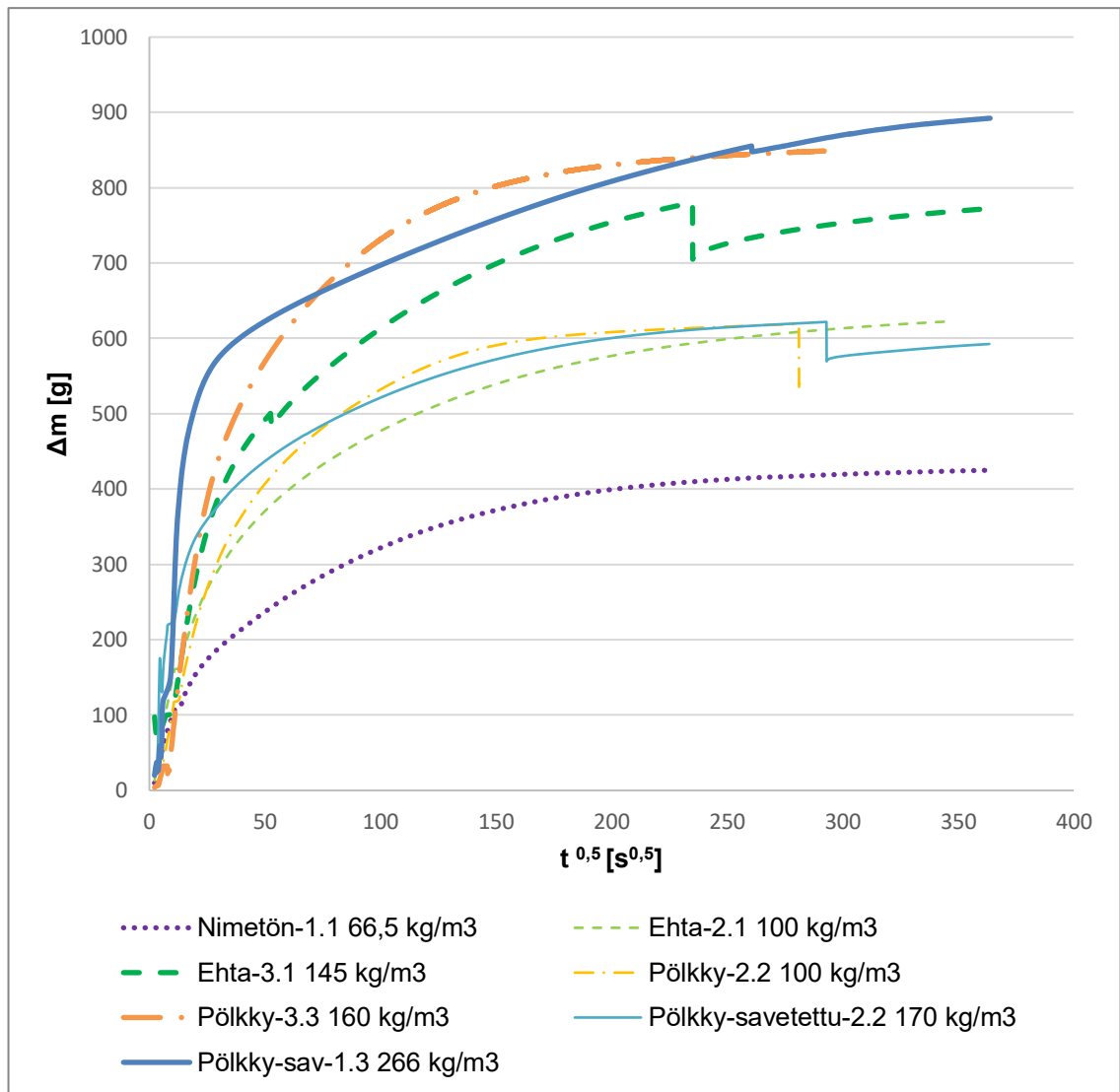
Koska painonnousukäyrässä ei ole selkeää lineaarista aluetta ja taitekohtaa, standardinmukaista arvoa A_w , ei voitu laskea, vaan standardin mukaan olisi laskettava $A_{w,24}$. Tästä ei kuitenkaan ole rakennusfysiikan laskentatarkasteluissa hyötyä, joten käyristä pyrittiin löytämään lineaarisella regressiolla alue, josta voidaan laskea kulmakerroin eli veden imeytymiskerroin A_w . Koska lineaarinen sovite oli lyhyeltä ajalta kokeen alussa ja kulmakerroin vaihteli tälläkin alueella hyvin paljon, tässä arvossa ja sen perusteella lasketussa kyllästyskosteuspitoisuudessa w_{cap} on hyvin paljon mittaausepävarmuutta.

Taulukko 5.8. Tulokset, veden imeytyminen.

Materiaali	Yksikkö	Olo- suhde [% RH]	Pölkky 160 kg/m ³	Ehta, 100 kg/m ³	Pölkky- sav. 266 kg/m ³	Nimetön, 66,5 kg/m ³
Veden imeytymis- kerroin	A_w kg/(m ² s ²)	50	0,6272 0,34–0,9	0,2305 0,15–0,41	1,0929 0,21–2,47	0,3857 0,10–0,39
Veden imeytymis- kerroin	$A_{w,24}$ [kg/(m ² s ²)]	50	0,144	0,091	0,144	0,07
Kapillaarinen kyllästyskosteus- pitoisuus	w_{cap} [kg/m ³]	50	478 434–484	329 288–338	489 448–518	234 216–246

Kuvassa 5.4 on esitetty veden imeytyminen ajan neliöjuuren funktiona. Kuvaajista näkyy, että kutteristueristeen vedenimukokeessa ei ole selkeää lineaarista jaksoa alussa, eikä taitekohtaa ajanhetkellä, jossa kosteus on saavuttanut koekappaleen yläpinnan. Veden imeytyminen ja kosteusrintaman eteneminen materiaalissa on niin nopeaa, että kosteus ehtii saavuttaa kappaleen yläpinnan huomattavasti nopeammin, kuin materiaalin huokokset (kutterinlastueristeen tapauksessa solut) kyllästyvät vedellä. Kosteus leviää ensin tasaisesti koko materiaaliin ensin soluväleihin ja soluseinämiin, jonka jälkeen solujen sisäosat alkavat täyttyä vedellä.

