



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

EERO TUOMINEN
LAASTIEN JA BETONIEN KAPILLAARISUUSOMINAISUUKSIEN
MÄÄRITYS VAPAAN VEDEN IMEYTYSKOKEELLA
Diplomityö

Tarkastaja: professori Juha Vinha
Tarkastaja ja aihe hyväksytty Talou-
den ja rakentamisen tiedekunnan
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
9.3.2016

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Tuominen, Eero: Laastien ja betonien kapillaarisuusominaisuuksien määrittäminen vapaan veden imeytyskokeella

Diplomityö, 141 sivua ja 88 liitesivua

Maaliskuu 2016

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Juha Vinha

Avainsanat: kapillariteettikerroin, veden imeytymiskerroin, veden tunkeutumiskerroin, kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus, kosteusdiffusiviteetti, absorptio, kapillaarisuus, vapaan veden imeytyskoe, laasti, betoni

Standardin EN ISO 15148 mukainen vapaan veden imeytyskoe on yksinkertainen ja hyväksi todettu menetelmä huokoisten rakennusmateriaalien vedenimuominaisuuksien tutkimiseen. Kokeen tuloksena saadaan veden imeytymiskerroin, jonka avulla voidaan arvioida kapillaarisen kosteusdiffusiviteetin arvoa. Veden imeytymiskertoimen avulla saadaan laskettua vain keskimääräinen kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti, mutta korrelaatiokaavojen avulla saadaan myös arvio kosteusdiffusiviteetistä kosteuspitoisuuden funktiona. Kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti on tärkeä suure mallinnettaessa rakenteiden kosteusteknistä toimintaa yli 95 % RH suhteellisessa kosteudessa.

Tässä diplomityössä on rakennettu automaattinen vapaan veden imeytyslaitteisto. Automaattisen mittaustulokseton punnitustuloksiin vaikuttaa koekappaleeseen vesikosketuksesta kohdistuva noste. Laitteiston käyttöönoton yhteydessä kehitettiin kalibrointimittauksiin perustuva laskentamenetelmä, jolla koekappaleeseen kohdistuvan nosteen aiheuttama virhe voidaan poistaa mittaustuloksista.

Valmiilla laitteistolla on määritetty kapillaarisia materiaaliominaisuuksia laasti- ja betonikoekappaleille sekä tehty virhelähdekokeita. Laasti- ja betonikoekappaleille on koetuloksista laskemalla määritetty veden imeytymiskerroin ja -tunkeutumiskerroin sekä kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus. Virhelähdekokeissa tutkittiin koekappaleen pinta-alan, imupinnan muodon sekä kylki- ja yläpintojen suojausten vaikutusta kokeen tuloksena saatavaan veden imeytymiskertoimen arvoon. V

Tehtyjen kokeiden sekä kirjallisuuskatsauksen perusteella on tehty toimintatapaohje, jonka avulla veden imeytymiskerroin ja kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus saadaan mitatuksi mahdollisimman luotettavasti. Tässä työssä on esitelty kirjallisuuskatsauksessa esille tulleet virhelähteet sekä virhelähdekokeiden tulokset. Lisäksi on esitelty laasti- ja betonikoekappaleiden veden imeytyskokeiden laskennan tulokset ja verrattu näitä kirjallisuudesta löytyviin arvoihin. Virhelähdekokeiden tuloksille on tehty laajat analyysit eri mittaukseen liittyvien muuttujien arvioinnista.

Laasteille määritetyt veden imeytymiskertoimet vaihtelivat välillä n. 0,005-0,04 $\text{kg/m}^2\text{s}^{0.5}$ ja kapillaariset kyllästyskosteuspitoisuudet välillä n. 100-300 kg/m^3 . Betonin mitatut ja kirjallisuusarvot edustavat vaihteluvälin keskiarvoa. Tuloksille laskettiin myös 90 % luottamusvälit, jotka olivat luokkaa 5-20 % tuloksesta. Useimmat virhelähteet osoittautuivat vaikeiksi eliminoida ja tulosten vertailukelpoisuuden kannalta on tärkeää suorittaa kokeet toistettavilla menetelmillä. Tutkituista virhelähdevariaatioista vain koekappaleen muoto osoittautui merkittävästi tuloksiin vaikuttavaksi tekijäksi.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Construction Technology

Tuominen, Eero: Determination of capillary properties on plasters and concretes by free water uptake test

Master of Science Thesis, 141 pages, 88 Appendix pages

March 2016

Major: Construction engineering

Examiner: Professor Juha Vinha

Keywords: water absorption coefficient, water penetration coefficient, water content on capillary saturation, liquid water diffusivity, absorption, capillarity, free water uptake test

A free water uptake test performed by a standard method (SFS-EN ISO 15148 2002) is simple and reproducible experiment which is proved to be good when determining the capillary properties of porous building materials. As a result from the experiment, we get a capillary absorption coefficient which can be used when estimating liquid water diffusivity. The average value of liquid water diffusivity can be calculated straight from the capillary absorption coefficient. There are also correlation functions which take into account the functional shape of the dependency between the diffusivity and water content of the material. The liquid water diffusivity is an important material characteristic while modeling structures where relative humidity is above 95 % RH.

An automatic free water uptake test equipment was built in the course of this thesis. While the specimen is weighed during water contact, the buoyancy effects cause an error to weighing results. A calculation model based on calibration experiments is developed to count out the error. The evolution of the method is presented.

Ruggedness tests are performed by the new equipment. The area of the specimen, the shape of the immersed surface and the protection of the upper surface and sides of the specimen were selected to be variations in the tests. The effects of varied quantities in the ruggedness tests were evaluated from changes in the calculated water absorption coefficient. Here is presented measured and calculated results along with the analysis of the experiments. In addition to test results, also a literature review of ruggedness tests is presented in the thesis.

With some preconditions one, can calculate also water penetration coefficient and water content on capillary saturation from measured weighing results. As capillary saturation is an important quantity, the analysis of the ruggedness test was done also with this material characteristics.

Most of the sources of errors are difficult to eliminate. In consequence we need accurate instructions to get reproducible results. Only the shape of the specimen turned out to have significant impact on the test results. The area of the specimen came up as having an impact on the capillary saturation. Surface protections did not show up as a remarkable quantity, but the effect can be seen from weighing results by thorough analysis.

SISÄLLYS

1	Johdanto.....	12
1.1	Tutkimuksen sisältö.....	12
1.2	Tutkimuksen suoritus.....	13
2	Materiaalien kosteustekninen käyttäytyminen.....	14
2.1	Kosteus ilmassa.....	14
2.2	Kosteus huokoisessa materiaalissa.....	15
2.2.1	Kosteuden sitoutuminen hygroskooppisella alueella.....	15
2.2.2	Kosteuden sitoutuminen kapillaarisella alueella.....	17
2.2.3	Tasapainokosteuden hystereesi.....	18
2.3	Kosteuden siirto huokoisissa materiaaleissa.....	19
2.3.1	Diffuusio.....	20
2.3.2	Pintadiffuusio.....	21
2.3.3	Kapillaarivirta.....	21
2.3.4	Hydraulivirta.....	22
2.3.5	Laajennettu Fickin laki.....	22
2.4	Huokoisen materiaalin kapillaarisuusominaisuudet.....	23
2.4.1	Huokosalipaine.....	23
2.4.2	Kapillaarinen nousukorkeus.....	25
2.4.3	Kyllästymättömän kosteusvirran teoria, Richardin yhtälö.....	26
2.4.4	Veden imeytymiskerroin.....	28
2.4.5	Veden tunkeutumiskerroin.....	29
2.4.6	Kapillaarisen kosteusdiffusiviteetin määrittäminen veden imeytymiskertoimen avulla.....	30
2.4.7	Kyllästymättömän kosteusvirran teorian tunnetut epävarmuudet.....	31
3	Veden imeytymiskertoimen määrittäminen.....	33
3.1	Standardit.....	34
3.1.1	SFS-EN ISO 15148 (2002).....	34
	Kokeen suorittaminen.....	35
	Tulosten laskenta.....	36
3.1.2	ASTM C1585-13 (2013).....	37
	Kokeen suorittaminen ja tulosten laskenta.....	38
3.1.3	NT Build 368 (1991).....	38
	Kokeen suorittaminen ja tulosten laskenta.....	39
3.1.4	Muut standardit ja standardivertailu.....	39
3.2	Tieteelliset artikkelit.....	41
3.2.1	Materiaalit ja koekappaleet.....	41
3.2.2	Tasapainotus- ja jälkihoito-olosuhteet.....	43
3.2.3	Koekappaleiden leikkaus ja suojaus.....	43

3.2.4	Mittausolosuhteet, upotussyvyys ja kannatinmekanismit.....	44
3.2.5	Mittaustekniikka, käsin punnitus.....	45
3.2.6	Mittaustekniikka, automaattipunnitus.....	46
3.2.7	Tulosten laskenta.....	47
3.2.8	Soviteyhtälöt.....	48
3.3	Virhelähteet.....	49
3.3.1	Tunnettuja virhelähteitä.....	50
	Poikkeamat teoriasta.....	50
	Imupinnan kosteuspitoisuus ja gravitaatio.....	50
	Koekappaleen kosteuspitoisuus.....	51
	Materiaali ja koejärjestelyt.....	51
3.3.2	Virhelähdekokeita.....	52
	Koejärjestelyt.....	53
	Koekappaleen pinta-ala ja korkeus.....	54
	Alkukosteuspitoisuus ja imupinnan kosteuspitoisuuden virheet	54
	Koekappaleen esikäsitteilyt.....	55
	Mittautapa ja laskenta.....	55
	Veden ominaisuudet.....	56
3.3.3	Virhelähteiden yhteenveto.....	57
4	Laboratoriokokeet.....	58
4.1	Tutkimuslaitteisto.....	58
4.1.1	Kannatintelineet.....	60
4.1.2	Veden korkeuden stabilointi.....	61
	Kehitysversio 1.....	61
	Kehitysversio 2.....	62
	Kehitysversio 3.....	63
	Mittausjärjestelyn jatkokehitys.....	64
4.2	Tutkittavat materiaalit.....	64
4.2.1	Ensimmäinen koesarja.....	64
4.2.2	Virhelähde- ja täydentävät kokeet.....	65
4.3	Koekappaleiden valmistaminen.....	66
4.3.1	Valu ja jälkihoito.....	67
4.3.2	Tasapainotus ja valmistelevat käsittelyt.....	69
	Hiomalaitteen kehittäminen.....	70
	Kylkien suojaaminen.....	70
	Yläpinnan suojaaminen.....	71
4.4	Automaattilaitteistolla mittaaminen.....	71
4.4.1	Mittauskaapin olosuhteiden tasaannuttaminen.....	72
4.4.2	Laitteiston kalibrointi.....	72

4.4.3	Haihtumisen määrittäminen.....	73
4.4.4	Veden imeytyksen aloitus.....	74
4.4.5	Lämpötila- ja kosteusolosuhteiden mittaukset.....	74
4.4.6	Veden imeytyksen päättäminen.....	75
4.4.7	Laitteiston pesu.....	75
4.5	Virhelähdekokeet.....	76
4.5.1	Tavanomainen saumalaasti.....	77
4.5.2	Modifioitu saumalaasti.....	79
5	Tulokset.....	81
5.1	Veden korkeuden stabiiliusmittaukset.....	81
5.1.1	Ylivirtausjärjestelmän stabiiliusmittaukset.....	82
5.1.2	Haihtumisnopeuden määrittäminen.....	84
5.1.3	Haihtumiskorjauskäyrä.....	87
5.2	Tulosten käsittely ja laskenta.....	90
5.2.1	Nostemuutosten eliminointi.....	91
	Tasovaihtelun laskenta.....	93
	Todellisen painon muutoksen laskenta.....	94
5.2.2	Teorian mukainen veden imeytymiskerroin.....	96
5.2.3	Veden imeytymiskertoimen määrittäminen epälineaarista mittausdatasta.....	99
5.2.4	Veden imeytymiskertoimen soveltaminen teoriaa noudattamattomalle mittausdatalle.....	100
5.2.5	Veden tunkeutumiskerroin.....	101
5.2.6	Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus.....	103
5.2.7	Virheen ja luotettavuuden laskenta.....	104
5.3	Mittaustulokset.....	106
5.3.1	Ensimmäinen koesarja.....	106
5.3.2	Tavanomaisen saumalaastin virhelähdekokeet.....	108
5.3.3	Modifioidun saumalaastin virhelähdekokeet.....	110
5.3.4	Muut tutkitut materiaalit.....	112
5.4	Tulosten analysointi.....	113
5.4.1	Tavanomaisen saumalaastin virhelähdekokeet.....	113
	Veden imeytymiskerroin.....	114
	Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus.....	116
5.4.2	Modifioidun saumalaastin virhelähdekokeet.....	119
	Ajan suhteen muuttuva veden imeytymiskerroin.....	119
5.4.3	Muut tutkitut materiaalit.....	122
	Polymeerimodifioitu julkisivurappauslaasti.....	122
	Betoni.....	123
	Kevytsoraharkko ja kevytbetoni.....	123

5.4.4	Analyysin johtopäätökset.....	124
	Pinta-alan ja muodon sekä suojaustavan vaikutus vedenimukokeen tuloksiin.....	124
	Kosteus- ja lämpötilaolosuhteiden vaikutukset vedenimukokeen tuloksiin.....	126
	Koekappaleen korkeuden, upotussyvyyden ja imupinnan ilmakuplien määrän vaikutukset vedenimukokeen tuloksiin...	127
	Jälkihoidon vaikutukset vedenimukokeen tuloksiin.....	128
	Muita havaintoja vedenimukokeista.....	129
5.5	Vertailu aiempiin tutkimuksiin.....	130
5.5.1	Veden imeytymiskertoimen ja kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden vertailut.....	130
5.5.2	Virhelähdekokeiden tulosten vertailu.....	132
6	Yhteenveto.....	135
6.1	Mittaustekniikka.....	135
6.2	Virhelähdekokeet.....	136
	Lähteet.....	137

