



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

ELINA MANELIUS

**RAKENNUSMATERIAALIEN
VESIHÖYRYNLÄPÄISEVYYSKOKEIDEN KEHITTÄMINEN**

Diplomityö

Tarkastaja: professori Juha Vinha

Tarkastaja ja aihe hyväksyttiin
Tuotantotalouden ja rakentamisen tie-
dekunnan tiedekuntaneuvoston koko-
uksessa 6. maaliskuuta 2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

MANELIUS, ELINA: Rakennusmateriaalien vesihöyrynläpäisevyyksiköiden kehittäminen

Diplomityö, 73 sivua, 27 liitesivua

Lokakuu 2013

Pääaine: rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Juha Vinha

Avainsanat: vesihöyrynläpäisevyys, kuppikoe, materiaaliominaisuus, rakennusmateriaali

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli parantaa Tampereen teknillisen yliopiston vesihöyrynläpäisevyyksiköiden koejärjestelyä. Tavoitteena oli pääasiassa koekupin kehittäminen, koekupin tiivistystavan parantaminen ja siten reunavuotojen vähentäminen. Muutoksia tehtiin myös yhteen kosteushuoneeseen ja koekappaleiden punnituksissa käytettävään vaakaan. Kosteushuoneen kosteus- ja lämpötilaolosuhteiden vaihtelua pienennettiin lämmöneristämällä kosteushuoneen seinät ja asentamalla tilaan termostaattilla toimiva lämmitysvastus. Vaa'an punnituskapasiteettia nostettiin, jotta suurempien koekuppien mittaaminen olisi mahdollista. Diplomityössä kehitettiin myös mittausjärjestelmä kiviaineisten materiaalien vesihöyrynläpäisevyyden mittaamiselle ja uuden mittausjärjestelmän mukainen työohje, jonka tavoitteena on kiinnittää mittaajan huomio mittauksen tarkkuuden kannalta olennaisiin seikkoihin ja parantaa mittausten luotettavuutta ja toistettavuutta.

Koejärjestelyn parantamisen jälkeen tehtiin vertailumittauksia aiemmin TTY:llä käytössä olleen ja työn yhteydessä kehitetyn koejärjestelyn kesken. Vertailua suoritettiin kuudelle materiaalille. Lisäksi suoritettiin mittauksia muutamalle materiaalille ainoastaan uudella koejärjestelyllä. Vertailumittausten perusteella voidaan todeta, että vanhan ja uuden mittausjärjestelmän tulosten välillä oli vain vähän eroa. Höyrynsulkumuovin ja reunavuotoa mittaavien sokeiden kuppien perusteella näyttää siltä, että vanhalla mittausjärjestelmällä tapahtuu enemmän reunavuotoa kuin uudella. Reunavuoto on kuitenkin niin vähäistä, että se vaikuttaa tuloksiin vasta hyvin tiiviitä materiaaleja mitattaessa. Näilläkin materiaaleilla reunavuoto on niin vähäistä, ettei sitä tarvitse ottaa huomioon laskennallisesti.

Reunavuotoa suurempi ongelma näyttää olevan koejärjestelyn useat muut epävarmuustekijät, jotka yksittäisinä tekijöinä eivät vaikuta olennaisesti tuloksiin, mutta yhdessä saattavat kasvattaa paljon tulosten virhemarginaalia. Monet epävarmuustekijät riippuvat inhimillisistä tekijöistä, minkä vuoksi on tärkeää suorittaa testaukset systemaattisesti samalla tavalla. Testauksia tulisi tehdä myös riittävän suurella sarjalla; vähintään viidellä rinnakkaisella näytteellä. Mitattaessa materiaalin vesihöyrynläpäisevyyttä suhteellisen kosteuden funktiona tulee kosteuspareja olla enemmän kuin neljä. Tämä koskee erityisesti materiaaleja, joiden vesihöyrynläpäisevyys muuttuu voimakkaasti suhteellisen kosteuden funktiona.

Vesihöyrynläpäisevyyksiköitä tulee kehittää edelleen. Diplomityössä käyttöön otettuja koekuppeja voidaan parantaa suojaamalla koekupit suolaliuokselta. Kokeet tulee jatkossa suorittaa erillisissä olosuhdehuoneissa, jossa olosuhteen säätö tapahtuu koneellisesti. Käytetyn vaa'an punnituskapasiteetti tulee valita mitattavan materiaalin mukaan ja varmistaa samalla ettei se ylitä mittausten yhteydessä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

MANELIUS, ELINA: Development of water vapour permeability measurements of building products

Master of Science Thesis, 73 pages, 27 Appendix pages

October 2013

Major: Construction Engineering

Examiner: professor Juha Vinha

Keywords: water vapour permeability, cup test, material property, building material

The purpose of this research was to improve the water vapour permeability measurements used in Tampere University of Technology. The main goal was to develop the test cup, the sealing method and therefore to decrease the leakage through the seal. Changes were also made on one of the climate rooms and the scale which is used to weigh the test cups. Temperature and relative humidity fluctuation in the climate room was decreased by insulating the walls of the room and by installing a heater equipped with a thermostat. The weighing capacity of the scale was increased in order to weigh heavier test cups. Also a water vapour permeability measuring method for rock materials was developed during the master thesis. In addition a working instruction was developed which was designed to pay attention on the accuracy of measurements and therefore to enhance the reliability and repeatability of the method.

After improving the test assembly measurements were done with both new and old measuring method to compare the two methods. Comparisons were done for six materials. In addition also a few materials were measured with only the new developed test method. According to the comparison measurements it seems that there is only a small difference between the new and the old method results. Although according to measurements made with very vapour tight materials (vapour retarder and aluminium sheet) it seems that there is more leakage through the seal in the old test method. The leakage on the other hand is so small that it affects the results only when measuring very vapour tight materials. Even with these vapour tight materials it is not necessary to make corrections on the measurements because of the leakage.

When considering the reliability of the test method, the other sources of error are a bigger issue rather than the leakage through the seal. Individually they don't have an enormous effect on the results but together increase the margin of error. Many of these sources of error are caused by human factors, which make it important to carry out the measurements systematically with the same way. The tests should be carried out with a large enough test series; at least five parallel samples. When measuring the water vapour permeability as a function of relative humidity there should be more than four different relative humidity levels. This affects specially materials, which water vapour permeability has a strong dependence on relative humidity.

The water vapour permeability test should be further developed. The test cups developed in this master thesis should be enhanced by protecting the test cups from the salt solution. The tests should be in the future carried out in climate chambers where the controlling of conditions happens automatically. The weighing capacity and the accuracy of the scale should be chosen according to the material.

ALKUSANAT

Tämä tutkimus on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksella osana rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmän kehitystyötä. Tutkimuksen rahoitti Rakennustekniikan laitos.

Haluaisin kiittää professori Juha Vinhaa diplomityön ohjauksesta ja tarkastamisesta. Kiitokset kuuluvat myös rakennustuotevalmistajille materiaalinäytteiden toimittamisesta ja VTT:n laboratoriohenkilökunnalle neuvoista koekupin kehitystyöhön liittyen.

Kiitos työkavereille neuvoista ja avusta. Perhettäni haluan kiittää pienestä painostamisesta, jota osaan nyt jo arvostaa. Laurille kiitos kärsivällisyydestä ja tukemisesta.

Tampereella 7.10.2013

Elina Manelius

SISÄLLYS

Tiivistelmä	II
Abstract	III
Alkusanat	IV
Sisällys	V
Merkinnät	VII
Käsitteet.....	VIII
1 Johdanto	1
1.1 Tutkimuksen tausta	1
1.2 Tutkimuksen tavoitteet.....	2
1.3 Tutkimuksen suoritus	3
1.4 Tutkimuksen rajaukset	3
2 Teoriaa.....	4
2.1 Ilman kosteus	4
2.2 Materiaalin kosteus	6
2.3 Kosteuden siirtymisen muodot.....	6
2.4 Vesihöyrynläpäisevyyskokeisiin liittyvät standardit	9
2.5 Materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden mittaaminen.....	11
2.5.1 Märkä- ja kuivakuppikoe	11
2.5.2 Vesihöyrynläpäisevyys suhteellisen kosteuden funktiona.....	12
2.5.3 Kuppikokeen virhelähteet	13
3 Vesihöyrynläpäisevyyden koejärjestelyn parantaminen	14
3.1 Vanha menetelmä.....	14
3.1.1 Koekuppi	14
3.1.2 Kosteushuone	15
3.1.3 Vaaka.....	18
3.2 Uusi menetelmä.....	19
3.2.1 Koekuppi	19
3.2.2 Kosteushuone	24
3.2.3 Vaaka.....	28
4 Laboratoriokokeiden suoritus	29
4.1 Tutkitut materiaalit.....	29
4.2 Koekappaleiden valmistaminen	31
4.2.1 Vanhan menetelmän koekupin valmistaminen	35
4.2.2 Uuden menetelmän koekupin valmistaminen	36
4.3 Olosuhteet ennen mittauksia	37
4.4 Olosuhteet mittauksissa.....	37
5 Laskennallinen analyysi	40
5.1 Massavirta	40
5.2 Vesihöyrypitoisuusero	40
5.3 Regressioanalyysi.....	41

5.4	Korjauskerttoimet.....	44
5.4.1	Näytteen ja suolaliuoksen välisen ilmatilan vastus.....	44
5.4.2	Koekappaleen naamioitu reuna.....	46
5.4.3	Ilmanpaineen vaihtelu.....	48
5.4.4	Reunahäviö.....	51
6	Tulokset ja tulosten analysointi.....	53
6.1	Vaneri.....	54
6.2	Runkoleijona.....	56
6.3	Rakentajan kovalevy.....	57
6.4	Polyuretaani.....	58
6.5	Höyrynsulkumuovi.....	59
6.6	Kipsilevy.....	61
6.7	Ekovilla 5x ilmansulkupaperi.....	62
6.8	Betoni.....	63
6.9	Punatiili.....	65
7	Johtopäätökset.....	66
	Lähteet.....	69
	Liitteet.....	73

Merkinnät

d	paksuus	m
g	kosteusvirran tiheys	kg/(m ² s)
m	massa	kg
p	paine	Pa
s _d	suhteellinen diffuusiovastus	m
t	aika	h
A	pinta-ala	m ²
M	kaasun molekyylipaino	kg/kmol
M _a	ilman molekyylipaino	28,96 kg/kmol
M _w	veden molekyylipaino	18,02 kg/kmol
R	yleinen kaasuvakio	8314,3 J/(kmolK)
R _v	veden kaasuvakio	461,5 J/(Kkg)
RH	suhteellinen kosteus	%
T	lämpötila	K, °C
V	tilavuus	m ³
W _v	vesihöyrynläpäisykerroin (vesihöyrypitoisuuserolla laskettuna)	m/s
W _p	vesihöyrynläpäisykerroin (vesihöyryn osapaine-erolla laskettuna)	kg/(m ² sPa)
Z _v	vesihöyrynvastuskerroin (vesihöyrypitoisuuserolla laskettuna)	s/m
Z _p	vesihöyrynvastuskerroin (vesihöyryn osapaine-erolla laskettuna)	m ² sPa/kg
v	vesihöyrypitoisuus	g/m ³
v _{sat}	vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuus	g/m ³
δ _v	vesihöyrynläpäisevyys (vesihöyrypitoisuuserolla laskettuna)	m ² /s
δ _p	vesihöyrynläpäisevyys (vesihöyryn osapaine-erolla laskettuna)	kg/(msPa)
δ _a	ilman vesihöyrynläpäisevyys (vesihöyryn osapaine-erolla laskettuna)	kg/(msPa)
μ	vesihöyryn diffuusiovastuskerroin	-
ρ	tiheys	kg/m ³

Käsitteet

Diffuusio	Kaasumolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksessa yksittäisen kaasun pitoisuseroja (tai osapaine-eroja). Diffuusiossa kaasu siirtyy korkeammasta pitoisuudesta alempaan pitoisuuteen.
Effuusio	Kaasumolekyylien liike pienissä huokosissa, kun huokosen halkaisija on pienempi kuin molekyylin keskimääräinen vapaa matka diffuusiutilanteessa.
Hygroσκοoppisuus	Huokoisen aineen kyky sitoa itseensä kosteutta ilmasta ja luovuttaa sitä takaisin ilmaan.
Kapillaarisuus	Nestemäisen veden siirtyminen materiaalin huokosverkostossa huokosalipaineen vaikutuksesta.
Kosteuspari	Kuppikokeessa kosteusparin muodostavat kupin sisä- ja ulkopuolella käytetyt toisistaan eroavat kosteusolosuhteet.
Kuppikoe	Koejärjestely, jolla mitataan materiaalin vesihöyrynläpäisevyyttä.
Kyllästyskosteuspitoisuus	Ilmaan mahtuvan vesihöyryn maksimimäärä tietyssä lämpötilassa.
Naamioitu reuna	Kuppikokeessa näytteen osa, joka ylittää koekupin reunan.
Regressio	Menetelmä, jolla haetaan muuttujien x ja y välille yhtälö $y=f(x)$, joka kuvaa muuttujajoukkoa mahdollisimman hyvin.
Round robin –testi	Eri tutkimuslaboratorioiden kesken tehty mittausjärjestelyjen vertailututkimus.
Suhteellinen diffuusiovastus	Suhteellinen diffuusiovastus s_d [m] kuvaa sitä, kuinka paksu ilmakerros vaaditaan, jotta ilmaker-

	roksen vesihöyrynvastus olisi yhtä suuri kuin kyseisellä materiaalikerroksella
Termodiffuusio	Ilmiö, jossa kevyet vesihöyrymolekyylit siirtyvät suuremman lämpötilan suuntaan ja raskaat ilman molekyylit pienemmän lämpötilan suuntaan.
Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin	Vesihöyryn diffuusiovastuskertoimella (μ) tarkoitetaan materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden ja seisovan ilman vesihöyrynläpäisevyyden suhdeluku.
Vesihöyrynläpäisevyys	Vesihöyrynläpäisevyys (δ_v tai δ_p) kuvaa vesimäärää, joka aikayksikössä läpäisee pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen vesihöyrypitoisuuksien ero tai vesihöyryn osapaine-ero on yksikön suuruinen.
Vesihöyrynläpäisykerroin	Vesihöyrynläpäisykerroin (W_v tai W_p) ilmoittaa vesimäärän, joka läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen rakenneosan, kun rakenneosan eri puolilla olevien ilmatilojen vesihöyrypitoisuuksien ero tai vesihöyryn osapaine-ero on yksikön suuruinen.
Vesihöyrynvastus	Vesihöyrynvastuksella (Z_v tai Z_p) tarkoitetaan vesihöyrynläpäisykerroimen käänteisarvoa.
Vesihöyrypitoisuus	Vesihöyrypitoisuus (v) ilmoittaa ilmassa olevan vesihöyryn määrän.

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Uusien kiristyvien lämmöneristysmääräysten myötä olemassa olevia rakenteita parannellaan ja uusia rakenteita kehitetään kiihtyvällä tahdilla. Kehitystyössä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan varmistaminen on mukana yhtenä olennaisena osana. Lämpö- ja kosteustekniset mallinnusohjelmat ovat viime vuosikymmenen aikana nousseet rakenteiden kosteusteknisen toiminnan laskennallisen tutkimuksen tueksi. Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan tutkimisessa niin käsin laskien kuin mallinnusohjelmiäkin käyttäen tärkeää on todellisten materiaaliarvojen selvittäminen. Rakenteiden toiminta voi muuttua merkittävästi, jos materiaalien materiaaliarvoina käytetään tilanteeseen sopimattomia tai huolimattomasti mitattuja arvoja. Materiaaliominaisuuksista vesihöyrynläpäisevyys on laskennan kannalta yksi merkittävimmistä.

Kuppikoetta on käytetty materiaalien vesihöyrynläpäisevyyden mittaamiseen useita vuosikymmeniä ja lähes kaikissa rakennusmateriaaleja tutkivissa tutkimuslaitoksissa, mitataan vesihöyrynläpäisevyyttä kuiva- tai märkäkuppikokeen avulla. Kuppikoetta käytetään laajalti, koska se ei vaadi kalliita mittausjärjestelmiä ja koejärjestely on yksinkertainen.

Yksinkertaisuudestaan huolimatta kuppikoe sisältää epävarmuustekijöitä. Energiajärjestö IEA:n teettämän kansainvälisen Annex 41 -tutkimuksen (Roels 2008) yhteydessä vertailtiin round robin -testein 14 eri tutkimuslaitoksen vesihöyrynläpäisevyyskokeita. Myös Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitos osallistui vertailututkimukseen. Vertailussa kukin tutkimuslaitos mittasi järjestäjän toimittamien tuotteiden vesihöyrynläpäisevyydet useassa eri olosuhteessa. Mittausmenetelmän tuli olla standardin SFS-EN ISO 12572 (2001) ja järjestäjien antamien lisäohjeiden mukainen. Tutkimuksen tuloksena huomattiin, että eri tutkimuslaitosten mittaustulokset vaihtelivat suuresti, vaikka menetelmät ja koemateriaalit olivat identtisiä. Eroa syntyi erityisesti tiiviiden materiaalien mittauksissa. Tutkimuksessa havaittiin lisäksi, että korkeimmat vesihöyrynvastusarvot saatiin tutkimuslaitoksista, joissa materiaalit oli tiivistetty kuppeihin vahalla. Tämä viittaa siihen, että muilla tiivistystavoilla toteutetuissa kupeissa saattaa esiintyä tuloksia vääristävää reunavuotoa.

Kuppikokeen epävarmuus on havaittu myös muissa round robin -testeissä. Toas (1989) havaitsi 12 tutkimuslaitoksen välisessä vertailussa, että kuppikokeiden suorituksessa olennaista on materiaalin huolellinen tiivistäminen kuppiin ja riittävän tarkan vaa'an

käyttäminen. Myös Hansen & Bertelsen (1989) havaitsi 10 tutkimuslaitoksen välisessä vertailussa hajontaa mittaustuloksissa. Eri laboratorioiden tulokset erosivat toisistaan jopa 15 %. Kumaran (1988) painotti vertailussaan laskentatuloksiin tehtyjä korjauksia, jotka ottavat huomioon ilmanpaineen vaihtelun, näytteen ja suolaliuoksen välisen ilmatilan sekä naamioidun reunan vaikutuksen.

Edellä mainittujen round robin –testien vaihtelevista tuloksista johtuen vesihöyrynläpäisevyyskokeiden tarkkuutta tulee parantaa. Erityisesti materiaalin tiivistystapaan, mittaustausajan olosuhteisiin, vaa’an tarkkuuteen ja erilaisiin korjauskertoimiin on kiinnitettävä huomiota.

Tampereen teknillisellä yliopistolla selvitettiin vuosina 1999-2004 42 rakennusmateriaalin materiaaliominaisuuksia laajoin mittauksin. Yhtenä tutkimuksen osana olivat materiaalien vesihöyrynläpäisevyysmittaukset. Mittaustuloksia on esitetty julkaisussa Vinha et al. (2005). Vesihöyrynläpäisevyyskokeiden tuloksia ja mittausten menetelmää on lisäksi esitelty diplomityössä Mikkilä (2001). Näitä TTY:llä mitattuja materiaaliarvoja on tämän jälkeen käytetty hyödyksi laskennallisessa mallinnuksessa. Vinha (2007) verifioi väitöskirjassaan laskentaohjelmia vertailemalla laskentatuloksia vastaaviin laboratorio- ja kenttämittaustuloksiin. Vinha havaitsi, että kyseisillä materiaaliominaisuuksilla tehdyt laskennalliset mallinnukset eivät tietyiltä osin kuitenkaan vastanneet koetuloksia. Laskentatulosten ja koetulosten välillä esiintyi eroa erityisesti, kun tarkasteltava rakenne sisälsi vaneria. Yhtenä syynä verifioinnissa havaittuihin eroavaisuuksiin epäiltiin virhetta vanerin vesihöyrynläpäisevyyden mittauksessa. Tämä osaltaan kannusti tutkimaan ja kehittämään TTY:n vesihöyrynläpäisevyyskokeiden mittaustekniikkaa.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena oli parannella tarvittavilta osin TTY:llä aikaisemmin kehitettyä vesihöyrynläpäisevyyden koejärjestelyä, joka on esitetty diplomityössä Mikkilä (2001), ja muuttaa sitä vastaamaan paremmin standardia SFS-EN ISO 12572 (2001). Kehitystyössä otettiin käyttöön muissa tutkimuslaitoksissa hyväksi havaittuja tekniikoita. Tutkimuksen tavoitteena oli myös tehdä vertailevia mittauksia uudella ja vanhalla koejärjestelyllä. Uudella koejärjestelyllä tehtyjen mittausten tuloksia verrattiin myös tutkimusraportin Vinha et al. (2005) tuloksiin.

Tutkimuksen osatavoitteena oli kehittää koejärjestely, joka soveltuu myös kiviaineisten materiaalien vesihöyrynläpäisevyyden mittaamiseen. Kiviaineisten materiaalien mittaukset eroavat muista rakennusmateriaaleista lähinnä näytteen valmistustavassa. Kiviaineisia materiaaleja ei ole aikaisemmin mitattu Tampereen teknillisellä yliopistolla ja ne lisättiin tutkimukseen myös siitä syystä, että niistä on kirjallisuudessa vain vähän mittaustuloksia saatavilla.

Lisäksi tavoitteena oli laatia vesihöyrynläpäisevyyskokeiden suoritusta varten työohjeet, joiden tarkoituksena on kiinnittää tutkijan huomio mittaustarkkuuden kannalta olennaisiin asioihin ja parantaa siten TTY:llä tehtyjen vesihöyrynläpäisevyyskokeiden luotettavuutta ja toistettavuutta.

1.3 Tutkimuksen suoritus

Tutkimuksessa selvitettiin ensin, miten muissa tutkimuslaitoksissa tehdään vesihöyrynläpäisevyyskokeita. Tämä lisäksi selvitettiin, mitkä ovat koejärjestelyn yleisimmät virhelähteet. Olemassa olevaa koejärjestelyä kehitettiin tämän jälkeen parantelemalla kosteushuonetta, uusimalla koekupin malli ja muuttamalla tiivistystekniikkaa.

Koejärjestelyn kehittämisen jälkeen tutkimuksessa mitattiin kahdeksan eri rakennusmateriaalin vesihöyrynläpäisevyys kuppikoemenetelmällä. Näistä materiaaleista kuusi mitattiin aikaisemmin TTY:llä käytössä olleella menetelmällä ja uudella parannetulla menetelmällä. Lisäksi tutkittiin uudella tekniikalla kaksi kivipohjaista materiaalia ja testattiin koekappaleiden valmistusta neljällä kivipohjaisella materiaalilla. Kaikkien materiaalien vesihöyrynläpäisevyys mitattiin suhteellisen kosteuden funktiona eli kukin materiaali mitattiin neljässä kosteusolosuhteessa. Mittaustuloksiin sovellettiin myös erilaisia korjauskertoimia, kuten näytteen ja suolaliuoksen välisen ilmatilan, naamioidun reunan, reunavuodon ja ilmanpaineen vaihtelun korjauskertoimia.

1.4 Tutkimuksen rajaukset

Tutkimuksessa ei ollut tarkoituksena tehdä laajaa mittaussarjaa materiaalikirjaston luomiseksi vaan vertailla eri mittausten menetelmillä mitattuja arvoja toisiinsa. Tutkimuksessa ei ole otettu huomioon lämpötilan vaikutusta materiaalin vesihöyrynläpäisevyyteen, vaan mittaukset on tehty vakio- lämpötilassa.

2 TEORIAA

2.1 Ilman kosteus

Ilma on monien eri kaasujen seos. Ilma koostuu muun muassa typestä (78 %), hapestä (21 %), argonista (1 %) ja hiilidioksidista (0,036 %). Ilmanpaine muodostuu näiden kaasujen osapaineiden summana. Rakennusteknisissä tarkasteluissa ilma voidaan olettaa ideaalikaasuksi, jolloin pätee: (Björkholtz 1997)

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad (2.1)$$

missä

p	kaasun paine [Pa]
V	kaasun tilavuus [m^3]
m	kaasun massa [kg]
M	kaasun molekyylipaino [kg/kmol]
R	yleinen kaasuvakio [8314,3 J/(kmolK)]
T	lämpötila [K]

Keskeisimpien kaasujen lisäksi ilma sisältää aina jonkin verran myös vesihöyryä. Ilman sisältämän vesihöyryn määrää voidaan kuvata vesihöyrypitoisuutena v [kg/m^3] tai vesihöyryn osapaineena p_v [Pa]. Ideaalikaasun tilanyhtälön avulla saadaan näille yhteys:

$$v = \frac{p_v M_w}{RT} \quad (2.2)$$

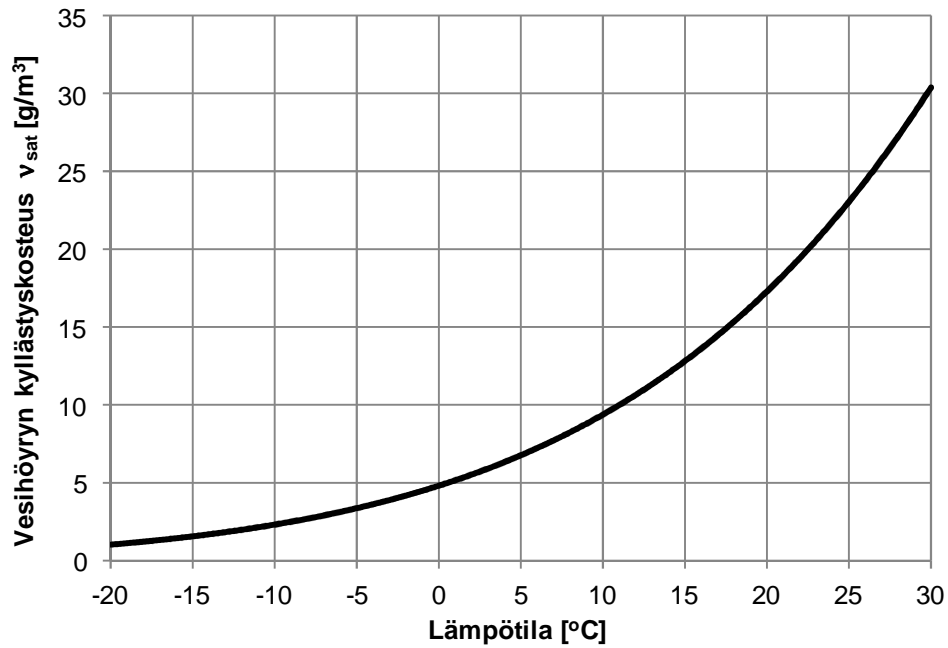
missä

M_w	veden molekyylipaino, 18,02 [kg/kmol]
-------	---------------------------------------

Tietyissä lämpötilassa ilma voi sisältää enintään tietyn määrän vesihöyryä. Tätä kosteusmäärää kutsutaan kyllästyskosteuspitoisuudeksi v_{sat} [kg/m^3] tai $p_{v,\text{sat}}$ [Pa]. Kyllästyskosteuspitoisuus pienenee lämpötilan laskiessa (kuva 2.1). Täsmällistä matemaattista yhteyttä kyllästyskosteuspitoisuuden ja lämpötilan välille ei kuitenkaan ole, vaan kirjallisuudessa esiintyy erilaisia likiarvokaavoja (mm. Hyland & Wexler (1983), DIN 4108-5 (1981), EN ISO 13788 (2001)). Alle 0 °C lämpötiloissa ilman kyllästyskosteuspitoisuus on erilainen riippuen siitä, tarkastellaanko tilannetta nestemäisen veden vai jääkerroksen yläpuolella. (Vinha 2007)

Tässä diplomityössä on käytetty Hylandin ja Wexlerin (1983) esittämää korrelaatiokaavaa, joka ilmoittaa ilman kyllästyskosteuspitoisuuden veden yli:

$$\begin{aligned} \ln(p_{v,\text{sat}}) = & -0,58002206 \times 10^4 T^{-1} \\ & + 0,13914993 \times 10^1 \\ & - 0,48640239 \times 10^{-1} T \\ & + 0,41764768 \times 10^{-4} T^2 \\ & - 0,14452093 \times 10^{-7} T^3 \\ & + 0,65459673 \times 10^1 \ln(T) \end{aligned} \quad (2.3)$$



Kuva 2.1 Ilman vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuus lämpötilan funktiona (Hyland & Wexler 1983)

Suhteellinen kosteus kertoo, kuinka paljon ilmassa on vesihöyryä verrattuna ilman kyllästyskosteuspitoisuuteen:

$$\varphi = 100 \frac{v}{v_{\text{sat}}} \quad (2.4)$$

2.2 Materiaalin kosteus

Vesi voi olla sitoutunut materiaaliin kemiallisesti tai fysikaalisesti. Kemiallisesti sitoutunutta vettä ei tarvitse ottaa huomioon rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa, koska se on sitoutunut materiaaliin kiinteästi molekyylitasolla. Fysikaalisesti sitoutunut vesi voi esiintyä huokoisessa materiaalissa kolmessa eri muodossa; vesihöyrynä, vetenä tai jäänä. (Björkholtz 1997)

Materiaalissa olevan kosteuden määrä ja muoto riippuvat ympäröivistä olosuhteista sekä itse materiaalista. Materiaali pyrkii aina tasapainoon ympäristönsä kanssa, eli tilanteesta riippuen joko kastuu tai kuivuu. Kosteuden siirtyminen ympäristön ja materiaalin välillä tapahtuu vetenä tai vesihöyrynä. Rakennusaineen hygroskooppisuus sekä kapillaarisuus määräävät siirtyvän kosteuden määrän ja siirtymisnopeuden. (Björkholtz 1997)

2.3 Kosteuden siirtymisen muodot

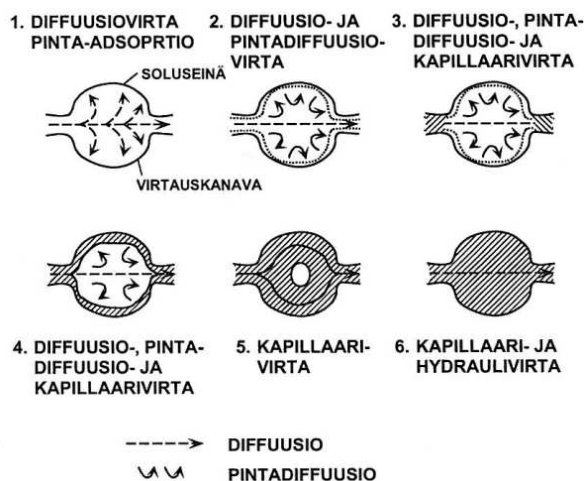
Kosteuden siirtyminen vesihöyrynä tapahtuu seuraavilla tavoilla: (Björkholtz 1997)

- Diffuusio, eli vesimolekyylit siirtyvät suuremmasta pitoisuudesta pienempään
- Konvektio, eli vesimolekyylit kulkeutuvat ilman mukana
- Pintadiffuusio
- Effuusio ja termodiffuusio

Kosteuden siirtyminen vetenä tapahtuu seuraavilla tavoilla:

- Kapillaari-imu
- Painovoimainen siirtyminen
- Paineenalainen siirtyminen.

Todellisuudessa kosteus siirtyy usean eri tavan yhteisvaikutuksesta. Kosteuden liikkumista materiaalin huokosverkostossa kostumisen eri vaiheissa havainnollistaa kuva 2.2.



Kuva 2.2 Kosteuden siirtymismuodot (Ojanen et al. 1989).

Vesihöyrypitoisuuksien ero materiaalin tai rakenteen sisä- ja ulkopinnan välillä saa aikaan diffuusion. Homogeenisessa ainekerroksessa vesihöyryn diffuusiolla siirtyvä kosteusvirran tiheys voidaan laskea Fickin lain avulla. Kosteusvirran tiheyden g [kg/(m²s)] kaava yksidimensioiselle tapaukselle on:

$$g = -\delta_v \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.5)$$

missä

g kosteusvirran tiheys [kg/(m²s)]

δ_v aineen vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmaistuna [m²/s]

v vesihöyrypitoisuus [kg/m³].

Edellä oleva kaava voidaan esittää myös vesihöyryn osapaineiden avulla:

$$g = -\delta_p \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.6)$$

missä

δ_p aineen vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmaistuna [kg/(msPa)].

Aineen vesihöyrynläpäisevyydelle vesihöyrypitoisuuseron sekä vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmaistuna voidaan määrittää yhteys kaavalla:

$$\delta_v = \frac{R(237,15 + T)}{M_w} \delta_p \quad (2.7)$$

Materiaalin vesihöyrynläpäisevyyttä voidaan kuvata monin tavoin. Vesihöyryn diffuusiovastuskertoimella μ [-] tarkoitetaan materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden suhdetta ilman vesihöyrynläpäisevyyteen:

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p} \quad (2.8)$$

missä

δ_a ilman vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmaistuna [kg/(msPa)].

Ilman vesihöyrynläpäisevyys riippuu lämpötilasta ja ilmanpaineesta. Normaali-ilmanpaineessa (101 325 Pa) ilman vesihöyrynläpäisevyys on:

$$\delta_a = \frac{2 \times 10^{-7} T^{0.81}}{P_n} \quad (2.9)$$

missä

T ilman lämpötila [K]
 P_n normaali ilmanpaine [Pa].

Materiaaleille, joiden paksuutta ei saada määritettyä tarkasti, vesihöyrynläpäisevyys ilmaistaan vesihöyrynvastuksena Z_v [s/m] tai Z_p [m²sPa/kg], joka kuvaa tietyn materiaalikerroksen tai tuotteen vesihöyrynläpäisykykyä.

$$Z_v = \frac{d}{\delta_v} \quad \text{tai} \quad Z_p = \frac{d}{\delta_p} \quad (2.10)$$

missä

d materiaalin paksuus [m].

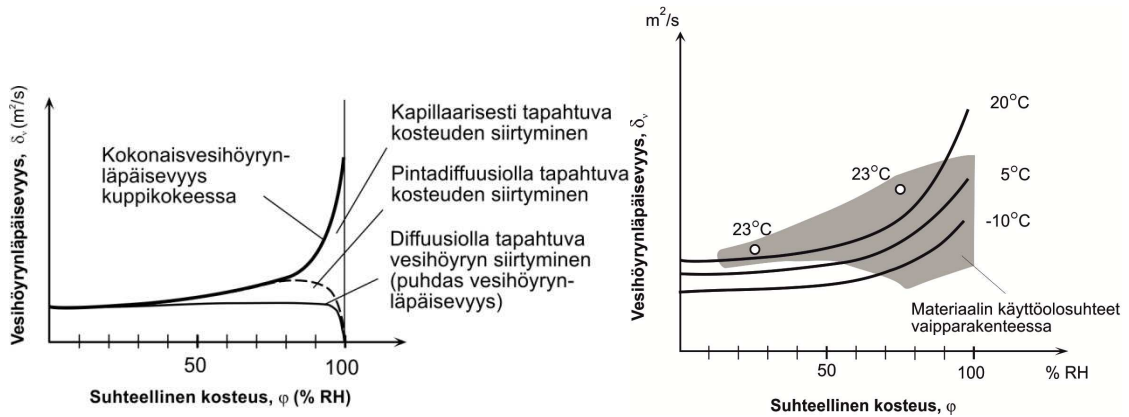
Vesihöyrynläpäisykertoimet W_v [m/s] ja W_p [kg/(m²sPa)] ovat puolestaan vesihöyrynvastusten Z_v [s/m] ja Z_p [m²sPa/kg] käänteislukuja.

Materiaalin suhteellinen diffuusiovastus s_d [m] puolestaan kuvaa sitä, kuinka paksu ilmakerros vaaditaan, jotta ilmakerroksen vesihöyrynvastus olisi yhtä suuri kuin kyseisellä materiaalikerroksella:

$$s_d = \mu d \quad (2.11)$$

Vesihöyrynläpäisykertoimet W_v [m/s] ja W_p [kg/(m²sPa)], vesihöyrynvastusarvot Z_v [s/m] ja Z_p [m²sPa/kg] sekä suhteellinen diffuusiovastus s_d [m] kuvaavat aina tietyn paksuisen tuotteen vesihöyrynläpäisykykyä. Vesihöyrynläpäisevyys δ_v [m²/s] ja δ_p [kg/(msPa)] sekä vesihöyryn diffuusiovastuskerroin μ [-] ovat materiaalikerroksen paksuudesta riippumattomia materiaaliarvoja.

Rakenteen ja materiaalin läpi siirtyvän vesihöyryn määrään vaikuttaa siis vesihöyrypitoisuuseron lisäksi materiaalin vesihöyrynläpäisevyys. Vesihöyrynläpäisevyys voidaan mitata ns. kuppikokeella (märkä- tai kuivakuppikoe), esimerkiksi standardin SFS-EN ISO 12572 (2001) mukaisesti. Materiaalin vesihöyrynläpäisevyys ei kuitenkaan ole vakio vaan siihen vaikuttaa lämpötila sekä huokosilman suhteellinen kosteus. Useilla materiaaleilla vesihöyrynläpäisevyys kasvaa suhteellisen kosteuden kasvaessa, mikä johtuu todellisuudessa pintadiffuusiosta ja kapillaarivirtauksesta eikä niinkään vesihöyryn diffuusion lisääntymisestä. Kuppikokeen avulla saatu vesihöyrynläpäisevyys on siis todellisuudessa monen kosteuden siirtymismuodon summa (kuva 2.3).



Kuva 2.3 Materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden muuttuminen ja kosteuden siirtymismuotojen osuudet suhteellisen kosteuden funktiona (kuva vasemmalla) sekä lämpötilan vaikutus materiaalin vesihöyrynläpäisevyyteen (kuva oikealla). (Vinha 2011)

Koska vesihöyrynläpäisevyys voi tietyillä materiaaleilla kasvaa suhteellisen kosteuden kasvaessa, tulee vesihöyrynläpäisevyys mitata useassa eri kosteusparissa.

2.4 Vesihöyrynläpäisevyyskokeisiin liittyvät standardit

Seuraavassa on esitetty rakennusmateriaalien vesihöyrynläpäisevyyden mittaamiseen liittyviä standardeja ja selostettu lyhyesti niiden sisältö sekä muutamia erityispiirteitä.

Monille rakennusmateriaaleille on määritetty omat standardit, joiden mukaan materiaalin vesihöyrynläpäisevyys tulee mitata. Standardit perustuvat lähes aina samaan mittausperiaatteeseen. Standardeissa esitetyt ohjeet voivat kuitenkin vaihdella näytteiden valmistelun, koekupin, näytteen tiivistämisen, olosuhteiden, mittaustarkkuuden yms. osalta.

SFS-standardit

SFS-EN ISO 12572:2001 Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties

- Soveltuu kaikenlaisten hygroskooppisten tai ei-hygroskooppisten rakennusmateriaalien ja -tuotteiden mittaamiseen (myös pinnoitetut tuotteet).
- Ei sovellu tuotteille, joiden suhteellinen diffuusiiovastus s_d on alle 0,1 m

SFS-EN 12086:1997 Lämmöneristetuotteet rakentamiskäyttöön. Vesihöyrynläpäisevyyden määrittäminen

- Soveltuu lämmöneristetuotteiden mittaamiseen.

SFS-EN 772-15:2000 Muurauskappaleiden testimenetelmä – Osa 15: Karkaistujen kevytbetoniharkkojen vesihöyrynläpäisevyyden määrittäminen

- Soveltuu kevytbetonin mittaamiseen

SFS-EN 1015-19:1998 Methods of tests for mortar for masonry – Part 19: Determination of water vapour permeability of hardened rendering and plastering mortars

- Soveltuu laastien mittaamiseen.

SFS-EN 1931:2000 Flexible sheets for waterproofing – Bitumen, plastic and rubber sheets for waterproofing – Determination of water vapour transmission properties

- Soveltuu erityisesti katteiden mittaamiseen (esim. bitumi, kumi ja muovi), mutta voidaan käyttää myös muiden materiaalien mittaamiseen.
- Standardissa on mainittu toimenpiteitä, joilla otetaan huomioon tiiviimpien materiaalien mittaamiseen liittyviä epätarkkuustekijöitä.

SFS-EN ISO 7783:2011 Paints and varnishes. Determination of water-vapour transmission properties. Cup method

- Soveltuu maalien ja muiden pinnoitteiden mittaamiseen.

SFS-ISO 1663:1986 Muovit. Jäykät solumuovit. Vesihöyrynläpäisyneuden ja vesihöyrynläpäisevyyden määrittäminen.

- Soveltuu jäykkien solumuovimateriaalien mittaamiseen.

Muita kuin SFS-standardeja

ASTM E96:1995 Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials

- Soveltuu erityyppisten rakennusmateriaalien mittaamiseen.

NT Build 265:1984 Materials, Thin: Water vapour permeability

- Soveltuu erityyppisten rakennusmateriaalien mittaamiseen.