Kuvasta näkyy myös, että veden imeytymisen puhtaiden kutterinlastunäytteiden välillä määrittelee käytännössä tiheys. Nimetön 66,5 kg/m³ tiheydellä imee vähiten vettä itseensä, kun taas Pölkky 160 kg/m³ imee yli kaksinkertaisen määrän. Kuvasta myös näkyy että Pölkky-savetettu tasatulla ripotellulla tiheydellä 170 kg/m³ imee saman määrän kosteutta kuin Pölkky vastaavalla tiheydellä 100 kg/m³. Vastaavasti nämä materiaalit imevät vertailukelpoisilla seinärakennetiheyksillä saman määrän. Pölkky-savetetun kohdalla näkyy, se että alkuun massa kasvaa nopeammin ja taittuu jyrkemmin. Tämä saattaa selittyä sillä, että kosteus siirtyy kapillaarisesti savetettujen lastujen pinnalla nopeasti näytteen yläpintaan.



Kuva 5.4 Kutterinlastumateriaalien tiheyden vaikutus veden imeytymiseen ajan neliöjuuren funktiona.

6. YHTEENVETO

Diplomityön tavoite oli määrittellä materiaaliominaisuudet ECOSAFE-hankkeessa käytetyille kutterinlastutuotteille hankkeen laskentatarkasteluja varten.

Tutkimuksen tuloksena saatiin johdonmukaiset tulokset tarkastelluille kutterinlastumateriaaleille, joskin vesihöyrynläpäisykokeen ja vedenimukokeen tuloksiin liittyy epävarmuutta. Tarkka tiheyden määrittäminen oli ongelmallista johtuen jo yksin siitä, että kutterinlastun tilavuus muuttuu kosteuden muuttuessa merkittävästi.

Taulukko 6.1 Yhteenveto materiaaliominaisuuksista.

Materiaali	yksikkö	olo- suhde [%RH]	Pölkky 180 kg/m ³)160 kg/m ³	Ehta, 100 kg/m ³	Pölkky- sav. 266 kg/m ³	Nimetön, 66,5 kg/m ³
Lämmönjohtavuus	λ [W/(mK)]	11	0,052	0,052	0,055	
	λ [W/(mK)]	50	0,058	0,055	0,059	0,054
	λ [W/(mK)]	93	0,065	0,063	0,065	
Ilmanläpäisevyys	k_a [*10 ⁻⁴ m ³ /(msPa)]	50	0,64	4,87	0,62	1,74
Vesihöyrynlä- päisykerroin	W_v [m/s]	11–50	1,36E-04	1,90E-04	1,01E-04	2,39E-04
	W_v [m/s]	50–93	7,04E-04	8,15E-04	7,27E-04	2,64E-04
Vesihöyrynlä- päisevyys	δ_v [m ² /s]	11–50	12,9E-6	18,1E-6	9,6E-6	22,7E-6
	δ_v [m ² /s]	50–93	2,36E-05	2,73E-05	2,43E-05	2,50E-05
Vesihöyrynvastus	Z_v [s/m]	11–50	7,40E+03	5,26E+03	9,89E+03	4,20E+03
	Z_v [s/m]	50–93	1,49E+03	1,28E+03	1,45E+03	3,80E+03
Diffuusionvastus- kerroin	μ	11–50	2,07	1,48	2,79	1,18
	μ	50–93	1,19	1,02	1,16	1,07
Veden imeytymiskerroin	A_w [kg/(m ² s ²)]	50	0,6272	0,2305	1,0929	0,3857
Veden imeytymiskerroin	$A_{w,24}$ [kg/(m ² s ²)]	50	0,144	0,091	0,144	0,07
Kapillaarinen kyllästyskosteus	w_{cap} [kg/m ³]	50	478	329	489	234
*) Pölkky kutterinlastulle hydr. tasapainokosteuspitoisuus, vesihöyrynläpäisevyys ja vedenimukoe määritettiin tiheydessä 160 kg/m ³						

Toisena tavoitteena oli tutkia, oliko eri kutterinlastutuotteiden välillä eroavaisuuksia materiaaliominaisuuksissa. Tutkimuksessa ollut Ehta-eriste on kuusta, josta on hienoaainesta seulottu pois. Pölkky on tehty sekapuusta, jossa voi olla mäntyä ja kuusta

sekaisin. Nimetön kutteri edusti kokeissa ns. jokamiehen kutterinlastua, jota voi olettaa saatavan suoraan piensahalta. Kokeissa olleesta Nimettömästä kutterista on todettava, että se oli isompilastuista kuin Ehta ja Pölkky. Nimettömän kutterin osalta ei ollut tiedossa, onko materiaali mäntyä vai kuusta. Värin perusteella se oli todennäköisesti mäntyä.

Näyttäisi siltä, että kutterinlastujen materiaaliominaisuuksien väliset erot selittyvät suurelta osin tiheyseroilla. Puulajilla (mänty tai kuusi) tai kutterinlastun muodolla ei näyttäisi olleen vaikutusta tuloksiin. Tulosten voi olettaa pätevän laajemminkin kutterinlastutuotteille, sillä kuten luvussa 3.2 todettiin, teollisessa tuotannossa käytetyt höyläkoneet ja menetelmät ovat samankaltaisia, joten tuotetun kutterinlastunkin voi olettaa olevan samanlaista. Tulokset eivät eronneet myöskään eniten muista tuotteista eroavalla Nimetön kutterinlastulla. Kokeissa ei tutkittu homehtumista, mutta silmämääräisesti oli havaittavissa että Ehta, joka on kuusta, vaikutti kestävän säilytystä suurissa kosteuksissa muita paremmin. Tämän todentaminen vaatisi kuitenkin lisätutkimusta.

Ilmanläpäisevyyden osalta tiheys oli ainoa määrittävä tekijä. Eri kutterinlastujen välillä ei ollut havaittavissa muuten eroja. Johtuen koemenetelmästä Nimettömän kutterin osalta ei 66,5 kg/m³ saatu luotettavaa tulosta, mutta 100 kg/m³ tiheydellä tulos oli sama kuin Ehdalla vastaavalla tiheydellä. Vastaavasti Pölkyn (180 kg/m³) ja Pölkky-savetetun (266 kg/m³) osalta ilmanläpäisevyydet olivat samat.

Myös lämmönjohtavuuden osalta tulokset olivat kaikille mitatuille tuotteille välillä 0,048–0,065 W/(mK) siten, että kosteuden pysyessä normaaleissa olosuhteissa alle 50 % RH erot olivat pieniä. Suhteellisen kosteuden kasvaessa lämmönjohtavuus kasvaa erityisesti suurilla kosteuksilla. Erot tuotteiden välillä olivat pieniä. Erot määräytyivät tiheyden perusteella, mutta tutkituilla tiheyksillä erot olivat marginaalisia.