MERKINNÄT

δ_p	vesihöyrynläpäisevyys	kg/msPa
δ_v	vesihöyrynläpäisevyys	m ² /s
η	dynaaminen viskositeetti	Ns/m ₂
θ	lämpötila	°C
κ_w	kosteudenjohtavuus	kg/msPa
λ	boltzmannin muuttuja	m/s ^{0,5}
v	ilman vesihöyrypitoisuus	kg/m ³
v_{sat}	vesihöyrypitoisuuden maksimiarvo	kg/m ³
ρ	tiheys	kg/m ³
ρ_{dry}	kuivatiheys	kg/m ³
σ	pintajännitys	N/m
φ	ilman suhteellinen kosteus	-
ϕ	nesteen ja materiaalipinnan välinen reunakulma	° tai rad
ΔA_w	vedenimukertoimen otoskeskihajonta	kg/m ² s ^{0,5}
$\Delta A_{w,i}$	yksittäisen mittauksen vedenimukertoimen virhe	kg/m ² s ^{0,5}
$\Delta A_{w,min}$	mittasarjan vedenimukertoimen keskiarvon keskivirheen materiaalista riippumaton alaraja	kg/m ² s ^{0,5}
$\Delta A_{w,t,0,90}$	vedenimukertoimen 90% luottamustason virheraja	kg/m ² s ^{0,5}
p	paineen hradientti	Pa/m
p_v	vesihöyryn osapaineen gradientti	Pa/m
w	kosteuspitoisuuden gradientti	kg/m ⁴
v	ilman vesihöyrypitoisuuden gradientti	kg/m ⁴
a, b, n	vakiokertoimia diffusiviteetin korrelaatioyhtälöissä	
a_{ln}	haihtumisesta määritetyn logaritmisen regression kulmakerroin	
a_{RH}	haihtumista kuvaava suhteellisesta kosteudesta riippuva lineaarisen regression kulmakerroin	
b_{ln}	haihtumisesta määritetyn logaritmisen regression vakiotermi	
b_{ln}	haihtumista kuvaava suhteellisesta kosteudesta riippuva lineaarisen regression vakiotermi	
d	koekappaleen halkaisija	m
g	putoamiskiihtyvyyys	9,81 m/s ²
g	kosteusvirran tiheys	kg/m ² s
g_{cap}	kapillaarinen kosteusvirta	kg/m ² s
g_i	nestemäinen kosteusvirta	kg/m ² s
g_v	diffuusiolla siirtyvä kosteusvirta	kg/m ² s
h_{cap}	kapillaarinen nousukorkeus	m
$h_1(t)$	koekappaleen upotussyvyys ajan t funktiona koetilanteessa i	mm

i	pinta-alaan suhteutettu painomuutos	kg/m^2
k	permeabiliteetti	m^2
m	massa / punnitustulos	kg
m_0	kappaleen alkupaino	kg
$m_h(t)$	ajanhetkellä t tehty haihtumiskokeen punnitustulos	kg
n	lukumäärä	kpl
p_v	vesihöyryn osapaine	Pa
$p_{v,\text{sat}}$	vesihöyryn osapaineen maksimiarvo	Pa
r	huokossäde	m
s	huokosalipaine	Pa
t	aika	s
u	materiaalin kosteuspitoisuus	kg/kg tai $\%$
w	materiaalin kosteuspitoisuus	kg/m^3
w_0	alkukosteuspitoisuus	kg/m^3
w_B	imupinnan kosteuspitoisuus	kg/m^3
w_{cap}	kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus	kg/m^3
w_{crit}	kriittinen kosteuspitoisuus	kg/m^3
w_{hygr}	hygrooskooppinen kyllästyskosteuspitoisuus	kg/m^3
w_{max}	maksimikosteuspitoisuus	kg/m^3
x	etäisyys	m
Δ	koekappaleen pinta-ala	m^2
$\nabla_{w,i}$	yksittäisen mittauksen pinta-alaan suhteuttamaton vedenimukerroin	$\text{kg/s}^{0,5}$
∇_0	vedenimukertoimen sovitesuoran y-akselin leikkauspiste	kg/m^2
∇_{astia}	vedenimeytysastian pinta-ala	m^2
A_{aw}	apukerroin pitkäaikaisten imeytysten in sovitekäyrälle	kg/m^2
A_{dif}	vedenimukerointa vastaava suure diffuusion ja muiden hitaiden siirtymisprosessien kuvaamiseen	$\text{kg/m}^2\text{s}^{0,5}$
A_k	haihtumiskokeen koekappaleen pinta-ala	m^2
A_{vesi}	vapaan veden pinta-ala kun koekappale on upotettu vesiastiaan	m^2
A_w	vedenimukerroin	$\text{kg/m}^2\text{s}^{0,5}$
B_w	tunkeutumiskerroin	$\text{m/s}^{0,5}$
C	gravitaation huomioiva kerroin in sovitekäyrässä	$\text{kg/m}^2\text{s}$
D_w	kosteusdiffusiviteetti	m^2/s
$D_{w,s}$	kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti	m^2/s
F	kappaleeseen kohdistuva nostevaikutus	N
G	kappaleen paino	N
M	moolipaino	kg/mol
N	vaa'an kannattelema paino	N

P_g	ilmanpaine	Pa
P_l	huokosvedenpaine	Pa
R	yleinen kaasuvakio	8,31 J/(K mol)
RH	ilman suhteellinen kosteus	%
S	vedenimeytyvyys	kg/m ² s ^{0,5}
T	lämpötila	K
V_{imu}	koekappaleen imemän vesimäärän tilavuus	m ³

KÄSITTEET

absorptio	molekyylien sitoutuminen aineeseen
adsorptio	molekyylien sitoutuminen aineen pinnoille
adsorptiovesi	Vesi, joka tiivistyy materiaalin huokosiin kapillaaristen voimien vaikutuksesta huokosilman suhteellisen kosteuspitoisuuden ollessa alle 100%RH.
desorptio	absorption vastakohta, molekyylien poistuminen aineesta
huokossäde	Huokosen suuruutta kuvaava mitta, joka on määritetty kapillaaristen voimien avulla olettaen pyöreät huokokset.
huokosvedenpaine	Materiaalin huokosseinille tiivistyneen veden pinnan kaarevuuden nesteeseen aiheuttama paine.
hygroskooppinen kyllästyskosteuspitoisuus	Huokoisen materiaalin suurin mahdollinen kosteuspitoisuus joka on saavutettavissa, kun koekappale ympäröidään mahdollisimman kostealla ilmalla.
isotermien olosuhde	Olosuhde, jossa lämpötila on vakio.
kannatinteline	Väline, jonka avulla koekappale ripustetaan vaakaan automaattisessa vapaan veden imeytyslaitteessa.
kapillaarinen kyllästyskosteus	Huokoisen materiaalin suurin mahdollinen kosteuspitoisuus joka on saavutettavissa ilman ulkoisen paineen vaikutusta.
kapillaarinen nousukorkeus	Se korkeus, johon vesi voi kapillaari-huokosissa enimmilleen nousta.
kosteusdiffusiviteetti	Materiaalin kosteuspitoisuudesta riippuva ominaisuus, joka kuvaa materiaalin kosteuden siirtokykyä vesihöyrylle.
kosteusdiffusiviteetti uudelle jakaantumiselle	Materiaalin kosteuspitoisuudesta riippuva ominaisuus, joka kuvaa materiaalin kosteuden siirtokykyä kuivumistilanteessa
maksimikosteuspitoisuus	Huokoisen materiaalin suurin mahdollinen kosteuspitoisuus, joka materiaaliin voi sitoutua. Usein sama kuin huokostilavuus.
mittaushuone	Tila, jossa automaattinen vapaan veden imeytyslaite sijaitsee.
mittauskaappi	Automaattisen vapaan veden imeytyslaitteen kaappi, jonka sisällä veden imeytys tehdään.
mittausvesiastia	Automaattisen vapaan veden imeytyslaitteen mittauskaapissa sijaitseva vesiastia
nestemäisen veden kosteusdiffusiviteetti	Materiaalin kosteuspitoisuudesta riippuva ominaisuus, joka kuvaa materiaalin kosteuden siirtokykyä huokosissa siirtyvälle vedelle.
veden tunkutumiskerroin	Materiaaliominaisuus, joka kuvaa vesirintaman etenemisnopeutta, kun hygroskooppisiin olosuhteisiin tasapainotettu koekappale laitetaan vesikosketukseen.
vapaan veden imeytyskoe	Koe, jossa koekappale upotetaan osittain veteen ja punnitsemalla mitataan imeytyneen veden määrää.
veden imeytymiskerroin (kapillariteettikerroin)	Materiaaliominaisuus, joka kuvaa veden imeytymisnopeutta hygroskooppisiin olosuhteisiin tasapainotetussa koekappaleessa, joka laitetaan vesikosketukseen.
Virhelähdevariaatioiden perustapaus	Koekappaleryhmä, jossa koekappaleet ovat pyöreitä, suojaus on toteutettu vahalla ja pleksillä ja mittaus on tehty haihtuvaan veteen.

1 JOHDANTO

Nopeasti kehittyvä rakennustekniikka, jonka ajavana voimana on suurilta osin tiukkenevat energiatehokkuusvaatimukset, on johtanut uudenlaisiin rakenneratkaisuihin. Pelkästään eristepaksuuksien lisääminen sekä ilmastonmuutos tuovat rakenteille lisävaatimuksia, joita ei kokemukseräisesti vielä tunneta. Lisäksi monenlaiset sisäilma- ja kosteusongelmat luovat paineita parempien rakenteiden kehittämiseen.

Uudenlaisten rakenteiden rakennusfysikaalisen toiminnan arvioiminen käsin laskien ei ole mielekäästä. Rakennusfysikaalisia ohjelmia onkin kehitetty viime aikoina, ja tietokoneiden laskentatehon kasvaessa myös ohjelmien tarkkuutta voidaan lisätä lähes rajattomasti. Nyt onkin tarvetta kehittää ja verifioida uusia matemaattisia malleja ohjelmien taustalle. Jo nyt on käytettävissä malleja, joilla rakenteiden kosteusteknistä toimintaa voidaan mallintaa mielekkäällä tasolla. Esimerkiksi Scheffler et Al. (2004) esittelee materiaalien lämpö- ja kosteusteknisestä luonteesta insinöörimallin, joka on saatu koetulojen avulla kalibroitu uskottavalle tarkkuustasolle. Tällaista mallia käytettäessä yksi keskeinen ongelma on tarkkojen materiaaliominaisuuksien puute.

1.1 Tutkimuksen sisältö

Tämän työn tarkoituksena on keskittyä materiaalien nestemäisen veden siirto-ominaisuuksiin. Kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti on verrattain vähän mitattu materiaaliominaisuus, vaikka se on välttämätön suure laskettaessa kosteuden liikettä yli 95 % suhteellisessa kosteudessa. Kapillaarisen kosteusdiffusiviteetin määrittämiseen käytettävät mittaustekniikat ovat kalliita, ja laitteilla voidaan parhaimmillaankin tutkia vain joitain kymmeniä millimetrejä paksuja kappaleita. Näin ollen kalliillakaan tekniikalla ei saada luotettavia tuloksia, koska rakennusmateriaalien epähomogeeninen luonne vaatisi suurten koekappaleiden käyttöä.

Mikäli materiaali noudattaa kyllästymättömän kappaleen virtausteoriaa eli Richardsin yhtälöä, voidaan kapillaarista kosteusdiffusiviteettiä arvioida veden imeytymiskertoimen avulla käyttäen korrelaatiokaavaa. Veden imeytymiskerroin määritetään vapaan veden imeytyskokeella. Vedenimukokeen tuloksissa on joidenkin materiaalien osalla ollut poikkeamia teoriasta. Näiden poikkeamien ja yleisemminkin vedenimukokeen virhelähteiden arvioinnista on tehty tutkimusta lähinnä virhelähteiden osoittamiseksi. Mittaustekniikan kehittämistä toistettavampien ja luotettavampien mittaustulosten suuntaan on tehty vain harvakseltaan. Aiemmin veden imeytymiskerrointa on käytetty veden imeytymisen kuvaamiseen, ja epätarkemmatkin tulokset ovat olleet riittäviä. Nyt veden

imeytymiskerrointa käytetään kapillaarisen kosteusdiffusiviteetin määrittämiseen, joten tarvittaisiin vähintään kertaluokkaa luotettavampia mittauksia.

1.2 Tutkimuksen suoritus

Tutkimuksessa on käyty ensiksi läpi kirjallisuutta ja olemassa olevaa tietoa liittyen vapaan veden imeytyskokeeseen. Tässä yhteydessä on haettu tietoa myös kokeen mittaustulosten tulkinnasta. Kiinnostuksen kohteena ovat olleet veden imeytymiskerroin ja kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus, joiden avulla voidaan arvioida myös kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti. Tämän jälkeen on etsitty näitä suureita yhdistäviä matemaattisia malleja.

Vapaan veden imeytyskokeita varten on rakennettu koelaitteisto, jolla on tehty vedenimukokeita ja tutkittu kokeen virhelähteitä. Virhelähteiden vaikuttavuutta arvioivissa kokeissa on keskitytty sellaisiin virhelähteisiin, joilla on eniten vaikutusta kokeen työläyteen. Edellä mainitulla kriteerillä sekä aiempien virhelähdekokeiden perusteella on nyt tehtyihin virhelähdekokeisiin valittu muuttuviksi suureiksi pinta-ala ja imupinnan muoto sekä kylki- ja yläpinnan suojaus.

Tutkimuksessa on keskitytty erityisesti vapaan veden imeytyskokeen kehittämiseen. Tavoitteena on ollut saada kokeen tuloksista sellaisia, että niistä voidaan määrittää mahdollisimman monta eri materiaaliominaisuutta. Koetuloksista määritetään vähintään veden imeytymiskerroin, jonka osalta on keskitytty erityisesti mittaustarkkuuden lisäämiseen. Lisäksi laskentamenetelmää kehittämällä on voitu määrittää veden tunkeutumiskerroin ja kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus.

2 MATERIAALIEN KOSTEUSTEKNINEN KÄYTTÄYTYMINEN

Tässä kappaleessa käsitellään yleisesti hyväksytyt kosteuden siirron teorit ja niiden sovellettavuus eri tilanteisiin. Ilman suhteellisen vesihöyrypitoisuuden tunteminen on välttämätöntä kosteusteknisissä tarkasteluissa. Diplomityön tarkoituksena on käsitellä materiaalien kapillaarisen alueen ilmiöitä, ja siksi kysymykseen tulevat vain huokoiset materiaalit. Marginaalisemmat kosteuden siirtymismuodot, kuten termodiffuusio, liukenevilla tapahtuva diffuusio, effuusio, osmoosi ja elektrokineettinen siirtyminen, jätetään käsittelemättä. Myös konvektio jätetään käsittelemättä, koska sillä ei ole suoraa yhteyttä kapillaarisiin ominaisuuksiin. Huokoisten materiaalien kosteudensiirron kannalta oleellisia ovat diffuusio, pintadiffuusio, kapillaarivirta ja hydraulivirta.

2.1 Kosteus ilmassa

Rakennusfysikaalisesti ilma voidaan luokitella kolmella eri muuttujalla. Nämä ovat ilmanpaine P_g [Pa], lämpötila θ [°C] tai T [K] ja vesihöyrypitoisuus. Vesihöyrypitoisuus voidaan ilmoittaa seuraavilla muuttujilla: vesihöyrypitoisuus v [kg/m³], vesihöyryn osapaine p_v [Pa] ja suhteellinen vesihöyrypitoisuus ϕ [% RH] tai [-]. (Hagentoft 2001) Vesihöyryn osapaineen ja vesihöyrypitoisuuden yhteys saadaan laskettua ideaalikaasun tilanyhtälön (2.1) perusteella, koska ilmanpaine on rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa lähes vakio. Tässä on esitetty yksinkertaistettu tilanyhtälö

$$p_v = 461,4 \cdot (\theta + 273,15) \cdot v, \quad (2.1)$$

jossa oleva vakiokerroin (461,4) sisältää vesihöyryn osalta kaikki vakiot (Hagentoft 2001).