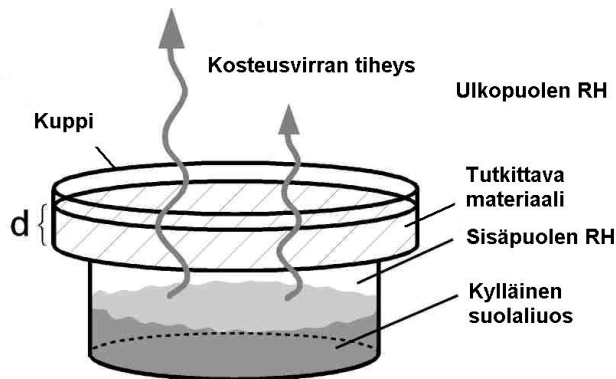
DIN 52615:1987 Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen

- Soveltuu erityyppisten rakennusmateriaalien mittaamiseen.

2.5 Materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden mittaaminen

2.5.1 Märkä- ja kuivakuppikoe

Vesihöyrynläpäisevyyden mittaaminen kuppikokeella perustuu kosteuden tasaiseen virtaukseen. Materiaalinäyte asetetaan tiiviiksi kanneksi astiaan, jonka sisällä on vakiona pysyvä vesihöyrypitoisuus ja suhteellinen kosteus. Kupin sisällä tietyn vesihöyrypitoisuuden ja suhteellisen kosteuden saa aikaan kylläinen suolaliuos (taulukko 4.3). Kuppi viedään kosteushuoneeseen, jonka vesihöyrypitoisuus eroaa kupin sisällä olevasta vesihöyrypitoisuudesta. Vesihöyrypitoisuusero aiheuttaa kosteusvirran näytteen läpi kupin sisältä ulos (märkäkuppikoe) tai ulkopuolelta kupin sisälle (kuivakuppikoe). Märkäkup-



pikokeen periaate on esitetty kuvassa 2.4.

Kuva 2.4 Märkäkuppikokeen periaate.

Kuppia punnitaan säännöllisin väliajoin, josta saadaan selville kosteusvirran tiheys g [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$] kappaleen läpi.

$$g = \frac{\Delta m}{A \Delta t} \quad (2.12)$$

missä

Δm	koekupin painon muutos [kg]
A	koekappaleen avoin pinta-ala [m^2]
Δt	ajan muutos [s]

Kosteusvirran tiheydestä saadaan johdettua materiaalin vesihöyrynläpäisykykyä kuvaavat suureet.

$$W_v = \frac{g}{\Delta v} \quad (2.13)$$

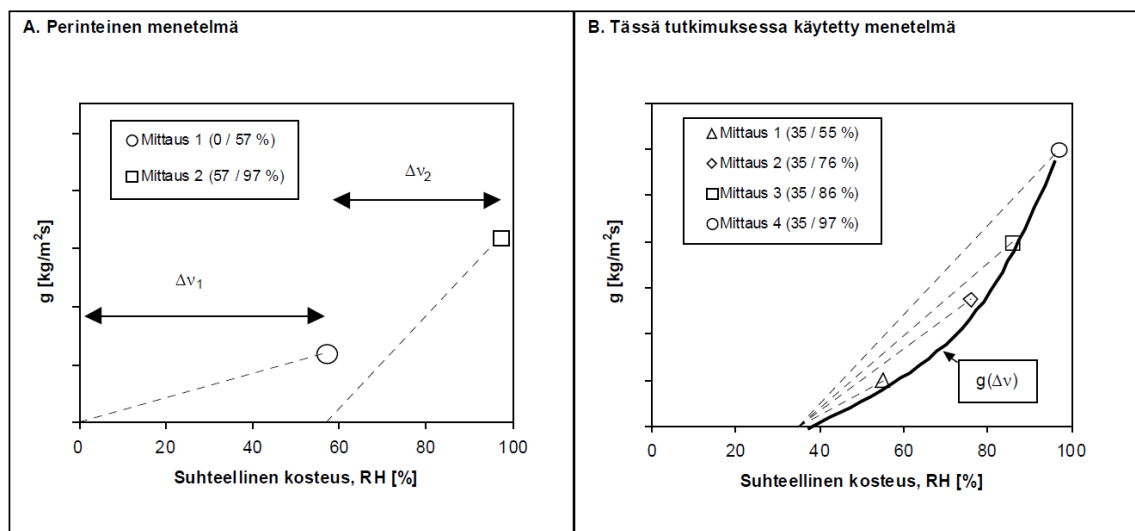
missä

Δv	vesihöyrypitoisuusero kupin sisä- ja ulkopuolen välillä [kg/m^3]
------------	--

2.5.2 Vesihöyrynläpäisevyys suhteellisen kosteuden funktiona

Materiaalin vesihöyrynläpäisevyys mitataan perinteisesti yhdellä kosteusparilla (kupin ulkopuolinen ja sisäpuolinen kosteus). Tällöin materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden arvon on oletettu pätevän näiden kahden kosteuden puolivälissä. Usein materiaaleille on mitattu erikseen vesihöyrynläpäisevyysarvot kuivissa ja kosteissa olosuhteissa, koska monien materiaalien vesihöyrynläpäisevyys muuttuu suhteellisen kosteuden funktiona, kuten kuvassa 2.3 on esitetty.

TTY:llä on kehitetty mittausmenetelmä, jolla vesihöyrynläpäisevyydelle saadaan määritettyä käyrä suhteellisen kosteuden funktiona. Tässä ns. regressiomenetelmässä koevaiheet kytketään toisiinsa pitämällä kupin ulkopuolista kosteutta vakiona kaikkien koevaiheiden aikana. Vastaavaa laskentamenetelmää on aiemmin käytetty myös lähteissä Hedenblad (1996) ja Saarimaa et al. (1989). Regressiomenetelmää on käytetty myös tässä diplomityössä. Perinteisen mittausmenetelmän ja regressiomenetelmän eroa on havainnollistettu kuvassa 2.5. (Mikkilä 2001)



Kuva 2.5 Vesihöyrynläpäisevyyden määrittämiseen käytetty perinteinen menetelmä ja regressiomenetelmä. (Mikkilä 2001)

Regressiomenetelmässä kosteusvirran tiheyden ja vesihöyrypitoisuuseron välille saadaan yhtälö, jonka määrittäminen tapahtuu regressioanalyysin avulla. Mittaustuloksiin sovitetaan matemaattinen yhtälö, joka on joko lineaarinen, polynomi tai eksponentiaalinen. Mikkilä (2001) on todennut menetelmän haittapuoleksi suureksi kasvavan vesihöyrypitoisuuden potentiaalieron korkeilla vesihöyrypitoisuuksilla, jolloin ilmatilan vesihöyryvastuksen merkitys kasvaa. Lisäksi ongelmakohtana on matemaattisen mallin valinta. Jotta regressioanalyysi on luotettava ja mallien välille saadaan tarpeeksi eroa, tulee mittaustuloksia olla riittävästi. Mikkilä (2001) piti neljää mittausta miniminä. Mittausperiaatteet on tässä diplomityössä pidetty samankaltaisina, jotta tulokset ovat mahdollisimman hyvin vertailtavissa.

2.5.3 Kuppikokeen virhelähteet

Yksinkertaisuudestaan ja yleisyydestään huolimatta kuppikoe sisältää erilaisia virhelähteitä. Kuten luvussa 1.1 todettiin, eri tutkimuslaitosten välillä tehdyt vertailututkimukset, osoittavat tutkimustuloksissa olevan hajontaa. Hansen (1990) on esitellyt artikkelissaan kuppikokeen mahdollisia virhelähteitä, jotka ovat häneen mukaansa seurausta osittain huomioimatta jääneistä korjauksista ja osittain mittaustarkkuuden puutteista. Myös Bomberg (1989) on luetellut kohtia, joihin tulisi erityisesti kiinnittää huomiota kuppikoetta tehtäessä.

Parametrit, jotka tulisi ottaa laskennallisesti huomioon ovat:

- ilmanpaineen vaihtelu
- näytteen ja suolaliuoksen välisen ilmatilan vastus
- näytteen ja kupin välisen reunan vaikutus (naamioidun reunan vaikutus)

Muita huomioon otettavia asioita:

- mittaustarkkuus (lämpötila, suhteellinen kosteus, ilmanpaine, ilman virtausnopeus, kupin massa)
- olosuhteiden tasaisuus (lämpötila, suhteellinen kosteus)
- laskennan tarkkuus
- riittävä näytteen avoin pinta-ala
- näytteen huolellinen tiivistäminen kuppiin

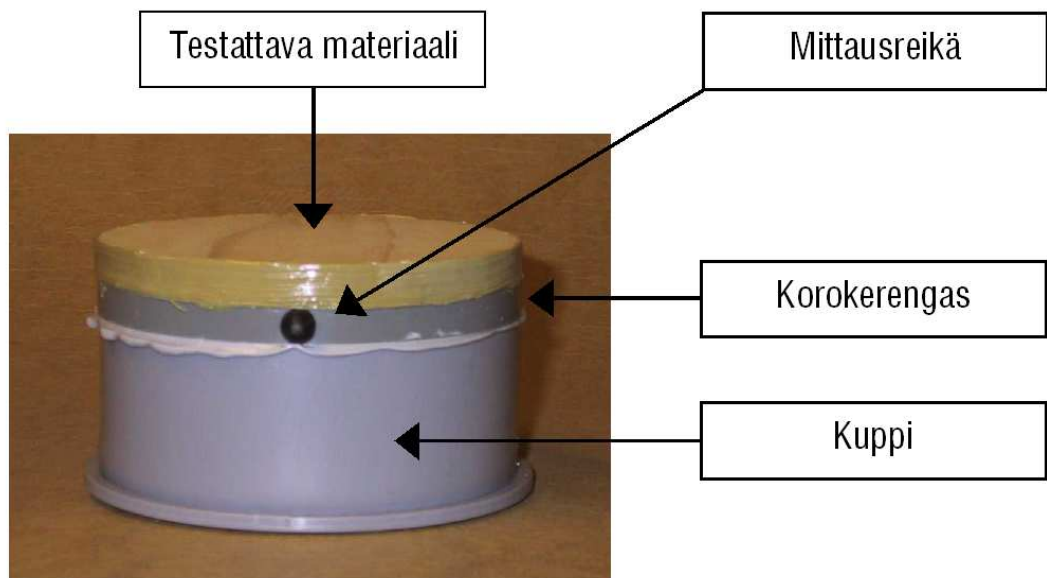
3 VESIHÖYRYNLÄPÄISEVYYDEN KOEJÄRJESTELYN PARANTAMINEN

3.1 Vanha menetelmä

Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksella käytetty vanha menetelmä kuppikokeille on kehitetty 2000-luvun vaihteessa Antti Mikkilän diplomityön yhteydessä. Menetelmä kehitettiin standardiin SFS-EN ISO 12572 (2001) perustuvaksi, mutta menetelmässä on vaikutteita useasta eri lähteestä ja myös TTY:n laboratoriohenkilökunnan käytännön kokemukset ovat vaikuttaneet menetelmän kehittämisessä. (Mikkilä 2001)

3.1.1 Koekuppi

Vanhan menetelmän koekuppi koostui kolmesta osasta: testattavasta materiaalista, korokerengasta ja kupista (kuva 3.1). Kuppina oli PVC-muovista valmistettu muoviputken päätetulppa, jonka ulkohalkaisija oli 110 mm ja materiaalipaksuus 3,2 mm. Kupin syvyys oli 40 mm.



Kuva 3.1 Vanhassa menetelmässä käytetyn koekupin osat (Mikkilä 2001).

Korokerengas sahattiin 110 mm muoviputkesta. Ulkohalkaisija ja materiaalipaksuus olivat samat kuin koekupin. Renkaan korkeus oli 10 mm ja siihen oli porattu 5,5 mm reikä kupin sisäpuolisen suhteellisen kosteuden mittaamista varten.

Korokerenkaan ja kupin välinen liitos tiivistettiin PU-pohjaisella saumaussmassalla. Liitos on suunniteltu tiiviiksi, mutta helposti avattavaksi suolaliuoksen vaihtamisen vuoksi.

Testattava materiaali liitettiin korokerenkaaseen 2-komponenttisella polyuretaaniliimalla. Materiaalin reunat tiivistettiin samalla liimalla, jotta kosteusvirta kulkisi testattavan materiaalin läpi.

Koekupin epävarmuustekijät

Eri laboratorioiden kesken tehdyn round robin- testin perusteella (Roels 2008) voidaan näytteen tiivistystapaa pitää vanhan menetelmän yhtenä epävarmuustekijänä. Vanhassa menetelmässä on tiivistystavasta johtuen kolme mahdollista epätiiviyiskohtaa; kupin ja korokerenkaan välinen sauma, näytteen ja korokerenkaan välinen sauma sekä näytekapaleen reunan tiivistys. Joissain tapauksissa kupissa esiintyneet vuotokohdat on voitu jopa silmin havaita suolan ryömimisen vuoksi (kuva 3.2).



Kuva 3.2 Kupin epätiiviyiskohtan voi havaita kiteytyneestä suolasta.

3.1.2 Kosteushuone

Aiemmin TTY:llä on ollut käytössä kaksi kevytrakenteista, puutavarasta rakennettua ja PE-rakennusmuovilla vuorattua kosteushuonetta. Kuvassa 3.3 näkyvän isoimman kosteushuoneen pohjapinta-ala oli 1,85 x 2 m ja korkeus 1,75 m. Käytössä oli myös pienempiä, pyörillä liikuteltavia kosteushuoneita. Kosteushuoneet oli sijoitettu TTY:n Rakennustekniikan laitoksen laboratoriorhallin kellarikerrokseen.



Kuva 3.3 Vanha kosteushuone (Mikkilä 2001).

Kosteushuoneiden olosuhteita on aiemmin pidetty yllä manuaalisin menetelmin. Huoneen kosteuden perussäätö on toteutettu ylikylläistä suolaliuosta sisältävien astioiden avulla (Kuva 3.4). Kosteuden todettiin kuitenkin nousevan helposti 33 %:n tavoitekosteudesta, joten liiallista kosteutta poistettiin kondenssikuivaajalla. Tilaa lämmitettiin tarvittaessa lämminilmapuhaltimella, mutta muuta lämpötilansäätöä ei käytetty.

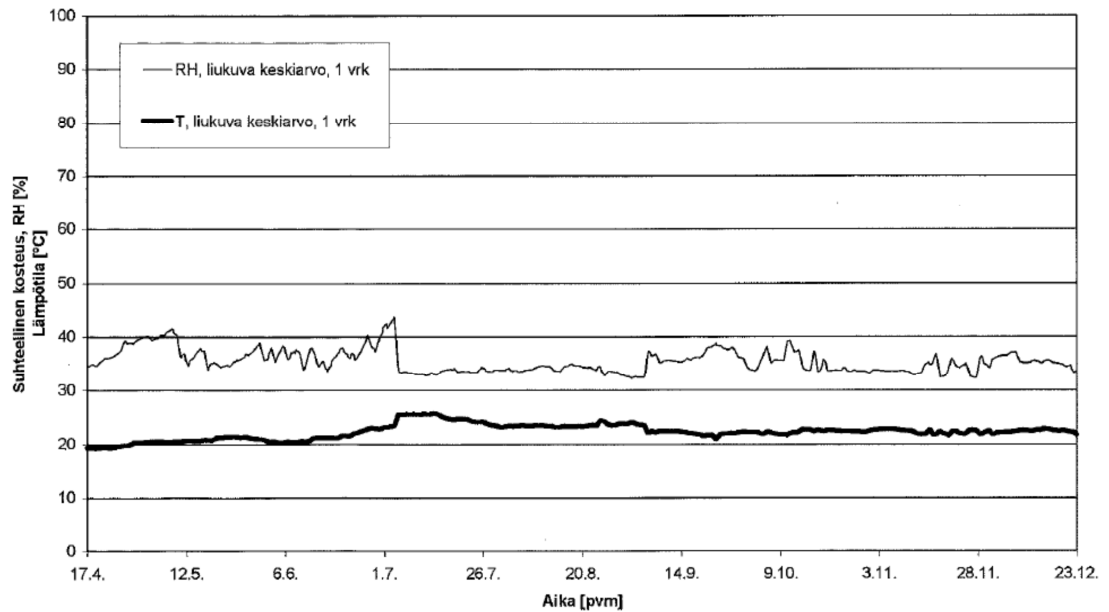


Kuva 3.4 Kosteushuoneen tuulettimella varustettu suolaliuosastia (Mikkilä 2001).

Kosteushuoneen olosuhteita mitattiin Vaisala Oy:n kosteus- ja lämpötilalähetimillä (HMP 233).

Kosteushuoneen epävarmuustekijät

TTY:llä aiemmin käytössä olleen kevytrakenteisen kosteushuoneen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden heilahtelua voidaan pitää yhtenä kuppikokeiden epävarmuustekijänä. Kuvasta 3.5 voidaan havaita, että kondenssikuiivaimesta ja lämminilmapuhaltimesta huolimatta olosuhteiden heilahtelu oli suurempaa kuin standardi SFS-EN ISO 12572 (2001) sallii. Standardissa ilmoitettu vaihteluväli suhteelliselle kosteudelle on $\pm 3 \%$ ja lämpötilalle $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$.



Kuva 3.5 Vanhan kosteushuoneen lämpötila ja ilman suhteellinen kosteus, yhden vuorokauden liukuvat keskiarvot. (Mikkilä 2001)

3.1.3 Vaaka

Koekuppien painonmuutosta seurattiin punnitsemalla kuppeja säännöllisin väliajoin. Punnitukset on aiemmin tehty käyttäen kuvassa 3.6 esitettyä Sartorius LP1200S -vaaka. Vaa'an tarkkuus on 1 mg ja punnituskapasiteetti 1,2 kg.



Kuva 3.6 Aiemmin koekuppien punnitukseen käytetty vaaka. Punnituksessa käytettiin suojakotelo, jotta kosteushuoneen ilmavirtaukset eivät vaikuttaisi punnitustulokseen (Mikkilä 2001).

Punnituksen epävarmuustekijät

Koska kuppikokeessa mitataan kuppien massanmuutosta, ei systemaattisilla toistuvilla virheillä vaa'an punnitustuloksessa ole merkitystä. Jotta massamuutokset ovat havaittavissa myös silloin, kun kosteusvirta on pieni, tulee vaa'an olla riittävän tarkka ja toisaalta punnituskapasiteetin riittävä tietyn suuruisille koekupeille.

Yhtenä punnituksen epävarmuustekijänä on koekupin heilahtelu punnituksen aikana. Jos ilmatila näytteen ja suolaliuoksen välissä ei ole riittävän suuri ja kuppi pääsee heilahtelemaan punnituksen aikana, voi suolaliuos päästä kosketuksiin näytteen kanssa.

3.2 Uusi menetelmä

Vesihöyrynläpäisevyyskokeiden kehitystyössä päätavoitteena oli kupin tiivistystavan parantaminen, mutta myös muita standardin SFS-EN ISO 12572 (2001) määrittelemiä ehtoja pyrittiin ottamaan huomioon. Muutoksia tehtiin kuppityypin lisäksi kosteushuoneeseen ja vaakaan.

3.2.1 Koekuppi

Seuraavassa on esitetty koekupin valinnassa ja suunnittelussa huomioon otettuja asioita:

- Koko:
 - o Avoimen pinta-alan tulee olla vähintään 0,005 m².
 - o Rinnakkaisia mittauksia tarvitaan viisi, jos avoin pinta-ala on pienempi kuin 0,02 m². Muussa tapauksessa kolme rinnakkaista koekappaletta riittää.
 - o Koemateriaalin ylä- ja alapuolinen avoin pinta-ala ei saa erota niiden keskiarvosta enempää kuin 3 % homogeenisillä materiaaleilla ja 10 % muilla materiaaleilla.
 - o Näytteen halkaisijan tulee olla vähintään kaksi kertaa näytteen paksuus.
 - o Valmiin koekupin paino testimateriaaleineen ei saa ylittää vaa'an punnituskapasiteettia.
- Muoto:
 - o Koemateriaali tulee olla mahdollista tiivistää vahalla.
 - o Näytteen ja kupin tulee olla ympyrän muotoinen.
- Materiaali:
 - o Kupin materiaalin tulee olla suolaliuosta ja kuumennusta kestävä.
 - o Tyypillisesti kuppi on tehty lasista tai metallista.

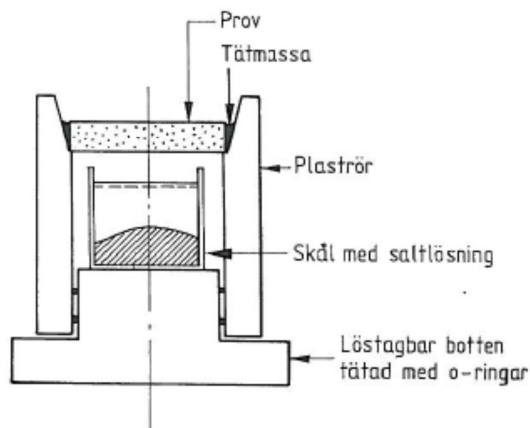
Muissa tutkimuslaitoksissa käytettyjä koekuppeja

Tutkimuksen alussa pyrittiin selvittämään millaisia koekuppeja on muissa laboratorioissa käytössä. Lähteessä Roels (2008) on esitetty round robin-testissä mukana olleiden 14 tutkimuslaitoksen koekuppityypit. 11 tutkimuslaitoksella oli käytössä ympyränmuotoinen koekuppi ja muilla neliön muotoinen. Kuppimateriaaleina oli ruostumatonta terästä, muovia, alumiinia, lasia. Näytteen avoin pinta-ala vaihteli 29 cm² ja 400 cm² välillä. Tutkimuslaitoksista 8 tiivisti näytteen kuppiin vahalla. Muita tiivistystapoja olivat kumi, epoksi, silikoni, teippi ja liima. Ilman virtausnopeus kosteushuoneessa vaihteli välillä 0,08-1,65 m/s. Viiden laboratorion kokeissa olleista ilman virtausnopeuksista ei ollut tietoa. Kuvassa 3.7 on esitetty muutamia tässä round robin-testissä mukana olleita kuppityyppejä.



Kuva 3.7 Erilaisia kuppityyppejä. (Roels 2008)

Myös muita kuppityyppejä oli käytössä eri tutkimuslaitoksissa. Hedenblad (1996) esitteli Lundin yliopistolla käytössä olevan kuppityypin, jossa kupin saa helposti avattua ja suola on sijoitettuna erilliseen astiaan (kuva 3.8).



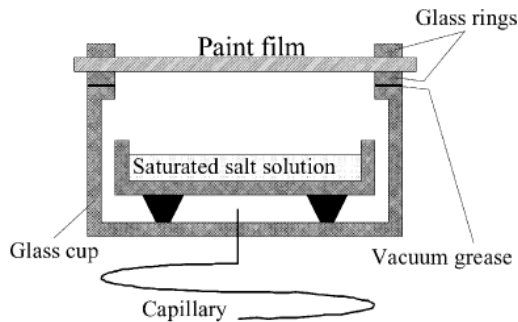
Kuva 3.8 Lundin yliopistolla käytössä ollut kuppityyppi. Kupin saa avattua ja suola on sijoitettuna erilliseen astiaan. (Hedenblad 1996)

Dresdenin teknillisen yliopiston laboratoriossa on käytössä kuvassa 3.9 esitetty kuppityyppi. Itse astia on pyöreä, mutta näyte on neliönmuotoinen. Näyte tiivistetään kanteen kumimassalla, jonka tarkempaa koostumusta ei ole tiedossa. Dresdenin teknillinen yliopisto on rakennusfysikaalisten materiaaliominaisuuksien määrittämisen osalta yksi maailman arvostetuimmista.



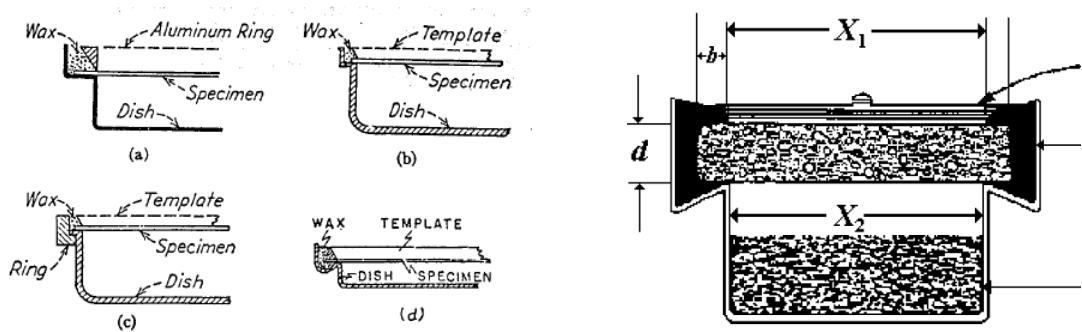
Kuva 3.9 Dresdenin teknillisen yliopiston vesihöyrynläpäisevyyskokeiden koekuppien kansia. Kuvassa näkyy materiaalien tiivistystapa kanteen.

Kalvomaisten materiaalien mittaamiseen löytyy kirjallisuudesta kuppityyppejä, joissa näytteen tiivistäminen tapahtuu jollain muulla tavoin kuin vahoilla tai liimatyypisillä tuotteilla. Kuvassa 3.10 (vasen) on esitetty maalikalvon mittaamiseen tarkoitettu koejärjestely. Siinä maalikalvo pingotetaan tyhjiörasvan avulla kahden lasireunuksen väliin. Menetelmässä paine-eron muodostuminen näytteen yli estetään kapillaariputken avulla. Kapillaariputken aiheuttama virhe on tutkimusten mukaan pienempi kuin koko menetelmän virhe. (Goossens et al. 2003) Kuvassa 3.10 (oikea) on esitetty kalvoille soveltuva kuppityyppi, jossa näytteen tiivistäminen tapahtuu mekaanisesti (Vartest Laboratories [WWW]).



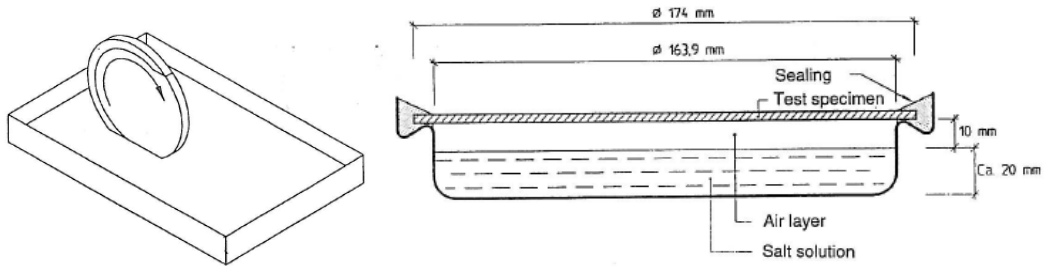
Kuva 3.10 Maalikalvon vesihöyrynläpäisevyyden mittaamisen suunniteltu koeoppi (vasen) ja kalvojen vesihöyrynläpäisevyyksmittauksissa käytetty koeoppi (oikea). (Goossens et al. 2003; Vartest Laboratories [WWW])

Kuvassa 3.11 vasemmalla on esitetty standardissa ASTM E96 esitetty näytteen tiivistäminen koeoppiin ja oikealla standardin SFS-EN ISO 12572 (2001) mukainen koejärjestely, kun mitattava materiaali on jäykkä.



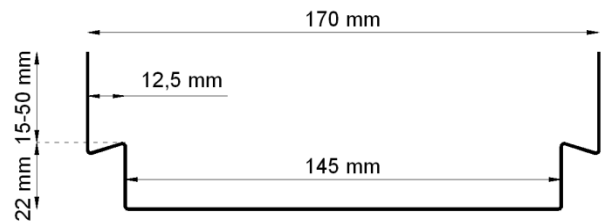
Kuva 3.11 ASTM E96 standardin esittämä näytteen tiivistäminen (vasemmalla) ja standardin SFS-EN ISO 12572 (2001) mukainen koejärjestely (oikealla).

Kuvassa 3.12 on esitetty raportissa Bergheim et al. (1998) esitetty koemenetelmä. Kyseisessä menetelmässä näytteen reunat käsitellään vahalla ja näyte tiivistetään sen jälkeen alumiinista valmistettuun koppiin.



Kuva 3.12 Koemenetelmä, jossa näytteen reunat käsitellään vahalla ja näyte tiivistetään sen jälkeen alumiinista valmistettuun kuppiin. (Bergheim et al. 1998)

VTT:n Otaniemen materiaalilaboratoriossa on käytössä vesihöyrynläpäisevyyskokeen mittausjärjestelmä, joka muistuttaa muistuttaa lähteen Bergheim et al. (1998) kuvaamaa koejärjestelyä. VTT:n koejärjestely koostuu 1 mm vahvuisesta alumiinista painosorvaamalla valmistetusta koekupista (kuva 3.13) ja standardin SFS-EN ISO 12572 (2001) mukaisesta tiivistystavasta, eli 60 % mikrovahaa ja 40 % parafiinia.



Kuva 3.13 VTT:n koekuppi ja sen mitat.

TTY:lle valittu kuppityyppi

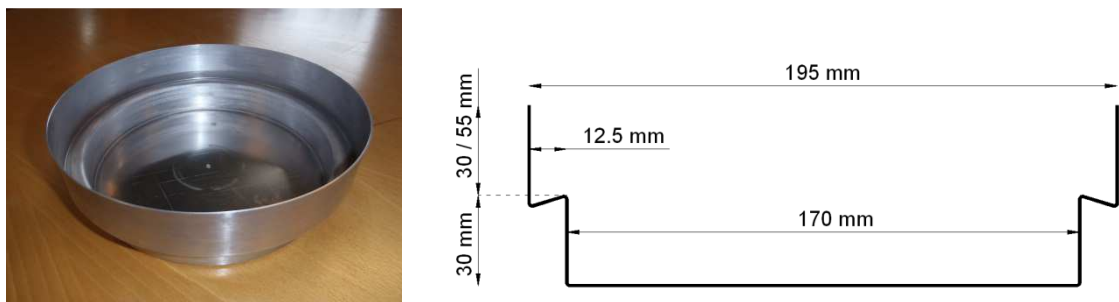
TTY:n Rakennustekniikan laitoksen mittauslaboratorion uuteen menetelmään päätettiin kehittää koekupit VTT:n mittausjärjestelmään perustuen, koska VTT on Suomessa tällä hetkellä ainut vesihöyrynläpäisevyyskokeita suorittava ilmoitettu laitos, ja toimii koejärjestelyjen sertifiointin valvojana. VTT:ltä saatiin myös tiedot vahatyypistä sekä kuppeja valmistavasta metallipajasta.

VTT:n kuppien huonoksi puoleksi osoittautui kuitenkin kupeissa käytetty materiaali. Alumiini voi reagoida voimakkaasti tiettyjen suolaliuosten kanssa, joten suolaliuosta ei voida sekoittaa suoraan kupin pohjalle vaan on käytettävä erillistä sisäkuppia.

Alumiinin heikon suolankestävyyden vuoksi selvitettiin myös muita materiaalivaihtoehtoja. Ilmeni kuitenkin, että koekuppien valmistaminen lasista tulisi liian kalliiksi. Yhden kupin valmistus olisi maksanut 125 €, kun taas alumiinikupin hinnaksi muodostui painosorvausmuotteineen 18,4 €. Toisena vaihtoehtona selvitettiin muovin käyttämistä kuppimateriaalina. Muovikuppien tilaaminen ei hinnaltaan eronnut alumiinikupeista, mutta koska näyte irroitetaan kokeen lopuksi kupista sulattamalla vaha uunissa, olisivat muovikupit voineet vahingoittua kuumentamisen aikana matalan sulamislämpötilan

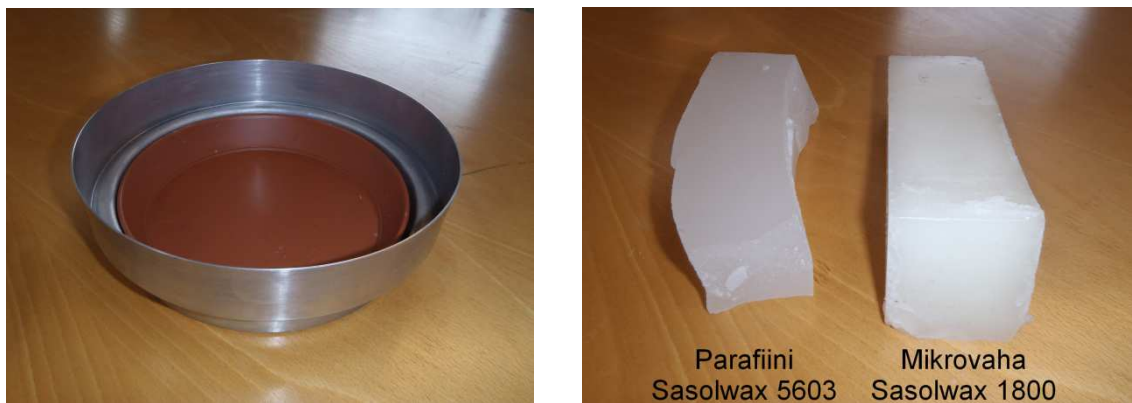
vuoksi. Lopulta päädyttiin kuitenkin käyttämään kuppimateriaalina VTT:n tapaan alumiinia ja estämään suolan reagoiminen alumiinin kanssa erillisiä sisäkuppeja käyttämällä.

Kuvassa 3.14 on esitetty TTY:n uudet vesihöyrynläpäisevyyskokeiden koekupit. Koekupit tehtiin painosorvaamalla 1,25 mm vahvuisesta alumiinista, sillä 1 mm paksuinen alumiini ei olisi toimittajan mukaan kestänyt sorvausta. Koekupit tilattiin espoolaiselta metallituotteita valmistavalta yritykseltä OLP-Tuotanto Oy. Koekuppeja tilattiin kahta eri mallia. Toisissa ylempi reunakorkeus oli 30 mm ja toisissa 55 mm. Matalampia kuppeja käytetään ohuemmillä koekappaleilla. Kuppi on VTT:n kuppia suurempi, jotta myös kolmen rinnakkaisen näytteen mittaaminen on mahdollista.



Kuva 3.14 Uusi koekuppi ja sen mitat.

Koekuppiin hankittiin myös alumiinia suojaavia sisäkuppeja. Sisäkupit olivat muovisia Hammarplastin Cultivate-merkkisiä kukkaruukun alusvateja, halkaisijaltaan 160 mm (kuva 3.15).



Kuva 3.15 Vasemmalla uusi koekuppi ja alumiinia suojaava sisäkuppi. Oikealla kuva tiivistämiseen käytetyistä vahoista.

Materiaalin tiivistämistä varten hankittiin kahta erityyppistä vahaa kemikaalien ja raaka-aineiden maahantuoja Oy Celego Ab:ltä. Vahat olivat mikrovaha Sasolwax 1800 ja parafiini Sasolwax 5603 (kuva 3.15).

3.2.2 Kosteushuone

TTY:n Rakennustekniikan laitoksen kosteushuonetta pyrittiin parantamaan siten, että suhteellinen kosteus ja lämpötila pysyvät standardin SFS-EN ISO 12572 (2001) vaatimusten mukaisena (± 3 % RH ja $\pm 0,5$ K). TTY:n rakennushallissa lämpötilan vaihtelu on eri vuodenaikojen välillä suurta, koska hallin ovia pidetään ajoittain auki. Tästä johtuen ne kellarikerroksen seinät, jossa kevytrakenteiset kosteushuoneet sijaitsevat, eristettiin polyuretaanilevyillä. Tavoitteena oli vähentää ulkopuolisten tilojen lämpötilanvaihteluiden vaikutusta kosteushuoneissa ja toisaalta säilyttää tietty kosteustaso huoneissa mahdollisimman tehokkaasti. Tiloista poistettiin yksi vanha kevyt- ja puurakenteinen muovilla vuorattu kosteushuone ja tämän tilalle rakennettiin uusi kosteushuone. Tässä tilassa seinät ja katto vuorattiin alumiinipintaisella polyuretaanilla (kuva 3.16). Tilaan rakennettiin vesihöyrytiivis ovi.



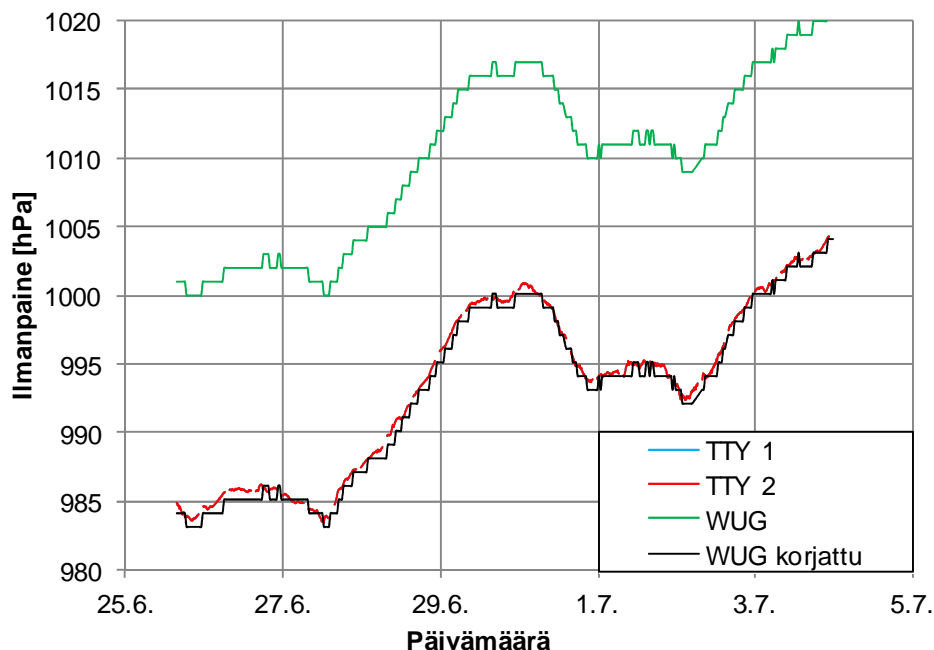
Kuva 3.16 Vasemmalla kosteushuone ja oikealla kosteushuonetta lämmittävä termostaattila varustettu lämmitysvastus.

Uuteen kosteushuoneeseen asennettiin termostaatilla varustettu lämmitysvastus (kuva 3.16), joka automaattisesti lämmitti tilaa lämpötilan laskiessa alle 23 °C. Kosteushuoneen kosteusolosuhteiden säätö tapahtui edelleen kylläistä suolaliuosta sisältävillä astioilla, joita kosteushuoneessa oli kolme kappaletta.

Kosteushuoneen olosuhteita tallennettiin edelleen Vaisala Oy:n kosteus- ja lämpötilälähettimillä (HMP 233). Anturit kuitenkin kalibroitiin diplomityön alussa. Kalibrointi suoritettiin ainoastaan suhteelliselle kosteudelle, koska tarkistusmittauksin todettiin, että lämpötilamittaus oli tarkka. Valmistaja on antanut mittareille tarkkuudeksi suhteellisen kosteuden osalta ± 2 % RH ja lämpötilan osalta $\pm 0,1$ °C (Vaisala 2002).

Suolaliuosastioiden tuulettimet vastasivat myös kosteushuoneen riittävästä ilmanvirtauksesta. Ilman virtausnopeus kosteushuoneessa varmistettiin TSI Velocicalc Plus paineromittarilla. Mittari asetettiin huoneessa sijaitsevien hyllyjen ylimmälle tasolle (kuva 3.16 vasen) ja lukeman heilahtelua seurattiin hetken aikaa. Ilmavirran nopeudeksi saatiin 0,02-0,14 m/s. Standardin SFS-EN ISO 12572 (2001) mukaan ilmavirran nopeus tulee kosteushuoneessa olla välillä 0,02-0,3 m/s vesihöyrynläpäisevyyskokeiden aikana.

Kosteushuoneisiin hankittiin vesihöyrynläpäisevyyskokeiden aikana myös kaksi kappaletta tallentavia ilmanpainemittareita. Ilmanpainemittarit olivat Vaisalan PTB110-mallisia barometrejä. Kuitenkin, koska suurin osa mittauksista ehdittiin tehdä ennen ilmanpainemittarien hankkimista, käytettiin laskennassa hyödyksi ”Weather Underground” internet-sivujen ilmanpainetietoja (Weather Underground [WWW]). ”Weather Underground”-sivustolla ilmanpaine ilmoitetaan meren pinnalla, joten arvot muutettiin vastaamaan TTY:n rakennustalon laboratorion korkeusasemaa (135 m). Maanpinnan läheisissä ilmakerroksissa 8 metrin nousu korkeussuunnassa merkitsee noin 1 hPa (100 Pa) vähennystä ilmanpaineessa (Ilmatieteen laitos). Kuvassa 3.17 on esitetty ”Weather Underground”-sivuston ja TTY:n laboratoriolle myöhemmin hankittujen ilmanpainemittarien vertailua. Kuvaajasta nähdään, että mittausarvot vastaavat hyvin toisiaan.