Hygroskooppinen tasapainokosteuskoe tehtiin eri tiheydessä kuin tavoitetiheys (elementtien asennustiheys), mutta lämmönjohtavuuskokeen koekappaleita pystyttiin käyttämään sen todentamiseen, että laskennalliset tulokset pätevät myös tavoitetiheydessä. Tasapainokosteuskäyrissä näkyi materiaalin hystereesi tasapainokosteuskäyrien erotessa toisistaan adsorptiossa ja desorptiossa. Odotettavasti tilavuuteen nähden tiheämmillä materiaaleilla tasapainokosteuspitoisuudet olivat suurempia. Mitatulla ripotellulla tiheydellä Pölkky ja Pölkky-savetettu välillä ei ollut

nähtävissä eroja. Sen sijaan rakennetiheyksille lasketuilla käyrillä ero oli merkittävä. Pölkky-savetetulla on rakennetiheydessä (266 kg/m³) sisältää lähes vastaavan määrän kutterinlastua kuin Pölkky tiheydellä (175 kg/m³). Tasapainokosteus sillä on kuitenkin merkittävästi suurempi. Näyttäisi siis, että savi nostaa tasapainokosteutta korkeissa kosteusolosuhteissa.

Vesihöyrynläpäisevyydessä ei myöskään ole havaittavissa eroja kutterinlastutuotteiden välillä. Tulokset määräytyvät johdonmukaisesti tiheyden perusteella. Vesihöyrynläpäisevyyden osalta kehitettiin samalla tutkimusmenetelmää irtomateriaalin vesihöyrynläpäisevyyden mittaamiseksi.

Vedenimukoe tehtiin materiaaleille sekä edellä mainituilla ripotelluilla tiheyksillä että rakennekoetiheyksillä. Ripotelluilla tiheyksillä mitatut vedenimukäyrät olivat lähellä toisiaan ja vastaavasti seinärakennetiheyksillä käyrät olivat lähellä toisiaan. Kuvaajissa ei ole nähtävissä alussa selkeää lineaarisuutta, kapillaarisen kosteuden etenemistä alhaalta ylös ja tasaantumista kosteuden saavuttaessa yläpinnan. Tämä on odotettavaa kutterinlastulle, jossa yksittäisten lastujen syysuunta vaihtelee ja kosteus leviää materiaalissa tasaisesti joka suuntaan. Kosteus saavutti myös kappaleen yläpinnan ennen 24 tunnin aikarajaa. Tämän vuoksi standardinmukaisia A_w ja w_{cap} arvoja ei voinut kutterinlastuille määrittellä, vaan standardissa määritelty 24 tunnin ajalta laskettava $A_{w,24}$ arvo. Tästä ei kuitenkaan ole hyötyä laskentatarkasteluissa, koska se ei kuvaa todellista kapillaarista veden imeytymistä kovinkaan hyvin. Laskentatarkasteluja varten materiaaleille pyrittiin määrittämään myös veden imeytymiskerroin A_w .

Kolmantena tavoitteena oli tutkia savetuksen vaikutusta. Savetuksella näyttäisi olleen vaikutusta tasapainokosteuskokeessa ja vedenimukokeessa. Tasapainokosteuskokeessa savetus näyttäisi lisänneen tasapainokosteutta suuremmilla kosteuspitoisuuksilla. Samoin vedenimukokeessa näkyy, että Pölkky-savetettu imee itseensä suuremman määrän kosteutta. Sen osalta vedenimukokeessa on havaittavissa myös jyrkin muutos painonnousukuvaajassa, mikä kertoo voimakkaammasta kapillaarisuudesta. Tätä tavoitetta varten olisi ollut hyvä tutkia savetettua kutterinlastua eri savetussuhteilla ja siten, että on tarkasti tiedossa kutterinlastun ja savijauhon määrä koekappaleissa. Tässä tutkimuksessa ei tiedetty, mikä oli kutterinlastun kosteuspitoisuus savetuksen yhteydessä, eikä myöskään täsmällisesti, kuinka paljon savea on irronnut koemateriaalista ennen koekappaleiden valmistusta. Samoin olisi ollut mielenkiintoista tutkia savijauhon

materiaaliominaisuudet, sillä savea on tutkittu paljon savena, mutta savijauhona sen ominaisuuksia ei ole tutkittu.

Kutterinlastu on pitkään ollut menneiden aikojen eristeen maineessa. Sen lämmöneristävyys on parempi kuin mitä sille mitoitusaulukoissa annettu $0,07 \text{ W/(mK)}$ on antanut ymmärtää, vastaavalla tavalla kuivana mitattuna kuin yleisesti kaupalliset eristeet sen lämmönjohtavuus oli $0,045 \text{ W/(mK)}$ luokkaa.

Lähteet

- 12572:2016, S.-E. I., 2016. Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of water vapour transmission properties. Cup method (ISO 12572:2016). s.l.:s.n.
- Alakangas, E., 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo: VTT Energia.
- Eskola, P. (., Leiponen, K. (., & Leka, O. (., 1957. Jokamies rakentajana. Helsinki: Werner Söderström osakeyhtiö.
- Fedorik, F. (., a., 2021. Hygrothermal properties of advanced bio-based insulation materials. s.l.:s.n.
- Fredriksson, E., Englund & Maria, T., 2021. Wood Modification as a Tool to Understand Moisture in Wood. *Forests*, 12(372).
- Hagentoft, C.-E., 2001. Introduction to Building Physics. Malmö: Studentlitteratur.
- Hemmilä, et al., 2001. VTT Julkaisuja 849, Ympäristöystävällinen puuntyöstö. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.
- Hänninen, J., Rissanen, R. & Viljanen, M., 1997. Julkaisu 59, Sahateollisuuden purutuotteet rakennusten eristemateriaaleina. Espoo: Talonrakennustekniikan laboratorio.
- Ilmanläpäisevyyskoe, Toimintatapaohje, 2017. Ilmanläpäisevyyskoe, Rakennusfysiikan tutkimusryhmän toimintatapaohje. [Luettu 28.11.2021].
- Jackon Finland Oy, 2021. Thermisol Platina Katto. <https://www.jackon.fi/materiaalipankki/esitteet/> [Luettu 22.5.2021].
- Joy, F. A. & Wilson, A. G., 1966. Standardization of the dish method for measuring water vapor transmission. Ottawa: NRC Publications Record / Notice d'Archives des publications de CNRC.
- Krabbenhøft, K., 2004. Moisture Transport in Wood, A Study of Physical-Mathematical Models and their Numerical Implementation. BYG-Rapport No. R-153 ed. s.l.:Technical University of Denmark. .
- Kärkkäinen, M., 2003. Puutieteen perusteet. Hämeenlinna: Metsälehti Kustannus.
- Kärkkäinen, M., 2007. Puun rakenne ja ominaisuudet. Hämeenlinna: Metsä kustannus.
- Lasercomp, 2009. FOX200, FOX300, FOX304 and FOX314 Instrument manual. Saugus, Massachusetts, U.S.A.: Lasercomp Inc.
- Mandelin, W., 1957. Jokamies rakentajana. Porvoo: Werner Söderström osakeyhtiö.
- Metsälä, H., 1997. Puukirja. Helsinki: Rakennusalan kustantajat RAK.
- MFPA-Leipzig, 2019. <https://www.holz-lehmhaus.eu/downloads.https://cdn.website-editor.net/88931d96e02849c68a0d7228641a0ebf/files/uploaded/Bauzulassung%252022.05.2020.pdf> [Luettu 13.5.2021].
- Paibira. Oulun Ammattikorkeakoulu, 2020. PaiBiRa - Paikalliset Biopohjaiset Rakennusmateriaalit, Työpaketti 2, mittaukselliset. <https://www.paibira.fi/tyopaketti> [Luettu 4.11.2021].