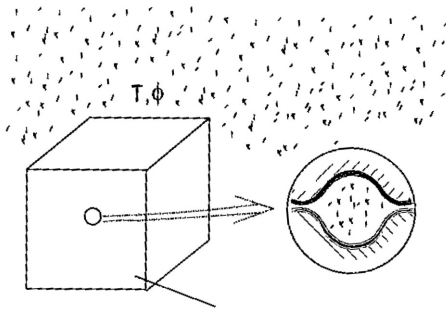
Ilma pystyy sitomaan vain tietyn määrän kosteutta. Tämä kyllästyskosteuspitoisuus riippuu lämpötilasta, ja se voidaan ilmoittaa vesihöyrypitoisuutena v_{sat} [kg/m³] tai vesihöyryn osapaineena $p_{v,\text{sat}}$ [Pa]. Kyllästyskosteuspitoisuus muuttuu lämpötilasta riippuen: se on 20 °C lämpötilassa 17,28 g/m³ ja vastaavasti 0 °C lämpötilassa 4,86 g/m³. Kyllästyskosteuspitoisuuden ja lämpötilan välille ei ole absoluuttista analyttistä yhteyttä, mutta siitä on esitetty useita eri korrelaatiokaavoja. (Vinha 2011) Suhteellinen kosteus kertoo ilman sisältämän vesihöyrymäärän suhteessa maksimimäärään, ja se voidaan laskea kaavalla (2.2).

$$\varphi = \frac{v}{v_{sat}} = \frac{p_v}{p_{v,sat}} \quad (2.2)$$

Suhteellinen kosteus ilmoitetaan usein prosentteina (Vinha 2011).

2.2 Kosteus huokoisessa materiaalissa

Materiaalissa kosteus sitoutuu huokosiin. Kuvassa 2.1 on esitetty huokoinen materiaalikappale, jonka ympärillä on kosteaa ilmaa. Tasapainotilassa huokosten sisällä oleva ilma on yhtä kosteaa. Ilmassa olevilla vesimolekyyleillä eli vesihöyryllä on taipumus sitoutua huokosseinämiin. Huokosseinämiin sitoutuneen kosteuden määrä riippuu huokosilman suhteellisesta kosteuspitoisuudesta ja lämpötilasta. Lämpötilariippuvuuden myötä tasapainokosteuspitoisuus on suurimmillaan 0 °C lämpötilassa, sillä se laskee sekä ilman lämmitessä että kylmetessä (Vinha 2011). Yleensä ei oteta huomioon lämpötilariippuvuutta, vaan materiaalin kosteuspitoisuus (w) [kg/m^3] ilmoitetaan suhteellisen kosteuden funktiona tasapainokosteuskäyrän (Kuva 2.2) avulla.



Kuva 2.1: "Materiaalikappale kostean ilman ympäröimänä. Kuvasta nähdään myös yksittäinen huokonen ja siihen absorpoitunut kosteus." (Hagentoft 2001)

Kosteuspitoisuus voidaan ilmoittaa myös paino-osana (u) [kg/kg tai %], joka määritellään kaavalla (2.3)

$$u = \frac{w}{\rho_{dry}}, \quad (2.3)$$

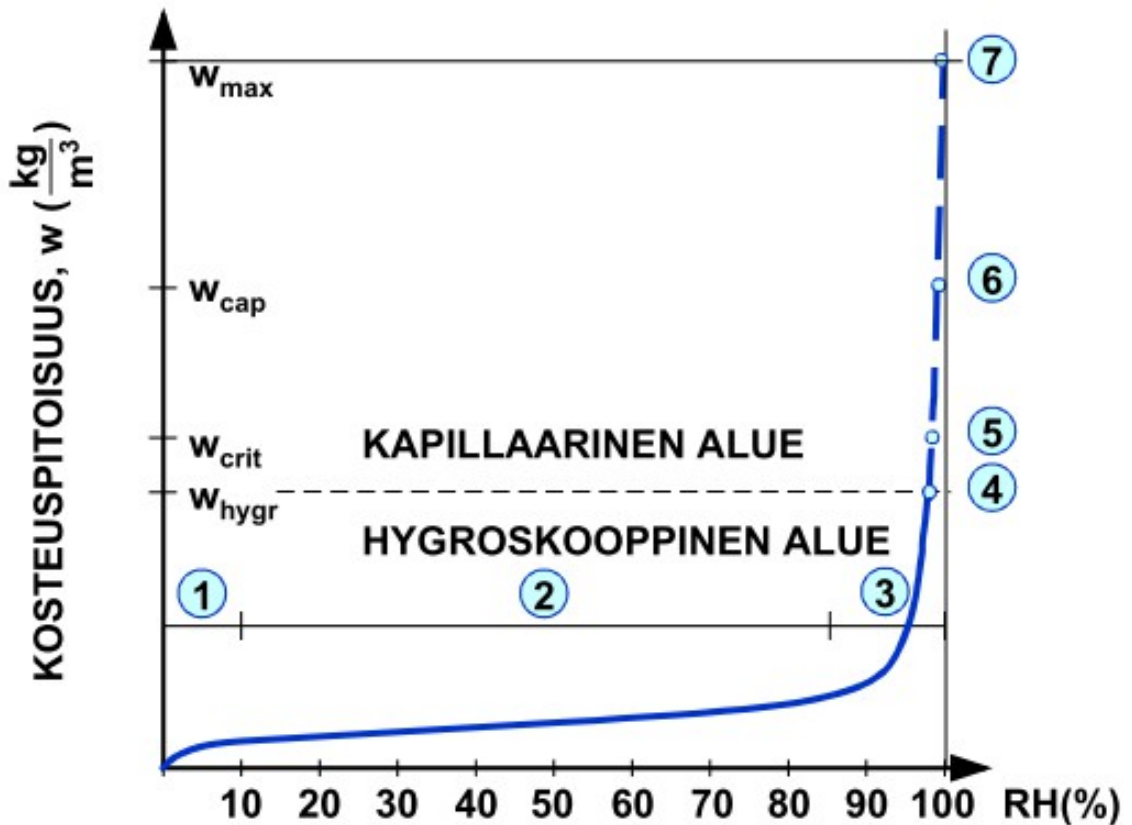
jossa ρ_{dry} on materiaalin kuivatiheys [kg/m^3]. Kuivatiheys voidaan määrittää kappaleesta, jota on kuivattu 105 °C lämpötilassa pitkän aikaa. (Hagentoft 2001)

2.2.1 Kosteuden sitoutuminen hygroskooppisella alueella

Materiaalien huokosrakenne on monimutkainen. Esimerkiksi höyrykarkaistulla kevytbetonilla ("siporex") pienimmät huokokset koostuvat pääasiassa sementtigeelin satunnaisesti suuntautuneiden hiutaleiden välisestä tilasta (Ioannou et al. 2008). Suuremmat huokokset ovat tyhjiä tiloja, jotka höyrykarkaistussa kevytbetonissa ovat massaan alumiinijauheella synnytettyjä vetykaasukuplia. Näihin huokosverkostoihin vesi voi adsorptoi-

tua kiinteän aineen pinnoille, kondensoitua kapillaarisesti halkeamiin ja pieniin huokosiin tai sitoutua kosteaan huokosilmaan. Puu on syntyvastaan johtuen poikkeava materiaali, minkä vuoksi se sitoo kosteuttakin osin eri tavalla kuin muut materiaalit; puulla myös soluseinät voivat absorpoida vettä. (Hagentoft 2001)

Matalassa suhteellisessa kosteuspitoisuudessa kosteus sitoutuu huokosiin yksittäisiin molekyylikerroksiin. Tätä kutsutaan monomolekylaariseksi adsorptioksi, mikä näkyy tasapainokosteuskäyrän kuvassa 2.2 alueena 1. Suhteellisen kosteuden noustessa molekyylikerrokset alkavat paksuuntua, jolloin siirrytään polymolekylaarisen adsorption (Kuva 2.2, alue 2) alueelle. Tällä alueella tasapainokosteus nousee melko lineaarisesti suhteellisen kosteuden funktiona. Seuraavaksi siirrytään kapillaarikondenssiksi kutsutulle alue (Kuva 2.2, alue 3), jolloin huokokset pienimmistä alkaen alkavat täyttyä vedellä. Tasapainokosteus alkaa nousta eksponentiaalisesti verrattuna suhteelliseen kosteuteen. (Kurs & Kiebl 1998, Hagentoft 2001)



Kuva 2.2: Materiaalin tasapainokosteuspitoisuudet (Vinha 2011).

Kapillaarikondenssissa materiaali sitoo yhä enemmän kosteutta, ja saavuttaa lopulta empiirisesti määritellyn hygroskooppisen kyllästyskosteuspitoisuuden (w_{hygr}) (Kuva 2.2 kohta 4). Hygroskooppinen alue kattaa suhteellisen kosteuden välillä noin 0–98 % RH (Hagentoft 2001). Jotta materiaalin kosteuspitoisuus nousee hygroskooppisen alueen yläpuolelle, on sen oltava kosketuksessa nestemäiseen veteen (Kurs & Kiebl 1998).

Hygrooskoopin kosteusalueen ylärajana on 98 % RH, koska tätä kosteampia olosuhteita ei pystytä tuottamaan kosteuskammiossa normaalipaineessa (Vinha 2011).

Kapillaarikondenssissa nesteen molekyylit kiinnittyvät huokosseinämiin muodostaen lopulta yhtenäisen kaarevan pinnan. Kaarevalle pinnalle syntyy paine-ero (ks. luku 2.4.1), joka saa höyryn tiivistymään nesteeksi jo kyllästyskosteuspitoisuutta alemmissa kosteuspitoisuuksissa (Hagentoft 2001). Kapillaarikondenssilla kyllästyneiden huokosten koon ja suhteellisen kosteuden yhteyttä kuvaa Kelvinin laki (2.4) (Kurs & Kiebl 1998)

$$\varphi = e^{\frac{-2\sigma M_w \cos \phi}{r \rho R T}}, \quad (2.4)$$

jossa σ [N/m] on nesteen pintajännitys, M_w veden moolimassa [kg/mol], ϕ [°] on nesteen ja materiaalin pinnan välinen reunakulma, r [m] huokossäde, ρ [kg/m³] nesteen tiheys ja R [8,31 J/(K mol)] kaasuvakio (Kurs & Kiebl 1998). Huokossäde on helpoin ymmärtää kuvittelemalla huokosten muodostuvan sylintereistä.

Kaavalla (2.4) laskettuja kapillaarikondenssin rajoja huokossäteen funktiona on esitetty taulukossa 2.1. (Hagentoft 2001 s.291)

Taulukko 2.1: Huokossäteen ja suhteellisen vesihöyrypitoisuuden vastaavuus kapillaarikondenssissa. (Hagentoft 2001 s.291)

2r (nm)	φ (%)
1	10,00
3	47,00
10	80,00
30	93,00
100	98,00
300	99,10
1000	99,80

Halkaisijaltaan alle nanometrin luokkaa olevissa pienimmissä huokosissa huokokset täyttyvät adsorptiovedestä jo alhaisilla suhteellisen kosteuden arvoilla. Kapillaarikondenssin alkaminen näkyy tasapainokosteuskäyrästä, ja useimmilla materiaaleilla sen havaitaan alkavan vasta korkeilla suhteellisilla kosteuksilla. Tämän perusteella voidaan arvioida materiaalin pienimpien huokosten kokoa. (Vinha 2011)

2.2.2 Kosteuden sitoutuminen kapillaarisella alueella

Nestemäiseen veteen kosketuksissa oleva kappale saavuttaa merkittävästi hygrooskoopista kyllästyskosteuspitoisuutta suurempia kosteuspitoisuuksia. Tällä alueella ei pystytä luotettavasti määrittämään tasapainokosteutta suoraan suhteellisen kosteuden funktiona, koska tasapainokosteuden arvo muuttuu nopeasti pienellä suhteellisen kosteuden vaihteluvälillä (Kurs & Kiebl 1998). Kelvinin lain avulla saadaan suhteellinen kosteus muutettua huokossäteeksi, joka voidaan luvun 2.4.1 mukaisella teoriolla muuttaa paine-erok-

si. Tähän perustuen tasapainokosteuspitoisuus kapillaarisella alueella voidaan määrittää painelevylaitteella (NT Build 481 1997, ASTM C1699-09 2009). Paineistamalla kappale siten, että vesi pääsee poistumaan painelevyn huokosverkostoa pitkin, saadaan kosteus poistettua määrättyä suuremmista huokosista (Kurs & Kiebl 1998, Vinha 2011).

Kapillaarisella alueella aine pystyy sitomaan nestettä, kunnes se saavuttaa kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden (w_{cap}) (Kuva 2.2, kohta 6). Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus on määritetty kosteuspitoisuudeksi, joka voidaan saavuttaa luonnollisella veden imeytyksellä normaalissa ilmanpaineessa ilman ulkoisten voimien vaikutusta (Kurs & Kiebl 1998).

Joillekin materiaaleille kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden absoluuttista arvoa on vaikea määrittää. Mikäli kappale upotetaan kokonaan veteen, täyttää veden paine myös osan ei-kapillaarisista huokosista. Toisaalta, jos kappaleeseen imeytetään vettä ja vain kappaleen alapinta on kosketuksissa veteen, aiheuttaa eri huokossäteiden erilainen kapillaarinen nousukorkeus ainakin korkeammilla kappaleilla alempia kosteuspitoisuuksia kuin teoreettinen kapillaarihuokosten tilavuus antaisi olettaa. Tällä on vaikutusta ensisijaisesti kosteuden siirtymisen mallintamiseen, koska kosteuden liikkeen potentiaalit eivät ole samat kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden ylä- ja alapuolella.

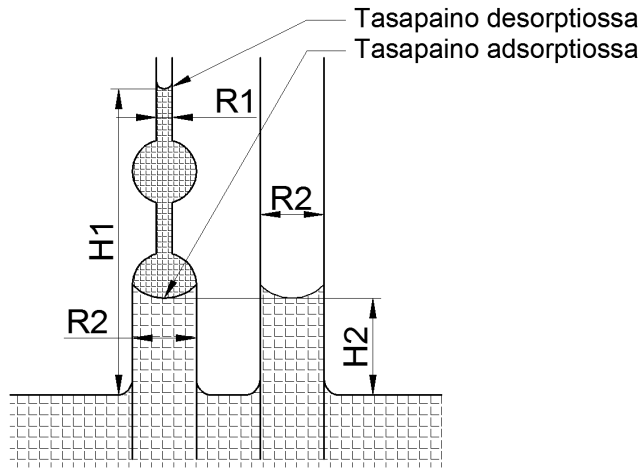
Kapillaarista kyllästyskosteuspitoisuutta edeltää kriittinen kosteuspitoisuus (Kuva 2.2, kohta 5). Kriittinen kosteuspitoisuus edustaa rajaa, jonka jälkeen materiaalin sisäiset vesihöyrystä koostuvat kosteusvirrat vähenevät ja kosteudensiirtoa alkaa hallita kapillaarivirtaus. (Vinha 2011)

Maksimikosteuspitoisuus yhtenäisessä huokosverkostossa (w_{max}) (Kuva 2.2, kohta 7) saavutetaan, kun koko huokosverkosto täytetään vedellä. Kaikki huokokset eivät täyty normaalin paineen vallitessa, koska niihin jää kapseloitunutta ilmaa. (Kurs & Kiebl 1998; Wilson et al. 1999) Kapseloituneen ilman paineen tulee ylittää kaareutuneen nestepinnan aiheuttama paine. Esimerkiksi betonin suojahuokosissa tämä paine on merkittävästi normaalia ilmanpainetta suurempi, eikä tavanomainen hydrostaattinen paine riitä ilman poistamiseen. Hyvin pitkien vesiuotusten aikana kapseloitunut ilma liukenee veteen ja pääsee näin diffundoitumaan pois materiaalista (Kurs & Kiebl 1998; Wilson et al. 1999, Hall 2007). Liukenemalla tapahtuva diffuusio on hyvin hidasta, ja nopeammin maksimikosteuspitoisuus saadaan selville ajamalla nestettä kappaleeseen jonkin ulkoisen voiman avulla. Yleinen tapa on asettaa kappale tyhjiöön, jossa se upotetaan veteen, ja tämän jälkeen tyhjiöön palautetaan normaali ilmanpaine (Kurs & Kiebl 1998; Wilson et al. 1999).