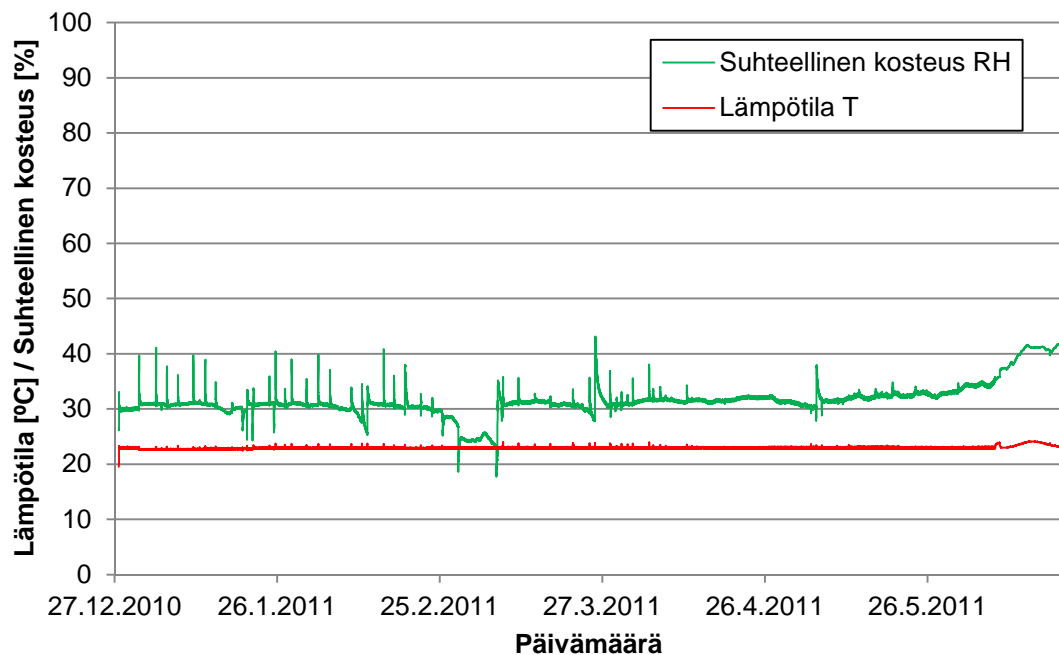


Kuva 3.17 TTY:llä mitattujen ja Weather Underground-sivustolta haettujen ilmanpainetietojen vertailu. TTY:n toisen mittarin (TTY 1) mittausarvot eivät näy kuvassa, koska arvot olivat täysin samat kuin mittarilla TTY 2.

Kuvassa 3.18 on esitetty kuinka suhteellinen kosteus ja lämpötila vaihtelivat uudistetussa kosteushuoneessa ajanjaksona 27.12.2010 – 20.6.2011. Kuvasta nähdään, että lämpötila pysyy termostaatin avulla talvikaudella jatkuvasti tavoitellussa 23 °C:ssa. Vain mit-

tausjakson loppuvaiheessa kesän alussa lämpötila lähtee kevyesti kohoamaan. Tämä onkin edelleen yksi näiden kosteushuoneiden ongelmista. Koska huoneessa ei ole jäähdytystä, ei edes kosteushuoneen sijainti kellarissa ja huoneen seiniin asennetut polyuretaanilevyt estä lämpötilan kohoamista yli 23 °C:een, jos kesä on helteinen. Lämpötilan kohoamista tapahtuu kuitenkin suhteellisen lyhyen ajanjakson aikana (kesäkuu-elokuu), joten mittauksia voidaan tällöin välttää.

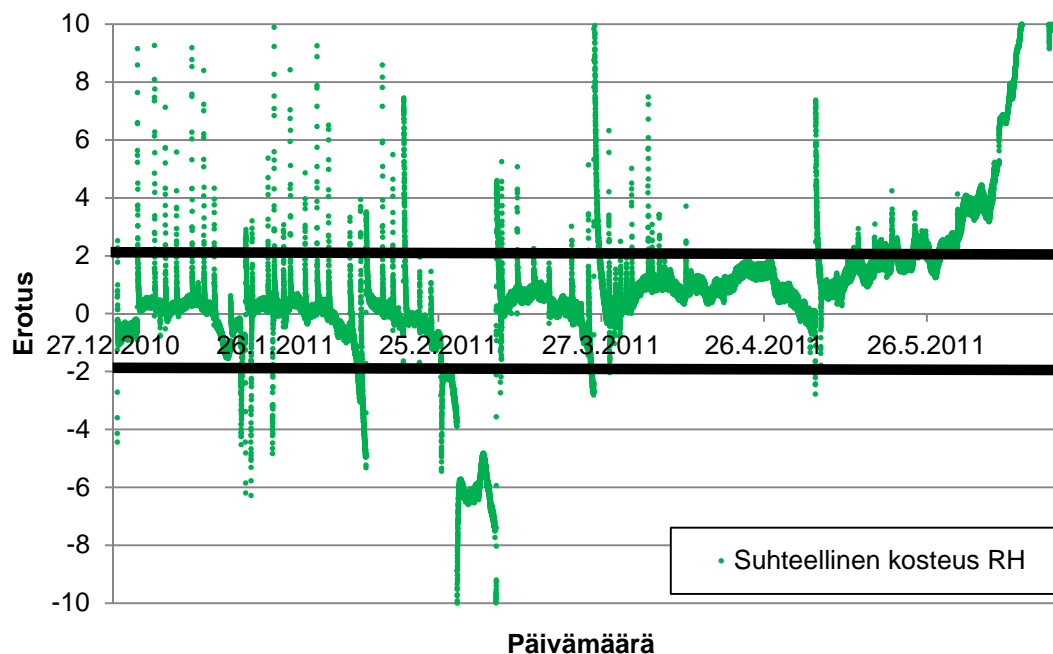
Lämpötilan nousun sijaan suuremman ongelman tuottaa matalan suhteellisen kosteuden tuottaminen kosteushuoneeseen kesäkauden aikana. Kesällä normaali huonetilan suhteellinen kosteus on n. 50 % - 60 % RH, joten suolaliuoksen tarvitsee sitoa kosteutta, jotta päästäisiin alle tämän arvon. Tämä tarkoittaa sitä, että suolaliuosastioihin tulee vähintään kerran viikossa lisätä runsaasti uutta suolaa ja poistaa nestettä. Toimenpiteestä huolimatta suhteellinen kosteus lähtee helposti ryömimään ylöspäin. Ilmiö on havaittavissa myös kuvassa 3.18; kesän alussa suhteellinen kosteus on jo yli 40 % RH. Kuvasta voidaan kuitenkin havaita, että talvikaudella suhteellinen kosteus pysyy tasaisena. Kosteushuoneessa käynti punnitusten aikana nostaa suhteellisen kosteuden aina hetkellisesti lähelle 40 % RH:ta, mutta kosteusolosuhteet palautuvat nopeasti takaisin tavoitellulle tasolle. Helmi-maaliskuun vaihteessa kosteushuone on ollut käyttämättömänä jolloin suhteellinen kosteus on ollut matalammalla tasolla, koska suola-astioihin ei ole lisätty vettä.



Kuva 3.18 Uudistetun kosteushuoneen mitatut olosuhteet (RH ja T) ajanjaksolla 27.12.2010-20.6.2011.

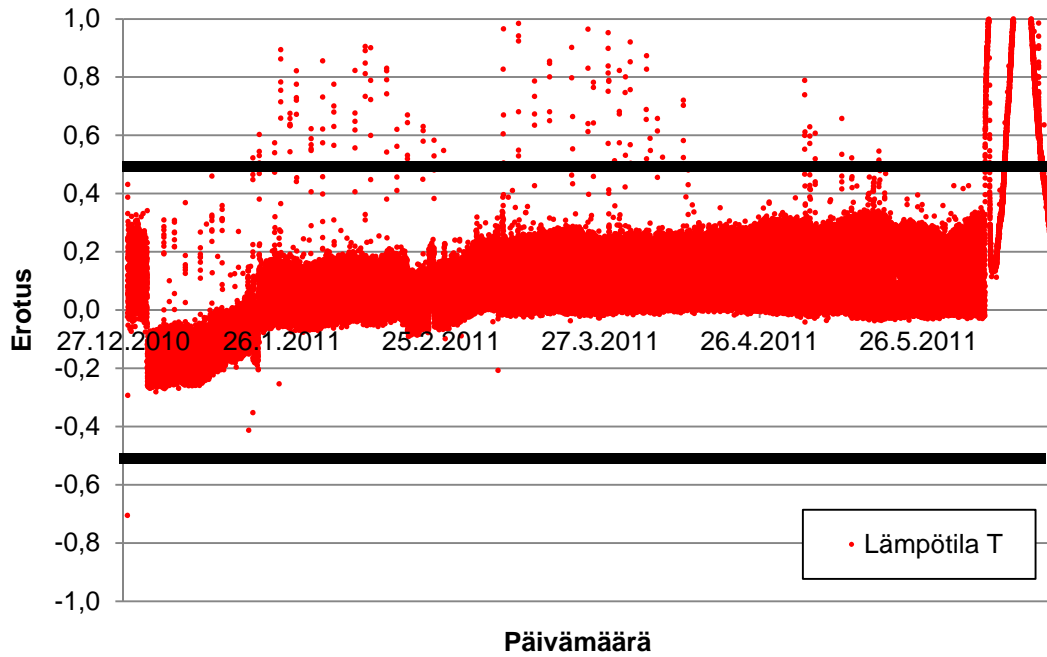
Verrattuna aiemmin TTY:llä käytössä olleen kosteushuoneen olosuhteisiin (kts. kuva 3.5), uudistetussa kosteushuoneessa lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihtelu on maltillisempaa. Jos tarkastellaan ajanjaksoa 27.12.2010-25.2.2011, jolloin kosteushuone on ollut jatkuvasti käytössä, saadaan kosteushuoneen keskimääräiseksi suhteelliseksi

kosteudeksi 30,6 % RH. Tavoitearvoa (33 % RH) hieman matalampi suhteellisen kosteuden arvo johtuu todennäköisesti kosteushuoneen suuresta koosta. Suolaliuos ei saa nostettua suuren tilan suhteellista kosteutta aivan tavoitearvon mukaiseksi. Kuitenkin koska olennaisempaa on suhteellisen kosteuden tason pysyminen tasaisena, on diplomityön mittaukset suoritettu näissä olosuhteissa ja laskennassa on käytetty mitattuja olosuhdearvoja. Kuvassa 3.19 on esitetty suhteellisen kosteuden heilahtelua tästä keskiarvolukemasta (30,6 % RH). Standardin SFS EN ISO 12572 (2001) mukaan suhteellinen kosteus saa vaihdella mittausten aikana ± 2 % RH. Kuvasta voidaan havaita, että valtaosan ajasta pysytään tämän vaihteluvälin sisäpuolella. Jos ei oteta huomioon alkukesää ja ajankohtaa jolloin kosteushuone oli käyttämättömänä, on suhteellisen kosteuden vaihtelu hetkellistä punnituksista aiheutuvaa vaihtelua. Laskennallisesti 88 % ajasta suhteellinen kosteus pysyy standardin mukaisen vaihteluvälin sisäpuolella, jos ei oteta huomioon alkukesän ja käyttämättömän ajan olosuhteita.



Kuva 3.19 Uudistetun kosteushuoneen mitatun suhteellisen kosteuden erotus keskimääräisestä suhteellisesta kosteudesta. Kuvassa on esitetty standardin SFS-EN ISO 12572 (2001) sallima vaihteluväli mustilla viivoilla.

Kuvassa 3.20 on esitetty vastaava lämpötilan vaihtelu. Standardi SFS-EN ISO 12572 (2001) määrittelee, että lämpötilan saa vaihdella maksimissaan $\pm 0,5$ °C. Kuvasta nähdään, että lämpötila pysyy hyvin tämän vaihteluvälin sisäpuolella. Laskennallisesti 99 % ajasta lämpötila pysyy standardin mukaisen vaihteluvälin sisäpuolella, jos ei oteta huomioon alkukesän olosuhteita.



Kuva 3.20 Uudistetun kosteushuoneen mitatun lämpötilan erotus keskimääräisestä lämpötilasta. Kuvassa on esitetty standardin SFS-EN ISO 12572 (2001) sallima vaihteluväli mustilla viivoilla.

3.2.3 Vaaka

Koska uusien kupprien koko kasvoi huomattavasti aiempaa suuremmaksi, nousi koekupprien massa aiemmin käytössä olleen vaa'an punnituskapasiteetin yli. Punnituksen riittävän tarkkuuden vuoksi hankittiin uusi vaaka, jolla oli suurempi punnituskapasiteetti. Hankittu vaaka oli merkkiä Precisa ES 2220M Executive, jonka punnitustarkkuus oli 1 mg ja punnituskapasiteetti 2,2 kg (kuva 3.21). Samalla uusittiin myös punnituksen yhteydessä käytettävä suojakotelo.



Kuva 3.21 Koekupprien punnituksessa käytetty vaaka Precisa ES 2220M Executive.

4 LABORATORIOKOKOKEIDEN SUORITUS

Koemenetelmän kehitystyön lisäksi tämän työn tavoitteena oli tehdä vertailumittauksia uuden ja vanhan mittausmenetelmän kesken. Vertailujen lisäksi mittauksia tehtiin kiviaineisille materiaaleille ja Ekovillan 5 x ilmansulkupaperille.

4.1 Tutkitut materiaalit

Tutkimusmateriaaleina käytettiin osin Vinha et al. (2005) julkaisun kanssa samoja materiaaleja. Koska täsmälleen samoja materiaalikappaleita ei ollut tarjolla, mitattiin suurin osa materiaaleista sekä uudella että vanhalla tekniikalla. Taulukoissa 4.1 ja 4.2 esitetään diplomityössä mitatut materiaalit, niiden mitatut paksuudet sekä tiheydet.

Taulukko 4.1 *Materiaalit, joiden vesihöyrynläpäisevyys mitattiin sekä vanhalla että uudella menetelmällä.*

<p>VANERI</p> <ul style="list-style-type: none"> - WISA 3 Ply, havuvaneri - 8,5 mm - 482 kg/m³ (kirjallisuusarvo) <p>ID: PLY_U ja PLY_V</p>	
<p>RUNKOLEIJONA</p> <ul style="list-style-type: none"> - 24,2 mm - 230-300 kg/m³ (kirjallisuusarvo) <p>ID: RL_U ja RL_V</p>	
<p>RAKENTAJAN KOVALEVY</p> <ul style="list-style-type: none"> - 3,3 mm - 900-1000 kg/m³ (kirjallisuusarvo) <p>ID: RK_U ja RK_V</p>	
<p>POLYURETAANI PUR</p> <ul style="list-style-type: none"> - 20,7 mm - 32-38 kg/m³ (kirjallisuusarvo) <p>ID: PUR_U ja PUR_V</p>	

<p>POLYURETAANI PIR</p> <ul style="list-style-type: none"> - 20,6 mm - 32-38 kg/m³ (kirjallisuusarvo) <p>ID: PIR_U ja PIR_V</p>	
<p>HÖYRYNSULKUMUOVI</p> <ul style="list-style-type: none"> - 0,2 mm - 980 kg/m³ (kirjallisuusarvo) <p>ID: HSM_U ja HSM_V</p>	
<p>Taulukko 4.2 Materiaalit, joiden vesihöyrynläpäisevyys mitattiin vain uudella menetelmällä.</p>	
<p>KIPSILEVY</p> <ul style="list-style-type: none"> - 9,7 mm - Sama materiaali kuin lähteessä Vinha et al. (2005) - 774 kg/m³ <p>ID: KL</p>	
<p>EKOVILLA 5X ILMANSULKUPAPERI</p> <ul style="list-style-type: none"> - 0,3 mm - 767 kg/m³ (kirjallisuusarvo) <p>ID: Eko</p>	
<p>BETONI C20/25</p> <ul style="list-style-type: none"> - 30,6 mm - 2220 kg/m³ <p>ID: C20/25</p>	
<p>BETONI C32/40</p> <ul style="list-style-type: none"> - 30,6 mm - 2200 kg/m³ <p>ID: C32/40</p>	
<p>PUNATILI</p> <ul style="list-style-type: none"> - 13,3 mm - 1860 kg/m³ <p>ID: PT</p>	

4.2 Koekappaleiden valmistaminen

Kokeita varten oli materiaaleista leikattava tai sahattava halkaisijaltaan sopivan kokoisia kiekkoja. Vanhassa menetelmässä kiekon halkaisijan tuli olla 110 mm ja uudessa menetelmässä 185 mm. Jäykät materiaalit sahattiin muotoonsa sirkkeliä ja vannesahaa käyttäen. Näytteen reunat viimeisteltiin hiomalla. Materiaalit mitattiin pääasiassa alkuperäisessä tuotetta vastaavassa paksuudessaan. Poikkeuksena polyuretaanit PUR ja PIR, jotka sahattiin 60 / 70 mm paksuisista materiaalinäytteistä. Materiaalinäytteiden halkaisija sekä paksuus mitattiin kolmen mittauksen sarjana 0,1 mm tarkkuudella.

Diplomityön yhtenä tavoitteena oli kehittää myös mittausjärjestelmä kiviaineisten materiaalien mittaukselle. Mittaus eroaa muista rakennusmateriaaleista lähinnä näytteiden valmistuksen osalta.

Näytteiden valmistaminen kivimateriaaleista

Kivimateriaalien osalta koekappaleiden valmistus on haastavampaa, koska materiaalia ei ole mahdollista työstää pehmeämmille rakennusmateriaaleille soveltuvien menetelmin. Tarvitaan siis järeämpiä työkaluja tai vaihtoehtoisesti, jos kyseessä on valettava materiaali (betonit, laastit) voidaan materiaali valaa heti oikeaan muotoon. Diplomityössä testattiin molempia valmistustapoja. Betoniset koekappaleet valettiin ja muut kivimateriaalit työstettiin (punatiili, kalkkihiekkakivi, kevytbetoni, kevytsorabetoni).

Betonikoekappaleiden valmistus

Betonin vesihöyrynläpäisevyysominaisuuksiin vaikuttaa mm. vesi-sementtisuhde ja siten myös lujuus, raekokojakauma ja huokoisuus. Tämän vuoksi mittauksissa haluttiin samalla tutkia betonin vesihöyrynläpäisevyyden riippuvuutta lujuudesta ja vesisementtisuhteesta. Mittaukset tehtiin kahdelle betonilaadulle; lujuusluokaltaan C20/25 (K25) ja C32/40 (K40). Jotta betonilaadun vaikutus saatiin selville, piti näytebetonin ominaisuudet olla tiedossa. Tämän vuoksi betoni päätettiin valaa itse massasta, jonka eri osainemien määrät tiedettiin. Betonimassa käytiin hakemassa Lujabetoni Oy:n betonitehtaalta. Laboratoriotulokset betonin valmistuksesta on esitetty liitteessä 1.

Betonimassa valettiin suoraan lopullisiksi koekappaleiksi, eli halkaisijaltaan 185 mm ja paksuudeltaan 30 mm kiekkoiksi, kuten kuvasta 4.1 voidaan havaita. Toisena vaihtoehtona harkittiin suuremman lieriön valamista, josta koekappaleet voisi sahata timanttisahalla. Tässä tapauksessa koekappaleen pinnat eivät olisi kuitenkaan vastanneet oikeita rakenneseosia, joten koekappaleet päädyttiin valamaan heti lopullisiin mittoihin.

On kuitenkin huomattava, että koekappaleet eivät tällöin täyttäneet standardin SFS-EN ISO 12572 (2001) vaatimuksia, sillä standardin mukaan epähomogeenisten materiaalien paksuus tulee olla kolme kertaa suurimman partikkelin paksuus. Betonin maksimirakekoko oli 16 mm, joten näytteen paksuuden tulee olla silloin 48 mm. Näin paksuja materiaalinäytteitä ei kuitenkaan haluttu tehdä, koska betonin kaltaisella tiiviillä materiaalilla kosteusvirta näytteen läpi on hyvin pientä. Kosteusvirta materiaalin läpi oli jo 30 mm paksuisella näytteellä hyvin pientä.



Kuva 4.1 Betonikoekappaleet valettuina.

Näytteen paino toi myös haastetta mittauksiin, koska 1 mg tarkkuusvaa'an punnituskapasiteetti on 2,2 kg ja 30 mm paksu näyte painoi kuppeineen ja suolaliuoksineen painoi jo lähes 3 kg. Betonin mittauksissa käytettiin siten erilaista vaakaa, jonka mittaustarkkuus oli 10 mg, mutta kapasiteetti 6,2 kg (Sartorius ED6202S-CW) Standardissa SFS-EN ISO 12572 (2001) on todettu, että 10 mg tarkkuus voi olla riittävä mitattaessa painavia materiaaleja.

Valettujen näytteiden annettiin kuivua vuorokausi muotissaan ja tämän jälkeen ne asetettiin vesiupotukseen 28 päiväksi. Vesihöyrynläpäisevyyskokeet suoritettiin muutama kuukausi tämän jälkeen.

Jotta voitiin varmistua betonin lujuudesta, testattiin betonin puristuslujuus kuutionäytteistä TTY:n laboratoriossa (kuva 4.2). Mittaukset suoritettiin 28 päivän ikäisille koe-

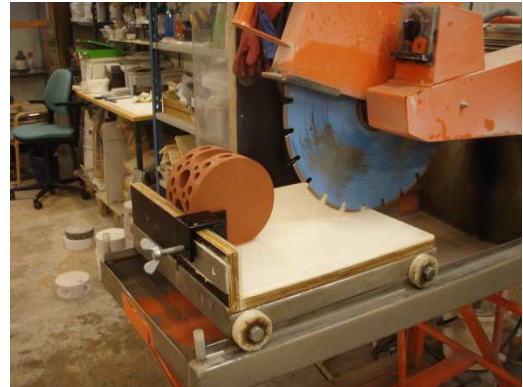
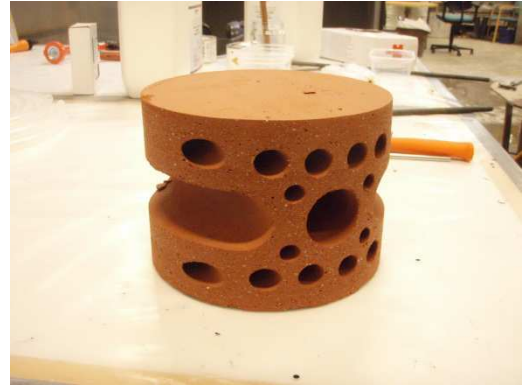
kappaleille. Kokeiden tulokset on esitetty liitteessä 2. Lujuusluokaltaan ilmoitetun betonin C20/25 puristuslujuudeksi saatiin $28,6 \text{ N/mm}^2$ ja betonin C32/40 puristuslujuudeksi tuli $48,3 \text{ N/mm}^2$. Mitatut lujuudet vastasivat siis hyvin tavoitelujuutta.



Kuva 4.2 *Betonien puristuslujuus testattiin kuutiopuristuslujuuskokeissa.*

Näytteiden valmistus muista kivimateriaaleista

Muista kivimateriaaleista valmistettiin lopullisia koekappaleita työstämällä isompia materiaalinäytteitä. Koekappaleiden valmistusta varten hankittiin timanttiporan terä, jolla voitiin porata materiaalista halkaisijaltaan oikean kokoisia näytteitä. Timanttiporan terän tuli olla sisähalkaisijaltaan n. 185 mm. Valmiina ei tämän suuruista terää löytynyt. Terä teetettiin erikoistilauksena Terra-Team Oy:llä (kuva 4.3). Kun näytteet oli porattu halkaisijaltaan oikean kokoisiksi, sahattiin ne vielä sopivaan paksuuteen timanttisahalla (kuva 4.3).



Kuva 4.3 Kivimateriaalien poraus ja sahaus. Ensin materiaalista porattiin timanttioralla halkaisijaltaan 185 mm ympyränmuotoisia kiekkoja. Sen jälkeen kiekot sahattiin sopivaan paksuuteen timanttisahalla.

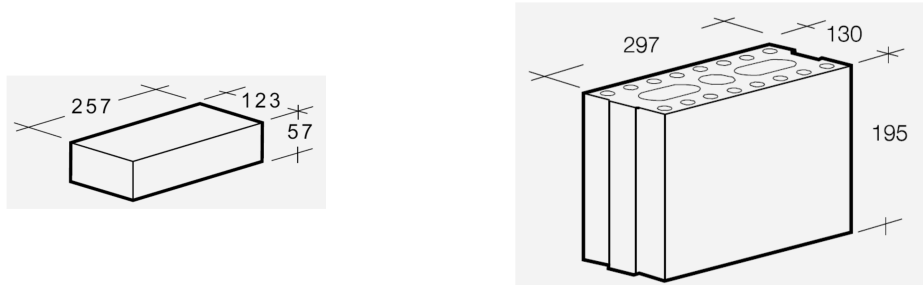
Kyseisen valmistustavan haittapuolena on timanttiorauksessa ja -sahauksessa käytetty vesi. Materiaalin tulee kestää työstön aikainen kosteusrasitus. Valmiit koekappaleet on myös kuivattava ennen varsinaisia mittauksia. Lisäksi materiaalista on oltava olemassa niin suuria kappaleita, että niistä on mahdollista työstää halkaisijaltaan 185 mm:n koekappaleita.

Koekappaleiden valmistusta testattiin punatiilelle, kevytsorabetonille, kalkkiehkekkatiilelle ja kevytbetonille. Koekappaleet saatiin valmistettua kaikista edellä mainituista materiaaleista timanttioraa ja -sahaa käyttämällä. Valmistetut koekappaleet on esitetty kuvassa 4.4.



Kuva 4.4 Koekappaleet punatiilestä, kevytbetonista, kevytsoraharkosta ja kahitiilestä.

Punatiilen osalta koekappaleen koko toi lisähaastetta niiden valmistukseen. Yleisimmät täystiilet ovat mitoiltaan niin pieniä, että niistä ei saa sahattua yhtenäistä halkaisijaltaan 185 mm olevaa näytettä. Tämän vuoksi mittaukseen valittiin runkotiili, jonka korkeus oli niin suuri, että tiilen pinnasta saatiin sahattua n. 10 mm paksu näytekappale (kuva 4.5 ja 4.3).



Kuva 4.5 Tiilien mittoja. Vasemmalla poltettu täystiili, oikealla Terca-runkotiili. (RT 38089).

Varsinaiset vesihöyrynläpäisevyyskokeet tehtiin ainoastaan betonikoekappaleille ja punatiilelle aikataulusyistä.

4.2.1 Vanhan menetelmän koekupin valmistaminen

Vanhan menetelmän mukaiset mittaukset suoritettiin kappaleessa 3.1.1 kuvatulla koejärjestelyllä. Koekuppi koostui siis testattavasta materiaalista, korokerenkaasta ja kupista, jotka olivat PVC-muovia ja ulkohalkaisijaltaan 110 mm. Kupista ei tässä tutkimuksessa mitattu sisäpuolista suhteellista kosteutta, joten korokerenkaan mittausreikä oli mittausajan peitettynä kumitulpalla. Korokerenkaan ja kupin välinen liitos tiivistettiin PU-pohjaisella saumaussmassalla, koekappaleiden reunat tiivistettiin ja materiaali kiinnitettiin kuppiin 2-komponenttisella polyuretaaniliimalla (kuva 4.6 vasen). Höyrynsulku muovin osalta todettiin, että polyuretaaniliima ei tarttunut muoviin, joten tämän materiaalin osalta tiivistys/kiinnitys tapahtui SikaBond®-505 kalvoliimalla.



Kuva 4.6 Vanhan menetelmän mukainen koekuppi (vasen) ja materiaalin irrottaminen koekupista suolanvaihdon yhteydessä (oikea).

Materiaalit mitattiin kahdessa erässä, eli koekupin suolaliuos vaihdettiin mittausten välissä (kuva 4.6 oikea). Ensin mittaukset suoritettiin käyttäen kupin sisällä suhteellisia kosteuksia 55 % ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$) ja 86 % (KCl). Sen jälkeen suolaliuokset vaihdettiin liuoksiin, jotka tuottivat 75 % RH (NaCl) ja 97 % RH (K_2SO_4) suhteelliset kosteudet. Mittaukset on siis 55 % RH ja 75 % RH sekä 86 % RH ja 97 % RH osalta tehty samoilla materiaalinäytteillä, lukuun ottamatta runkoleijonan mittauksia, jolloin osa näytteistä jouduttiin uusimaan materiaalin vahingoittumisen vuoksi.

4.2.2 Uuden menetelmän koekupin valmistaminen

Uudessa testausmenetelmässä näyte tiivistettiin koekupin sisälle asettamalla näyte kupissa olevan kynnyksen päälle ja kaatamalla sulatettua vahaseosta kupin reunoille. Vaha sulatettiin kattilassa keittolevyllä. Koemenetelmän testausvaiheessa huomattiin, että vahatekniikalla on suuri merkitys kupin tiivistyksen onnistumiseen. Jos sulatettu vaha kaadetaan kupin reunoille kerralla ilman mitään muita toimenpiteitä, näytteen, vahan ja kupin välinen liitos ei muodostu riittävän tiiviiksi. Muissa tutkimuksissa on lisäksi todettu, että näytteen ja vahan tartunta tulee olla hyvä. Jos näytteen pinta on sileä ja tiivis, ei vaha tartu pintaan ja reunasta saattaa tapahtua vuotoja. Tämän vuoksi näytteen reunassa ei tulisi käyttää vahan tunkeutumista estäviä teippejä yms. (Manelius & Vinha 2011).

Seuraavassa on lueteltu työvaiheet, joiden mukaan näyte tiivistettiin koekuppiin. Kuvassa 4.7 on esitetty valmis koekuppi näytteineen. Liitteessä 4 on vesihöyrynläpäisevyyskokeiden työohje, jonka periaatteita on noudatettu myös diplomityön kokeita suoritettaessa.

1. 60 % mikrovahaa ja 40 % parafiinia sulatetaan ja sekoitetaan keskenään kattilassa keittolevyllä.
2. Koekupin reunoille ja kynnykselle sivellään vahakerros. Samoin näytteen reunat käsitellään ohuella vahakerroksella. Tämä käsittely parantaa näytteen ja vahan sekä kupin ja vahan välistä tartuntaa ja estää vahan liiallisen tunkeutumisen näytteeseen.
3. Vahaseoksen annetaan jäähtyä siihen pisteeseen, että vaha on lähestulkoon jähmetymässä uudelleen.
4. Vahaa kaadetaan näytteen paksuudesta riippuen vähintään kahdessa kerroksessa koekupin reunoille. Vahan tulee antaa jähmettyä kunnolla ennen uuden kerroksen kaatamista.
5. Vahaa kaadetaan kunnes tiivistys ulottuu jo osittain näytteen päälle. Näytteen päällä tulee käyttää muottia, joka estää vahan valumisen koko näytteen päälle. Muotin koko valitaan siten, että koemateriaalin avoin pinta-ala on sekä näytteen ylä- että ala- osastaan yhtä suuri.
6. Koekuppi viimeistellään sivelemällä vielä sulaa vahaa kupin reunoille.



Kuva 4.7 Koemateriaali tiivistettynä koekuppiin.

4.3 Olosuhteet ennen mittauksia

Ennen mittauksia suurinta osaa materiaaleista säilytettiin normaalissa huonetilassa, jossa lämpötila oli n. 20 °C ja suhteellinen kosteus 30 -50 % RH. Kivimateriaaleja, jotka ovat hyvin hygroskooppisia materiaaleja, eli betonikoekappaleita ja punatiiltä, säilytettiin ennen koekuppien valmistusta valvotuissa kosteusolosuhteissa. Näytteet, joissa kupin sisäpuolisena olosuhteena oli 55 % RH tai 75 % RH säilytettiin 55 % RH suhteellisessa kosteudessa ja näytteet joissa sisäpuolisena olosuhteena oli 86 % RH tai 97 % RH säilytettiin 75 % RH suhteellisessa kosteudessa. Menettelytavalla pyrittiin lyhentämään kosteusvirran tasaantumisaikaa. Lämpötila kosteushuoneessa oli n. 23 °C (kts. kuva 3.18).

4.4 Olosuhteet mittauksissa

Koekupin sisälle muodostetaan suolaliuos sekoittaen suolaa ja tislattua (tai ionisoitua) vettä tietyssä suhteessa keskenään. Taulukossa 4.3 on esitetty mittauksissa käytetyt suolat ja niiden aikaansaamat suhteelliset kosteudet eri lämpötiloissa. Suolaliuosta lisättiin sekä vanhassa menetelmässä että uudessa menetelmässä koekupin sisälle siten, että näytteen ja suolaliuoksen pinnan väliin jäi 15 mm ilmakerros. Ilmakerroksen tuli olla riittävän suuri, jotta suolaliuos ei osu näytteeseen punnituksen aikana, ja toisaalta riittävän pieni, jotta ilmakerros ei muodosta merkittävää vesihöyryn siirtymistä vastustavaa kerrosta ja siten vaikuta mittaustuloksiin.

Taulukko 4.3 Tutkimuksessa käytettyjen suolojen muodostamat suhteelliset kosteudet eri lämpötiloissa. (SFS-EN ISO 12571 (2000))

°C	MgCl ₂	Mg(NO ₃) ₂	NaBr	NaCl	KCl	K ₂ SO ₄
0	33,66 ± 0,33	60,35 ± 0,55		75,51 ± 0,34	88,61 ± 0,53	98,77 ± 1,1
5	33,60 ± 0,28	58,86 ± 0,43	63,51 ± 0,72	75,65 ± 0,27	87,67 ± 0,45	98,48 ± 0,91
10	33,47 ± 0,24	57,36 ± 0,33	62,15 ± 0,60	75,67 ± 0,22	86,77 ± 0,39	98,18 ± 0,76
15	33,30 ± 0,21	55,87 ± 0,27	60,68 ± 0,51	75,61 ± 0,18	85,92 ± 0,33	97,89 ± 0,63
20	33,07 ± 0,18	54,38 ± 0,23	59,14 ± 0,44	75,47 ± 0,14	85,11 ± 0,29	97,59 ± 0,53
23	32,90 ± 0,17	53,49 ± 0,22	58,20 ± 0,42	75,36 ± 0,13	84,65 ± 0,27	97,42 ± 0,47
25	32,78 ± 0,16	52,89 ± 0,22	57,57 ± 0,40	75,29 ± 0,12	84,34 ± 0,26	97,30 ± 0,45
30	32,44 ± 0,14	51,40 ± 0,24	56,03 ± 0,38	75,09 ± 0,11	83,62 ± 0,25	97,00 ± 0,40
35	32,05 ± 0,13	49,91 ± 0,29	54,55 ± 0,38	74,87 ± 0,12	82,95 ± 0,25	96,71 ± 0,38
40	31,60 ± 0,13	48,42 ± 0,37	53,17 ± 0,41	74,68 ± 0,13	82,32 ± 0,25	96,41 ± 0,38
45	31,10 ± 0,13	46,93 ± 0,47	51,95 ± 0,47	74,52 ± 0,16	81,74 ± 0,28	96,12 ± 0,40
50	30,54 ± 0,14	45,44 ± 0,60	50,93 ± 0,55	74,43 ± 0,19	81,20 ± 0,31	95,82 ± 0,45
55	29,93 ± 0,16		50,15 ± 0,65	74,41 ± 0,24	80,70 ± 0,35	
60	29,26 ± 0,18		49,66 ± 0,78	74,50 ± 0,30	80,25 ± 0,41	

Magnesiumkloridia (MgCl₂) käytettiin aina kupin ulkopuolisena suolana, jolloin kosteuhuoneessa suhteellinen kosteus oli n. 33 % RH. Kupin sisäpuolella käytettiin kaikilla materiaalilla neljää eri suolaa, jotka tuottivat erisuuruisen suhteellisen kosteuden kupin sisälle. Pääasiassa käytössä oli magnesiumnitraatti (Mg(NO₃)₂), natriumkloridi (NaCl), kaliumkloridi (KCl) ja kaliumsulfaatti (K₂SO₄), jotka tuottivat kupin sisälle 55 % RH, 75 % RH, 86 % RH ja 97 % RH suhteelliset kosteudet. Kokeiden aikana huomattiin, että magnesiumnitraatti on käyttöturvallisuustiedotteessaan luokiteltu hapettavaksi aineeksi. Koska koekuppien puhdistus tapahtuu kuumentamalla koko kuppi (suola mukaan luettuna) 100 °C:een, pidettiin magnesiumnitraatin käyttöä palovaaran vuoksi liian riskialttiina. Magnesiumnitraatin käyttö korvattiin natriumbromidilla (NaBr), joka tuottaa n. 58 % RH suhteellisen kosteuden. Osa materiaaleista on siis mitattu magnesiumnitraatilla (vaneri, rakentajan kovalevy, polyuretaanit, höyrynsulkumuovi ja ekovillan 5 x ilmansulkupaperi) ja osa natriumbromidilla (runkoleijona, betonit, punatiili ja kipsilevy).

Taulukossa 4.4 on esitetty suolan ja veden seossuhde, jolla kylläistä suolaliuosta valmistettiin. Todellisuudessa suolaliuos on kylläistä, kun 100 ml vettä sisältää vähintään taulukossa esitetyn määrän suolaa. Suolaa voi ja tulee olla varmuuden vuoksi hieman enemmän, jotta liuos on varmasti kylläistä. Kylläisen suolaliuoksen tunnistaa siitä, että liuos sisältää kiinteitä suolarakeita.

Taulukko 4.4 Tutkimuksessa käytettyjen suolojen sekoitussuhteet huonelämpötilassa (SFS-EN ISO 12571 (2000))

	g/100 ml
MgCl₂	170
Mg(NO₃)₂	200
NaBr	120
NaCl	40
KCl	35
K₂SO₄	12

Magnesiumnitraatin osalta kesken kokeiden alettiin epäillä, että taulukossa 4.4 esitetty seossuhde ei ollut riittävä. Testimittaukset vahvistivat epäilyn ja todettiin, että 100 ml:ssa vettä pitäisi suolaa olla vähintään 200 g, jotta liuoksen muodostama suhteellinen kosteus oli taulukon 4.3 mukainen. Havaintoa ennen ehdittiin tehdä mittauksia Ekovillan 5x ilmansulkupaperille. Kyseisen materiaalin osalta kokeet uusittiin.

5 LASKENNALLINEN ANALYYSI

Jotta laskentatulokset olisivat mahdollisimman hyvin vertailtavissa keskenään, mittaus- tulosten laskennallisessa analyysissä käytettiin pääasiassa hyväksi samoja mittauspöytä- kirjoja, laskentataulukoita ja laskentatekniikoita, jotka on esitetty lähteessä Mikkilä (2001). Laskenta erosi Mikkilän (2001) laskennasta ainoastaan koekappaleiden naami- oidun reunan ja ilmanpaineen osalta.

5.1 Massavirta

Kuppikokeet perustuvat siihen, että vesihöyrypitoisuusero näytteen sisä- ja ulkopuolen välillä saa aikaan kosteusvirran näytteen läpi. Kosteusvirta aiheuttaa kupin massan pie- nenemisen, kun kyseessä on märkäkuppikoe. Kuivakuppikokeessa kupin massa kasvaa. Kosteusvirta g [$kg/(m^2s)$] saadaan siis määritettyä punnitsemalla koekuppia tasaisin vä- lijain, jolloin kosteusvirta voidaan laskea kaavalla 2.12.

Koekappaleen avoin pinta-ala on näytteen ulko- ja sisäpinnan avoimen pinta-alan kes- kiarvo. Vanhassa koemenetelmässä avoin pinta-ala oli n. $0,009 m^2$ ja uudessa koemene- telmässä $0,0234 m^2$. Koekappaleita punnittiin keskimäärin kolme kertaa viikossa ja kul- lekin punnitukselle määritettiin kosteusvirran tiheys. Materiaalin vesihöyrynläpäisevyys määritettiin ajanjaksolta, jolloin kosteusvirta oli tasainen. Standardin SFS-EN ISO 12572 (2001) mukaan kosteusvirta on tasainen, kun viiden peräkkäisen punnituksen pe- rusteella määritetyt yksittäiset kosteusvirrat eroavat keskiarvosta enintään 5 %. Epäho- mogeenisilla materiaaleilla ero saa olla enintään 10 %. Koekupin massavirta määritettiin tasoittuneen vaiheen 5 peräkkäisen mittauksen keskiarvona.

5.2 Vesihöyrypitoisuusero

Vesihöyrypitoisuusero koekupin ulko- ja sisäpuolen välillä Δv [kg/m^3] määritettiin seu- raalla kaavalla:

$$\Delta v = \frac{RH_s - RH_u}{100} v_{sat} \quad (5.1)$$

missä

- RH_s suhteellinen kosteus koekupin sisällä
- RH_u suhteellinen kosteus koekupin ulkopuolella
- v_{sat} vesihöyryyn kyllästyskosteuspitoisuus [kg/m^3].

Kosteushuoneen lämpötilaa ja suhteellista kosteutta tallennettiin mittausten aikana viiden minuutin välein. Vesihöyrypitoisuuseron laskennassa käytettiin mittausten keskiarvoa. Kupin sisäpuolinen suhteellinen kosteus määritettiin taulukon 4.3 ja kokeen aikana vallinneen keskimääräisen lämpötilan perusteella.