Pinteric, M., 2017. Building Physics, From physical principles to international standards. s.l.:Springer International Publishing AG.

Pro Puu-keskus, 2021. Puutieto - Puuproffa. <https://puuproffa.fi/puutieto> [Luettu 29.12.2021].

Puuinfo, 2021. Puutieto, puun kosteustekniset ominaisuudet. [Online] Available at: <https://puuinfo.fi/puutieto/puun-ominaisuuksia/puun-kosteustekniset-ominaisuudet/> [Luettu 4.11.2021].

Rakentajain kalenteri, 1924. Rakentajain kalenteri. Helsinki: Suomen rakennusmestariliitto. Rakentajain kustannus Oy.

Rakentajain kalenteri, 1956. Helsinki: Suomen rakennusmestariliitto, Rakentajain kustannus Oy.

RIL, 2014. Rakennusfysiikka 1. Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

SFS-12114, 2000. SFS-EN ISO 12114. Rakennusten lämpötekniset ominaisuudet. rakennusosien ja -elementtien ilmanläpäisevyys. laboratoriotestimenetelmä. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SFS-12570, 2000. SFS-EN ISO 12570. Rakennusmateriaalien ja -tuotteiden lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Kosteuden määrittäminen korotetussa lämpötilassa.. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.

SFS-12571, 2014. SFS-EN ISO 12571. Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of hygroscopic sorption properties. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

SFS-12667, 2001. SFS-EN 12667. Rakennusmateriaalien ja -tuotteiden lämpötekniset ominaisuudet. Lämmönvastuksen määrittäminen kuumalevy- ja lämpövirtalevylaitteella. Tuotteet, joilla on korkea tai suhteellisen korkea lämmönvastus. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.

SFS-12939, 2001. SFS-EN 12939. Rakennusmateriaalien ja -tuotteiden lämpötekniset ominaisuudet. Lämmönvastuksen määrittäminen kuumalevy- ja lämpövirtalevylaitteella. Paksut tuotteet, joilla on korkea tai suhteellisen korkea lämmönvastus. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.

SFS-15148, 2003. SFS-EN ISO 15148. Hygrothermal performance of building materials and products -Determination of water absorption coefficient by partial immersion (ISO 15148:2002). Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.

SFS-9053, 2018. SFS-EN ISO 9053-1:2018. Acoustics. Determination of airflow resistance. Part 1: Static airflow method (ISO 9053-1:2018). Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry..

Shankar, V. & Hagentoft, C. E., 2000. A Numerical Study of Effect of Natural Convection on Thermal Properties of Horizontal Oriented Porous Insulation. Göteborg: Department of Building Physics Chalmers University of Technology.

Siikanen, U., 2008. Puurakentaminen. Tampere: Rakennustieto.

Siikanen, U., 2014. Rakennusfysiikka, Perusteet ja sovelluksia. Tampere: Rakennustieto.

Sundqvist, H. & Jääskeläinen, A.-S., 2007. Puun rakenne ja kemia. s.l.:Otatiето.

- Tuominen, E., 2016. Laastien ja betonien kapillaarisuusominaisuuksien määrittäminen vapaan veden imeytyskokeella. Tampere: Tampereen Teknillinen Yliopisto.
- Valovirta, I., 2005. Lämpövirtalevylaitteen toimintaperiaate ja yleisimmät ongelmat. s.l.:Tampereen Teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikan laboratorio.
- Vinha, J., 2007. Hygrothermal Performance of Timber-Framed External Walls in Finnish Climatic Conditions. Tampere: Tampereen Teknillinen Yliopisto.
- Vinha, J., 2011. Rakennusfysiikka, luentomoniste osat 1 ja 2. Tampere: Tampereen Teknillinen Yliopisto.
- Vinha, J. et al., 2005. Tutkimusraportti 129, Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja kosteuden funktiona. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan osasto, Talonrakennustekniikan laboratorio.
- Virolainen, et al., 2002. Puutuoteteollisuus I, Tekniset ja taloudelliset perusteet. Helsinki: Edita Prima.
- Wegelius, R. L., 1952. Talonrakennustekniikan käsikirja 2. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Kirjamies.
- Weinig, 2021. Alles über werkzeug.
https://www.weinig-holzher.ch/fileadmin/assets/migrated_zu_verschieben/pdfs_docs/Alles_ueber_Werkzeug_Screen.pdf
- Welling, 2002. Puutuoteteollisuus I, tekniset ja taloudelliset perusteet. Helsinki: Opetushallitus, Edita Prima.