2.2.3 Tasapainokosteuden hystereesi

Tasapainokosteuskäyrä on useimmille materiaaleille erilainen adsorption kuin desorption osalla. Tätä selitetään useimmiten mustepulloefektillä, joka on helpoin kuvata kapillaarisella alueella. Samankaltainen ilmiö esiintyy myös hygroskooppisella alueella.

Adsorptiossa huokokset täyttyvät suuruusjärjestyksessä, mutta desorptiossa suuret huokokset eivät pääse kuivumaan, jos ne on ympäröity pienemmillä huukosilla. Tätä on havainnollistettu kuvassa 2.3.



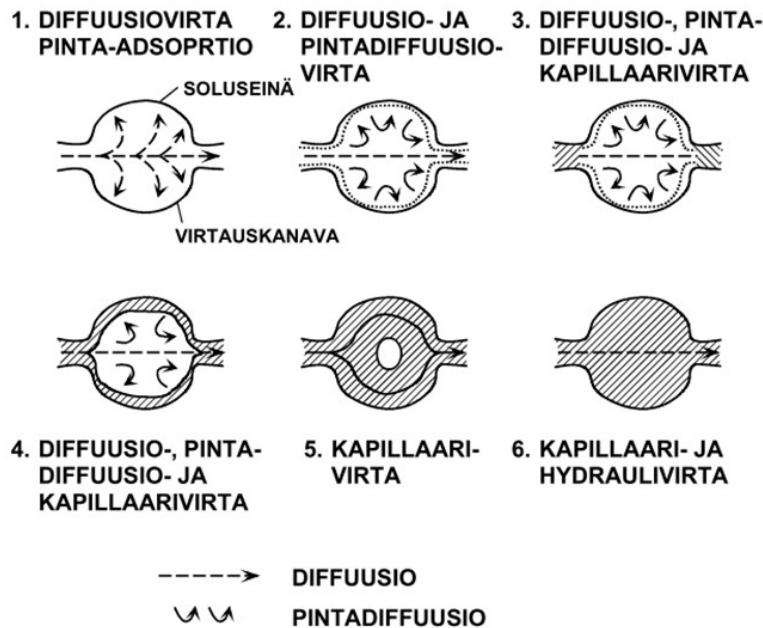
Kuva 2.3: Adsorption ja desorption ero.

Koska laskentaan sisältyy suurempiakin virhelähteitä kuin hystereesi, sitä ei usein oteta huomioon tietokonelaskennassa. Pienen hystereesi ilmiön omaaville materiaaleille adsorptiokäyrä (tai desorptiokäyrä) on riittävä, ja suuremman hystereesi-ilmion omaaville materiaaleille voidaan käyttää adsorptio- ja desorptiokäyrien keskiarvoa (Kurs & Kiebl 1998). Adsorptiokäyrää ei voida määrittää kapillaariselle alueelle, koska painelevylaitteella tehdyllä kokeella saadaan selvitettyä vain desorptiokäyrä (ASTM C1699-09 2009).

2.3 Kosteuden siirto huukoissa materiaaleissa

Kosteus voi siirtyä materiaalissa usean eri mekanismin avulla. Eri siirtymismekanismeilla on eri potentiaalit eli ajavat voimat. Laskelmissa todellista potentiaalia ei usein voida käyttää, koska kyseistä potentiaalia kuvaava materiaaliominaisuutta ei ole määritetty. Laskennassa kannattaa käyttää sellaista potentiaalia, jolle on helppoa määrittää luotettavat materiaaliparametrit.

Rakennusfysiikan kannalta tärkeimmät kosteuden siirtymismuodot materiaalissa on esitetty kuvassa 2.4.



Kuva 2.4: Kosteuden siirtymismuodot huokoisessa materiaalissa (Vinha 2011, katso VTT raportti).

Kuvasta huomataan, että siirtymismekanismit vaihtuvat materiaalin kosteuspitoisuuden muuttuessa. Tämä tarkoittaa myös sitä, että kosteuden liikkeen potentiaali muuttuu. Tällä ei ole merkitystä isotermisissä olosuhteissa, koska kaikki potentiaalit ajavat kosteusvirtaa samaan suuntaan. Ei-isotermisissä olosuhteissa sen sijaan huokosilman suhteellinen kosteuspitoisuus ja materiaalin kosteuspitoisuus voivat ajaa diffuusiota ja kapillaarivirtausta eri suuntiin.

2.3.1 Diffuusio

Kaasumolekyylien liike tuottaa kaasulle ominaisen osapaineen kaasuseokseen. Mikäli osapaineessa on paikallisia eroja, ne pyrkivät tasoittumaan. Tätä kaasun liikettä kutsutaan diffuusioksi, ja sen ajavana voimana voidaan käyttää osapaine-eroa tai pitoisuuseroa, jotka on todettu jo aiemmin toisistaan riippuviksi (ks. luku 2.1). Kaasu virtaa on korkeammasta pitoisuudesta matalampaan. Kosteusvirta voidaan laskea empiirisen Fickin lain (2.5) avulla

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

$$\mathbf{g} = -\delta_p \nabla p_v = -\left(\delta_p \frac{\partial p_v}{\partial x}, \delta_p \frac{\partial p_v}{\partial y}, \delta_p \frac{\partial p_v}{\partial z}\right), \quad (2.5)$$

jossa g on kosteusvirran tiheys [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]; δ_v ja δ_p ovat vesihöyrynläpäisevyydet [m^2/s ja kg/msPa]; ja ovat vesihöyrypitoisuuden [kg/m^4] ja vesihöyryn osapaineen [Pa/m] gradientit. Vesihöyrynläpäisevyys on suhteellisen kosteuden funktio. Sekä tasapainokos-

teuspitoisuus että vesihöyrynläpäisevyys kasvavat voimakkaasti, kun ilman suhteellinen kosteus nousee. (Vinha 2011)

Vesihöyrynläpäisevyyden kasvu johtuu kapillaarikondenssista, jonka myötä kosteusvirrat materiaalissa vaihtuvat diffuusiosta kapillaarisiksi. Muutosalueen laajuus riippuu huokosjakaumasta. Kapillaarisella alueella kosteusvirran potentiaalina on kapillaarimu. Tästä johtuen vesihöyrynläpäisevyys ei ole paras parametri kuvaamaan materiaalin kosteudenläpäisyä korkean suhteellisen kosteuden alueella. Vakioksi voidaan ajatella aito vesihöyrynläpäisevyyden arvo, jossa kapillaarisen siirtymisen osuus on poistettu. Se vähenee mitättömäksi korkeassa kosteuspitoisuudessa huokosten täytyessä vedellä. (Vinha 2011)

2.3.2 Pintadiffuusio

Polymolekylaarisen adsorption myötä molekyylien sidosvoimat huokosseinämiin heikkenevät. Lopulta uloimman molekyylikerroksen sidonta on niin heikko, että molekyyli irtaana. Nyt vesimolekyylit ovat vuoroin sekoittuneena huokosilmaan ja vuoroin sitoutuneena huokosseinämiin. Sidosvoimat heikkenevät kosteuspitoisuuden noustessa, jolloin irronneet molekyylit pyrkivät sitoutumaan matalamman kosteuspitoisuuden suuntaan. Tätä kosteuden siirtymismuotoa nimitetään pintadiffuusioksi. (Vinha 2011)

Pintadiffuusiosta kosteudensiirron potentiaalina toimii kosteuspitoisuus, joka voidaan tasapainokosteuden avulla yhdistää huokosilman suhteelliseen kosteuteen. Samaa potentiaalia käytetään myös kapillaarivirralla. Koska pintadiffuusiota ei pystytä helposti mittaamaan erikseen, niin kapillaarivirta ja pintadiffuusio yhdistetään laskennassa nestemäisen kosteuden virraksi. (Vinha 2011)

2.3.3 Kapillaarivirta

Kosteus siirtyy materiaalissa yli 95 % RH suhteellisessa kosteudessa lähes yksinomaan nesteinä. Huokosverkostosta suurin osa on jo kapillaarikondenssin myötä täyttynyt vedellä, ja diffuusio vaikuttaa vain suurimmissa huokosissa, ja vaikutus kosteusvirran määrään jää mitättömäksi (Kurs & Kiebl 1998, SFS-EN ISO 15148 2002). Kapillaariset voimat lakkaavat vaikuttamasta, kun kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus on saavutettu. Tämän jälkeen kosteutta ajavat vain ulkoiset voimat, kuten painovoiman aiheuttama hydrostaattinen tai muu ulkoinen paine (Kurs & Kiebl 1998).

Kapillaaristen voimien syntyä on helpoin kuvata pyöreän ohuen putken avulla (Kuva 2.5). Tämän putken ajatellaan edustavan kapillaarihuokosta materiaalissa (Kurs & Kiebl 1998). Kun neste peittää huokosputken seinämää, vapautuu Gibbssin vapaata energiaa (Butt H-J et Al. 2003). Energian vapautuminen aiheuttaa nestepinnan nousun reunoja ylös, ja syntyvä hydrostaattinen paine-ero saa nestepinnan kaareutumaan. Tällaista kaarevaa nestepintaa kutsutaan meniskukseksi (Vinha 2011). Meniskuksen yli syntyvä paine-ero riippuu kaarevuussäteestä, joten myös kapillaarivoimien suuruus on huokosten halkaisijasta riippuvainen (Hagentoft 2001). Paine-erosta käytetään myös nimitystä

huokosalipaine, ja sen suuruus voidaan määrittää Laplacen lain avulla. Kapillaarivirtaus käsitellään tarkemmin luvussa 2.4.

2.3.4 Hydraulivirta

Kapillaariset voimat lakkaavat vaikuttamasta materiaalin saavuttaessa kapillaarisen kylästyskosteuspitoisuuden. Nesteiden virtaus voi jatkua, jos materiaaliin kohdistuu ulkoisia voimia. Ulkoinen voima on usein painovoiman aiheuttama hydrostaattinen paine. Tasapainotilassa ulkoisen paineen aiheuttamaa virtausta kuvaa Darcyn laki (2.6). (Hagentoft 2001)

$$\mathbf{g} = \rho \frac{k}{\eta} \nabla P = \kappa_w \nabla P \quad (2.6)$$

Kaavassa k [m^2] on materiaalin permeabiliteetti (eri suuri eri nesteille), η dynaaminen viskositeetti (vedelle $1,31\text{E-}3$ Ns/m^2 kun $\theta=10$ °C) ja ∇P [Pa/m] on paineen gradientti. Permeabiliteetin sijasta materiaaliparametrina voidaan käyttää kosteudenjohtavuutta κ_w [kg/msPa], joka sisältää sekä nesteen että materiaalin ominaisuudet. (Hagentoft 2001, Vinha 2011)

Darcyn laki voidaan laajentaa käsittämään myös kapillaarista kosteudensiirtoa, jos paine-erona käytetään kapillaarista paine-eroa (Hagentoft 2001, Scheffler G. 2008, Vinha 2011). Näin kosteudenjohtavuus käsittää kaikki muut kosteuden siirtymismuodot paitsi vesihöyryn diffuusion (Vinha 2011). Hydraulivirtauksen tavanomaisimpina esimerkkeinä lienevät pato- ja allasrakenteet, joissa veden hydrostaattinen paine vaikuttaa rakenteen yli.

2.3.5 Laajennettu Fickin laki

Darcyn lain käyttäminen kosteuden siirtolaskelmissa kapillaarisella alueella ei ole mielekää, koska paine-eron määrittäminen on vaikeaa. Kapillaarisella alueella paine-ero korreloi materiaalin kosteuspitoisuuteen, jolloin myös kosteuspitoisuutta voidaan käyttää potentiaalina. Kosteusvirran määrittämiseksi voidaan Fickin laki laajentaa nestemäisen kosteuden siirron alueelle (2.7). (Mukhopadhyaya et al. 2002, Scheffler 2008 s.26)

$$\mathbf{g} = -D_{w,s} \nabla w \quad (2.7)$$

Materiaaliparametrina käytetään kapillaarista kosteusdiffusiviteettiä $D_{w,s}$ [m^2/s], kosteuspitoisuuden gradientin ollessa ∇w [kg/m^4] (RIL 255-1-2014).

Fickin lakia sovellettiin jo aiemmin diffuusiolle (ks. luku 2.3.1). Nyt kosteusdiffusiviteetti D_w [m^2/s] voidaan ottaa materiaaliparametriksi vesihöyrynläpäisevyyden rinnalle. Yhteys saadaan lasketuksi potentiaalien välisestä riippuvuuksista (Hagentoft 2001). Kosteusdiffusiviteetti jatkuu koko määritettävissä olevalle kosteuspitoisuuden alueelle. Kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti on eritelty, koska todellinen potentiaali on eri neste-

virralle kuin diffuusiolle (ks. luku 2.3). Yhdistetty virtaus voidaan määrittää diffuusion ja nestevirran summana (2.8) (Hagentoft 2001)

$$\mathbf{g} = \mathbf{g}_v + \mathbf{g}_l, \quad (2.8)$$

jossa \mathbf{g}_v on diffuusion kosteusvirta ja \mathbf{g}_l nestemäinen kosteusvirta. Nestemäinen kosteusvirta ja diffuusion kosteusvirta voidaan laskea esimerkiksi kaavoilla (7)-(9).

Rajanveto diffuusion ja nestemäisen kosteusvirran välillä ei kapillaarikondenssin vuoksi ole suoraviivaista. Siksi kaavan (2.8) lähestymistapa on vain likiarvoistus (Hagentoft 2001).