5.3 Regressioanalyysi

Kosteusvirran tiheyden ja vesihöyrypitoisuuseron välille määritettiin regressioanalyysillä matemaattinen yhtälö, joka oli joko lineaarinen, polynomi tai eksponentiaalinen. Näin saatiin selville materiaalin vesihöyrynläpäisevyys suhteellisen kosteuden funktiona.

Regressiomenetelmässä muuttujia x_i (selittävä muuttuja) ja y_i (selitettävä muuttuja) kuvataan yhtälöllä. Lineaarinen yhtälö on muotoa

$$y = b_0 + b_1x \quad (5.2)$$

Eksponentiaalinen yhtälö on muotoa

$$y = Ae^{Bx} \quad (5.3)$$

Polynomi yhtälö on muotoa

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 \quad (5.4)$$

Yhtälöllä määritettyä x_i :n arvoa kuvataan pisteellä (x_i, \hat{y}) . Regressioanalyysissä haetaan pienimmän neliösumman menetelmällä ratkaisua lausekkeelle

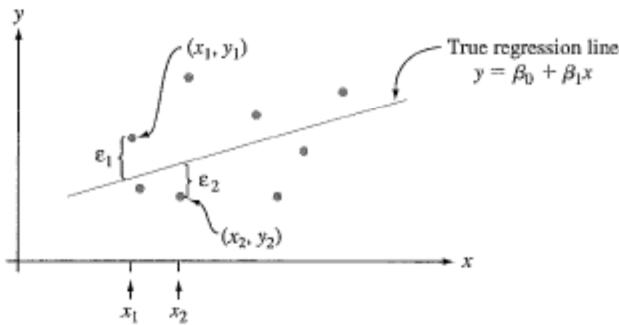
$$\min \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = \min \sum e_i^2 \quad (5.5)$$

Menetelmässä olennaista oli sopivimman sovitekäyrän valinta. Valinta tehtiin pääasias-
sa silmämääräisesti, mutta apuna käytettiin myös jäännöstermin hajontakuvion ja seli-
tyskertoimen tarkastelua.

Jäännöstermillä kuvataan mittausarvon ja regressiomallin estimaatin erotusta. Mitä pie-
nempi jäännöstermi on sitä paremmin malli kuvaa mitattuja arvoja.

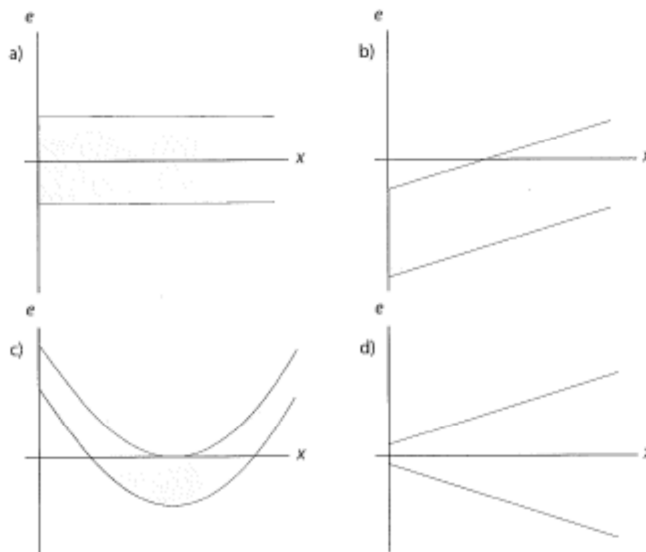
$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (5.6)$$

Kuvassa 5.1 on esitetty jäännöstermin merkitystä.



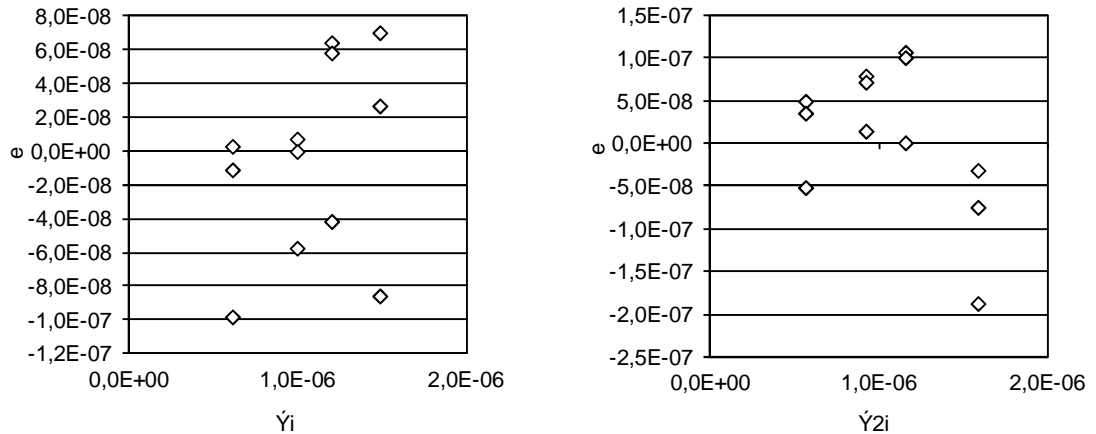
Kuva 5.1 Mittausarvojen ja mallin yhteensopivuus sekä jäännöstermin perusajatus. (Devore 2012)

Jäännöstermeistä voidaan piirtää kuvaaja \hat{y} -arvojen funktiona. Tätä kutsutaan hajontakuvioksi. Jos hajontakuviossa ei ole selkeää johdonmukaisuutta, malli on todennäköisesti käyttökelpoinen. Kuvassa 5.2 on esitetty tyypillisiä jäännöstermin hajontakuvioita. Kuvio a) esittää ideaalista tilannetta, kuvio b) ja c) taas väärin määriteltyjä malleja. Kuvio d) esittää tilannetta, jossa muuttujana on aika ja jäännöstermin hajonta kasvaa ajan kuluessa. (Holopainen & Pulkkinen 2012)



Kuva 5.2 Esimerkkejä erilaisista jäännöstermin hajontafunktioista. (Holopainen & Pulkkinen 2012)

Kuvassa 5.3 on esitetty punatiilen kaksi eri hajontakuvioita. Kuvassa vasemmalla on lineaarisen sovitekäyrän jäännöstermien hajontakuviota. Oikealla on eksponentiaalisen sovitekäyrän jäännöstermien hajontakuviota. Kuvasta nähdään, että eksponentiaalisen mallin hajontakuviota on lineaarisen mallin kuviota johdonmukaisempi. Tässä tapauksessa lineaarinen malli kuvaa mittaustuloksia paremmin.



Kuva 5.3 Punatiilen lineaarisen (vasemmalla) ja eksponentiaalisen (oikealla) sovitekäyrän jäännöstermin hajontakuvio.

Sovitekäyrän hyvyyttä voidaan arvioida myös selityskertoimen R^2 avulla. Selityskerroin ilmaisee, kuinka monta prosenttia muuttujan y arvojen vaihtelusta voidaan selittää muuttujan x avulla. Selityskerroin saa arvoja välillä $-1 \dots 1$. Mitä lähempänä ykköstä selityskertoimen arvo on, sitä paremmin malli kuvaa muuttujia. Selityskerroin voidaan laskea kaavalla

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (5.7)$$

missä

$$SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5.8)$$

$$SST = \sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n}. \quad (5.9)$$

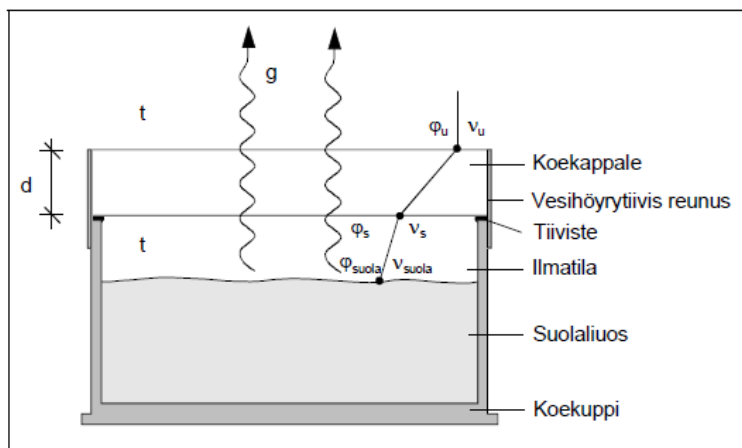
Esimerkiksi punatiilen tapauksessa selityskerroin on lineaarisella käyrällä 0,975 ja eksponentiaalisella käyrällä 0,953, joten lineaarinen käyrä kuvaa mittaustuloksia tässäkin tapauksessa paremmin.

5.4 Korjauskertoimet

Kappaleessa 2.5.2 esitettyjä kuppikokeen virhelähteitä voidaan ottaa laskennallisesti huomioon korjauskertoimien avulla. Seuraavassa on esitetty korjauskertoimien laskentaan liittyvää teoriaa ja havainnollistettu tämän diplomityön mittaustulosten avulla, kuinka suuri vaikutus korjauskertoimilla on tuloksiin.

5.4.1 Näytteen ja suolaliuoksen välisen ilmatilan vastus

Suolaliuos muodostaa kupin sisälle tietyn suhteellisen kosteuden. Tämä suhteellinen kosteus on voimassa aivan lähellä suolaliuoksen pintaa. Kuitenkin myös ilma vastustaa vesihöyryn siirtymistä, joten näytteen alapinnassa vallitseva suhteellinen kosteus poikkeaa suolaliuoksen pinnan suhteellisesta kosteudesta (kuva 5.4). Ilmatilan vesihöyrynvastuksen vaikutus on sitä suurempi, mitä läpäisevämpi mitattava materiaali on ja mitä suurempi on kosteuden massavirta. (Mikkilä 2001)



Kuva 5.4 Periaatekuva kupin ilmatilan vaikutuksesta vesihöyrynläpäisevyysmittauksissa. (Vinha et al. 2005)

Koekupin ilmatilan vaikutus vesihöyrypitoisuuseron Δv voidaan laskea kaavalla:

$$\Delta v = \frac{\frac{d}{\delta_a} g}{461,39 \cdot (273,15 + t)} \quad (5.10)$$

missä

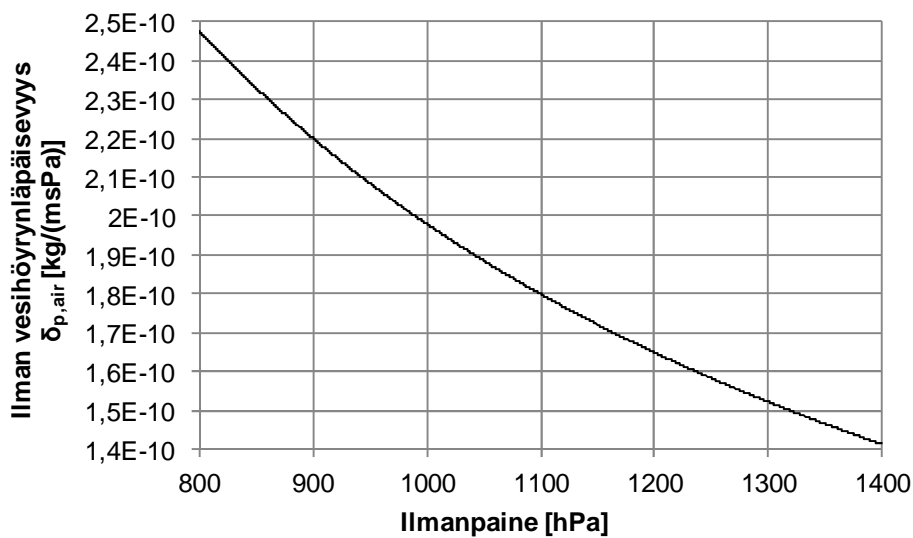
- d koekupin ilmatilan korkeus [m]
- g kosteusvirran tiheys [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
- t kosteushuoneessa vallitseva lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]
- δ_a ilman vesihöyrynläpäisevyys [$\text{kg}/(\text{msPa})$]

Ilman vesihöyrynläpäisevyys riippuu vallitsevasta ilmanpaineesta kuvan 5.5 mukaisesti. Ilman vesihöyrynläpäisevyyden voi laskea ns. Schirmerin kaavalla.

$$\delta_a = \frac{2,306 \cdot 10^{-5} p_0}{R_v \cdot T \cdot p} \left(\frac{T}{273,15} \right)^{1,81} \quad (5.11)$$

missä

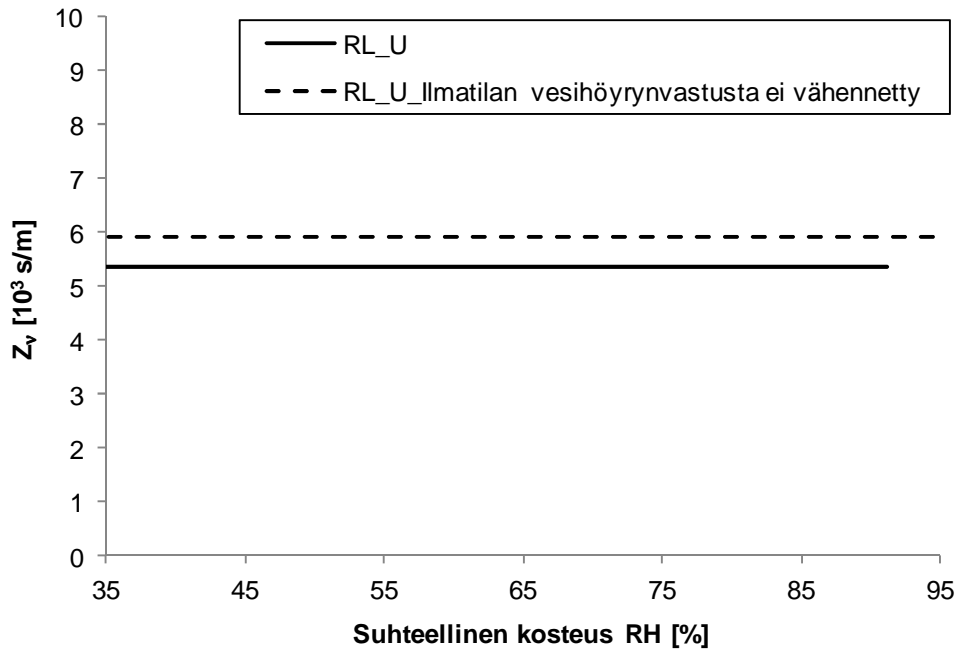
p_0	normaali ilmanpaine [101325 Pa]
R_v	veden kaasuvakio [461,5 J/(Kkg)]
T	lämpötila [K]
p	vallitseva ilmanpaine [Pa]



Kuva 5.5 Ilmanpaineen vaikutus ilman vesihöyrynläpäisevyyteen.

Mikkilän (2001) diplomityössä mitattiin ilmatilan suhteellista kosteutta kuppiin tehdyn reiän kautta ja verrattiin näitä arvoja teoreettisesti laskettuihin arvoihin. Tuloksena huomattiin, että mittaukset korreloivat varsin hyvin teoreettisen mallin kanssa. Ilmatilan vesihöyrynvastuksen huomioon ottaminen laskennallisesti on siis perusteltua.

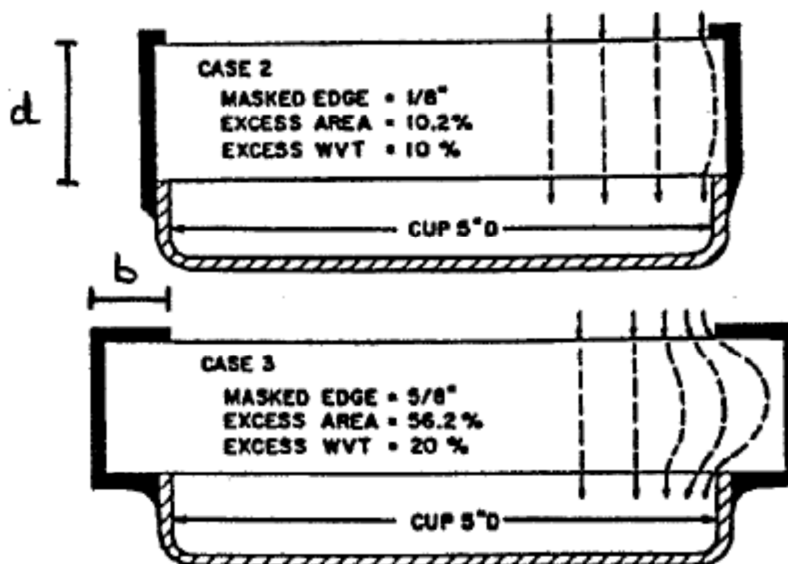
Näytteen ja suolaliuoksen välinen ilmatila vastustaa vesihöyryn siirtymistä sitä enemmän mitä korkeampi ilmatila on ja mitä suurempi kosteusvirran tiheys on. Kuvassa 5.6 on esitetty millainen vaikutus ilmatilan vesihöyrynvastuksen huomiotta jättämisellä olisi runkoleijonan tapauksessa.



Kuva 5.6 Näytteen ja suolaliuoksen välisen ilmatilan vaikutus runkoleijonan mittaustuloksiin. Uuden mittausmenetelmän mukainen koejärjestely.

5.4.2 Koekappaleen naamioitu reuna

Jos koekappi on suunniteltu siten, että koekappaleen avoin pinta-ala on pienempi kuin koekappaleen pinta-ala, ei kosteusvirta koekappaleen läpi ole yksiulotteista. Ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 5.7. Naamioitu reuna kasvattaa kosteusvirran tiheyttä sitä enemmän mitä paksumpi koekappale on ja mitä leveämpi reuna on.



Kuva 5.7 Koekappaleessa on naamioitu reuna, kun koekappaleen avoin pinta-ala on pienempi kuin sen pinta-ala. (Nielsen 1992)

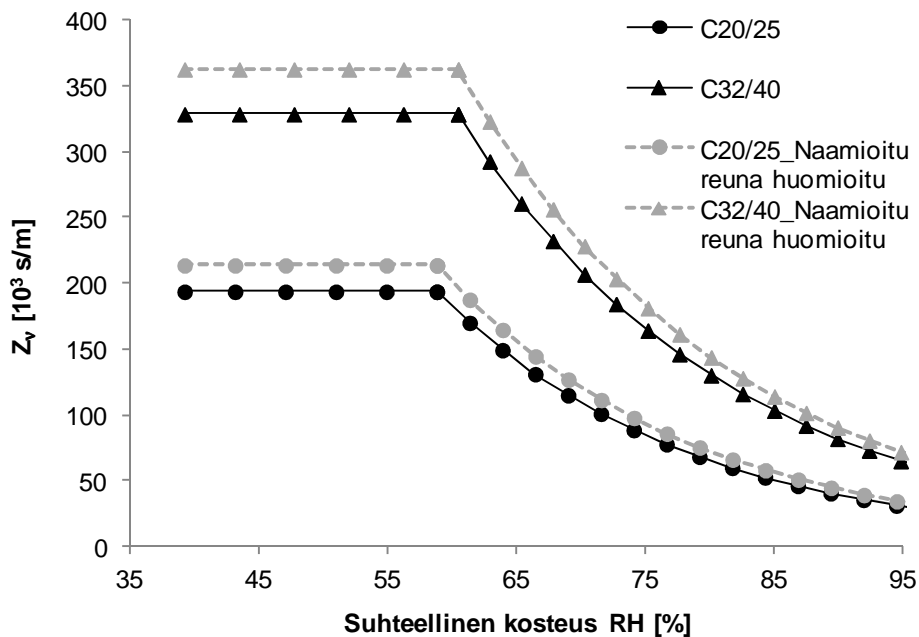
Standardin SFS-EN ISO 12572 (2001) ohjeistaa ottamaan huomioon naamioidun reunan vaikutuksen seuraavalla kaavalla:

$$\frac{g_{me}}{g} = 1 + \frac{4 \cdot d}{\pi \cdot S} \cdot \ln \left(\frac{2}{1 + \exp\left(-2 \cdot \pi \cdot \frac{b}{d}\right)} \right) \quad (5.12)$$

missä

- g_{me} kosteusvirran tiheys, kun naamioidun reunan vaikutus on otettu huomioon [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$]
 g kosteusvirran tiheys kun naamioitu reuna on eliminoitu pois [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$]
 d näytteen paksuus [m]
 b naamioidun reunan leveys [m]
 S hydraulinen halkaisija [m]
 (neljä kertaa näytteen pinta-ala jaettuna näytteen piirillä)

Naamioitu reuna kasvattaa kosteusvirran tiheyttä sitä enemmän mitä paksumpi koekappale on ja mitä leveämpi reuna on. Kuvassa 5.8 on esitetty naamioidun reunan laskennallisen korjauksen vaikutus betonin vesihöyrynvastukseen. Eli kun koekappaleen naamioidun reunan vaikutus on otettu huomioon vesihöyrynvastus kasvaa.



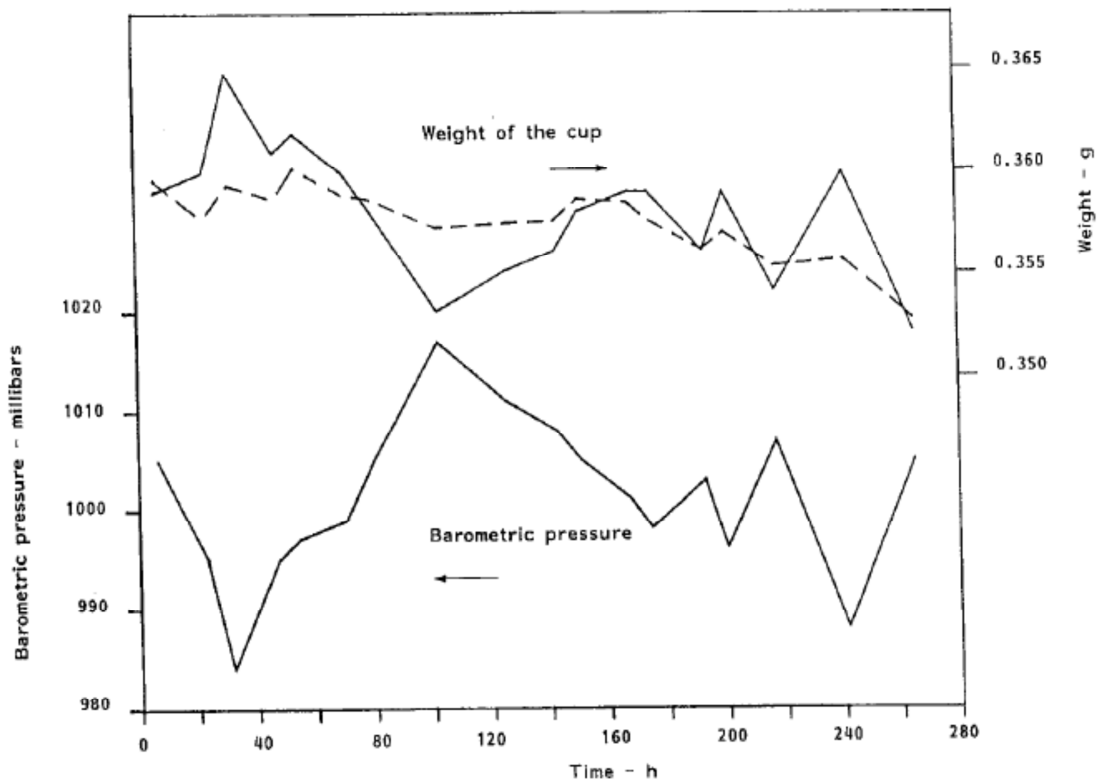
Kuva 5.8 Naamioidun reunan laskennallisen korjauksen vaikutus betonin vesihöyrynvastukseen.

Standardissa SFS-EN ISO 12572 (2001) sanotaan, että naamioidun reunan vaikutus tulee ottaa huomioon, kun materiaalinäytteen reuna ylittää koekupin reunan. Tämä tapahtuu myös vanhan koekupin mukaisessa mittausjärjestelyssä, joten naamioidun reunan vaikutuksen mukaiset korjauskertoimet otettiin huomioon myös vanhan koejärjestelyn mittaustuloksissa.

5.4.3 Ilmanpaineen vaihtelu

Standardissa SFS-EN ISO 12572 (2001) todetaan, että koekappaleilla, joilla on pieni kosteusvirran tiheys (erityisesti ohuilla joustavilla kalvoilla) suuret ilmanpaineen vaihtelut voivat vaikuttaa punnitustuloksiin. Punnitustulosten vaihtelu aiheutuu ilman tiheyden vaihtelun aiheuttamasta noste-vaikutuksesta. Vaikutus tulee ottaa huomioon vähentämällä massanmuutoksesta ”tyhjän” kupin massamuutos, eli kupin, jonka sisällä ei ole suolaliuosta. Toinen vaihtoehto on valita mittaustulokset päiviltä, jolloin vallitsee samansuuruinen ilmanpaine.

Lähteessä Hansen (1990) kuvataan ilmanpaineen vaikutusta kuvan 5.9 mukaisella kuvaajalla. Kuvasta nähdään, että ilmanpaineen kasvaessa kupin punnitusarvot pienenevät.



Kuva 5.9 Ilmanpaineen heilahtelun vaikutus kupin massa. Kun ilmanpaine kasvaa, kupin massa pienenee, eli kosteusvirta kupin sisältä ulos kasvaa. (Hansen 1990)

Standardissa SFS-EN 1931 (2000) todetaan, että nosteen vaikutus (buoyancy-effect) tulee ottaa huomioon, kun kosteusvirran tiheys on $< 5,7870 \cdot 10^{-9} \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$. Standardin mukaan paras tapa ottaa asia huomioon, on punnita kappaleet, kun ilmanpaine on sama ($\pm 5 \text{ hPa}$). Mukhopadhyaya (2007) totesi, että ilmanpaineen vaihtelu tulee ottaa huomioon, kun massanmuutos on 0-100 mg.

Nielsen (1992) esitti korjaustavan ilmanpaineen vaihtelulle:

$$\Delta m_{\text{bar}} = V_c \Delta \rho_{\text{air}} \quad (5.13)$$

missä

- Δm_{bar} punnitustuloksen korjaus
 V_c kupin tilavuus
 $\Delta \rho_{\text{air}}$ ilman tiheyden vaihtelu [kg/m^3]

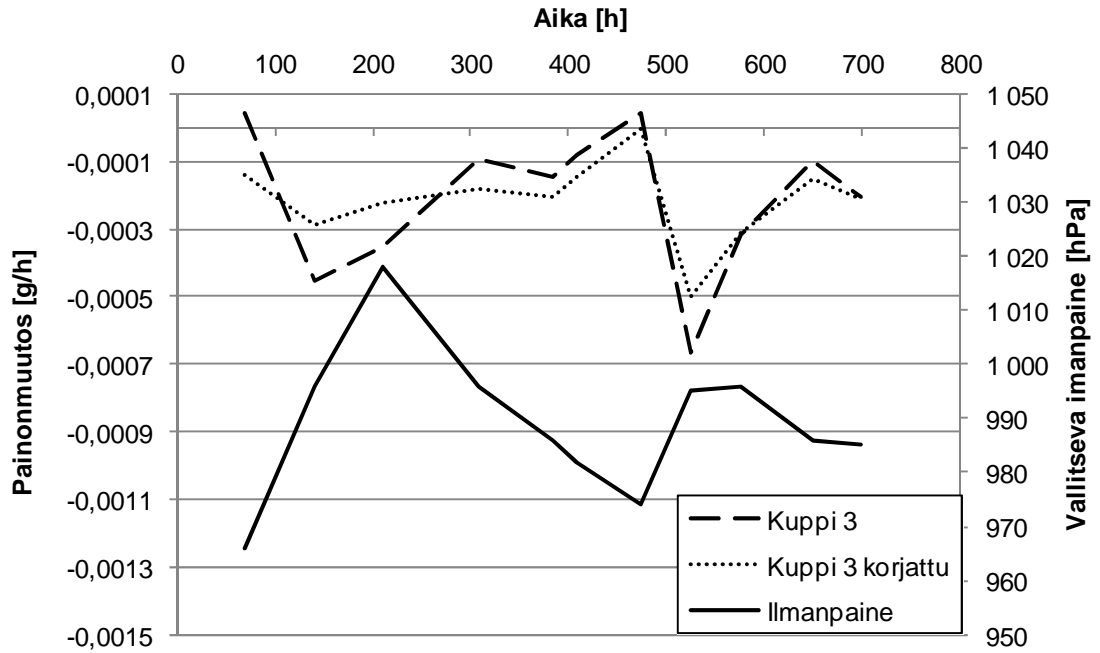
Kostean ilman tiheys voidaan laskea kaavalla

$$\rho_{\text{air}} = \frac{p_a M_a + p_v M_w}{RT} \quad (5.14)$$

missä

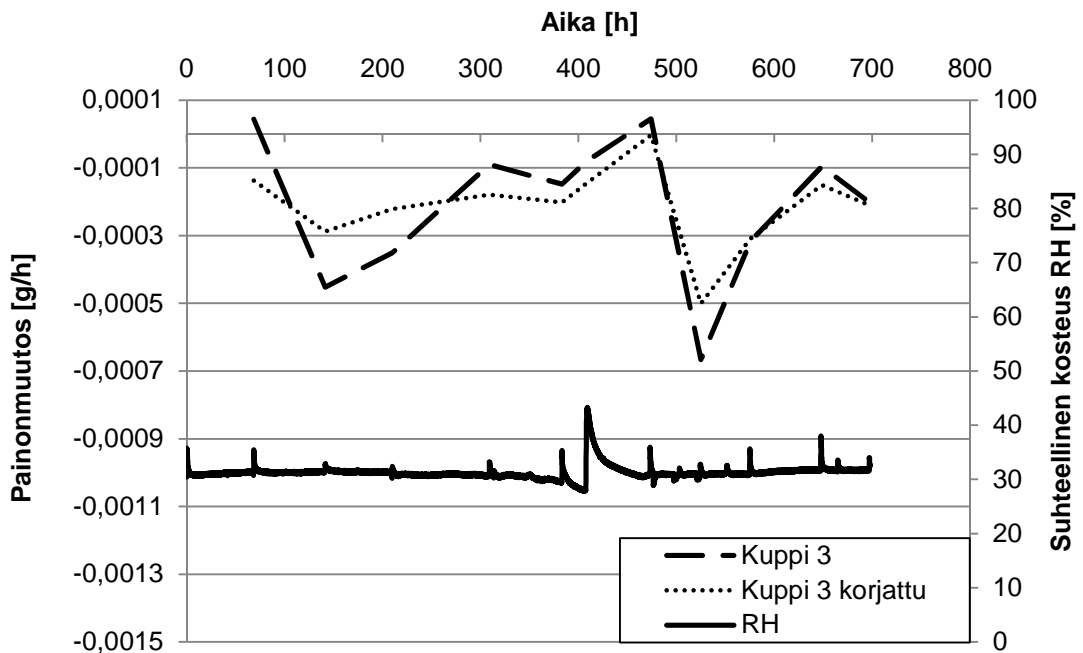
- p_a kuivan ilman osapaine [Pa]
 M_a ilman molekyylipaino, [28,96 kg/kmol]
 p_v vesihöyryn osapaine [Pa]
 M_w veden molekyylipaino, [18,02 kg/kmol]
 R yleinen kaasuvakio, [8314,3 J/(kmolK)]
 T lämpötila [K]

Tässä diplomityössä tutkituista materiaaleista ainoastaan höyrynsulkumuoville tulee tehdä ilmanpaineen vaihtelusta johtuvat korjaukset, sillä kosteusvirran tiheys on $<5,7870 \cdot 10^{-9} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ja kupin massanmuutos punnitusten välillä on $<100 \text{ mg}$. Kuvassa 5.10 on esitetty ilmanpaineen heilahtelun vaikutusta massavirtaan höyrynsulkumuovin tapauksessa. Kuvasta nähdään, että vaikutus on sama kuin lähteessä Hansen (1990). Samassa kuvassa 5.10 on esitetty myös kaavalla 5.13 korjauksen vaikutus höyrynsulkumuovin mittaustulokseen, kun kupin tilavuus on 340 cm^3 ja lämpötila $23 \text{ }^\circ\text{C}$. Esimerkkikappaleena on käytetty kosteusparin 75 % RH / 33 % RH koekuppia 3.



Kuva 5.10 Ilmanpaineen vaihtelun vaikutus höyrynsulkumuovin koekupin painonmuutokseen ja korjauksen vaikutus tuloksiin. Kuvassa on esitetty höyrynsulkumuovin mittaustulokset kosteusparissa 75 %/33 %.

Kuvasta 5.10 nähdään, että kaavan 5.13 mukaisilla korjauksilla saadaan tasoitettua ilmanpaineen heilahtelun vaikutusta koekupin massanmuutokseen. Ajanhetkellä 350 – 450 h tapahtuva painonmuutoksen heilahtelu johtuu todennäköisesti kosteushuoneen suhteellisen kosteuden heilahtelusta (kuva 5.11).



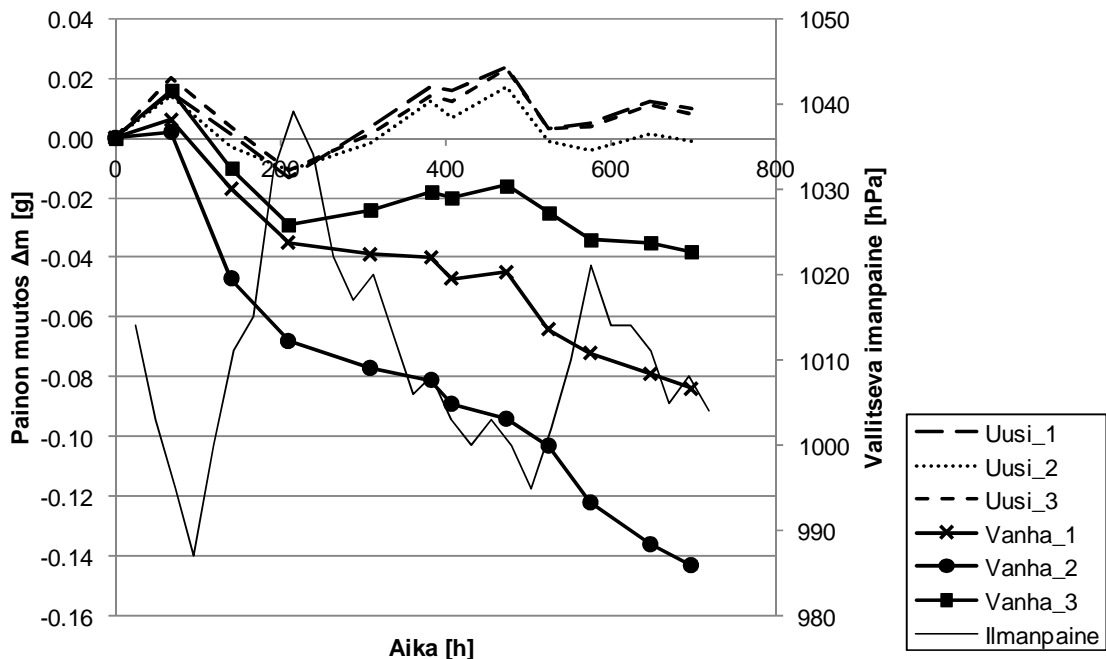
Kuva 5.11 Punnitustulosten heilahtelu ajanhetkellä 350-450 h aiheutuu kosteushuoneen suhteellisen kosteuden vaihtelusta.

Ilmanpaineen vaihtelu voi vaikuttaa myös vesihöyryn diffuusiovastuskertoimen laskentaan. Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin μ [-] kuvaa materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden suhdetta ilman vesihöyrynläpäisevyyteen, joten kaavan 2.9 mukaisesti myös ilmanpaineella on vaikutusta tulokseen. μ -arvojen laskennassa käytettiin mittausten aikana vallinnutta keskimääräistä ilmanpainetta.

5.4.4 Reunahäviö

Koemateriaalin epäonnistuneesta tiivistyksestä johtuen voi materiaalin ja kupin välillä tapahtua reunahäviöitä. Tällöin kosteusvirta etenee epätiiviyiskohtien kautta eikä itse materiaalin läpi. Vanhan ja uuden kuppikoemenetelmän reunahäviöiden suuruutta tutkittiin ns. sokeiden kuppien avulla. Sokeissa kupeissa kuppiin tiivistetään alumiinipelti tai muu yhtä vesihöyrytiivis materiaali. Tällöin voidaan olettaa, että kupissa tapahtuva massahäviö johtuu reunahäviöistä.

Kuvassa 5.12 on esitetty uudelle ja vanhalle kuppityypille tehtyjen sokeiden kuppien massanmuutos. Kuvasta nähdään, että vaikka molemmissa kuppityypeissä kuppiin on tiivistetty vesihöyrytiivis materiaali, tapahtuu kupeissa massanmuutosta. Vanhan kupin osalta massanmuutos on huomattavasti suurempaa. Vanhalla kuppityypillä kupin massa on pienentynyt kuukaudessa 40-140 mg, kun taas uudella kuppityypillä massa on lähes tulkoon samassa tasossa kuin kokeen alussa. Uuden kupin massan heilahtelu voidaan selittää ilmanpaineen vaihtelulla, kuten kuvassa 5.12 esitetystä ilmanpainekäyrästä voidaan havaita. Tämän kuvaajan perusteella voidaan todeta, että vanhalla kupilla on reunahäviö suurempaa kuin uudella kupilla.



Kuva 5.12 Uudella ja vanhalla kuppityypillä tehtyjen sokeiden kuppien massanmuutos sekä ilmanpaineen vaihtelu.

Koska diplomityön tarkoituksena oli vertailla vanhan ja uuden menetelmän mukaisilla mittausjärjestelyillä saatuja tuloksia toisiinsa, ei mittaustuloksissa ole otettu huomioon reunahäviön vaikutusta kummankaan mittausjärjestelyn osalta. Periaatteessa reunahäviö voidaan ottaa huomioon vähentämällä kosteusvirran tiheydestä sokealle kupille määritetty kosteusvirran tiheys:

$$g_{\text{korjattu}} = g - g_{\text{sk}} \quad (5.15)$$

missä

- g_{korjattu} kosteusvirran tiheys, josta on vähennetty reunan epätiiviskohtien kautta kulkeutuva kosteusvirta [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
- g punnitustulosten perusteella laskettu kosteusvirran tiheys [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
- g_{sk} reunan epätiiviskohtien kautta kulkeutuva kosteusvirta [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

Kuvassa 5.11 esitettyjen tulosten perusteella vaikuttaa kuitenkin siltä, että uudessa mittausmenetelmässä reunavuotojen kautta kulkeutuva kosteusvirta on niin pientä, ettei sitä tarvitse ottaa huomioon.

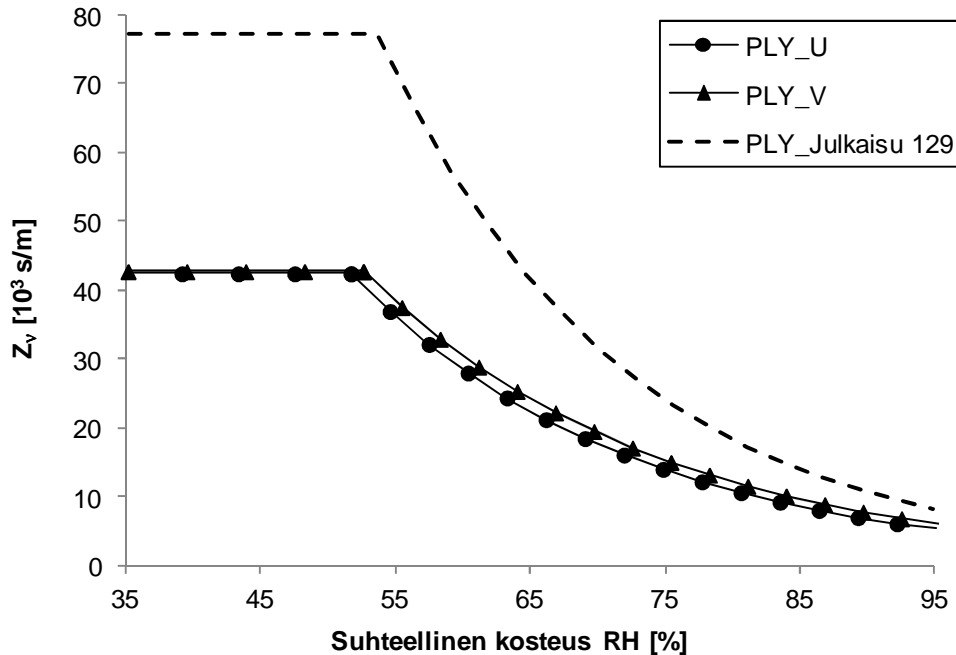
6 TULOKSET JA TULOSTEN ANALYSOINTI

Seuraavassa on esitetty tutkimuksessa mitattujen materiaalien vesihöyrynläpäisevyysmittausten tulokset ja verrattu niitä julkaisussa Vinha et al. (2005) esitettyihin tuloksiin tai muihin kirjallisuusarvoihin. Uuden mittausmenetelmän mukaiset lopulliset tulokset on lisäksi esitetty liitteessä 3.

