



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Kari Vääntinen

SISÄKUORIBETONIN RAKENNUSFYSIKAALISET KOSTEUSOMINAISUUDET

Diplomityö

Tarkastaja: professori Juha Vinha
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
27. marraskuuta 2017

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

VÄNTTINEN, KARI: Sisäkuoribetonin rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet
Diplomityö, 79 sivua, 9 liitesivua

Joulukuu 2017

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Juha Vinha

Avainsanat: betoni, sisäkuoribetoni, materiaaliominaisuus,
vesihöyrynläpäisevyys, vedenimu, kapillaarisuus, tasapainokosteus

Tässä tutkimuksessa selvitettiin sisäkuoribetonin kosteusteknisiä ominaisuuksia. Tutkittavia ominaisuuksia olivat vedenimeytymiskerroin, vedentunkeutumiskerroin, kapillaarinen kyllästykosteuspitoisuus, maksimikosteuspitoisuus, hygroskooppinen ja kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä ja vesihöyrynläpäisevyys. Tutkimusmenetelminä olivat vapaan veden imeytyskoe, tasapainokosteuskoe kosteuskaapissa, painelevykoe ja märkäkuppikoe.

Kirjallisuudessa on esitetty hyvin suppeasti vertailuarvoja sisäkuoribetonille. Kokeesta saatujen tulosten perusteella sisäkuoressa käytetyn betonin veden imeytymisominaisuudet ovat huomattavasti pienempiä kuin normaalilujuuksiselle betonille kirjallisuudessa esitetyt arvot. Ontelolaattabetonin kirjallisuudessa esitettyihin arvoihin verrattaessa sisäkuoribetonilla saadut arvot ovat suuruusluokaltaan lähellä toisiaan. Tuloksissa oli havaittavissa hajontaa eri valmistajien betonien välillä. Myös koesarjojen sisällä eri koekappaleiden välillä oli runsaasti hajontaa, joka johtuu betonin epähomogeenisesta rakenteesta.

Ruduksen betonilla tehtiin vapaan veden imeytyskokeita ajan funktiona alkaen vuorokausi valamisesta ja päättyen noin kahdeksan kuukauden ikään. Tuloksista oli havaittavissa veden imeytymiskertoimen ja veden tunkeutumiskertoimen kasvaminen suuremmaksi ajan funktiona. Jatkossa olisi tärkeää tutkia kuinka kauan betonin valmistumisen jälkeen veden imeytymisominaisuudet muuttuvat.

Vesihöyrynläpäisevyys oli Ruduksen tutkitulla betonilla samaa suuruusluokkaa kirjallisuudessa esitettyjen arvojen kanssa. Parman ja Lujabetonin tutkittujen betonien vesihöyrynläpäisevyys oli noin puolet kirjallisuudessa esitetyistä normaalilujuuksisen betonin vesihöyrynläpäisevyydestä ja vastasivat suuruusluokaltaan ontelolaattabetonin vesihöyrynläpäisevyyttä.

Tutkimusten yhteydessä havaittiin standardien mukaisessa tasapainokosteuskokeiden suorittamisessa haasteita tutkittujen tiiviiden betonilaatujen testauksessa. Hygroskooppisen tasapainokosteuskäyrän osalta tasaantumisaikat kasvoivat pitkiksi. Kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän osalta koekappaleiden maksimikosteuspitoisuutta ei saavutettu standardin mukaisessa kyllästyksessä. Toisaalta standardissa NT BUILD 481 painelevykokeessa esitetty kokeessa pidettävä aika todettiin tutkimuksessa riittämättömäksi koekappaleiden kosteuspitoisuuden tasaantumiseksi. Tasapainokosteuskokeiden suoritusohjeita tulee jatkossa kehittää myös lujalle betonille soveltuvaksi.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

VÄNTTINEN, KARI: Moisture properties of inner shell concrete

Master of Science Thesis, 79 pages, 9 Appendix pages

December 2017

Master's Degree Programme in Construction Technology

Major: Construction engineering

Examinor: Professor Juha Vinha

Keywords: concrete, inner shell concrete, properties of material, water vapor transmission rate, water suction, capillarity, equilibrium moisture

The purpose of this study is to identify moisture technical properties of inner shell concrete. The properties that were researched were water absorption coefficient, water penetration coefficient, capillary saturated humidity content, maximum moisture content, hygroscopic and capillary equilibrium moisture content curve and water vapor transmission rate. The research methods that were used were free water uptake test, equilibrium moisture content test, pressure plate test and water vapor permeability test.

Previous research has shown few reference values for inner shell concrete. Based on the results of these tests it can be said that water absorption of inner shell concrete is significantly lower than has earlier been suggested for normal strength concrete. Compared to the results of concrete of hollow-core slabs proposed in earlier literature, the results obtained on inner shell concrete are close to each other. The results however differed between different concrete manufacturers. Additionally, the results differed greatly between different test series, which is caused by the heterogenous compositions of concrete.

Free water uptake tests were carried out as a function of time on Rudus concrete. The tests began 24 hours after the molding and were finished approximately after eight months. Water absorption coefficient and water penetration coefficient increased as a function of time. Thus, the changes in water absorption remain yet to be studied further.

The water vapour transmission rate in Rudus concrete was similar to the results obtained in earlier literature. Water vapour transmission rate in both Parma and Lujabetoni concrete was approximately only half of the rate proposed for normal strength concrete in previous literature and were similar to the water vapour transmission rate of hollow-core slabs.

Some challenges arose in testing the different dense concretes according to the standards. The time in which the hygroscopic equilibrium moisture content stabilized was long. Additionally, the maximal moisture content of the test samples was not achieved in the standard saturation test and thus the capillary equilibrium moisture content curve could not be completely determined. TOISAALTA the testing time for pressure plate measurement given in the standard NT BUILD 481 was discovered to be insufficient for the moisture content of the samples to stabilize. In conclusion, the instructions for carrying out the equilibrium moisture content tests ought to be designed also for testing strong concrete.

ALKUSANAT

Tämä tutkimus on osa Tampereen teknillisen yliopiston vetämää COMBI-hanketta. COMBI-hankkeen tavoitteena on tutkia palvelurakennuksien energiatehokkuuden parantamista ja siihen liittyviä riskejä.

Tämä tutkimus tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitoksen rakennusfysiikan tutkimusryhmässä diplomityönä professori Juha Vinhan ohjaamana.

Kiitän professori Juha Vinhaa diplomityöni tarkastamisesta sekä tutkimustyön aikaisesta ohjaamisesta. Kiitokset myös Eero Tuomiselle, joka auttoi ja neuvoi aina tarvittaessa tutkimuksen edetessä.

Kiitokset Arto Haaraselle mukavista opiskeluhetkistä ja yhteistyöstä opiskelujen aikana. Kiitokset myös Lauri Korhoselle yhteistyöstä diplomityöhön liittyvien tutkimusten suorittamisessa.

Erityiskiitokset vaimolleni Sarille, joka jakoi tukea ja kannustaa minua niin opiskeluaikana, kuin myös diplomityöni tekemisen aikana.

Kuopiossa, 27.11.2017

Kari Vänttinen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	I
ABSTRACT	II
ALKUSANAT	III
SISÄLLYSLUETTELO	IV
MERKINNÄT	VI
KÄSITTEET	VIII
1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tausta	1
1.2 Tutkimuksen rajaukset	1
2. KOSTEUS HUOKOISESSA MATERIAALISSA	3
2.1 Kosteus ilmassa	3
2.2 Kosteus huokoisessa materiaalissa	5
2.2.1 Kosteuden sitoutuminen hygroskooppisella alueella	5
2.2.2 Kosteuden sitoutuminen kapillaarisella alueella	7
2.2.3 Tasapainokosteuden hystereesi	9
2.3 Kosteuden siirtymismuodot huokoisessa materiaalissa	11
2.3.1 Diffuusio	12
2.3.2 Pintadiffuusio	14
2.3.3 Kapillaarivirta	15
2.3.4 Hydraulivirta	18
3. TUTKITUT MATERIAALIT	19
3.1 Betoni, Parma	19
3.2 Betoni, Lujabetoni	19
3.3 Betoni, Rudus	19
4. SUORITETUT KOKEET	20
4.1 Esivalmistelut	20
4.1.1 Valu	21
4.1.2 Koekappaleiden valmistaminen	21
4.2 Veden imeytyskoe	25
4.2.1 Yleistä	25
4.2.2 Koejärjestely	29
4.2.3 Virhelähteet	33
4.3 Tasapainokosteuskoe	34
4.3.1 Yleistä	34
4.3.2 Koejärjestely	34
4.3.3 Virhelähteet	38
4.4 Painelevykoe	38
4.4.1 Yleistä	38
4.4.2 Koejärjestely	39
4.4.3 Virhelähteet	39

4.5	Märkäkuppikoe.....	43
4.5.1	Yleistä	43
4.5.2	Koejärjestely	44
4.5.3	Virhelähteet	45
5.	TULOKSET	46
5.1	Veden imeytyskoe	46
5.1.1	Veden imeytymisominaisuuksien kehittyminen	45
5.1.2	Tulokset, veden imeytymiskerroin.....	49
5.1.3	Tulokset, veden tunkeutumiskerroin.....	51
5.1.4	Tulokset, kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus	53
5.1.5	Tulokset, kosteuspitoisuuden vaikutus vedenimuominaisuuksiin ..	55
5.2	Hygroskooppien tasapainokosteuskoe	58
5.2.1	Tulokset, kokonaiset koekappaleet	58
5.2.2	Tulokset, murskatut koekappaleet.....	61
5.3	Painelevykoe	63
5.3.1	Tulokset, maksimikosteuspitoisuus	63
5.3.2	Tulokset, kaoliinisaven vaikutus painelevykokeessa.....	66
5.3.3	Tulokset, painelevykoe	69
5.4	Märkäkuppikoe.....	74
6.	YHTEENVETO	76
	LÄHTEET	77

MERKINNÄT

σ	veden pintajännitys	(0,073 N/m lämpötilassa 20 °C)	
v	vesihöyrypitoisuus		g/m ³
v_{sat}	vesihöyryn kyllästyspitoisuus		g/m ³
δ_v	vesihöyrynläpäisevyys (vesihöyrynpitoisuuserolla laskettuna)		m ² /s
δ_p	vesihöyrynläpäisevyys (vesihöyryn osapaine-erolla laskettuna)		kg/(msPa)
δ_a	ilman vesihöyrynläpäisevyys		kg/(msPa)
μ	vesihöyryn diffuusiovastuskerroin		-
ρ	tiheys		kg/m ³
ρ_w	veden tiheys	1000 kg/m ³ (27 °C:n lämpötilassa)	
φ	ilman suhteellinen kosteus		% RH
η_w	veden dynaaminen viskositeetti	1,31x10 ⁻³ Ns/m ² (10 °C:n lämpötilassa)	
d	säde, paksuus		m
g	kosteusvirran tiheys		kg/(m ² s)
g	putoamiskiihtyvyyys		9,81 m/s ²
h	korkeus		m
k	materiaalin permeabiliteetti		m ²
m	massa		kg
m_φ	koekappaleen massa tietyssä suhteellisessa kosteudessa		kg
n	huokoisuus		m ³ /m ³
p	paine		Pa
p_v	vesihöyryn paine		Pa
r	huokosten säde		m
s	huokosalipaine		Pa
s_d	suhteellinen diffuusiovastus		m
t	aika		h
u	kosteuspitoisuus		kg/kg
w	kosteuspitoisuus		kg/m ³
w_{cap}	kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus		kg/m ³
w_{crit}	kriittinen kosteuspitoisuus		kg/m ³
w_{hygr}	hygroskooppinen kyllästyskosteuspitoisuus		kg/m ³
w_{max}	maksimikosteuspitoisuus		kg/m ³
A	pinta-ala		m ²
A_w	veden imeytymiskerroin (kapillariteettikerron)		kg/(m ² s ^{0,5})
B_w	veden tunkeutumiskerroin		m/s ^{0,5}
D_w	kosteusdiffusiviteetti		m ² /s
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	vesihöyryn kaasuvakio	461,5 J/(Kkg)
RH	suhteellinen kosteus	%
T	lämpötila	K, °C
V	tilavuus	m^3
W_v	vesihöyrynläpäisevyyskerroin (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

KÄSITTEET

Absorptio	Molekyylien imeytyminen aineeseen.
Adsorptio	Molekyylien sitoutuminen aineen huokosten pinnoille.
Desorptio	Molekyylien poistuminen aineesta.
Huokossäde	Huokosen suuruutta kuvaava mitta, joka on määritetty kapillaaristen voimien avulla olettaen huokokset pyöreiksi lieriöiksi.
Hygroσκοoppinen kyllästyskosteuspitoisuus	Materiaalin suurin mahdollinen kosteuspitoisuus, joka on saavutettavissa mahdollisimman kostealla ilman suhteellisella kosteudella.
Hygroσκοoppinen tasapainokosteus	Materiaalin kosteuspitoisuus materiaalin huokostilan tasaannuttuaan tiettyyn ilman suhteelliseen kosteuteen.
Hygroσκοoppisuus	Materiaalin kyky sitoa ilman kosteutta ja luovuttaa sitä takaisin.
Kapillaarisuus	Nestemäisen veden siirtymistä materiaalin huokosverkostossa huokosalipaineen vaikutuksesta.
Kapillariteettikerroin	Materiaaliarvo, joka kuvaa materiaaliin siirtyvän veden määrää, kun materiaali on vesikosketuksessa vapaan veden kanssa. Kapillariteettikerroin ei ole vakio, vaan muuttuu materiaalin kosteuspitoisuuden mukaan.
Kosteusdiffusiviteetti	Materiaalin kosteudensiirtokykyä vesihöyrylle kuvaava ominaisuus.
Maksimikosteuspitoisuus	Suurin mahdollinen kosteuspitoisuus, jonka materiaali voi saavuttaa.
Suhteellinen kosteus	Ilmassa olevan kosteuden määrä verrattuna samassa lämpötilassa olevaan kyllästyskosteuteen.

Tasapainokosteus	Materiaaliin sitoutunut kosteusmäärä materiaalin huokostilan ilman kosteuden tasaannuttua tiettyyn suhteelliseen kosteuteen.
Tiheys	Kuivatun kappaleen massa suhteessa kappaleen tilavuuteen.
Veden tunkeutumiskerroin	Kapillaarisesti siirtyvän vesirintaman etenemisnopeutta kuvaava materiaaliominaisuus.
Veden imeytymiskerroin	Synonyymi kapillariteettikertoimelle.
Vesihöyrynläpäisevyys	Kuvaa vesihöyryn määrää, joka läpäisee aikayksikössä pituusyksikön suuruisen homogeenisen ainekerroksen, aineen molemmin puolin on yhden yksikön suuruinen vesihöyryn osapaine-ero tai vesihöyrypitoisuuden ero.
Vesihöyryn kyllästyspitoisuus	Vesihöyrypitoisuus, jonka tietyn lämpöinen ilma pystyy sitomaan.
Vesihöyrypitoisuus	Ilmoittaa ilmassa olevan vesihöyryn määrän.

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Rakennusten energiatehokkuusmääräykset ovat Suomessa edelleen kiristymässä. Tämä aiheuttaa haasteita rakenteiden rakennusfysikaaliselle toiminnalle. On tärkeää tietää, milloin rakennusaikainen kosteus on poistunut rakenteesta. Liian kostealle alustalle tehty pinnoitus aiheuttaa emissioita ja voi vaurioittaa pinnoitetta. Emissiot voivat aiheuttaa rakennuksessa sisäilmaongelman joka puolestaan aiheuttaa oireilua rakennuksessa asuville tai työskenteleville ihmisille. Myös käytön aikainen rakenteiden rakennusfysikaalinen toiminta tulee pystyä varmentamaan jo ennen rakentamista. Nykyisin on kehitetty käsin laskentaa tehostamaan rakennusfysikaalisia simulointiohjelmiä, joiden avulla voidaan mallintaa rakenteiden toimivuutta todellisia muuttuvia olosuhteita vastaavissa olosuhteissa ajan funktiona.

Käsin laskentaan tai simulointiohjelmiin tarvitaan kuitenkin tarkat materiaaliominaisuudet tulosten oikeellisuuden varmistamiseksi. Tampereen teknillisellä yliopistolla on viimeisimpien vuosien aikana tutkittu laajasti eri materiaalien lämpö- ja kosteusteknisiä ominaisuuksia, mutta tarvetta uusien ja tutkimattomien materiaalien ominaisuuksien tutkimiselle on edelleen. Eri materiaalien ominaisuuksia tulee myös tarkentaa, jos valmistustekniikassa on poikkeavuuksia aikaisemmin tutkittuun verrattuna.

Betonin kosteusteknisiä ominaisuuksia on tutkittu paljon maailmalla ja Suomessa aikaisemmin. Tarvetta lisätutkimukselle kuitenkin on. Varsinkin normaalin puristuslujuuden omaavia betoneja on tutkittu laajasti. Myös ontelolaattojen kosteusteknisiä ominaisuuksia on tutkittu Tampereen teknillisellä yliopistolla. Betonirunkoisten rakennusten sisäkuorissa käytettävien betonien kosteusteknisistä ominaisuuksista ei ole aikaisempaa tutkittua tietoa Suomessa.

1.2 Tutkimuksen rajaukset

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää betonirunkoisten rakennusten sisäkuoressa käytettävän betonin kosteustekniset ominaisuudet. Tutkittavia asioita ovat vedenimuominaisuudet ja vesihöyrynläpäisevyys. Lisäksi tutkitaan materiaalien hygroskooppinen ja kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä.

Tutkimukset on suoritettu Tampereen teknillisellä yliopistolla. Tutkimuksissa on käytetty vakioituneita Tampereen teknillisen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmän kokeiden toteutusohjeita. Vedenimukokeet on tehty TTY:llä automaattisella vapaan

veden imeytyslaitteistolla. Vesihöyrynläpäisevyys on tutkittu märkäkuppikokeella. Kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä on määritetty painelevykokeiden avulla ja hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä tasaamalla kappaleiden kosteus haluttuun pitoisuuteen kosteuskaapissa.

Tutkimus on rajattu koskemaan elementtitehtaalla valmistettuja sisäkuorielementtejä. Betonirakenteisten rakennusten ulkoseinän sisäkuori on yleisimmin Suomessa elementtirakenteinen (Vainio, ym., 2005). Tutkittavat betonilaadut valittiin pikasementistä valmistetuiksi. Pikasementtiä käytetään yleisesti elementtitehtailla tuotantoprosessin nopeuttamiseksi.

Tähän tutkimukseen valittiin kolme eri betonilaatua. Jokainen betonilaatu on eri valmistajalta. Betonivalmistajiksi valittiin Rudus Oy, Parma Oy ja Luja Oy, jotka ovat kolme suurinta betonin valmistajaa Suomessa. Parman ja Lujan betonielementit olivat tehtaalla valmiiksi valettuja ja Ruduksen toimittamasta betonista valettiin TTY:llä koekappaleita ja elementtejä kokeita varten.

2. KOSTEUS HUOKOISESSA MATERIAALISSA

2.1 Kosteus ilmassa

Kuiva ilma sisältää useita eri kaasuja. Suurimmat kaasupitoisuudet ilmassa ovat typpi (78,08 %), happi (20,95 %), argon (0,934 %) ja hiilidioksidi (0,036 %). Ilmassa on myös vesihöyryä, jonka määrä vaihtelee ja on noin 1 % ilman tilavuudesta. Ilmassa olevan vesihöyryn määrä voidaan esittää vesihöyryn osapaineena p_v [Pa] tai vesihöyrypitoisuutena v [kg/m³]. Vesihöyryn osapaineen ja vesihöyrypitoisuuden välillä on yhteys ideaalikaasun tilanyhtälön avulla. Kaavassa 2.1 on esitetty ideaalikaasun tilanyhtälö. (Vinha 2011)

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \quad (2.1)$$

jossa	p	= kaasun paine [Pa]
	V	= kaasun tilavuus [m ³]
	n	= kaasun suhteellinen atomimassa [mol]
	m	= kaasun massa [kg]
	M	= kaasun molekyylipaino [kg/kmol]
	R	= yleinen kaasuvakio (8314,3 J/(kmolK))
	T	= lämpötila [K]
	ρ	= kaasun tiheys [kg/m ³]

Tietystä tilavuudesta, paineesta ja lämpötilasta on aina sama määrä kaasumolekyylejä. Tällöin voidaan kaavan 2.2 avulla laskea ilman vesihöyrypitoisuus v [kg/m³] ja kaavan 2.3 avulla vastaavasti vesihöyryn osapaine p_v [Pa]. (Björkholtz 1987)

$$v = \frac{p_v \cdot M_w}{R \cdot T} \approx \frac{p_v}{461,4 \cdot T} \quad (2.2)$$

$$p_v = \frac{v \cdot R \cdot T}{M_w} \approx v \cdot 461,4 \cdot T \quad (2.3)$$

Ilman keskimääräinen moolipaino on M_a 28,96 kg/kmol ja vesihöyryn moolipaino on M_w 18,02 kg/kmol.

Tietystä lämpötilasta ilma voi sisältää vain tietyn määrän vesihöyryä. Tätä suurinta mahdollista vesihöyrymäärää ilmassa tietystä lämpötilasta kutsutaan vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuudeksi v_{sat} [kg/m³] tai kyllästysosapaineeksi $p_{v,sat}$ [Pa]. (Björkholtz 1987, Vinha 2011). Alan kirjallisuudessa on esitetty useita likiarvokaavoja ilman vesihöyryn kyllästyskosteuden ja kyllästysosapaineen laskemiseen. (Nevander &

Elmarsson 1994, Björkholtz 1987, Vinha 2011, Alduchov & Eskridge 1995, Hagentoft 2003, Hens 2007, SFS EN ISO 13788 2013). Kaavassa 2.4 on Hagentoftin esittämä likiarvokaava kyllästyskosteuspitoisuuden v_{sat} laskemiseksi (Hagentoft 2003 ss. 88-89).

$$v_{sat} = \frac{a \cdot \left(b + \frac{T}{100}\right)^n}{461,4 \cdot (T + 273,15)} \quad (2.4)$$

jossa $0 \text{ °C} \leq T \leq 30 \text{ °C}$, $a = 288,68 \text{ Pa}$, $b = 1,098 \text{ Pa}$, $n=8,02$

$-20 \text{ °C} \leq T \leq 0 \text{ °C}$, $a = 4,689 \text{ Pa}$, $b = 1,468 \text{ Pa}$, $n=12,3$

$T = \text{°C}$.

Alle 0 °C :n lämpötiloissa, tulee ottaa huomioon, tarkastellaanko kyllästyskosteuspitoisuutta nestemäisen veden vai jään yläpuolella. Yleinen oletus rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa on, että mentäessä alle 0 °C :n, tarkastelu tehdään jään yli. Jään yli tehtävässä tarkastelussa kyllästyskosteuspitoisuudet ovat hieman pienempiä, kuin veden yli tehtävissä tarkasteluissa. Erot eivät ole kovin suuria, jos tarkastellaan kyllästyskosteuspitoisuuden arvoja, mutta korostuvat tarkasteltaessa suhteellista kosteutta.

Ilman suhteellisen kosteuden avulla ilmaistaan, kuinka paljon ilmassa on kosteutta verrattuna ilman kyllästyskosteuspitoisuuteen. Ilman suhteellinen kosteus (% RH) lasketaan kaavalla 2.5. (Burström 2001 s. 55)

$$\varphi = \frac{v}{v_{sat}} = \frac{p_v}{p_{v,sat}} \quad (2.5)$$

Ilman suhteellinen kosteus esitetään yleensä prosentteina [%]. Kaavassa 2.6 on esitetty ilman suhteellisen kosteuden muunnos prosenteiksi.

$$RH = \frac{v}{v_{sat}} \cdot 100 \% = \frac{p_v}{p_{v,sat}} \cdot 100 \% \quad (2.6)$$

2.2 Kosteus huokoisessa materiaalissa

Kosteus voi olla sitoutuneena huokoiseen materiaaliin kemiallisesti tai fysikaalisesti (Vinha 2011). Esimerkiksi betoniin sitoutuu kemiallisesti vesimolekyyleja sementin hydratoituessa. Vesi sitoutuu tällöin kemiallisten yhdisteiden molekyyleihin. (Suomen Betonitieto Oy 2005 ss. 50-53). Fysikaalisesti kosteus voi sitoutua aineeseen adsorboitumalla aineen huokosseinämien pinnoille, kapillaari- tai gravitaatiovoimien vaikutuksesta imeytymällä huokosiin, vesihöyrynä huokosilmaan tai osmoottisella sitoutumisella. (Vinha 2011) Yleensä vallitsevia fysikaalisia kosteuden sitoutumismuotoja ovat adsorpoituminen huokosten seinämiin ja kapillaarinen sitoutuminen. Sitoutuneen kosteuden määrään vaikuttaa materiaalin huokoskoko ja

huokosjakauma. Materiaalin huokoisuus voidaan laskea seuraavan kaavan avulla (Vinha

$$n = \frac{V_{pores}}{V_{tot}} \quad (2.7)$$

2011):

jossa V_{pores} = materiaalin huokostilavuus

V_{tot} = materiaalin kokonaistilavuus

2.2.1 Kosteuden sitoutuminen hygroskooppisella alueella

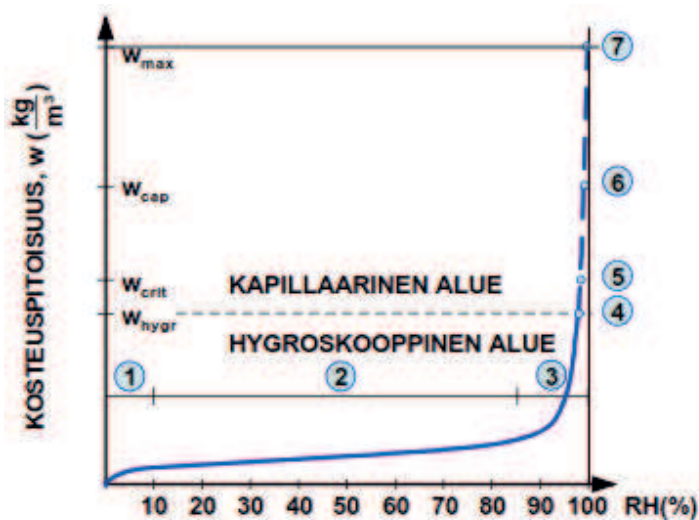
Huokoisten materiaalien huokosilman kosteus pyrkii tasoittumaan vastaamaan materiaalia ympäröivän ilman suhteellista kosteutta. Kutakin suhteellisen kosteuden arvoa vastaamaan on huokoisella materiaalilla olemassa tasapainokosteus $w(\varphi)$ [kg/m³], joka voidaan esittää myös kaavan 2.8 mukaisesti arvona $u(\varphi)$ [kg/kg] tai kaavan 2.9 mukaisesti $u(\varphi)$ [paino-%]. Tasapainokosteuden suuruus riippuu pääosin materiaalin huokosilman suhteellisesta kosteudesta (% RH), mutta myös lämpötilalla on vaikutusta (Hagentoft 2003, Vinha 2011). On havaittu tasapainokosteuden hieman kasvavan lähestyessä 0 °C:sta. (Vinha ym. 2005 s. 62, Vinha 2011 s. 9) Lämpötilan vaikutus jätetään kuitenkin monesti ottamatta huomioon. (Hagentoft 2003 s. 90)

$$u = \frac{w}{\rho_{dry}} \quad (2.8)$$

$$u = \frac{w}{\rho_{dry}} \cdot 100 \% \quad (2.9)$$

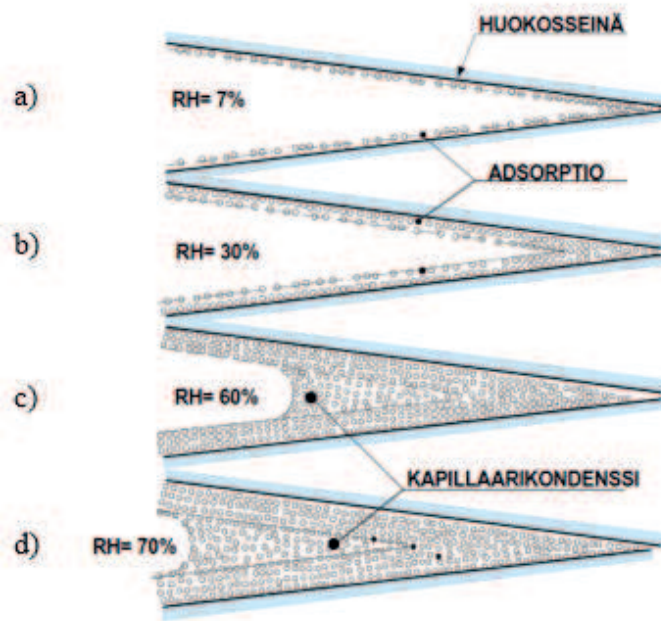
Materiaalin kuivapaino ρ_{dry} [kg/m³] saavutetaan kuivaamalla materiaalia pitkän aikaa 105 °C:n lämpötilassa. (Hagentoft 2003 s. 91)

Määritettyjen tasapainokosteuksien perusteella voidaan piirtää materiaalille ominainen tasapainokosteuskäyrä $w(\varphi)$. Kuvassa 2.1 on esimerkki tasapainokosteuskäyrästä. Tasapainokosteuskäyrästä on erotettavissa hygroskooppinen ja kapillaarinen alue. Hygroskooppisen alueen katsotaan päättyvän noin 98 % RH, jonka jälkeen kosteuden siirtyminen materiaalissa tapahtuu pääosin vapaana vetenä kapillaari- tai gravitaatiovoimien avulla. Hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä esitetään materiaalin huokosilman suhteellisen kosteuden funktiona. (Hagentoft 2003 s. 91)



Kuva 2.1. Tasapainokosteuskäyrä. Kuvassa on esitettyä esimerkki tasapainokosteuskäyrästä ja tasapainokosteuskäyrän tärkeimmät osat numeroituna. (Vinha 2011 s. 10)

Huokoisten rakennusmateriaalien tasapainokosteuskäyrä on lähes aina S-kirjaimen muotoinen (Hansen 1989). Tasapainokosteuskäyrästä on erotettavissa eri kosteuden sitoutumisvaiheita, jotka on numeroituna kuvassa 2.1. Pienillä ilman suhteellisen kosteuden arvoilla vesimolekyylit kiinnittyvät Van Der Waalsin voimien avulla huokosten seinämille. Kiinnittävät voimat ovat heikkoja sähkömagneettisia voimia. Vesimolekyylien ollessa adsorpoituneena korkeintaan yhdessä kerroksessa huokosen seinämiin, kutsutaan huokosen täyttöstettä monomolekylaarisiksi adsorptioksi (kuva 2.1, alue 1 ja kuva 2.2 a)). Kuvan 2.2 kohdassa a) on esitettyä vesimolekyylien sitoutuminen huokosen seinämään monomolekylaarisesti. (Vinha 2011 s. 9)



Kuva 2.2. Vesimolekyylin sitoutuminen materiaalihuokosen pintaan eri huokosilman suhteellisissa kosteuksissa. (Vinha 2011 s. 11)

Suhteellisen kosteuden noustessa korkeammaksi huokosilmassa alkaa huokosten pinnoille kertyä vesimolekyylejä useampaan kerrokseen ja huokosen täyttöaste muuttuu polymolekylaarisiksi adsorptioksi (kuva 2.1, alue 2 ja kuva 2.2 b)). Polymolekylaarisessa adsorptiossa kauimmaisten molekyylien sidosvoimat ovat heikompia ja molekyylit pääsevät helpommin liikkumaan. Tämä mahdollistaa kapillaarikondenssin syntymisen (kuva 2.1, alue 3 ja kuva 2.2 c) ja d)). Kapillaarikondenssin alkaessa vesi pääsee liikkumaan huokosten pinnoilla, mutta huokokset eivät ole vielä täyttyneet vedellä ja kapillaariverkosto ei ole vielä yhtenäinen. Suhteellisen kosteuden noustessa edelleen korkeammaksi huokosissa, alkavat huokokset täyttyä vedellä. Ensin täyttyy pienimmät huokokset ja huokosilman suhteellisen kosteuden noustessa edelleen korkeammaksi alkavat myös suuremmat huokokset täyttyä. Huokosilman suhteellisen kosteuden ollessa lähellä 98 % RH saavutetaan hygroskooppinen kyllästyskosteuspitoisuus w_{hygr} (kuva 2.1, piste 4). Hygroskooppisessa kyllästyskosteuspitoisuudessa materiaali on saavuttanut korkeimman mahdollisen tasapainokosteuden, joka voidaan saavuttaa tasaisissa lämpötila- ja RH-olosuhteissa. (Vinha 2011 ss. 10-15)

2.2.2 Kosteuden sitoutuminen kapillaarisella alueella

Huokosilman suhteellisen kosteuden noustessa yli 98 % RH:n ollaan kapillaarisella alueella. Tämä edellyttää laboratoriokokeessa tyypillisesti ainakin ajoittaista kappaleen kosketusta nestemäiseen veteen. Huokoisen materiaalin ollessa vesikosketuksessa alkavat kapillaarivoimat imeä vettä huokosverkostoon. Kapillaarivoimien vaikutuksesta vettä imeytyy ja sitoutuu ainakin hetkellisesti huokosverkostoon.