Liite A1: Lämmönjohtavuuskokeet, koesarja 1

Pölkky - Savetettu	ΔT [°C]	ϕ [% RH]	λ [W/(mK)]	Keski-hajonta	L.väli 90 %	Alaraja [W/(mK)]	Yläraja [W/(mK)]
Adsorptio	0-20	13	0,054	3,24E-04	0,0005	0,054	0,055
	0-20	50	0,058	5,29E-04	0,0009	0,058	0,059
	0-20	93	0,070	1,47E-03	0,0025	0,067	0,072
	(-10)-10	93	0,062	1,20E-03	0,0020	0,060	0,064
Desorptio	0-20	14	0,056	1,17E-03	0,0020	0,054	0,058
	0-20	50	0,059	9,77E-04	0,0016	0,057	0,061
	0-20	94	0,069	9,16E-04	0,0015	0,067	0,070
	0-20	94	0,067	7,97E-04	0,0013	0,066	0,069
Keskiarvo	0-20	12	0,055				
	0-20	50	0,059				
	0-20	95	0,069				
	0-10	95	0,065				
Ehta	ΔT [°C]	ϕ [% RH]	λ [W/(mK)]	Keski-hajonta	L.väli 90 %	Alaraja [W/(mK)]	Yläraja [W/(mK)]
Adsorptio	0 - 20	13	0,051	3,47E-04	0,0006	0,051	0,052
	0 - 20	50	0,055	1,42E-04	0,0002	0,055	0,056
	0 - 20	93	0,068	1,39E-03	0,0023	0,066	0,071
	(-10)-10	93	0,058	1,20E-03	0,0020	0,056	0,061
Desorptio	0 - 20	14	0,053	3,40E-04	0,0006	0,053	0,054
	0-20	50	0,055	3,72E-04	0,0006	0,054	0,055
	0-20	94	0,067	8,43E-04	0,0014	0,066	0,069
	0-10	94	0,066	1,96E-04	0,0003	0,065	0,066
Keskiarvo	0-20	12	0,052				
	0-20	50	0,055				
	0-20	95	0,068				
	0-10	95	0,062				
Pölkky	ΔT [°C]	ϕ [% RH]	λ [W/(mK)]	Keski-hajonta	L.väli 90 %	Alaraja [W/(mK)]	Yläraja [W/(mK)]
Adsorptio	0-20	13	0,054	5,93E-04	0,0010	0,053	0,055
	0-20	50	0,059	4,65E-04	0,0008	0,058	0,059
	0-20	93	0,071	1,78E-04	0,0003	0,071	0,072
	(-10)-10	93	0,063	1,12E-04	0,0002	0,062	0,063
Desorptio	0-20	14	0,051	4,94E-04	0,0008	0,050	0,052
	0-20	50	0,058	4,86E-04	0,0008	0,057	0,059
	0-20	94	0,067	3,71E-04	0,0006	0,066	0,068
	0-10	94	0,064	1,67E-04	0,0003	0,064	0,064
Keskiarvo	0-20	12	0,052				
	0-20	50	0,058				
	0-20	95	0,069				
	0-10	95	0,063				

Liite A2: Lämmönjohtavuuskokeet, koesarja 2

Koekappale	φ [%RH]	λ [W/(mK)]	λ_{ka} [W/(mK)]	K.hajonta	L.väli 95 %	Alaraja	Yläraja
E-2.1	13	0,048	0,0479	4,98E-04	1,24E-03	0,047	0,049
E-2.2	13	0,048					
E-2.3	13	0,048					
E-5.1	50	0,053	0,0529	1,01E-04	2,50E-04	0,053	0,053
E-5.2	50	0,053					
E-5.3	50	0,053					
E-1.1	93	0,067	0,0668	9,42E-04	2,34E-03	0,064	0,069
E-1.2	93	0,067					
E-1.3	93	0,066					
P-4.1	13	0,051	0,0514	1,73E-04	4,31E-04	0,051	0,052
P-4.2	13	0,051					
P-4.3	13	0,052					
P-5.1	50	0,059	0,0587	1,65E-04	4,09E-04	0,058	0,059
P-5.2	50	0,059					
P-5.3	50	0,059					
P-3.1	93	0,069	0,0695	2,95E-04	7,33E-04	0,069	0,070
P-3.2	93	0,070					
P-3.3	93	0,070					
PS-4.1	13	0,057	0,0555	1,39E-03	3,45E-03	0,052	0,059
PS-4.2	13	0,056					
PS-4.3	13	0,054					
PS-5.1	50	0,059	0,0596	6,16E-04	1,53E-03	0,058	0,061
PS-5.2	50	0,060					
PS-5.3	50	0,060					
PS-3.1	93	0,071	0,0712	1,23E-03	3,06E-03	0,068	0,074
PS-3.2	93	0,073					
PS-3.3	93	0,070					
R-1.1	50	0,054	0,0538	5,50E-04	1,37E-03	0,052	0,055
R-1.2	50	0,053					
R-1.3	50	0,054					

Liite B1: Tasapainokosteuskoe, tulokset

Adsorptio	RH	0	11	39	50	75	95
PS	Keskiarvo		6,1	8,7	10,1	15,5	26,3
	K.hajonta		0,008	0,051	0,025	0,169	0,182
	Luottamusväli 95 %		0,020	0,127	0,063	0,419	0,451
	Alaraja		6,1	8,6	10,0	15,1	25,9
	Yläaraja		6,1	8,9	10,2	15,9	26,8
Adsorptio	RH	0	11	39	50	75	95
Ehta	Keskiarvo		3,9	6,1	7,0	10,9	18,3
	K.hajonta		0,021	0,094	0,018	0,268	0,249
	Luottamusväli 95 %		0,053	0,234	0,045	0,665	0,620
	Alaraja		3,8	5,9	6,9	10,2	17,7
	Yläaraja		3,9	6,3	7,0	11,6	18,9
Adsorptio	RH	0	11	39	50	75	95
Pölkky	Keskiarvo		6,0	9,3	10,5	16,2	26,4
	K.hajonta		0,000	0,082	0,085	0,207	0,795
	Luottamusväli 95 %		0,001	0,204	0,212	0,514	1,975
	Alaraja		6,0	9,1	10,3	15,7	24,4
	Yläaraja		6,0	9,5	10,7	16,7	28,4
Adsorptio	RH	0	11	39	50	75	95
Nimetön	Keskiarvo		3,1	4,7	5,7	8,3	12,2
	K.hajonta		0,066	0,056	0,066	0,096	0,030
	Luottamusväli 95 %		0,164	0,140	0,164	0,238	0,076
	Alaraja		3,0	4,6	5,5	8,1	12,1
	Yläaraja		3,3	4,9	5,8	8,6	12,3

Desorptio	RH	0	11	39	50	75	95
Pölkky-sav.	Keskiarvo		5,5	10,4	12,7	18,5	25,7
	K.hajonta		0,071	0,088	0,119	0,034	0,157
	Luottamusväli 95 %		0,175	0,220	0,295	0,085	0,391
	Alaraja		5,3	10,1	12,4	18,4	25,3
	Yläaraja		5,6	10,6	12,9	18,6	26,1
Desorptio	RH	0	11	39	50	75	95
Ehta	Keskiarvo		3,7	7,4	9,2	13,6	18,0
	K.hajonta		0,010	0,128	0,039	0,396	0,092
	Luottamusväli 95 %		0,024	0,318	0,096	0,983	0,229
	Alaraja		3,7	7,1	9,1	12,7	17,8
	Yläaraja		3,8	7,7	9,3	14,6	18,3
Desorptio	RH	0	11	39	50	75	95
Pölkky	Keskiarvo		5,4	10,4	13,2	19,3	26,1
	K.hajonta		0,035	0,152	0,094	0,103	0,236
	Luottamusväli 95 %		0,086	0,377	0,233	0,255	0,586
	Alaraja		5,4	10,1	12,9	19,0	25,6
	Yläaraja		5,5	10,8	13,4	19,5	26,7
Desorptio	RH	0	11	39	50	75	95
Nimetön	Keskiarvo		3,3	5,0	6,1	9,5	11,9
	K.hajonta		0,070	0,056	0,065	0,368	0,070
	Luottamusväli 95 %		0,174	0,140	0,162	0,915	0,174
	Alaraja		3,1	4,9	6,0	8,5	11,7
	Yläaraja		3,5	5,2	6,3	10,4	12,0