Kaikkien materiaalien tuloksissa on otettu huomioon kappaleessa 5 esitetyt korjauskeruimet koekappaleen ja suolaliuoksen väliselle ilmatilalle sekä koekappaleen naamioidun reunan vaikutukselle. Ilmanpaineen vaihtelusta johtuva nostevaikutus on otettu huomioon höyrynsulkumuovin tapauksessa. Reunavuotoa ei ole otettu laskennallisesti huomioon, koska tarkoituksena oli vertailla eri kuppityyppien tiivistystekniikan vaikutusta tuloksiin.

6.1 Vaneri

Kuvassa 6.1 on esitetty havuvanerille ($d = 9$ mm) mitatut vesihöyrynvastusarvot suhteellisen kosteuden funktiona sekä uudella että vanhalla tekniikalla mitattuna. Kuvasta nähdään, että kahdella eri menetelmällä mitattujen tulosten välinen ero on hyvin pieni.

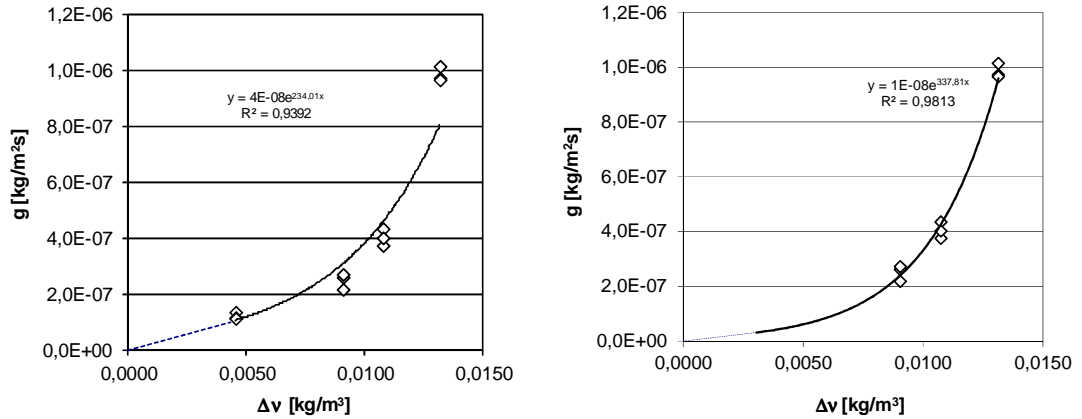


Kuva 6.1 Vanerin vesihöyrynvastus suhteellisen kosteuden funktiona. Mittaukset on tehty sekä uudella että vanhalla tekniikalla. Kuvassa on esitetty lisäksi lähteessä Vinha et al. (2005) mitatut vanerin vesihöyrynvastusarvot (julkaisu 129).

Vanerille mitattu vesihöyrynvastus ($Z_v=42400$ s/m) eroaa kuitenkin lähteessä Vinha et al. (2005) mitatusta vesihöyrynvastuksen arvosta ($Z_v=77200$ s/m). Aiemmin on saatu kaksinkertaisia arvoja tämän työn tuloksiin verrattuna. Tuloksiin on tosin voinut vaikuttaa vanerin laatu. Vanerin vesihöyrynläpäisevyyteen vaikuttaa oleellisesti kerrosten välinen liimaus, joka saattaa vaihdella tuotantoerästä riippuen.

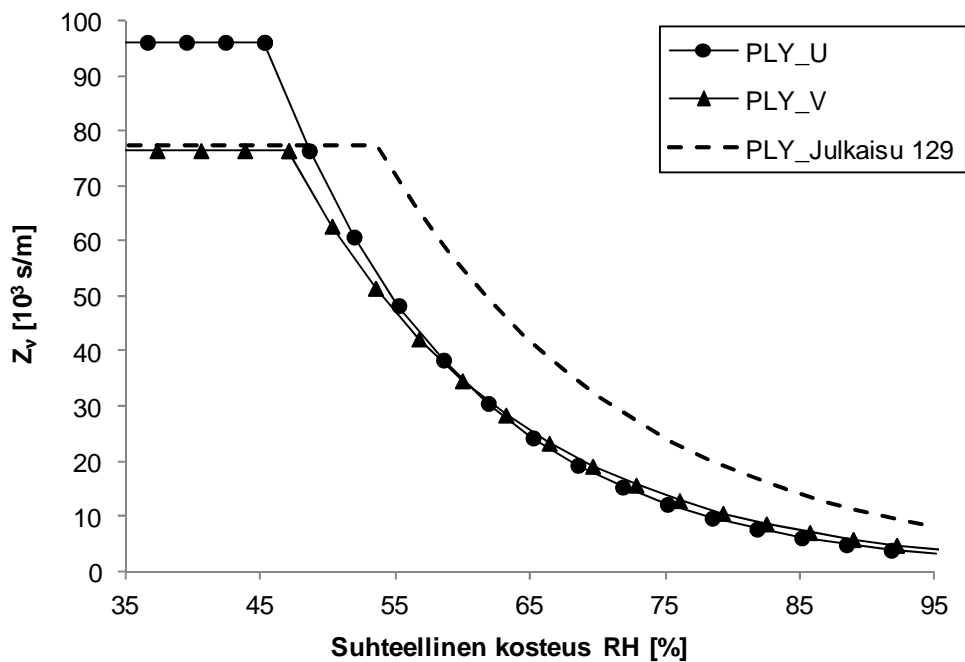
Standardissa SFS-EN ISO 10456 (2008) annetaan kuivalle vanerille vesihöyryn diffuusiovastuskertoimelle vaihteluväli $\mu=150\dots250$ [-], joka vastaa 9 mm paksuisella vanerillavesihöyrynvastusarvoja $Z_v=47100\dots78500$ [s/m]. Diplomityössä mitatut tulokset ovat siten hieman standardissa ilmoitettuja arvoja matalampia.

Tulosten perusteella vaikutti siltä, että kosteusparin 33 % RH- 55 % RH mittaustulokset poikkesivat muista tuloksista, eivätkä osuneet kovin hyvin sovitekäyrälle. Tämän vuoksi testattiin, miten tuloksiin vaikuttaa, jos kyseisen kosteusparin mittaustulokset jätetään pois. Kuvassa 6.2 on esitetty sekä neljän että kolmen mittauspisteen sovitekäyrän muodostaminen.



Kuva 6.2 Vanerin eksponentiaalisen sovitekäyrän muodostaminen neljällä mittauspisteellä (vasen) ja kolmella mittauspisteellä (oikea).

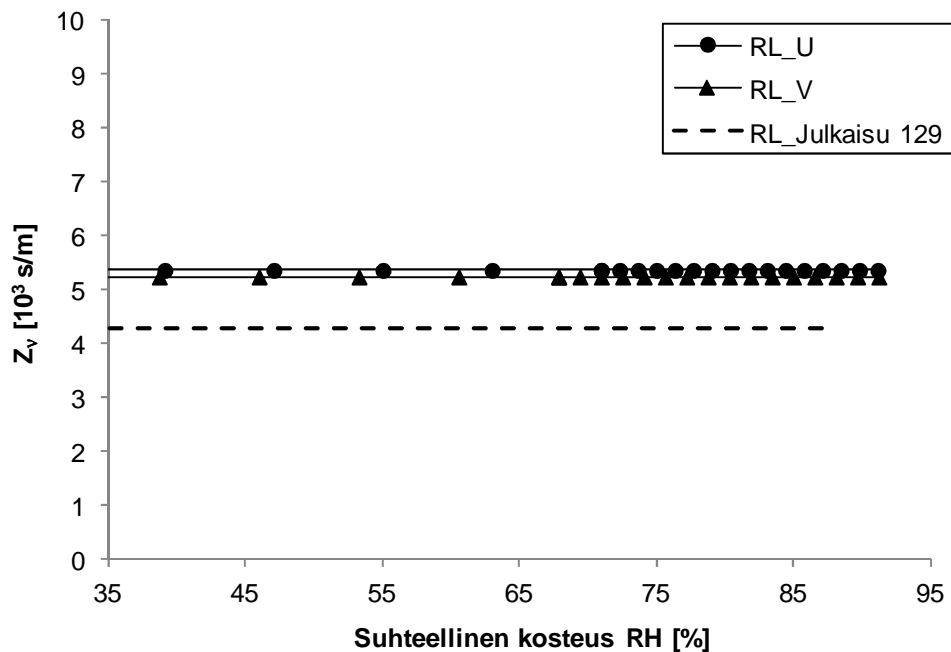
Kuvassa 6.3 on esitetty, miltä vanerin vesihöyrynvastus suhteellisen kosteuden funktiona näyttää, kun käytetään ainoastaan kolmen mittauspisteen tuloksia. Kuvasta nähdään, että tulokset muuttuvat radikaalisti, ja arvot ovat lähempänä lähteessä Vinha et al. (2005) mitattuja arvoja. Koska ei kuitenkaan ollut riittäviä perusteita 55 % RH:n mittauspisteen poistamiselle on liitteen 3 lopullisissa tuloksissa esitetty tulokset, jotka on laskettu neljällä mittauspisteellä. Kyseinen tapaus kuitenkin osoittaa, että jotta tulosten luotettavuuden parantaminen edellyttäisi kosteusparien määrän lisäämistä.



Kuva 6.3 Vanerin vesihöyrynvastus suhteellisen kosteuden funktiona kolmella kosteusparilla mitattuna (33 % RH - 75 % RH / 86 % RH / 97% RH)

6.2 Runkoleijona

Kuvassa 6.4 on esitetty runkoleijonalle ($d=24,2$ mm) mitatut vesihöyrynvastukset suhteellisen kosteuden funktiona sekä uudella että vanhalla menetelmällä mitattuna. Kuvasta nähdään, että kahdella eri menetelmällä mitattujen tulosten välinen ero on hyvin pieni (Z_v -arvojen välinen ero 120 s/m, eli 2%). Tulokset ovat hieman suurempia kuin lähteessä Vinha et.al (2005) mitatut runkoleijonan vesihöyrynvastukset. Osasyynä eroon voi olla tämän diplomityön laskennassa huomioon otettu naamioitu reuna. Materiaaliarvot voivat myös vaihdella paljon eri materiaalierien välillä, minkä vuoksi lähteessä Vinha et. al (2005) ja tässä diplomityössä mitatut materiaaliarvot eivät ole täysin vertailukelpoisia.

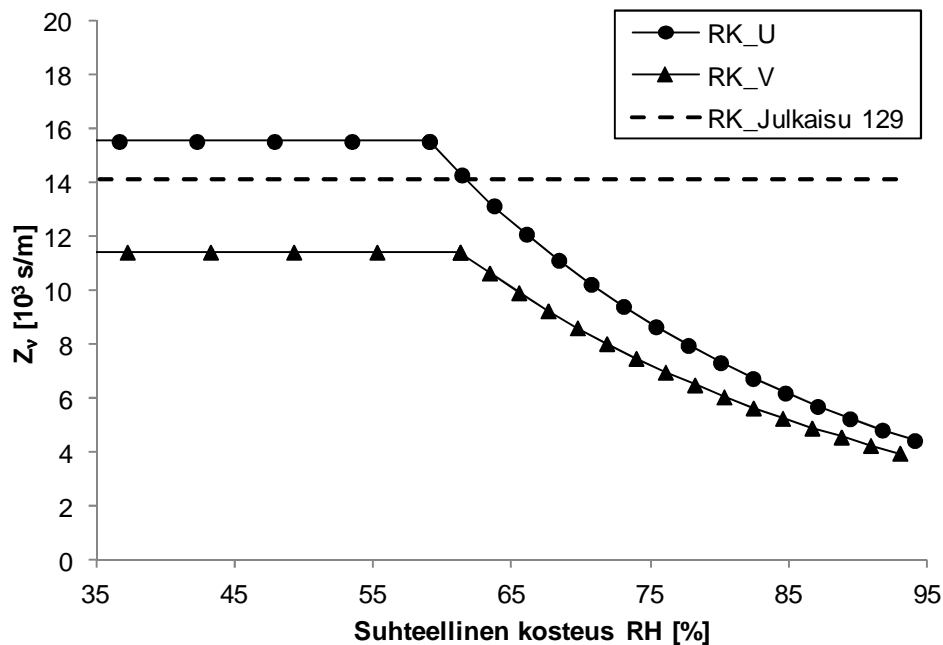


Kuva 6.4 Runkoleijonan vesihöyrynvastus suhteellisen kosteuden funktiona. Mittaukset on tehty sekä uudella että vanhalla tekniikalla. Kuvassa on esitetty lähteessä Vinha et.al (2005) mitatut runkoleijonan vesihöyrynvastusarvot (Julkaisu 129).

Valmistaja on ilmoittanut 25 mm paksun tuotteen vesihöyrynläpäisykertoimelle W_p arvon 2×10^{-9} kg/(m²sPa) (Suomen kuitulevy Oy - Runkoleijona [WWW]), joka on vesihöyrynvastusarvoksi (Z_v) muutettuna 3700 s/m. Diplomityössä mitatut vesihöyrynvastukset ovat siis hieman valmistajan ilmoittamaa arvoa suurempia.

6.3 Rakentajan kovalevy

Kuvassa 6.5 on esitetty rakentajan kovalevylle ($d=3$ mm) mitatut vesihöyrynvastusarvot suhteellisen kosteuden funktiona sekä uudella että vanhalla tekniikalla mitattuna. Kuvassa on esitetty myös lähteessä Vinha et. al (2005) mitatut rakentajan kovalevyn vesihöyrynvastusarvot. Lähteessä Vinha et. al. (2005) rakentajan kovalevylle on määritetty lineaarinen vesihöyrynläpäisevyys. Tämän diplomityön mittaustulokset viittaavat kuitenkin siihen, että materiaalin vesihöyrynläpäisevyys kasvaa suhteellisen kosteuden funktiona. Vanhan mittausjärjestelmän mukaiset mittaukset antoivat materiaalin vesihöyrynläpäisevyydeksi hieman alhaisempia arvoja verrattuna uuteen menetelmään.

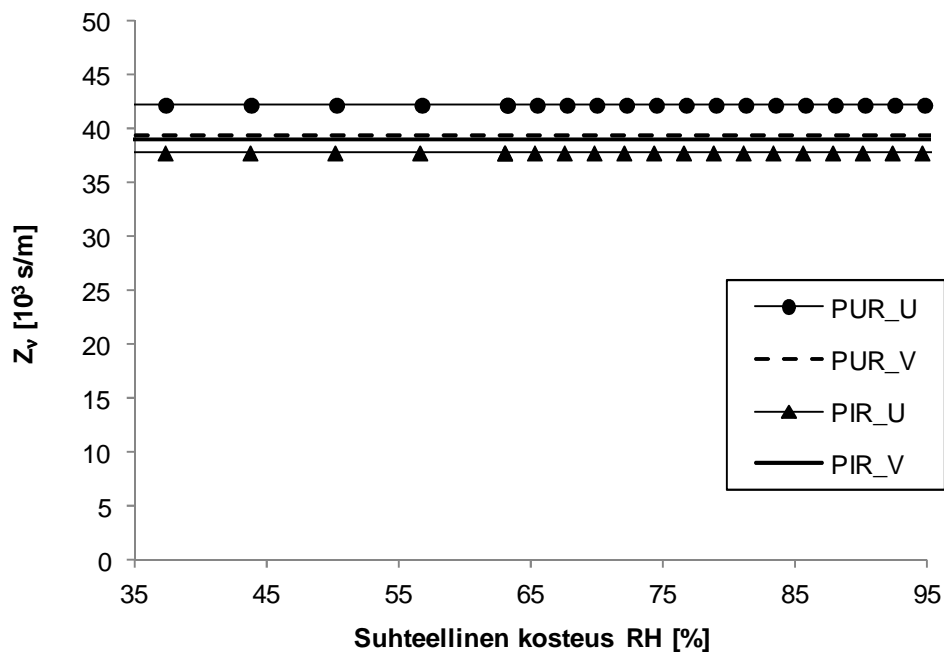


Kuva 6.5 Rakentajan kovalevyn vesihöyrynvastus suhteellisen kosteuden funktiona. Mittaukset on tehty sekä uudella että vanhalla tekniikalla. Kuvassa on esitetty lisäksi lähteessä Vinha et.al (2005) mitatut rakentajan kovalevyn vesihöyrynvastusarvot (julkaisu 129).

Valmistaja on ilmoittanut rakentajan kovalevyn vesihöyrynvastukselle vaihteluvälin $1,2 - 2,8 \times 10^9$ $\text{m}^2\text{sPa/kg}$ (Suomen kuitulevy Oy – Rakentajan kovalevy [WWW]), joka vastaa vesihöyrynvastusarvoja 8800 - 20500 s/m. Tässä tutkimuksessa määritetyt kovalevyn vesihöyrynvastukset ovat näiden arvojen alapuolella, kun suhteellinen kosteus on suurempi kuin 75 % RH.

6.4 Polyuretaani

Kuvassa 6.6 on esitetty polyuretaanille (PIR- ja PUR-tyyppi, $d=20,7$ mm) mitatut vesihöyrynvastusarvot suhteellisen kosteuden funktiona sekä uudella että vanhalla tekniikalla mitattuna. Kuvasta nähdään, että kahdella eri menetelmällä mitattujen tulosten välinen ero on PUR-tyyppisellä eristeellä 2800 s/m (7 %), siten että uudella tekniikalla mitattu tulos on suurempi. PIR-tyyppisellä eristeellä menetelmien välinen ero on 2000 s/m (3 %), mutta tässä tapauksessa vanha menetelmä antaa suuremman arvon. Kaiken kaikkiaan menetelmien ja eristetyypin välillä oli vain vähän eroa.

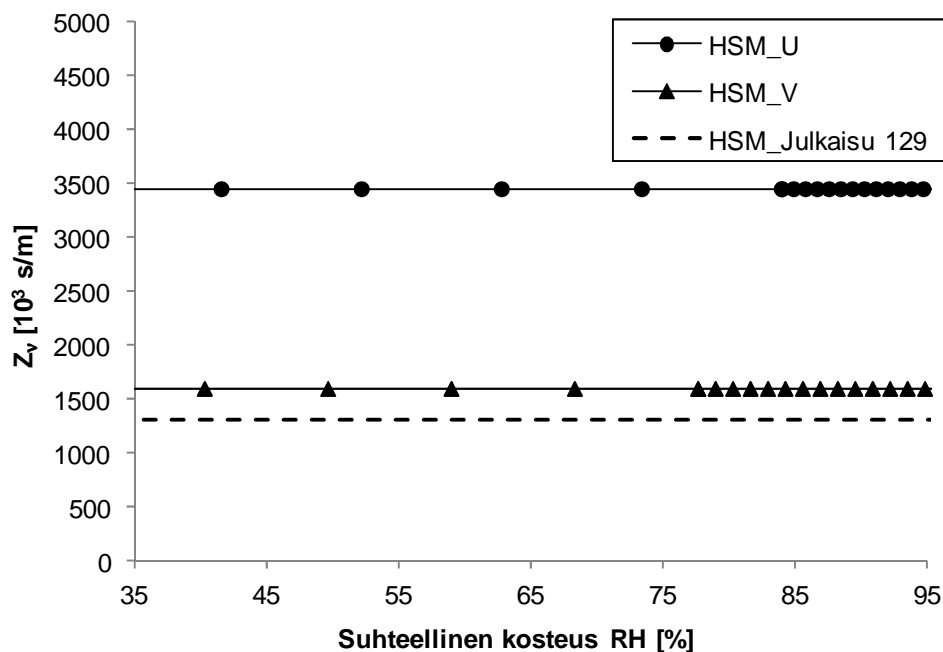


Kuva 6.6 Polyuretaanin vesihöyrynvastus suhteellisen kosteuden funktiona. Mittaukset on tehty sekä PIR- että PUR-tyyppiselle polyuretaanille ja uudella sekä vanhalla tekniikalla.

Mineraalikulitupäällysteisten polyuretaanin vesihöyryn diffuusiiovastuskertoimelle μ on ilmoitettu kirjallisuudessa vaihteluväli 40-200 [-], mikä vastaa 20 mm paksuisen polyuretaanilevyn vesihöyrynvastusarvoa 30000-147000 s/m (PU-Nordic [WWW]). Diplomityössä mitatut arvot sijoittuvat siis tämän vaihteluvälin alapäähän.

6.5 Höyrinsulkumuovi

Kuvassa 6.7 on esitetty höyrinsulkumuoville ($d=0,2$ mm) mitatut vesihöyrinvastusarvot suhteellisen kosteuden funktiona sekä uudella että vanhalla tekniikalla mitattuna. Kuvasta nähdään, että kahdella eri menetelmällä mitattujen tulosten välinen ero on hyvin suuri. Vanhalla tekniikalla mitatut arvot ovat lähellä lähteessä Vinha et al. (2005) esitettyjä arvoja.

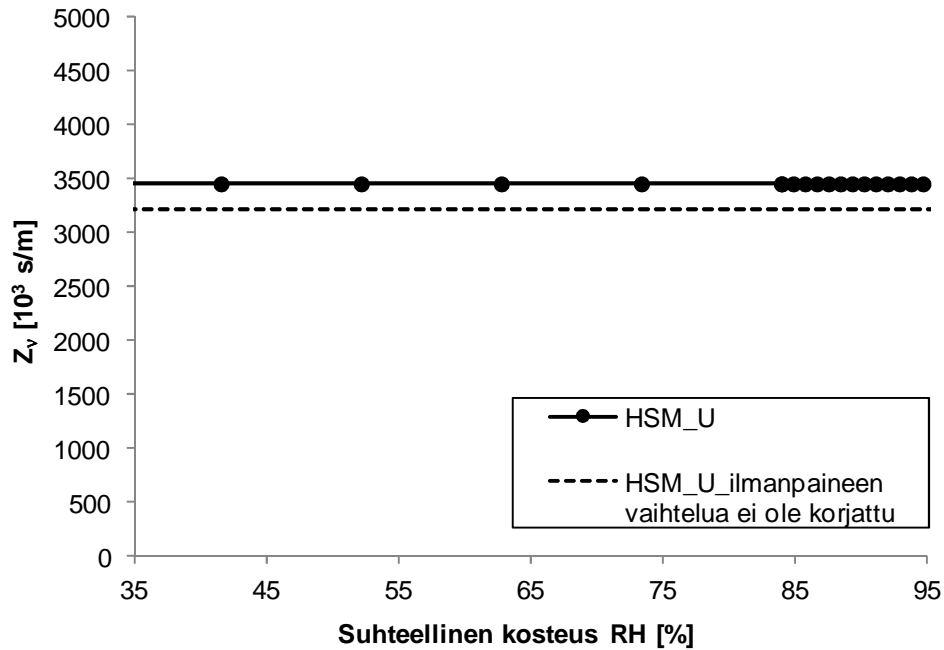


Kuva 6.7 Höyrinsulkumuovin vesihöyrinvastus suhteellisen kosteuden funktiona. Mittaukset on tehty sekä uudella että vanhalla tekniikalla. Kuvassa on esitetty lisäksi lähteessä Vinha et al. (2005) mitatut höyrinsulkumuovin vesihöyrinvastusarvot (julkaisu 129).

Höyrinsulkumuovin materiaalivalmistaja on ilmoittanut materiaalin vesihöyrinvastukseksi arvon $> 3000 \cdot 10^6$ s/m (Rani 2008). Diplomityössä mitattu arvo ($3450 \cdot 10^6$ s/m) on siis hyvin linjassa materiaalivalmistajan ilmoittaman arvon kanssa. Uuden mittausmenetelmän mukaan saatua tulosta voidaan pitää siis uskottavana.

Vanhan ja uuden mittausmenetelmän tulosten erot viittaavat siihen, että vanhassa mittausmenetelmässä tapahtuu tulosta vääristävää reunavuotoa. Päätelmää vahvistavat mittauksen aikana tehdyt havainnot. Mittausten edetessä koemateriaalin ja koekupin väliin muodostui pieniä rakoja. On kuitenkin huomattava, että höyrinsulkumuovin osalta käytettiin erilaista tiivistystapaa muihin materiaaleihin verrattuna, joten tuloksista ei voida tehdä yleisiä päätelmiä koemenetelmän tiivistystekniikan riittävydestä.

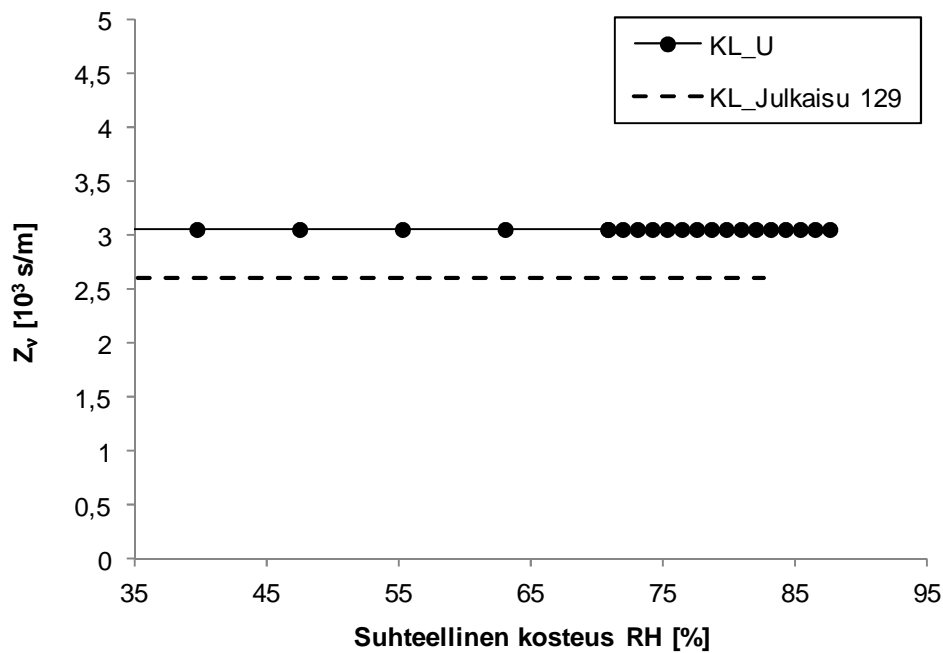
Mittaushavaintojen perusteella voidaan todeta, että vaikka uuden menetelmän mukaiset mittaustulokset ovat uskottavia, tulee höyrinsulkumuovin tapauksessa mittaustekniikkaa vielä kehittää. Näinkin tiiviillä materiaalilla kosteusvirta kupin sisältä ulos on vesihöyrpitoisuuserosta riippumatta hyvin pieniä. Jotta saadaan mitattua tasaista kosteusvirtaa, tulee punnitusväli olla riittävän pitkä (n. 1 viikko). Lisäksi vaa'an tulee olla tarkka. Standardissa SFS EN 1931 (2000) on määritetty vaa'an mittaustarkkuudeksi 0,1 mg. Ilmanpaineen vaihtelun vaikutus tulee myös ottaa tuloksissa huomioon. Kuvassa 6.8 on esitetty ilmanpaine- ja korjausten vaikutus tuloksiin.



Kuva 6.8 Ilmanpaineen vaihtelun korjausten vaikutus höyrinsulkumuovin uuden mittausmenetelmän mukaisiin tuloksiin.

6.6 Kipsilevy

Kuvassa 6.9 on esitetty kipsilevyllä ($d=9,7$ mm) mitatut vesihöyrynvastusarvot suhteellisen kosteuden funktiona uudella tekniikalla mitattuna. Kipsilevyllä mittaukset tehtiin vain uudella tekniikalla, koska tallessa oli vielä lähteessä Vinha et al. (2005) käytetyt materiaalinäytteet, joten testin toistaminen vanhalla tekniikalla ei ollut tarpeellista. Kuvasta nähdään, että uudella tekniikalla tehdyt mittaukset eroavat lähteessä Vinha et al. (2005) esitetyistä arvoista 500 s/m (17 %).



Kuva 6.9 Kipsilevyn vesihöyrynvastus suhteellisen kosteuden funktiona. Mittaukset on tehty vain uudella tekniikalla. Kuvassa on esitetty lisäksi lähteessä Vinha et al. (2005) mitatut kipsilevyn vesihöyrynvastusarvot (julkaisu 129).

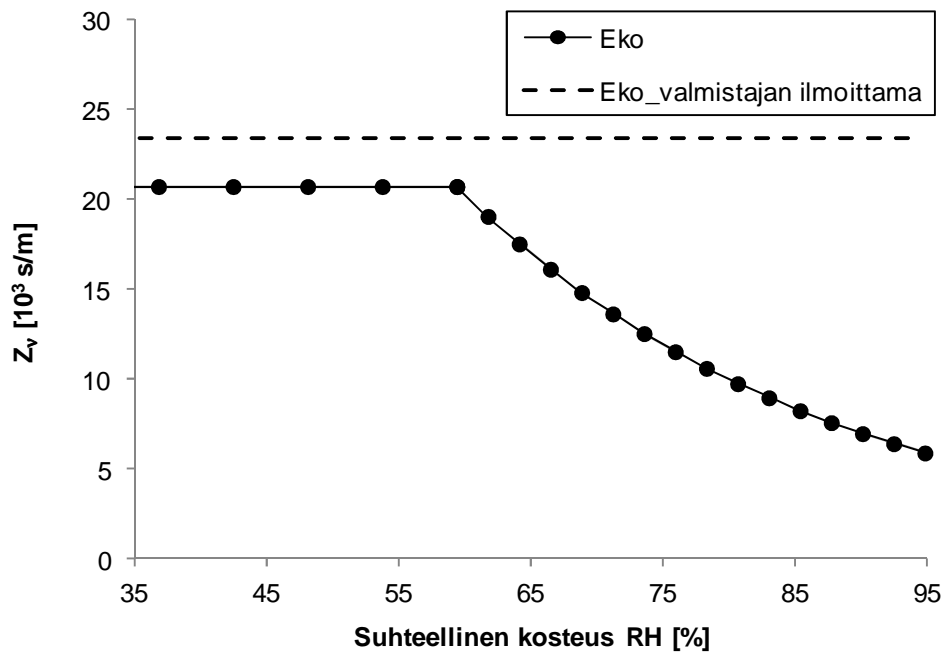
Standardissa SFS-EN 12524 (2000) on annettu kipsilevyn vesihöyryn diffuusiovastuskertoimelle μ arvo 10 [-], mikä vastaa 9 mm paksulla kipsilevyllä vesihöyrynvastusarvoa 3300 s/m. Diplomityössä mitattu arvo on lähellä tätä arvoa.

Standardissa SFS-EN ISO 12572 (2001) on todettu, että menetelmä ei sovellu tuotteille, joiden suhteellinen diffuusiovastus s_d on pienempi kuin $0,1$ m. Kipsilevyn suhteelliseksi diffuusiovastuskertoimeksi saatiin $0,08$ m, joten tämän mukaan n. 9 mm kipsilevyä ei pystyisi mittaamaan standardin SFS-EN ISO 12572 (2001) mukaan riittävän luotettavasti.

6.7 Ekovilla 5x ilmansulkupaperi

Ekovillan ilmansulkupaperin mittauksissa kosteusparin 33 % / 55 % tulokset eivät olleet linjassa muiden tulosten kanssa, sillä mitattu vesihöyrynvastus kyseisessä kosteusparissa oli pienempi kuin muilla kosteusparilla. Koska vesihöyrynvastus ei voi kasvaa suhteellisen kosteuden kasvaessa, tuloksia ei voida pitää luotettavana. Mittaukset kyseisessä kosteusparissa uusittiin kaksi kertaa, mutta tulokset eivät muuttuneet radikaalisti. Tämän vuoksi Ekovillan ilmansulkupaperin tulokset on esitetty ainoastaan kolmella kosteusparilla mitattuna.

Kuvassa 6.10 on esitetty Ekovillan ilmansulkupaperille ($d=0,3$ mm) mitatut vesihöyrynvastukset suhteellisen kosteuden funktiona uudella tekniikalla mitattuna. Valmistaja ilmoittaa tuotteelleen vesihöyrynvastusarvon $Z_v=23400$ s/m, joten diplomityössä mitattu tulos on hieman tätä pienempi kuivissa olosuhteissa mitattuna.

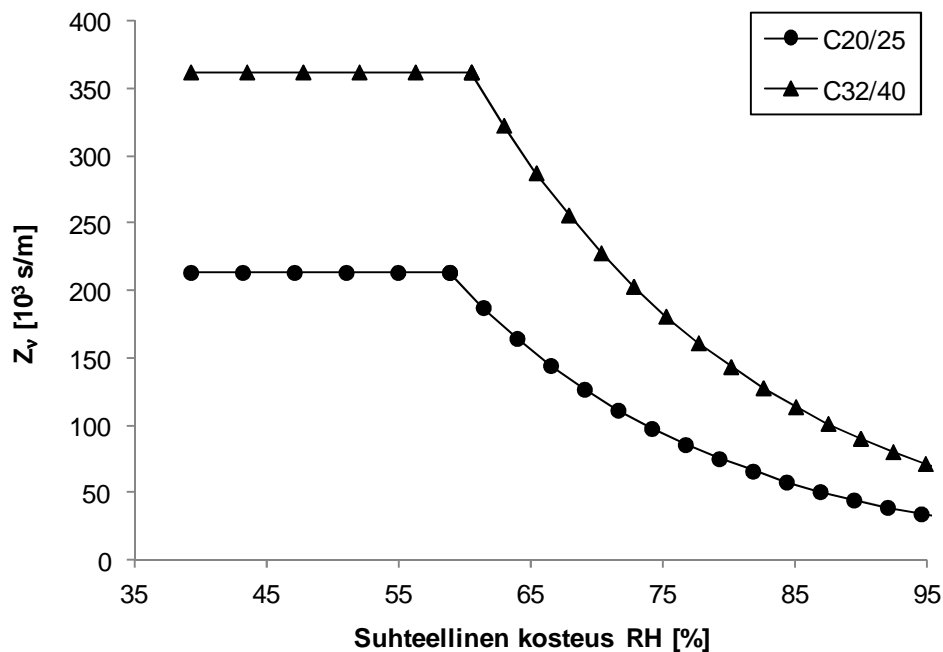


Kuva 6.10 Ekovillan ilmansulkupaperin vesihöyrynvastus suhteellisen kosteuden funktiona. Mittaukset on tehty vain uudella tekniikalla. Kuvassa on esitetty lisäksi valmistajan tuotteelleen ilmoittama vesihöyrynvastusarvo.

Diplomityön mittausten perusteella näyttää myös siltä, että ilmansulkupaperin vesihöyrynvastus pienentyisi suhteellisen kosteuden funktiona. Valmistaja on kuitenkin ilmoittanut materiaalin vesihöyrynvastukselle ainoastaan yhden vakioarvon.

6.8 Betoni

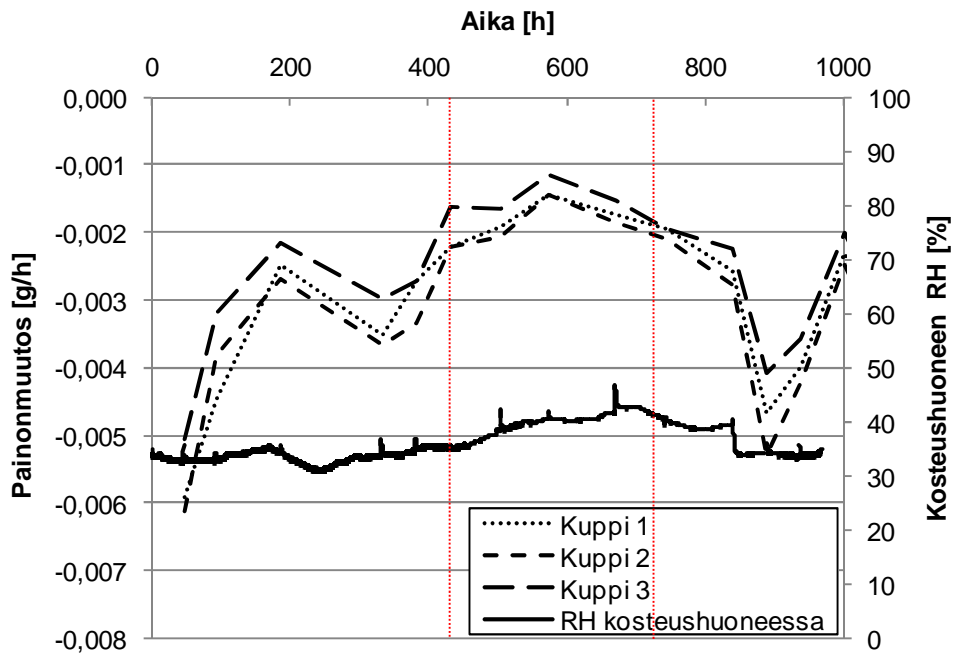
Kuvassa 6.11 on esitetty betonille ($d=30$ mm) mitatut vesihöyrynvastusarvot suhteellisen kosteuden funktiona uudella tekniikalla mitattuna. Betonista tutkittiin myös lujuuden vaikutusta vesihöyrynläpäisevyyteen, joten mittaukset tehtiin kahdelle eri betonilaadulle. Kuvasta nähdään, että lujemman betonin (C32/40) vesihöyrynläpäisevyys on huomattavasti pienempi kuin C20/25-lujuusluokan betonilla (koekappaleiden paksuus oli sama).



Kuva 6.11 Betonin vesihöyrynvastus suhteellisen kosteuden funktiona. Mittaukset on tehty vain uudella tekniikalla. Kuvassa on esitetty kahden eri lujuusluokan betonin mittaustulokset.

Betonin mittaustuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että koekappaleiden suuren massan vuoksi punnituksessa on käytetty hieman epätarkempaa vaakaa (10 mg tarkkuus). Pienimmällä vesihöyrypitoisuuserolla mitattuna painonmuutos kupissa oli keskimäärin 70 mg, joten punnitustarkkuutta ei voida pitää kovin hyvänä. Tämän vuoksi erityisesti pienellä vesihöyrypitoisuuserolla koekupin massavirtaa ei saatu tasaantumaan siten, että viiden peräkkäisen punnituksen yksittäinen arvo eroaisi punnitusten keskiarvosta enintään 10 % (raja-arvo epähomogeenisille materiaaleille standardin SFS-EN ISO 12572 (2001) mukaan). Tasaisen massavirran aikaansaamista vaikeutti edelleen kosteushuoneessa vallinneet olosuhteet. Punnitukset suoritettiin kesäaikaan, jolloin suhteellinen kosteus lähtee edelleen kosteushuoneessa helposti kohoamaan, kuten kuvan 6.12 kosteushuoneen RH-käyrästä voidaan nähdä. Laskennassa pyrittiin käyttämään

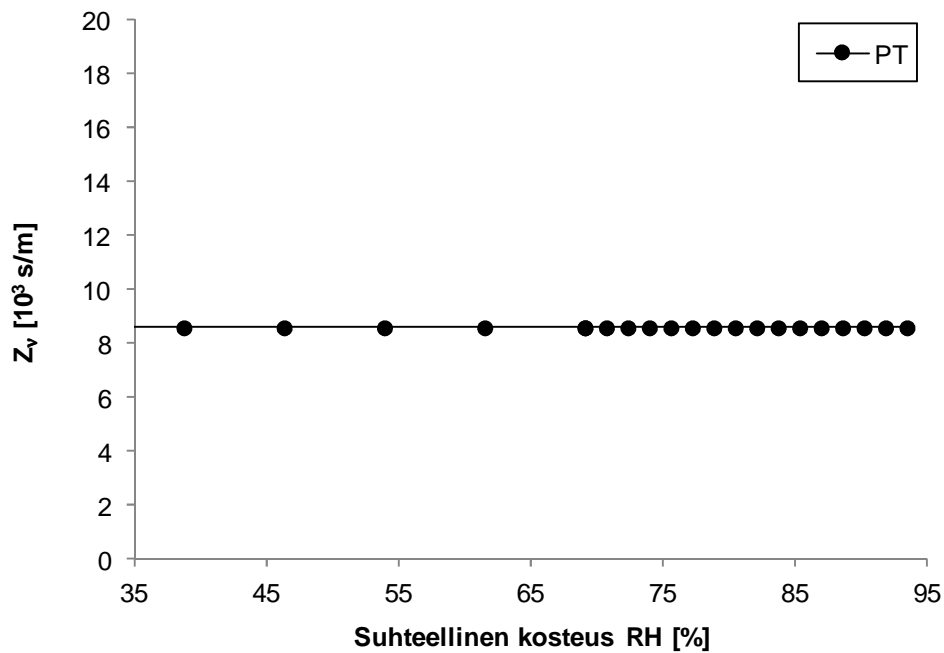
kuitenkin punnitustuloksia ajanjaksolta, jolloin painonmuutos on ollut mahdollisimman tasainen.



Kuva 6.12 Betonin C20/25 kosteusparin 33 % / 55 % koekuppien painonmuutos ja kosteushuoneen suhteellinen kosteus. Punaiset pystyviivat kuvaavat ajanjaksoa, jolta laskettiin materiaalin vesihöyrynläpäisevyysarvot.