Materiaalin huokosilman suhteellisen kosteuden noustessa yli hygroskooppisen kyllästyskosteuspitoisuuden saavutetaan pian kriittinen kosteuspitoisuus w_{crit} (kuva 2.1, piste 5). Ylitettäessä kriittinen kosteuspitoisuus kosteus siirtyy pääasiassa nestemäisenä yhtenäistä kapillaariverkostoa pitkin. Huokosverkoston täytyttyä kapillaarisesti vedellä saavutetaan kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus w_{cap} (kuva 2.1, piste 6).

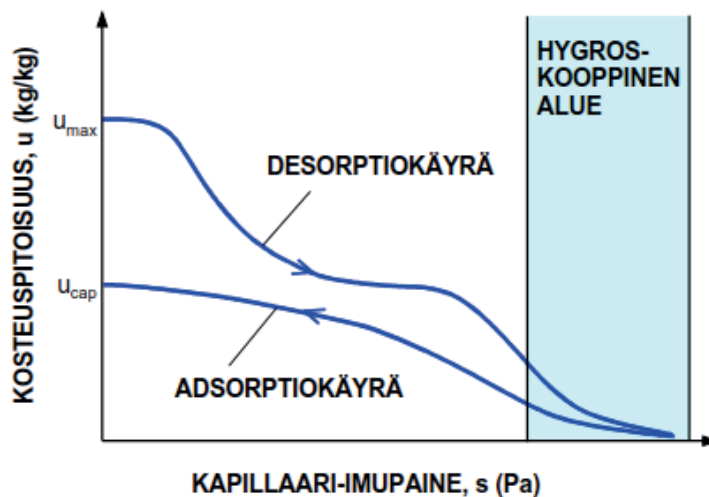
Materiaalin täytyessä kapillaarisesti vedellä väliin jää kuitenkin huokosia, joissa on ainakin osittain ilmaa vedellä ympäröitynä. Täydellinen materiaalin vedellä kyllästäminen vaatii ensin ilman poistamisen materiaalin huokosista vakuumlaitteella ja tämän jälkeen vedellä kyllästäminen. Täydellisesti vedellä kyllästynyt materiaali on saavuttanut maksimikosteuspitoisuuden w_{max} (kuva 2.1, piste 7). (Vinha 2011 s. 10) Maksimikosteuspitoisuuden laskeminen on esitetty seuraavassa kaavassa:

$$w_{max} = n \cdot \rho_w \quad (2.10)$$

jossa n = materiaalien huokoisuus

ρ_w = veden tiheys (n. 1000 kg/m³)

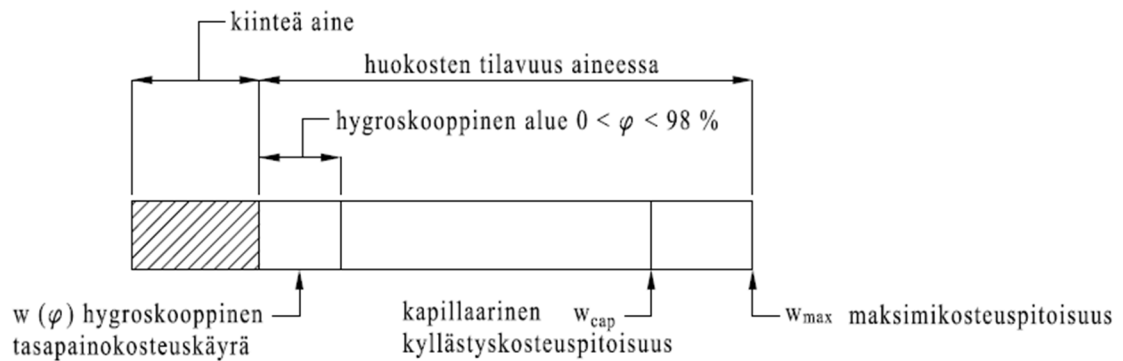
Kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä esitetään yleensä joko keskimääräisen huokosalipaineen s [Pa] tai huokosten säteen r [m] funktiona. Huokosilman suhteellisen kosteus on kapillaarisella alueella aina lähes 100 % RH ja tällöin tasapainokosteuden esitys hygroskooppisella tasapainokosteuskäyrällä ei ole havainnollista. (Vinha 2011 s. 28) Kuvassa 2.3 on esimerkki kapillaarisesta tasapainokosteuskäyrästä.



Kuva 2.3. Kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä. Kosteuspitoisuus u [kg/kg] on esitettyinä kapillaari-imupaineen s [Pa] funktiona. (Vinha 2011 s. 29)

Kuvasta 2.3 voidaan havaita kosteuspitoisuuden olevan suuri kapillaarisella alueella verrattuna hygroskooppisen alueen kosteuspitoisuuteen. Sama havainto voidaan tehdä kuvan 2.4 perusteella. Kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän muoto voi vaihdella eri materiaaleilla. Vaihtelu johtuu huokoskokojakauman vaihtelusta. (Vinha 2011) Kuvassa

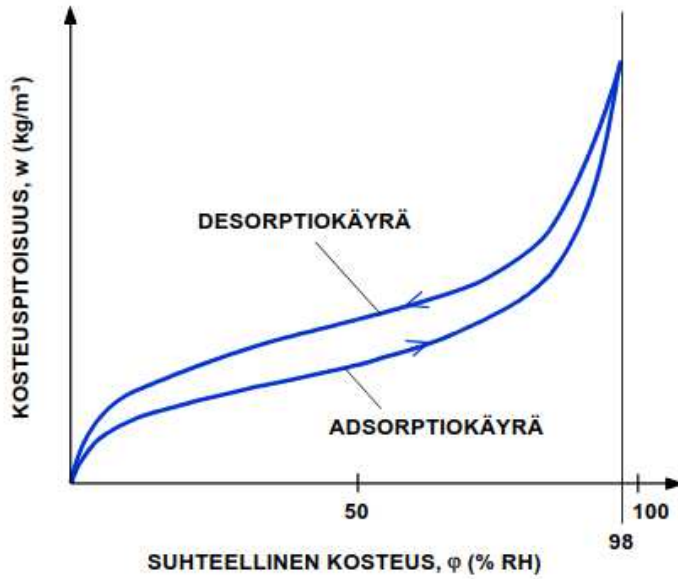
2.3 on esitettyä desorptio- ja adsorptiokäyrät erikseen. eroa kutsutaan hystereesiksi. Asiaa käsitellään tarkemmin luvussa 2.2.3.



Kuva 2.4. Erään huokoisen aineen jakautuminen kiinteään aineeseen ja huokostilavuuteen. Kuvassa on esitetty myös hygroskooppisesti kosteudella täyttyvä osa huokostilavuudesta. Kapillaarisesti kosteudella täyttyvä osa huokostilavuudesta ylittää kiinteästä aineesta kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen. (Hagentoft 2003 s. 92)

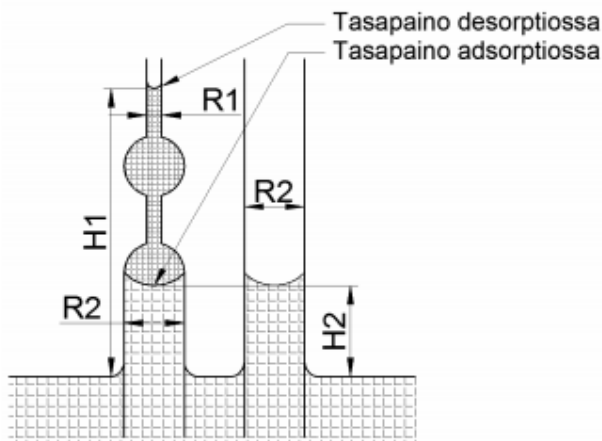
2.2.3 Tasapainokosteuden hystereesi

Materiaalin tasapainokosteuskäyrä ei ole yhtenevä materiaalin tasaantuessa kostempaan päin verrattuna materiaalin tasaantuessa kuivempaan suuntaan. Tätä ilmiötä kutsutaan tasapainokosteuden hystereesiksi. Materiaalin kostuessa tasapainokosteuskäyrää kutsutaan adsorptiokäyräksi ja materiaalin kuivuessa käyrä on nimeltään desorptiokäyrä. Materiaalin kuivuessa kosteuspitoisuus pysyy korkeammalla kuin materiaalin kostuessa verrattaessa materiaalia samassa suhteellisessa kosteudessa. (Hagentoft 2003 ss. 92-93) Kuvassa 2.5 on esitetty tasapainokosteuskäyrä hygroskooppisella alueella. Hystereesiksi kutsutaan kuvassa näkyvien adsorptio- ja desorptiokäyrien erotusta. Kuvassa 2.3 on nähtävissä hystereesi kapillaarisella alueella.



Kuva 2.5. Tasapainokosteuskäyrä hygroskooppisella alueella. Kuvassa on esitetty desorptio- ja adsorptiokäyrä. Hystereesillä tarkoitetaan käyrien välistä erotusta. (Vinha, 2011 s. 18)

Syyksi hystereesi ilmiöön on esitetty useita teorioita. Yhtenä syynä on pidetty huokosrakenteen kapeammista ja leveämmistä kohdista aiheutuvaa ”mustepullovaikutusta”. Mentäessä suurempaa kosteuspitoisuutta kohti jää aina väliin laajempia kohtia huokosverkostossa, joihin ei pääse muodostumaan kapillaarikondensssia. (Vinha 2011 ss. 15-27) Tällöin huokokset täyttyvät vedellä suuruusjärjestyksessä alkaen pienimmistä. Kuivuessaan taas materiaaliin voi jäädä laajempiin huokosiin vettä, joka ei ole enää kapillaarisesti yhteydessä muuhun huokosverkostoon pienempien viereisten huokosten kuivuttua. (Tuominen 2016) Seuraavassa kuvassa on esitetty desorption ja adsorption ero huokosissa:



Kuva 2.6. Adsorption ja desorption ero. (Tuominen 2016 s. 19)

Tasapainokosteuden hystereesiä on aineissa hygroskooppisella ja kapillaarisella alueella. Käytännössä tasapainokosteus on aina adsorptio- ja desorptiokäyrien välimaastossa, koska olosuhteiden vaihdeltaessa myös tasapainokosteus vaihtelee. (Vinha 2011 s. 16)

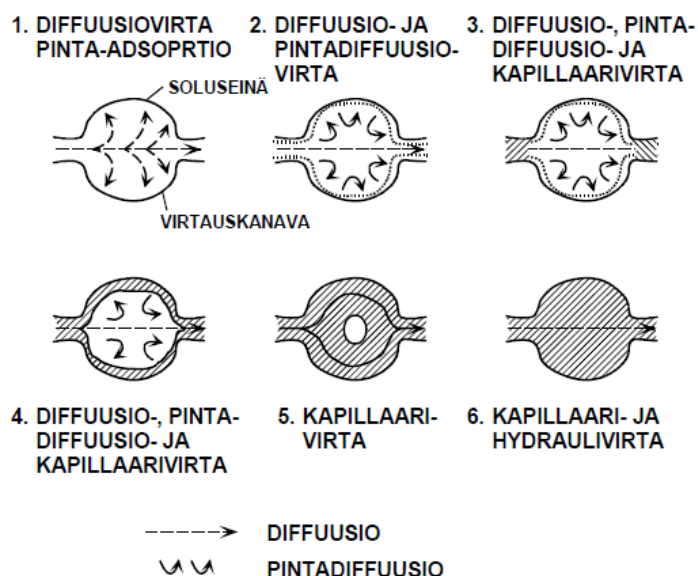
2.3 Kosteuden siirtymismuodot huokoisessa materiaalissa

On olemassa monia kosteuden siirtymismuotoja. Rakennusfysiikan kannalta merkittävimpiä ovat (Vinha 2011):

- Diffuusio (kaasudiffuusio)
- Pintadiffuusio
- Kapillaarinen siirtyminen (kapillaari-imu)
- Konvektio
- Painovoimainen siirtyminen
- Paineenalainen siirtyminen

Diffuusiossa ja konvektiossa kosteus siirtyy vesihöyrynä. Diffuusiossa ja pintadiffuusiossa vesimolekyylit pyrkivät suuremmasta pitoisuudesta pienempään pitoisuuteen ajan mittaan tasoittaen mahdolliset pitoisuuserot. Konvektiossa vesimolekyylit liikkuvat ilmavirran mukana.

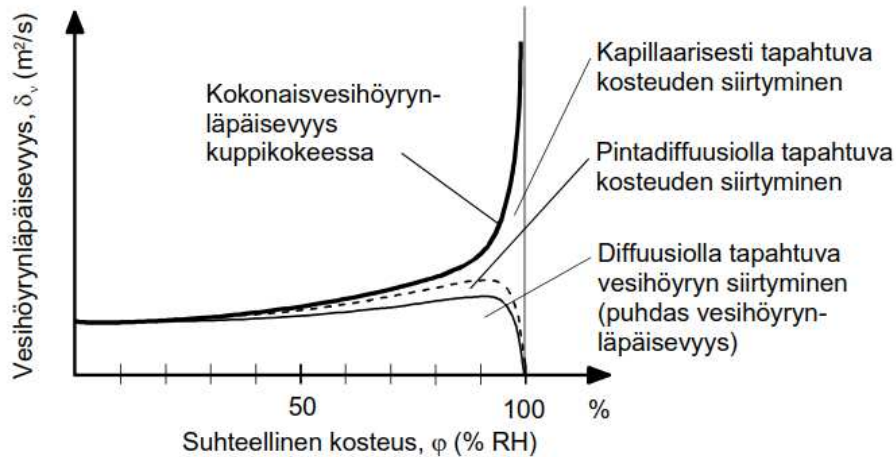
Nestemäisenä vesi voi siirtyä materiaalissa kapillaarisesti, painovoimaisesti (gravitaatiovoima) tai paineenalaisena (hydraulivirta). Huokoisessa materiaalissa merkittävimmät kosteudensiirtomuodot on esitetty kuvassa 2.7.



Kuva 2.7. Kosteuden siirtymismuodot materiaalin huokosissa. (Vinha 2011 s. 41)

Kuvasta voidaan huomata kosteuden siirtymismuotojen vaihtuvan kosteuspitoisuuden muuttuessa materiaalin huokosissa. Alhaisessa materiaalin kosteuspitoisuudessa (kuva

2.7, kohdat 1 ja 2) kosteus siirtyy diffuusion tai pintadiffuusion avulla ja korkeassa kosteuspitoisuudessa kapillaari- tai hydraulivirran avulla (kuva 2.7, kohdat 5 ja 6). Kuvan 2.7 tapauksissa 3,4 ja 5 on esitetty tapaukset alhaisen ja hyvin korkean kosteuspitoisuuden välissä, jolloin kosteus siirtyy diffuusion, pintadiffuusion ja kapillaarivirtauksen yhteisvaikutuksesta. Kuvassa 2.8 on esitetty huokoisen materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden kasvaminen suhteellisen kosteuden kasvaessa.



Kuva 2.8. Vesihöyryn läpäisevyys ja eri kosteudensiirtymismuotojen vaikuttavuus huokoisessa materiaalissa suhteellisen kosteuden funktiona (Vinha 2011).

Kuvasta voidaan huomata materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden kasvavan voimakkaasti suhteellisen kosteuden kasvaessa korkeaksi. Kuvassa on esitetty myös eri kosteudensiirtomuotojen osuus graafisesti suhteellisen kosteuden funktiona. Kosteus siirtyy melko tasaisesti diffuusiolla koko hygroskooppisella alueella. Pintadiffuusio ja kapillaarivirtaus alkavat vaikuttamaan huokoskokojakaumasta riippuen suhteellisen kosteuden noustessa suuremmaksi kuin 50 % RH. Kapillaarivirtaus muuttuu merkittävimmäksi kosteuden siirtymismuodoksi materiaalin suhteellisen kosteuden noustessa korkeaksi.

2.3.1 Diffuusio

Diffuusiolla tarkoitetaan ilmiötä, jossa molekyylit pyrkivät jakaantumaan tasaisesti kaasussa tai nesteessä. Molekyylit liikkuvat sattumanvaraisesti Brownin liikkeen (Michaelides 2014) vaikutuksesta. Molekyyliä liikkuessa molekyylipitoisuudet tasoittuvat, eli suuremmasta pitoisuudesta siirtyy molekyylejä pienempään pitoisuuteen. Suuremman ja pienemmän pitoisuuden välille muodostuu potentiaaliero, joka voidaan esittää pitoisuus- tai osapaine-erona. Rakennusfysiikassa tärkein tarkasteltava kaasu on vesihöyry. Kosteusvirran tiheys g [kg/(m²s)] materiaalin läpi voidaan laskea Fickin lain (2.11 tai 2.12) mukaan (Vinha 2011):

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

jossa δ_v = aineen vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmaistuna
[m²/s]

x, y, z = kosteusvirran suuntakoordinaatit [m]

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

jossa δ_p = aineen vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmaistuna
[kg/(m·s·Pa)]

Yksidimensionaalisessa tapauksessa kaavat pelkistyvät muotoon:

$$g = -\delta_v \frac{dv}{dx} \quad (2.13)$$

$$g = -\delta_p \frac{dp_v}{dp_v} \quad (2.14)$$

Materiaalin vesihöyrynvastuksen määrä voidaan esittää myös diffuusiovastuskertoimen μ [-] avulla. Diffuusiovastuskerroin μ ilmaisee, kuinka paksu kerros tarvitaan paikallaan olevaa ilmaa, että ilman vesihöyrynvastus on yhtä suuri kuin materiaalin vesihöyrynvastus. μ :n ratkaisu on esitetty kaavassa 2.15. (Hagentoft 2003 s. 96)

$$\mu = \frac{D}{\delta_v} \quad (2.15)$$

jossa D = seisovan ilman vesihöyrynläpäisevyys [m²/s] (20 °C:ssa $25 \cdot 10^{-6}$ m²/s)

Tällöin voimme kirjoittaa Fickin lain mukaisesti kosteusvirran yleisen yhtälön yksidimensionaalisessa tapauksessa materiaalin läpi kaavan 2.16 mukaisesti. (Hagentoft 2003 s. 97)

$$g = \frac{D}{\mu} \frac{dv}{dx} \quad (2.16)$$

Kosteusvirta g voidaan esittää myös kaavan 2.17 mukaisesti stationääri tilanteessa, jossa rakenteen vesihöyrynläpäisevyys esitetään vesihöyrynvastuksen Z_v [s/m] avulla. Vesihöyrynvastuksen Z_v ratkaiseminen on esitetty kaavassa 2.18. (Hagentoft 2003 ss. 97-98)

$$g = \frac{v_1 - v_2}{Z_v} \quad (2.17)$$

$$Z_v = \frac{d}{\delta_v} \quad (2.18)$$

Rakenteen sisältäessä useampia kerroksia voidaan kosteusvirta g ratkaista kaavan 2.19 mukaisesti. (Hagentoft 2003 s. 98)

$$g = \frac{v_1 - v_2}{Z_{v.tot}} \quad (2.19)$$

jossa $Z_{v.tot} = \sum_{i=1}^N \frac{d_i}{\delta_{v,i}} + Z_{vi} + Z_{ve}$, Z_{vi} ja Z_{ve} ovat rakenteet sisä- ja ulkopinnan vesihöyrynvastukset.

Kosteusvirta voidaan laskea myös materiaalin vesihöyrynläpäisykertoimen W_v [m/s] avulla. Kosteusvirran laskenta on esitetty kaavassa 2.20 ja vesihöyrynläpäisykertoimen laskenta kaavassa 2.21 (Vinha 2011).

$$g = W_v(v_1 - v_2) \quad (2.20)$$

$$W_v = \frac{1}{Z_v} = \frac{\delta_v}{d} \quad (2.21)$$

2.3.2 Pintadiffuusio

Materiaalin kosteuspitoisuuden kasvaessa huokosverkoston pinnalle alkaa kertyä vesimolekyylejä useampaan kerrokseen, eli vesimolekyylit ovat polymolekylaarisessa adsorptiossa. Sidosvoimat huokosen seinämän ja uloimpien molekyylikerrosten välillä ovat kuitenkin heikkoja ja molekyylikerroksen kasvaessa riittävän suureksi uloimmasta kerroksesta irtoaa vesimolekyylejä. Uloimman kerroksen vesimolekyylit ovat vuoroin kiinnittyneinä molekyylikerroksen välityksellä huokosseinämään ja vuoroin sekoittuneena huokosilmaan. Vesimolekyyli siirtyy kiinnittyessään alhaisemman kosteuspitoisuuden suuntaan, jossa on vähemmän vesimolekyylejä huokosseinämän pinnalla ja tästä syystä suuremmat sidosvoimat. Tätä kosteuden siirtymismuotoa kutsutaan pintadiffuusioksi. (Vinha 2011)

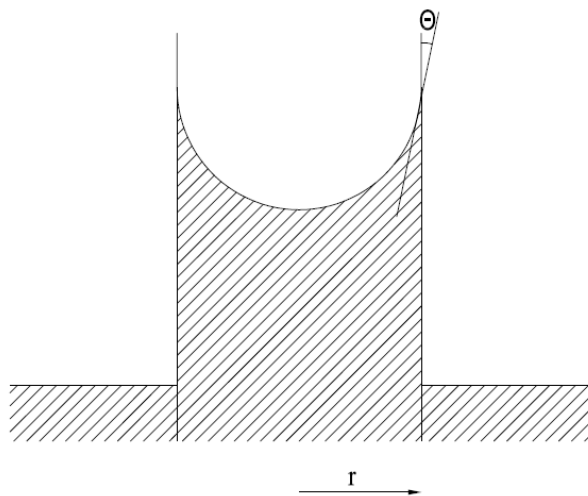
Laskennallisesti on hankala erottaa pintadiffuusiota omaksi kosteuden siirtymismuodoksi, joten se yhdistetään yleensä kapillaarivirtaan. (Vinha 2011)

2.3.3 Kapillaarivirta

Materiaalin huokosten suhteellisen kosteuden noustessa yli 95 % RH:n, kosteuden siirtyminen tapahtuu lähes kokonaan nesteinä. Tämä yleensä edellyttää materiaalin olemista yhteydessä nestemäiseen veteen ainakin ajoittain. (SFS-EN ISO 15148, 2002) Jos materiaaliin ei kohdistu ulkoista painetta, nestemäisen veden siirtyminen tapahtuu

kapillaari-ilmion vaikutuksesta. Vesi voi siirtyä kapillaarisesti materiaalissa jokaiseen suuntaan huokosverkoston ja kosteuspitoisuuden salliessa kapillaari-ilmion.

Kapillaari-ilmio esitetään nyt kapillaarisen nousun avulla. Veden kapillaarista nousua on helpointa kuvata pyöreän putken avulla. Ohuessa putkessa, joka on upotettuna vapaaseen veteen, vedenpinta nousee korkeammalle kuin ympäröivässä vedessä. Putkessa olevaan veteen vaikuttaa kapillaari-imu. Tämä johtuu putken seinämän ja veden välillä vallitsevasta vetovoimasta sekä vedessä vaikuttavasta koheesiosta. Toisaalta veteen putkessa vaikuttaa gravitaatiovoima tai muu ulkoinen paine. Tästä syystä veden pinta putkessa kaareutuu eli muodostuu meniskus (kuva 2.9). (Vinha 2011)



Kuva 2.9. Kapillaari-imun vaikutuksesta muodostuva nesteen nousu putkessa. Gravitaatiovoiman vaikutuksesta nesteen pintaan muodostuu kaareva muoto, meniskus. (Hagentoft 2003 s. 100)

Veden pinnan nousemisesta huokosputkessa aiheutuu veden pinnan ja ilman välille paine-ero. Tämä paine-ero on nimetty huokosalipaineeksi, s [Pa] (Vinha 2011). Tämä veden imusta aiheutuva negatiivinen paine s [Pa] on ratkaistavissa kaavan 2.22 avulla (Hagentoft 2003 s. 99, Vinha 2011).

$$s = \frac{2 \cdot \sigma}{r} \cdot \cos(\theta) \quad (2.22)$$

jossa σ = pintajännitys [N/m] (0,073 N/m lämpötilassa 20 °C)

r = huokosputken säde [m]

θ = veden pinnan meniskuksen ja putken seinän kosketuspinnan kulma [°]

(normaaleissa rakennusmateriaaleissa voidaan olettaa kulman θ olevan nolla ilman suurta virhettä)

Huokosalipaineen ja huokosilman suhteellisen kosteuden välillä on yhteys Kelvinin lain avulla (Vinha 2011):

$$\ln \varphi = -\frac{s \cdot M_w}{R \cdot T \cdot \rho_w} \quad (2.23)$$

Kaavan 2.23 avulla on laskettavissa, kuinka suuri huokosilman suhteellisen kosteuden tulee olla, että huokosessa tapahtuisi kapillaarikondenssi.

Vesi voi nousta kapillaarisesti putkessa korkeudelle, jossa vallitsee tasapainotila vedestä aiheutuvan hydrostaattisen paineen ja huokosalipaineen välillä (Vinha, 2011). Hydrostaattisen paineen vedelle voi aiheuttaa esimerkiksi gravitaatiovoima tai muu ulkoinen paine. Tasapainoyhtälö huokosputkessa vaikuttaville paineille on esitetty seuraavassa yhtälössä (Vinha, 2011):

$$\pi \cdot r^2 \cdot h \cdot g \cdot \rho_{vesi} - 2\pi \cdot r \cdot \sigma \cdot \cos \theta = 0 \quad (2.24)$$

jossa h = veden nousukorkeus putkessa verrattuna ympäröivään veteen [m]

g = putoamiskiihtyvyyys maan pinnalla [m/s^2] (noin $9,81 m/s^2$)

ρ_{vesi} = veden tilavuuspaino [kg/m^3]

Huokosalipaineen suuruus tasapainotilanteessa on esitetty kaavassa 2.25 (Hagentoft, 2003):

$$h \cdot g \cdot \rho_w = s = \frac{2 \cdot \sigma}{r} \cos \theta \quad (2.25)$$

Kaavan 2.25 perusteella veden kapillaarinen nousukorkeus putkessa voidaan kirjoittaa kaavan 2.26 mukaisesti, jos meniskuksen ja huokosputken seinämän välinen kulma oletetaan olevan 0° . (Hagentoft 2003 s. 100)

$$h = \frac{2 \cdot \sigma}{g \cdot r \cdot \rho_w} \quad (2.26)$$

Teoreettinen nousukorkeus pätee vain putkille. Rakennusmateriaaleille sitä voidaan käyttää kapillaarisen nousukorkeuden suuruusluokan arviointiin. Rakennusmateriaalien huokosverkko on yleensä hyvin vaihteleva läpimittansa ja muotonsa suhteen. (Hagentoft 2003) Kapillaarisessa nousukorkeudessa on havaittavissa samankaltainen hystereesi-ilmiö kuin tasapainokosteuden osalta (Vinha 2011).

Kapillaarinen kosteusvirran tiheys g_{cap} [kg/m^2s] kuvaa kosteuden siirtymistä materiaalissa. Kapillaarisen kosteusvirran tiheyden laskeminen materiaalin läpi yleisessä tapauksessa Darcyn lain avulla on esitetty kaavassa 2.27. (Vinha 2011)

$$g_{cap} = -\rho_w \frac{k}{\eta_w} \frac{\partial p}{\partial x} = -k_w \frac{\partial s}{\partial x} \quad (2.27)$$

jossa k = materiaalin permeabiliteetti [m^2]

η_w = veden dynaaminen viskositeetti ($1,31 \cdot 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s}/m^2$, kun $T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$)

k_w = kosteudenjohtavuus [$\text{kg}/(m\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$]

Darcyn laki pätee veden siirtymiseen materiaalissa kaikkiin suuntiin. Jos materiaali on vesikosketuksessa alapinnastaan ja kosteuden siirtyminen tapahtuu alhaalta ylöspäin, voidaan kapillaarisen kosteusvirran tiheys kirjoittaa muotoon (Vinha 2011):

$$g_{cap} = \frac{A_w}{2\sqrt{t}} \quad (2.28)$$

jossa A_w = veden imeytymiskerroin (kapillariiteettikerroin) [$\text{kg}/m^2\sqrt{s}$]

t = aika [s]

Veden imeytymiskertoimen arvoja on määritetty useille materiaaleille. Kapillaarisesti ajassa t materiaalin läpäissyt kosteus määrä saadaan laskettua kaavan 2.29 avulla.

$$\int_0^t g_{cap} dt = A_w \cdot \sqrt{t} \quad (2.29)$$

Materiaalissa kapillaarisesti kyllästyneen rintaman syvyys x_p saadaan ratkaistua kaavan 2.30 avulla.

$$x_p = B_w \cdot \sqrt{t} \quad (2.30)$$

jossa B_w = veden tunkeutumiskerroin [m/\sqrt{s}]

Kosteusvirran tiheys tietyllä korkeudella materiaalissa voidaan laskea seuraavasti:

$$g_{cap} = \frac{A_w \cdot B_w}{2 \cdot x_p} \quad (2.31)$$

2.3.4 Hydraulivirta

Kosteuden imeytyminen materiaaliin hidastuu materiaalin saavutettua kapillaarisen kyllästyskosteuden, jos materiaaliin ei kohdistu ulkoisia voimia. Ulkoisena voimana voi toimia esimerkiksi painovoima, jonka ansiosta kosteuden imeytyminen jatkuu kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden saavuttamisen jälkeen. Painovoiman

aiheuttama hydrostaattinen paine muodostuu esimerkiksi patorakenteen seinään. Hydraulivirta voidaan laskea Darcyn lain avulla (Hagentoft 2003):

$$g = \rho_w \frac{k}{\eta_w} \frac{\Delta P}{d} = k_w \nabla P \quad (2.32)$$

jossa ΔP = Veden paineen ero [Pa]

∇P = paineen gradientti [Pa/m]

Veden paineen ero ΔP saadaan laskettua tapauksessa, jossa vaikuttavana voimana on gravitaatiovoima kaavan 2.33 avulla:

$$\Delta P = h \cdot \rho_w \cdot g \quad (2.33)$$

3. TUTKITUT MATERIAALIT

Tässä työssä tutkittiin kolmen eri valmistajan sisäkuoressa käyttämän betonin kosteusteknisiä ominaisuuksia. Tutkittavaksi valittiin elementtiteollisuudessa käytettyjä betonilaatuja, koska ennen työn aloitusta tehdyn selvityksen perusteella suurin osa Suomen betonisisäkuorista valmistetaan elementteinä (Talonstrakentaminen 2016). Kokeita varten tilattiin sisäkuorielementit kahdelta valmistajalta: Parma Oy:ltä ja Lujabetoni Oy:ltä. Lisäksi tilattiin elementtitehtailla käytettyä valmisbetonilaatua Rudus Oy:ltä, josta valettiin Tampereen teknillisellä yliopistolla sisäkuorielementtejä ja lieriöitä, joista valmistettiin koekappaleita. Betonin valmistusreseptit on määritetty salaisiksi valmistajien toimesta, joten seuraavissa kohdissa esitetään vain suurpiirteisesti betonien valmistustiedot.