Liite C1: Vesihöyrynläpäisykokeet tulokset

Ehta 11–50 koesarja2 (paksuus 100 mm)									
Suure	Yksikkö	Koe-kappale 1	Koe-kappale 2	Koe-kappale 3	Keski-arvo	Keski-hajonta	L.väli 95 %	Alaraja	Yläraja
Vesihöyrynvastus Z_v	s/m	5,52E+03	5,08E+03	5,18E+03	5,26E+03	2,28E+02	5,65E+02	4,69E+03	5,82E+03
Vesihöyrynvastus Z_p	m ² sPa/kg	7,49E+08	6,90E+08	7,02E+08	7,14E+08	3,09E+07	7,67E+07	6,37E+08	7,90E+08
Vesihöyrynläpäisykerroin W_v	m/s	1,81E-04	1,97E-04	1,93E-04	1,90E-04	8,08E-06	2,01E-05	1,70E-04	2,10E-04
Vesihöyrynläpäisykerroin W_p	kg/(m ² sPa)	1,34E-09	1,45E-09	1,42E-09	1,4E-09	5,95E-11	1,48E-10	1,25E-09	1,55E-09
Vesihöyrynläpäisevyys δ_v	m ² /s	1,72E-05	1,87E-05	1,84E-05	1,81E-05	7,67E-07	1,91E-06	1,62E-05	2,00E-05
Vesihöyrynläpäisevyys δ_p	kg/(msPa)	1,27E-10	1,38E-10	1,35E-10	1,33E-10	5,65E-12	1,40E-11	1,19E-10	1,47E-10
Vesihöyrynläpäisykerroin μ	-	1,55	1,43	1,46	1,48	0,06	0,16	1,32	1,64

Pölkky 11–50 koesarja2 (paksuus 100 mm)									
Suure	Yksikkö	Koe-kappale 1	Koe-kappale 2	Koe-kappale 3	Keski-arvo	Keski-hajonta	L.väli 95 %	Alaraja	Yläraja
Vesihöyrynvastus Z_v	s/m	1,02E+09	9,82E+08	1,01E+09	1,00E+09	1,92E+07	4,77E+07	9,56E+08	1,05E+09
Vesihöyrynvastus Z_p	m ² sPa/kg	1,12E-05	1,16E-05	1,13E-05	1,14E-05	1,85E-07	4,59E-07	1,09E-05	1,18E-05
Vesihöyrynläpäisykerroin W_v	m/s	1,38E-04	1,34E-04	1,35E-04	1,36E-04	2,00E-06	4,98E-06	1,31E-04	1,41E-04
Vesihöyrynläpäisykerroin W_p	kg/(m ² sPa)	1,02E-09	9,90E-10	9,96E-10	1,00E-09	1,48E-11	3,67E-11	9,65E-10	1,04E-09
Vesihöyrynläpäisevyys δ_v	m ² /s	1,31E-05	1,28E-05	1,28E-05	1,29E-05	1,90E-07	4,73E-07	1,24E-05	1,34E-05
Vesihöyrynläpäisevyys δ_p	kg/(msPa)	9,67E-11	9,40E-11	9,46E-11	9,51E-11	1,40E-12	3,48E-12	9,16E-11	9,86E-11
Vesihöyrynläpäisykerroin μ	-	2,04	2,10	2,08	2,07	0,03	0,08	2,00	2,15

Pölkky-savetettu 11–50 koesarja2 (paksuus 100 mm)									
Suure	Yksikkö	Koe-kappale 1	Koe-kappale 2	Koe-kappale 3	Keski-arvo	Keski-hajonta	L.väli 95 %	Alaraja	Yläraja
Vesihöyrynvastus Z_v	s/m	9,67E+03	9,74E+03	1,03E+04	9,89E+03	3,25E+02	8,07E+02	9,09E+03	1,07E+04
Vesihöyrynvastus Z_p	m ² sPa/kg	1,31E+09	1,32E+09	1,39E+09	1,34E+09	4,41E+07	1,10E+08	1,23E+09	1,45E+09
Vesihöyrynläpäisykerroin W_v	m/s	1,03E-04	1,03E-04	9,74E-05	1,01E-04	3,26E-06	8,11E-06	9,30E-05	1,09E-04
Vesihöyrynläpäisykerroin W_p	kg/(m ² sPa)	7,62E-10	7,56E-10	7,18E-10	7,45E-10	2,41E-11	5,98E-11	6,86E-10	8,05E-10
Vesihöyrynläpäisevyys δ_v	m ² /s	9,83E-06	9,75E-06	9,25E-06	9,61E-06	3,10E-07	7,71E-07	8,84E-06	1,04E-05
Vesihöyrynläpäisevyys δ_p	kg/(msPa)	7,24E-11	7,18E-11	6,82E-11	7,08E-11	2,29E-12	5,68E-12	6,51E-11	7,65E-11
Vesihöyrynläpäisykerroin μ	-	2,72	2,75	2,89	2,79	0,09	0,23	2,56	3,01

Nimetön 11–50 koesarja1 (paksuus 100 mm)									
Suure	Yksikkö	Koe-kappale 1	Koe-kappale 2	Koe-kappale 3	Keski-arvo	Keski-hajonta	L.väli 95 %	Alaraja	Yläraja
Vesihöyrynvastus Z_v	s/m	4,03E+03	4,05E+03	4,51E+03	4,20E+03	2,74E+02	6,81E+02	3,52E+03	4,88E+03
Vesihöyrynvastus Z_p	m ² sPa/kg	5,47E+08	5,49E+08	6,13E+08	5,70E+08	3,72E+07	9,24E+07	4,77E+08	6,62E+08
Vesihöyrynläpäisykerroin W_v	m/s	2,48E-04	2,47E-04	2,22E-04	2,39E-04	1,50E-05	3,74E-05	2,02E-04	2,76E-04
Vesihöyrynläpäisykerroin W_p	kg/(m ² sPa)	1,83E-09	1,82E-09	1,63E-09	1,76E-09	1,11E-10	2,75E-10	1,49E-09	2,04E-09
Vesihöyrynläpäisevyys δ_v	m ² /s	2,36E-05	2,35E-05	2,10E-05	2,27E-05	1,43E-06	3,55E-06	1,91E-05	2,62E-05
Vesihöyrynläpäisevyys δ_p	kg/(msPa)	1,74E-10	1,73E-10	1,55E-10	1,67E-10	1,05E-11	2,62E-11	1,41E-10	1,93E-10
Vesihöyryndiffuusiovastuskerroin μ	-	1,14	1,14	1,27	1,18	0,08	0,19	0,99	1,37