6.9 Punatiili

Kuvassa 6.13 on esitetty punatiilelle ($d=13,3$ mm) mitatut vesihöyrynvastusarvot suhteellisen kosteuden funktiona uudella tekniikalla mitattuna. Standardissa SFS-EN ISO 10456 (2008) on annettu poltetulle tiilelle vesihöyryn diffuusiovastuskertoimeksi $\mu=16$ [-], mikä vastaa 13,3 mm punatiilen vesihöyrynvastusarvoa $Z_v=7900$ s/m. Diplomityössä mitattu vesihöyrynvastus oli siis tätä arvoa hieman suurempi, mutta kuitenkin samaa suuruusluokkaa.



Kuva 6.13 Punatiilen vesihöyrynvastus suhteellisen kosteuden funktiona. Mittaukset on tehty vain uudella tekniikalla.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Diplomityön päätavoitteena oli parantaa TTY:llä käytettyä vesihöyrynläpäisevyyskoetta. Koejärjestelyä muutettiin vastaamaan paremmin standardia SFS-EN ISO 12572 (2001). Koejärjestelyä muutettiin kuppityypin, tiivistystavan, kosteushuoneen ja vaa'an osalta. Lisäksi tutkittiin erilaisten korjauskertoimien vaikutusta tuloksiin. Diplomityössä tehtiin mittauksia sekä vanhalla että uudella koejärjestelyllä ja verrattiin tuloksia toisiinsa.

Vertailumittausten perusteella voidaan sanoa, että vanhan ja uuden koemenetelmän välillä ei ole merkittävää eroa vanerin, runkoleijonan, polyuretaanin ja kipsilevyn tapauksissa. Ainoa vesihöyryä kohtalaisen hyvin läpäisevä materiaali, jolla menetelmien välisissä mittaustuloksissa oli merkittävää eroa, oli rakentajan kovalevy. Höyrynsulku-
muovin ja sokeiden kuppien mittaustuloksista voidaan kuitenkin päätellä, että reunavuoto on suurempaa vanhassa mittausjärjestelyssä. Virhe tulee kuitenkin näkyviin vasta erittäin vesihöyrytiivittä materiaaleja mitattaessa. Mittausten perusteella havaittiin myös, että reunavuotojen kautta kulkeutuva kosteusvirta on niin pientä, ettei sitä tarvitse ottaa laskennallisesti tuloksissa huomioon.

Reunavuotoa suurempi ongelma näyttää tulosten perusteella olevan koejärjestelyn useat muut epävarmuustekijät, jotka yksittäisinä tekijöinä eivät vaikuta olennaisesti tuloksiin, mutta yhdessä saattavat kasvattaa tulosten virhemarginaalia. Epävarmuustekijöitä ovat kupin sisäpuolinen suhteellinen kosteus, kosteushuoneen olosuhteiden heilahtelu, olosuhteiden mittaustarkkuus, punnitustarkkuus, kupin heilahtelu punnittaessa, materiaalien väliset vaihtelut ja huolellisuus kupin tiivistämisessä. Monet epävarmuustekijät riippuvat inhimillisistä tekijöistä, joten virheiden suuruus ja myös tulokset saattavat vaihdella tekijän mukaan. Tämän vuoksi koemenettely pyritään tulevaisuudessa saamaan mahdollisimman stabiiliksi diplomityön yhteydessä laaditun työohjeen avulla.

Kaiken kaikkiaan diplomityössä saatiin kehitettyä kuppityyppiä ja sen tiivistystapaa luotettavammaksi ja toisaalta myös helpommaksi, koska menetelmä sisältää vähemmän työvaiheita. Suuremman näyte- ja koekuppikoon vuoksi rakennusmateriaalin ja vahan menekki on suurempaa. Koekupin laaja, avoin pinta-ala kuitenkin mahdollistaa myös suuremman kosteusvirran ja siten parantaa mittausmenetelmän tarkkuutta. Reunan ympärysmitan suhde koekupin pinta-alaan myös pieneni, joten mittausmenetelmän tarkkuus parantui siinäkin mielessä. Uuden koejärjestelyn huonona puolena voidaan pitää suolan reagoimista alumiinin kanssa. Koekupin sisällä tulee käyttää erillistä muovista

sisäkuppia, mutta usein mittausten jälkeen suolaliuosta pääsee liikuteltaessa silti valumaan alumiinisen kupin pohjalle. Tällöin suolaliuos reagoi kupin kanssa, jos sitä ei heti tyhjennetä. Koekuppeja tulisikin tulevaisuudessa parantaa pinnoittamalla koekupit sisäpuolelta esim. vedeneristetyypisellä massalla.

Diplomityön yhteydessä onnistuttiin myös parantamaan rakennustekniikan laitoksen laboratorion kosteushuonetta. Kosteushuoneen lämpötilavaihtelua saatiin tasoitettua seiniin asennetulla polyuretaanilla sekä termostaatilla toimivan lämmitysvastuksen avulla. Suhteellinen kosteus kosteushuoneessa pysyi kohtalaisen tasaisena kolmen tuulettimella varustetun suola-astian sekä vesihöyrytiiviiden seinärakenteiden ja oven ansiosta. Toimenpiteistä huolimatta jopa tunnin mittaiset punnitukset nostivat suhteellisen kosteuden tasoa kosteushuoneessa. Tilanne kuitenkin tasoittui nopeasti punnitusten jälkeen. Kosteushuone voidaan todeta toimiviksi talviolosuhteissa, kun normaalin huoneilman suhteellinen kosteus ja lämpötila ovat jo valmiiksi matalia. Ongelmia ilmeni kesäaikana, jolloin suhteellinen kosteus ja lämpötila ovat korkeampia. Suola-astiat eivät olleet suolan lisäämisestä huolimatta riittävän tehokkaita pitämään suhteellista kosteutta matalalla tasolla, vaan kosteusolosuhteet lähtivät hiljalleen kohoamaan kosteushuoneessa. Suolaliuos ylläpitää tilan kosteuden hyvin, jos suolan on tarkoitus luovuttaa kosteutta huoneilmaan eikä toisinpäin. Myös tasaisen lämpötilan ylläpitäminen on vaikeampaa, koska jäähdytysmahdollisuutta ei kosteushuoneessa ollut. Tämän vuoksi kosteushuoneen käyttöä kesäaikana ei voi tässä työssä tehtyjen tarkastelujen perusteella suositella.

Vesihöyrynläpäisevyysmittaukset tulisikin jatkossa suorittaa koneellisesti säädetyissä olosuhdehuoneissa, joissa ilmaa kostutetaan, kuivatetaan, lämmitetään ja jäähdytetään automaattisesti tarpeen mukaan. TTY:lle onkin valmistumassa vuonna 2013 valmistumassa uusia olosuhdehuoneita, jossa vesihöyrynläpäisevyyskokeita tullaan jatkossa tekemään.

TTY:lle diplomityön yhteydessä hankittu vaaka mahdollisti suurempien koekuppien käyttämisen. Vaa'an punnituskapasiteetti ei kuitenkaan ollut riittävä betonin tapauksessa. Kiviaineisten materiaalien yhteydessä tuleekin huolehtia, että näyte on riittävän ohut, jotta vaa'an punnituskapasiteetti ei ylitä. Betonin kaltaisilla vesihöyrytiivillä kivimateriaaleilla tuleekin käyttää tarkkuudeltaan vähintään 1 mg vaakaa pienen kosteusvirran ja materiaalin hygroskooppisuuden vuoksi. Höyrynsulkumuovin mittauksissa tulee käyttää vielä tarkempaa vaakaa, eli 0,1 mg vaakaa, jotta kosteusvirta saadaan havaittua ilman usean viikon mittaista punnitusväliä. Vaa'an punnituskapasiteetti tulee tällöin olla vähintään 600 g.

Diplomityössä käytetty regressioanalyysi mahdollistaa tarkempien mittausten tekemisen. Jos yksittäisessä mittaustuloksessa on tapahtunut jokin virhe, tai jos näytemateriaali on jollain tapaa keskiarvosta poikkeava, tasaantuu tulos kuitenkin muiden mittausten ansioista keskiarvotasolle. Diplomityössä käytettiin neljän kosteusparin mittausta. Nel-

jällä kosteusparilla ei kuitenkaan usean materiaalin tapauksessa saatu tarpeeksi eroa aikaiseksi eri sovitekäyrien välille, mikä vaikeutti sovitekäyrän valintaa. Kosteusparien pieni määrä aiheutti myös sen, että jos mittaustuloksista poistettiin yksi kosteuspari, muuttuivat tulokset huomattavasti. Kuitenkin, jotta regressioanalyysistä olisi todellista hyötyä yksittäisten keskiarvosta poikkeavien mittaustulosten karsinnassa, ja jotta analyysillä saataisiin luotettavasti kuvattua materiaalin vesihöyrynvastus/-läpäisevyys suhteellisen kosteuden funktiona, tulisi mittauksia olla huomattavasti enemmän. Kosteuspareja tulisi olla enemmän kuin neljä ja yhdessä sarjassa tulisi mitata vähintään viisi rinnakkaista näytettä kolmen sijasta.

Tutkimuslaitosten välisissä vertailumittauksissa on havaittu, että vesihöyrynläpäisevyyskokeiden toteutus ja koetulokset vaihtelevat suuresti eri laitosten välillä, vaikka menettelytapa pitäisi olla sama. Kuppikoe sisältää siis monia epävarmuustekijöitä, jotka ovat sidonnaisia inhimillisiin tekijöihin. Tämän vuoksi tarjolla olisi hyvä olla olemassa joitakin yleisiä referenssimateriaaleja, jonka materiaaliarvot tunnetaan hyvin ja jotka pysyvät suhteellisen tasalaatuisina. Eri tutkimuslaitosten olisi mahdollista hankkia näitä materiaaleja ja verifioida niiden avulla oma mittausjärjestely ja laskentatapa. Tällä hetkellä tällaisia materiaaleja ei ole tarjolla, mutta ne olisivat koejärjestelyn luotettavuuden ja käytettävyyden kannalta kuitenkin tarpeellisia.

LÄHTEET

ASTM E96 / E96M – 10. 1995. Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials. American Society for Testing and Materials. 8 p.

Bergheim, E., Geving, S. & Time, B. 1998. Hygroscopic material properties. Water vapour permeability and hygroscopic sorption curves for materials used in a test house. Project report 234. Norwegian Building Research Institute (NBI). Department of Building and Construction Engineering (NTNU). 18 p.

Björkholtz, D. Lämpö ja kosteus, Rakennusfysiikka. Rakentajain Kustannus Oy, Helsinki 1997, 150 s.

Bomberg, M. 1989. Testing Water Vapor Transmission: Unresolved Issues. Reprinted from Water Vapor Transmission Through Building Materials and Systems: Mechanisms and Measurement, ASTM, STP, 1039, pp. 157-167

Devore, J. L. 2012. Probability and Statistics for Engineering and the Sciences. Eighth Edition. International Edition. Brooks/Cole, Cengage Learning. Canada. 687 p.

DIN 4108-5. 1981. Wärmeschutz im Hochbau, Berechnungsverfahren. Deutsches Institut für Normung. 16 p.

DIN 52615. 1987. Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen. Deutsches Institut für Normung. 5 s.

EN ISO 13788. 2001. Hygrothermal performance of building components and building elements . Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods. Brussels, European Committee for Standardization 36 p.

Goossens, E.L.J, van der Zanden, A.J.J & van der Spoel. 2003. The measurement of the moisture transfer properties of paint films using the cup method. Progress in Organic Coatings 49. pp. 270-274

Hansen, K.K and Bertelsen, N.H. (1989) Results of a water Vapor Transmission Round Robin test Using Cup Methods. Water Vapor Transmission Through Materials and Systems: Mechanisms and Measurements, ASTM STP 1039, H.R. Trechsel and M. Bomberg, Eds., American society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 91-100.

Hansen, K. 1990. Cup method for determination of water vapour transmission properties of building materials. Sources of uncertainty in the method. Proceedings of the 2nd Symposium, Building Physics in the Nordic Countries, Trondheim, pp. 291-298.

Hedenblad, G. 1996. Materialdata för fukttransportberäkningar. Byggeforskningsrådet. Stockholm. 55 s.

Holopainen, M. & Pulkkinen, P. 2012. Tilastolliset menetelmät. Sanoma Pro Oy. Helsinki. 360 s.

Hyland, R.W. & Wexler, A. 1983. Formulations for the Thermodynamic Properties of the Saturated Phases of H₂O from 173.15 K to 473.15. ASHRAE Transactions. Vol. 89, Part 2A. Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, pp. 500-519.

Ilmatieteen laitos [WWW]. Viitattu 25.1.2013. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/ilmanpaine>

Kumaran, M.K. 1998. Interlaboratory comparison of the ASTM standard test methods for water vapor transmission of materials. Journal of Testing and Evaluation, 26, (2), pp. 83-88.

Manelius, E. & Vinha, J. 2011. The Effect of Leakage Through the Sealant in the Cup Test Method. Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Building Physics, NSB 2011, Tampere, Finland, May 29–June 2, Vol. 2, pp. 601-608.

Mikkilä, A. 2001. Rakennusmateriaalien vesihöyrynläpäisevyyydet eri kosteusolosuhteissa. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Talonrakennustekniikka. Tampere. 61 s. 91 liites.

Mukhopadhyaya, P., Kumaran, K., Lackey, J. & van Reenen, D. 2007. Water vapor transmission measurement and significance of corrections. Journal of ASTM International, v. 4, no.8. pp.1-12.

Nielsen, C.B. 1992. Fejlkorrektion ved kopmålinger. Teknisk rapport 259/92. Laboratoriet for bygningsmaterialer. Danmarks Tekniske Hjskole. 26 s. + 27 liites.

NT Build 265. 1984. Materials, Thin: Water vapour permeability. Nordtest. Espoo. 8 p.

Ojanen, T., Salonvaara, M., Kohonen R. & Nieminen, J. 1989. Kosteuden siirtyminen rakenteissa, Laskentamenetelmät. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 595. 102 s.

PU-Nordic [WWW]. Viitattu 16.3.2013. [Saatavissa: http://www.pu-nordic.fi/files/pu-nordic/pdf/81228_PU_Nordic_lammoneriste_esite_spread_LR.pdf]

Rakennusfysiikan opintomoniste. 2011. Koonnut Juha Vinha. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennetekniikka.

Rani 2008. RaniMoBar, Technical Data Sheet. Ab Rani Plast Oy. 1 s.

Roels, S. 2008. Annex 41. Whole Building Heat, Air, Moisture Response. Subtask 2: Experimental Analysis of Moisture Buffering. International Energy Agency (Exco ECBCS), pp. 22-49.

RT 38089. Terca-poltetut tiilet. Wienerberger Oy Ab. Tarviketieto. Toukokuu 2011.

Saarimaa, J., Nieminen, J., Rautiainen, L., Ojanen, T. & Kohonen, R. 1989. Kosteuden siirtyminen rakenteissa. Rakennusaineiden kosteustekniset ominaisuudet. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. VTT Tutkimuksia 644. Espoo 1989. 98 s.

SFS-EN 772-15. 2000. Muurauskappaleiden testimenetelmä – Osa 15: Karkaistujen kevytbetoniharkkojen vesihöyrynläpäisevyyden määrittäminen. Suomen standardisoimisliittos SFS ry. 5 s.

SFS-EN 1015-19. 1998. Methods of tests for mortar for masonry – Part 19: Determination of water vapour permeability of hardened rendering and plastering mortars. European Committee for Standardization. 8 p.

SFS-EN 1931. 2000. Flexible sheets for waterproofing – Bitumen, plastic and rubber sheets for waterproofing – Determination of water vapour transmission properties. European Committee for Standardization. 12 p.

SFS-EN 12086. 1997. Lämmöneristetutuotteet rakentamiskäyttöön. Vesihöyrynläpäisevyyden määrittäminen. Suomen standardisoimisliittos SFS ry. 11 s.

SFS-EN 12524. 2000. Rakennusmateriaalit ja -tuotteet. Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Taulukoidut suunnittelu-arvot. Suomen standardisoimisliittos SFS ry. 19 s.

SFS-EN ISO 7783. 2011. Paints and varnishes. Determination of water-vapour transmission properties. Cup method. European Committee for Standardization. 14 p.

SFS-EN ISO 10456. 2008. Rakennusaineet ja -tuotteet. Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Taulukoidut suunnittelu-arvot ja menetelmät ilmoitetun lämpöteknisen arvon

ja lämpöteknisen suunnitteluarvon määrittämiseksi. Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 30 s.

SFS-EN ISO 12571. 2000. Hygrothermal performance of building materials and products -- Determination of hygroscopic sorption properties. Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 20 s.

SFS-EN ISO 12572. 2001. Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties. Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 32 s.

SFS-ISO 1663. 1986. Muovit. Jäykät solumuovit. Vesihöyrynläpäisyneuden ja vesihöyrynläpäisevyyden määrittäminen. Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 5 s.

Suomen kuitulevy Oy - Runkoleijona [WWW]. Viitattu 16.3.2013. [Saatavissa: <http://www.suomenkuitulevy.fi/fi/tuotteet/rakennuslevyt/runkoleijona>]

Suomen kuitulevy Oy - Rakentajan kovalevy [WWW]. Viitattu 16.3.2013. [Saatavissa: <http://www.suomenkuitulevy.fi/fi/tuotteet/rakennuslevyt/rakentajankovalevy>]

Toas, M. 1989. Results of the 1985 Round Robin Test Series Using ASTM E96-80. Water Vapor Transmission Through Materials and Systems: Mechanisms and Measurements, ASTM STP 1039, H.R. Trechsel and M. Bomberg, Eds., American society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 73-90.

Vaisala. 2002. HMP230 Series Transmitters. User's guide. M210225en-B. Helsinki. Finland. 163 p.

Vartest Laboratories [WWW]. Viitattu 4.2.2013. Saatavissa: vartest.com

Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A. & Käkelä, P. 2005. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. Tutkimusraportti 129. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan osasto. Talonrakennustekniikan laboratorio. Tampere. 101 s. + 211 liites.

Vinha, J. 2007. Hygrothermal Performance of Timber-Framed External Walls in Finnish Climatic Conditions: A Method for Determining the Sufficient Water Vapour Resistance of the Interior Lining of a Wall Assembly. Tampere, Tampere University of Technology. 338 p. + app. 10 p.

Weather Underground [WWW]. Viitattu 1.1.-1.3.2013. Saatavissa: wunderground.com

LIITTEET

- LIITE 1 Betonimassan laboratoriotulosteet, 2 sivua.
- LIITE 2 Betonin kuutiopuristuskokeiden tulokset, 1 sivu
- LIITE 3 Uuden mittausjärjestelmän mukaiset materiaalikohtaiset tulokset,
22 sivua.
- LIITE 4 Uuden mittausjärjestelmän mukainen työohje, 2 sivua.

Laboratoriotuloste
Kuormakirja: 29193

10.6.2010

Reseptin tiedot

Koodi	35021	Kloridipitoisuusluokka	Cl 0,10
Suhteitusryhmä	NORMA	Suojahuokossuhde	0,00
Lujuusluokka	25	Vesi-sementtisuhde	0,00
Notkeusluokka	S3		
Raekoko	16		
Huomautuksia			
Rasitusluokat	[X0:50,100,-] [XCl:50,100,-] [XC2:50,-,-] [XC3:50,-,-]		

Kuormakirjan tiedot

Vastuosasto		Mylläri	Vaherto
Projekti/Viite	20098	Sekoitin	1
Asiakasnumero	26794	Valmistus alkoi	10.6.2010 13:24:16
Asiakas	LUJABETONI OY	Valmistus päättyi	10.6.2010 13:24:16
Toimitusosoite	KESKIRUSKONKATU 11	Kuorman koko	
Suunniteltu käyttöikä	50	Tavoite	1,00m³
Rasitusluokat	XC1	Toteutunut	0,98m³

Komponentit

Komponentti	CEM I 42,5 R/2	TUHKA	0-8	0-8/6	3-8
Tavoite	250,00kg	65,00kg	520,00kg	520,00kg	176,75kg
Toteutunut	249,10kg	69,30kg	503,00kg	524,00kg	186,00kg
Virhe	-0,90kg/-0,36%	4,30kg/6,62%	-17,00kg/-3,27%	4,00kg/0,77%	9,25kg/5,23%
Lämpötila	10,00°C	10,00°C	17,00°C	16,00°C	18,00°C
Kosteus-%			4,00%	4,00%	1,00%
Absorptio-%			1,00%	1,00%	1,00%
Aktiivisuuskertoimen	0,95	0,95			
Komponentti	6-16	fill	Kylmä vesi	sikament evo	
Tavoite	404,00kg	213,20kg	128,05kg	1,89kg	
Toteutunut	394,00kg	200,00kg	128,30kg	2,19kg	
Virhe	-10,00kg/-2,48%	-13,20kg/-6,19%	0,25kg/0,20%	0,30kg/15,87%	
Lämpötila	16,00°C	17,00°C	10,00°C	15,00°C	
Kosteus-%	1,00%	4,00%			
Absorptio-%	1,00%	1,00%			

Yhteenvedo (yhdele kuutiolle betonia)

Vesimäärä	Sementtimäärä	Vesi-sementtisuhde (w/c)	
Tavoite	195,00kg	Tavoite	0,62
Toteutunut	185,48kg	Toteutunut	0,57
Tavoite tehollinen	177,38kg	Tavoite EN206-1	0,59
Toteutunut tehollinen	167,17kg	Toteutunut EN206-1	0,54
	Sementtiseosainemäärä	Vesi/(sementti + k x seosaine)-suhde	
	Tavoite EN206-1	Tavoite EN206-1	0,59
	Toteutunut EN206-1	Toteutunut EN206-1	0,54
Kiviaineksen tilavuusosuus	67,91%		
Kiviaineksen massaosuus	77,75%		

Reseptin tiedot

Koodi	35028	Kloridipitoisuusluokka	Cl 0,10
Suhteitusryhmä	NORMA	Suojahuokossuhde	0,00
Lujuusluokka	40	Vesi-sementtisuhde	0,00
Notkeusluokka	S3		
Raekoko	16		
Huomautuksia			
Rasitusluokat	[XC1:50,100,-] [XC2:50,100,-] [XC3:50,100,-] [XC4:50,100,-] [X0:50,100,-]		

Kuormakirjan tiedot

Vastuuosasto		Mylläri	Vaherto
Projekti/Viite	27626/HÄRMÄLÄNOJA	Sekoitin	1
Asiakasnumero	1459	Valmistus alkoi	9.6.2010 14:49:19
Asiakas	YIT-RAKENNUS INFRAPALVELUT	Valmistus päättyi	9.6.2010 14:49:19
Toimitusosoite	ILMAILUNKATU/PIRKKALA	Kuorman koko	
Suunniteltu käyttöikä	50	Tavoite	2,00m³
Rasitusluokat	XC2	Toteutunut	2,00m³

Komponentit

Komponentti	CEM I 42,5 R	TUHKA	0-8	0-8/6	3-8
Tavoite	726,00kg	204,00kg	745,20kg	745,20kg	238,36kg
Toteutunut	721,60kg	204,10kg	805,00kg	734,00kg	238,00kg
Virhe	-4,40kg/-0,61%	0,10kg/0,05%	59,80kg/8,02%	-11,20kg/-1,50%	-0,36kg/-0,15%
Lämpötila	10,00°C	10,00°C	17,00°C	16,00°C	18,00°C
Kosteus-%			3,50%	3,50%	1,00%
Absorptio-%			1,00%	1,00%	1,00%
Aktiivisuuskertoimen	1,10	0,95			
Komponentti	6-16	fill	Kylmä vesi	sikament evo	
Tavoite	1111,00kg	436,80kg	326,44kg	4,65kg	
Toteutunut	1114,00kg	437,00kg	326,30kg	4,59kg	
Virhe	3,00kg/0,27%	0,20kg/0,05%	-0,14kg/-0,04%	-0,06kg/-1,29%	
Lämpötila	16,00°C	17,00°C	10,00°C	15,00°C	
Kosteus-%	1,00%	4,00%			
Absorptio-%	1,00%	1,00%			

Yhteenveto (yhdelta kuutiolle betonia)

Vesimäärä	Sementtimäärä	Vesi-sementtisuhde (w/c)	
Tavoite	210,00kg	Tavoite	0,45
Toteutunut	204,19kg	Toteutunut	0,44
Tavoite tehollinen	194,18kg	Tavoite EN206-1	0,39
Toteutunut tehollinen	187,73kg	Toteutunut EN206-1	0,38
	Sementtiseosainemäärä	Vesi/(sementti + k x seosaine)-suhde	
	Tavoite EN206-1	Tavoite EN206-1	0,39
	Toteutunut EN206-1	Toteutunut EN206-1	0,38

Kiviaineksen tilavuusosuus	61,34%
Kiviaineksen massaosuus	70,80%

Betonipasta	386,63l/m³
Suhteellinen kutistuma	0,620mm/m³

Betonin puristuskokeet

K40

Valupäivä 9.6.2010

Betonin ikä 29d

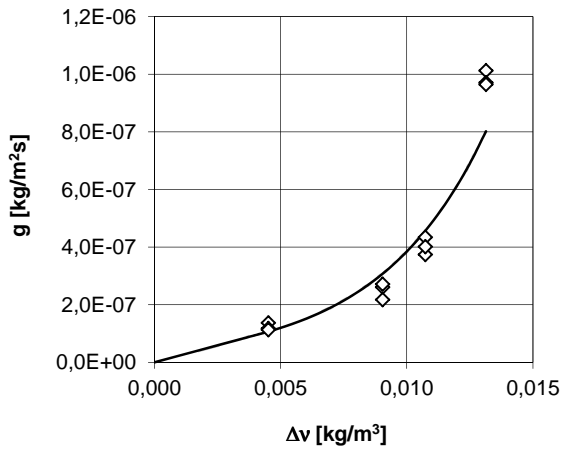
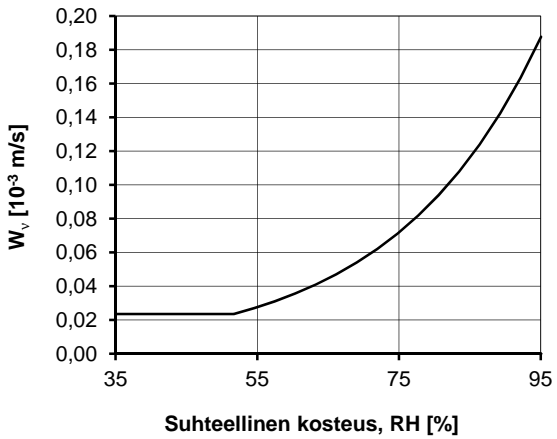
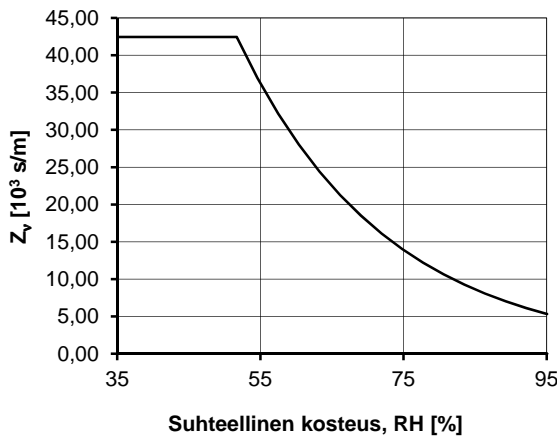
Koekappale	Paino [kN/m ³]	Kuormitusala [mm ²]	Murtokuorma [kN]	Puristuslujuus [N/mm ²]
1/6	22.6	22846.3	1104	48.3
2/6	22.9	22515.0	1120	49.7
3/6	23.0	22385.5	1095	48.9
4/6	23.1	22589.6	1066	47.2
5/6	22.6	22662.3	1062	46.9
6/6	22.8	22561.5	1106	49.0
keskiarvo				48.3

K25

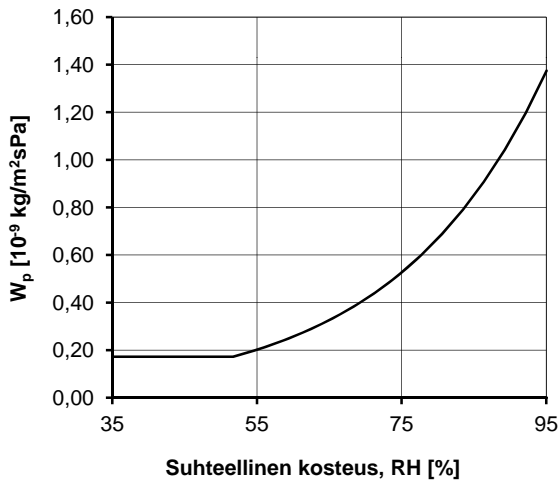
Valupäivä 10.6.2010

Betonin ikä 28d

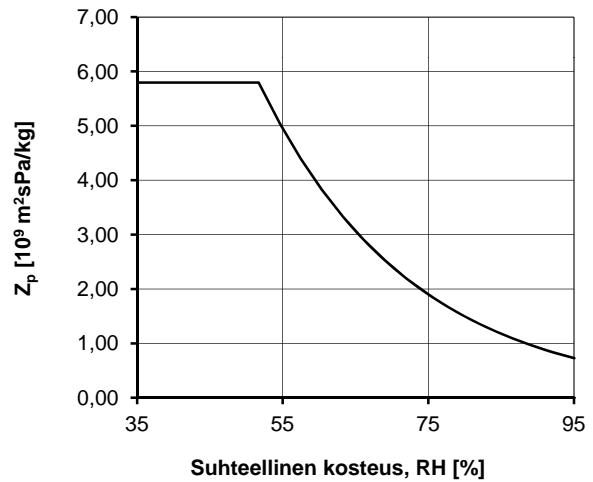
Koekappale	Paino [kN/m ³]	Kuormitusala [mm ²]	Murtokuorma [kN]	Puristuslujuus [N/mm ²]
1/6	22.7	22596.1	655	29.0
2/6	22.7	22612.6	635	28.1
3/6	22.9	22537.5	655	29.1
4/6	22.9	22515.0	603	26.8
5/6	22.7	22534.3	651	28.9
6/6	22.9	22746.6	673	29.6
keskiarvo				28.6

PLY_U		Wisa 3 ply 9 mm			Lämpötilan keskiarvo kokeen aikana	22,9	[°C]
					Vesihöyryn kylästyskosteus v_k	20,5	[g/m ³]
tunnus	uRH [%]	sRH [%]	Δv	g	<p>Kosteusvirran tiheys g</p> 		
			[kg/m ³]	[kg/m ² s]			
			X_i	Y_i			
1 - a	uRH, keskiarvo 31 %	52,9	4,51E-03	1,37E-07			
2 - b		52,9	4,51E-03	1,17E-07			
3 - c		52,9	4,51E-03	1,13E-07			
4 - a		75,0	9,04E-03	2,61E-07			
5 - b		75,0	9,04E-03	2,71E-07			
6 - c		75,0	9,04E-03	2,17E-07			
7 - a		83,3	1,07E-02	4,34E-07			
8 - b		83,3	1,07E-02	3,74E-07			
9 - c		83,3	1,07E-02	4,01E-07			
10 - a		95,1	1,31E-02	1,01E-06			
11 - b		95,1	1,31E-02	9,71E-07			
12 - c		95,1	1,31E-02	9,65E-07			
		Vakiot			Δv	Kosteusvirran tiheyden yhtälö	
		b_1	b_2	a_1			
lineaarinen malli		5,1412E-05	-	-	[0...0,013]	$g = b_1 \Delta v$	
polynomimalli		-	-	-		$g = b_1 \Delta v + b_2 \Delta v^2$	
eksponentiaalinen malli		-	-	2,3561E-05	[0...0,0043]	$g_1 = a_1 \Delta v$	
		3,7039E-08	234,009812	-	[0,0043...0,0131]	$g_2 = b_1 e^{b_2 \Delta v}$	
Vesihöyrynläpäisykerroin W_v				Vesihöyrynvastus Z_v			
							

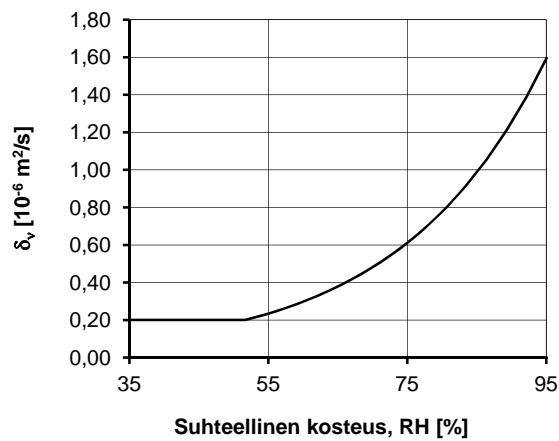
Vesihöyrynläpäisykerroin W_p



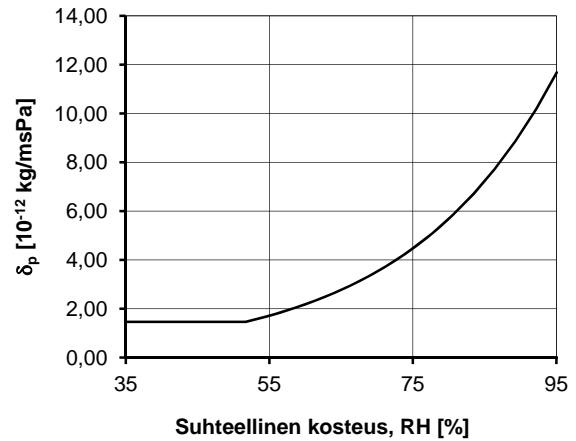
Vesihöyrynvastus Z_p



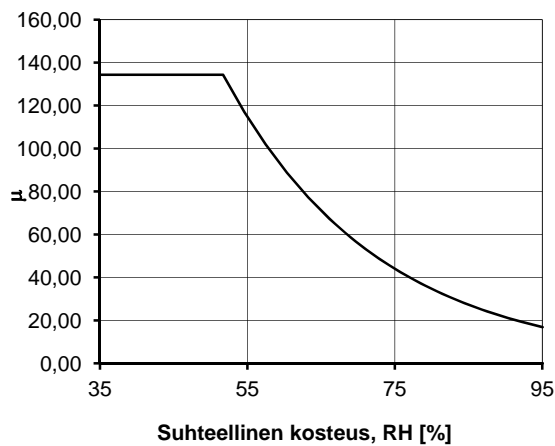
Vesihöyrynläpäisevyys δ_v



Vesihöyrynläpäisevyys δ_p



Vesihöyryn diffusiovastuskerroin μ



Kaavoja

$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$ [kg/m³]

$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$ [m/s]

$Z_v = 1 / W_v$ [s/m]

$\delta_v = W_v d$ [m²/s]

$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$ [kg/m²sPa]

$Z_p = 1 / W_p$ [m²sPa/kg]

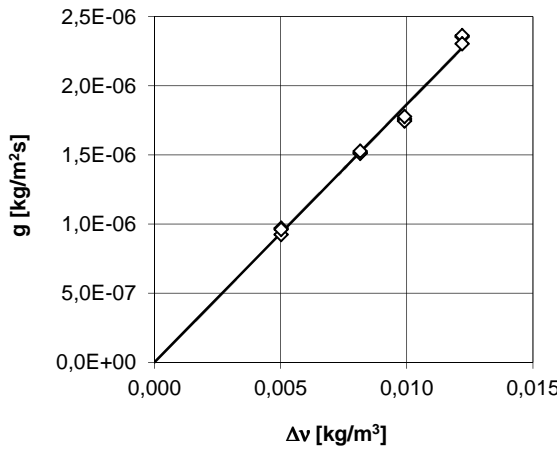
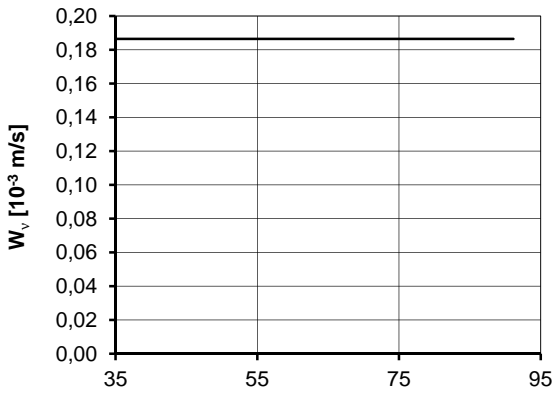
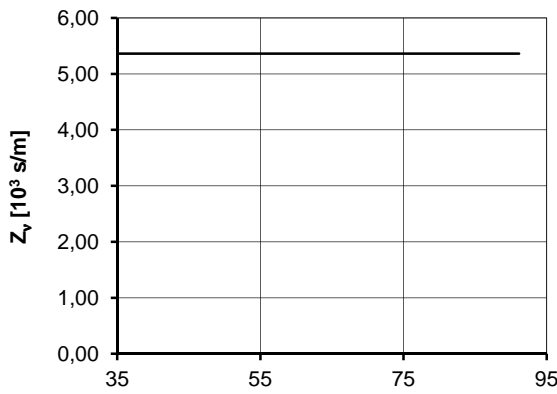
$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$ [kg/msPa]

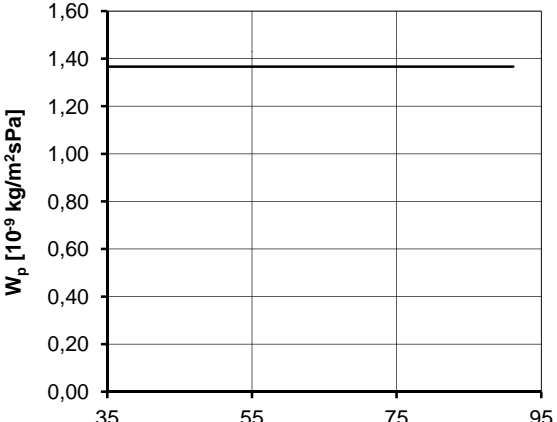
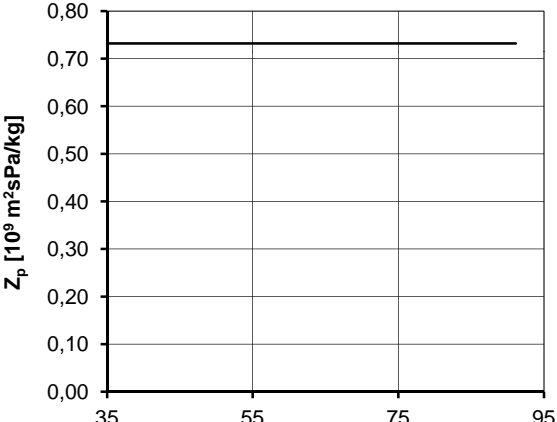
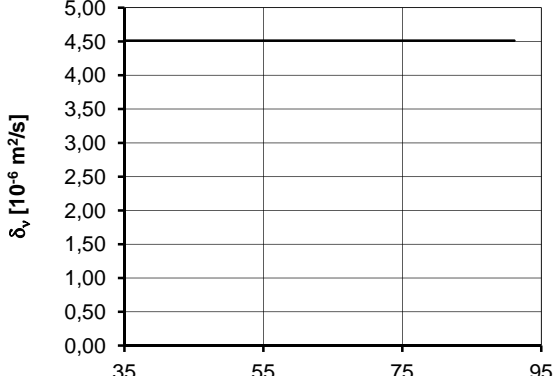
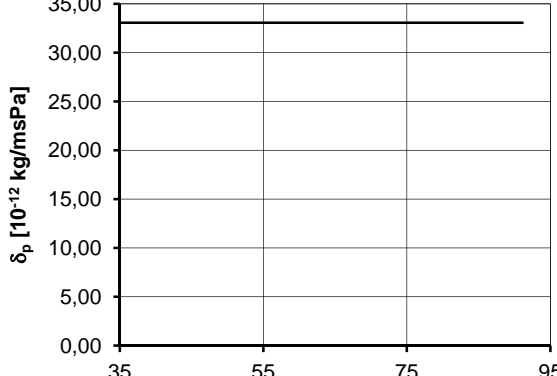
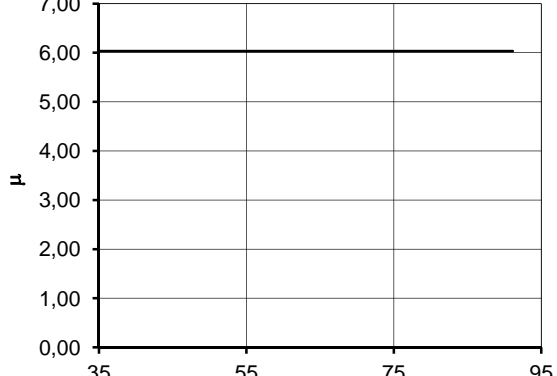
$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$ [-]

$\delta_{p, ilma} = n \cdot 197 \times 10^{-12}$ [kg/msPa]