3.1 Betoni, Parma

Parma Oy:n tutkittava sisäkuorielementti valettiin Parma Oy Forssan Julkisivutehtaalla 11.2.2016. Betonin nimellislujuus oli K40 ja vesi-sementtisuhde 0,48. Vesimäärä kokonaisuudessaan oli 174,4 kg/m³. Suurin raekoko oli 16 mm. Massa oli itsetiivistyvää. Sementtinä oli nopeasti varhaislujuuden saavuttavaa sementtiä, eli ns. pikasementtiä. Lisäaineina oli käytetty notkistinta ja huokostinta.

3.2 Betoni, Lujabetoni

Lujabetoni Oy:n tutkittava sisäkuorielementti valettiin Lujabetoni Oy Poltinahon tehtaalla Hämeenlinnassa 19.11.2015. Betonin nimellislujuus oli K50 ja vesi-sementtisuhde 0,39. Vesimäärä oli 111,04 l/m³. Suurin raekoko oli 16 mm. Sementti oli luokituksestaan N 52,5, eli varhainen ljuuden kehitys oli normaalia luokkaa. Lisäaineina oli käytetty notkistinta ja huokostinta.

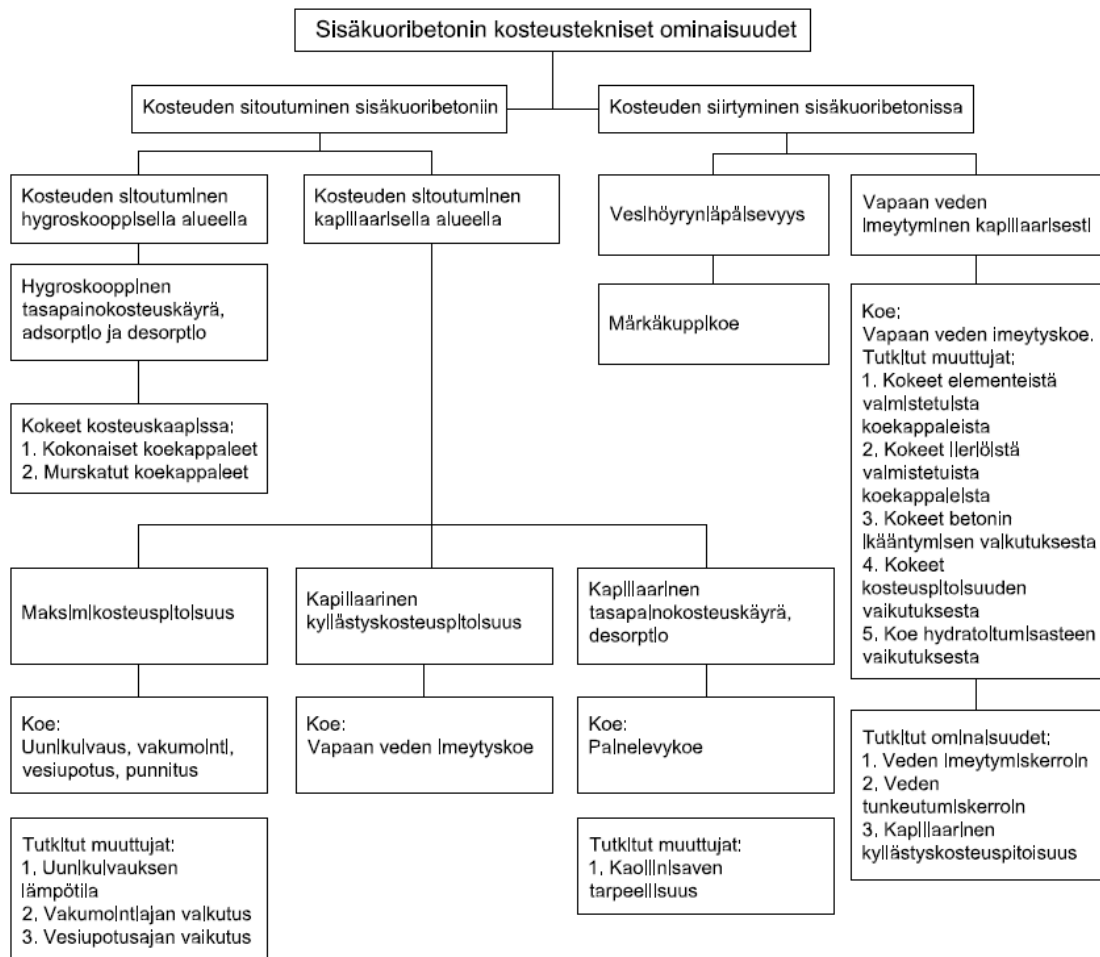
3.3 Betoni, Rudus

Rudus Oy:n toimitti valmisbetonia Nekalan tehtaalta. Toimituspäivä oli 20.4.2016. Betoni oli nopeasti kovettuvaa, jonka nimellislujuus oli K50. Betonille tehtiin kuitenkin standardin SFS-EN 12390-3 mukainen puristuslujuuden testaus 28 vuorokauden iässä, jossa betonin puristuslujuudeksi saatiin K40. Betonin vesi-sementtisuhde oli 0,449 ja sementistä 2/3 oli nopeasti varhaislujuuden saavuttavaa sementtiä ja 1/3 normaalisti varhaislujuuden saavuttavaa sementtiä. Suurin raekoko oli betonia tilattaessa 16 mm, mutta betonin seassa oli havaittavissa 32 mm raekoon omaavaa runkoainesta. 32 mm runkoainesta omaavaa betonia oli ilmeisesti jäänyt betonikuorma-auton säiliöön

edellisestä kuormasta. Tilatun betonin lisäaineena oli käytetty notkistinta. Tehollinen veden määrä oli 193 l/m^3 ja ilma-vesi-suhde oli 0,104.

4. SUORITETUT KOKEET

Suoritettujen kokeiden avulla tutkittiin kosteuden sitoutumis- ja siirtymisominaisuuksia. seuraavassa kuvassa on esitettyä tutkitut ominaisuudet ja suoritettut kokeet.



Kuva 4.1. Sisäkuoribetonista tutkitut ominaisuudet ja tehdyt kokeet.

4.1 Esivalmistelut

Parman ja Lujabetonin sisäkuorielementit tilattiin valmiiksi valmistettuina TTY:lle. Ruduksen betonia varten valmistettiin 1,2 m x 1,2 m kokoisia laatikoita vesivanereista, joiden pohja oli vesivanerista ja korkeus 0,15 m. Lisäksi valmistettiin 0,5 m korkeita lieriömuotteja 200 mm ulkohalkaisijaltaan olevasta viemäriputkesta. Viemäriputken sisähalkaisija oli n. 187 mm.

4.1.1 Valu

Ruduksen betoni valettiin 20.4.2016 Tampereen teknillisen yliopiston laboratoriossa. Valun tiivistämisessä käytettiin sauvatärytintä. Viemäriputkesta valmistetut lieriömuotit täytettiin aluksi puoleen väliin ja tiivistettiin, jonka jälkeen ne täytettiin täydeksi ja tiivistettiin loppuosa. Elementit valettiin suoraan 0,15 m paksuuteen ja tiivistettiin sauvatäryttimellä. Elementtien pinnat hierrettiin ja liipattiin teräslipillä. Esiselvityksen perusteella elementtitehtaissa ei tehdä betonille jälkihoitoa (Ahonen 2016), joten jälkihoito jätettiin myös koebetonille tekemättä.

4.1.2 Koekappaleiden valmistaminen

Elementeistä porattiin timanttikoralla 185 mm halkaisijaltaan olevia betonilieriöitä, joista leikattiin n. 25 mm paksuja siivuja timanttisahalla. Kappaleet merkittiin, jonka jälkeen pinnat hiottiin molemmin puolin. Sahauksessa ja hionnassa käytettiin puhdasta hanavettä pölynsidontaan ja jäähdyttämään työstöterää. Koekappaleiden lopullinen korkeus oli noin 20 mm. Hionnan jälkeen koekappaleiden korkeus ja halkaisija mitattiin kolmesta kohtaa. Ruduksen muoviputken valettu lieriö leikattiin putken kanssa timanttisahalla n. 25 mm siivuksi, jonka jälkeen muoviputki poistettiin koekappaleen päältä ja koekappale merkittiin, hiottiin molemmin puolin ja mitattiin kuten elementeistä valmistetut koekappaleet.



Kuva 4.2. Betonielementistä porattuja noin 185 mm halkaisijaltaan olevia lieriöitä, joista valmistettiin timanttisahaamalla ja hiomalla koekappaleita.

Kuvassa 4.3 on esitettyinä valmiita koekappaleita.



Kuva 4.3. Valmiita 185 mm halkaisijaltaan olevia ja noin 20 mm korkeita koekappaleita. Koekappaleet on merkattu reunoilta ja koekappaleiden kuivuttua merkkkaus tehtiin myös koekappaleiden yläpinnalle.

Painelevykoetta varten koekappaleet valmistettiin poraamalla elementeistä noin 52 mm halkaisijaltaan olevia lieriöitä. Lieriöistä leikattiin noin 10 mm korkeita koekappaleita, jotka hiottiin noin 6-9 mm paksuuteen. Mittausstandardin (NT BUILD 481, 1997) mukaan koekappaleiden vähimmäispinta-alan tulee olla 15 cm^2 ja korkeuden 5-15 mm. Koekappaleiden korkeus tulee pyrkiä pitämään alle 10 mm:ssa, ettei mittausaika kasva turhan pitkäksi (Krus & Kiesl 1998). Muutoin koekappaleiden valmistaminen tapahtui kuten suuremmilla 185 mm halkaisijaltaan olevilla koekappaleilla.

Tasapainokosteuskoetta murskatuilla koekappaleilla varten elementeistä porattiin noin 70 mm halkaisijaltaan olevia lieriöitä, jotka sahattiin noin 12-18 mm paksuiksi. Koekappaleita ei hiottu, mutta merkitseminen ja mittaaminen suoritettiin, kuten edellä muiden koekappaleiden osalta on kerrottu. Murskausmenettely on kerrottu tarkemmin tasapainokosteuskoetta käsittelevässä kappaleessa

Veden imeytyskoe

Veden imeytyskokeella testattiin Parman, Lujan ja Ruduksen sisäkuorielementiksi valettuja betoneja. Lisäksi testattiin Ruduksen betonilla kosteuspitäisyyden vaikutusta veden imeytymisominaisuuksiin painelevykokeessa olleilla koekappaleilla. Ruduksen betonilla testattiin myös kosteuden imeytymisominaisuuksien kehittymistä ajan funktiona alkaen vuorokausi betonin valamisesta. Edellä mainitussa kokeessa käytettiin muoviputkeen valetusta betonista valmistettuja koekappaleita.

Jokaista veden imeytyskoetta varten valmistettiin kolme koekappaleita. Koekappaleet valmistettiin, kuten aikaisemmin kerrottiin, pois lukien heti valamisen jälkeen testatut

koekappaleet, jotka testattiin hiomattomina. Pinnat päätettiin jättää hiomatta, koska betonin lujuus ei ole kehittynyt riittävästi pinnan hiomiseen 1-2 päivän ikäisenä.

Koekappaleiden annettiin tasaantua olosuhdehuoneessa, kunnes painon muutos oli alle 0,1 %/24 h, pois lukien koekappaleet, jotka testattiin valamisen jälkeen ennen kuin tasaantuminen oli ennättänyt tapahtua ja koekappaleet, joiden avulla testattiin kosteuspitoisuuden vaikutusta veden imeytymisominaisuuksiin. Olosuhdehuoneen lämpötila oli tasaantumisaikana noin +20 °C. Ilman suhteellinen kosteus vaihteli 50-70 % RH:n välillä, johtuen olosuhdehuoneen säätimen viallisesta toiminnasta, mutta oli suurimmaksi osaksi noin 60 % RH.

Tasapainokosteuskoe

Koekappaleet valmistettiin, kuten aikaisemmin on kerrottu. Ruduksen koekappaleet valettiin muoviputkeen valetusta lieriöstä. Koekappaleet hiottiin noin 15-16 mm:n paksuiksi. Koekappaleet valmistettiin vähintään kuukauden vanhasta betonista. Kappaleet laitettiin uunikuivaukseen 105 °C:n lämpötilaan 14 vuorokauden ajaksi. Koekappaleiden kosteutta seurattiin, kunnes voitiin todeta koekappaleiden painon muutoksen olevan alle 0,1 %/vrk. Uunikuivauksen jälkeen, koekappaleiden jäähtyttyä, koekappaleiden reunoille laitettiin ilmastointiteippi, jolloin kosteuden siirtyminen tapahtui yksidimensionaalisesti. Koekappaleet punnittiin ennen teipin laittamista ja teipin laittamisen jälkeen, jolloin voitiin tuloksista poistaa teipin paino.

Koekappaleita valmistettiin jokaisesta kolmesta tutkittavasta betonilaadusta kuusi kappaletta, jolloin saatiin kolme tutkittavaa koekappaletta kustakin betonilaadusta tasapainottumaan matalammasta kosteuspitoisuudesta korkeampaan päin, eli adsorptioon ja kolme koekappaletta tasapainottumaan korkeammasta pitoisuudesta matalampaan, eli desorptioon.

Tasapainokosteuskoe, murskatut koekappaleet

Koekappaleita valmistettiin aina kolme jokaisesta betonista kuhunkin koekappalesarjaan. Sarjoja tehtiin yhteensä kahdeksan, jolloin saatiin näytteitä tasaantumaan useaan suhteellisen kosteuden pitoisuuteen samanaikaisesti. Koekappaleet uunikuivattiin ennen murskaamista ja kuivapaino punnittiin. Murskatun koekappaleen osien suurimmaksi halkaisijaksi valittiin 12 mm, eli murskatun aineksen seulonnassa käytettiin 12 mm seulaa.

Ennen koekappaleiden särkemistä tehtiin vertailevia kokeita eri murskaustapojen välillä. Ensimmäisenä koekappaleiden särkemistapana koitettiin kappaleiden särkemistä kankaan välissä vasaralla. Tällä tavoin tehdyssä murskauksessa seulan pohjalle päätyvä hienoaineksen määrä oli 14,5 paino-% ja hävikin määrä 1,6 paino-%. Lisäksi testattiin kappaleiden särkemistä morttelilla ja murskaimella (taulukko 4.1).

Taulukko 4.1. Koekappaleen murskaustavan vertailu. Läpäistävänä suurimpana seulana on käytetty #8 mm seulaa.

Koekappale n. Ø 70 x 12 mm ²	Mortteli		Murskain	
	g	%	g	%
Särkemätön	147,0	100,0	131,5	100,0
Kivet	45,1	30,6	48,9	37,2
4 mm seulan päällä	64,9	44,0	57,5	43,7
1 mm seulan päällä	27,0	18,3	18,1	13,8
Seulan pohjalla	9,8	6,7	6,8	5,1
Hävikki	0,7	0,5	0,3	0,2

Taulukosta 4.1 voidaan huomata murskaimella tehtävän kappaleiden särkemisen aiheuttavan pienemmän seulan pohjalle päätyvän hienoainespitoisuuden ja hävikin verrattuna mortteliin. Myös 1 mm seulan päälle päätynyt aines on vähäisempää murskaimella hajotetuissa kappaleissa. Murskausmenetelmäksi valikoitui tämän perusteella murskain.

Kappaleet murskattiin aluksi pienemmiksi käyttäen teräksistä mortteliä (kuva 4.4). Morttelissa murskattujen kappaleiden koko pyrittiin pitämään halkaisijaltaan noin 2,5 cm:n kokoluokassa.



Kuva 4.4. Teräksinen mortteli.

Varsinainen koekappaleiden murskaus suoritettiin kiviaineksen murskaukseen tarkoitetulla pienellä murskaimella (kuva 4.5):



Kuva 4.5. Murskain.

Murskauksessa murskaimen leukoja pienennettiin vähitellen. Jokaisen leukojen pienentämisen välissä murskattu aines seulottiin 12 mm seulalla. Murskaimen leukojen väliä vähitellen pienentämällä saatiin hienoaineksen määrä pidettyä mahdollisimman pienenä.

Painelevykoe

Kaikista kolmesta tutkittavasta materiaalista valmistettiin 36 koekappaletta. Yhteen painelevylaitteeseen mahtui kerrallaan 12 koekappaletta, joten jokaisesta tutkittavasta betonista oli kolme koesarjaa. Kolme koesarjaa mahdollisti useamman painelevylaitteen samanaikaisen käytön.

Märkäkuppikoe

Ruduksen betonista valmistettiin koekappaleet muoviputkeen valetusta betonista. Parman ja Lujan betonista koekappaleet valmistettiin sisäkuorielementeistä. Valmiiden koekappaleiden korkeus oli noin 20 mm. Koekappaleet valmistettiin vähintään kuukauden vanhasta betonista. Koekappaleiden annettiin tasaantua olosuhdehuoneessa 20 °C lämpötilassa ja noin 60 %:n RH suhteellisessa kosteudessa kuukauden ajan ennen kokeen aloitusta.

4.2 Veden imeytyskoe

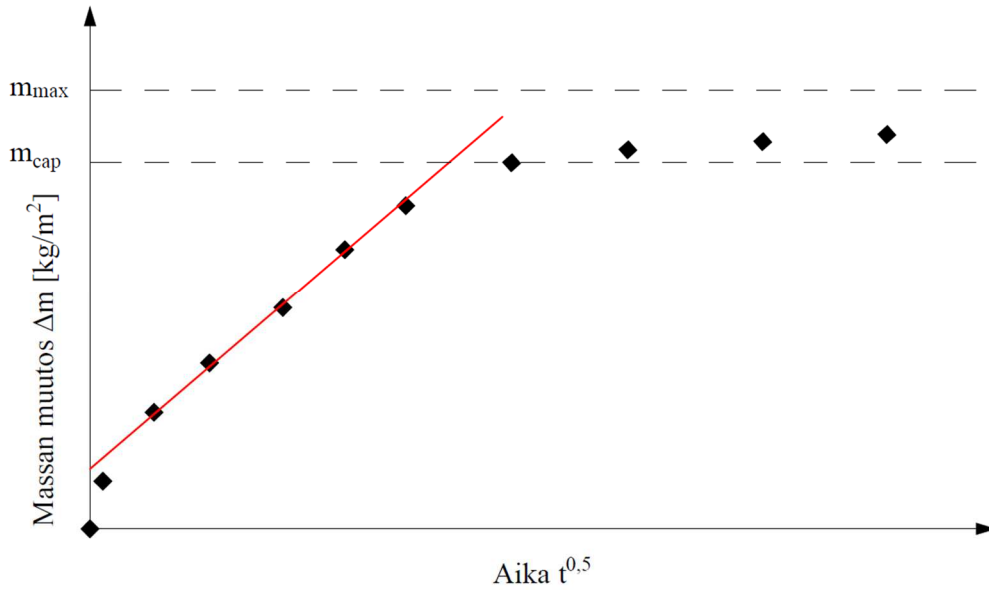
4.2.1 Yleistä

Veden imeytyskokeessa koekappale asetetaan alapinnastaan jatkuvaan vesikosketukseen ja koekappaleen painon muutosta seurataan ajan funktiona. Tuloksena saadaan painonnousukuvaaja, jonka perusteella voidaan määrittää veden imeytymiskerroin A_w

[kg/(m²s^{0,5})] ja veden tunkeutumiskerroin B_w [m/s^{0,5}]. Veden imeytymiskertoimen määrittämiseksi on olemassa standardi SFS-EN ISO 15148, mutta veden tunkeutumiskertoimen määrittämiseksi ei ole tehty virallista ohjetta. Näiden kahden ominaisuuden lisäksi kuvaajasta pystytään määrittämään kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus w_{cap} . Tunkeutumiskertoimen ja kyllästyskosteuspitoisuuden määrittämiseksi painonnousukuvaajassa tulee olla selvästi havaittavissa hetki, jolloin veden tunkeutumisrintama saavuttaa koekappaleen yläpinnan. Tämä hetki näkyy painonnousukuvaajan muuttumisena loivemmaksi.

Kokeen aikana tulee tehdä vähintään kolme rinnakkaista testausta samasta materiaalista valmistetuista koekappaleista. Koekappaleiden reunat suojataan, jotta saadaan kosteuden siirtyminen yksidimensionaaliseksi. (RIL 255-1, 2014) Koekappaleiden yläpinnat tulee suojata jättäen pieni ilmatila koekappaleen ja suojauksen väliin. Tällöin ilmatilaan muodostuu oma mikroilmasto, joka pysyy ympäröivää ilmastoa tasaisempana. (Tuominen, 2014) Raja-arvona lämpötilalle on 23 ± 5 °C, joka saa vaihdella ± 2 °C testauksen aikana. Suhteellisen kosteuden raja-arvona on 50 ± 5 % RH, joka saa vaihdella ± 5 % RH. (SFS-EN ISO 15148/A1, 2016) Koekappaleiden tulee olla tasapainottuneet testauksen aikana vallitseviin olosuhteisiin ennen kokeen aloitusta (SFS-EN ISO 15148, 2002).

Alkuperäinen koekappaleen massa selvitetään punnitsemalla koekappale ennen asettamista vesiastiaan. Koekappale asetetaan vesiastiaan siten, että vesikosketus on 2-10 mm kappaleen alapinnassa. Koekappaleiden tulee olla koko kokeen ajan alapuoleltaan kosketuksissa veteen. Veden siirtymistä koekappaleeseen seurataan punnitsemalla koekappale määräajoin. Koekappaleen punnitseminen voidaan tehdä myös automaattisella laitteistolla, jolloin koekappaleita ei tarvitse poistaa vesikosketuksesta punnitsemisen ajaksi. Automaattisesti mitatusta punnitustuloksista poistetaan laskennallisesti veden vähenemisestä johtuva veden nosteen muutos. Vettä vähenee astiasta haihtumisen ja koekappaleeseen imeytymisen seurauksena. Mittausten perusteella voidaan piirtää kuvaaja, jossa on esitettyä koekappaleen massan muutos ajan neliöjuuren funktiona. (RIL 255-1, 2014) Esimerkki kuvaajasta on kuvassa 4.6:



Kuva 4.6. Veden imeytymiskertoimen määrittäminen. Kuvassa on vedenimukokeen punnitustuloksista piirretty painonnousukuvaaja, johon on lisätty regressiosuora veden imeytymiskertoimen määrittämiseksi.

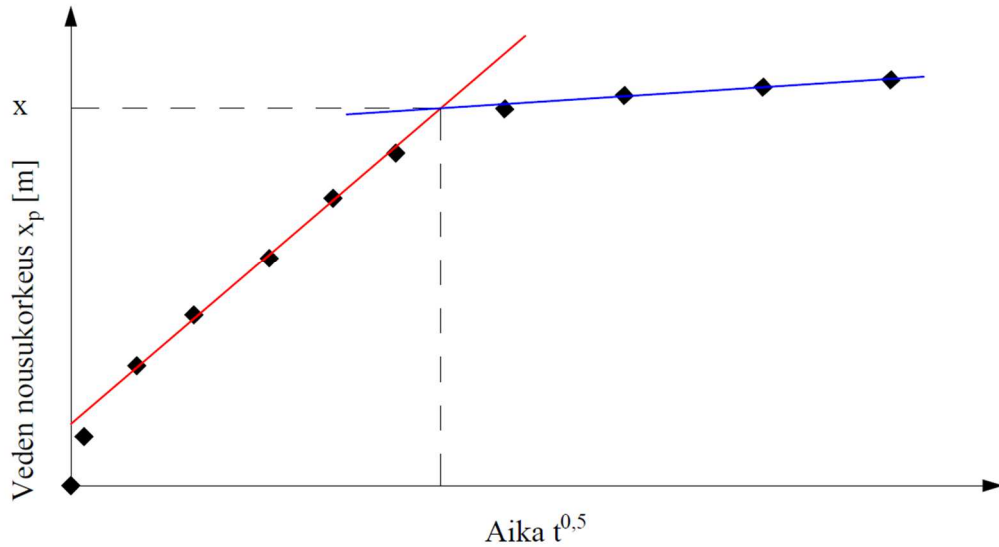
Kuvasta 4.6 on havaittavissa lineaarinen osuus painon muutoksessa ajan neliöjuuren funktiona. Kuvassa on piirretty lineaariselle osuudelle regressiosuora. Veden imeytymiskerroin A_w [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0.5})$] on painon muutoksen lineaariselle osuudelle piirretty regressiosuoran kulmakerroin:

$$A_w = \frac{\Delta m}{\sqrt{t}} \quad (4.1)$$

jossa Δm = regressiosuoralta valittujen kahden pisteen välinen massan muutos [kg/m^2]

\sqrt{t} = valittujen kahden pisteen välinen ajan neliöjuuri [$\text{s}^{0.5}$]

Kuvasta 4.6 voidaan huomata myös toinen lineaarinen osuus. Se alkaa kosteusrintaman yltäessä koekappaleen yläpintaan. Painon muutos jatkuu edelleen kosteuden siirtyessä pienempiin huokosiin kapillaari- tai hydraulivoimien ajamana. Ajanhetki jolloin kapillaarisesti nousevan veden rintama ylettyy koekappaleen yläpintaan, voidaan määrittää kuvan 4.7 avulla.



Kuva 4.7. Veden tunkeutumiskertoimen määrittäminen. Kuvaan on piirretty regressiosuorat alun lineaarisen painon muutoksen osalle ja osuudelle, joka alkaa kapillaarisesti nousevan veden yltäessä koekappaleen yläpintaan.

Kapillaarisesti nouseva kosteus saavuttaa koekappaleen yläpinnan regressiosuorien leikatessa toisensa. Tiedettäessä koekappaleen korkeus, voidaan melko luotettavasti määrittää veden tunkeutumiskerroin B_w kaavan 4.2 avulla (Tuominen 2016):

$$B_w = \frac{x}{t^{1/2}} \quad (4.2)$$

jossa x = veden etenemisrintama [m]

t = aika [s]

Veden tunkeutumisrintaman selvittämiseen on olemassa myös muita tapoja. Mittaaminen voi perustua sähköjohtavuuteen tai lämpökuvaukseen, joiden avulla voidaan selvittää vesirintaman eteneminen. Vesirintama voidaan paikantaa myös gamma- tai röntgensädelaitteistolla, NMR-mittauksilla tai neutroniradiografialla. Nämä mittaustavat ovat kuitenkin monimutkaisia ja kalliita toteuttaa ja mittaustarkkuus ei juurikaan parane. (RIL 255-1, 2014)

Vedenimukokeen avulla voidaan selvittää myös materiaalin kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus w_{cap} [kg/m³]. Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus kuvaa suurinta mahdollista kosteuden määrää, joka voi sitoutua materiaaliin kapillaarisesti. Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus saadaan laskemalla materiaalin kosteuspitoisuus kuvan 4.7 mukaisen painonnousukuvaajan regressiosuorien leikkauspisteessä ja vertaamalla sitä kappaleen tilavuuteen kaavan 4.3 mukaisesti.

$$w_{cap} = \frac{m_{cap} - m_0}{V} \quad (4.3)$$

jossa m_{cap} = kapillaarisesti kyllästyneen kappaleen paino [kg]

m_0 = kappaleen absoluuttinen kuivapaino [kg]

4.2.2 Koejärjestely

Kokeet toteutettiin Eero Tuomisen kehittämällä automaattisella vapaan veden imeytyslaitteistolla (Tuominen 2016), TTY:n ”Toimintatapaohje kapillaari-imukokeen suorittamiseen automaattilaitteistolla” mukaisesti (Tuominen, 2014). Koejärjestely perustuu standardiin SFS-EN ISO 15148. Koejärjestelyyn kuului kalibrointimittauksia, joiden avulla määritettiin veden haihtumisesta aiheutuva painonnousu vesikosketuksessa oleviin koekappaleisiin. Kalibrointituloksista saatua painonnousu tietoa käytettiin tulosten tulkitsemiseen tehdyssä laskentataulukossa.

Veden imukokeella testattiin itsevaletun Ruduksen betonin vedenimuominaisuuksien muuttumista ajan funktiona. Ensimmäinen vedenimukoe tehtiin vuorokausi koekappaleiden valamisen jälkeen ja testausta jatkettiin määräajoin kahden kuukauden ajan. Lisäksi tutkittiin Ruduksen betonilla kosteuspitoisuuden vaikutusta vedenimuominaisuuksiin. Kosteuspitoisuus tasattiin tietylle tasolle painelevykokeen avulla ja kokeessa käytettiin painelevykokeessa olleita koekappaleita. Painelevykokeen päätyttyä tiettyyn kosteuspitoisuuteen tasapainottuneet koekappaleet siirrettiin välittömästi vedenimukokeeseen. Rudukselta tulleesta betonista tehtiin myös testi, jossa koekappaleiden annettiin tasaantua aluksi suhteellisen kosteuteen 60 % RH, jonka jälkeen ne kasteltiin uudelleen vesiupotuksessa. Koekappaleiden annettiin olla vesiupotuksessa niin kauan, ettei painon muutosta enää tapahtunut. Betonin kastuessa sementin hydratoituminen käynnistyy uudelleen. Tällä kokeella testattiin, onko betonin uudelleen kastuttamisella vaikutusta vedenimuominaisuuksiin.

Varsinaisten mittauksien jälkeen pestiin vesisastiat juoksevan veden alla pesusienen avulla ja vaihdettiin vesiastiaan käänteisosmoosilaitteistolla puhdistettu de-ionisoitu vesi. Vettä mahtui vesiastioihin noin kaksi litraa. Veden annettiin tasaantua testauskaappin lämpötilaan ennen kalibrointimittauksen alkua. Vettä pidettiin jatkuvasti koelaitteiston osana olevissa vesiastioissa, pois lukien astioiden pesuhetket. Myös testauskaappien ovet pidettiin suljettuina muutoin, kuin kokeen suorittamiseksi oli tarpeellista. Näillä toimenpiteillä varmistettiin testauskaappien materiaalien tasoittuminen vesiastian kosteuslisän mukaiseen suhteelliseen kosteuteen varsinaisten kokeiden ja kalibrointien aikana.

Testauslaitteistolle tehtiin kalibrointimittaus ennen jokaisen varsinaisen testauksen alkua ensimmäisten 24 mittauksen aikana, jonka jälkeen kalibrointimittauksia tehtiin ennen joka toisen mittauksen alkua. Kalibrointimittauksessa vesiastiaan asetettiin muovinen

pohjaltaan umpinainen lieriö, jonka painonmuutosta seurattiin automaattisen punnituksen avulla. Paino muuttuu vesiastiasta haihtuvasta vedestä johtuen, koska tällöin veden pinta laskee ja sen myötä veden nosteen vaikutus kappaleeseen pienenee. Kalibroinnin aikana seurattiin sisäilman suhteellista kosteutta, jonka avulla haihtumisnopeus saatiin yhdistettyä laskennallisesti sisäilman suhteelliseen kosteuteen. Kalibrointimittauksen yhteydessä tarkastettiin myös automaattisten vaakojen tarkkuus kolmella tarkkuuspunnuksella 500 g, 1000 g ja 2000 g sekä vertailtiin ristiin automaattisten vaakojen ja pöytävaa’an tuloksia.

Vapaan veden imeytyslaitteistossa on kolme erillistä kaappia, joiden pohjalla on tunkilla nostettava vesiastia. Kaappien yläosassa on reiät, joista koekappaleiden ripustimet saadaan kiinnitettyä automaattisesti painoa mittaaviin vaakoihin. Mittauslaitteistoon kuuluu myös tietokone, jonka avulla ohjataan vaakoja ja kirjataan pöydällä tehtävät punnitukset veden imeytymiskerroin -lomakkeeseen, joka kuuluu vapaan veden imeytyslaitteistoon. Veden imeytymiskerroin -lomaketta käytetään punnitustulosten kirjaamiseen ja koetulosten analysointiin. Kuvassa 4.8 on esitettyä TTY:n vapaan veden imeytyslaitteisto.