Ehta 50–95 koesarja1 (paksuus 46 mm)									
Suure	Yksikkö	Koe-kappale 1	Koe-kappale 2	Koe-kappale 3	Keski-arvo	Keski-hajonta	L.väli 95 %	Alaraja	Yläraja
Vesihöyrynvastus Z_v	s/m	1,11E+03	1,66E+03	1,06E+03	1,28E+03	3,31E+02	8,23E+02	4,54E+02	2,10E+03
Vesihöyrynvastus Z_p	m ² sPa/kg	1,51E+08	2,25E+08	1,44E+08	1,73E+08	4,50E+07	1,12E+08	6,17E+07	2,85E+08
Vesihöyrynläpäisykerroin W_v	m/s	8,99E-04	6,03E-04	9,43E-04	8,15E-04	1,85E-04	4,59E-04	3,56E-04	1,27E-03
Vesihöyrynläpäisykerroin W_p	kg/(m ² sPa)	6,62E-09	4,44E-09	6,95E-09	6,00E-09	1,36E-09	3,38E-09	2,62E-09	9,39E-09
Vesihöyrynläpäisevyys δ_v	m ² /s	3,01E-05	2,02E-05	3,16E-05	2,73E-05	6,19E-06	1,54E-05	1,19E-05	4,27E-05
Vesihöyrynläpäisevyys δ_p	kg/(msPa)	2,22E-10	1,49E-10	2,33E-10	2,01E-10	4,56E-11	1,13E-10	8,78E-11	3,14E-10
Vesihöyryndiffuusiovastuskerroin μ	-	0,89	1,32	0,85	1,02	0,26	0,66	0,36	1,68

Pölkky 50–95 koesarja1 (paksuus 46 mm)									
Suure	Yksikkö	Koe-kappale 1	Koe-kappale 2	Koe-kappale 3	Keski-arvo	Keski-hajonta	L.väli 95 %	Alaraja	Yläraja
Vesihöyrynvastus Z_v	s/m	1,28E+03	1,22E+03	1,97E+03	1,49E+03	4,17E+02	1,04E+03	4,51E+02	2,52E+03
Vesihöyrynvastus Z_p	m ² sPa/kg	1,73E+08	1,65E+08	2,67E+08	2,02E+08	5,66E+07	1,41E+08	6,13E+07	3,42E+08
Vesihöyrynläpäisykerroin W_v	m/s	7,83E-04	8,22E-04	5,08E-04	7,04E-04	1,71E-04	4,24E-04	2,80E-04	1,13E-03
Vesihöyrynläpäisykerroin W_p	kg/(m ² sPa)	5,77E-09	6,05E-09	3,74E-09	5,19E-09	1,26E-09	3,13E-09	2,06E-09	8,32E-09
Vesihöyrynläpäisevyys δ_v	m ² /s	2,62E-05	2,75E-05	1,70E-05	2,36E-05	5,72E-06	1,42E-05	9,37E-06	3,78E-05
Vesihöyrynläpäisevyys δ_p	kg/(msPa)	1,93E-10	2,03E-10	1,25E-10	1,74E-10	4,22E-11	1,05E-10	6,91E-11	2,79E-10
Vesihöyryndiffuusiovastuskerroin μ	-	1,02	0,97	1,57	1,19	0,33	0,83	0,36	2,02

Pölkky-savetettu 50–95 koesarja1 (paksuus 46 mm)									
Suure	Yksikkö	Koekappale 1	Koekappale 2	Koekappale 3	Keskiarvo	Keskiahajonta	L.väli 95 %	Alaraja	Yläraja
Vesihöyrynvastus Z_v	s/m	1,68E+03	1,67E+03	1,02E+03	1,45E+03	3,78E+02	9,39E+02	5,15E+02	2,39E+03
Vesihöyrynvastus Z_p	m ² sPa/kg	2,27E+08	2,26E+08	1,38E+08	1,97E+08	5,13E+07	1,27E+08	6,98E+07	3,25E+08
Vesihöyrynläpäisykerroin W_v	m/s	5,97E-04	5,99E-04	9,83E-04	7,27E-04	2,22E-04	5,52E-04	1,74E-04	1,28E-03
Vesihöyrynläpäisykerroin W_p	kg/(m ² sPa)	4,40E-09	4,42E-09	7,24E-09	5,35E-09	1,64E-09	4,07E-09	1,28E-09	9,42E-09
Vesihöyrynläpäisevyys δ_v	m ² /s	2,00E-05	2,01E-05	3,29E-05	2,43E-05	7,45E-06	1,85E-05	5,84E-06	4,28E-05
Vesihöyrynläpäisevyys δ_p	kg/(msPa)	1,47E-10	1,48E-10	2,43E-10	1,79E-10	5,49E-11	1,36E-10	4,30E-11	3,16E-10
Vesihöyryndiffuusiovastuskerroin μ	-	1,34	1,33	0,81	1,16	0,30	0,75	0,41	1,91

Ehta 50–95 koesarja3 (paksuus 100 mm)									
Suure	Yksikkö	Koekappale 1	Koekappale 2	Koekappale 3	Keskiarvo	Keskiahajonta	L.väli 95 %	Alaraja	Yläraja
Vesihöyrynvastus Z_v	s/m	4003,941	3596,126	3841,755	3813,941	205,32498	346,14803	3467,793	4160,089
Vesihöyrynvastus Z_p	m ² sPa/kg	5,43E+08	4,88E+08	5,21E+08	5,18E+08	27866443	46978768	4,71E+08	5,65E+08
Vesihöyrynläpäisykerroin W_v	m/s	0,00025	0,000278	0,00026	0,000263	1,431E-05	2,413E-05	0,000239	0,000287
Vesihöyrynläpäisykerroin W_p	kg/(m ² sPa)	1,84E-09	2,05E-09	1,92E-09	1,94E-09	1,055E-10	1,778E-10	1,76E-09	2,11E-09
Vesihöyrynläpäisevyys δ_v	m ² /s	2,37E-05	2,64E-05	2,47E-05	2,5E-05	1,36E-06	2,293E-06	2,27E-05	2,72E-05
Vesihöyrynläpäisevyys δ_p	kg/(msPa)	1,75E-10	1,95E-10	1,82E-10	1,84E-10	1,002E-11	1,689E-11	1,67E-10	2,01E-10
Vesihöyryndiffuusiovastuskerroin μ	-	1,13	1,01	1,08	1,07	0,06	0,10	0,98	1,17