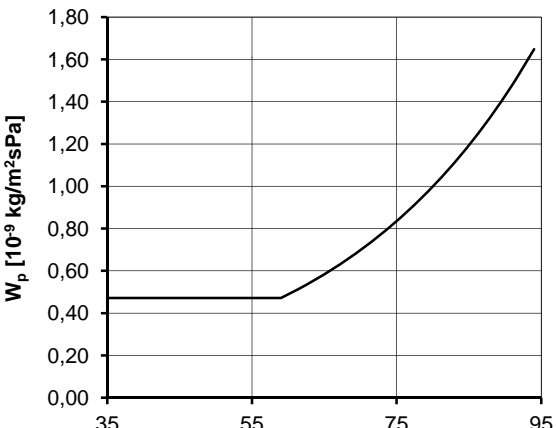
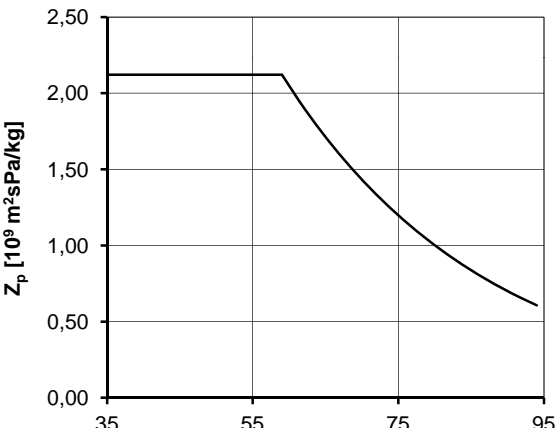
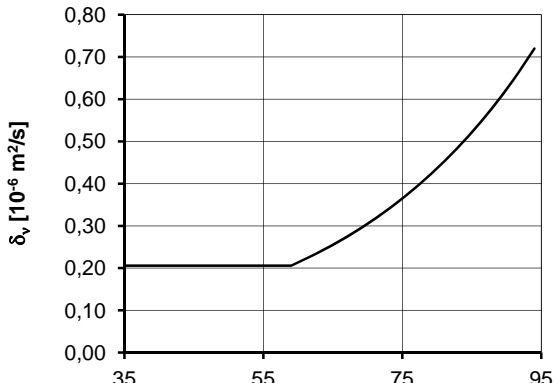
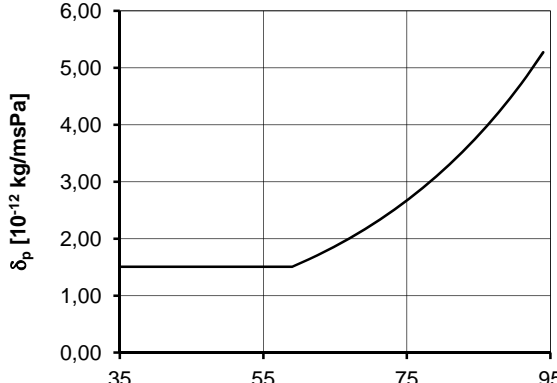
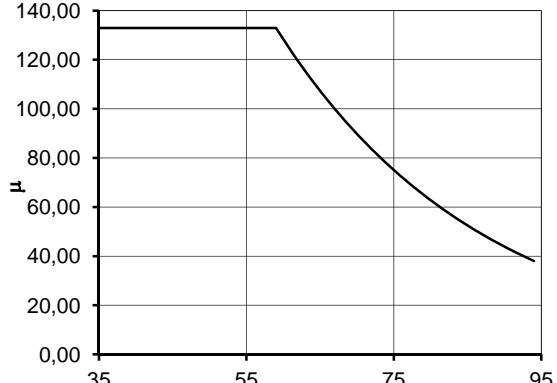
$R = 8314,3$ [J/kmolK]

$M_v = 18,02$ [kg/kmol]

RL_U		Runkoleijona			Lämpötilan keskiarvo kokeen aikana	22,8	[°C]
					Vesihöyryn kylästyskosteus v_k	20,3	[g/m ³]
tunnus	uRH [%]	sRH [%]	Δv	g	<p style="text-align: center;">Kosteusvirran tiheys g</p> 		
			[kg/m ³]	[kg/m ² s]			
			X_i	Y_i			
1 - a	uRH, keskiarvo 31 %	55,8	5,02E-03	9,25E-07			
2 - b		55,8	5,02E-03	9,71E-07			
3 - c		55,8	5,02E-03	9,62E-07			
4 - a		71,2	8,15E-03	1,52E-06			
5 - b		71,2	8,15E-03	1,51E-06			
6 - c		71,2	8,15E-03	1,53E-06			
7 - a		79,9	9,91E-03	1,76E-06			
8 - b		79,9	9,91E-03	1,74E-06			
9 - c		79,9	9,91E-03	1,78E-06			
10 - a		91,1	1,22E-02	2,35E-06			
11 - b		91,1	1,22E-02	2,36E-06			
12 - c		91,1	1,22E-02	2,30E-06			
		Vakiot			Δv	Kosteusvirran tiheyden yhtälö	
		b_1	b_2	a_1			
lineaarinen malli		0,00018648	-	-	[0...0,012]	$g = b_1 \Delta v$	
polynomimalli		-	-	-		$g = b_1 \Delta v + b_2 \Delta v^2$	
eksponentiaalinen malli		-	-	-		$g_1 = a_1 \Delta v$	
		-	-	-		$g_2 = b_1 e^{b_2 \Delta v}$	
Vesihöyrynläpäisykerroin W_v				Vesihöyrynvastus Z_v			
							

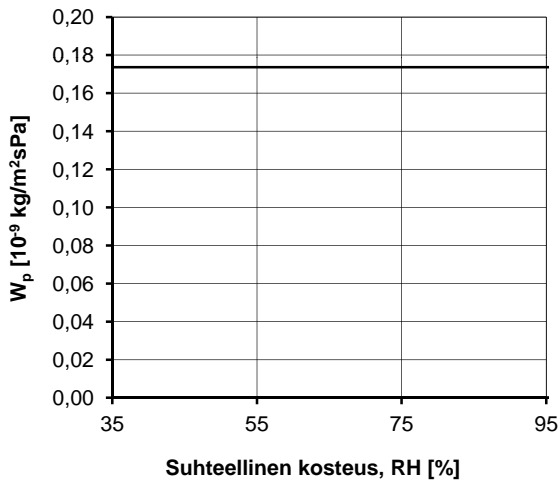
RL_U	Runkoleijona	Materiaalin kuivatiheys 230-300 * [kg/m ³] * Kirjallisuusarvo																						
<p style="text-align: center;">Vesihöyrynläpäisykerroin W_p</p>  <p style="text-align: center;">Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>		<p style="text-align: center;">Vesihöyrynvastus Z_p</p>  <p style="text-align: center;">Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>																						
<p style="text-align: center;">Vesihöyrynläpäisevyys δ_v</p>  <p style="text-align: center;">Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>		<p style="text-align: center;">Vesihöyrynläpäisevyys δ_p</p>  <p style="text-align: center;">Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>																						
<p style="text-align: center;">Vesihöyryn diffuusiiovastuskerroin μ</p>  <p style="text-align: center;">Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>	<p style="text-align: center;">Kaavoja</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$</td> <td>[kg/m³]</td> </tr> <tr> <td>$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$</td> <td>[m/s]</td> </tr> <tr> <td>$Z_v = 1 / W_v$</td> <td>[s/m]</td> </tr> <tr> <td>$\delta_v = W_v d$</td> <td>[m²/s]</td> </tr> <tr> <td>$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$</td> <td>[kg/m²sPa]</td> </tr> <tr> <td>$Z_p = 1 / W_p$</td> <td>[m²sPa/kg]</td> </tr> <tr> <td>$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$</td> <td>[kg/msPa]</td> </tr> <tr> <td>$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$</td> <td>[-]</td> </tr> <tr> <td>$\delta_{p, ilma} = n \cdot 200 \times 10^{-12}$</td> <td>[kg/msPa]</td> </tr> <tr> <td>$R = 8314,3$</td> <td>[J/kmolK]</td> </tr> <tr> <td>$M_v = 18,02$</td> <td>[kg/kmol]</td> </tr> </table>		$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$	[kg/m ³]	$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$	[m/s]	$Z_v = 1 / W_v$	[s/m]	$\delta_v = W_v d$	[m ² /s]	$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/m ² sPa]	$Z_p = 1 / W_p$	[m ² sPa/kg]	$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/msPa]	$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$	[-]	$\delta_{p, ilma} = n \cdot 200 \times 10^{-12}$	[kg/msPa]	$R = 8314,3$	[J/kmolK]	$M_v = 18,02$	[kg/kmol]
$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$	[kg/m ³]																							
$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$	[m/s]																							
$Z_v = 1 / W_v$	[s/m]																							
$\delta_v = W_v d$	[m ² /s]																							
$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/m ² sPa]																							
$Z_p = 1 / W_p$	[m ² sPa/kg]																							
$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/msPa]																							
$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$	[-]																							
$\delta_{p, ilma} = n \cdot 200 \times 10^{-12}$	[kg/msPa]																							
$R = 8314,3$	[J/kmolK]																							
$M_v = 18,02$	[kg/kmol]																							

RK_U		Rakentajan kovalevy			Lämpötilan keskiarvo kokeen aikana	22,9	[°C]
					Vesihöyryn kyllästyskosteus v_k	20,5	[g/m ³]
tunnus	uRH [%]	sRH [%]	Δv	g	<p style="text-align: center;">Kosteusvirran tiheys g</p>		
			[kg/m ³]	[kg/m ² s]			
			X_i	Y_i			
1 - a	uRH, keskiarvo 31 %	52,4	4,36E-03	2,70E-07			
2 - b		52,4	4,36E-03	2,70E-07			
3 - c		52,4	4,36E-03	3,36E-07			
4 - a		73,9	8,75E-03	5,80E-07			
5 - b		73,9	8,75E-03	5,85E-07			
6 - c		73,9	8,75E-03	9,47E-07			
7 - a		82,4	1,05E-02	6,38E-07			
8 - b		82,4	1,05E-02	8,69E-07			
9 - c		82,4	1,05E-02	6,77E-07			
10 - a		94,0	1,29E-02	1,28E-06			
11 - b		94,0	1,29E-02	1,29E-06			
12 - c		94,0	1,29E-02	1,59E-06			
		Vakiot			Δv	Kosteusvirran tiheyden yhtälö	
		b_1	b_2	a_1			
lineaarinen malli		8,8684E-05	-	-	[0...0,013]	$g = b_1 \Delta v$	
polynomimalli		-	-	-		$g = b_1 \Delta v + b_2 \Delta v^2$	
eksponentiaalinen malli		-	-	6,4374E-05	[0...0,0057]	$g_1 = a_1 \Delta v$	
		1,3546E-07	174,824071	-	[0,0057...0,0129]	$g_2 = b_1 e^{b_2 \Delta v}$	
Vesihöyrynläpäisykerroin W_v				Vesihöyrynvastus Z_v			

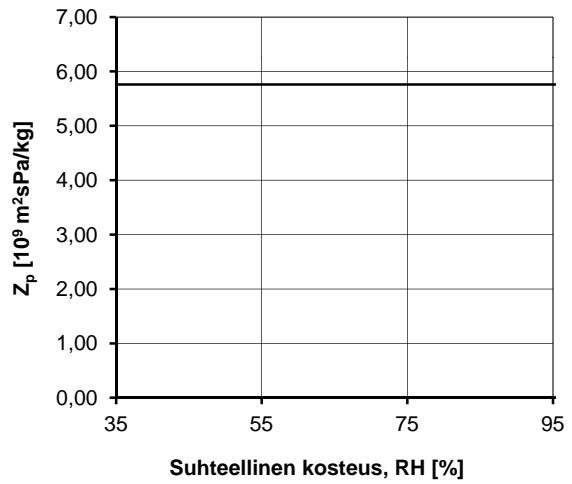
RK_U	Rakentajan kovalevy	Materiaalin kuivatiheys 900-1000 * [kg/m ³] * Kirjallisuusarvo																					
<p style="text-align: center;">Vesihöyrynläpäisykerroin W_p</p>  <p style="text-align: center;">Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>	<p style="text-align: center;">Vesihöyrynvastus Z_p</p>  <p style="text-align: center;">Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>																						
<p style="text-align: center;">Vesihöyrynläpäisevyys δ_v</p>  <p style="text-align: center;">Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>	<p style="text-align: center;">Vesihöyrynläpäisevyys δ_p</p>  <p style="text-align: center;">Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>																						
<p style="text-align: center;">Vesihöyryn diffuusiiovastuskerroin μ</p>  <p style="text-align: center;">Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>	<p style="text-align: center;">Kaavoja</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$</td> <td>[kg/m³]</td> </tr> <tr> <td>$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$</td> <td>[m/s]</td> </tr> <tr> <td>$Z_v = 1 / W_v$</td> <td>[s/m]</td> </tr> <tr> <td>$\delta_v = W_v d$</td> <td>[m²/s]</td> </tr> <tr> <td>$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$</td> <td>[kg/m²sPa]</td> </tr> <tr> <td>$Z_p = 1 / W_p$</td> <td>[m²sPa/kg]</td> </tr> <tr> <td>$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$</td> <td>[kg/msPa]</td> </tr> <tr> <td>$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$</td> <td>[-]</td> </tr> <tr> <td>$\delta_{p, ilma} = n \cdot 201 \times 10^{-12}$</td> <td>[kg/msPa]</td> </tr> <tr> <td>$R = 8314,3$</td> <td>[J/kmolK]</td> </tr> <tr> <td>$M_v = 18,02$</td> <td>[kg/kmol]</td> </tr> </table>	$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$	[kg/m ³]	$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$	[m/s]	$Z_v = 1 / W_v$	[s/m]	$\delta_v = W_v d$	[m ² /s]	$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/m ² sPa]	$Z_p = 1 / W_p$	[m ² sPa/kg]	$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/msPa]	$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$	[-]	$\delta_{p, ilma} = n \cdot 201 \times 10^{-12}$	[kg/msPa]	$R = 8314,3$	[J/kmolK]	$M_v = 18,02$	[kg/kmol]
$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$	[kg/m ³]																						
$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$	[m/s]																						
$Z_v = 1 / W_v$	[s/m]																						
$\delta_v = W_v d$	[m ² /s]																						
$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/m ² sPa]																						
$Z_p = 1 / W_p$	[m ² sPa/kg]																						
$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/msPa]																						
$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$	[-]																						
$\delta_{p, ilma} = n \cdot 201 \times 10^{-12}$	[kg/msPa]																						
$R = 8314,3$	[J/kmolK]																						
$M_v = 18,02$	[kg/kmol]																						

PUR_U Polyuretaani PUR					Lämpötilan keskiarvo kokeen aikana	22,8	[°C]
					Vesihöyryn kyllästyskosteus v_k	20,3	[g/m ³]
tunnus	uRH [%]	sRH [%]	Δv	g	<p>Kosteusvirran tiheys g</p>		
			[kg/m ³]	[kg/m ² s]			
			X_i	Y_i			
1 - a	uRH, keskiarvo 31 %	53,2	4,54E-03	8,38E-08			
2 - b		53,2	4,54E-03	7,87E-08			
3 - c		53,2	4,54E-03	8,63E-08			
4 - a		75,1	9,00E-03	2,52E-07			
5 - b		75,1	9,00E-03	2,03E-07			
6 - c		75,1	9,00E-03	2,18E-07			
7 - a		83,6	1,07E-02	2,55E-07			
8 - b		83,6	1,07E-02	2,55E-07			
9 - c		83,6	1,07E-02	2,87E-07			
10 - a		97,0	1,34E-02	3,40E-07			
11 - b		97,0	1,34E-02	2,91E-07			
12 - c		97,0	1,34E-02	2,99E-07			
		Vakiot			Δv	Kosteusvirran tiheyden yhtälö	
		b_1	b_2	a_1			
lineaarinen malli		2,3699E-05	-	-	[0...0,013]	$g = b_1 \Delta v$	
polynomimalli		-	-	-		$g = b_1 \Delta v + b_2 \Delta v^2$	
eksponentiaalinen malli		-	-	-		$g_1 = a_1 \Delta v$	
		-	-	-		$g_2 = b_1 e^{b_2 \Delta v}$	
<p>Vesihöyrynläpäisykerroin W_v</p>					<p>Vesihöyrynvastus Z_v</p>		

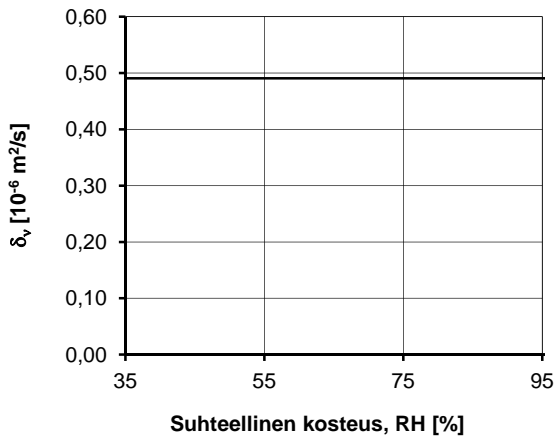
Vesihöyrynläpäisykerroin W_p



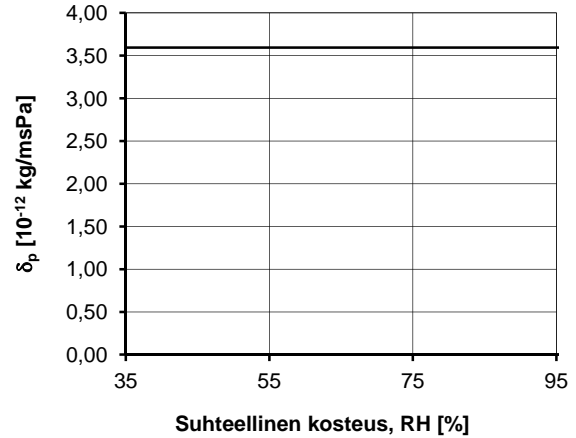
Vesihöyrynvastus Z_p



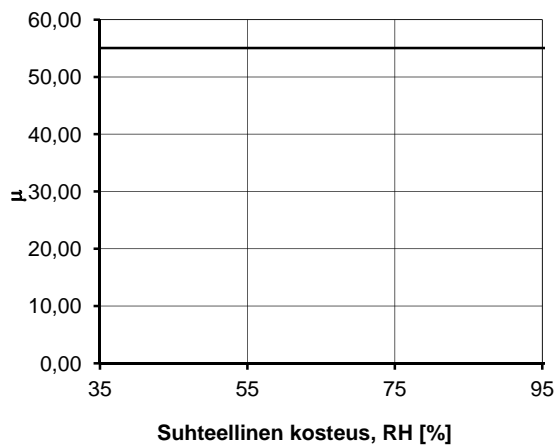
Vesihöyrynläpäisevyys δ_v



Vesihöyrynläpäisevyys δ_p



Vesihöyryn diffusiovastuskerroin μ



Kaavoja

$$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k \quad [\text{kg/m}^3]$$

$$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v) \quad [\text{m/s}]$$

$$Z_v = 1 / W_v \quad [\text{s/m}]$$

$$\delta_v = W_v d \quad [\text{m}^2/\text{s}]$$

$$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t) \quad [\text{kg/m}^2\text{sPa}]$$

$$Z_p = 1 / W_p \quad [\text{m}^2\text{sPa/kg}]$$

$$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t) \quad [\text{kg/msPa}]$$

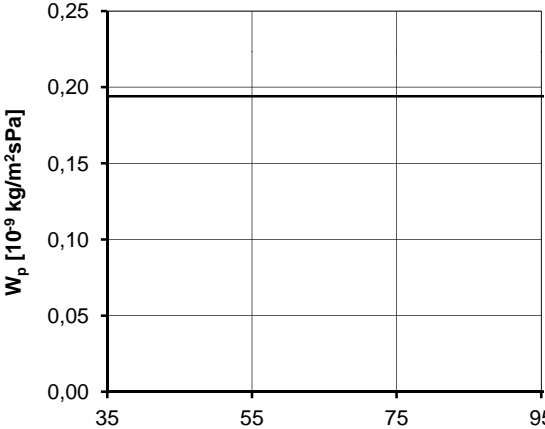
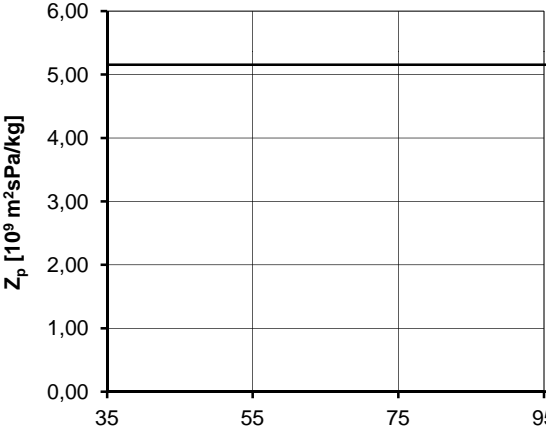
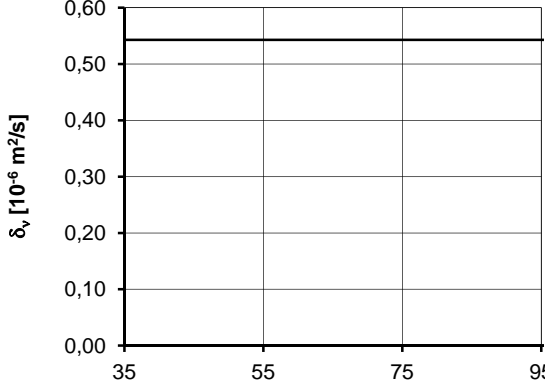
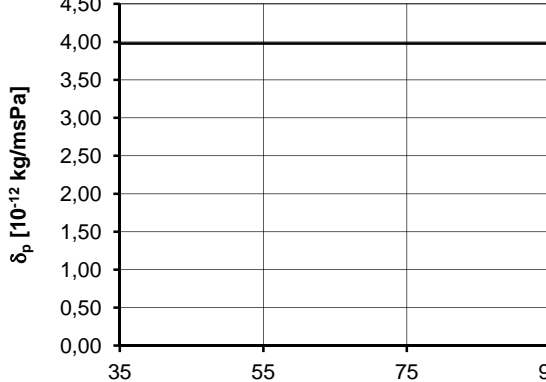
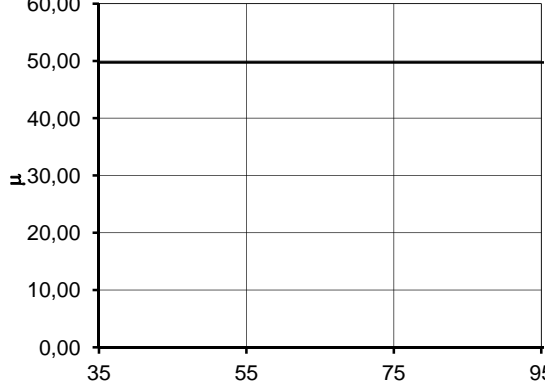
$$\mu = \delta_{p, \text{ilma}} / \delta_p \quad [-]$$

$$\delta_{p, \text{ilma}} = n \cdot 198 \times 10^{-12} \quad [\text{kg/msPa}]$$

$$R = 8314,3 \quad [\text{J/kmolK}]$$

$$M_v = 18,02 \quad [\text{kg/kmol}]$$

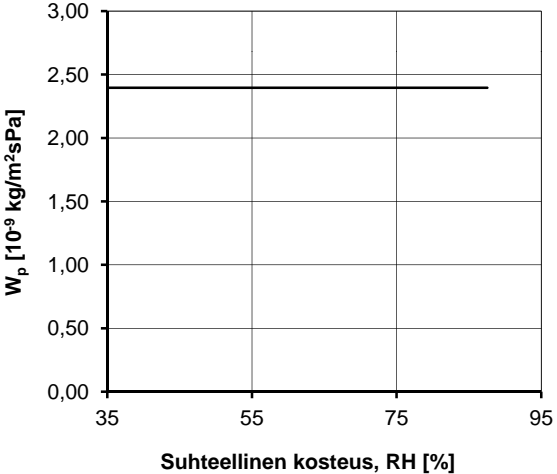
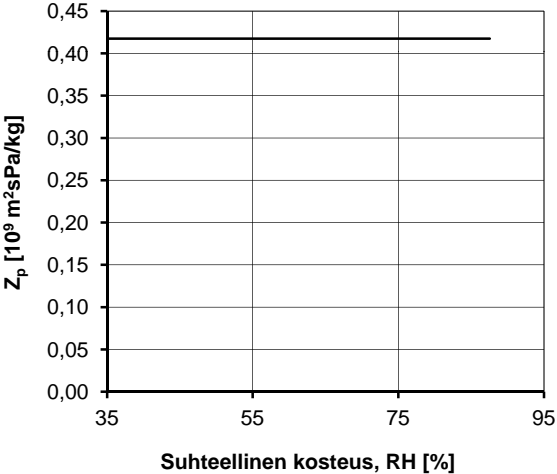
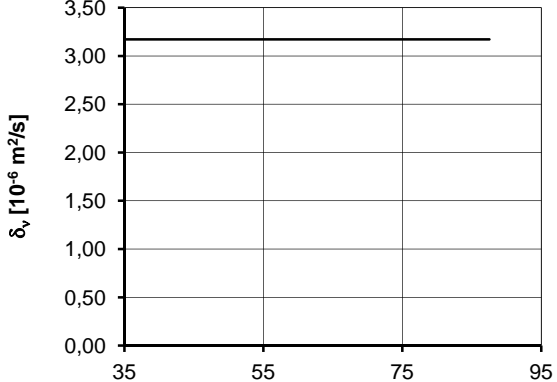
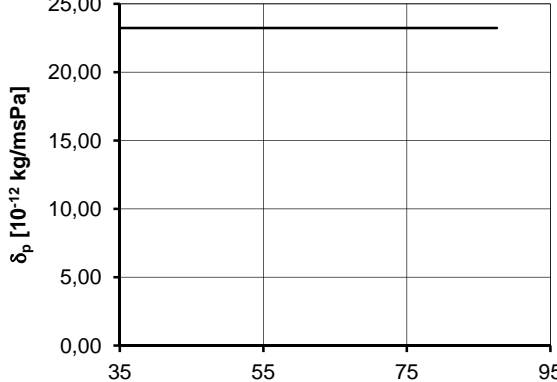
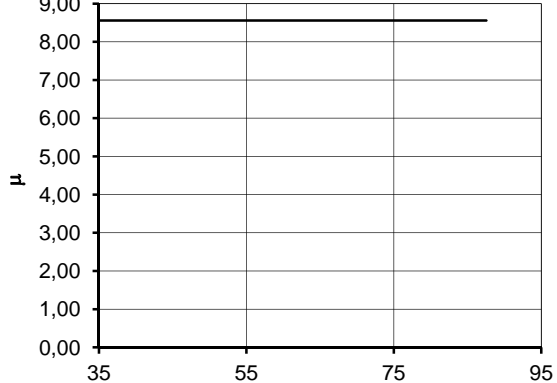
PIR_U		Polyuretaani PIR			Lämpötilan keskiarvo kokeen aikana	22,8	[°C]
					Vesihöyryn kyllästyskosteus v_k	20,3	[g/m ³]
tunnus	uRH [%]	sRH [%]	Δv	g	<p>Kosteusvirran tiheys g</p>		
			[kg/m ³]	[kg/m ² s]			
			X_i	Y_i			
1 - a	uRH, keskiarvo 31 %	53,1	4,53E-03	9,50E-08			
2 - b		53,1	4,53E-03	1,02E-07			
3 - c		53,1	4,53E-03	1,03E-07			
4 - a		75,1	9,00E-03	2,27E-07			
5 - b		75,1	9,00E-03	2,12E-07			
6 - c		75,1	9,00E-03	2,03E-07			
7 - a		83,6	1,07E-02	2,89E-07			
8 - b		83,6	1,07E-02	2,54E-07			
9 - c		83,6	1,07E-02	2,88E-07			
10 - a		96,8	1,34E-02	3,87E-07			
11 - b		96,8	1,34E-02	3,89E-07			
12 - c		96,8	1,34E-02	3,76E-07			
		Vakiot			Δv	Kosteusvirran tiheyden yhtälö	
		b_1	b_2	a_1			
lineaarinen malli		2,6483E-05	-	-	[0...0,013]	$g = b_1 \Delta v$	
polynomimalli		-	-	-		$g = b_1 \Delta v + b_2 \Delta v^2$	
eksponentiaalinen malli		-	-	-		$g_1 = a_1 \Delta v$	
		-	-	-		$g_2 = b_1 e^{b_2 \Delta v}$	
<p>Vesihöyrynläpäisykerroin W_v</p>				<p>Vesihöyrynvastus Z_v</p>			

PIR_U	Polyuretaani PIR	Materiaalin kuivatiheys 32-38 * [kg/m ³]																							
		* Kirjallisuusarvo																							
<p style="text-align: center;">Vesihöyrynläpäisykerroin W_p</p>  <p style="text-align: center;">Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>		<p style="text-align: center;">Vesihöyrynvastus Z_p</p>  <p style="text-align: center;">Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>																							
<p style="text-align: center;">Vesihöyrynläpäisevyys δ_v</p>  <p style="text-align: center;">Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>		<p style="text-align: center;">Vesihöyrynläpäisevyys δ_p</p>  <p style="text-align: center;">Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>																							
<p style="text-align: center;">Vesihöyryn diffusiovastuskerroin μ</p>  <p style="text-align: center;">Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>		<p style="text-align: center;">Kaavoja</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$</td> <td>[kg/m³]</td> </tr> <tr> <td>$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$</td> <td>[m/s]</td> </tr> <tr> <td>$Z_v = 1 / W_v$</td> <td>[s/m]</td> </tr> <tr> <td>$\delta_v = W_v d$</td> <td>[m²/s]</td> </tr> <tr> <td>$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$</td> <td>[kg/m²sPa]</td> </tr> <tr> <td>$Z_p = 1 / W_p$</td> <td>[m²sPa/kg]</td> </tr> <tr> <td>$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$</td> <td>[kg/msPa]</td> </tr> <tr> <td>$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$</td> <td>[-]</td> </tr> <tr> <td>$\delta_{p, ilma} = n \cdot 198 \times 10^{-12}$</td> <td>[kg/msPa]</td> </tr> <tr> <td>$R = 8314,3$</td> <td>[J/kmolK]</td> </tr> <tr> <td>$M_v = 18,02$</td> <td>[kg/kmol]</td> </tr> </table>		$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$	[kg/m ³]	$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$	[m/s]	$Z_v = 1 / W_v$	[s/m]	$\delta_v = W_v d$	[m ² /s]	$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/m ² sPa]	$Z_p = 1 / W_p$	[m ² sPa/kg]	$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/msPa]	$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$	[-]	$\delta_{p, ilma} = n \cdot 198 \times 10^{-12}$	[kg/msPa]	$R = 8314,3$	[J/kmolK]	$M_v = 18,02$	[kg/kmol]
$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$	[kg/m ³]																								
$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$	[m/s]																								
$Z_v = 1 / W_v$	[s/m]																								
$\delta_v = W_v d$	[m ² /s]																								
$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/m ² sPa]																								
$Z_p = 1 / W_p$	[m ² sPa/kg]																								
$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/msPa]																								
$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$	[-]																								
$\delta_{p, ilma} = n \cdot 198 \times 10^{-12}$	[kg/msPa]																								
$R = 8314,3$	[J/kmolK]																								
$M_v = 18,02$	[kg/kmol]																								

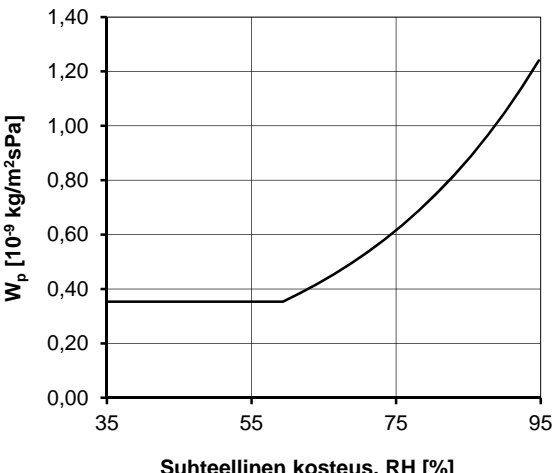
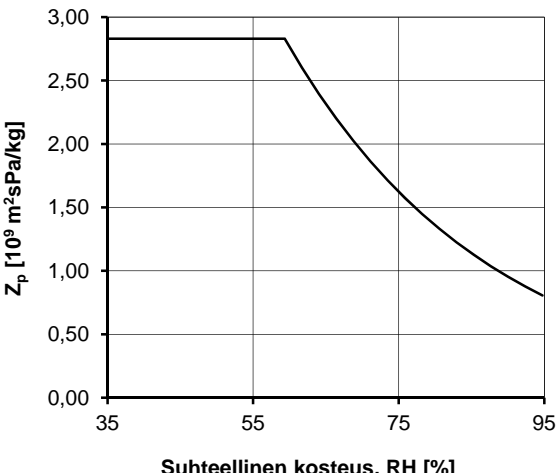
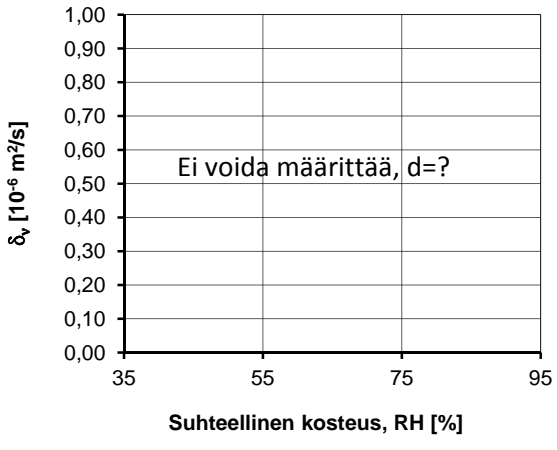
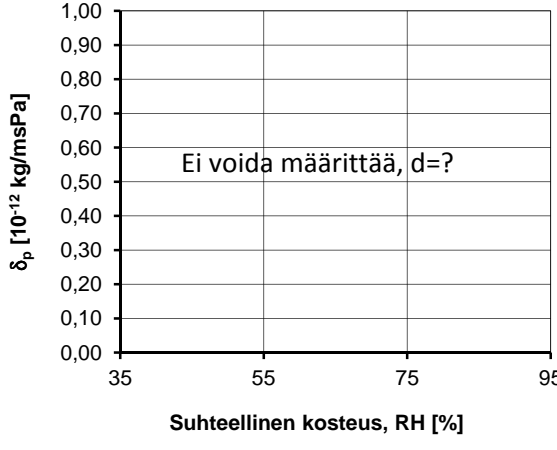
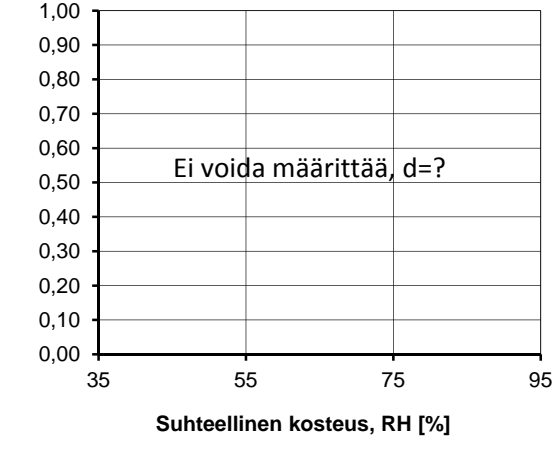
HSM_U Höyrynsulkumuovi				Lämpötilan keskiarvo kokeen aikana	22,8	[°C]		
				Vesihöyryn kyllästyskosteus v_k	20,4	[g/m ³]		
tunnus	uRH [%]	sRH [%]	Δv	g	<p>Kosteusvirran tiheys g</p>			
			[kg/m ³]	[kg/m ² s]				
			X_i	Y_i				
1 - a	uRH, keskiarvo 31 %	54,0	4,70E-03	1,49E-09				
2 - b		54,0	4,70E-03	1,83E-09				
3 - c		54,0	4,70E-03	1,77E-09				
4 - a		75,2	9,02E-03	2,61E-09				
5 - b		75,2	9,02E-03	2,74E-09				
6 - c		75,2	9,02E-03	2,63E-09				
7 - a		84,6	1,09E-02	3,11E-09				
8 - b		84,6	1,09E-02	3,15E-09				
9 - c		84,6	1,09E-02	3,07E-09				
10 - a		97,3	1,35E-02	3,73E-09				
11 - b		97,3	1,35E-02	3,74E-09				
12 - c		97,3	1,35E-02	3,95E-09				
		Vakiot			Δv	Kosteusvirran tiheyden yhtälö		
		b_1	b_2	a_1				
lineaarinen malli		2,8957E-07	-	-	[0...0,014]	$g = b_1 \Delta v$		
polynomimalli		-	-	-		$g = b_1 \Delta v + b_2 \Delta v^2$		
eksponentiaalinen malli		-	-	-		$g_1 = a_1 \Delta v$		
		-	-	-		$g_2 = b_1 e^{b_2 \Delta v}$		
<p>Vesihöyrynläpäisykerroin W_v</p>				<p>Vesihöyrynvastus Z_v</p>				

HSM_U Höyrinsulkumuovi		Materiaalin kuivatiheys	980 *	[kg/m ³]																						
		* Kirjallisuusarvo																								
<p>Vesihöyrynläpäisykerroin W_p</p> <p>Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>		<p>Vesihöyrynvastus Z_p</p> <p>Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>																								
<p>Vesihöyrynläpäisevyys δ_v</p> <p>Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>		<p>Vesihöyrynläpäisevyys δ_p</p> <p>Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>																								
<p>Vesihöyry diffusioivastuskerroin μ</p> <p>Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>		<p>Kaavoja</p> <table border="1"> <tr> <td>$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$</td> <td>[kg/m³]</td> </tr> <tr> <td>$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$</td> <td>[m/s]</td> </tr> <tr> <td>$Z_v = 1 / W_v$</td> <td>[s/m]</td> </tr> <tr> <td>$\delta_v = W_v d$</td> <td>[m²/s]</td> </tr> <tr> <td>$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$</td> <td>[kg/m²sPa]</td> </tr> <tr> <td>$Z_p = 1 / W_p$</td> <td>[m²sPa/kg]</td> </tr> <tr> <td>$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$</td> <td>[kg/msPa]</td> </tr> <tr> <td>$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$</td> <td>[-]</td> </tr> <tr> <td>$\delta_{p, ilma} = n \cdot 199 \times 10^{-12}$</td> <td>[kg/msPa]</td> </tr> <tr> <td>$R = 8314,3$</td> <td>[J/kmolK]</td> </tr> <tr> <td>$M_v = 18,02$</td> <td>[kg/kmol]</td> </tr> </table>			$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$	[kg/m ³]	$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$	[m/s]	$Z_v = 1 / W_v$	[s/m]	$\delta_v = W_v d$	[m ² /s]	$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/m ² sPa]	$Z_p = 1 / W_p$	[m ² sPa/kg]	$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/msPa]	$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$	[-]	$\delta_{p, ilma} = n \cdot 199 \times 10^{-12}$	[kg/msPa]	$R = 8314,3$	[J/kmolK]	$M_v = 18,02$	[kg/kmol]
$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$	[kg/m ³]																									
$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$	[m/s]																									
$Z_v = 1 / W_v$	[s/m]																									
$\delta_v = W_v d$	[m ² /s]																									
$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/m ² sPa]																									
$Z_p = 1 / W_p$	[m ² sPa/kg]																									
$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/msPa]																									
$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$	[-]																									
$\delta_{p, ilma} = n \cdot 199 \times 10^{-12}$	[kg/msPa]																									
$R = 8314,3$	[J/kmolK]																									
$M_v = 18,02$	[kg/kmol]																									