Kuva 4.8. TTY:n vapaan veden imeytyslaitteisto

Tasapainottuneet koekappaleet punnittiin ja niiden halkaisija ja paksuus mitattiin kolmesta kohtaa. Koekappaleiden sivut käsiteltiin parafiiniin ja vahan seoksella, jolloin veden imeytyminen pysyi yksidimensionaalisena. Koekappaleiden päälle asetettiin parafiiniin ja vahan seoksen varaan 2 mm paksu muovinen suojus, joka jätettiin irti koekappaleen pinnasta noin 1-2 mm. Muovisen suojuksen ja koekappaleen väli täytettiin

reunojen osalta parafiinin ja vahan seoksella. Muovisuojuksen ja koekappaleen väliseen vahaukseen tehtiin rautalangalla pieni reikä, joka esti paineen muodostumista muovisuojuksen ja koekappaleen väliseen ilmatilaan. Kuvassa 4.9 on esitettyinä valmiiksi suojatut kappaleet. Koekappaleet punnittiin suojauksen jälkeen. Painelevykokeesta vedenimukokeeseen siirrettyille koekappaleille ei tehty suojauksia.



Kuva 4.9. Kirkaalla 2 mm muovipleksillä yläpuolelta suojatut koekappaleet. Koekappaleiden reunit on suojattu parafiinin ja vahan seoksella.

Suojauksen jälkeen koekappaleet asetettiin ripustimiin. 185 mm halkaisijaltaan oleville koekappaleille käytettiin ripustimia, joiden tukipisteet olivat kappaleen pohjassa kolmessa kohtaa. Tukipisteiden kosketuspinnat oli tehty kuperiksi kosketuspinta-alan pienentämiseksi. 52 mm halkaisijaltaan oleville koekappaleille käytettiin ripustimia, joihin kiinnitettiin koekappaleet reunoiltaan. Suuremmilla koekappaleilla reunoilta tapahtuva kiinnitys on todettu hankalaksi vahan rikkoutumisvaarasta johtuen (Vainio 2016).

Koekappaleiden ollessa valmiita testaukseen, käynnistettiin vaakojen automaattinen painon mittaushjelma. Ohjelmalla ajettiin vaakojen sisäinen kalibrointi ennen jokaista mittausta. Punnitusväliksi asetettiin kokeen alussa viisi sekuntia.

Koekappaleet ripustimen kanssa punnittiin pöydällä olevalla vaa'alla ja tämän jälkeen ripustettiin koekaappiin roikkumaan automaattisesti mittaavasta vaa'asta. Koekaapin ovea pidettiin auki vain sen aikaa, kuin oli tarpeellista ripustimen asettamiseksi vaakaan. Automaattisen vaa'an ja pöydällä olevan vaa'an tuloksia verrattiin mahdollisten virhetilanteiden välttämiseksi. Virhetilanne voi muodostua esimerkiksi automaattisen vaa'an kiinnityslenkin osuessa kaapin yläosassa olevan reiän reunaan.

Koe aloitettiin kirjaamalla kokeen aloitushetki veden imeytymiskerroin -lomakkeelle. Tämän jälkeen kaikki kolme koekaapin ovea avattiin. Ensimmäisen kaapin vesiastia nostettiin koekappaleen alapinnan kanssa kosketukseen siten, että upotussyvyys oli 5 ± 2 mm. Kappaleen ollessa oikealla upotussyvyydellä, tarkastettiin, ettei koekappaleen alapinnassa ole suurempia ilmakuplia ja suljettiin koekaapin ovi. Sama toistettiin

jokaiselle koekaapille. Lopuksi asetettiin automaattisten vaakojen mittausväliksi 55 sekuntia.

Koetta jatkettiin niin kauan, kunnes koekappaleen yläpinta oli täysin tummunut kapillaarisesti nousseesta vedestä. Ruduksen betonista tehdyillä koekappaleilla tähän meni noin kolme vuorokautta Parman ja Lujan betonit eivät täysin kostuneet vielä seitsemässä vuorokaudessa. Parman ja Lujan koekappaleiden testausta jatkettiin viikon jälkeen erillisissä muoviasiastoissa, joissa oli pohjalla de-ionisoitua vettä ja korokkeet, joiden avulla kappaleiden upotussyvyys pysyi noin viidessä millimetrissä. Kuvassa 4.10 on esitetty koejärjestely Parman ja Lujan koekappaleilla viikon automaattisen vedenimukokeen jälkeen. Punnitukset suoritettiin aluksi noin vuorokauden välein ja myöhemmin noin kolme kertaa viikossa pöytävaa’alla. Ennen punnitusta koekappaleiden pohjalta pyyhittiin irtonainen vesi pois kostealla sienellä.



Kuva 4.10. Parman ja Lujan vedenimukokeen jatkamismenettely, jossa koekappaleita säilytettiin vesikosketuksessa muoviasiastoissa ja punnitukset tehtiin pöytävaa’alla. Punnitusten välillä muoviasiastoiden kannet pidettiin kiinni.

Automaattisen vapaan veden imeytyskokeen lopetus aloitettiin asettamalla vaakojen punnitusväli takaisin viiteen sekuntiin. Ensimmäisen koekaapin vesiasia laskettiin alas tunkin avulla ja koekappale otettiin ripustimen kanssa ulos kaapista. Kaapin ovia pidettiin auki vain sen aikaa, että ripustin koekappaleen kanssa saatiin pois kaapista. Koekappale otettiin nopeasti pois ripustimesta ja koekappaleen pohjalta pyyhittiin irtonainen vesi kostealla sienellä. Myös ripustimesta poistettiin irtonainen vesi. Koekappale asetettiin takaisin ripustimeen ja ripustin kiinnitettiin takaisin automaattiseen vaakaan koekaappiin. Koekaapin ovi suljettiin ja odotettiin automaattisen mittauslaitteiston kolme punnitusta. Tämän jälkeen koekappale ja ripustin poistettiin kaapista ja punnittiin pöytävaa’alla, ensin yhdessä ja sitten koekappale ja ripustin erikseen. Samat toimenpiteet toistettiin kahdelle muulle koekappaleelle.

Kokeen jälkeen koekappaleet siirrettiin olosuhdehuoneeseen tasaantumaan ja myöhemmin uunikuivaukseen. Ennen uunikuivausta koekappaleista poistettiin muovinen yläpuolen suojus ja suurin osa parafiini-vahasuojauksesta. Koekappaleita pidettiin uunikuivauksessa 105 °C:n lämpötilassa vähintään kolmen viikon ajan. Kuivauksen aikana koekappaleita punnittiin ja koekappaleiden katsottiin olevan kuivia, kun painonmuutos oli alle 0,1 %/vrk.

4.2.3 Virhelähteet

Vapaan veden imukokeessa on useita virhelähteitä. Virhelähteitä on käsitelty laajemmin Eero Tuomisen diplomityössä (Tuominen 2016). Suurimmiksi virhelähteiksi on esitetty seuraavia asioita:

- Poikkeamat teoriasta. Teoria on johdettu yhdensuuntaisten huokosputkien ajatuksesta. Huokosrakenne on kuitenkin kompleksinen, joten teoria ei kaikilta osin toimi todellisessa huokosrakenteessa.
- Koekappaleen muodolla on vaikutusta.
- Jos koemateriaalissa on suuria huokosia, voi gravitaatiovoimat estää kapillaari-imun tapahtumista.
- Koekappaleen kosteuspitoisuus vaikuttaa kosteudensiirto-ominaisuuksiin, mutta jos ollaan hygrooskooppisella alueella, niin vaikutukset ovat vähäisiä.
- Koejärjestely: Lämpötila ja suhteellinen kosteus tulisi olla tasaisia koetilassa. Veden lämpötilan tulisi pysyä tasaisena.
- Koekappaleiden pinnan tasaisuus. Kiillotettu pinta imee karheaksi hiottua nopeammin vettä.
- Imupinnan upotussyvyys vaikuttaa imupinnan kosteuspitoisuuteen. Upotussyvyys tulisi minimoida. Virhettä tulokseen tekee kokeessa veden alla oleva koekappaleen osa, johon kohdistuu veden nosteesta ulkoinen paine. Tämä ulkoinen paine toimii kapillaarivoiman lisäksi kosteutta siirtävänä potentiaalina.
- Noste vaikutuksen eliminointi laskennallisesti.

Kokeiden aikana oli havaittavissa, että koekappaleet kastuivat aluksi reunoilta ja vasta myöhemmin keskeltä. Reunan suojuksella on vaikutusta kosteuden siirtymiseen.

4.3 Tasapainokosteuskoe

4.3.1 Yleistä

Tasapainokosteuskokeessa koekappaleiden annetaan tasapainottua tiettyihin suhteellisen ilmakehän kosteuden arvoihin tietyssä lämpötilassa. Koekappaleiden huokostilavuuden ilmakehän kosteus tasapainottuu ajan kuluessa koekappaleen ympäröivää ilmaa vastaan. Huokosten seiniin adsorboituu kosteutta huokosten ilmakehän tilasta, jolloin myös koekappaleen

paino muuttuu koekappaleen huokostilan tasapainottuessa tiettyyn ilman suhteelliseen kosteuteen.

Tasapainokosteutta materiaalista voidaan mitata hygroskooppisella tai kapillaarisella alueella. Tässä kappaleessa käsitellään tasapainokosteuden määrittämistä hygroskooppisella alueella ja tasapainokosteudella tarkoitetaan hygroskooppisen alueen tasapainokosteutta. Tasapainokosteutta hygroskooppisella alueella on käsitelty aikaisemmin kohdassa 2.2.1.

Testattavan materiaalin tasapainokosteus riippuu siitä, ovatko koekappaleet tasapainottumassa korkeammasta suhteellisesta kosteudesta matalampaan päin vai päinvastoin. Tätä tasapainokosteuden hystereesiä on käsitelty kohdassa 2.2.3.

4.3.2 Koejärjestely

Tasapainokosteuskoetta lähdettiin toteuttamaan tasapainokosteuteen liittyvän standardin (SFS-EN ISO 12571 2014) ja TTY:llä tehdyn toimintatapaohjeen mukaisesti (Tasapainokosteus 2016)

Desorptiokäyrän määrittämisessä käytettävät koekappaleet tasapainotettiin aluksi uunikuivauksesta suhteellisen kosteuden arvoon 97 % RH. Adsorptiossa ja desorptiossa tutkimuksessa oli tarkoituksena tasapainottaa koekappaleet taulukon 4.2 mukaisiin kosteuksiin:

Taulukko 4.2. Tutkittavat kosteuspitoisuudet tasapainokosteuskäyrältä

Nro	Suola	Suhteellinen kosteus (,kun T = 23 °C)
1	KOH	9 % RH
2	MgCl ₂ ·6H ₂ O	33 % RH
3	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	53 % RH
4	KCl	85 % RH
5	KNO ₃	93 % RH
6	KS ₂ O ₄	97 % RH

Suhteellisen kosteuden arvoon 97 % RH voidaan hygroskooppisella alueella tulla vain pienemmästä kosteudesta, eli adsorption kautta.

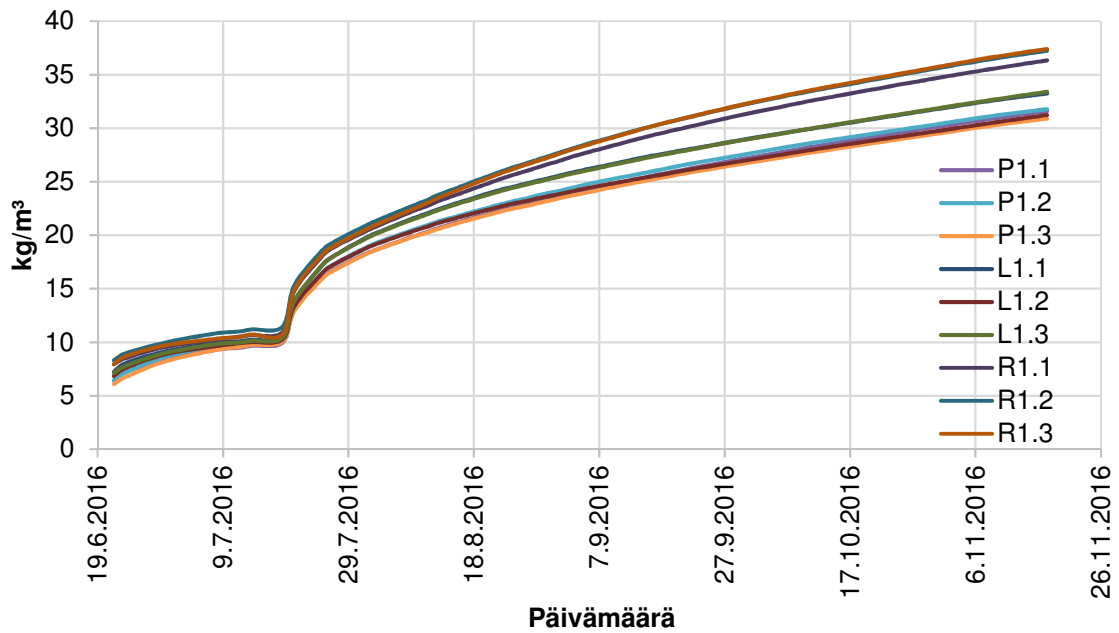
Kokeet suoritettiin kahdessa erillisessä kosteuskaapissa, joiden ilmatilaan luotiin tietty suhteellinen kosteus kylläisen suolaliuksen avulla. Taulukossa 4.2 on esitettyä tutkittavia suhteellisia kosteuksia vastaavat suolat. Kylläinen suolaliuos laitettiin kosteuskaapin pohjalla olevaan muoviastiaan. Astian kansi oli rei'itetty ja kannessa oli

puhallin, jonka avulla suhteellinen kosteus pysyi tasaisempuna kosteuskaapissa. Puhaltimen kohdalla oli kannessa reikä, jonka kautta puhallin imi ilmaa kyllästyneen suolaliuoksen yläpuolelta. Kosteuskaapin suhteellista kosteutta ja lämpötilaa mitattiin kolmelta eri korkeudelta kosteuskaapista. Kuvassa 4.11 on nähtävissä kosteuskaappi. Normaalitylanteessa kosteuskaapin ovi pidettiin suljettuna ja avattiin vain hetkellisesti koekappaleiden siirtämiseksi punnitukseen tai takaisin kosteuskaappiin.



Kuva 4.11. Kosteuskaappi.

Kolmen koekappaleen koesarjat kustakin tutkittavasta materiaalista laitettiin tasapainottumaan suhteelliseen kosteuteen 97 % RH ja toinen koesarja suhteelliseen kosteuteen 9 % RH. Koekappaleita punnittiin Precisa ES2200M vaa'alla, jonka tarkkuus oli 0,001 g. Punnituksen aikana vaa'an päällä pidettiin suojakotelo, joka esti ilmavirtauksien vaikutuksen punnitustuloksiin. Punnitustuloksista piirrettiin painonnousukuvaaja ajan funktiona koekappalekohteisesti, joista pystyi määrittelemään koekappaleiden tasaantumisen tiettyyn suhteellisen kosteuden arvoon. Koekappaleiden ensimmäisen sarjan todettiin tasaantuneen suhteelliseen kosteuteen 9 % RH noin kuukaudessa ja toisen koesarjan arvoon 97 % RH noin kolmessa kuukaudessa. Siirryttäessä adsorptiokäyrällä tutkittavasta suhteellisesta kosteudesta 9 % RH suhteellisen kosteuden arvoon 33 % RH, ei tasapainottumista ollut tapahtunut kolmessa kuukaudessa. Kuvassa 4.12 on nähtävissä koekappaleiden tasoittuminen adsorptiokäyrän suhteellisen kosteuden arvoihin 9 % RH ja 33 % RH.



Kuva 4.12. Koekappaleiden tasapainottuminen adsorptiokäyrällä suhteellisen kosteuden arvoihin 9 % RH ja 33 % RH. Suolaliuos on vaihdettu vastaamaan suhteellista kosteutta 33 % RH 18.7.2016.

Kuvasta 4.9 voidaan nähdä painon nousun olevan edelleen kolmen kuukauden jälkeen voimakasta siirryttäessä suhteellisen kosteuden arvosta 9 % RH arvoon 33 % RH. Kokeen suoritus aika todettiin liian pitkäksi liittyen tähän diplomityöhön. Kokeen rinnalla päätettiin toteuttaa koe murskatuilla koekappaleilla koeajan lyhentämiseksi.

Tasapainokosteuskoe murskatuilla koekappaleilla

Tasapainokosteuskäyrän määrittäminen murskatuilla koekappaleilla perustuu siihen, ettei materiaalin huokospinta-ala juurikaan pienene, vaikka materiaali murskattaisiin pienempiin osiin. Kirjallisuudesta löytyy esimerkkejä lähinnä kovettuneen sementtikiven murskaamisesta tasapainokosteuskäyrän määrittämiseksi. Tutkimuksissa oli vertailtu murskatun sementtikiven ja vastaavasta sementistä valmistetun betonin tasapainokosteuskäyriä. Betonista valmistetut koekappaleet olivat tutkimuksissa noin 2-3 mm:n paksuja ja halkaisijaltaan noin 70-110 mm. Murskatut sementtikivipalojen halkaisijat olivat $0,8 \text{ mm} < d \leq 1,0 \text{ mm}$. Tutkimuksissa murskatun sementtikiven ja ohuiden betonikoekappaleiden tasapainokosteuskäyrät olivat hyvin lähellä toisiaan varsinkin alhaisissa suhteellisen kosteuden arvoissa. (Baroghel-Boyny;Mainguy;Lassabatere;& Coussy, 1999, Baroghel-Bouny, 2007)

Betonin runkoaineena toimivaan kiviainekseen pystyy adsorpoitumaan kosteutta noin 0,3-0,5 % kiviaineksen painosta. Jos kiviaines on rapautunutta adsorpoituvan kosteuden määrä kasvaa 1,0-1,5 %. 0,4 vesi-sementtisuhteiden omaavalla betonilla sementtigelin huokosmäärä on noin 25-30 % kokonaistilavuudesta. (Suomen Betonitieto Oy, 2005) Normaalilujuuksisen betonin kokonaishuokoisuus on noin 15,5 % (Künzel, ym. 2008)

Betonissa käytetyn kiviaineksen huokostilavuus on pieni verrattuna sementtigeelin huokostilavuuteen. Tästä johtuen betonin kiviaines päätettiin pitää mukana murskatuissa koenäytteissä.

Kunkin koekappaleen murskattu, seulottu aines laitettiin kokonaisuudessaan alumiiniseen astiaan ja uunikuivattiin 105 °C:ssa. Kuivumista seurattiin punnitsemalla näytteitä. Uunikuivat näytteet siirrettiin tasapainottumaan haluttuun suhteelliseen kosteuteen muovisiin kannellisiin laatikoihin (kuva 4.13).



Kuva 4.13. Koenäytteet tasapainottumassa kosteuslaatikossa.

Näyteastiat pyrittiin sijoittamaan siten, että näytteet olisivat mahdollisimman vapaasti yhteydessä laatikon ilmatilaan. Laatikoiden pohjalle oli valmistettu haluttua suhteellisen kosteuden pitoisuutta vastaava kylläinen suolaliuos. Laatikon pohjalla oli korokkeet, jotka pitivät näyteastiat suolaliuoksen yläpuolella. Laatikoiden kannessa oli tuulettimet, joiden avulla suhteellinen kosteus pysyi tasaisena laatikoissa. Laatikoiden suhteellista kosteutta ja lämpötilaa mitattiin vähintään kahdesta pisteestä. Myös kosteuskaappeja (kuva 4.11) käytettiin kokeen aikana.

Näytteiden tasapainottumista seurattiin punnitsemalla. Punnitsemisen yhteydessä näytteet siirrettiin toiseen vastaavan kyllästyneen suolaliuoksen omaavaan kosteuslaatikkoon.

Näytteiden tasapainottumista seurattiin painonmuutoskuvaajan avulla. Kun painonmuutosta ei kuvaajan perusteella enää tapahtunut, voitiin määrittää näytteen tasapainokosteus kyseisessä suhteellisessa kosteudessa ja siirtää näytteet seuraavaan suhteelliseen kosteuteen.

4.3.3 Virhelähteet

Kokonaiset koekappaleet

Koekappaleiden tasaantuessa suhteellisen kosteuden arvoon 97 RH %:a, alkoi koekappaleiden pinnalle kondensoitua vettä. Kondensoituminen johtui pienestä, alle 1 °C:n lämpötilan vaihtelusta. Suhteellisen kosteuden 97 RH %:a arvolla kosteuden kondensoitumiseen riittää noin 0,5 °C:n lämpötilan ero koekappaleen ja koetilan ilman lämpötilan välillä.

Kokonaisilla koekappaleilla tasaantumisaika oli pitkä, useita kuukausia. Kosteuden siirtyminen materiaalissa hidastui lähestyttäessä tasapainokosteutta. Materiaali lähestyy tasapainokosteutta äärettömän pitkään, joten koe on keskeytettävä ennen kuin saavutetaan absoluuttisesti tasapainokosteus koekappaleessa. Tästä syntyy virhettä koetuloksiin.

Murskatut koekappaleet

Murskatuilla koekappaleilla oli samoja virhelähteitä kuin kokonaisilla koekappaleilla. Lisäksi suuri koenäytteiden määrä aiheutti haasteita tilan käytöllisesti. Pällekkäin asetelluissa koeastioissa ei ole tasaisesti yhteyttä koetilan ilmaan, vaikka puhallin pyöritti ja tasasi ilmatilaa. Murskatuilla koekappaleilla tasaantumisaikat muodostuivat myös pitkiksi, vaikka raekoko oli pienempi kuin 12 mm. Murskatut koekappaleet eivät edusta kokonaista materiaalia, joten huokosjakauma ei ole vastaava kokonaiseen materiaaliin verrattuna.

4.4 Painelevykoe

4.4.1 Yleistä

Painelevykokeessa vakumoinnin ja vesiupotuksen avulla maksimikosteuspitoisuuden saavuttaneet koekappaleet asetetaan kapillaarikontaktiin painelevyn kanssa. Tämän jälkeen koekappaleisiin kohdistetaan ulkoinen paine. Kappaleiden huokostilan annetaan tasaantua ulkoista painetta vastaavaksi, jolloin kappaleista poistuu kosteutta, kunnes huokosissa oleva vesimäärä vastaa ulkoista painetta vastaavaa kapillaari-imun synnyttämää huokosalipainetta. Tietty huokostilaan vaikuttava paine vastaa tiettyä suhteellisen kosteuden arvoa huokosen ilmatilassa. Yhteys voidaan esittää Kelvinin lain avulla:

$$\ln \varphi = - \frac{p_h \cdot M_w}{R \cdot T \cdot \rho_w} \quad (4.4)$$

jossa p_h = materiaalin huokosissa vaikuttava paine [Pa]

Ulkoisen paineen tasaannuttua koekappaleiden huokostilaan, mitataan koekappaleiden paino. Tuloksena saadaan koekappaleen kosteuspitoisuus u [kg/kg] tai w [kg/m³] tietyssä huokostilan paineessa. Kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä esitetään joko keskimääräisen huokosalipaineen, s [Pa], tai huokosten säteen, r [m], funktiona (Vinha, 2011). Huokosten säde r voidaan laskea kaavalla 4.5 (NT BUILD 481, 1997):

$$r = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{s} \quad (4.5)$$

4.4.2 Koejärjestely

Kokeet suoritettiin mukailien standardia NT BUILD 481 (1997).

Valmiit koekappaleet laitettiin uunikuivaukseen. Koekappaleita punnittiin määräajoin uunikuivauksen aikana ja punnitustuloksista piirrettiin painonmuutoskuvaaja, josta voitiin todeta kappaleiden kuivuminen. Standardin mukainen kuivauslämpötila on $+105 \pm 2$ °C (NT BUILD 481, 1997). Kuivauslämpötilana käytettiin kuitenkin $+60 \pm 2$ °C, jolloin kosteana uuniin laitettuihin koekappaleisiin ei muodostu haitallisessa määrin ettringiittiä. Betonissa laajenemalla vaurioita aiheuttavan ettringiitin alhaisimpana muodostumislämpötilana pidetään $+70$ °C (Kelham 1996). Ongelma on esiintynyt yleensä lämmitettäessä betonia valutilanteessa, mutta matalammalla kuivauslämpötilalla haluttiin varmistaa, ettei koekappaleisiin tule vaurioita kuivauksien aikana. Suuri kuivauslämpötila voi aiheuttaa betoniin mikrohalkeilua, joka muuttaa betonin kosteudensiirto-ominaisuuksia ja mahdollisesti myös kosteuden sitomiskykyä.

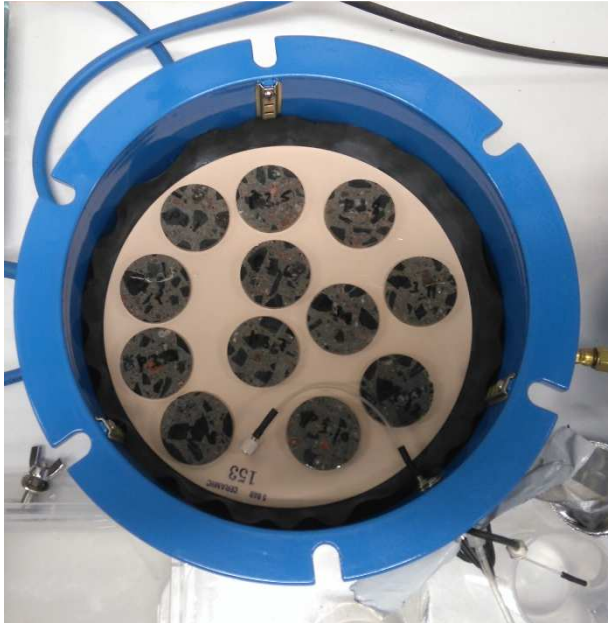
Uunikuivatut koekappaleet kyllästettiin de-ionisoidulla vedellä. Kyllästys tehtiin pitämällä koekappaleita vakuumilaitteessa (kuva 4.14) 100 Pascalin alipaineessa vuorokauden ajan, jonka jälkeen koekappaleiden annettiin olla vesiupotuksessa vähintään kaksi vuorokautta. Standardin mukainen (NT BUILD 481, 1997) vakumoinnissa pidettävä aika on kolme tuntia, jonka jälkeen koekappaleet upotetaan de-ionisoituun veteen ja vakumoidaan uudelleen tunnin ajan. Standardin mukaista koekappaleiden vedellä kyllästämistä testattiin, mutta koekappaleiden havaittiin imevän kosteutta vesiupotuksessa useiden kuukausien ajan vakumoinnin jälkeen. TTY:llä tehdyissä aikaisemmissa painelevykokeissa vakumointiaika on ollut kuusi tuntia ja vedessä pidetty aika ennen koetta 24 h (Vainio 2016). Kuuden tunnin vakumointiaika todettiin kuitenkin alustavissa kokeissa liian lyhyeksi, koska koekappaleiden kosteuspitoisuus jatkoi nousemista useiden vuorokausien ajan vakumoinnin jälkeen. Maksimikosteuspitoisuuden saavuttaneet koekappaleet punnittiin ennen painelevykokeen aloitusta.



Kuva 4.14. Koekappaleet vakuumlaitteen alipaineistusastian pohjalla. Koekappaleet aseteltiin astian reunoja vasten siten, että alipaine pääsi vaikuttamaan vapaasti kappaleiden molemmin puolin.

Painelevylaitteita oli käytettävissä kolme kappaletta, 5, 15 ja 100 bar laitteet. 5 bar ja 15 bar painelevylaitteiden keraamiset painelevyt kyllästettiin ennen koetta de-ionisoidulla vedellä. Kyllästäminen tapahtui asettamalla kokeessa käytettävät painelevyt painelevylaitteeseen ja laskemalla de-ionisoitua vettä painelevyjen päälle. Painelevylaitteeseen paineistettiin kokeessa käytettävään paineeseen vähintään vuorokauden ajaksi, jolloin painelevyjen kosteus tasaantui käytettyä painetta vastaavaksi. Painelevyjä ei tarvinnut siirtää välillä vesisäilytykseen, koska varsinainen painelevykoe aloitettiin aina välittömästi painelevyjen kyllästämisen jälkeen. 100 bar painelevylaitteen selluloosakalvon annettiin kyllästyä de-ionisoituun veteen upotettuna ilmanpaineessa vähintään 16 tunnin ajan ennen kokeen aloitusta. Selluloosakalvon päältä poistettiin suurin osa vedestä lappoletkujen avulla ennen koekappaleiden asettamista kalvon päälle.

5 ja 15 bar painelevylaitteisiin oli mahdollista laittaa saman aikaisesti neljä painelevyä. Jokaiselle levyille mahtui 12 koekappaletta. 100 bar painelevylaitteeseen mahtui 12 koekappaletta. Kuvassa 4.15 on koekappaleita asetettuna 5 bar painelevylaitteeseen ja kuvassa 4.16 100 bar painelevylaitteeseen ennen kokeen alkua.



Kuva 4.15. Koekappaleet aseteltuna painelevylaitteen keraamisen painelevyn päälle ennen kokeen aloitusta.



Kuva 4.16. Koekappaleet aseteltuna 100 bar painelevylaitteen selluloosakalvon päälle ennen kokeen aloitusta.

Standardin (NT BUILD 481, 1997) mukaan keraamisten painelevyjen ja koekappaleiden välissä tulee olla kaoliinisavea parantamassa kapillaarista kontaktia. Kaoliinisavi erotetaan koekappaleista huokosen paperin avulla, jolloin pasta ei pääse tunkeutumaan koekappaleiden huokosiin. Koekappaleet olivat kuitenkin huolellisesti hiottuja, joten voitiin olettaa kapillaarisen kontaktin muodostuvan koekappaleen ja painelevyn välille ilman kaoliinisavea. Kaoliinisaven vaikutusta koekappaleiden tasaantumiseen tutkittiin tekemällä koesarjat paineissa 0,316 bar, 1 bar ja 10 bar, joissa käytettiin myös

kaoliinisavea. Muutoin koekappaleiden alla ei käytetty kaoliinisavea. Kaoliinisavi valmistettiin sekoittamalla 125 g savea ja 150 g de-ionisoitua vettä. Vertailukokeissa ei todettu olevan vaikutusta kaoliinisaven käytöllä painelevykokeiden tuloksiin. Vertailukokeet on esitetty luvussa 5.3.2 ja liitteessä 1.

Painelevykokeessa koekappaleiden annettiin olla paineistettuna 14 vuorokauden ajan, jonka jälkeen koekappaleet punnittiin. Punnitsemisen aikana painelevylaitteiden päällä pidettiin muovista levyä, etteivät koekappaleiden kosteus pääsisi tasapainottumaan huoneilman kanssa. Painelevykokeessa käytettiin standardissa (NT BUILD 481, 1997) esitettyjä paineita, jotka on esitetty taulukossa 4.3:

Taulukko 4.3. Huokosalipainetta, huokossädettä ja paineastian painetasoa vastaava suhteellinen kosteus sekä käytettävät laitteet.

Huokosalipaine s [Pa]	Huokossäde r [m]	Paineastian paine p _h [bar]	Suht. kosteus RH [%]	Paineastian maksimipaine bar	Painelevy bar/kalvo
3,16E+04	4,585E-06	0,316	99,977	5	1
1,00E+05	1,450E-06	1	99,927	5	1
3,16E+05	4,585E-07	3,16	99,768	5	5
1,00E+06	1,450E-07	10	99,269	15	15
3,16E+06	4,585E-08	31,6	97,707	100	selluloosa
1,00E+07	1,450E-08	100	92,926	100	selluloosa

Suhteellisen kosteuden arvot on laskettu huokosalipaineesta Kelvinin lain avulla. Veden ominaisuudet laskennassa oli määritetty 23 °C lämpötilassa.

Standardissa (NT BUILD 481, 1997) on esitetty taulukossa 4.3 esitettyjä paineita pienempiä paineita. 0,316 baria pienemmällä paineella ei ollut mielekästä lähteä tekemään kokeita, koska paineen säätäminen alle 0,316 bar paineissa on epätarkkaa käytetyillä tutkimuslaitteilla. Kapillaarisen tasapainokosteuden tutkiminen pienemmillä paineilla ei ole mielekästä myöskään betonilla, koska pääosa tasapainokosteuden muutoksesta tapahtuu suuremmilla paineilla.