Nimetön 50–95 koesarja3 (paksuus 100 mm)									
Suure	Yksikkö	Koekappale 1	Koekappale 2	Koekappale 3	Keskiarvo	Keskiahajonta	L.väli 95 %	Alaraja	Yläraja
Vesihöyrynvastus Z_v	s/m	3998,471	3695,825	3699,137	3797,811	173,78	292,98	3504,835	4090,787
Vesihöyrynvastus Z_p	m ² sPa/kg	5,43E+08	5,02E+08	5,02E+08	5,15E+08	0,24E+08	0,40E+08	4,76E+08	5,55E+08
Vesihöyrynläpäisykerroin W_v	m/s	0,00025	0,000271	0,00027	0,000264	1,175E-05	1,982E-05	0,000244	0,000283
Vesihöyrynläpäisykerroin W_p	kg/(m ² sPa)	1,84E-09	1,99E-09	1,99E-09	1,94E-09	8,661E-11	1,46E-10	1,8E-09	2,09E-09
Vesihöyrynläpäisevyys δ_v	m ² /s	2,38E-05	2,57E-05	2,57E-05	2,5E-05	1,117E-06	1,883E-06	2,32E-05	2,69E-05
Vesihöyrynläpäisevyys δ_p	kg/(msPa)	1,75E-10	1,89E-10	1,89E-10	1,85E-10	8,228E-12	1,387E-11	1,71E-10	1,98E-10
Vesihöyryndiffuusiovastuskerroin μ	-	1,13	1,04	1,04	1,07	0,05	0,08	0,99	1,15

Liite D1: Veden imeytymiskerroin, koekappaleet

Koe-kappale	Telineen massa	Tavoite-tiheys [g/m ³]	Tavoite-massa [g]	Punnittu massa [g]	Kutterin osuus [%]	Kokeen päivämäärä
E_2.1	760,24	100000	951,671	951,728	0,20	9.12.-13.12.2020
E_2.2	761,147	100000	952,578	952,754	0,20	9.12.-13.12.2020
E_2.3	761,932	100000	953,363	953,355	0,20	9.12.-13.12.2020
PS_1.1	761,802	266000	1271,01	1273,29	0,40	18.12.-21.12.2020
PS_1.2	762,53	266000	1271,74	1270,96	0,40	18.12.-21.12.2020
PS_1.3	769,36	266000	1278,57	1278,88	0,40	18.12.-21.12.2020
P_1.1	762,21	160000	1068,5	1068,81	0,29	22.12.-29.12.2020
P_1.2	762,61	160000	1068,9	1068,91	0,29	22.12.-29.12.2020
P_1.3	768,51	160000	1074,8	1074,65	0,28	22.12.-29.12.2020
R_1.1	761,97	66500	889,271	889,54	0,14	31.12.2020.-2.1.2021
R_1.2	762,46	66500	889,761	889,91	0,14	31.12.2020.-2.1.2021
R_1.3	768,29	66500	895,591	895,67	0,14	31.12.2020.-2.1.2021
P_2.1	761,81	105000	962,812	962,77	0,21	6.1.-7.1.2020
P_2.2	762,23	105000	963,232	963,31	0,21	6.1.-7.1.2020
P_2.3	768,06	105000	969,062	969,61	0,21	6.1.-7.1.2020
P_3.1	761,57	160000	1067,86	1067,52	0,29	18.3.-19.3.2020
P_3.2	761,96	160000	1068,25	1068,87	0,29	18.3.-19.3.2020
P_3.3	767,92	160000	1074,21	1074,82	0,29	18.3.-19.3.2020
PS_2.1	761,505	170000	1086,94	1085,51	0,30	22.3.-24.3.2021
PS_2.2	761,95	170000	1087,38	1085,05	0,30	22.3.-24.3.2021
PS_2.3	767,77	170000	1093,2	1097,81	0,30	22.3.-24.3.2021
E_3.1	761,365	155000	1058,08	1057,17	0,28	13.4.-15.4.2021
E_3.2	761,797	145 000	1039,37	1040,84	0,27	13.4.-15.4.2021
E_3.3	767,635	145000	1045,21	1042,54	0,26	13.4.-15.4.2021

Liite D2: Vedenimukoe $A_{w,24}$ ja w_{cap}

Veden imeytymiskerroin $A_{w,24}$ ja kapillaarinen kyllästyskosteus w_{cap}

Koekap- pale	Tiheys (kg/m ³)	Massan muutos Δm_{24} [g]	Massan muutos/m ² Δm_{24} [kg/m ²]	Veden imeytymis- kerroin $A_{w,24}$ [kg/m ² s ²]	Kapillaarinen kyllästys- kosteus *) w_{cap} [kg/m ³]
E_2.1	100	611,9192	22,375921	0,076	319,66
E_2.2	100	586,19046	21,435103	0,073	306,22
E_2.3	100	446,00746	16,309061	0,055	232,99
PS_1.1	266	541,67004	19,807135	0,067	282,96
PS_1.2	266	572,37637	20,929967	0,071	299,00
PS_1.3	266	511,66193	18,709835	0,064	267,28
R_1.1	66,5	418,87478	15,316906	0,052	218,81
R_1.2	66,5	414,00982	15,13901	0,052	216,27
R_1.3	66,5	432,69638	15,822318	0,054	226,03
P_2.1	105	530,18333	19,387102	0,068	276,96
P_2.2	105	549,36539	20,088529	0,071	286,98
P_2.3	105	543,81723	19,885651	0,070	284,08
P_3.1	160	913,62947	33,408497	0,114	477,26
P_3.2	160	848,24527	31,017607	0,106	443,11
P_3.3	160	848,80835	31,038197	0,106	443,40
PS_2.1	170	811,74304	29,682837	0,101	424,04
PS_2.2	170	933,13437	34,121729	0,116	487,45
PS_2.3	180	866,63153	31,689933	0,108	452,71
E_3.1	155	770,30714	28,16766	0,096	402,40
E_3.2	145	750,65714	27,449122	0,093	392,13
E_3.3	145	738,38571	27,000395	0,092	385,72

*) Vedenimukokeessa saatu tulos ilman lisättyä alkukosteuspitoisuutta $w_{ads,RH50}$