2.4 Huokoisen materiaalin kapillaarisuusominaisuudet

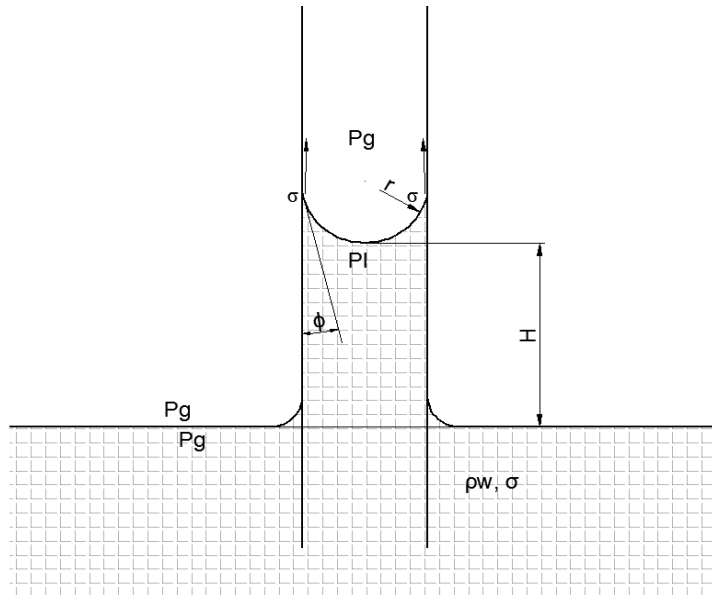
Edellä on esitetty yleisesti hyväksytyt ja laajalti käytössä olevat materiaalien kosteusteknisen käyttäytymisen periaatteet. Jotta näitä voidaan soveltaa käytännössä tehtävien vapaan veden imeytyskokeiden tulosten analysointiin, täytyy taustalla olevaan fysiikkaan perehtyä hivenen syvällisemmin.

Veden imeytymiskertoimelle esitetään teoreettinen perustelu, jonka alkuperäinen määritelmä on perustunut empiirisiin havaintoihin materiaalin vedenimukäyttäytymisestä. Luvussa 2.3.4 esiteltyä kosteudenjohtavuutta ja Darcyn lakia (kaava 2.6) käyttämällä voidaan johtaa niin diffusiviteetin kuin veden imeytymiskertoimen määrittelevä yhtälö. Darcyn laki on tunnetuista epävarmuuksista huolimatta luotettava peruskivi, jota käytetään usein laskennan pohjana (Hall 2007, Scheffler 2008).

Huokosalipaine on mainittu jo edellä (ks. luku 2.3), ja nyt paneudutaan sen taustalla olevaan fysiikkaan. Huokosalipaineen avulla voidaan määrittää teoreettisesti kapillaarinen nousukorkeus (Courard & Degeimbre 2003), mikä on tämän työn laboratoriokoikeissa jouduttu sivuuttamaan työmäärän rajoittamiseksi.

2.4.1 Huokosalipaine

Huokosalipaineen määrittämiseksi on ensin syytä perehtyä nesteiden kapillaarisuuteen. Piirretään ensin kuva huokosputkesta (Kuva 2.5), jossa on kapillaarista nestettä. Neste nousee putkessa Gibbsin vapaan energian vapautuessa (ks. luku 2.3.3) (Butt H-J et Al. 2003 s.231). Vapautuva energia sitoutuu nesteen potentiaalienergiaksi. Kaikkien nesteiden tapauksessa energiaa ei vapaudu; esimerkiksi elohopean ja useimpien kiintoainesten rajapintaan sitoutuu energiaa eikä kapillaarista imua synny vaan nestepinta putkessa laskee ympäröivää pintaa alemmas. Käytännössä ilmiötä kuvataan usein nesteen ja pinnan välisellä reunakulmalla (ϕ) [°] (ks. luku 2.2.1). Jos kontaktikulma on alle 90 °, vapautuu nesteen ja kiintoaineen rajapinnasta energiaa, kun taas yli 90 ° kulmalla rajapintaan sitoutuu energiaa (Butt et al. 2003).



Kuva 2.5: Huokosputkessa vaikuttavia voimia.

Kuvassa 2.5 näkyvistä suureista voidaan johtaa Laplacen laki (2.9), joka määrittää nesteen paineen suuruuden meniskuksen alla. Tätä paine-eroa voidaan kutsua myös huokosalipaineeksi (s). (Hagentoft 2001; Butt et al. 2003)

$$P_g - P_l = s = \frac{2\sigma \cos \phi}{r} \quad (2.9)$$

Kaavasta nähdään, että kontaktikulmalla on hyvin suuri merkitys huokosalipaineen suuruuteen. Tämän voi käytännössä huomata vaikkapa ohuella vesiputkella. Putkessa oleva pisara on merkittävästi helpompi imeä kuin puhaltaa pois; imussa kontaktikulma suurennee, mutta puhaltaessa pienenee entisestään. Tämä on myös käytännön osoitus kontaktikulman hystereesistä (Butt et al. 2003, Scheffler 2008). Kontaktikulman hystereesi on yksi syy luvussa 2.2.3 esitettyyn ilmiöön.

Rakennusmateriaalin monimutkaisessa huokosverkostossa on kontaktikulman ja kulman hystereesin lisäksi tuntemattomana tekijänä huokossäde (ja muoto). Kontaktikulma ja huokossäde ovat muuttujia kaavassa (2.9), eikä niitä ole nykytekniikalla relevanttia selvittää laskentaan riittävällä tarkkuudella. Darcyn lakia käytettäessä tarvitaan vain kapillaari-imun ja materiaalin kosteuspitoisuuden suhde, joka voidaan määrittää esimerkiksi luvussa 2.2.2 mainitulla painelevylaitteella (Scheffler 2008).

Laplacen laki on edellä johdettu kapillaarihuokoseen nousseen nesteen avulla. Laki on voimassa myös laajemmin. Pintajännityksen vuoksi nesteen pinta-ala pyrkii aina minimiin. Esimerkiksi kuvan 2.5 huokosputkessa pintajännitys pyrkii minimoimaan nesteen ja kaasun välisen rajapinnan pinta-alan, jolloin kaarevuutta ei syntyisi. Laplacen laki kuvaa kaarevuudesta aiheutuvaa seurausta; nesteen ja kaasun rajapinnassa täytyy olla paine-ero, joka saa pintajännityksen muodostaman ”kalvon” kaareutumaan. Ilmiön

voi havainnollistaa esimerkiksi putken päähän asetetulla kumikalvolla; ilman paine-eroa kumikalvo asettuu sisäisten jännitysten vuoksi tasoon, mutta mikäli putkessa on alipaine, on kumikalvon muoto meniskusta muistuttava kaareva pinta. (Butt et al. 2003 s.8)

2.4.2 Kapillaarinen nousukorkeus

Kapillaarinen nousukorkeus voidaan määrittää maamateriaaleille standardin SFS-EN 1097-10 (2014) mukaisesti (Leppänen 2013). Rakennusmateriaaleille vastaavaa menetelmää ei ole käytettävissä, koska koekappaleen kylkien suojaaminen katkaisee näköyhteyden materiaaliin. Kylkiä ei voida jättää suojaamatta, koska silloin vesi pääsisi haihtumaan pinnoilta. Ilman visuaalista havaintoa vesirintaman etenemisestä kapillaarisen nousukorkeuden määrittäminen on hyvin epäluotettavaa.

Laskennallinen nousukorkeus saadaan tasapainoyhtälöstä, jossa huomioidaan Laplace'n laki ja hydrostaattinen paine. Teoreettinen nousukorkeus huokossäteen funktiona voidaan laskea kaavalla (2.10) (Kurs & Kiebl 1998, Butt et al. 2003)

$$h_{cap} = \frac{2\sigma \cos \phi}{r\rho g}, \quad (2.10)$$

jossa g [m/s^2] on putoamiskiihtyvyys ja kontaktikulmana veden ja rakennusmateriaalien välillä käytetään yleensä 0° (Scheffler 2008).

Edellä oleva kaava ei anna kuvaa kapillaarisesta nousukorkeudesta. Huokosten halkaisijaa ja muotoa ei tiedetä, koska mittaaminen on vaikeaa (ks. luku 2.4.1). Itse asiassa huokoskokoä määritettäessä tulee jo määritellyksi teoreettisesti kapillaarinen nousukorkeus, koska painelevylaitteessa kosteuspitoisuus tasapainotetaan määrättyssä paineessa (NT Build 481 1997, ASTM C1699-09 2009). Esimerkiksi 1 bar paineeseen tasapainotettu kappale määrittäisi teoriassa sellaisten huokosten määrän, jotka täyttyvät kapillaarisesti vedellä noin 10 m korkeuteen asti.

Käytännössä näin suuria nousukorkeuksia on harvoilla materiaaleilla; pienten huokosten seassa on riittävästi suurempia huokosia, jotka katkaisevat nousun. Mikäli pienten huokosten verkosto on jatkuva, voi kapillaarinen kyllästyskosteus olla erisuuri eri korkeuksilla (Martys & Ferraris 1997, Ioannou et al. 2008). Tämä aiheuttaa verrattain suuren virhelähteen myös kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden määrittämiseen; luotettava kyllästyskosteuspitoisuus voidaan mitata vain koekappaleille, joiden huokoskokojakauma on kapea, ja joissa kapillaarinen nousukorkeus on merkittävästi tutkittavan kappaleen korkeutta suurempi.

Yksi tapa arvioida kapillaarista nousukorkeutta on ”bubbling pointin (Huang 2003 s.19)” määrittäminen (Leppänen 2013). Bubbling point voidaan käsittää paineena, jolla täysin vedellä kyllästetyn kappaleen läpi pystytään johtamaan ilmakupla. Paineen suuruuteen vaikuttaa huokoskoko sekä huokosten yhteydet toisiinsa. Suurimman yhtenäisen huokosverkon huokossäteen halkaisija voidaan arvioida paineen avulla. Tämän paineen

tai huokossäteen avulla voidaan arvioida, mille vähimmäiskorkeudelle vesi nousee kapillaarisesti (Leppänen 2013).

Jos materiaalissa ei ole kahta erisuurta huokoskoon keskittymää ja huokoskokojakautta on muutenkin kapea, on bubbling pointin avulla määritetty kapillaarinen nousukorkeus todennäköisesti riittävän hyvä arvio. Bubbling pointin määrittämiseen rakennusmateriaaleille ei ole olemassa testimetodia (Huang 2003 s.19). Maaperän tutkimuksessa tähän on kuitenkin kehitetty laitteisto (Leppänen 2013), jonka kehittäminen edelleen rakennusmateriaaleilla toimivaksi voisi olla mahdollista.

Kapillaarinen nousukorkeus on kokemusperäisesti tiedossa myös pienihuokosisille materiaaleille, kuten betonille. Käytännössä vesivirtauksen loppuminen johtuu huokosverkoston epäjatkuvuudesta, jota teoria ei huomioi. Edellä mainitut epävarmuustekijät kapillaarisen nousukorkeuden määrittämisessä sekä teoreettiset epävarmuustekijät, kuten huokoskoon epäjatkuvuudet johtavat siihen, että kapillaarista nousukorkeutta on vaikea huomioida laskennassa. Tämä aiheuttaa virheen laskennan tuloksiin.

2.4.3 Kyllästymättömän kosteusvirran teoria, Richardin yhtälö

Kapillaarisen kosteusalueen nestevirtoja hallitsee paine-ero. Tämän fysikaalisen faktan vuoksi Darcyn laki (2.6) on tässäkin yhteydessä otettu laskennan pohjaksi. Tällä lähestymistavalla on pitkä historia maaperän kosteusvirtojen laskennassa (Hall 1989 ja 2007, Janz 2002). Darcyn laista johdetuilla yhtälöillä on lisäksi todettu hyvä yhtenevyys käytännön mittaustuloksiin (Pel et al. 1995; Lockington et al. 1999; Wilson et al. 1999; Hall 2007).

Koska kosteuden siirrossa materiaaliominaisuudet muuttuvat jatkuvasti kosteuspitoisuuden muuttuessa, niin kosteudensiirtoa kuvaavat yhtälöt täytyy muotoilla differentiaaliseen muotoon. Kaavan (2.6) vasemmalla puolella merkitty kosteusvirran vektori jaetaan osiin, ja etäisyyskoordinaatit jaetaan puolittain oikealle puolelle. Kun hydrostaattinen paine jätetään huomioon ottamatta, jäljelle jää kapillaarinen paine-ero (P_c) [Pa]. Hydrostaattisen paineen eli gravitaation huomiotta jättäminen ei useimmilla rakennusmateriaaleilla aiheuta merkittävää virhettä (Hall 1989, Lockington et al. 1999; Carmeliet et al. 2004). Edellytyksenä on, että imukorkeudet ovat maltillisia, mutta myös poikkeuksia löytyy (Hall 2007). Näin saadaan yleisesti tunnettu Richardin yhtälö (2.11) (Hall 2007, Scheffler 2008).

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot (\kappa \nabla P_c) \quad (2.11)$$

Nyt on helppo nähdä yhteys Darcyn- ja Fickin lain välillä, kun otetaan huomioon tunnettu kosteuspitoisuuden ja huokosalipaineen yhteys. Kun tämä lasketaan auki, niin saadaan epälineaarinen diffuusioyhtälö (2.12), joka on vektorimuotoisena esitetty luvussa 2.3.5.

$$D_{w,s}(w) = \kappa \frac{dP_c}{dw}$$

$$\Rightarrow \frac{\partial w}{\partial t} = \nabla (D_{w,s}(w) \nabla w) \quad (2.12)$$

Otetaan käsittelyyn yksiulotteinen tapaus, ja sijoitetaan kaavaan (2.12) Boltzmannin muuttuja (λ), jonka avulla yhtälö saadaan yksinkertaistettua (2.13). Seuraavien reunaeh-
tojen tulee toteutua:

- (1) Kokeen alkaessa kosteuspitoisuus kappaleessa on vakio.
- (2) Kosteuspitoisuus pysyy vakiona kappaleen vedenimun vastaisella pinnalla.
- (3) Vesipitoisuus imupinnalla on vakio, käytännössä kapillaarinen kyllästyskosteus-
pitoisuus. (Hall et al. 1983; Lockington et al. 1999; Carmeliet et al. 2004;
Bomberg et al. 2005)

Lisäksi yksiulotteisen virtauksen toteutuminen vaatii seuraavat ehdot:

- Imusuuntaan kohtisuoran pinta-alan tulee olla vakio.
- Kappaleen kyljet tulee olla suojattu niin, että niiden kautta ei tapahdu kosteuden
siirtoa. (Hall et al. 1983; Bomberg et al. 2005)

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{w,s}(w) \frac{\partial w}{\partial x} \right) \wedge \lambda = \frac{x}{t^{1/2}}$$

- (1) $w = w_0; x \geq 0; t = 0$
- (2) $w = w_0; x \rightarrow \infty; t > 0$
- (3) $w = w_B; x = 0; t > 0$

$$\Rightarrow \frac{-\lambda}{2} \frac{dw}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left(D_{w,s}(w) \frac{dw}{d\lambda} \right)$$

- (1) $\lambda = 0; w = w_B$
- (2) $\lambda \rightarrow \infty; w = w_0$

(2.13)

Yhtälössä (x) [m] on etäisyys kosteuslähteestä. Vedenimukokeessa alkukosteuspitoisuus (w_0) [kg/m³] on usein lähes kuiva ja imupinnan kosteuspitoisuus (w_B) [kg/m³] lähellä ka-
pillaarista kyllästyskosteuspitoisuutta (Hall et al. 1983; Carmeliet et al. 2004). Nyt
nähdään, että kosteuspitoisuus voidaan esittää Boltzmannin muuttujan funktiona ilman
aika- ja etäisyysriippuvuutta. Yhtälöstä (2.13) voidaan johtaa kapillaarinen kosteusdiffu-
siviteetti ($D_{w,s}$) kosteuspitoisuuden funktiona (2.14) (Parlange et al. 1992, Pel et al.
1995; Krus 1996; Carmeliet et al. 2004; Pavlík & Černý 2012).

$$D_{w,s}(w) = \frac{-1}{2} \frac{d\lambda}{dw} \int_{w_0}^{w_B} \lambda dw, \quad (2.14)$$

Ratkaisu yhtälölle on esitetty lähteessä (Parlange et al. 1992), mutta kapillaarisen kos-
teusdiffusiviteetin määrittäminen tällä tavoin ei ole diplomityön tavoitteena. Mielenkiin-

toista puolestaan on edellä esitetyn yhteys veden imeytyvyyteen (S) [$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-0.5}$] ja sitä kautta myös veden imeytymiskertoimeen (A_w) [$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-0.5}$] (ks. kaava 2.17).