Koekappaleet uunikuivattiin ja saatettiin maksimikosteuspitoisuuteen vakumoinnin ja vesiupotuksen avulla ennen seuraavaa painelevykoetta.

4.4.3 Virhelähteet

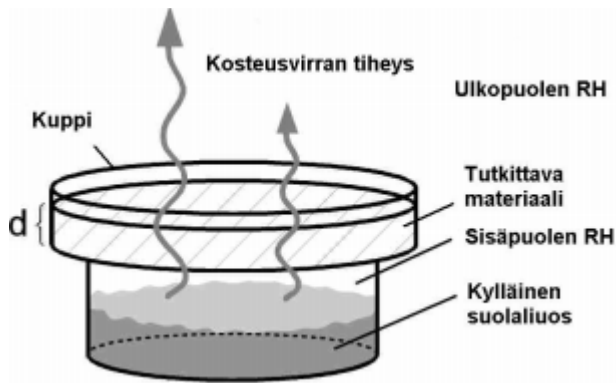
Painelevykokeissa huomattiin kokeiden aikana useita virhelähteitä. Alle on listattu kokeisiin mahdollisesti vaikuttaneita virheitä:

- Koekappaleilla ei saavutettu maksimikosteuspitoisuutta standardin (NT BUILD 481, 1997) mukaisella vakumoinnilla ja vesiupotuksella. Tämä johtuu mahdollisesti kokeessa tutkituista lujista betonilaaduista, joihin kosteuden siirtyminen on hidasta. Suurimmat kosteuspitoisuudet saatiin pisimmillään noin 275 vuorokautta vesiupotuksessa pidetyillä koekappaleilla.
- Koekappaleiden paino kasvoi pienillä paineilla, joka johtui todennäköisesti kosteuden siirtymisestä vedellä kyllästytetystä painelevystä kapillaarisesti koekappaleisiin, jotka eivät olleet saavuttaneet maksimikosteuspitoisuutta.
- Useiden koekappaleiden peräkkäinen punnitseminen, jolloin viimeiset punnitukseen menevät koekappaleet ovat voineet menettää kosteutta. Virheen suuruutta voitaisiin arvioida punnitsemalla ensimmäiseksi punnittu koekappale uudelleen lopuksi (Hansen ym. 1999).
- Huono kapillaarikontakti koekappaleen ja painelevyn välillä. Kokeissa todettiin hyvin hiotun koekappaleen muodostavan kapillaarikontaktin painelevyn kanssa.
- Liian lyhyt tasaantumisaika. Kokeen aikana ei voida punnita koekappaleita, joten tasapainokosteuden saavuttamista ei voida todeta punnitusten avulla.
- Paine vaihteli noin ± 3 baria 100 bar painelevykokeessa.
- Koekappaleet jatkavat hydratoitumista, kun ne kastellaan maksimikosteuspitoisuuden saavuttamiseksi. Tällöin tutkittava materiaali ei ole täsmällisesti samaa, kuin mitä sisäkuorielementistä porattiin.

4.5 Märkäkuppikoe

4.5.1 Yleistä

Materiaalien vesihöyrynläpäisevyys voidaan määrittää kuppikokeen avulla. Kuvassa 4.17 on esitetty märkäkuppikokeen periaate. Koekupin sisäpuolelle saadaan haluttu ilman suhteellinen kosteus kylläisen suolaliuoksen avulla. Ulkopuolen suhteellinen kosteus pidetään halutun suuruisena. Koekappale on kupissa tiiviinä kantena, jolloin kappaleen eri puolille muodostuu vesihöyryn osapaineen potentiaaliero. Koekappaletta punnitaan määrääjain, jolloin saadaan selville kosteusvirran tiheys g [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]. Märkäkuppikokeessa kosteusvirta on kupin sisäpuolelta ulospäin. Koe voidaan toteuttaa myös kuivakuppikokeena. Kuivakuppikokeessa kupin sisäpuolella on matalampi suhteellinen kosteus, kuin kupin ulkopuolella. (Vinha ym. 2005)



Kuva 4.17. Märkäkuppikokeen periaate. (Manelius 2013)

Vesihöyrynvastukseen ja -läpäisevyyteen vaikuttaa materiaalin lämpötila ja kosteus. Vesihöyrynläpäisevyys kasvaa lämpötilan tai materiaalin huokosilman suhteellisen kosteuden kasvaessa (Vinha ym. 2005).

4.5.2 Koejärjestely

Tutkittavien materiaalien vesihöyrynläpäisevyys ominaisuudet tutkittiin märkäkuppimenetelmällä TTY:n rakennusfysiikan ryhmän toteutusohjeen (Vesihöyrynläpäisevyyden määrittäminen 2015) ja standardin (SFS-EN 12572, 2016) mukaisesti.

Kuppina käytettiin alumiinisia kuppeja, joiden halkaisija leveämmältä kohdaltaan oli 195 mm. Leveämmän kohdan korkeus oli 25 mm. Kapeamman kohdan leveys oli 170 mm ja korkeus 60 mm. Suolaliuos tehtiin muoviseen kuppiin, joka asetettiin alumiinikupin pohjalle. Muovikupin tarkoituksena oli estää suolan reagoiminen alumiinin kanssa. Suhteellisen kosteuden arvoksi valittiin kupin sisäpuolelle 93 % RH, joka saatiin aikaan kylläisellä kaliumnitraatti (KNO_3) suolaliuoksella. liuos tehtiin ionivaihdettuun veteen. Suolaa sekoitettiin veteen niin paljon kuin sitä liukeni. Muovisen suolakupin ja koekappaleen väliin jäi 40 mm vapaata ilmatilaa. Kupin ulkopuolelle luotiin olosuhteet suhteellinen kosteus 50 % RH ja lämpötila 23 °C olosuhdehuoneen avulla. Olosuhteet kupin sisä- ja ulkopuolella olivat standardin (SFS-EN ISO 12572, 2016) mukaiset.

Alumiinisen koekupin ja koekappaleen tiivistys tehtiin vahaseoksen avulla. Vahaseoksessa oli 40 % parafiinia ja 60 % mikrovahaa. Aluksi siveltiin ohuella sulatetulla juoksevalla vahalla alumiinikupin kynnys ja reuna siltä osin, kuin se on koekappaleen kohdalla. Juoksevalla vahalla siveltiin myös koekappaleen reunat. Koekappale asetettiin paikoilleen alumiinikupin kynnyksen varaan ja kupin sekä koekappaleen väliin kaadettiin juuri jähmettymässä olevaa vahaa puoleen väliin rakoja. Vahan annettiin jäähtyä, jonka jälkeen kaadettiin jähmettymäisillään olevaa vahaa rako täyteen. Koejärjestely viimeisteltiin asettamalla koekappaleen päälle alumiinikupin kapeamman osan levyinen muovi lautanen, jota vasten kaadettiin vahaseosta. Lautanen poistettiin ennen vahan

lopullista kovettumista. Tällä järjestelyllä saatiin koekappaleen molemmille puolille yhtä paljon vesihöyryä läppäisevää pinta-alaa. Kupit merkittiin tunnistenumeroilla.

Koekappaleita punnittiin aluksi noin 3 kertaa viikossa ja myöhemmin noin kerran viikossa. Painon muutos pysyi punnitusväleillä alle 1 g:n. Punnituksia jatkettiin kolmen kuukauden ajan. Punnituksessa käytettiin Precisa ES2200M elektronista vaakaa, jonka tarkkuus oli 1 mg. Punnituksen aikana vaa'an päällä käytettiin läpinäkyvästä muovista valmistettua suojakotelo, joka esti ilmavirran vaikutuksen punnitustulokseen.

Koekappaleiden vesihöyrynläppäisevyys määritettiin ajanjaksolta, jolloin punnitustulokset osoittivat kosteusvirran olevan tasainen. Standardin (SFS-EN ISO 12572, 2016) mukaan kosteusvirta on tasainen, kun punnitustulosten perusteella määritetty kosteusvirta ei eroa epähomogeenisilla materiaaleilla yli 10 %. Betonit ovat epähomogeenisiä materiaaleja. Kosteusvirta määritettiin vähintään viiden peräkkäisen mittauksen keskiarvona.

4.5.3 Virhelähteet

Märkäkuppikokeessa virheitä aiheuttaa, ettei kupissa olevan suolaliuoksen suhteellista kosteutta voida todeta. Lisäksi olosuhdehuoneessa on pieniä vaihteluita suhteellisessa kosteudessa ja lämpötilassa. Suhteellisen kosteuden parina käytettiin olosuhdehuone 50 % RH ja märkäkuppi 93 % RH. Tällöin koekappaleen huokosilman suhteellinen kosteus tasaantuu keskimäärin noin 70 % RH pitoisuuteen. Tutkittaessa puhtaasti vesihöyryn siirtymistä materiaalissa olisi järkevää tehdä rinnalle koesarja kuivakuppikokeeseen, jossa kuivakupissa olisi ilmasta kosteutta absorboivaa silikageeliä ja huonetilassa suhteellinen kosteus olisi esimerkiksi 50 % RH. Tällöin materiaalissa huokosilman suhteellinen kosteus tasaantuisi noin 25 % RH pitoisuuteen ja teorian mukaan kosteuden siirtyminen tapahtuisi tällöin lähes puhtaasti diffuusiolla.

5. TULOKSET

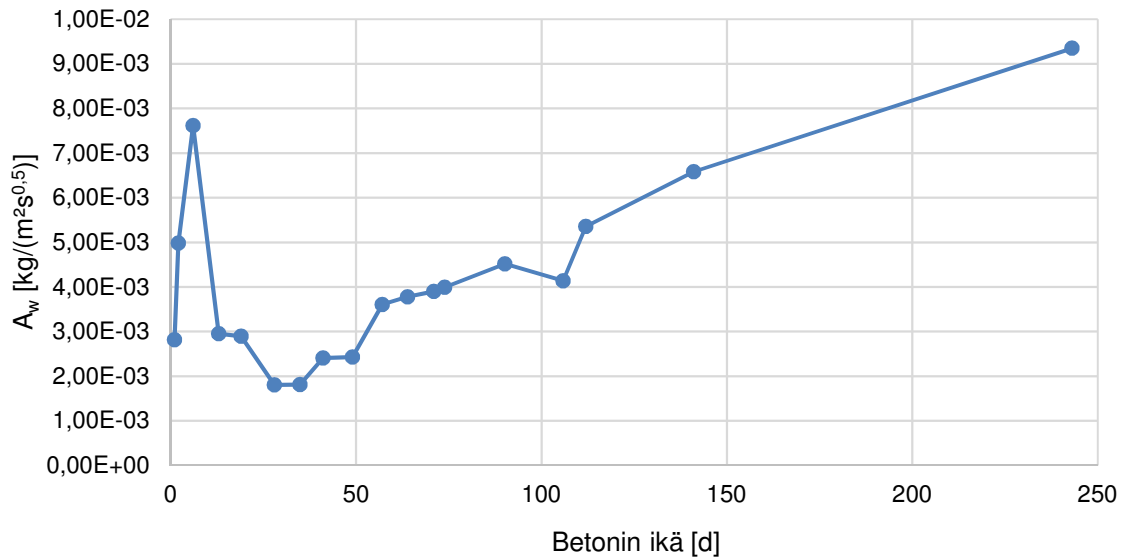
5.1 Veden imeytyskoe

Veden imeytyskokeet suoritettiin TTY:n laboratoriossa kevään, kesän ja syksyn 2016 aikana. Testien aikana testahuoneen lämpötila oli keskimäärin 23,1 °C. Suurimmillaan testin aikainen keskilämpötila oli 23,8 °C ja pienimmillään 22,0 °C. Testahuoneen testin aikainen keskimääräinen suhteellinen kosteus vaihteli 23-47 % RH välillä.

Ruduksen betonille tehtiin 20 koesarjaa veden imukokeita n. 185 mm halkaisijaltaan olevista koekappaleista ja Parman sekä Lujabetonin betoneille kaksi koesarjaa saman kokoisilla koekappaleilla. Ruduksen betonilla tutkittiin vedenimuominaisuuksien muuttumista ajan funktiona alkaen vuorokausi betonin valamisesta. Lisäksi tehtiin neljä koesarjaa painelevykokeissa olleilla Ruduksen betonista valmistetuilla koekappaleilla. Painelevykokeissa olleet kappaleet siirrettiin välittömästi painelevykokeen päätyttyä veden imeytyskokeeseen. Tutkittavat koesarjat olivat 3,16 bar, 10 bar, 31,6 bar ja 100 bar painelevykokeista.

5.1.1 Veden imeytymisominaisuuksien kehittyminen

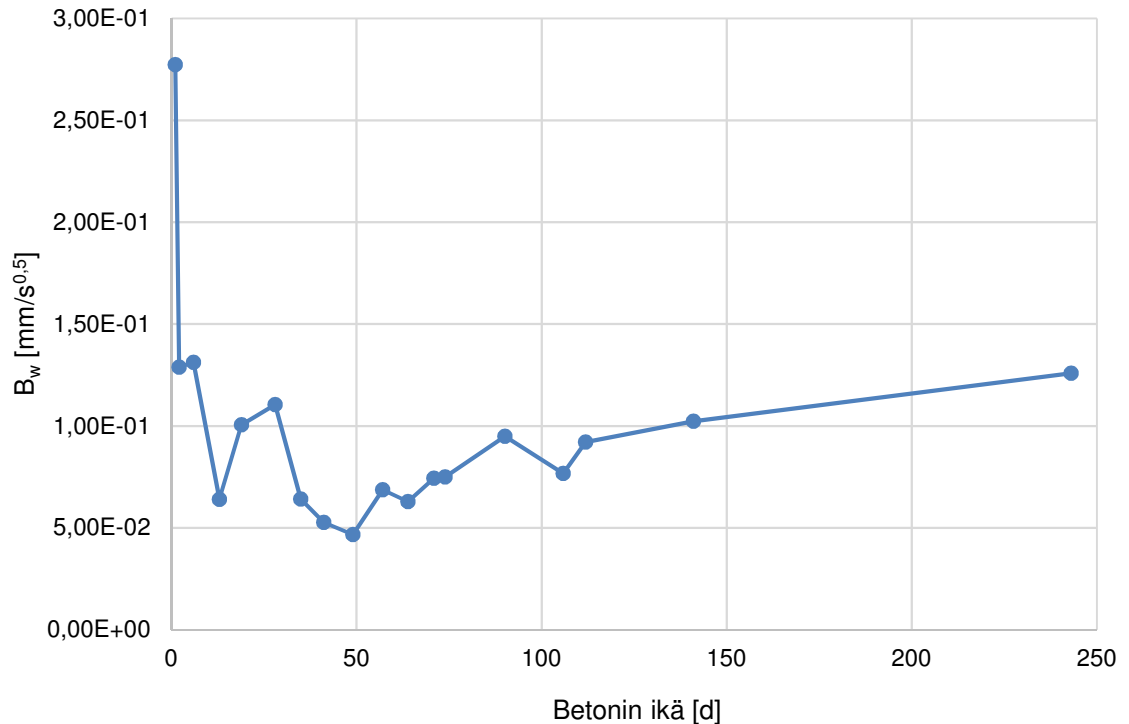
Ruduksen betonilla tutkittiin veden imeytymiskertoimen kehittymistä ajan funktiona. Koekappaleet on sahattu 50 cm korkeasta lieriöstä ja hiottu pois lukien kuusi ensimmäistä koesarjaa, joille hiontaa ei tehty. Kuvassa 5.1 on esitettyä veden imeytymiskertoimen kehittyminen alkaen vuorokausi koekappaleiden valamisesta.



Kuva 5.1. Veden imeytymiskertoimen A_w kehittyminen ajan funktiona Rudus Oy:n betonilla. Tulokset on esitetty koesarjan tulosten keskiarvona.

Kuvasta 5.1 voidaan huomata veden imeytymiskertoimen lähtevän aluksi kasvamaan voimakkaasti ensimmäisen viikon aikana, jonka jälkeen tulokset laskevat arvoon 0,0018 kg/(m²s^{0,5}). Alun suuret poikkeavuudet voivat aiheutua betonin suuresta kosteuspitoisuudesta valmistamisen jälkeen. Ensimmäisen kuukauden aikana betoni ei ole ennättänyt tasaantua koekappaleiden säilytyksessä käytetyn olosuhdehuoneen olosuhteisiin. Ensimmäisen kuukauden jälkeen on koetuloksissa havaittavissa selvää vedenimukertoimen kasvamista ajan funktiona. Koekappaleet ovat ennättäneet tasaantua lähelle olosuhdehuoneen olosuhteita betonin ollessa kuukauden ikäistä. Vedenimukertoimen kehittyminen mukailee loivasti kaareutuvaa logaritmista funktiota pois lukien 105 päivän ikäiselle betonille tehty koesarja. Trendiä pienempi vedenimukertoimen tulos kyseisenä ajankohtana on kuitenkin lähes normaalin vaihteluvälin sisällä.

Koekappaleille määritettiin myös veden tunkeutumiskerroin B_w . Kuvassa 5.2 on esitetty veden tunkeutumiskertoimen kehittyminen Ruduksen betonilla.

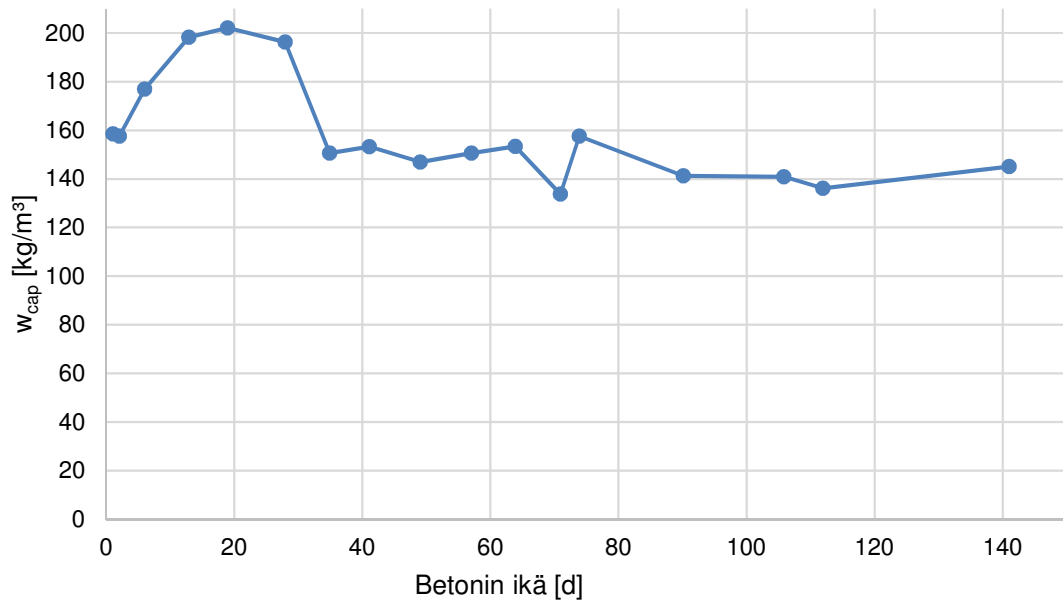


Kuva 5.2. Veden tunkeutumiskertoimen B_w kehitys Ruduksen betonilla alkaen vuorokausi betonin valmistamisesta. Tulokset on esitetty koesarjan tulosten keskiarvona.

Kuvassa 5.2 esitettyjen tulosten perusteella veden tunkeutumiskerroin on heti betonin valmistamisen jälkeen suuri, joka selittyy korkealla betonin kosteuspitoisuudella. 50 vuorokauden jälkeen veden tunkeutumiskerroin lähtee kasvamaan, kuten myös veden imeytymiskertoimen arvot alkoivat kasvaa (kuva 5.1).

Veden imeytyminen betoniin on todettu olevan nopeampaa ikääntyneellä betonilla. Kestävä kivitalokirjassa on esitetty betonista riippuen veden imeytymisnopeuden kasvavan 2-3 kertaiseksi kahden ensimmäisen kuukauden aikana. (Merikallio 2006). Saatut tulokset ovat saman suuntaisia ”Kestävä kivitalo” -kirjassa esitettyjen tuloksien kanssa. Kivitalokirjassa esitetyissä tuloksissa on kuitenkin tutkittu betonilaatan kuivumista, jolloin tuloksiin vaikuttaa betonin kuivuminen; mitä kuivempaa betoni on, sitä nopeammin se imee vettä itseensä.

Kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden arvot pysyivät varsin tasaisina, jos ei oteta huomioon ensimmäisen kuukauden aikana saatuja korkeita kyllästyskosteuspitoisuuden arvoja. Kuvassa 5.3 on esitetty kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden arvot tehdyissä kokeissa.



Kuva 5.3. Kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden w_{cap} kehitys Ruduksen betonilla alkaen vuorokausi betonin valmistamisesta. Tulokset on esitetty koesarjan tulosten keskiarvona.

Ensimmäisen kuukauden tulokset voivat olla epäluotettavia korkean koekappaleiden alkukosteuspitoisuuden takia. 30 päivän jälkeen keskiarvo koetulosten kapillaarisesta kyllästyskosteuspitoisuudesta on noin 146,3 kg/m³ ja hajontaa tulosten välillä on vähän.

5.1.2 Tulokset, veden imeytymiskerroin

Parman ja Lujabetonin toimittamista betonielementeistä tehtiin molemmista kaksi koesarjaa veden imeytymiskokeita. Koesarja 2 on valmistettu vesihöyrynläpäisevyyskokeissa olleista koekappaleista. Koekappaleista hiottiin pinnat ja kosteuden annettiin tasaantua olosuhdehuoneessa ennen koetta. Ruduksen toimittamasta betonista valettiin betonielementti, josta tehtiin yksi koesarja. Veden imeytymiskertoimen tulokset on esitetty taulukoissa 5.1, 5.2 ja 5.3.

Taulukko 5.1. Parma Oy:n toimittamasta betonielementistä määritetyt veden imeytymiskertoimet A_w .

Parma Oy:n betonielementti				
Koesarja	Aika valusta [d]	A_w [kg/(m ² s ^{0,5})]	90 % luottamusväli	luottamusvälin hajonta
1	147	1,65E-03	1,08E-03	65,72 %
2	278	2,39E-03	2,80E-03	117,37 %

Koesarjassa kolme koekappaletta.

Taulukko 5.2. Lujabetoni Oy:n toimittamasta betonielementistä määritetyt veden imeytymiskertoimet A_w .

Lujabetoni Oy:n betonielementti				
Koesarja	Aika valusta	A_w	90 %	luottamusvälin
a	[d]	[kg/(m ² s ^{0,5})]	luottamusväli	hajonta
1	245	1,44E-03	1,13E-03	78,57 %
2	370	1,20E-03	2,87E-04	23,95 %

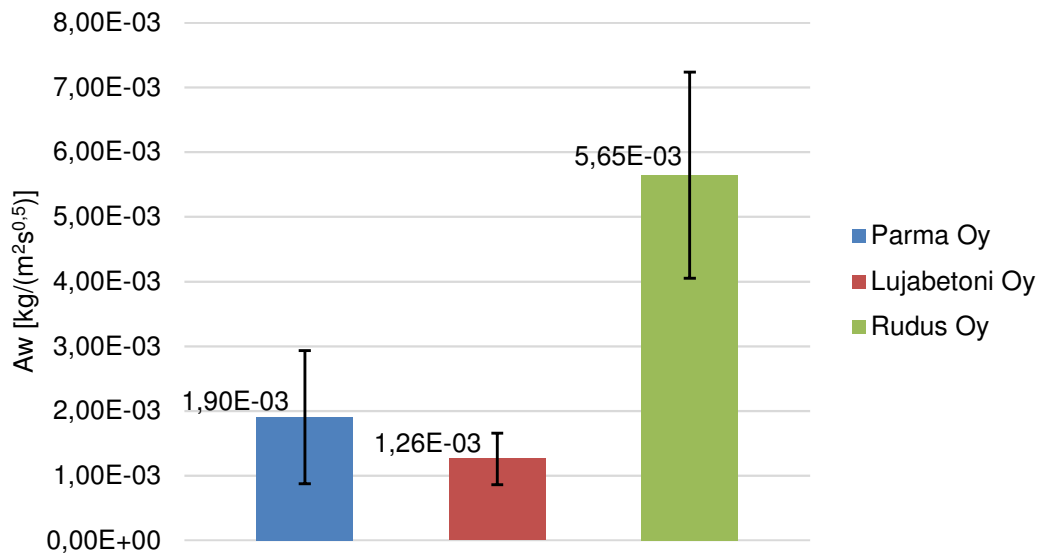
Koesarjassa kolme koekappaletta.

Taulukko 5.3. Rudus Oy:n toimittamasta betonista valetusta betonielementistä määritetty veden imeytymiskerroin A_w .

Rudus Oy:n toimittamasta betonista valettu betonielementti				
Koesarja	Aika valusta	A_w	90 %	luottamusvälin
a	[d]	[kg/(m ² s ^{0,5})]	luottamusväli	hajonta
1	215	5,65E-03	1,59E-03	28,23 %

Koesarjassa kolme koekappaletta.

Kaikkien betonilaatujen tuloksista on havaittavissa suuri luottamusvälin hajonta. Betoni on epähomogeeninen materiaali, jolloin eri koekappaleiden koetuloksiin luonnollisesti tulee hajontaa. Kuvassa 5.4 on esitetty koekappaleiden tuloksista lasketut keskiarvot ja 90 %:n luottamusvälit. Keskiarvoa laskettaessa tuloksia on painotettu menetelmävirheen suuruudella.



Kuva 5.4. Veden imeytymiskertoimien A_w keskiarvot jokaiselle koekappaleelle lasketulla menetelmävirheellä painotettuna. Mustat janat kuvaavat tuloksen 90 %:n luottamusväliä.

Kuvasta 5.4 on huomattavissa eri valmistajien sisäkuoribetoneissa suuria vaihteluja veden imeytymiskertoimessa. Rudus Oy:n betonin veden imeytymiskerroin on noin 4,5 kertaa

suurempi verrattuna Lujabetoni Oy:n betonin veden imeytymiskertoimeen. Parma Oy:n ja Lujabetoni Oy:n betoneiden veden imeytymiskertoimet ovat lähempänä toisiaan verrattuna Rudus Oy:n betoniin. Parman Oy:n ja Lujabetoni Oy:n elementit valmistettiin elementtitehtaalla, kun puolestaan Rudus Oy:n betoni tuli TTY:lle valmisbetoniasemalta betoniautolla.

Huokoisuuden määrä korreloi kosteuden siirtymisominaisuuksien kanssa. Suurempi huokoisuus aiheuttaa yleensä materiaalissa suuremmat kosteuden siirtymisominaisuudet. Ruduksen betonin kuljetus betoniautolla voi osaltaan selittää korkeampaa veden imeytymiskertoimen arvoa. Kuljetuksen aikana betonia pyöritetään betoniauton säiliössä, jolloin betonissa olevan ilman määrä lisääntyy. Alettaessa tyhjentää betoniautoa, betonimassan joukkoon lisätään usein notkistinta tai huokostinta betonin työstettävyyden parantamiseksi. Tämä lisää osaltaan ilmamäärää betonissa. Suurempi ilmamäärä betonissa aiheuttaa suuremman huokoisuuden, joka puolestaan korreloi suuremman veden imukertoimen kanssa.

Yhden prosentin ilmamäärän lisäys pienentää betonin puristuslujuutta noin 5 %:a (Suomen Betonitieto Oy 2005). Rudus Oy:ltä tilattiin K50 lujuuksista betonia, mutta 28 vrk. Ikäisenä tehdyt puristuslujuuden määritykset osoittivat betonin olevan lujuudeltaan noin K40. Tämä voi johtua noin 4 %:n ilmamäärän lisääntymisestä betoniin valmisbetoniaseman ja betonin valamisen välillä.

Verrattaessa taulukon 5.3 veden imeytymiskertoimen arvoa samalla ajanhetkellä betonin valamisesta kuvan 5.1 vedenimukertoimen arvoon ($8,55E-03 \text{ kg/m}^2\text{s}^{0,5}$, 215 d valamisesta), voidaan huomata putkimuottiin valetun betonin omaavan suuremman veden imeytymiskertoimen. Tämä voi johtua betonin paremmasta tiivistymisestä valettaessa vaakatasossa 150 mm paksu elementti verrattuna 500 mm korkean putken valamiseen pystyssä.

5.1.3 Tulokset, veden tunkeutumiskerroin

Veden tunkeutumiskerroin B_w määritettiin samoista koesarjoista, kuin veden imeytymiskerroin. Tulokset on esitetty taulukoissa 5.4, 5.5 ja 5.6.

Taulukko 5.4. Parma Oy:n toimittamasta betonielementistä määritetyt veden tunkeutumiskertoimet B_w .

Parma Oy:n betonielementti				
Koe-sarja	Aika valusta [d]	B_w [$\text{mm/s}^{0,5}$]	90 % luottamusväli	luottamusvälin hajonta
1	147	4,32E-02	1,55E-02	35,81 %
2	278	1,02E-01	2,87E-02	28,02 %
Koesarjassa kolme koekappaletta.				

Taulukko 5.5. Lujabetoni Oy:n toimittamasta betonielementistä määritetyt veden tunkeutumiskertoimet B_w .

Lujabetoni Oy:n betonielementti				
Koe-sarja	Aika valusta [d]	B_w [mm/s ^{0,5}]	90 % luottamusväli	luottamusvälin hajonta
1	245	4,53E-02	2,13E-02	46,93 %
2	370	4,14E-02	8,64E-03	20,86 %

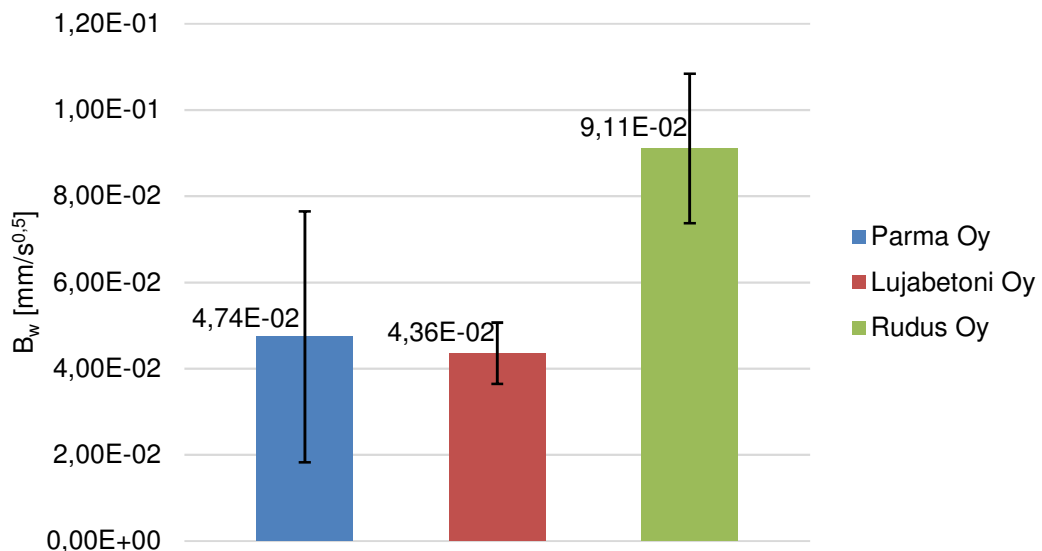
Koesarjassa kolme koekappaletta.

Taulukko 5.6. Rudus Oy:n toimittamasta betonista valetusta betonielementistä määritetty veden tunkeutumiskerroin B_w .

Rudus Oy:n toimittamasta betonista valettu betonielementti				
Koe-sarja	Aika valusta [d]	B_w [mm/s ^{0,5}]	90 % luottamusväli	luottamusvälin hajonta
1	215	9,11E-02	1,74E-02	19,05 %

Koesarjassa kolme koekappaletta.