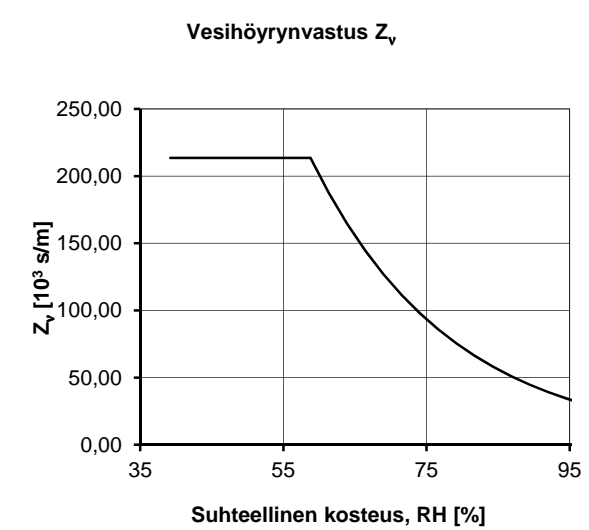
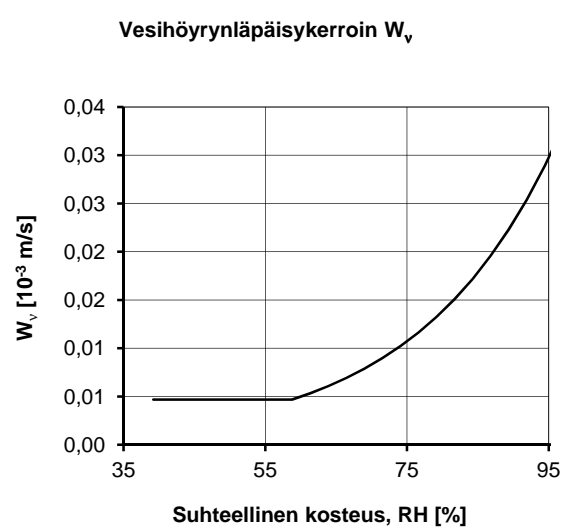
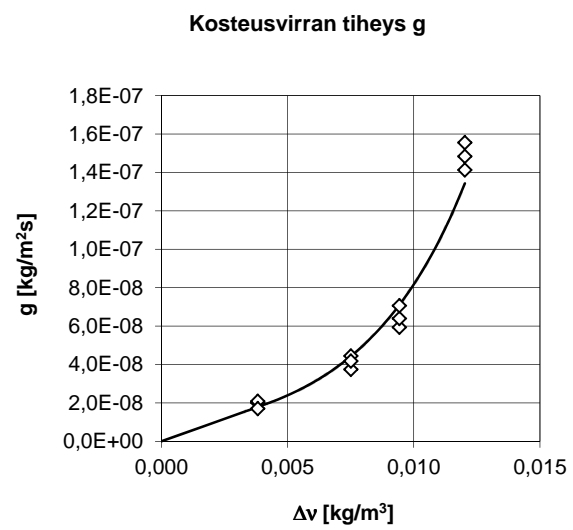
KL	Gyproc TS 9 mm				Lämpötilan keskiarvo kokeen aikana	22,9	[°C]
					Vesihöyryn kyllästyskosteus v_k	20,5	[g/m ³]
tunnus	uRH [%]	sRH [%]	Δv	g	Kosteusvirran tiheys g 		
			[kg/m ³]	[kg/m ² s]			
			X_i	Y_i			
1 - a	uRH, keskiarvo 32 %	54,0	4,52E-03	1,53E-06			
2 - b		54,0	4,52E-03	1,55E-06			
3 - c		54,0	4,52E-03	1,57E-06			
4 - a		68,7	7,52E-03	2,56E-06			
5 - b		68,7	7,52E-03	2,44E-06			
6 - c		68,7	7,52E-03	2,46E-06			
7 - a		76,5	9,13E-03	3,00E-06			
8 - b		76,5	9,13E-03	2,91E-06			
9 - c		76,5	9,13E-03	3,16E-06			
10 - a		87,6	1,14E-02	3,63E-06			
11 - b		87,6	1,14E-02	3,63E-06			
12 - c		87,6	1,14E-02	3,67E-06			
		Vakiot			Δv	Kosteusvirran tiheyden yhtälö	
		b_1	b_2	a_1			
lineaarinen malli		0,00032708	-	-	[0...0,011]	$g = b_1 \Delta v$	
polynomimalli		-	-	-		$g = b_1 \Delta v + b_2 \Delta v^2$	
eksponentiaalinen malli		-	-	-		$g_1 = a_1 \Delta v$	
		-	-	-		$g_2 = b_1 e^{b_2 \Delta v}$	
Vesihöyrynläpäisykerroin W_v				Vesihöyrynvastus Z_v			

KL	Gyproc TS 9 mm	Materiaalin kuivatiheys 774 [kg/m³]																						
<p style="text-align: center;">Vesihöyrynläpäisykerroin W_p</p> 		<p style="text-align: center;">Vesihöyrynvastus Z_p</p> 																						
<p style="text-align: center;">Vesihöyrynläpäisevyys δ_v</p> 		<p style="text-align: center;">Vesihöyrynläpäisevyys δ_p</p> 																						
<p style="text-align: center;">Vesihöyryn diffuusiiovastuskerroin μ</p> 	<p style="text-align: center;">Kaavoja</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$</td> <td style="text-align: right;">[kg/m³]</td> </tr> <tr> <td>$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$</td> <td style="text-align: right;">[m/s]</td> </tr> <tr> <td>$Z_v = 1 / W_v$</td> <td style="text-align: right;">[s/m]</td> </tr> <tr> <td>$\delta_v = W_v d$</td> <td style="text-align: right;">[m²/s]</td> </tr> <tr> <td>$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$</td> <td style="text-align: right;">[kg/m²sPa]</td> </tr> <tr> <td>$Z_p = 1 / W_p$</td> <td style="text-align: right;">[m²sPa/kg]</td> </tr> <tr> <td>$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$</td> <td style="text-align: right;">[kg/msPa]</td> </tr> <tr> <td>$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$</td> <td style="text-align: right;">[-]</td> </tr> <tr> <td>$\delta_{p, ilma} = n \cdot 199 \times 10^{-12}$</td> <td style="text-align: right;">[kg/msPa]</td> </tr> <tr> <td>$R = 8314,3$</td> <td style="text-align: right;">[J/kmolK]</td> </tr> <tr> <td>$M_v = 18,02$</td> <td style="text-align: right;">[kg/kmol]</td> </tr> </table>		$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$	[kg/m ³]	$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$	[m/s]	$Z_v = 1 / W_v$	[s/m]	$\delta_v = W_v d$	[m ² /s]	$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/m ² sPa]	$Z_p = 1 / W_p$	[m ² sPa/kg]	$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/msPa]	$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$	[-]	$\delta_{p, ilma} = n \cdot 199 \times 10^{-12}$	[kg/msPa]	$R = 8314,3$	[J/kmolK]	$M_v = 18,02$	[kg/kmol]
$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$	[kg/m ³]																							
$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$	[m/s]																							
$Z_v = 1 / W_v$	[s/m]																							
$\delta_v = W_v d$	[m ² /s]																							
$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/m ² sPa]																							
$Z_p = 1 / W_p$	[m ² sPa/kg]																							
$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/msPa]																							
$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$	[-]																							
$\delta_{p, ilma} = n \cdot 199 \times 10^{-12}$	[kg/msPa]																							
$R = 8314,3$	[J/kmolK]																							
$M_v = 18,02$	[kg/kmol]																							

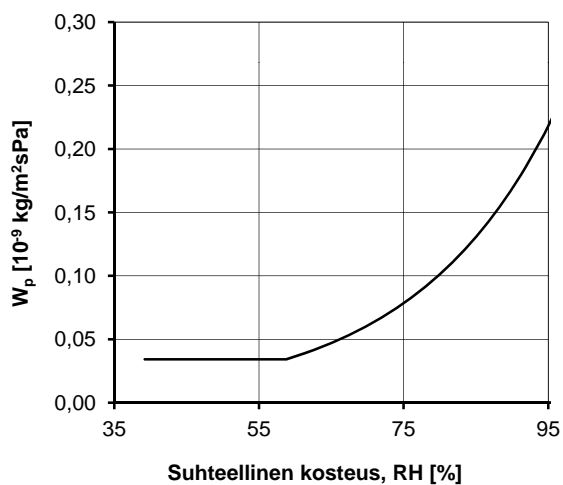
Eko		Ekovilla 5 x höyrinsulku			Lämpötilan keskiarvo kokeen aikana	22,9	[°C]	
					Vesihöyryn kyllästyskosteus v_k	20,4	[g/m ³]	
tunnus	uRH [%]	sRH [%]	Δv	g	<div style="text-align: center;"> Kosteusvirran tiheys g </div>			
			[kg/m ³]	[kg/m ² s]				
X_i	Y_i							
4 - a	uRH, keskiarvo 31 %	74,1	8,76E-03	4,72E-07				
5 - b		74,1	8,76E-03	4,71E-07				
6 - c		74,1	8,76E-03	4,69E-07				
7 - a		82,9	1,06E-02	6,07E-07				
8 - b		82,9	1,06E-02	6,19E-07				
9 - c		82,9	1,06E-02	6,81E-07				
10 - a		94,7	1,30E-02	9,84E-07				
11 - b		94,7	1,30E-02	1,02E-06				
12 - c		94,7	1,30E-02	9,35E-07				
		Vakiot			Δv	Kosteusvirran tiheyden yhtälö		
		b_1	b_2	a_1				
lineaarinen malli			6,5979E-05	-	-	[0...0,013]	$g = b_1 \Delta v$	
polynomimalli		-	-	-		$g = b_1 \Delta v + b_2 \Delta v^2$		
eksponentiaalinen malli		-	-	4,8254E-05	[0...0,0058]	$g_1 = a_1 \Delta v$		
		1,0213E-07	173,819943	-	[0,0058...0,0130]	$g_2 = b_1 e^{b_2 \Delta v}$		
Vesihöyrynläpäisykerroin W_v				Vesihöyrynvastus Z_v				

Eko	Ekovilla 5 x höyrynsulku	Materiaalin kuivatiheys 767 * [kg/m ³] * Kirjallisuusarvo																						
<p style="text-align: center;">Vesihöyrynläpäisykerroin W_p</p> 		<p style="text-align: center;">Vesihöyrynvastus Z_p</p> 																						
<p style="text-align: center;">Vesihöyrynläpäisevyys δ_v</p> 		<p style="text-align: center;">Vesihöyrynläpäisevyys δ_p</p> 																						
<p style="text-align: center;">Vesihöyryn diffusiovastuskerroin μ</p> 	<p style="text-align: center;">Kaavoja</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$</td> <td>[kg/m³]</td> </tr> <tr> <td>$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$</td> <td>[m/s]</td> </tr> <tr> <td>$Z_v = 1 / W_v$</td> <td>[s/m]</td> </tr> <tr> <td>$\delta_v = W_v d$</td> <td>[m²/s]</td> </tr> <tr> <td>$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$</td> <td>[kg/m²sPa]</td> </tr> <tr> <td>$Z_p = 1 / W_p$</td> <td>[m²sPa/kg]</td> </tr> <tr> <td>$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$</td> <td>[kg/msPa]</td> </tr> <tr> <td>$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$</td> <td>[-]</td> </tr> <tr> <td>$\delta_{p, ilma} = n \cdot 199 \times 10^{-12}$</td> <td>[kg/msPa]</td> </tr> <tr> <td>$R = 8314,3$</td> <td>[J/kmolK]</td> </tr> <tr> <td>$M_v = 18,02$</td> <td>[kg/kmol]</td> </tr> </table>		$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$	[kg/m ³]	$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$	[m/s]	$Z_v = 1 / W_v$	[s/m]	$\delta_v = W_v d$	[m ² /s]	$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/m ² sPa]	$Z_p = 1 / W_p$	[m ² sPa/kg]	$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/msPa]	$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$	[-]	$\delta_{p, ilma} = n \cdot 199 \times 10^{-12}$	[kg/msPa]	$R = 8314,3$	[J/kmolK]	$M_v = 18,02$	[kg/kmol]
$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$	[kg/m ³]																							
$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$	[m/s]																							
$Z_v = 1 / W_v$	[s/m]																							
$\delta_v = W_v d$	[m ² /s]																							
$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/m ² sPa]																							
$Z_p = 1 / W_p$	[m ² sPa/kg]																							
$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/msPa]																							
$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$	[-]																							
$\delta_{p, ilma} = n \cdot 199 \times 10^{-12}$	[kg/msPa]																							
$R = 8314,3$	[J/kmolK]																							
$M_v = 18,02$	[kg/kmol]																							

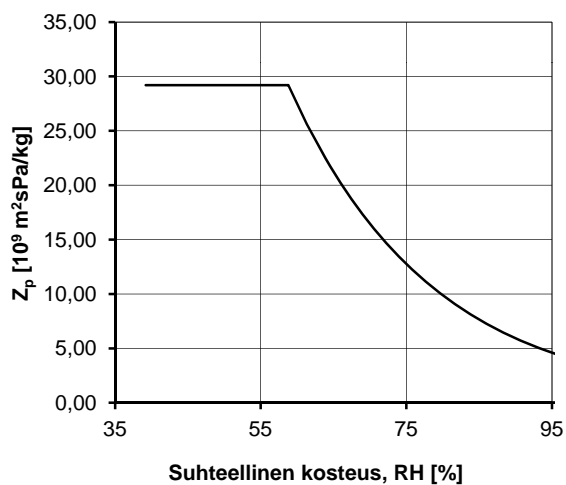
C20/25 <i>Betoni C20/25</i>		Lämpötilan keskiarvo kokeen aikana 23,2 [°C]		
		Vesihöyryn kyllästyskosteus v_k 20,8 [g/m ³]		
tunnus	uRH [%]	sRH [%]	Δv	g
			[kg/m ³]	[kg/m ² s]
			X_i	Y_i
1 - a	uRH, keskiarvo 39 %	57,5	3,82E-03	2,00E-08
2 - b		57,5	3,82E-03	2,08E-08
3 - c		57,5	3,82E-03	1,71E-08
4 - a		75,3	7,51E-03	4,45E-08
5 - b		75,3	7,51E-03	3,75E-08
6 - c		75,3	7,51E-03	4,18E-08
7 - a		84,5	9,43E-03	5,93E-08
8 - b		84,5	9,43E-03	6,40E-08
9 - c		84,5	9,43E-03	7,06E-08
10 - a		97,0	1,20E-02	1,41E-07
11 - b		97,0	1,20E-02	1,56E-07
12 - c		97,0	1,20E-02	1,48E-07
		Vakiot		
		b_1	b_2	a_1
lineaarinen malli		9,1226E-06	-	-
polynomimalli		-	-	-
eksponentiaalinen malli		-	-	4,682E-06
		7,0185E-09	245,412523	-
		Δv	Kosteusvirran tiheyden yhtälö	
		[0...0,012]	$g = b_1 \Delta v$	
			$g = b_1 \Delta v + b_2 \Delta v^2$	
		[0...0,0041]	$g_1 = a_1 \Delta v$	
		[0,0041...0,0120]	$g_2 = b_1 e^{b_2 \Delta v}$	
		Vesihöyrynläpäisykerroin W_v		
		Vesihöyrynvastus Z_v		



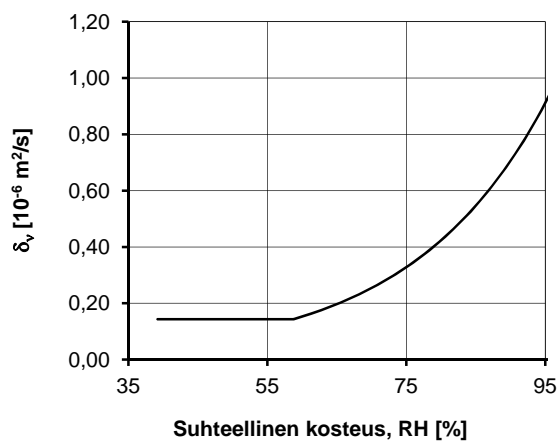
Vesihöyrynläpäisykerroin W_p



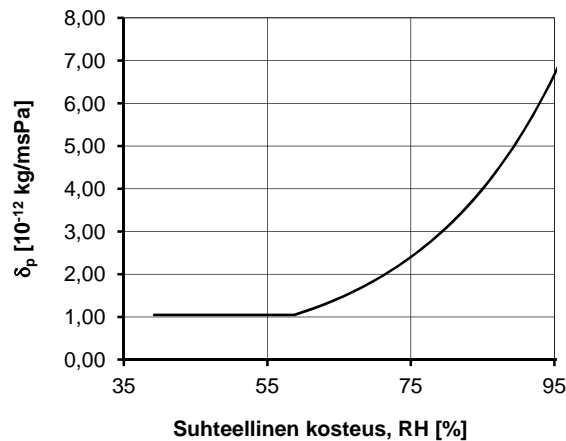
Vesihöyrynvastus Z_p



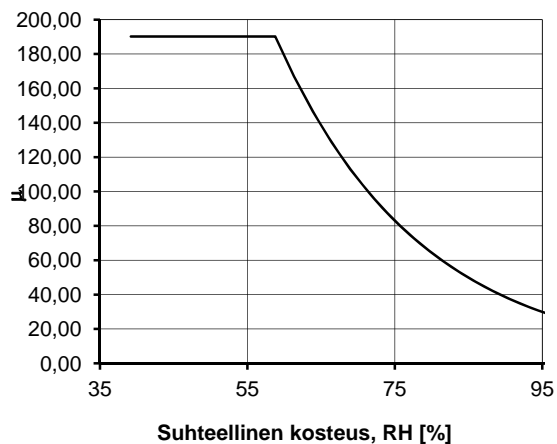
Vesihöyrynläpäisevyys δ_v



Vesihöyrynläpäisevyys δ_p



Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin μ



Kaavoja

$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$ [kg/m³]

$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$ [m/s]

$Z_v = 1 / W_v$ [s/m]

$\delta_v = W_v d$ [m²/s]

$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$ [kg/m²sPa]

$Z_p = 1 / W_p$ [m²sPa/kg]

$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$ [kg/msPa]

$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$ [-]

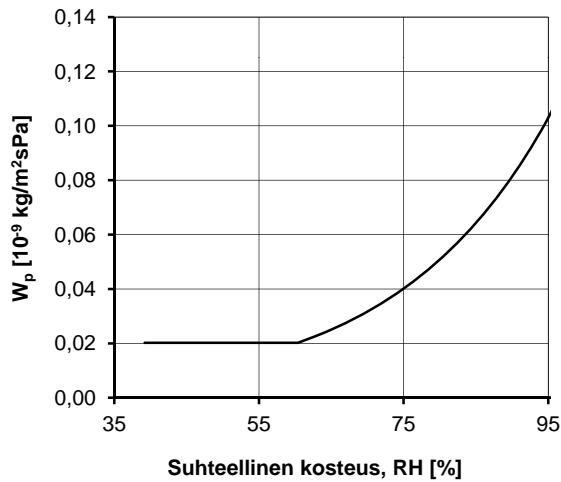
$\delta_{p, ilma} = n \cdot 199 \times 10^{-12}$ [kg/msPa]

$R = 8314,3$ [J/kmolK]

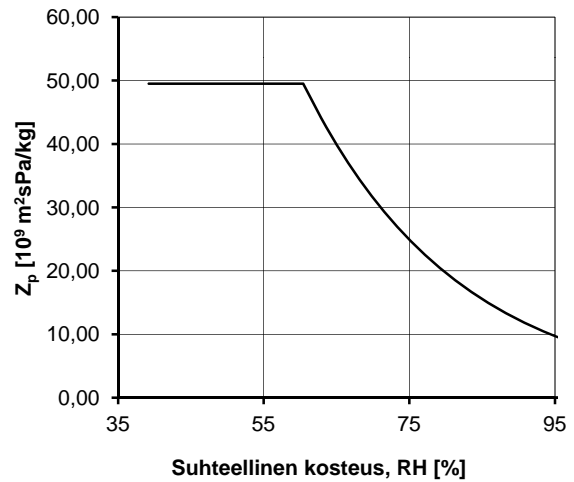
$M_v = 18,02$ [kg/kmol]

C32/40 <i>Betoni C32/40</i>		Lämpötilan keskiarvo kokeen aikana 23,2 [°C]		
		Vesihöyryn kyllästyskosteus v_k 20,8 [g/m ³]		
tunnus	uRH [%]	sRH [%]	Δv	g
			[kg/m ³]	[kg/m ² s]
			X_i	Y_i
1 - a	uRH, keskiarvo 39 %	57,6	3,82E-03	1,06E-08
2 - b		57,6	3,82E-03	1,03E-08
3 - c		57,6	3,82E-03	9,74E-09
4 - a		75,3	7,52E-03	2,40E-08
5 - b		75,3	7,52E-03	2,61E-08
6 - c		75,3	7,52E-03	2,37E-08
7 - a		84,6	9,44E-03	4,37E-08
8 - b		84,6	9,44E-03	4,51E-08
9 - c		84,6	9,44E-03	4,23E-08
10 - a		97,2	1,21E-02	6,09E-08
11 - b		97,2	1,21E-02	6,21E-08
12 - c		97,2	1,21E-02	6,58E-08
		Vakiot		
		b_1	b_2	a_1
lineaarinen malli		4,561E-06	-	-
polynomimalli		-	-	-
eksponentiaalinen malli		-	-	2,7608E-06
		4,4862E-09	226,392384	-
		Δv	Kosteusvirran tiheyden yhtälö	
		[0...0,012]	$g = b_1 \Delta v$	
			$g = b_1 \Delta v + b_2 \Delta v^2$	
		[0...0,0044]	$g_1 = a_1 \Delta v$	
		[0,0044...0,0121]	$g_2 = b_1 e^{b_2 \Delta v}$	
		Vesihöyrynläpäisykerroin W_v		
		Vesihöyrynvastus Z_v		

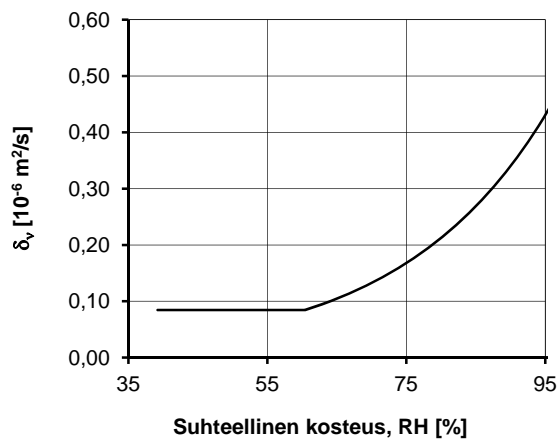
Vesihöyrynläpäisykerroin W_p



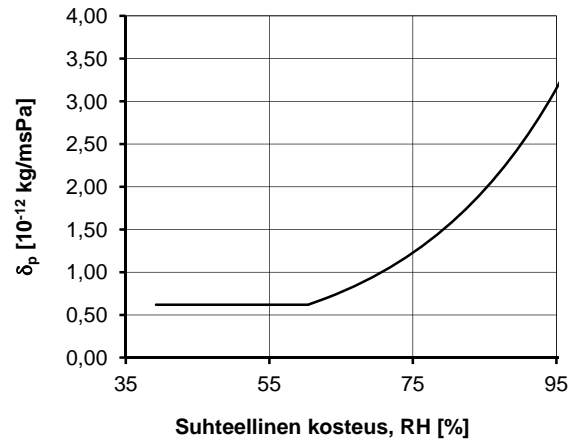
Vesihöyrynvastus Z_p



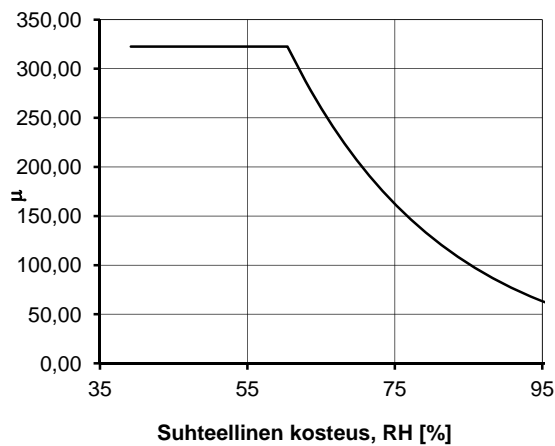
Vesihöyrynläpäisevyys δ_v



Vesihöyrynläpäisevyys δ_p



Vesihöyryn diffusiovastuskerroin μ



Kaavoja

$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$ [kg/m³]

$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$ [m/s]

$Z_v = 1 / W_v$ [s/m]

$\delta_v = W_v d$ [m²/s]

$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$ [kg/m²sPa]

$Z_p = 1 / W_p$ [m²sPa/kg]

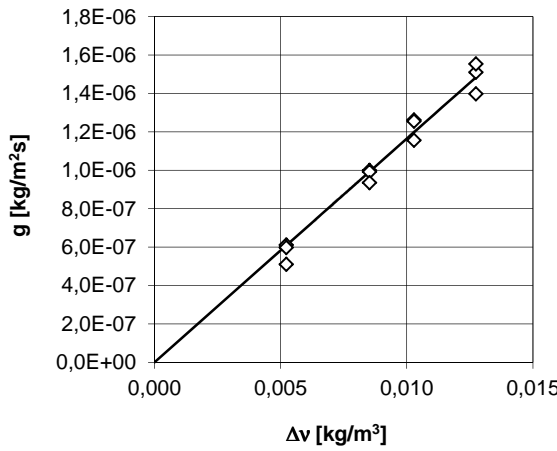
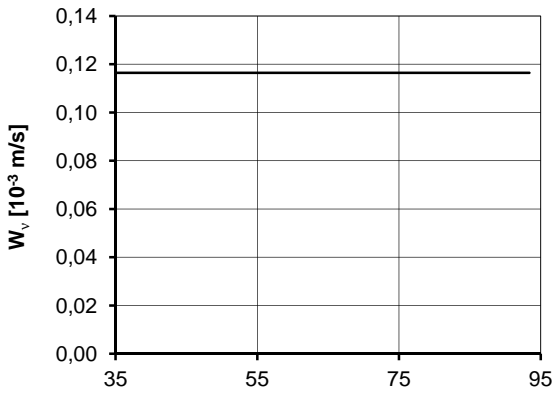
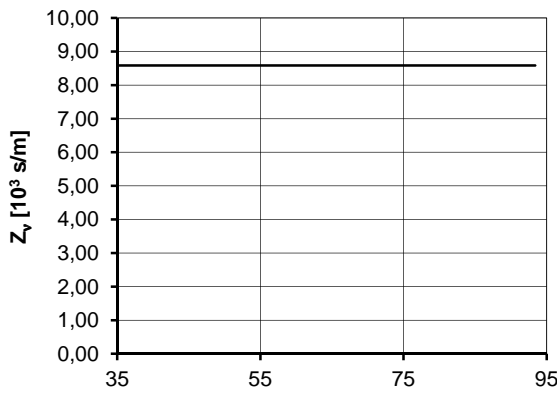
$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$ [kg/msPa]

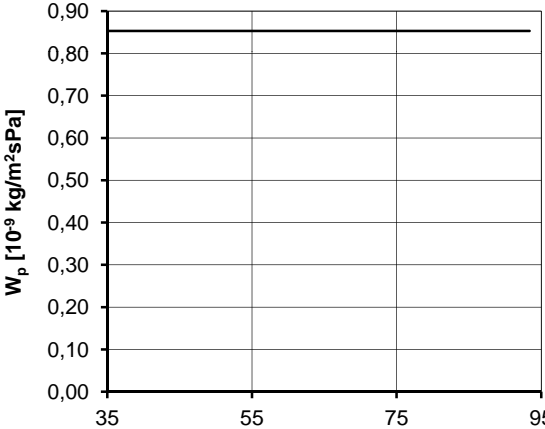
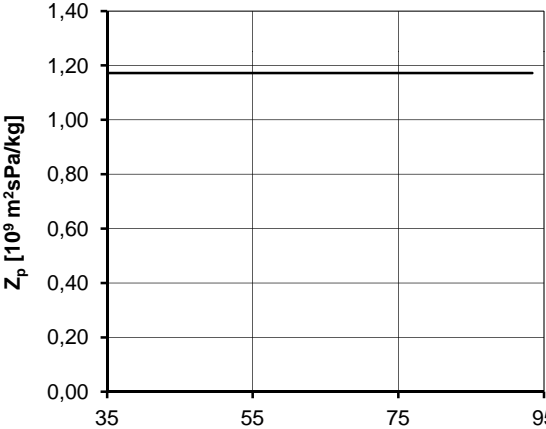
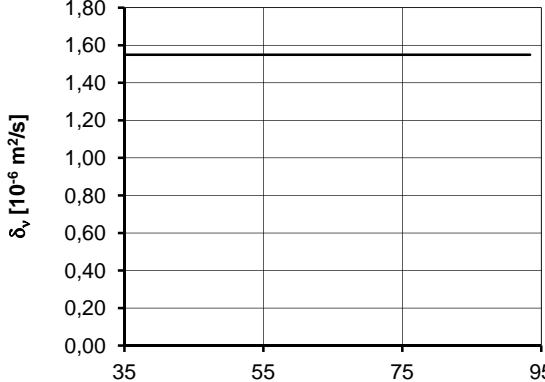
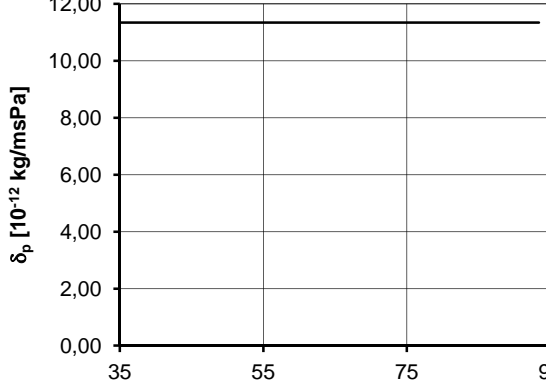
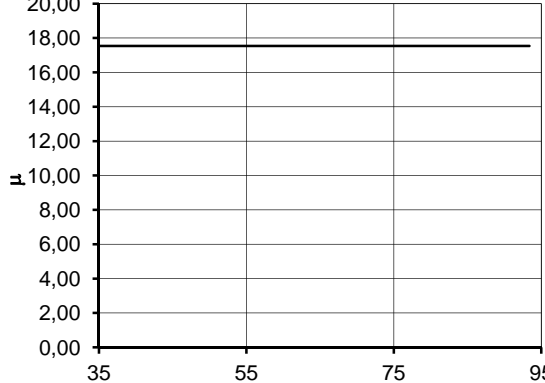
$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$ [-]

$\delta_{p, ilma} = n \cdot 199 \times 10^{-12}$ [kg/msPa]

$R = 8314,3$ [J/kmolK]

$M_v = 18,02$ [kg/kmol]

PT	Punatiili				Lämpötilan keskiarvo kokeen aikana	22,9	[°C]
					Vesihöyryn kyllästyskosteus v_k	20,5	[g/m ³]
tunnus	uRH [%]	sRH [%]	Δv	g	Kosteusvirran tiheys g 		
			[kg/m ³]	[kg/m ² s]			
X_i	Y_i						
1 - a	uRH, keskiarvo 31 %	56,7	5,23E-03	6,12E-07			
2 - b		56,7	5,23E-03	5,98E-07			
3 - c		56,7	5,23E-03	5,11E-07			
4 - a		72,8	8,52E-03	1,00E-06			
5 - b		72,8	8,52E-03	9,92E-07			
6 - c		72,8	8,52E-03	9,35E-07			
7 - a		81,4	1,03E-02	1,26E-06			
8 - b		81,4	1,03E-02	1,26E-06			
9 - c		81,4	1,03E-02	1,16E-06			
10 - a		93,4	1,27E-02	1,51E-06			
11 - b		93,4	1,27E-02	1,40E-06			
12 - c		93,4	1,27E-02	1,55E-06			
		Vakiot			Δv	Kosteusvirran tiheyden yhtälö	
		b_1	b_2	a_1			
lineaarinen malli		0,00011647	-	-	[0...0,013]	$g = b_1 \Delta v$	
polynomimalli		-	-	-		$g = b_1 \Delta v + b_2 \Delta v^2$	
eksponentiaalinen malli		-	-	-		$g_1 = a_1 \Delta v$	
		-	-	-		$g_2 = b_1 e^{b_2 \Delta v}$	
Vesihöyrynläpäisykerroin W_v					Vesihöyrynvastus Z_v		
							

PT	<i>Punatiili</i>	Materiaalin kuivatiheys 1860 [kg/m ³]																						
<p style="text-align: center;">Vesihöyrynläpäisykerroin W_p</p>  <p style="text-align: center;">Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>		<p style="text-align: center;">Vesihöyrynvastus Z_p</p>  <p style="text-align: center;">Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>																						
<p style="text-align: center;">Vesihöyrynläpäisevyys δ_v</p>  <p style="text-align: center;">Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>		<p style="text-align: center;">Vesihöyrynläpäisevyys δ_p</p>  <p style="text-align: center;">Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>																						
<p style="text-align: center;">Vesihöyryn diffusiovastuskerroin μ</p>  <p style="text-align: center;">Suhteellinen kosteus, RH [%]</p>		<p style="text-align: center;">Kaavoja</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$</td> <td>[kg/m³]</td> </tr> <tr> <td>$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$</td> <td>[m/s]</td> </tr> <tr> <td>$Z_v = 1 / W_v$</td> <td>[s/m]</td> </tr> <tr> <td>$\delta_v = W_v d$</td> <td>[m²/s]</td> </tr> <tr> <td>$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$</td> <td>[kg/m²sPa]</td> </tr> <tr> <td>$Z_p = 1 / W_p$</td> <td>[m²sPa/kg]</td> </tr> <tr> <td>$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$</td> <td>[kg/msPa]</td> </tr> <tr> <td>$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$</td> <td>[-]</td> </tr> <tr> <td>$\delta_{p, ilma} = n \cdot 199 \times 10^{-12}$</td> <td>[kg/msPa]</td> </tr> <tr> <td>$R = 8314,3$</td> <td>[J/kmolK]</td> </tr> <tr> <td>$M_v = 18,02$</td> <td>[kg/kmol]</td> </tr> </table>	$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$	[kg/m ³]	$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$	[m/s]	$Z_v = 1 / W_v$	[s/m]	$\delta_v = W_v d$	[m ² /s]	$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/m ² sPa]	$Z_p = 1 / W_p$	[m ² sPa/kg]	$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/msPa]	$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$	[-]	$\delta_{p, ilma} = n \cdot 199 \times 10^{-12}$	[kg/msPa]	$R = 8314,3$	[J/kmolK]	$M_v = 18,02$	[kg/kmol]
$\Delta v = ((\varphi_s - \varphi_u) / 100) v_k$	[kg/m ³]																							
$W_v(\Delta v) = \partial g / \partial(\Delta v)$	[m/s]																							
$Z_v = 1 / W_v$	[s/m]																							
$\delta_v = W_v d$	[m ² /s]																							
$W_p = W_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/m ² sPa]																							
$Z_p = 1 / W_p$	[m ² sPa/kg]																							
$\delta_p = \delta_v / (R / M_v) (273,15 + t)$	[kg/msPa]																							
$\mu = \delta_{p, ilma} / \delta_p$	[-]																							
$\delta_{p, ilma} = n \cdot 199 \times 10^{-12}$	[kg/msPa]																							
$R = 8314,3$	[J/kmolK]																							
$M_v = 18,02$	[kg/kmol]																							

Vesihöyrynläpäisevyyskokeet TTY:llä

TYÖOHJE

1. Näytteiden valmistaminen

- *Halkaisija:* 185 mm
- *Paksuus:* Tuotteen paksuus (tai max 50 mm)
HUOM! Vesihöyryvoimien materiaalien osalta sitä parempi mitä paksumpi. Vesihöyrytiivien materiaalien osalta sitä parempi mitä ohuempi.
- Jäykkiä rakennusmateriaaleja voidaan työstää sirkkelillä, vannesahalla ja näytteen reunat voidaan viimeistellä hiomalla.
- Pehmeät materiaalit voidaan työstää oikeaan muotoon käsin sahaamalla tai leikkaamalla
- Kiviaineiset materiaalit työstetään oikeaan kokoon timanttikoralla ja timanttisahalla. Ota huomioon, että materiaalin tulee kestää kosteusrasitusta. Anna koekappaleiden kuivua sahaamisen jälkeen. Kivimateriaalit voidaan myös valaa suoraan oikean kokoiseksi, mutta on huomattava, että näytteen paksuus tulee olla vähintään 3 kertaa isoimman partikkelin koko.
- Mittaa näytteen halkaisija ja paksuus kolmen mittauksen keskiarvona 0,1 mm tarkkuudella. Kirjaa mittaukset ylös valmiiseen mittauslomakkeeseen.

2. Näytteiden ilmastointi ennen mittauksia

- Hygroσκοoppiset materiaalit tulee tasapainottaa ennen varsinaisia mittauksia lähelle varsinaisten mittauksen aikaisia olosuhteita.

3. Olosuhteet mittauksissa

- Koekupin sisäpuolinen olosuhde muodostetaan kylläisellä suolaliuoksella. Kylläinen suolaliuos valmistetaan sekoittamalla tislattua tai ionisoitua vettä suolan kanssa tietyssä suhteessa. Ennen suolan käyttämistä lue suolalle annettu käyttöturvallisuustiedote ja käytä työskentelyn aikana käyttöturvallisuustiedotteessa annettuja suojavälinemääräyksiä. Suolan käsittelyn aikana tulee käyttää vähintään suojakäsineitä sekä silmäsuojaimia. Erilaiset suolat muodostavat ympäröivään ilmaan erilaisen suhteellisen kosteuden. Suolojen ja veden seossuhteet vaihtelevat. Seossuhteet ja kylläisten suolaliuosten muodostamat suhteelliset kosteudet on luettavissa standardista SFS-EN ISO 12571. Älä luota taulukoihin sokeasti, vaan tee suolaliuoksista testiliuokset joiden muodostaman suhteellisen kosteuden mittaat erillisellä kosteusanturilla.
- Koekuppeja säilytetään mittausten ajan olosuhdehuoneessa, jonka lämpötila vaihtelee maksimissaan $\pm 0,5$ °C ja suhteellinen kosteus maksimissaan ± 3 % RH. Mittaa kosteushuoneessa vällinneita lämpötila-, kosteus- ja ilmanpaineolosuhteita 5 minuutin välein. Huolehdi, että ilmavirran nopeus on myös kosteushuoneessa riittävä (välillä 0,02-0,3 m/s). Kosteushuoneen olosuhteiden RH-anturit tulee kalibroida kerran vuodessa ja muut mittausanturit kerran kahdessa vuodessa.

4. Koekuppien valmistaminen

- Valmista kylläinen suolaliuos kupin sisälle siten, että näytteen ja suolaliuoksen pinnan välille jää 15 mm paksuinen ilmaväli. Kirjaa ylös käytetyn veden ja suolan



määrä. Käytä koekupin sisällä muovista sisäkuppia, joka estää alumiinisen koekupin ja suolan reagoimisen keskenään.

- Käytä näytteen tiivistämiseen vahaa, jossa on 40 % parafiinia ja 60 % mikrovahaa. Vaha sulatetaan ja sekoitetaan keskenään kattilassa keittolevyllä
- Koekupin reunoille ja kynnykselle sivellään vahakerros. Samoin näytteen reunat käsitellään ohuella vahakerroksella. Tämä käsittely parantaa näytteen ja vahan sekä kupin ja vahan välistä tartuntaa ja estää vahan liiallisen tunkeutumisen näytteeseen.
- Vahaseoksen annetaan jäähtyä siihen pisteeseen, että vaha on lähestulkoon jähmettymässä uudelleen.
- Vahaa kaadetaan näytteen paksuudesta riippuen vähintään kahdessa kerroksessa koekupin reunoille. Vahan tulee antaa jähmettyä kunnolla ennen uuden kerroksen kaatamista.
- Vahaa kaadetaan kunnes tiivistys ulottuu jo osittain näytteen päälle. Näytteen päällä tulee käyttää muottia, joka estää vahan valumisen koko näytteen päälle. Muotin koko valitaan siten, että koekupin avoin pinta-ala on sekä näytteen ylä- että alaosaan yhtä suuri.
- Koekuppi viimeistellään sivelemällä vielä sulaa vahaa kupin reunoille.



5. Koekuppien punnitseminen

- Koekupit asetetaan kosteushuoneeseen ja punnitaan heti kerran. Käytä punnitukseen vaakaa, jonka kapasiteetti on 2,2 kg ja tarkkuus 1 mg.
- Tämän jälkeen koekuppia punnitaan n. kolme kertaa viikossa tai jos massanmuutos kupissa on suurta (>1 g), voidaan punnitusväliä tihentää. Jos massanmuutos kupissa on pientä (<50 mg), voidaan punnitusväliä harventaa.
- Kirjaa punnitukset valmiiseen punnituslomakkeeseen.
- Kun punnitset koekappaletta käytä vaa'an ympärillä tuulisuojaa, joka estää ilmavirran vaikutuksen. Nosta kuppi vaa'alle ja siitä pois hitaasti ja tasaisesti. Suolaliuos ei saa missään tapauksessa osua näytteen alapintaan.
- Kun käyt kosteushuoneessa suorittamassa punnituksen, pidä kosteushuoneen ovea mahdollisimman vähän aikaa avoinna.

6. Laskenta

- Koekuppien tietyssä ajassa tapahtuneen massanmuutoksen ja näytteen pinta-alan perusteella saadaan määritettyä koekupin kosteusvirran tiheys $g [kg/m^2s]$
- Vesihöyrypitoisuuseron ja kosteusvirran tiheyden perusteella saadaan laskettua näytteen vesihöyrynläpäisykerroin $[m/s]$ ja siitä edelleen muita materiaalien vesihöyrynläpäisevyyskykyä kuvaavia suureita
- Ota laskennassa huomioon erilaiset korjauskertoimet:
 - Suolaliuoksen ja näytteen välinen ilmatila
 - Koekappaleen naamioitu reuna
 - Jos kosteusvirta $<5,7870 \cdot 10^{-9} kg/(m^2s)$, huomioi ilmanpaineen vaihtelu
- Käytä laskennassa valmista laskentapohjaa