2.4.4 Veden imeytymiskerroin

Kapillaarisen kosteusdiffusiviteetin määrittävästä yhtälöstä (2.14) voidaan muutaman välivaiheen jälkeen ratkaista veden imeytyvyys (Parlange et Al. 1992, Hall 2007). Kumulatiivinen imeytynyt veden määrä (i) [kg/m^2] voidaan laskea millä tahansa ajanhetkellä (2.15), mikäli kosteuspitoisuus tunnetaan kosteuslähteen etäisyyden (x) [m] funktiona (Hall 1989).

$$i = \int_{w_0}^{w_B} x \, dw \quad (2.15)$$

Koska Boltzmannin muunnos pätee, voidaan edelleen merkitä (2.16).

$$i = t^{1/2} \int_{w_0}^{w_B} \lambda \, dw \quad (2.16)$$

Määritellään veden imeytyvyys (2.17) (Hall et al. 1983)

$$S = \int_{w_0}^{w_B} \lambda \, dw, \quad (2.17)$$

jonka huomataan esiintyneen jo kaavoissa (2.14) ja (2.16). Edelleen huomataan, että veden imeytyvyys on alku- ja loppukosteudesta riippuva vakio (Hall 1989). Veden imeytymiskerroin on veden imeytyvyyden erikoistapaus, jossa integraalin alkukosteuspitoisuus (w_0) on standardin SFS-EN ISO 15148 (2002) mukainen ja loppukosteuspitoisuus kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus, joka teoriassa saavutetaan, kun kappale on kosketuksessa vapaaseen veteen (Carmeliet et al. 2004).

Nyt on määritelty veden imeytymiskerroin kyllästymättömän kosteusvirran teoriaan pohjautuen. Tämä teoria on osoitettu paikkansa pitäväksi useimmilla huokoisilla rakennusmateriaaleilla (Hall 1989; Roels et al. 2004; Bomberg et al. 2005; Hall 2007; Vejmelková et al. 2009). Poikkeuksia on havaittu lähinnä materiaaleilla, joilla gravitaation vaikutusta ei pystytä eliminoimaan, tai sellaisilla materiaaleilla, jotka reagoivat kemiallisesti veden kanssa (Bomberg et al. 2005; Hall 2007; Ioannou et al. 2008).

Veden imeytymiskertoimen avulla voidaan määrittää kapillaarinen kosteusvirta (g_{cap}) [$\text{kg/m}^2\text{s}$] (2.18) (Hagentoft 2001 s.101). Edellä esitetyn teorian avulla veden imeytymiskerointa voidaan korjata niin, että se kuvaa kosteusvirtaa todellisesta alkukosteuspitoisuudesta (Hall et al. 1983; Lockington et al. 1999). Korjauksen tekeminen vaatii kosteusdiffusiviteetin kosteusriippuvuuden muodon tuntemista (Hall 1989). Alkukosteuspitoisuus on usein hygroskooppisella alueella, ja kosteuspitoisuuden erot jäävät helposti muiden laskennan virhelähteiden varjoon. Kosteusdiffusiviteetin heikosti tunnetun funk-

tionaalisen muodon sekä pienen alkukosteuspitoisuuden eron vuoksi korjausyhtälöä ei nyt esitellä.

$$g_{cap} = \frac{A_w}{2\sqrt{t}} \quad (2.18)$$

Kyllästymättömän kosteusvirran teoriasta voidaan veden imeytymiskertoimelle johtaa muitakin tutkimuksissa käytettyjä riippuvuussuhteita. Hall on esittänyt vettä imemättömien täyteaineiden lisäämisen vaikutuksen veden imeytymiskertoimeen, joka on määritetty täyteaineettomalle materiaalille (Lockington et al. 1999 katso Hall et al. 1993). Tätä yhteyttä ei esitetä tarkemmin, koska yleensä veden imeytymiskertoimet määritetään materiaalille, jossa täyteaine on mukana.

Yhdistämällä Darcyn laki (2.6) ja Laplacen yhtälö (2.9) nähdään veden imeytymiskertoimen skaalautuvuus pintajännityksen ja viskositeetin suhteen (2.19).

$$\frac{A_{w,1}}{A_{w,2}} = \left(\frac{\sigma_1 \eta_2}{\sigma_2 \eta_1} \right)^{1/2} \quad (2.19)$$

Yhteyttä on käytetty esimerkiksi kyllästymättömän kosteusvirran teorian poikkeamien tutkimiseen; pintajännityksen ja viskositeetin skaalauksen avulla voidaan verrata imukokeita, jotka on tehty eri lämpöisillä vesillä tai eri nesteillä. (Hall et al. 1983; Hall 1989; Mukhopadhyaya et al. 2002; Hall 2007; Ioannou et al. 2008)

2.4.5 Veden tunkeutumiskerroin

Veden tunkeutumiskerroin voidaan laskea, jos kosteuspitoisuuden oletetaan muuttuvan vedenimukokeessa etenevässä vesirintamassa kapillaarisesta kyllästyskosteuspitoisuudesta alkukosteuspitoisuuteen hyvin lyhyellä matkalla. Tämän yksinkertaistuksen avulla kapillaarisen kosteusdiffusiviteetin laskeminen kyllästymättömän virtauksen teoriasta on ollut yksinkertaisempaa (Parlange et al. 1992). Tästä yksinkertaistuksesta päästään eroon joko sopivalla matemaattisella analyysillä ja uusilla yksinkertaistuksilla tai käyttämällä numeerisia laskentamenetelmiä (Kumaran 2006; Scheffler 2008).

Aiemmin esiteltiin Boltzmannin muuttuja, joka on itse asiassa epälineaarisen diffuusioyhtälön (2.12) ratkaisu luvussa 2.4.3 annetuilla ehdoilla. Kun lisäksi lukitaan alku- ja loppukosteuspitoisuus, muuttuu Boltzmannin muuttuja vakioksi, joka voidaan merkitä veden tunkeutumiskertoimeksi (2.20).

$$B_w = \frac{x}{t^{1/2}} \quad (2.20)$$

Veden tunkeutumiskertoimen (B_w) [$m/s^{1/2}$] (Hagentoft 2001 s.101) yhteys veden imeytymiskertoimeen nähdään kaavasta (2.17). Merkitään yhteys määriteltyjen materiaaliominaisuuksien avulla (2.21).

$$A_w = B_w w_{cap} \quad (2.21)$$

Näistä kolmesta materiaaliominaisuudesta helpointa on määrittää veden imeytymiskerroin; veden imeytymiskerroin voidaan määrittää suoraan painonmuutoksen avulla. Veden tunkeutumiskertoimen ja kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden selvittämiseksi täytyy saada tietoa vesirintaman etenemisestä.

2.4.6 Kapillaarisen kosteusdiffusiviteetin määrittäminen veden imeytymiskertoimen avulla

Veden imeytymiskerroin voidaan määrittellä kyllästymättömän kosteusvirran teorian avulla. Koska veden imeytymiskerroin on tietyin reunaehdoin määritetty johdannainen, ei kapillaarista kosteusdiffusiviteettia saada sen avulla määriteltä analyttisesti. Kapillaarisen kosteusdiffusiviteetin suora määrittäminen on hankalaa ja kallista, koska laskennan lähtötiedoiksi tarvitaan tieto materiaalin kosteuspitoisuuksista eri ajanhetkillä (Hall et al. 1983; Kumaran 1999; Janz 2002; Carmeliet et al. 2004; Pavlík & Černý 2012). Veden imeytymiskerroin on kuitenkin verrattain helppo määrittää, joten korrelaatioita mitatun veden imeytymiskertoimen ja kosteusdiffusiviteetin välille on tutkittu ja esitetty paljon (Kumaran 1999; Lockington et al. 1999; Janz 2002; Mukhopadhyaya et al. 2002; Huang 2003).

Seuraavassa on koottu eri lähteistä kosteusdiffusiviteetin korrelaatiokaavoja, joissa muuttujina ovat veden imeytymiskerroin ja kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus (2.22-2.27). Mukaan on otettu myös sellaisia korrelaatiokaavoja, joihin tarvitaan myös muita tuntemattomia materiaalikohtaisia vakioita (a, b). (Kumaran 1999; Lockington et al. 1999; Janz 2002; Mukhopadhyaya et al. 2002; Huang 2003)

$$(1) D_{w,s} = \left(\frac{A_w}{w_{cap}} \right)^2 \frac{b^2}{2b-1} e^{b \left(\frac{w}{w_{cap}} - 1 \right)} \text{van Schindel et al. (1993)} \quad (2.22)$$

$$(2) D_{w,s} = a \left((b+1) \left(\frac{w}{w_{cap}} \right)^{\frac{1}{b}} - b \left(\frac{w}{w_{cap}} \right)^{\frac{2}{b}} \right) \text{Fechner (1997)} \quad (2.23)$$

$$(3) D_{w,s} = 6,74 \cdot 10^{-3} \left(\frac{A_w}{w_{cap}} \right) e^{\frac{6,4}{w_{cap}} \cdot w} \text{Depratere et al. (1999)} \quad (2.24)$$

$$(4) D_{w,s} = 3,8 \cdot \left(\frac{A_w}{w_{cap}} \right)^2 \cdot 1000^{\frac{w}{w_{cap}} - 1} \text{Kunzel (1995)} \quad (2.25)$$

$$(5) D_{w,s} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{A_w}{w_{cap}} \right)^2 \text{Kunzel (1993)} \quad (2.26)$$

$$(6) D_{w,s} = 10^{a+b \cdot w} \text{Bednar (2000)} \quad (2.27)$$

Kosteusdiffusiviteetin kosteusriippuvuuden funktionaalista muotoa on tutkittu. Esitellään yksittäinen ratkaisu (2.28), joka on johdettu kyllästymättömän kosteusvirran teo-

riasta olettaen Neperin kantainen eksponentiaalinen riippuvuus. Lockington et al. (1999) on koonnut teorian perusteluineen.

$$D_s = D_0 e^{\frac{w-w_0}{w_{cap}-w_0} \cdot n}$$

$$D_0 = \frac{\left(\frac{A_w}{w_{cap}-w_0}\right)^2}{\left(\frac{2}{n} - \frac{1}{n^2}\right) e^n - \frac{1}{n} + \frac{1}{n^2}}, \quad (2.28)$$

jossa n on vapaasti valittava muuttuja, jolle voidaan ainakin laastien tapauksessa perustellusti antaa arvo 6. (Lockington et al. 1999)

Yksittäisen korrelaatiokaavan sijaan kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti voidaan määrittää eri alkukosteuspitoisuuksista määritettyjen veden imeytymiskertoimien ja kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden avulla. Janz on esittänyt Fickin lakiin (2.7) pohjautuvan laskentamenetelmän, jolla kosteusdiffusiviteetti saadaan määritettyä kosteuspitoisuuden askelfunktiona. Menetelmä on luotettavimmillaan suurilla kosteuspitoisuuksilla, jolloin kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti on merkittävin. Kuppikokeisiin yhdistämällä voidaan kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti määrittää luotettavasti koko kosteuspitoisuuden vaihteluvälille kuivasta kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen käyttämällä ainoastaan laboratoriovaakaa ja numeerisia laskentaohjelmia. (Janz 2002)

Kosteusdiffusiviteetin suora määrittäminen pienimmän neliösumman menetelmällä kyllästymättömän kosteusvirran teoriaa käyttäen on osoittautunut haastavaksi (Kumaran 1999). Matemaattisista menetelmistä riippuen voidaan saada hyvin eriäviä tuloksia (Kumaran 1999; Carmeliet et al. 2004). Esimerkiksi kaavalla (2.26) laskettu kosteusdiffusiviteetin keskiarvo antaa laajalla kosteuspitoisuusalueella kohtalaisen hyvän arvion kosteusdiffusiviteetin arvosta (Mukhopadhyaya et al. 2002). Eksponentiaalisella korrelaatiolla on puolestaan kohtalaisen hyvä vastaavuus korkeilla kosteuspitoisuuksilla (Kumaran 1999). Tästä seuraa, että korrelaatiokaavoilla (2.22-2.28) lasketut kosteusdiffusiviteetit ovat varsin hyviä laskennan lähtötietoja, mikäli materiaalikohtaiset vakiot (a , b , n) on saatu määritettyä oikein. Työmäärältään raskaammalla Janzin (2002) menetelmällä näiden vakioiden määrittäminen on mahdollista ilman kosteusprofiilin mittaamiseen sopivia laitteita.

2.4.7 Kyllästymättömän kosteusvirran teorian tunnetut epävarmuudet

Kyllästymättömän kosteusvirran teoria perustuu kapillaarisiin voimiin. Teorian paikkansapitävyyttä on helppo tarkastella edellä esitettyjen matemaattisten yhteyksien avulla. Tosin esitettyyn teoriaan huonostikaan istuvat koetulokset eivät yksistään osoita teoriaa kelvottomaksi (Bomberg et al. 2005; Hall 2007; Ioannou et al. 2008). Teoriasta poikkeaville mittaustuloksille voidaan monissa tapauksissa löytää koetilanteen epävarmuuksista

johtuva teorian mukainen selitys (Hall 1989; Wilson et al. 1999; Roels et al. 2004; Bomberg et al. 2005; Ioannou et al. 2008; Vejmelková et al. 2009).

Veden imeytymiskertoimen määrittämiseksi tehtävässä vapaan veden imeytyskokeessa veden aiheuttama painonnousu tulisi olla lineaarista ajan neliöjuuren suhteen (ks. luku 2.4.4). Poikkeamia tästä teoriasta on saatu esiin useissa kokeissa (Wilson et al. 1999; Roels et al. 2004; Bomberg et al. 2005; Hall 2007; Ioannou et al. 2008; Plagge et al.). Osa poikkeamista voidaan selittää koejärjestelyjen virheillä, joita esitellään tarkemmin luvussa 3.3. Lisäksi ainakin hitausvoiman puuttuminen Richardin yhtälöstä (2.11) aiheuttaa virhettä (Hall 2007; Martys & Ferraris 1997). Eri alkukosteuspitoisuuksista tehdyt kokeet osoittavat, että suurimmat huokokset täyttyvät nopeimmin vedenimukoeksessa (Hall et al. 1983; Martys & Ferraris 1997; Janz 2002). Richardin yhtälön mukaan vesirintama etenee pienimpiä huokosia pitkin (Hall 2007). On myös olemassa todisteita, että kapillaarisesti aktiivisiin huokosiin voi jäädä ilmaa, jos niiden ympärillä olevat huokokset ovat täynnä vettä (Bomberg et al. 2005; Hall 2007; Ioannou et al. 2008).