Veden tunkeutumiskertoimen tuloksissa on suuri luottamusvälin hajonta, kuten oli myös veden imeytymiskertoimessa. Kuvassa 5.5 on esitetty koekappaleiden tuloksista lasketut keskiarvot veden tunkeutumiskertoimelle ja tulosten 90 %:n luottamusvälit. Keskiarvoa laskettaessa tuloksia on painotettu menetelmävirheen suuruudella.



Kuva 5.5. Veden tunkeutumiskertoimien keskiarvot jokaiselle koekappaleelle lasketulla menetelmävirheellä painotettuna. Mustat janat kuvaavat tuloksen 90 %:n luottamusväliä.

Kuvasta on havaittavissa puolet suurempi veden tunkeutumiskertoimen arvo Rudus Oy:n betonilla verrattuna Lujabetonin ja Parman betonielementteihin. Tämä voi johtua suuremmasta huokoisuudesta Rudus Oy:n betonissa.

5.1.4 Tulokset, kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus

Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus määritettiin samoista koesarjoista, kuin veden imeytymis- ja tunkeutumiskerroin. Saadut kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden arvot on esitetty taulukoissa 5.7, 5.8 ja 5.9.

Taulukko 5.7. Parma Oy:n toimittamasta betonielementistä määritetyt kapillaariset kyllästyskosteuspitoisuudet w_{cap} , kyllästyskosteuspitoisuuden 90 % luottamusväli, luottamusvälin hajonta ja kuivatiheyden keskiarvo ρ_0 .

Parma Oy:n betonielementti					
Koesarja	Aika valusta [d]	w_{cap} [kg/m ³]	90 % luottamusväli [kg/m ³]	Luottamusvälin hajonta [%]	ρ_0 [kg/m ³]
1	147	130,1	3,0	2,27	2345,0
2	278	97,3	10,26	10,5	2066,3
Koesarjassa kolme koekappaletta, tulokset keskiarvoja.					

Taulukosta 5.7 voidaan huomata kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden arvojen poikkeavan paljon keskenään. Eroaviin arvoihin voi vaikuttaa erilainen kuivatuslämpötila. Koesarjan 1 koekappaleet kuivattiin 105 °C:n lämpötilassa 13 vuorokautta ja koesarjan 2 koekappaleet 60 °C:n lämpötilassa kolme kuukautta. Molempien koesarjojen koekappaleiden painonmuutos oli alle 0,01 %/vrk, kun kuivaus lopetettiin. Koesarjalla 2 käytettiin alhaisempaa kuivatuslämpötilaa, koska koekappaleita oli tarkoitus edelleen testata muissa kokeissa. Koesarjan 2 koekappaleilla oli aikaisemmin tehty vesihöyrynläpäisevyyskoe märkäkuppimenetelmällä, joka osaltaan voi vaikuttaa tuloksiin.

Taulukossa 5.8 on esitettyinä Lujabetonin betonin kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden arvot.

Taulukko 5.8. Lujabetoni Oy:n toimittamasta betonielementistä määritetyt kapillaariset kyllästyskosteuspitoisuudet w_{cap} , kyllästyskosteuspitoisuuden 90 % luottamusväli, luottamusvälin hajonta ja kuivatiheyden keskiarvo ρ_0 .

Lujabetoni Oy:n betonielementti					
Koesarja	Aika valusta [d]	w_{cap} kg/m ³	90 % luottamusväli [kg/m ³]	Luottamusvälin hajonta [%]	ρ_0 [kg/m ³]
1	245	131,1	3,4	2,61	2190,0
2	370	103,0	8,73	8,5	2019,7
Koesarjassa kolme koekappaletta, tulokset keskiarvoja.					

Taulukon 5.8 tulosten perusteella Lujabetonin ja Parman betonien kapillaariset kyllästyskosteuspitoisuudet ovat hyvin lähelle saman suuruisia. Parman koekappaleiden kuivaus on tehty Lujabetonin koekappaleita vastaavasti.

Taulukossa 5.9 on esitettyä Rudusen betonin kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden arvot.

Taulukko 5.9. Rudus Oy:n toimittamasta betonista valetusta betonielementistä määritetty kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus w_{cap} , kyllästyskosteuspitoisuuden 90 % luottamusväli, luottamusvälin hajonta ja kuivatiheyden keskiarvo ρ_0 .

Rudus Oy:n toimittamasta betonista valettu betonielementti					
Koesarja	Aika valusta [d]	w_{cap} kg/m ³	90 % luottamusväli [kg/m ³]	Luottamusvälin hajonta [%]	ρ_0 [kg/m ³]
1	215	134,5	9,56	7,1	2318,0
Koesarjassa kolme koekappaletta, tulokset keskiarvoja.					

Taulukosta voidaan huomata kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden arvojen olevan samaa suuruusluokkaa Parman ja lujabetonin betonien koesarjan 1 kanssa. Ruduksen kuivapaino on suurin testatuista betoneista. Ruduksen koekappaleiden kuivaus tehtiin Parman ja Lujabetonin koesarjan 1 koekappaleita vastaavasti.

Lujabetonin ontelolaattabetonilla on kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus 105 kg/m³ ja Parman ontelolaattabetonilla 120 kg/m³ (Vainio 2016). Saadut tulokset ovat samaa suuruusluokkaa, mutta vaihtelua eri betonilaatujen ja koe-erien välillä on paljon.

Vapaan veden imeytyskokeen loppuksi määritettiin koekappaleiden tiheys kuivaamalla koekappaleet. Tulokset on esitetty seuraavassa taulukossa.

Taulukko 5.10. Elementeistä valmistetuista koekappaleista määritetyt koemateriaalien kuivatiheydet.

	Kuivapaino ρ_0 [kg/m ³]	Keskihajonta [kg/m ³]	90 %:n luottamusväli [kg/m ³]
Parma	2190,3	175,2	144,1
Lujabetoni	2104,9	97,1	79,9
Rudus	2318,3	33,6	56,6

Taulukosta 5.10 voidaan huomata Ruduksen betonilla olevan suurin kuivatiheys. Koetuloksissa on paljon hajontaa, josta kertoo suuri keskihajonta ja 90:n luottamusväli.

5.1.5 Tulokset, kosteuspitoisuuden vaikutus vedenimuominaisuuksiin

Ruduksen betonilla testattiin veden imeytymisominaisuuksia painelevykokeessa tasapainotetuilla koekappaleilla. Seuraavissa taulukoissa on esitetty tulokset kokeista.

Taulukko 5.11. Veden imeytymisominaisuudet Ruduksen betonilla 3,16 bar painelevykokeen jälkeen.

Rudus 99,8 %:n RH suhteellinen kosteus kokeen alussa			
Koesarja	A_w [kg/(m ² s ^{0,5})]	90 % luottamusväli	luottamusvälin hajonta
3	1,78E-03	1,53E-03	85,95 %
	B_w [mm/s ^{0,5}]	90 % luottamusväli	luottamusvälin hajonta
	2,29E-01	1,21E-01	52,75 %
Koesarjassa kolme koekappaletta.			

Taulukko 5.12. Veden imeytymisominaisuudet Ruduksen betonilla 10,0 bar painelevykokeen jälkeen.

Rudus 99,3 %:n RH suhteellinen kosteus			
Koesarja	A_w [kg/(m ² s ^{0,5})]	90 % luottamusväli	luottamusvälin hajonta
1	2,89E-03	1,79E-03	62,07 %
	B_w [mm/s ^{0,5}]	90 % luottamusväli	luottamusvälin hajonta
	3,07E-01	3,52E-02	11,47 %
Koesarjassa kolme koekappaletta.			

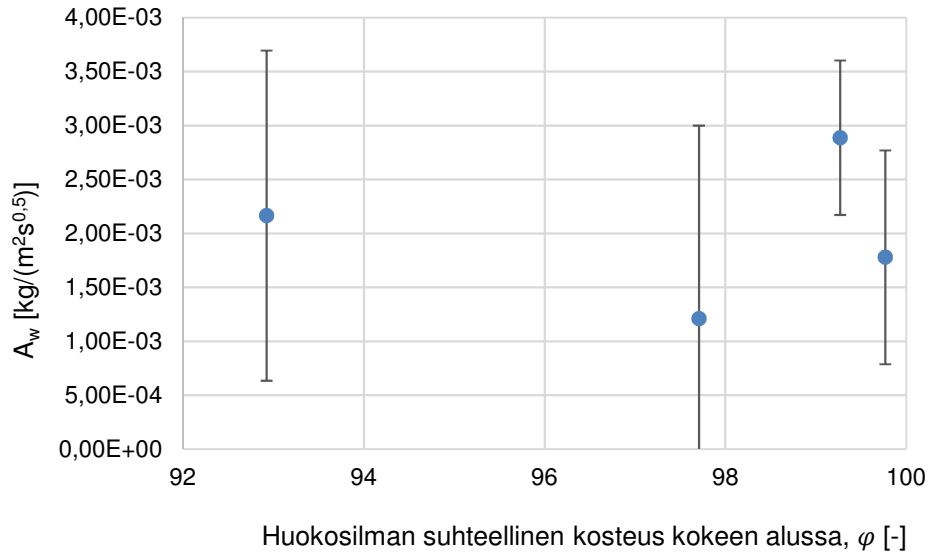
Taulukko 5.13. Veden imeytymisominaisuudet Ruduksen betonilla 31,6 bar painelevykokeen jälkeen.

Rudus 97,7 %:n RH suhteellinen kosteus			
Koesarja	A_w [kg/(m²s^{0,5})]	90 % luottamusväli	luottamusvälin hajonta
2	1,21E-03	7,16E-04	59,27 %
	B_w [mm/s^{0,5}]	90 % luottamusväli	luottamusvälin hajonta
	1,47E-01	1,34E-01	91,41 %
Koesarjassa kolme koekappaletta.			

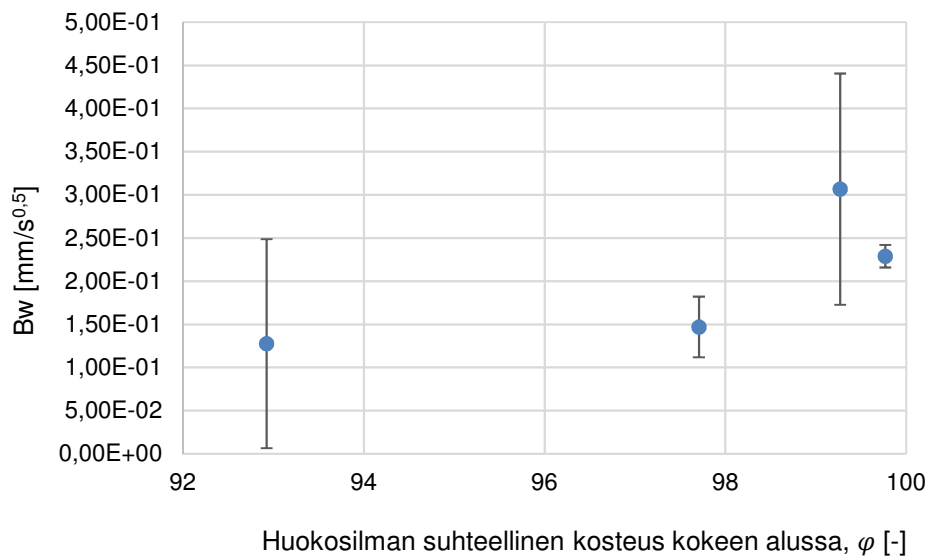
Taulukko 5.14. Veden imeytymisominaisuudet Ruduksen betonilla 100 bar painelevykokeen jälkeen.

Rudus 92,9 %:n RH suhteellinen kosteus			
Koesarja	A_w [kg/(m²s^{0,5})]	90 % luottamusväli	luottamusvälin hajonta
2	2,16E-03	9,91E-04	45,78 %
	B_w [mm/s^{0,5}]	90 % luottamusväli	luottamusvälin hajonta
	1,28E-01	1,30E-02	10,22 %
Koesarjassa kolme koekappaletta.			

Tuloksista voidaan havaita suuri 90 %:n luottamusväli. Tulokset on esitetty havainnollistamisen helpottamiseksi myös seuraavissa kuvissa.



Kuva 5.6. Painelevykokeessa tasapainottuneilla koekappaleilla tehtyjen vapaan veden imeytymiskokeesta saadut veden imeytymiskertoimet A_w Ruduksen betonilla. Janalla on esitettyinä tulosten 90 %:n luottamusväli.



Kuva 5.7. Painelevykokeessa tasapainottuneilla koekappaleilla tehtyjen vapaan veden imeytymiskokeesta saadut veden tunkeutumiskertoimet B_w Ruduksen betonilla. Janalla on esitettyinä tulosten 90 %:n luottamusväli.

Edellisistä kuvista voidaan huomata, ettei veden imeytyminen materiaaliin muutu samassa suhteessa kosteuspitoisuuden kanssa. Kosteuspitoisuus on kuitenkin hyvin suuri koekappaleissa varsinkin 10 bar tai pienemmällä paineella tehtyjen painelevykokeiden jälkeen. Kosteuden siirtyminen on huomattavasti nopeampaa kuin suhteellisen kosteuden arvoon 60 % RH tasapainottuneilla koekappaleilla. Veden imeytymiskertoimet jäävät kuitenkin noin puolet pienemmiksi painelevykokeista otetuilla koekappaleilla verrattuna 60 % RH suhteelliseen kosteuteen tasapainottuneilla koekappaleilla.

Lujabetonin betonilla tehtiin myös yksi vapaan veden imeytyskoe 31,6 bar paineeseen tasaantumisen jälkeen. Tulokset on esitetty seuraavassa taulukossa.

Taulukko 5.15. Veden imeytymisominaisuudet Lujabetonin betonilla 31,6 bar painelevykokeen jälkeen.

Lujabetoni 97,7 %:n RH suhteellinen kosteus			
Koesarja	A_w [kg/(m²s^{0,5})]	90 % luottamusväli	luottamusvälin hajonta
2	8,88E-04	1,94E-04	21,82 %
	B_w [mm/s_{0,5}]	90 % luottamusväli	luottamusvälin hajonta
	3,07E-01	3,52E-02	11,47 %
Koesarjassa kolme koekappaletta.			

Verrattaessa taulukon 5.15 tuloksia taulukkojen 5.2 ja 5.5 tuloksiin, voidaan havaita myös Lujabetonin betonin saavan jopa kymmenen kertaa suurempia veden tunkeutumiskertoimen arvoja, kun koekappaleet ovat tasapainottuneet suhteellisen kosteuden arvoon 97,7 % RH verrattuna tasoittumiseen 60 % RH:ssa. Veden imeytymiskerroin puolestaan pienenee noin puoleen, kun koekappaleen huokostilan suhteellinen kosteus nousee 60 % RH :sta 97,7 % RH.

5.2 Hygroskooppinen tasapainokosteuskoe

Hygroskooppinen tasapainokosteus määritettiin kokonaisilla koekappaleilla ja murskatuilla koekappaleilla. Pitkästä betonin kosteuden tasaantumisajasta hygroskooppisella alueella johtuen kokonaisilla koekappaleitten tasapainokosteus määritettiin vain adsorptiokäyrän osalta kolmessa pisteessä ja desorptiokäyrän osalta kahdessa pisteessä. Murskatuilla koekappaleilla tasapainokosteus määritettiin kuudessa pisteessä adsorptiokäyrän osalta 6 pisteessä ja desorptiokäyrän osalta viidessä pisteessä.

5.2.1 Tulokset, kokonaiset koekappaleet

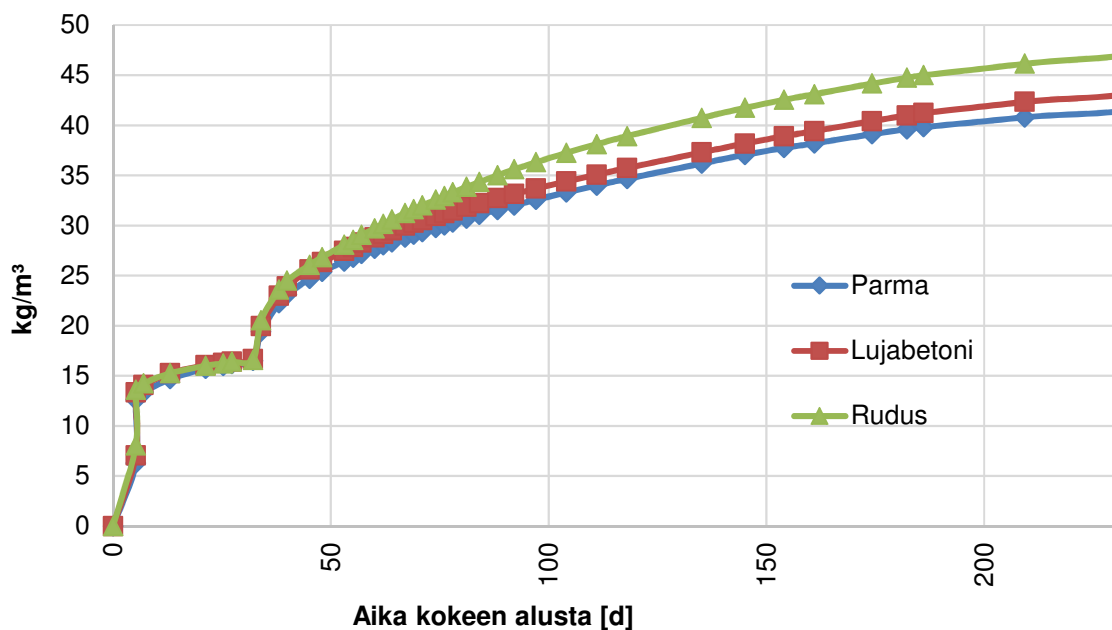
Kokonaisilla koekappaleilla määritettiin betonin kuivapaino. Seuraavassa taulukossa on esitetty tulokset kuuden koekappaleen keskiarvona.

Taulukko 5.16. Tutkittujen betonien kuivapainot ennen tasapainokosteuskoetta.

	Kuivapaino m_{dry}	Keskihajonta	90 %:n luottamusväli
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
Parma	2332,8	31,2	25,6
Lujabetoni	2204,4	17,4	14,3
Rudus	2244,8	11,5	9,4

Taulukosta 5.16 voidaan huomata Parman betonin omaavan suurimman tiheyden. Lujabetonilla ja Ruduksella betonien kuivapainot ovat suuruusluokaltaan samaa luokkaa. RIL 255-1 kirjassa on esitetty betonin tiheydeksi yleisesti noin 2100-2300 kg/m³, joten saadut tulokset ovat suuruusluokaltaan lähellä kirjallisuudessa esitettyjä arvoja. Verrattaessa tiheyksiä vapaan veden imeytyskokeen jälkeen määritettyihin tiheyksiin, taulukon 5.16 tuloksissa on huomattavasti pienempi hajonta koekappaleiden välillä.

Adsorptiokäyrältä määritettiin kokonaisilla koekappaleilla tulokset tässä diplomityössä kolmessa suhteellisen kosteuden arvossa. Tasaantumisaikat olivat pitkiä, joten useampien suhteellisen kosteuden tasapainokosteuksia ei ollut ajallisesti järkevää lähteä määrittämään. Kuvassa 5.8 on esitetty koekappaleiden tasaantuminen suhteellisen kosteuden arvoihin 9 % RH ja 33 % RH.



Kuva 5.8. Koekappaleiden kosteuspitoisuuden tasaantuminen 9 % RH ja 33 % RH ilman suhteelliseen kosteuteen. 32 vuorokauden kohdalla koekappaleet on siirretty 9 % RH ilman suhteellisesta kosteudesta 33 % RH ilman suhteelliseen kosteuteen.

Kuvasta 5.8 voidaan huomata koekappaleiden kosteuspitoisuuden tasaantuvan uunikuivauksen jälkeen 9 % RH suhteelliseen kosteuteen noin kuukaudessa. 33 % RH

suhteelliseen kosteuteen tasaantuminen ei ole kuitenkaan vielä 7 kuukauden aikana täysin tapahtunut. Taulukossa 5.17 on esitetty määritetyt tasapainokosteudet.

Taulukko 5.17. Määritetyt tasapainokosteudet adsorptiokäyrältä. Tulokset ovat kolmen koekappaleen keskiarvotuloksia.

Hygroskooppinen tasapainokosteus w_{ads} kg/m³ adsorptiosta			
RH [%]	Parma	Lujabetoni	Rudus
9	16,5	16,7	16,6
33	42,4	44,1	48,0
97	139,1	132,0	151,9

Taulukosta voidaan havaita tasapainokosteuksien 97 % RH suhteellisessa kosteudessa olevan samaa suuruusluokkaa tai suurempia kuin taulukoissa 5.7, 5.8 ja 5.9 esitetyt kapillaariset kyllästyskosteuspitoisuudet. Tämä voi johtua pitkästä tasaantumisajasta 97 % RH tasapainokosteuteen. Tasaantuminen kesti noin 2,5 kuukautta. Tasaantumisen loppuvaiheessa oli havaittavissa kosteuden tiivistymistä koekappaleiden pinnoille. Tämä johtui ilmeisesti olosuhdehuoneen pienestä lämpötilan vaihtelusta. Tiivistynyt vesi pääsi siirtymään koekappaleisiin kapillaarisesti, jolloin koekappaleiden kosteuspitoisuus oli osittain kapillaarisella alueella.

Desorptiokäyrältä määritetyt tasapainokosteudet on esitetty taulukossa 5.18.

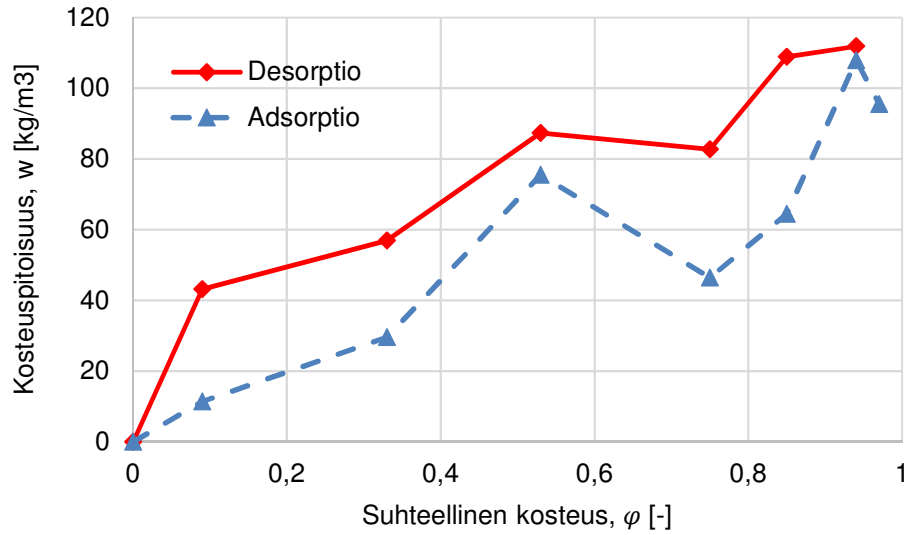
Taulukko 5.18. Desorptiokäyrältä määritetyt tasapainokosteudet.

Hygroskooppinen tasapainokosteus w_{des} kg/m³ desorptiosta			
RH [%]	Parma	Lujabetoni	Rudus
93	123,3	119,2	130,1
85	117,7	115,8	122,7

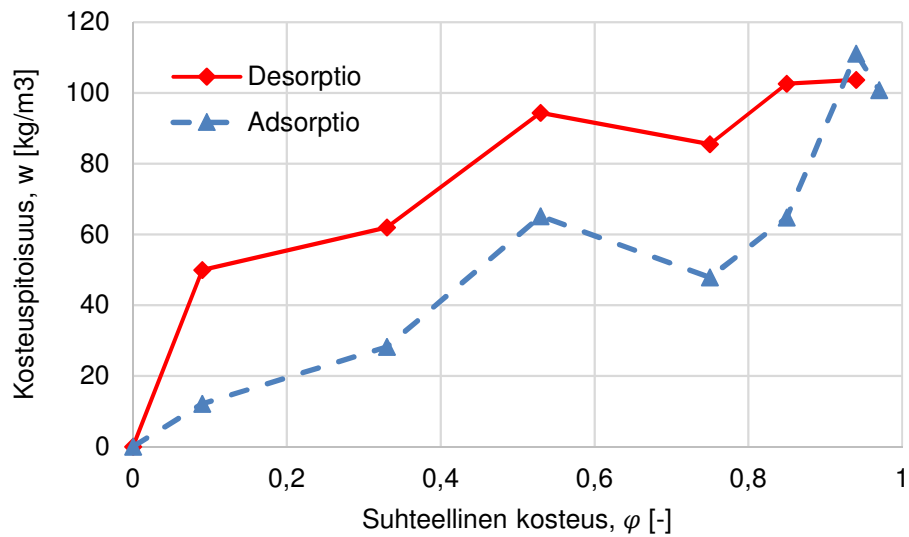
Taulukon 5.18 tulokset ovat korkeampia kuin RIL 255-1-2014 esitetyt betonin tasapainokosteudet vastaavissa suhteellisen kosteuden arvossa. RIL 255-1-2014 kirjassa on tasapainokosteus 93 % suhteellisessa kosteudessa noin 105 kg/m³ ja 85 % suhteellisessa kosteudessa noin 80 kg/m³.

5.2.2 Tulokset, murskatut koekappaleet

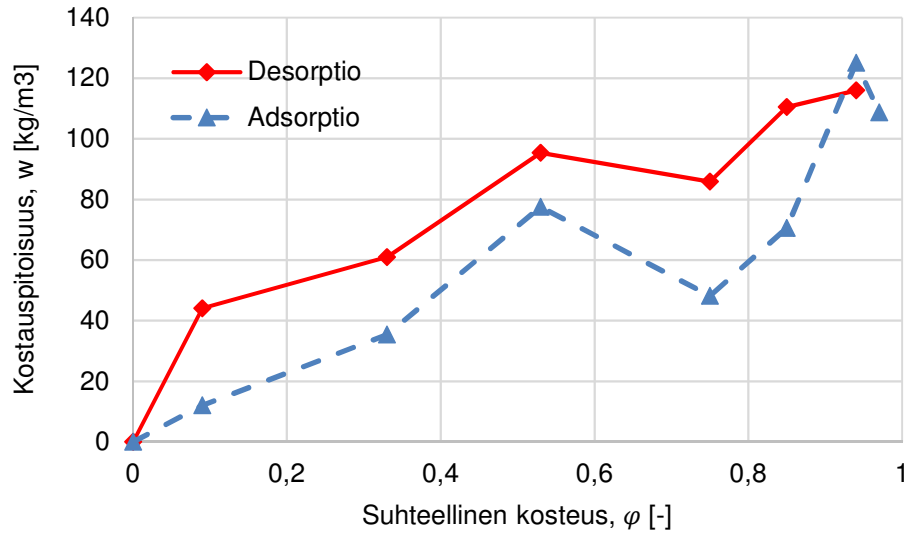
Seuraavissa kuvissa on esitetty määritetyt tasapainokosteuskäyrät murskatuilla koekappaleilla.



Kuva 5.9. Parman betonista murskatuilla koekappaleilla määritetty desorptio- ja adsorptiotasapainokosteuskäyrät.

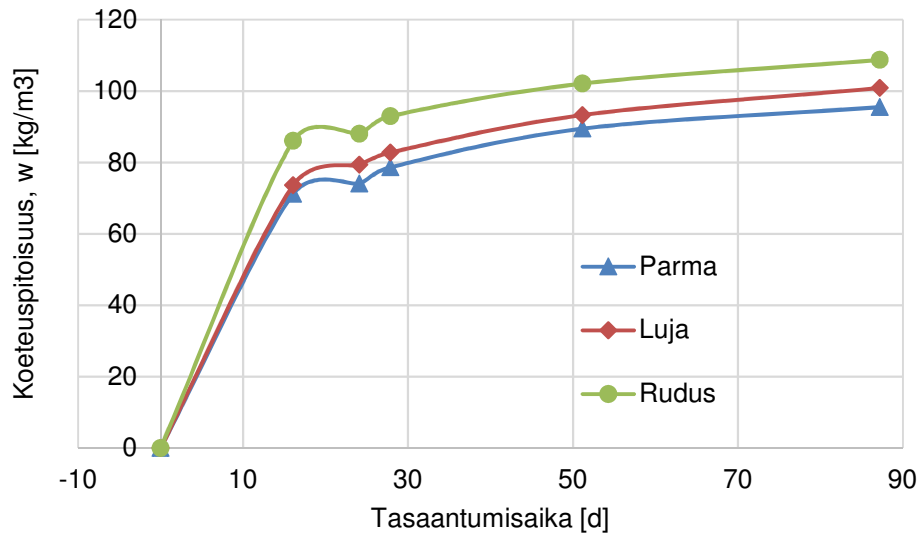


Kuva 5.10. Lujabetonin betonista murskatuilla koekappaleilla määritetty desorptio- ja adsorptiotasapainokosteuskäyrät.



Kuva 5.11. Ruduksen betonista murskatuilla koekappaleilla määritetty desorptio- ja adsorptiotasapainokosteuskäyrät.

Murskattujen koekappaleiden tasapainokosteuskäyristä voidaan huomata selkeästi hystereesi-ilmiö. Jokaisella tutkitulla materiaalilla voidaan huomata käyrältä teorian mukaisesta poikkeavia arvoja. Tämä voi johtua siitä, että kokeessa käytettiin useita koesarjoja. Yhdellä koesarjalla on saatu suhteellisen kosteuden arvot adsorptiossa suhteellisen kosteuden arvoissa 9 % RH, 33 % RH ja 53 % RH. Muut adsorptiossa saadut tulokset on saatu jokainen eri koesarjalla. Desorptiokäyrän tuloksista vain suhteellisen kosteuden arvoissa 85 % RH ja 94 % RH on käytetty yhtä koesarjaa. Muutoin jokainen yksittäinen tulos on eri omalta koesarjaltaan. Tuloksiin voi vaikuttaa koekappaleiden ja koesarjan pieni koko. 97 % RH kosteudessa voi tuloksiin vaikuttaa myös, etteivät materiaalit olleet täysin saavuttaneet tasapainokosteutta 87 vuorokauden tasapainottumisajassa. Seuraavassa kuvassa on esitetty koesarjojen tasapainottuminen 97 % RH suhteelliseen kosteuteen.



Kuva 5.12. Murskattujen koekappaleiden tasaantuminen 97 % RH:n suhteelliseen kosteuteen.

Kuvasta 5.12 on nähtävissä, että koemateriaalien kosteuspitoisuus on edelleen nousussa 87 vuorokauden jälkeen.

5.3 Painelevykoe

Painelevykokeissa käytettiin jokaista betonilaatua kohden kolmea koekappalesarjaa. Jokaisessa koekappalesarjassa oli 12 koekappaletta. Ennen painelevykokeen aloitusta koekappaleet pyrittiin kyllästämään vedellä maksimikosteuspitoisuuteen.

Painelevykokeiden osalta testit suoritettiin kesän ja syksyn 2016 aikana. Maksimikosteuspitoisuuden määrittystä jatkettiin kevääseen 2017 saakka. Testien aikana testahuoneen lämpötila oli keskimäärin 23,1 °C. Suurimmillaan testin aikainen keskilämpötila oli 23,8 °C ja pienimmillään 22,0 °C. Testahuoneen testin aikainen keskimääräinen suhteellinen kosteus vaihteli 23-47 % RH välillä.

5.3.1 Tulokset, maksimikosteuspitoisuus

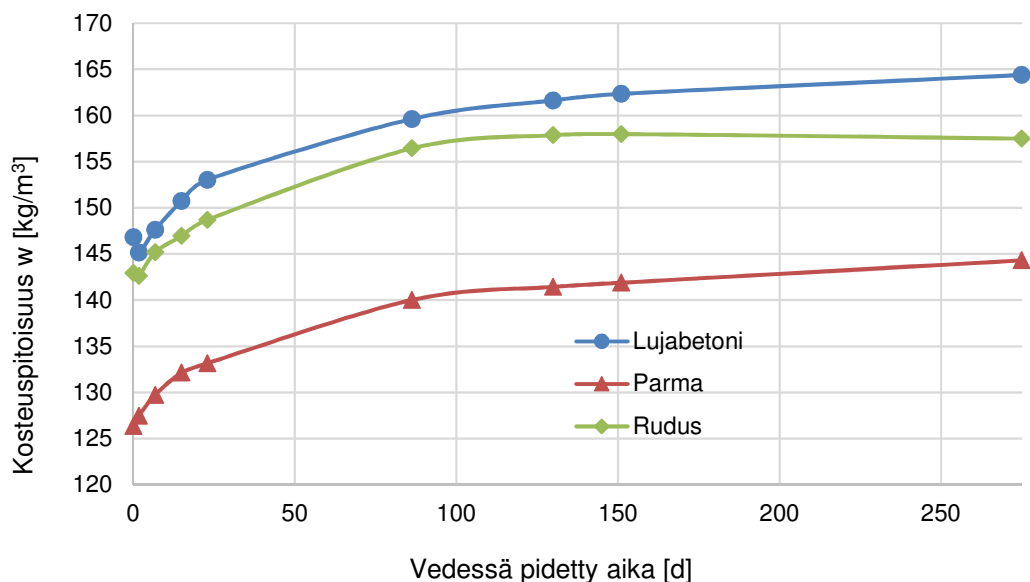
Ennen varsinaista painelevykoetta koekappaleet uunikuivattiin, vakumoitettiin alipainekattilassa ja kyllästettiin vedellä. Vedellä kyllästämisen jälkeen voitiin määrittää materiaalien maksimikosteuspitoisuus. Taulukossa 5.19 on esitetty tuloksista lasketut maksimikosteuspitoisuuden keskiarvot.

Taulukko 5.19. Suurimmat saavutetut keskiarvokosteuspitoisuudet w tutkituilla betoneilla. Taulukossa on jokaisen betonilaadun kolmella erillisellä 12 koekappaleen koekappalesarjalla saadut tulokset. Taulukossa on esitettyä myös kuivauslämpötila, vakumointiaika, vesiupotuksessa pidetty aika ja missä painelevykokeessa kyseistä koesarjaa on käytetty. Suurimmat saadut tulokset on esitetty harmaalla pohjalla. Vakumointi ajassa + -merkin jälkeinen aika tarkoittaa aikaa, jolloin koekappaleet ovat olleet vesiupotuksessa ja vakumoinnissa. Aika vedessä sarakkeessa + -merkin etupuolella oleva aika tarkoittaa aikaa, jolloin koekappaleet ovat vedessä ja vakumoinnissa. Koe sarakkeessa (k) merkintä tarkoittaa koetta kaoliinisaven vaikutuksen selvittämiseksi. Koesarjoissa 1.4 ja 3.4 sama kyllästämisen, vain vedessä pidetty aika muuttuu.

Koe sarja	Koekappalesarjan kosteuspitoisuuden keskiarvotulos [kg/m ³]			Kuivaus [°C]	Vakumointiaika	Aika vedessä	Koe [bar]
	Parma 1	Lujabetoni 1	Rudus 1				
1.1	127,5	142,2	138,1	60	6 h	6 d	0,316
1.2	124,2	139,9	138,7	60	6 h	3 d	10
1.3	126,1	141,7	140,5	60	1 d	4 d	1 (k)
1.4	126,4	146,8	142,9	105	3+1 h	1 h + 1 d	-
1.4	129,8	147,7	145,4	105	3+1 h	1 h + 1,75 d	-
1.4	132,2	150,8	147,1	105	3+1 h	1 h + 15 d	-
1.4	133,2	153,0	148,7	105	3+1 h	1 h + 23 d	-
1.4	140,0	159,6	156,4	105	3+1 h	1 h + 86 d	-
1.4	141,4	161,6	157,9	105	3+1 h	1 h + 129 d	-
1.4	141,9	162,3	158,0	105	3+1 h	1 h + 151 d	-
1.4	144,3	164,4	157,5	105	3+1 h	1 h + 275 d	-
	Parma 2	Lujabetoni 2	Rudus 2				
2.1		149,3		60	6 h	1 d	-
2.2		148,8		60	6 h	1 d	-
2.3	123,5			60	6 h	2 d	31,6
2.4		154,1		60	6,5 h	10 d	31,6
2.5			138,4	60	6,5 h	10 d	31,6
2.6	124,6			60	1 vrk	7 d	100
2.7			134,6	60	1 vrk	4 d	100
2.8		152,8		60	1 vrk	5 d	100
2.9	123,4	158,8	136,7	105	3 h+1 h	1 h + 1 h	3,16 (k)
	Parma 3	Lujabetoni 3	Rudus 3				
3.1	122,4	137,3	132,3	60	6 h	2 d	1
3.2	123,0	137,5	133,5	60	1 d	2 d	3,16
3.3	126,1	139,5	136,9	60	1 d	5 d	10 (k)
3.4	126,2	143,0	138,1	105	1 d	0,8 d	-
3.4	131,6	150,1	142,7	105	1 d	13 d	-
3.4	136,1	155,3	148,4	105	1 d	49 d	-
3.4	139,1	158,0	151,6	105	1 d	85 d	-
3.4	140,3	159,4	153,0	105	1 d	129 d	-
3.4	140,5	159,7	152,8	105	1 d	150 d	-
3.4	140,6	160,8	151,9	105	1 d	274 d	-

Taulukossa 5.19 standardin (NT BUILD 481, 1997) mukainen koekappaleiden maksimikosteuspitoisuuteen kyllästäminen on tehty koesarjoille 1.4 ja 2.9. Muutoin kuivatuslämpötila, vakumointi- tai vesiupotuksessa pidetyt ajat poikkeavat standardissa esitetystä. Standardin mukaisella koekappaleiden kyllästämisellä ei päästä näiden tulosten perusteella maksimikosteuspitoisuuteen millään testatulla betonilaadulla. Parman ja Lujabetonin betoneilla saavutetaan suurimmat arvot taulukon 5.19 koekappaleiden kyllästyksessä koesarjalla 1.4, 257 vuorokauden vesiupotusajan jälkeen. Ruduksen betonilla suurin kosteuspitoisuus saavutetaan koesarjalla 1.4, 151 vuorokauden vesiupotusajan jälkeen. Koesarjan 3.4 koekappaleiden vedessä pidetty aika on lähes yhtä suuri kuin koesarjan 1.4 koekappaleiden vedessä pidetty aika. Koesarjoissa 1.4 ja 3.4 koekappaleiden kosteuspitoisuuden arvot nousevat jokaisella tutkitulla betonilla lähelle samaa tasoa. Kosteuspitoisuuden voidaan havaita näiden tulosten perusteella korreloivan vedessä pidetyn ajan kanssa.

Taulukon 5.19 perusteella koekappaleiden kosteuspitoisuus vesiupotuksessa standardin NT BUILD 481 (NT BUILD 481, 1997) mukaisen koekappaleiden kyllästäminen jälkeen nousee useiden kuukausien ajan. Tämän perusteella maksimikosteuspitoisuutta ei saavuteta standardin (NT BUILD 481, 1997) mukaisella koekappaleiden kyllästämisellä ainakaan tiiviillä materiaalilla, kuten korkean puristuslujuuden omaavalla betonilla. Kuvassa 5.13 on esitetty koesarjan 1.4 koekappaleiden painonnousu vakumoinnin jälkeen.



Kuva 5.13. Painon nousu koesarjan 1.4 koekappaleilla vakumoinnin jälkeen vesiupotuksessa.

Kuvasta 5.13 voidaan huomata kosteuspitoisuuden nousevan koekappaleissa usean kuukauden ajan vesiupotuksessa vakumoinnin jälkeen.

Kosteuspitoisuuden lisääntyminen ajan funktiona voi johtua riittämättömästä vakumoinnista. Pienimpiin betonin huokosiin jää ilmaa pitkästä vakumointiajasta huolimatta. Suuremmista huokosista ilma poistuu ja vesiupotuksen jälkeen suuremmat huokokset täyttyvät nopeasti vedellä. Pienempiin huokosiin vesi alkaa siirtyä ajan kuluessa diffuusiolla ja kapillaarisesti. Samalla ilma mahdollisesti poistuu huokosverkkoa pitkin.

Koekappaleiden kyllästämisessä kokeiltiin kuivatuslämpötilan vaikutusta kyllästämisestä jälkeiseen kosteuspitoisuuteen. 60 °C:n kuivatuslämpötilassa koekappaleita ei saatu pitkästä kuivausajasta huolimatta niin kuivaksi kuin 105 °C:n kuivatuslämpötilassa. Kosteuspitoisuus 60 °C:ssa lämpötilassa kuivatuksen jälkeen oli koekappaleilla 10-24 kg/m³. Verrattaessa taulukon 5.19 koesarjojen 3.2 ja 3.4 vedellä kyllästämiä, voidaan huomata 105 °C:ssa kuivattujen koekappaleiden saavuttaman korkeamman kosteuspitoisuuden lyhyemmässä ajassa. Taulukosta voidaan huomata, että suurimmat kosteuspitoisuudet on saavutettu korkeamman kuivatuslämpötilan jälkeisellä kyllästyksellä. Edellä mainittujen perusteella voidaan pitää standardin NT BUILD 481 mukaista 105 °C:n kuivatuslämpötilaa oikeana vaihtoehtona tavoiteltaessa koekappaleiden maksimikosteuspitoisuutta.

5.3.2 Tulokset, kaoliinisaven vaikutus painelevykokeessa

Kaoliinisaven vaikutusta koetuloksiin painelevykokeessa testattiin tekemällä vertailevia kokeita, joissa osassa koekappaleista oli kaoliinisavi koekappaleiden ja painelevyn välissä ja osa koekappaleista oli asetettuna suoraan painelevyn päälle. Kaoliinisavi oli erotettuna koekappaleesta suodatinpaperilla. Koe tehtiin saman aikaisesti kaoliinisaven kanssa ilman kaoliinisavea oleville koekappaleille samassa painelevyastiassa, mutta eri painelevyillä. Painelevykokeessa käytettyyn painekammioon sai yhteen kokeeseen neljä painelevyä, jolloin kahdella painelevyllä oli kaoliinisaven kanssa testattavia koekappaleita ja kahdella painelevyllä koekappaleita ilman kaoliinisavea. Kaoliinisaven vaikutusta testattiin 0,316 bar, 1,0 bar ja 10 bar painelevykokeissa. Kaoliinisavi erotettiin koekappaleista suodatinpaperin avulla. Tulokset ovat esitettynä taulukoissa 5.20, 5.21 ja 5.22.

Taulukko 5.20. Kaoliinisaven vaikutuksen vertailukokeen tulokset. Kokeessa oli 6 koekappaletta jokaista betonilaatua kaoliinisaven kanssa ja 6 koekappaletta ilman kaoliinisavea 0,316 bar:n painelevykokeessa.

Kosteuspitoisuus w, 0,316 bar painelevykoe						
Kuivatus	Vakumointi-aika	Vedessä	Painelevy	P = Parma L = Lujabetoni R = Rudus		
60 °C	3 h	2 h	0,316 bar			
	Kaoliinisavi			Ei kaoliinisavea		
[kg/m ³]	P2.1-2.6	L2.1-2.6	R2.1-2.6	P2.7-2.12	L2.7-2.12	R2.7-2.12
Ennen koetta	123,6	161,9	136,3	123,2	155,6	137,1
max.	134,1	180,4	146,6	132,3	168,2	157,5
min.	110,2	146,8	116,1	116,3	131,0	119,7
keskihajonta	8,5	12,7	12,2	5,9	13,0	15,3
90 %:n luottamusväli	7,0	10,5	10,1	4,9	10,7	12,6
Kokeen jälkeen	124,3	161,1	133,8	123,1	140,1	129,6
Max.	135,9	177,5	143,1	132,0	155,0	144,5
Min.	113,2	145,1	113,3	116,4	113,3	114,8
keskihajonta	7,7	12,8	11,7	6,3	14,6	13,7
90 %:n luottamusväli	6,4	10,5	9,6	5,2	12,0	11,3
Lämpötila kokeen aikana:						
T_{keskiarvo}	T_{max}	T_{min}	Keskihajonta			
23,4 °C	24,4 °C	22,7 °C	0,3 °C			

Taulukosta 5.20 voidaan huomata ilman kaoliinisavea testattujen koekappaleiden tasoittuvan koeaikana matalampaan kosteuspitoisuuteen kuin kaoliinisaven avulla kapillaariseen kontaktiin painelevyn kanssa asetetut koekappaleet. Kaoliinisaven kanssa tutkituilla Parman koekappaleilla paino nousi kokeen aikana, joka voi johtua koekappaleiden puutteellisesta kyllästämisestä. Jos koekappaleiden kyllästämisessä ei päästä riittävän lähelle maksimikosteuspitoisuutta, koekappaleet voivat imeä kapillaarisesti vettä kaoliinisavesta tai painelevystä.

Taulukossa 5.21 on esitetty kaoliinisaven vertailukokeen tulokset 1 bar kokeessa.

Taulukko 5.21. Kaoliinisaven vaikutuksen vertailukokeen tulokset. Kokeessa oli 6 koekappaletta jokaista betonilaatua kaoliinisaven kanssa ja 6 koekappaletta ilman kaoliinisavea 1 bar:n painelevykokeessa.

Kosteuspitoisuus w, 1 bar painelevykoe						
Kuivatus	Vakumointi-aika	Vedessä	Painelevy	P = Parma L = Lujabetoni R = Rudus		
60 °C	1 d	4,0 d	1,0 bar			
	Kaoliinisavi			Ei kaoliinisavea		
[kg/m ³]	P1.1-1.6	L1.1-1.6	R1.1-1.6	P1.7-1.12	L1.7-1.12	R1.7-1.12
Ennen koetta	128,5	140,5	138,2	123,8	142,9	142,8
max.	135,1	153,7	145,9	132,5	163,5	151,1
min.	123,8	127,9	129,0	105,5	121,5	131,8
keskihajonta	4,1	10,0	6,8	10,2	15,2	8,7
90 %:n luottamusväli	3,3	8,2	5,6	8,4	12,5	7,1
Kokeen jälkeen	126,8	140,8	134,1	121,3	140,6	139,4
max.	132,6	157,1	144,5	130,2	157,6	148,4
min.	121,3	127,5	126,5	102,1	122,0	128,5
keskihajonta	4,0	11,1	7,7	10,6	14,3	8,7
90 %:n luottamusväli	3,3	9,1	6,3	8,7	11,8	7,2
Lämpötila kokeen aikana:						
Tkeskiarvo	Tmax	Tmin	Keskihajonta			
23,2 °C	24,8 °C	22,6 °C	0,4 °C			

Taulukosta 5.21 voidaan havaita kaikkien betonilaatujen kosteuspitoisuuksien muuttuvan samalla tavoin kaoliinisaven kanssa ja ilman kaoliinisavea 1 bar painelevykokeessa. Taulukosta 5.22 on havaittavissa, ettei kaoliinisavella ole myöskään 10 bar painelevykokeessa vaikutusta koekappaleiden kosteuspitoisuuksiin.

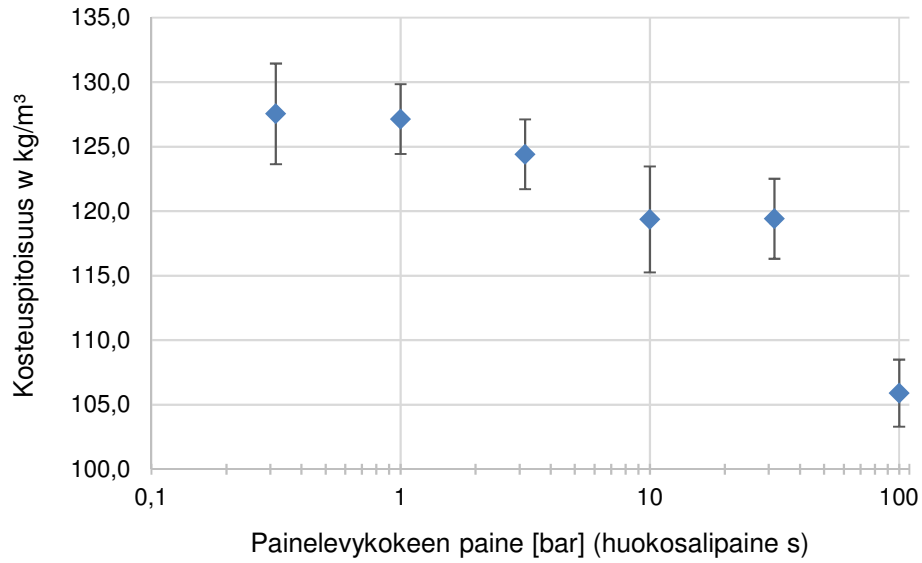
Taulukko 5.22. Kaoliinisaven vaikutuksen vertailukokeen tulokset. Kokeessa oli 6 koekappaletta jokaista betonilaatua kaoliinisaven kanssa ja 6 koekappaletta ilman kaoliinisavea 10 bar:n painelevykokeessa.

Kosteuspitoisuus w, 10 bar painelevykoe						
Kuivatus	Vakumointi-aika	Vedessä	Painelevy	P = Parma L = Lujabetoni R = Rudus		
60 °C	1 d	5 d	1 bar			
	Kaoliinisavi			Ei kaoliinisavea		
[kg/m ³]	P1.1-1.6	L1.1-1.6	R1.1-1.6	P1.7-1.12	L1.7-1.12	R1.7-1.12
Ennen koetta	125,5	141,4	136,4	126,7	137,7	137,5
max.	135,4	154,3	146,4	133,4	154,7	147,3
min.	117,1	123,2	127,2	121,2	114,6	120,3
Keskihajonta	6,5	11,3	9,0	4,3	16,0	10,7
90 %:n luottamusväli	9,3	7,4	5,3	13,1	8,8	3,5
Kokeen jälkeen	121,2	133,9	131,1	119,9	123,4	129,1
Max	128,4	151,0	140,0	124,9	138,8	140,6
Min	111,7	111,6	122,0	116,7	101,6	112,3
Keskihajonta	7,5	15,2	9,1	3,1	14,7	10,8
90 %:n luottamusväli	12,5	7,5	6,2	12,1	8,9	2,6
Lämpötila kokeen aikana:						
T_{keskiarvo}	T_{max}	T_{min}	Keskihajonta			
22,8 °C	23,5 °C	22,3 °C	0,3 °C			

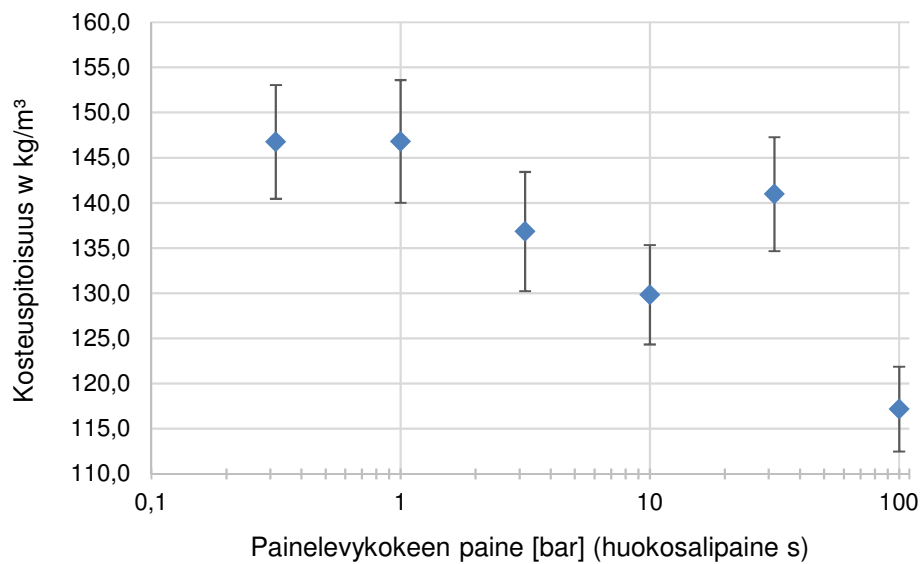
Kaoliinisaven vertailukokeiden tulosten perusteella voidaan todeta, ettei hyvin hiotuilla betonikoekappaleilla tarvitse käyttää kaoliinisavea kapillaarisen kontaktin saavuttamiseksi painelevyn kanssa.

5.3.3 Tulokset, painelevykoe

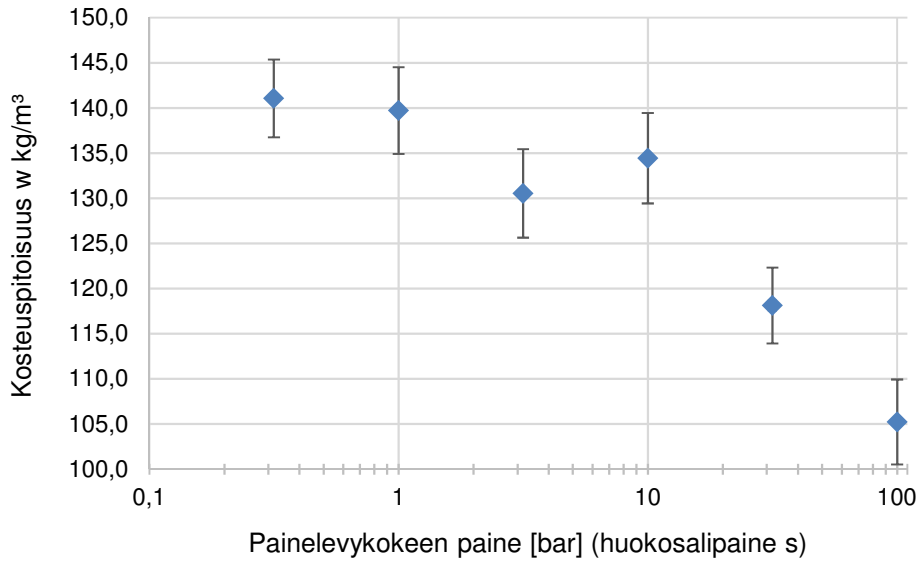
Kaikilla kolmella tutkitulla betonilaadulla määritettiin kapillaariset tasapainokosteudet painelevykokeiden avulla. Kokeissa ei käytetty kaoliinisavea koekappaleiden ja painelevyn välissä. Määritetyt kapillaariset tasapainokosteustulokset on esitetty kuvissa 5.14, 5.15 ja 5.16. Painelevykokeiden tulokset on esitetty taulukkomuodossa tarkemmin liitteessä 1.



Kuva 5.14. Parman betonilla saadut kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän tulokset. Virhepalkki esittää 90 %:n luottamusväliä.

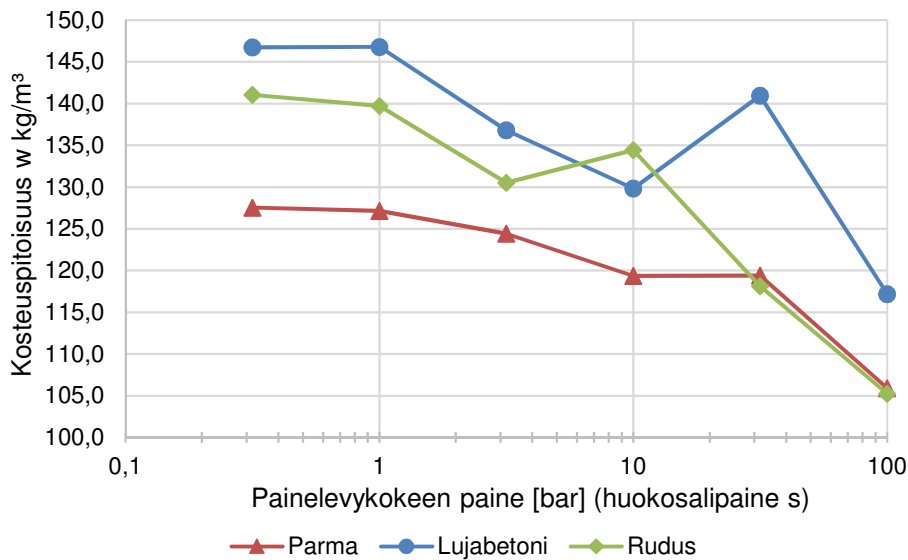


Kuva 5.15. Lujabetonin betonilla saadut kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän tulokset. Virhepalkki esittää 90 %:n luottamusväliä.



Kuva 5.16. Ruduksen betonilla saadut kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän tulokset. Virhepalkki esittää 90 %:n luottamusväliä.

Kuvista 5.14, 5.15 ja 5.16 voidaan huomata 90 %:n luottamusvälien olevan kohtuullisen pieniä jokaisessa tuloksessa. Yksittäisten koetulosten hajonta oli suurta, mutta suuri koekappaleiden määrä pienentää 90 %:n luottamusväliä. Kuvassa 5.17 on esitetty saadut painelevykoetulokset yhdessä kuvassa.



Kuva 5.17. Tutkittujen betonilaatujen kapillaariset tasapainokosteuskäyrät.

Kuvasta 5.17 voidaan huomata tutkituista betoneista Lujabetonin omaavan korkeimmat tasapainokosteudet kapillaarisella alueella ja Parman puolestaan matalimmat arvot. Lujabetonilla ja Parmalla on käyrästä poikkeava tulos tasapainokosteuskäyrässä 31 bar kohdalla ja Ruduksella 10 bar kohdalla. Nämä tulokset voivat johtua paremmin onnistuneesta betonin kyllästämisestä ennen painelevykoetta. Toisaalta 31 bar kokeen tuloksiin voi vaikuttaa 10 bar kokeessa käytettävän keraamisen painelevyn muuttuminen

31,6 bar ja 100 bar kokeessa käytettävään selluloosakalvoon. 14 vuorokauden tasaantumisaikassa kosteus ei mahdollisesti ehdi tasaantua selluloosakalvon läpi. Tulokset ovat esitettyinä taulukkomuodossa taulukoissa 5.23, 5.24 ja 5.25.

Taulukko 5.23. *Parma Oy:n betonin kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän tutkitut pisteet. Taulukossa on esitettyinä saavutettu koekappaleiden kesimääräinen kosteuspitoisuus ennen koetta, kokeen tulos, kokeessa ollut koesarja, koesarjan koekappaleiden keskikorkeus ja koelevyn asema painekattilassa. 31,6 bar ja 100 bar koekappaleet ovat yhdessä tasossa ja vain yksi koesarja testataan niissä kerrallaan. Taulukossa on esitetty harmaalla pohjalla poikkeava tulos kapillaariselta tasapainokosteuskäyrältä.*

Parma						
Koe	Koesarja	Kyllästyspitoisuus ennen koetta	Tulos	Koekappalesarja	Korkeus	Koelevyn asema painekattilassa
bar		kg/m ³	kg/m ³		[mm]	
0,316	1.1	127,5	127,5	Parma 1	9,0	ei tiedossa
1	1.3	122,4	127,1	Parma 3	7,0	keskellä
3,16	3.2	123,0	124,4	Parma 3	7,0	ylin
10	1.2	124,2	119,4	Parma 1	9,0	pohjalla
31,6	2.3	123,5	119,4	Parma 2	7,2	-
100	2.6	124,6	105,9	Parma 2	7,2	-

Taulukosta 5.23 voidaan huomata, että alle 3,16 bar paineilla painon muutokset ovat vähäisiä. 1 ja 3,16 bar kokeissa koekappaleiden paino on noussut. Painon nouseminen voi johtua riittämättömästä koekappaleiden kyllästämisestä, jolloin koekappaleisiin on mahdollista siirtyä kapillaarisesti kosteutta painelevyistä. Taulukosta 5.19 on esitetty Parman betonin suurimmaksi kosteuspitoisuudeksi 140,0 kg/m³, tehdyissä painelevykokeissa ei koekappaleet ole saavuttaneet vakuumoinnilla ja vedellä kyllästyksellä maksimikosteuspitoisuutta.

Taulukosta voidaan havaita myös käyrästä poikkeavan tulos 31,6 bar kokeesta. Tulos voi johtua keraamisen painelevyn, jota käytetään 10 bar kokeessa, muuttumisesta 31,6 ja 100 bar painelevykokeissa käytettävään selluloosakalvoon. Selluloosakalvo voi olla tiiviimpi verrattuna keraamiseen painelevyyn, jolloin selluloosakalvolla tehtävissä kokeissa tulisi olla pidempi tasaantumisaika. 31,6 bar kokeen poikkeava tulos voi johtua myös koekappalesarjan muuttumisesta Parma 1 sarjasta Parma 2 sarjaan.

Taulukosta 5.24 voidaan havaita myös Lujabetonilla poikkeava tulos 31,6 bar kokeesta.

Taulukko 5.24. Lujabetoni Oy:n betonin kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän tutkitut pisteet. Taulukossa on esitetty saavutettu koekappaleiden kesimääräinen kosteuspitoisuus ennen koetta, kokeen tulos, kokeessa ollut koesarja, koesarjan koekappaleiden keskikorkeus ja koelevyn asema painekattilassa. 31,6 bar ja 100 bar koekappaleet ovat yhdessä tasossa ja vain yksi koesarja testataan niissä kerrallaan. Taulukossa on esitetty harmaalla pohjalla poikkeava tulos kapillaariselta tasapainokosteuskäyrältä.

Lujabetoni						
Koe	Koesarja	Kyllästyspitoisuus ennen koetta	Tulos	Koesarja	Keskikorkeus	Koelevyn asema painekattilassa
bar		kg/m ³	kg/m ³		[mm]	
0,316	1.1	142,2	146,7	Lujabetoni 1	7,5	ei tiedossa
1	1.3	141,7	146,8	Lujabetoni 1	6,9	ylin
3,16	3.2	137,5	136,8	Lujabetoni 3	6,9	keskellä
10	1.2	139,9	129,8	Lujabetoni 1	7,5	ylin
31,6	2.4	154,1	141,0	Lujabetoni 2	7,4	-
100	2.8	152,8	117,2	Lujabetoni 2	7,4	-

Taulukon perusteella ollaan päästy koekappalesarjalla Lujabetoni 2 korkeampiin kosteuspitoisuuksiin ennen tehtyjä painelevykokeita verrattuna koekappalesarjoihin Lujabetoni 1 tai Lujabetoni 3. Tämä voi osaltaan selittää käyrästä poikkeavaa korkeampaa tulosta 31,6 bar painelevykokeesta Lujabetonilla. 31,6 bar ja 100 bar painelevykokeet on tehty koekappalesarjalla Lujabetoni 2. Korkein saavutettu kosteuspitoisuus on esitetty Lujabetonin betonille taulukossa 5.19 ja se on 164,4 kg/m³.

Taulukko 5.25. Rudus Oy:n betonin kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän tutkitut pisteet. Taulukossa on esitetty saavutettu koekappaleiden kesimääräinen kosteuspitoisuus ennen koetta, kokeen tulos, kokeessa ollut koesarja, koesarjan koekappaleiden keskikorkeus ja koelevyn asema painekattilassa. 31,6 bar ja 100 bar koekappaleet ovat yhdessä tasossa ja vain yksi koesarja testataan niissä kerrallaan. Taulukossa on esitetty harmaalla pohjalla poikkeava tulos kapillaariselta tasapainokosteuskäyrältä.

Rudus						
Koe	Koesarja	Kyllästyspitoisuus ennen koetta	Tulos	Koesarja	Korkeus	Koelevyn asema painekattilassa
bar		kg/m ³	kg/m ³		[mm]	
0,316	1.1	138,1	141,1	Rudus 1	8,0	ei tiedossa
1	1.3	140,5	139,7	Rudus 3	7,2	alin
3,16	3.2	133,5	130,5	Rudus 3	7,2	alin
10	1.2	138,7	134,4	Rudus 1	8,0	keskellä
31,6	2.5	138,4	118,1	Rudus 2	7,5	-

100	2.7	134,6	105,2	Rudus 2	7,5	-
-----	-----	-------	-------	---------	-----	---

Taulukosta 5.25 on havaittavissa poikkeava tulos Ruduksen kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän tuloksissa 10 bar kokeen osalta. Poikkeavuus voi johtua koesarjan muuttumisesta 3,16 bar kokeessa käytetystä koekappalesarjasta Rudus 3 10 bar kokeessa käytettyyn koekappalesarjaan Rudus 1. Osaltaan vaikuttaa koekappalesarjan Rudus 3 matala kosteuspitoisuus ennen 3,16 bar koetta. Kosteuspitoisuus ennen 3,16 bar koetta on matalampi, kuin ennen 10 bar koetta saavutettu kosteuspitoisuus.