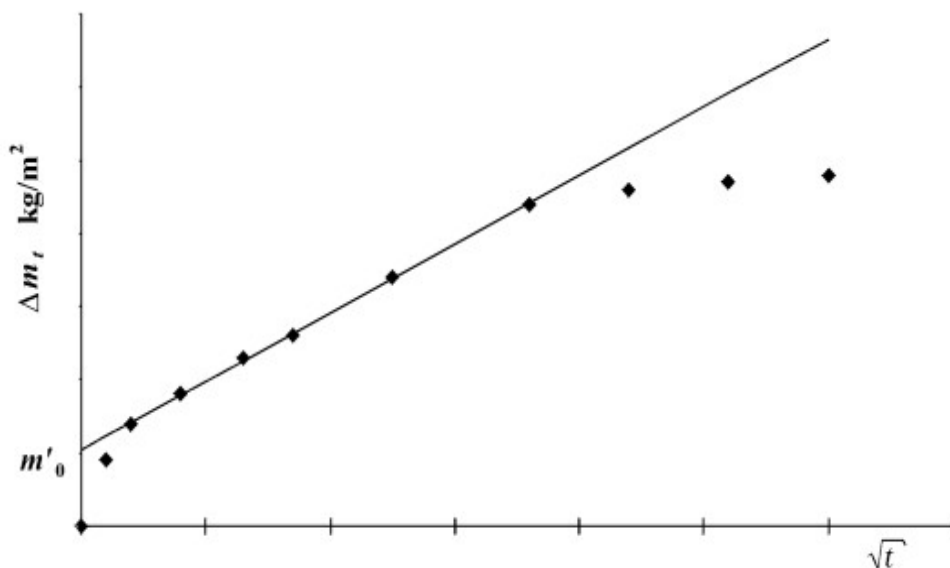
Veden imeytymiskerroin skaalautuu pintajännityksen ja viskositeetin sekä tiheyden avulla vastaamaan muita nesteitä (ks. kaava 2.19). Vedenimukoetta vastaavia kokeita on tehty ainakin alkoholilla ja n-dekaanilla sekä eri lämpöisillä vesillä (Mukhopadhyaya et al. 2002; Hall 2007; Ioannou et al. 2008; Pavlík & Černý 2012). Vertailukokeet osoittavat, että skaalaus pitää useimmilla materiaaleilla paikkansa (Mukhopadhyaya et al. 2002; Hall 2007). Myös poikkeavia tuloksia on havaittu (Mukhopadhyaya et al. 2002; Hall 2007; Ioannou et al. 2008). Joissain tapauksissa poikkeava tulos on noudattanut odotettua painonnousua, ja luotettavan oloinen veden imeytymiskerroin on saatu määritettyä (Hall 2007). Tämän uskotaan johtuvan materiaalin kiintoaineksen herkkyydestä vedelle; huokosissa esiintyy ilmeisesti muitakin kuin edellä esiteltyjä kapillaarisia voimia (Hall 2007; Ioannou et al. 2008). Vastaavaa herkkyyttä vedelle on havaittu myös muun tyyppisissä kokeissa; Krus on tutkinut huokosjakaumaa elohopeaporosimetrillä sekä painelevylaitteella, ja tuloksissa on näkynyt poikkeamia, jotka selittyvät materiaalin kiintoaineen ja veden reaktioista (Kurs & Kiebl 1998).

Poikkeamien selittämiseksi teoriaan on esitetty korjauksia (Hall 2007). Uudenlainen lähestymistapa tai uudet lisäkertoimet kosteusvirran yhtälöön tuovat kuitenkin lisää työtä materiaaliominaisuuksien määrittämiseen. Edellä esitetty epälineaarinen diffuusioyhtälö (2.12) kuvaa kosteudensiirtoa oikein ainakin useimmissa veden kanssa reagoimattomissa huokoisissa materiaaleissa (Hall et al. 1983; Martys & Ferraris 1997; Kurs & Vik 1999). Siksi edellä mainittuihin poikkeamiin ei nyt oteta tarkemmin kantaa.

3 VEDEN IMEYTYMISKERTOIMEN MÄÄRITTÄMINEN

Vapaan veden imeytyskokeita käytetään useiden materiaalien luokitteluun. Kokeessa tutkittava kappale asetetaan alapinnastaan vesikosketukseen ja tämän jälkeen seurataan veden imeytymistä. Koe voidaan tehdä myös jotain muuta nestettä kuin vettä käyttäen (Hall 1989). Yleisimmin veden imeytymistä seurataan koekappaleen punnituksilla, mutta esimerkiksi röntgenkuvauslaitteella voidaan mitata kosteuden jakaantumista kappaleen sisällä (Carmeliet et al. 2004). veden imeytymiskerrointa määritettäessä punnituksia tehdään yleensä vähintään viisi, ja ne pyritään tekemään ennen kuin vesirintama saavuttaa kappaleen yläpinnan. Mikäli teorian mukaiset reunaehdot toteutuvat (ks. luku 2.4.3), saadaan veden imeytymiskerroin määritettyä.

Veden imeytymiskerroin on sellaisen suoran kulmakerroin, joka voidaan piirtää kumulatiivista veden imeytymistä kuvaavien aika–paino -pisteiden kautta, kun painolukemat piirretään koordinaatistoon ajan neliöjuuren funktiona (Kuva 3.1). Tämä on johdettavissa teoriasta (ks. kaavat 2.11–2.17). Taustalla on matemaattinen operaatio, jossa Richardin yhtälöön (2.11) sijoitetaan Boltzmannin muuttuja (λ). Jotta Boltzmannin muuttujaa voidaan käyttää, täytyy asettaa reunaehtoja (ks. kaava 2.13 ehdot). Vaikka Boltzmannin muunnos toteuttaa epälineaarisen diffuusioyhtälön (2.12), tarvitaan empiirisiä kokeita, jotka osoittavat matemaattisen teorian istumisen käytäntöön.



Kuva 3.1: Esimerkki painonnousun kuvaajasta (SFS-EN ISO 15148 2002).

Monissa standardien mukaisissa vapaan veden imeytyskokeissa voidaan määrittää veden imeytymiskerrointa vastaava suure, joka ei kokeen väljien reunaehtojen vuoksi täysin vastaa edellä esitettyä teorian mukaista veden imeytymiskerrointa. Teorian mukainen veden imeytymiskerroin voidaan määrittää esimerkiksi standardin SFS-EN ISO 15148 (2002) avulla. Kokeen toistettavuuden takaamiseksi vielä tarkemmille ohjeistuksille on tarvetta (Roels et al. 2004, Scheffler 2008 s.71).

Aiemmissä tutkimuksissa on esitetty kritiikkiä ja parannusehdotuksia vapaan veden imeytyskokeeseen, jotta toistettavampia tuloksia voitaisiin saavuttaa. Tutkimuksia on tehty virhelähteiden vaikuttavuuksista niin käytännön kuin teorian tasolla. Kehitettävää löytyy niin mittaustekniikasta, koekappaleiden valmisteluista kuin tulosten analysoinnista. (Sabir et al. 1988; Huang 2003; Roels et al. 2004; Bomberg et al. 2005; Ioannou et al. 2008; Vejmelková et al. 2009) Seuraavassa esitetään standardien ja joidenkin artikkeleiden mukaiset mittausmenetelmät. Myös katsaus tutkittuihin sekä odotettavissa oleviin virhelähteisiin esitetään.

3.1 Standardit

Standardia SFS-EN ISO 15148 (2002) on käytetty käytännön kokeiden ohjenuorana, kun on määritetty veden imeytymiskerrointa vapaan veden imeytyskokeella. Seuraavassa on referoitu toteuttamisen kannalta tärkeimmät kohdat tästä standardista. Myös NTBuild ja ASTM -standardeista löytyy lähes vastaavat veden imeytyskokeet, joiden tuloksista lasketaan vastaava veden imeytymiskerroin.

Vapaan veden imeytyskoetta käytetään muidenkin materiaaliominaisuuksien määrittämiseen; joillekin materiaaleille on annettu oma vedenimukyvyn määrittämiseen tarkoitettu standardi. Myös näitä standardeja on käyty läpi; muista standardeista on etsitty käyttökelpoisia ohjeistuksia ISO-standardin vaatimuksia täydentämään.

3.1.1 SFS-EN ISO 15148 (2002)

Standardi (SFS-EN ISO 15148 2002) esittää metodin, jolla voidaan määrittää lyhytaikainen veden imeytymiskerroin osittaisella upotuksella ilman lämpötilaeroja. Lyhytaikaisella veden imeytymiskertoimella on tarkoitus kuvata materiaalin vettymistä esimerkiksi sateen aikana. Kokeen tuloksia ei ole tarkoitettu sovellettaviksi pysyvässä vesikosketuksessa oleville materiaaleille.

Koe voidaan suorittaa homogeeniselle materiaalille, jonka ominaisuudet ovat vakiot makroskooppisessa mittakaavassa. Koekappaleen imemä vesimäärä määritetään punnitsemalla määrääjain koekappaletta, jonka alapinta on vesikosketuksessa yleensä vähintään 24 h ajan.

Koekappaleiden tulee edustaa materiaalia tai tuotetta. Muodon tulee olla säännöllinen, ja imupinnan kanssa yhdensuuntaisen pinta-alan tulee olla vakio koko koekappaleen paksuudelta. Koekappaleita tulee olla vähintään kolme, ja yhteenlasketun imupinta-

alan tulee olla vähintään 300 cm². Jos pinta-ala on alle 100 cm²/kappale, tulee koekappaleita olla vähintään kuusi. Yleisesti pinta-ala tulee olla vähintään 50 cm² tai kappaleen sivumitan tai halkaisijan vähintään kymmenen kertaa suurin materiaalin partikkelikoko. Vastaavasti paksuuden tulee olla vähintään viisi kertaa suurin partikkelikoko, mieluummin kymmenen kertaa suurin partikkelikoko. Yleisohjeena paksuudelle on käyttää tuotteen tavanomaista kokonaispaksuutta ja välttää ohuita kappaleita, jotka vaurioituvat käsiteltäessä.

Koekappaleet leikataan menetelmällä, joka ei muuta materiaalin huokosrakennetta. Pintojen epäsäännöllisyydet tulee poistaa, mutta mahdollisia pinnoitteita tai vastaavia tarkoituksella luotuja pintakerroksien poikkeamia ei poisteta. Pinnoitteiksi tarkoitetut materiaalit valmistetaan tavanomaiselle käyttöalustalleen, jolloin koekappaleen paksuutena pidetään käyttöalustan ja pinnoitteen yhteispaksuutta. Imupinnan tulee olla suora ja vastata tavanomaista materiaalin karkeutta.

Mikäli materiaali ei ole isotrooppinen, tulee koesarja valmistella jokaiseen normaali-käytössä potentiaaliseen vedenimusuuntaan. Koekappaleen sivut suojataan materiaalilla, joka ei reagoi materiaalin kanssa kemiallisesti eikä juurikaan imeydy materiaalin pinta-huokosiin. Erityistä huolellisuutta vaaditaan, jos kysymyksessä on kerroksellinen materiaali, jossa imupinta on verrattain tiivis. Hyvin huokoiset ja pehmeät materiaalit, joiden sivut on vaikea pinnoittaa, voidaan asettaa tiukasti istuvaan muoviputkeen. Imupinnalla voidaan käyttää esimerkiksi metalliverkkoa, joka tukkii imupintaa mahdollisimman vähän, mutta estää materiaalin tippumisen putkesta. Mikäli kylkisuojuukseen käytetään putkea, tulee imupinta-ala olla vähintään 100 cm².

Kokeen suorittaminen

Ennen koetta koekappale tasapainotetaan koetilan olosuhteissa, kunnes massan muutos on stabiloitunut ja on alle 0,1 % / 24 h. Tarkempia tasapainotusohjeita annetaan standardissa ISO 12570. Koetilan suhteellisen kosteuden tulee olla välillä 40–60 % RH. Sallittu vaihtelu kokeen aikana on ±5 % RH. Vastaavasti lämpötilan tulee olla 18–28 °C ±2 °C. Myös kappaleeseen imeytettävä vesi tulee tasapainottaa koetilan lämpötilaolosuhteisiin. Koe voidaan tehdä käyttäen vesijohtovettä.

Tasapainotuksen jälkeen koekappaleiden paino tulee määrittää vähintään tarkkuudella ±0,1 % koekappaleen sen hetken massasta. Punnitsemisen jälkeen kappaleet asetetaan vesiastiaan kannattimien varaan siten, että imupinta on vähintään 5 mm irti astian pohjasta ja imupinta on veden alla 5±2 mm. Epätasaisen imupinnan tapauksessa maksimi upotussyvyys voi olla tätäkin suurempi. Upotussyvyys ei saa vaihdella testin aikana enempää kuin ±2 mm. Veteen asetettaessa täytyy huolehtia, että imupinnalle ei jää kuplia. Tarvittaessa koekappaleen päälle asetetaan paino, jos se ei muuten pysy kannattimien varassa. Samalla tulee huolehtia, etteivät kannattimet vaurioita koekappaleen imupintaa.

Upotushetkellä käynnistetään ajanotto, jonka virheen tulee olla alle 1 s / 24 h. Koekappale punnitaan ensimmäisen kerran noin 5 min vesikosketuksen alkamisesta. Punnit-

taessa kappale poistetaan vedestä ja märät pinnat pyyhitään kostealla sienellä kappaleeseen imeytymättömän veden poistamiseksi. Punnitusprosessin aikana kappale ei saisi olla pois vesikosketuksesta enempää kuin minuutin. Punnituksia toistetaan esimerkiksi 20 min, 1, 2, 4, 8 ja 24 h veden imeyttämisen alkamisesta. Tarkka punnitusaika ja massa kirjataan ylös.

Punnitusten onnistumista tulee tarkastella välittömästi punnitusten jälkeen laskemalla tulokset alla olevan ohjeen mukaisesti. Etenkin kokeen alussa on usein epälineaarisuutta, joka ei ole merkki punnitusvirheestä (ks. luku 3.3.1). Virheelliseksi epäilty punnitustulos osataan tarkistaa, jos lukema ei koordinaatistossa näytä istuvan oletettuun käytökseen.

Koe voidaan lopettaa, jos vesi saavuttaa koekappaleen yläpinnan. Vaihtoehtoisesti, jos painonnousu on alle 1 g/m^2 ensimmäisen kahdeksan tunnin imeytyksen jälkeen, voidaan testi keskeyttää ja materiaali todeta vesitiiviiksi.