Taulukosta 5.25 voidaan havaita myös painon nouseminen 0,316 bar kokeessa, joka voi johtua matalasta kosteuspitoisuudesta ennen koetta. Suurin saavutettu kosteuspitoisuus Ruduksen betonille on esitetty taulukossa 5.19 ja se on 158, kg/m³.

5.4 Märkäkuppikoe

Jokaisesta tutkittavasta materiaalista tehtiin kolme märkäkuppikoetta, joiden tulokset on esitetty taulukoissa 5.26 ja 5.27. Laskentakaavat ja tulokset on esitetty liitteessä 2.

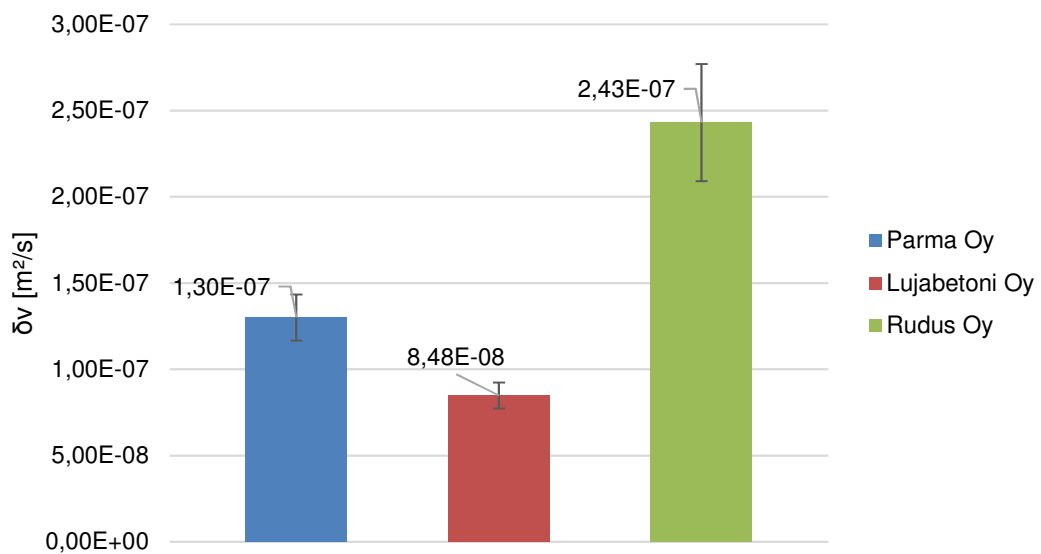
Taulukko 5.26. Tutkittujen betonien koekappaleiden korkeus, massavirta, korjattu massavirta, vesihöyrynläpäisykertoimet ja vesihöyrynvastus.

Materiaali	h [mm]	g [kg/(m ² s)]	g _k [kg/(m ² s)]	W _v [m/s]	W _p [kg/(m ² sPa)]	Z _v [s/m]
Parma	20	6,42E-08	5,91E-08	6,48E-06	4,74E-11	1,55E+05
Lujabetoni	20,1	4,19E-08	3,86E-08	4,23E-06	3,09E-11	2,37E+05
Rudus	20,4	1,18E-07	1,09E-07	1,19E-05	8,73E-11	8,42E+04
g _k = naamiointista johtuen korjattu massavirta. Korjauskertoimen standardin SFS-EN 12571 mukaan.						
Tulokset ovat kolmen koekappaleen keskiarvoja.						

Taulukko 5.27. Tutkittujen betonien vesihöyrynvastus vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmaistuna, vesihöyryn läpäisevyydet ja diffuusiovastuskertoimet.

Materiaali	Z _p [m ² sPa/kg]	δ _v [m ² /s]	δ _p [kg/(msPa)]	μ [-]	s _d [m]
Parma	2,12E+10	1,30E-07	9,48E-13	209,4	4,2
Lujabetoni	3,24E+10	8,48E-08	6,20E-13	320,5	6,43
Rudus	1,15E-12	2,43E-07	1,78E-12	112,2	2,28
Tulokset ovat kolmen koekappaleen keskiarvoja.					

Tutkittujen betonikoekappaleiden voidaan olettaa kokeen aikana tasaantuneen 50 % RH ja 94 % RH väliin, jotka olivat olosuhteet koekappaleiden eri puolilla. RIL 255-1 (2014) kirjassa on esitetty vastaavan vesi-sementti-suhteen ja lujuuden omaavalle betonille suhteellisessa kosteudessa 70 % RH vesihöyryn läpäisevyydeksi noin $2,00E-07$ m²/s, joka on tutkittujen Rudus Oy:n ja Parma Oy:n betonien vesihöyrynläpäisevyys arvojen välissä. Lujabetoni Oy:n betonin vesihöyrynläpäisevyys on puolestaan huomattavasti pienempi verrattuna muihin tutkittuihin betonilaatuihin tai RIL 255 kirjassa esitettyyn arvoon. Kuvassa 5.18 on esitetty saadut tulokset pylväskuvaajan avulla eri tutkittujen betonien vesihöyrynläpäisevyyden eroavaisuuksien suuruusluokan hahmottamisen helpottamiseksi.



Kuva 5.18. Tutkittujen betonien vesihöyryn läpäisevyydet kolmen koekappaleen keskiarvona. Virhepalkit esittävät 90 %:n luottamusväliä.

Kuvan perusteella Rudus Oy:n betoni on huomattavasti suurempi vesihöyrynläpäisevyydeltään verrattuna kahteen muuhun tutkittuun betoniin. Suuri vesihöyrynläpäisevyys voi selittyä suuremmalla huokoisuudella.

6. YHTEENVETO

Diplomityössä testattiin sisäkuoribetonin kosteusteknisiä ominaisuuksia. Saatuja tuloksia vertailtiin kirjallisuudessa esitettyihin betonin kosteusteknisiin ominaisuuksiin. Saatujen tuloksien mahdollisia virhelähteitä arvioitiin ja poikkeaville tuloksille esitettiin selitys.

Tutkittujen sisäkuoribetonien kosteuden siirto-ominaisuudet olivat pienemmät verrattuna kirjallisuudessa esitettyihin normaalilujuuksisen betonin arvoihin, pois lukien Ruduksen vesihöyrynläpäisevyys, joka oli kirjallisuudessa esitettyjen arvojen kanssa samalla tasolla. Tutkittujen betonien välillä oli havaittavissa hajontaa kosteudensiirto-ominaisuuksissa. Lujabetonin betonilla oli pienimmät kosteuden siirto-ominaisuudet ja Ruduksen betonilla suurimmat. Parman betoni oli lähellä Lujabetonia kosteudensiirto-ominaisuuksiltaan. Myös kaikkien betonilaatujen koekappalesarjojen sisällä oli hajontaa, joka selittyy betonin epähomogeenisella rakenteella.

Tasapainokosteuskäyrien standardien mukainen testaaminen aiheutti haasteita työn suorituksessa. Hygroskooppisessa tasapainokosteuskäyrässä kosteuden tasaantumisaikat olivat pitkiä. Koeajan lyhentämiseksi pyrittiin kehittämään menetelmä tasapainokosteuskäyrän määrittämiseksi murskatuilla koekappaleilla. Murskatuilla koekappaleilla tulokset eivät kuitenkaan vastanneet kokonaisten koekappaleiden tuloksia.

Ennen painelevykoetta tehtävässä standardin mukaisessa koekappaleiden vedellä kyllästämisessä ei päästy tämän tutkimuksen perusteella maksimikosteuspitoisuuteen. Tämä aiheutti kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän määrittämisessä virhettä varsinkin pienillä painelevykokeen paineilla. Painelevykoe vaatii lisätutkimusta myös koekappaleiden tasaantumisen varmistaminen osalta. Olisi tärkeää todeta koekappaleiden tasaantuminen kokeen aikana tai tutkia mikä on riittävä aika koekappaleiden tasaantumisen painelevylaitteessa. Tämä voisi onnistua esimerkiksi asettamalla kapasitanssineuloja koekappaleisiin, joiden avulla voitaisiin seurata kosteuden tasaantumista materiaalissa painelevykokeen aikana. Painelevykokeen suorittaminen kokonaisuudessaan vaatii edelleen lisätutkimuksia ja kehittämistä.

Tulosten perusteella on tärkeää tutkia eri rakenteissa käytettyjen betonien kosteusteknisiä ominaisuuksia. Eri betoneilla kosteudensiirto-ominaisuudet voivat poiketa toisistaan huomattavasti. Myös eri valmistajien betoneissa on huomattavia kosteusteknisiä eroavaisuuksia, joka tulee ottaa huomioon tehtäessä laskennallisia tarkasteluja. Betonin kosteusteknisten ominaisuuksien parempi ennustettavuus vaatisi tulevaisuudessa lisäaineiden, kuten huokostimien ja notkistimien, vaikutuksen lisätutkimusta.

LÄHTEET

Ahonen, J., 2016. Työnjotaja, Lakka-elementit Joensuu. Sähköpostihaastattelu betonielementtien jälkihoidosta elementtitehtaalla (15. huhtikuuta 2016).

Alduchov, O. & Eskridge, R., 1995. Improved Magnus Form Approximation of Saturation Vapor Pressure. Notes and Correspondance (1996) ss. 601-609

Baroghel-Bouny, V., 2007. Water vapour sorption experimants on hardened cementitious materials. Part 1: Essential tool for analysis of hygral behavior and its relation to pore structure, Pariisi: Cement and Concrete Resarch 37.

Baroghel-Boyny, V., Mainguy, M., Lassabatere, T. & Coussy, O., 1999. Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials, Pariisi: Cement and Concrete Research 29.

Björkholtz, D., 1987. *Lämpö ja kosteus, rakennusfysiikka*. Helsinki: Rakentajain Kustannus Oy.

Burström, P. G., 2001. *Byggnadsmaterial*. Lund: Studentlitteratur. 526 s.

Hagentoft, C.-E., 2003. Introduction to Building Physics. Lund, Ruotsi: Studentlitteratur AB, 422 s.

Hansen, K., 1989. Sorption Isotherms: A Catalog and a Data Base. *Water Vapor Transmission Through Building Materials and Systems: Mechanism and Measurement*, ss. 28-32.

Hansen, M. Houvernghele, G. Janz, M. Krus, M. Strømdahl. K. 1999. Interlaboratory Comparison of the Measurement of Retention Curves. *Journal of Building Physics* (1999), ss. 334-348.

Hens, H., 2007. Building physics - heat, air and moisture :fundamentals and engineering methods with examples and exercises. Berlin: Ernst & Sohn. 270 s.

Kelham, S., 1996. The Effect of Cement Composition and Fineness on Expansion Associated with Delayed Ettringite Formation. Elsevier, ss. 171-179.

Krus, M. & Kiesl, K., 1998. Determination of the moisture storage characteristics of porous capillary active materials. *Materials and Structures*, ss. 522-529.

Künzel, H., Holm, A. & Krus, M., 2008. *Hygrothermal Properties and Behaviour of Concrete*, Holzkirchen: Fraunhofer nstitute for Building Physics. 13 s.

Manelius, E., 2013. Rakennusmateriaalien vesihöyrynläpäisevyyskokeiden kehittäminen. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. 73 s.

Merikallio, T., 2006. Betonin kosteuden hallinta. Teoksessa: *Kestävä kivitalo*. Helsinki: Libris Oy, ss. 87-93.

Michaelides, E., 2014. Brownian movement and thermophoresis of nanoparticles in liquids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, ss. 179-180.

Nevander, L. E. & Elmarsson, B., 1994. *Fukt handbok*. Stocholm: AB Svensk Byggtjänst. 538 s.

NT BUILD 481. 1997. Building materials: Retention curve and pore size distribution. Nordtest, Espoo, 8 s.

SFS-EN 12390-3, 2009. Kovettuneen betonin testaus. Osa 3: Koekappaleiden puristuslujuus. Bryssel: European Committee for Standardization. 19 s.

SFS-EN ISO 12571, 2014. Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of hygroscopic sorption properties. Brussels, European Committee for Standardization, 31 s.

SFS EN ISO 13788, 2013. 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 s

SFS-EN ISO 15148, 2003. Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of water absorption coefficient by partial immersion. Bryssel: European Committee for Standardization, 38s.

SFS-EN ISO 15148/A1. 2016. Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of water absorption coefficient by partial immersion. Amendment 1 (ISO 15148:2002, modified). Suomen Standardisoimisliitto SFS ry

Suomen Betonitieto Oy, 2005. Betonitekniikan oppikirja 2004, by 201. Jyväskylä: Suomen Betoniyhdistys r.y. 570 s.

RIL 255-1-2014, Rakennusfysiikka 1, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 500 s.

Talonrakentaminen 2016. Saatavilla 27.11.2017:

<http://betoni.com/betonirakentaminen/elementtirakentaminen/talonrakentaminen/>

Tasapainokosteuden mittaaminen 2016. Toteutusohje. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennusfysiikan tutkimusryhmä.

Tuominen, E., 2014. Toimintatapaohje vapaan veden imeytyskokeen suorittamiseen automaattilaitteistolla. Tampere 2014, Tampereen teknillinen yliopisto / Rakennustekniikan laitos, Rakennusfysiikan tutkimusryhmä. 25s.

Tuominen, E., 2016. Laastien ja betonien kapillaarisuusominaisuuksien määrittäminen vapaan veden imeytyskokeella. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. 141 s.

Vainio, M., 2016. Kalsiumsilikaattilevyjen ja ontelolaattojen rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. 67 s.

Vainio, T., Lehtinen, E. & Nuuttila, H., 2005. Julkisivujen uudis- ja korjausrakentaminen, Tampere: VTT Rakennus- ja Yhdyskuntatekniikka.. ss. 14-25.

Vinha, J., 2011. RTEK-3511 Rakennusfysiikka. Luentomoniste, osa 1. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. 520 s.

Vinha, J., 2011. RTEK-3511 Rakennusfysiikka. Luentomoniste, osa 2. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. 246 s.

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 liitesivua.

Vesihöyryn läpäisevyyden mittaaminen 2015. Toteutusohje. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennusfysiikan tutkimusryhmä

LIITE 1

Painelevykokeiden tulokset taulukkomuodossa.

Liite 1. Taulukko1. 0,316 bar painelevykokeen tulokset. Taulukossa on esitettyä koekappaleiden kyllästäminen vedellä, kyllästyskosteus ennen koetta, kokeesta saadut tulokset ja kokeen aikana koehuoneessa ollut lämpötila.

Taulukko: Kosteuspitoisuus w, 0,316 bar			
kuivatus	vakumointi- aika	vedessä [d]	Painelevy [bar]
60 °C	6 h	6	1
Ei kaoliinisavea, 12 kpl jokaista materiaalia			
[kg/m³]	Parma 1	Lujabeton i 1	Rudus 1
Ennen koetta	127,5	142,2	138,1
max.	136,1	163,5	148,8
min.	104,5	119,8	126,1
keskihajonta	7,9	12,5	7,6
90 % luottamusväli	4,1	6,5	3,9
Kokeen jälkeen	127,5	146,7	141,1
max.	136,6	168,1	152,3
min.	106,4	125,6	129,8
keskihajonta	7,6	12,2	8,2
90 % luottamusväli	3,9	6,3	4,3
Lämpötila kokeen aikana:			
T	T_{max}	T_{min}	Keskihajonta
°C	°C	°C	°C
23,64	24,90	22,45	0,45

Liite 1. Taulukko 2. 1,0 bar painelevykokeen tulokset. Taulukossa on esitettynä koekappaleiden kyllästäminen vedellä, kyllästyskosteus ennen koetta, kokeesta saadut tulokset ja kokeen aikana koehuoneessa ollut lämpötila.

Taulukko: Kosteuspitoisuus w, 1 bar			
kuivatus	vakumointi aika	vedessä [d]	Painelevy [bar]
60 °C	6 h	2	1
Ei kaoliinisavea, 12 kpl jokaista materiaalia			
[kg/m ³]	Parma 3	Lujabetoni 3	Rudus 3
Ennen koetta	122,4	137,3	132,3
Max	131,4	151,8	144,0
Min	113,2	111,8	116,6
keskihajonta	5,6	12,6	8,6
90 %:n luottamusväli	2,9	6,5	4,4
Kokeen jälkeen	127,1	146,8	139,7
Max	135,9	161,7	152,4
Min	117,3	119,1	124,2
keskihajonta	5,3	13,1	9,3
90 %:n luottamusväli	2,7	6,8	4,8
Lämpötila kokeen aikana:			
T	Tmax	Tmin	Keskihajonta
°C	°C	°C	°C
23,3	24,2	22,7	0,21

Liite 1. Taulukko 3. 3,16 bar painelevykokeen tulokset. Taulukossa on esitettynä koekappaleiden kyllästäminen vedellä, kyllästyskosteus ennen koetta, kokeesta saadut tulokset ja kokeen aikana koehuoneessa ollut lämpötila.

Taulukko: Kosteuspitoisuus w, 3,16 bar			
kuivatus	vakumointi- aika	vedessä [d]	Painelevy [bar]
60 °C	1 d	2	5
Ei kaoliinisavea, 12 kpl jokaista materiaalia			
[kg/m³]	Parma 3	Lujabeto ni 3	Rudus 3
Ennen koetta	123,1	137,7	133,6
max.	131,2	154,0	144,0
min.	113,8	112,5	118,2
keskihajonta	5,0	12,6	8,6
90 %:n luottamusväli	2,6	6,5	4,5
Kokeen jälkeen	124,4	136,8	130,5
max.	136,8	151,6	143,0
min.	116,7	109,0	113,9
keskihajonta	5,2	12,7	9,4
90 %:n luottamusväli	2,7	6,6	4,9
Lämpötila kokeen aikana:			
T	Tmax	Tmin	Keskihajont a
°C	°C	°C	°C
23,5	24,5	23,2	0,17

Liite 1. Taulukko 4. 10 bar painelevykokeen tulokset. Taulukossa on esitettynä koekappaleiden kyllästämisen vedellä, kyllästyskosteus ennen koetta, kokeesta saadut tulokset ja kokeen aikana koehuoneessa ollut lämpötila.

Taulukko: Kosteuspitoisuus w, 10 bar			
kuivatus	vakumointi aika	vedessä [d]	Painelevy [bar]
60 °C	1 d	2	5
Ei kaoliinisavea, 12 kpl jokaista materiaalia			
[kg/m³]	Parma 1	Lujabetoni 1	Rudus 1
Ennen koetta	124,2	139,9	138,7
max.	132,7	162,1	149,3
min.	103,3	119,7	126,4
keskihajonta	7,4	11,9	7,3
90 %:n luottamusväli	3,8	6,2	3,8
Kokeen jälkeen	119,4	129,8	134,4
max.	128,7	148,3	144,1
min.	97,6	112,6	123,2
keskihajonta	7,9	10,6	8,0
90 %:n luottamusväli	4,1	5,5	4,2
Lämpötila kokeen aikana:			
T	Tmax	Tmin	Keskihajonta
°C	°C	°C	°C
23,5	24,4	22,7	0,32

Liite 1. Taulukko 5. 31,6 bar painelevykokeen tulokset. Taulukossa on esitettynä koekappaleiden kyllästäminen vedellä, kyllästyskosteus ennen koetta, kokeesta saadut tulokset ja kokeen aikana koehuoneessa ollut lämpötila.

Taulukko: Kosteuspitoisuus w, 31,6 bar			
kuivatus	Painelevy	Kokeen	
°C	[bar]	kesto	
60	100	14 vrk	
Ei kaoliinisavea, 12 kpl jokaista materiaalia			
[kg/m³]	Parma 2	Lujabeto ni 2	Rudus 2
vakumointi	6 h	6,5 h	6,5 h
vedessä	2 vrk	10 vrk	10 vrk
Ennen koetta	123,5	154,1	138,4
max.	133,7	175,5	160,0
min.	110,8	125,8	115,2
keskihajonta	6,5	12,2	13,4
90 %:n luottamusväli	3,4	6,3	6,9
Kokeen jälkeen	119,4	141,0	118,1
max.	129,4	161,2	130,9
min.	109,9	114,7	101,7
keskihajonta	6,0	12,1	9,6
90 %:n luottamusväli	3,1	6,3	5,0
Lämpötila [°C] kokeen aikana:			
T _{keskiarvo}	23,3	23,5	23,5
T _{max}	24,2	24,4	24,5
T _{min}	22,7	22,9	23,2
Keskihajonta	0,21	0,19	0,18

Liite 1. Taulukko 6. 100 bar painelevykokeen tulokset. Taulukossa on esitettyä koekappaleiden kyllästäminen vedellä, kyllästyskosteus ennen koetta, kokeesta saadut tulokset ja kokeen aikana koehuoneessa ollut lämpötila.

Taulukko: Kosteuspitoisuus w, 100 bar			
kuivatus	Painelevy	Kokeen	
°C	[bar]	kesto	
60	100	14 vrk	
Ei kaoliinisavea, 12 kpl jokaista materiaalia			
[kg/m³]	Parma 2	Lujabeto ni 2	Rudus 2
vakumointi	1 vrk	1 vrk	1 vrk
vedessä	7 vrk	5 vrk	4 vrk
Ennen koetta	124,6	152,8	134,8
max.	135,4	173,3	154,5
min.	112,8	125,4	113,6
keskihajonta	6,2	11,9	12,5
90 %:n luottamusväli	3,2	6,2	6,5
Kokeen jälkeen	105,9	117,2	105,2
max.	114,7	133,5	115,4
min.	98,1	99,0	91,5
keskihajonta	5,1	9,1	8,1
90 %:n luottamusväli	2,6	4,7	4,2
Lämpötila [°C] kokeen aikana:			
T _{keskiarvo}	23,2	23,4	22,8
T _{max}	24,8	24,4	23,6
T _{min}	22,7	22,7	22,4
Keskihajonta	0,28	0,32	0,26

LIITE 2

Liite 2. Taulukko 1. Parman betonin vesihöyrynläpäisevyydetulokset koekappaleittain.

	Yksikkö	Kaava	Kappale			ka
			P1.1	P1.2	P1.3	
Paksuus	mm		20,3	19,6	20,2	20,0
Koekappaleen halkaisija			184,2	184,2	184,1	184,2
Avoimen alueen halkaisija			167,8	167,2	167,0	167,3
Avoin pinta-ala	m ²	$A = \pi r^2$	0,0221	0,0220	0,0219	0,022
Reunan leveys	mm		8,2	8,5	8,6	8,4
Ilmatila	mm		15	15	15	15
Kosteushuone RH (tasoittunut aika)	%		49,91507	49,91507	49,91507	49,91507
Kosteushuone T (tasoittunut aika)	°C		23,20077	23,20077	23,20077	23,2
Suola RH	%		94	94	94	94
Ilman kylästyspitoisuus	kg/m ³		0,0208	0,0208	0,0208	0,0208
Massavirta g	kg/m ² s		6,21E-08	7,00E-08	6,06E-08	6,42E-08
Korjattu massavirta g _k (naamioitu reuna)	kg/m ² s		5,71E-08	6,45E-08	5,57E-08	5,91E-08
Ilman vesihöyrynläpäisevyys	kg/msPa		1,98E-10	1,98E-10	1,98E-10	1,98E-10
Δp ilmatilassa	Pa	$\Delta p = \frac{g \Delta x}{\delta_p}$	4,32E+00	4,88E+00	4,21E+00	4,47E+00
Vesihöyrypitoisuusero ilmatilassa	kg/m ³	$\Delta v = \frac{M_w}{R(273.15 + \theta)} p_v$	3,16E-05	3,57E-05	3,08E-05	3,27E-05
ΔRH ilmatilassa	%	$\varphi = \frac{v}{v_{sat}}$	0,15	0,17	0,15	0,16
ΔRH koekappaleessa	%		43,93	43,91	43,94	43,93
Vesihöyrypitoisuusero näytteen yli	kg/m ³		9,12E-03	9,12E-03	9,12E-03	9,12E-03
Vesihöyrynläpäisykerroin W _v	m/s	$W_v = \frac{g}{\Delta v}$	6,26E-06	7,08E-06	6,11E-06	6,48E-06
Vesihöyrynläpäisykerroin W _p	kg/m ² sPa	$W_p = \frac{W_v}{\frac{R}{M_w}(273.15 + \theta)}$	4,58E-11	5,18E-11	4,47E-11	4,74E-11
Vesihöyrynvastus Z _v	s/m	$Z_v = \frac{1}{W_v}$	1,60E+05	1,41E+05	1,64E+05	1,55E+05
Vesihöyrynvastus Z _p	m ² sPa/kg	$Z_p = \frac{1}{W_p}$	2,18E+10	1,93E+10	2,24E+10	2,12E+10
Vesihöyrynläpäisevyys δ _v	m ² /s	$\delta_v = W_v d$	1,27E-07	1,39E-07	1,23E-07	1,30E-07
Vesihöyrynläpäisevyys δ _p	kg/msPa	$\delta_p = \frac{\delta_v}{\frac{R}{M_w}(273.15 + \theta)}$	9,31E-13	1,01E-12	9,03E-13	9,49E-13
Vesihöyrynläpäisevyys μ	-	$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	213,0	195,6	219,7	209,4
Diffuusiovastuskerroin S _d	m	$S_d = \mu d$	4,33	3,83	4,44	4,20

Liite 2. Taulukko 2. Lujabetonin vesihöyrynläpäisevyydetulokset koekappaleittain.

	Yksikkö	Kaava	Kappale			ka
			L1.1	L1.2	L1.3	
Paksuus	mm		20,1	20,0	20,1	20,1
Koekappaleen halkaisija			184,2	184,3	184,3	184,3
Avoimen alueen halkaisija			167,8	168,1	168,7	168,2
Avoim pinta-ala	m ²	$A = \pi r^2$	0,0221	0,0222	0,0223	0,022
Reunan leveys	mm		8,2	8,1	7,8	8,0
Ilmatila	mm		15	15	15	15
Kosteushuone RH (tasoittunut aika)	%		49,91214	49,91214	49,91214	49,91214
Kosteushuone T (tasoittunut aika)	°C		23,20769	23,20769	23,20769	23,2
Suola RH	%		94	94	94	94
Ilman kyllästyspitoisuus	kg/m ³		0,0208	0,0208	0,0208	0,0208
Massavirta g	kg/m ² s		4,43E-08	4,05E-08	4,08E-08	4,19E-08
Korjattu massavirta g _k (naamioitu reuna)	kg/m ² s		4,08E-08	3,73E-08	3,76E-08	3,86E-08
Ilman vesihöyrynläpäisevyys	kg/msPa		1,98E-10	1,98E-10	1,98E-10	1,98E-10
Δp ilmatilassa	Pa	$\Delta p = \frac{g\Delta x}{\delta_p}$	3,09E+00	2,82E+00	2,85E+00	2,92E+00
Vesihöyrypitoisuusero ilmatilassa	kg/m ³	$\Delta v = \frac{M_w}{R(273.15 + \theta)} p_v$	2,26E-05	2,06E-05	2,08E-05	2,13E-05
ΔRH ilmatilassa	%	$\varphi = \frac{v}{v_{sat}}$	0,11	0,10	0,10	0,10
ΔRH koekappaleessa	%		43,98	43,99	43,99	43,99
Vesihöyrypitoisuusero näytteen yli	kg/m ³		9,13E-03	9,13E-03	9,13E-03	9,13E-03
Vesihöyrynläpäisykerroin W _v	m/s	$W_v = \frac{g}{\Delta v}$	4,47E-06	4,09E-06	4,12E-06	4,23E-06
Vesihöyrynläpäisykerroin W _p	kg/m ² sPa	$W_p = \frac{W_v}{\frac{R}{M_w}(273.15 + \theta)}$	3,27E-11	2,99E-11	3,01E-11	3,09E-11
Vesihöyrynvastus Z _v	s/m	$Z_v = \frac{1}{W_v}$	2,24E+05	2,45E+05	2,43E+05	2,37E+05
Vesihöyrynvastus Z _p	m ² sPa/kg	$Z_p = \frac{1}{W_p}$	3,06E+10	3,35E+10	3,32E+10	3,24E+10
Vesihöyrynläpäisevyys δ _v	m ² /s	$\delta_v = W_v d$	8,99E-08	8,17E-08	8,28E-08	8,48E-08
Vesihöyrynläpäisevyys δ _p	kg/msPa	$\delta_p = \frac{\delta_v}{\frac{R}{M_w}(273.15 + \theta)}$	6,57E-13	5,97E-13	6,06E-13	6,20E-13
Vesihöyrynläpäisevyys μ	-	$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	301,9	332,1	327,6	320,5
Diffuusiovastuskerroin S _d	m	$s_d = \mu d$	6,07	6,64	6,58	6,43

Liite 2. Taulukko 3. Ruduksen betonin vesihöyrynläpäisevyytustulokset koekappaleittain.

	Yksikkö	Kaava	R1.1	R1.2	R1.3	ka
Paksuus	mm		20,1	20,4	20,6	20,4
Koekappaleen halkaisija			187,4	187,9	187,5	187,6
Avoimen alueen halkaisija			168,2	168,0	167,9	168,0
Avoim pinta-ala	m ²	$A = \pi r^2$	0,0222	0,0222	0,0221	0,022
Reunan leveys	mm		9,6	9,9	9,8	9,8
Ilmatila	mm		15	15	15	15
Kosteushuone RH (tasoittunut aika)	%		49,91507	49,91507	49,91507	49,91507
Kosteushuone T (tasoittunut aika)	°C		23,20077	23,20077	23,20077	23,2
Suola RH	%		94	94	94	94
Ilman kyllästyspitoisuus	kg/m ³		0,0208	0,0208	0,0208	0,0208
Massavirta g	kg/m ² s		1,30E-07	1,08E-07	1,17E-07	1,18E-07
Korjattu massavirta g _k (naamioitu reuna)	kg/m ² s		1,19E-07	9,94E-08	1,07E-07	1,09E-07
Ilman vesihöyrynläpäisevyys	kg/msPa		1,98E-10	1,98E-10	1,98E-10	1,98E-10
Δp ilmatilassa	Pa	$\Delta p = \frac{g \Delta x}{\delta_p}$	9,01E+00	7,52E+00	8,09E+00	8,21E+00
Vesihöyrypitoisuusero ilmatilassa	kg/m ³	$\Delta v = \frac{M_w}{R(273.15 + \theta)} p_v$	6,59E-05	5,50E-05	5,92E-05	6,00E-05
ΔRH ilmatilassa	%	$\phi = \frac{v}{v_{sat}}$	0,32	0,26	0,29	0,29
ΔRH koekappaleessa	%		43,77	43,82	43,80	43,80
Vesihöyrypitoisuusero näytteen yli	kg/m ³		9,09E-03	9,10E-03	9,09E-03	9,09E-03
Vesihöyrynläpäisykerroin W _v	m/s	$W_v = \frac{g}{\Delta v}$	1,31E-05	1,09E-05	1,18E-05	1,19E-05
Vesihöyrynläpäisykerroin W _p	kg/m ² sPa	$W_p = \frac{W_v}{\frac{R}{M_w}(273.15 + \theta)}$	9,59E-11	8E-11	8,61E-11	8,73E-11
Vesihöyrynvastus Z _v	s/m	$Z_v = \frac{1}{W_v}$	7,62E+04	9,15E+04	8,49E+04	8,42E+04
Vesihöyrynvastus Z _p	m ² sPa/kg	$Z_p = \frac{1}{W_p}$	1,04E+10	1,25E+10	1,16E+10	1,15E+10
Vesihöyrynläpäisevyys δ _v	m ² /s	$\delta_v = W_v d$	2,63E-07	2,23E-07	2,42E-07	2,43E-07
Vesihöyrynläpäisevyys δ _p	kg/msPa	$\delta_p = \frac{\delta_v}{\frac{R}{M_w}(273.15 + \theta)}$	1,93E-12	1,63E-12	1,77E-12	1,78E-12
Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin μ	-	$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	102,9	121,5	112,1	112,2
Diffuusiovastuskerroin S _d	m	$S_d = \mu d$	2,07	2,48	2,30	2,28