Tulosten laskenta

Koekappaleen imupinta-ala lasketaan neliömetreinä. Jos koekappale on asetettu putkeen, pinta-alana käytetään putken suuaukon avointa pinta-alaa. Koekappaleen painon muutos alkupainoon verrattuna lasketaan ja suhteutetaan imupinta-alaan. Pinta-alaan suhteutettu painon muutos (i) [kg/m^2] piirretään neliöjuuri ajan funktiona ($\Delta m/A; \sqrt{t}$) -koordinaatistoon.

Koordinaatistoon piirrettynä painon muutoksen kuvaaja voi olla kahta eri tyyppiä. Tyypin A kuvaajassa punnitustulosten kautta voidaan piirtää suora, kun mittauksen alun häiriöt jätetään huomiotta. Mikäli painonnousun kuvaajassa näkyy selvä taitekohta, oletetaan nestemäisen veden saavuttaneen kappaleen yläpinnan. Tässä tapauksessa tätä taitekohtaa myöhemmät punnitustulokset jätetään huomioon ottamatta, kun suoraa sovitetaan painon muutoksen kuvaajaan. Veden imeytymiskerroin on sovitesuoran kulmakerroin.

Tyypin B painon muutoksen kuvaajassa ei ole lineaarista osuutta lainkaan. Tässä tapauksessa veden imeytymiskerroin määritetään 24 h ajanjaksolla tapahtuneen painon muutoksen perusteella. Mikäli koekappaleessa havaitaan vettä yläpinnalla ennen 24 h määräaika, ilmoitetaan aika, jona vesi saavutti kappaleen yläpinnan, eikä veden imeytymiskerrointa määritetä lainkaan.

Tulosten epävarmuus ei mittalaitteiden tiukoista tarkkuusvaatimuksista johtuen riipu juurikaan mittalaitteiden virheistä. Suurin virhelähde on koekappaleen käsittely punnituksen yhteydessä. Käsittelyn virheiden havaitsemiseksi tulokset suositellaan piirrettäväksi koordinaatistoon heti punnituksen yhteydessä, jolloin karkeat virheet voidaan eliminoida toistamalla punnitus. Kulmakertoimen määrittämisen yhteydessä voidaan laskea myös keskivirhe ja luotettavuusrajat. Jos suora piirretään kahdeksan punnitustuloksen avulla ja kunkin punnituksen keskivirhe on $\pm 5 \%$, saadaan kulmakertoimen keskivirheeksi noin $\pm 4 \%$.

3.1.2 ASTM C1585-13 (2013)

Merkittävänä erona edellä esitettyyn ISO-standardiin on, että tämä ASTM-standardi kattaa vain hydraulisesta sementistä valmistetut betonit. Tiukempi materiaalirajaus mahdollistaa myös spekulatiivisen veden imeytymiskertoimeen vaikuttavista tekijöistä, joita standardin mukaisesti ovat:

- (a) betonin sekoitussuhteet,
- (b) mahdollisten kemiallisten lisäaineiden ja täydentävien sementtimäisten aineiden määrä,
- (c) runkoaineen ja sementtimäisten aineiden koostumus ja fyysiset ominaisuudet,
- (d) huokosilmämäärä,
- (e) jälkihoitotapa ja kesto,
- (f) hydratoitumisaste ja ikä,
- (g) mikrohalkeamien esiintyminen,
- (h) mahdollinen muottiöljy tai muu pinnoite tai pintakäsittely ja
- (i) asennustapa sisältäen tiivistämisen ja viimeistelyn.

Näiden lisäksi veden imeytymiseen vaikuttaa voimakkaasti betonin alkukosteuspitoisuus.

Koekappaleiden tulee olla sylintereitä, halkaisijaltaan 100 ± 6 mm ja korkeudeltaan 50 ± 3 mm. Halkaisija mitataan työntömitalla 0,1 mm tarkkuudella vähintään neljästä kohdasta. Koekappaleita tarvitaan vähintään kaksi, ja niiden tulee olla joko valettuna muotoonsa tai porattuna erillisten standardien ohjeiden mukaan. Imupinta-alan vaihtelu ei saa olla imusuunnassa enempää kuin 1 %. Koekappaleissa tulee olla merkinnät alkuperäisen asennon määrittämiseksi. Molempien koekappaleiden tulee olla otettu samalta syvyydeltä, mikäli näyte on leikattu suuremmasta kappaleesta. Mahdollinen leikkuutyö tehdään vesijähdytetyllä timanttisahalla.

Leikatut koekappaleet kyllästetään vedellä käyttäen vakuumikyllästystekniikkaa. Koekappaleen paino kyllästyskosteudessa määritetään $\pm 0,01$ g tarkkuudella, minkä jälkeen kappale asetetaan tasapainottumaan. Tasapainotus 50 ± 2 °C lämpötilassa ja 80 ± 3 % RH suhteellisessa kosteudessa kestää kolme päivää. Tämän jälkeen kappale asetetaan kosteutta läpäisemättömään astiaan, jonka tilavuus on maksimissaan kuusi kertaa koekappaleen tilavuus. Säilytys tällaisessa astiassa kestää vähintään 15 päivää, jonka jälkeen kosteusolosuhteet koekappaleen huokosverkostossa on tasapainottunut vastaamaan tasapainokosteuspitoisuutta 50–70 % RH ilmassa.

Tasapainotettuna koekappaleiden kyljet suojataan. Kylkisuojausmateriaalit on listattu: kaistaleet heikosti kosteutta läpäisevää liimaantuvaa kalvoa, epoksimaali, sähkömiehen teippi (vinyyliä), ilmastointiteippi tai alumiiniteippi. Suojausmateriaalin jälkihoitotapa ei saa olla yli kymmentä minuuttia. Myös koekappaleen yläpinta suojataan. Suojaus tehdään esimerkiksi löysähköllä muovipussilla, joka tiivistetään kappaleen kylkiin kuminauhalla.

Kokeen suorittaminen ja tulosten laskenta

Vedenimeytys tehdään vesijohtovedellä, joka on tasapainotettuna mittaustilan lämpötilaan 23 ± 2 °C. Upotussyvyyden tulee olla koko kokeen ajan 1–3 mm. Vedenpinnan vakioimiseksi ehdotetaan ylösalaisin asetetun pullon käyttämistä; vedenpinta pysyy vakiona jos pullon suuaukko on vedenpinnan tasossa, veden laskiessa ilmaa pääsee pulloon ja näin pullosta pääsee vettä astiaan. Sopiva upotussyvyys voidaan kannattimien sijasta hoitaa myös käyttäen vesiasian pohjalla useaa kerrosta paksua paperia tai vastaavaa.

Suosittelut punnitusajat ovat 1, 5, 10, 20, 30, 60 min, 2, 3, 4, 5, 6 h, 2, 3, 4, 5, 7, 9 d. Punnitusajoille on annettu myös vaihteluvälit, mutta niitä ei esitetä tässä. Punnittaessa ajanotto pysäytetään, jos imuaika on alle 10 minuuttia. Koekappale kuivataan käyttäen kostutettua paperipyhettä tai rättiä. Punnituksen täytyy tapahtua 15 s kuluessa vesikon-taktin katkeamisesta.

Tulos lasketaan totutusti, mutta painoriippuvuus otetaan pois jakamalla painon muutoksen suuruus veden tiheydellä (1000 kg/m^3). Jos ensimmäisen kuuden tunnin ajanjak-solta, selvä imun hidastuminen pois lukien, ei saada lineaarista regressiota vähintään 0,98 korrelaatiolla, ei veden imeytymiskerrointa voida määrittää. Vastaavasti määrite-tään veden imeytymiskerroin ajanjaksolle 1–7 vrk, mikäli korrelaatioehto täyttyy. Tois-tettavuuden vaihteluväli on määritetty; koetulos voidaan toistaa 6 % tarkkuudella yksit-täisen koehenkilön suorittamana yksittäisessä laboratoriossa.

3.1.3 NT Build 368 (1991)

NT Build 368 -standardin (1991) määrittämä veden imeytymiskertoimen mittaustekniik-ka on sama kuin ISO-standardissa. Koe on määrätty kattamaan ainoastaan betonin kor-jauslaastit ja suojaavat pinnoitteet. Koekappaleita valmistellaan kolme, ja niistä saatua mittaustulosta verrataan betonikappaleisiin. Vertailukappaleiden betonin valmistuksessa tulee käyttää tavallista Portland sementtiä 300–350 kg betonikuutiometriä kohti. Vertai-lubetonin vesisementtisuhteen tulee olla $0,6\pm 0,01$, kartiopainuman 120 ± 20 mm ja mak-simi runkoainekoon 16 mm. Tarvittaessa voidaan käyttää notkistajaa, mutta ilmamäärää lisääviä aineita ei tule käyttää. Tiivistäminen tehdään Vebe-pöydällä, kunnes laasti on kunnollisesti asettunut ja tiivistynyt.

Myös koekappaleiden jälkihoito-ohjeet on annettu. Kappaleet poistetaan muotista en-simmäisen päivän jälkeen ja sijoitetaan 20 ± 2 °C veteen, kunnes valusta kulunut 14 päi-vää. Tämän jälkeen jälkihoito jatkuu 14 päivää ilmassa, jonka olosuhteet ovat 20 ± 2 °C ja 50 % RH. Jälkihoidon jälkeen mahdollinen testattava pinnoite asennetaan imu- ja si-vupintaan. Pinnoitteen jälkihoito tehdään valmistajan ohjeen mukaisesti. Sivusuojauk-sesta ei ole muita mainintoja, joten tulkitaan, että betonisia vertailukoekappaleita ei suo-jata sivuiltaan. Valmiit koekappaleet kuivataan seitsemän päivän ajan kuivassa ja tasai-nessa kosteusolosuhteessa 40 °C lämpötilassa. Tavoitekosteuspitoisuus on 0–0,5 % kap-paleen kuivapainosta.

Kokeen suorittaminen ja tulosten laskenta

Koejärjestely poikkeaa oleellisesti ISO-standardista siten, että kappale kyllästetään vedellä ennen itse vedenimukokeen suorittamista. ASTM-standardista poiketen vedellä kyllästäminen tehdään normaalipaineessa upottamalla koekappaleet veteen esimerkiksi viikon ajaksi. Vesiupotuksen jälkeen kappale punnitaan ja kuivataan uudelleen kuivaus-uunissa 40 °C lämpötilassa, kunnes kosteuspitoisuus on tasaantunut.

Vedenimeytys tehdään astiassa, joka voidaan peittää. Imeytys tehdään koekappaleen suojatusta pinnasta, mikäli suojaus on tehty. Noin 20 °C:een jäähdytetty koekappale asetetaan veteen 1 mm syvyydelle. Koekappale punnitaan 10, 30 min, 2, 3, 4, 6 h, 1, 2, 3, 4 d ajanhetkinä. Punnitusten yhteydessä kappaleet kuivataan kostealla pyyhkeellä. Neljäntenä päivänä kappale upotetaan vielä veteen kolmen päivän ajaksi kyllästyskosteuspitoisuuden määrittämiseksi. Kolmen päivän upotuksen jälkeen koekappale punnitaan ja kylästetään lopullisesti kohdistamalla kappaleeseen 80 ilmakehän ulkopuolinen paine kolmen päivän ajan. Jos ulkoista painetta ei haluta käyttää, tehdään lopullinen kyllästäminen vakuumikyllästystekniikalla. Täyden kyllästäminen jälkeen koekappaletta kuivataan uunissa 105 °C lämpötilassa yhden viikon ajan tai kunnes painon muutos on pysähtynyt.

Tulokset määritetään hivenen ISO- ja ASTM-standardista poikkeavasti. Lineaarinen regressio tehdään niin imun alkuvaiheelle kuin loppuvaiheelle, jossa vesi on saavuttanut kappaleen yläpinnan. Kun näiden suorien leikkauspiste määritetään, saadaan tietoon imetty vesimäärä kapillaarisessa kyllästyskosteuspitoisuudessa sekä ajanhetki, jolloin vesi teoriassa saavuttaa yläpinnan. Veden imeytymiskerroin määritetään tämän suorien leikkauspisteen ja origon kautta kulkevan suoran kulmakertoimeksi. Laskentatapa poikkeaa teoriasta (ks. luku 3.3.1) Yläpinnan saavuttamiseen kuluvan ajan perusteella lasketaan myös veden tunkeutumiskertoimen neliö. Käytännössä veden tunkeutumiskerroin voidaan rinnastaa tämän standardin ”vastuskertoimeen”. Lisäksi tuloksista lasketaan kokonaishuokoisuus vakuumikyllästyskokeen tai ulkoisella paineella kyllästäminen avulla sekä kokonaisimuhuokoisuus upotuskokeesta.

Jos kokeessa tutkitaan pinnoitteen vaikutusta, ei edellä esitettyjä tuloksia voida laskea, koska painonnousun kuvaaja ei ole lineaarinen. Näissä tapauksissa painonnousukäyriä verrataan vertailukoekappaleista saatuihin tuloksiin.

3.1.4 Muut standardit ja standardivertailu

Edellä laajemmin käsiteltyjen standardien lisäksi vastaavia koejärjestelyjä ja tulosten analysointeja on esitetty ainakin seuraavissa EN-standardeissa:

- SFS-EN 480-5 vedenimunopeus 1 d, 3 d ja 28 d imulla
- SFS-EN 772-11 veden imeytymiskerroin tai alkuimunopeus
- SFS-EN 1015-18 vedenimunopeus 10 min ja 90 min imulla
- SFS-EN 1062-3 vedenimunopeus hyvin vettä imevään kappaleeseen 24 h imulla; testataan pinnoitetta
- SFS-EN 1609 ja 12087 lyhyt- ja pitkäaikainen vedensitomiskyky

- SFS-EN 1925 veden imeytymiskerroin
- SFS-EN 12808-5 vedensitomiskyky 30 min ja 210 min imun jälkeen
- SFS-EN 13057 veden imeytymiskerroin, veden tunkeutumiskerroin
- SFS-EN 15801 veden imeytymiskerroin, veden tunkeutumiskerroin
- SFS-EN 16302 veden imeytymiskerroin in-situ-putkimenetelmällä

Tehdyssä listauksessa imunopeudella viitataan kahden punnituspisteen kautta määritettyyn veden imeytymiskertoimeen. Usein toisena pisteenä on origo ja toisena jonkin määrätyn ajanhetken punnitustulos. Vedensitomiskyvyllä puolestaan tarkoitetaan koetusta, jossa ilmoitetaan imetty vesimäärä määrätystä ajassa, mutta tulosta ei ilmoiteta imuun käytettyyn aikaan suhteutettuna. Tässä on mainittu vain kapillaarista vedensitomiskykyä määrittävät kokeet, koska niissä käytetään vapaan veden imeytys koetta.

Yllä mainituista standardeista on kerätty koejärjestelyyn liittyviä ohjeita ja määräyksiä. Mittaustekniikkaan liittyvä standardiyhteenvedo on esitetty liitteessä 1. Standardin SFS-EN 16302 (2013) tietoja ei ole kerätty taulukkoon, koska kysymyksessä on kentälle tarkoitettu mittausmenetelmä, josta on tarpeetonta hakea tukea laboratoriomittausten kehittämiseen.

Standardiyhteenvedosta voidaan huomata, että ohjeistuksessa ei ole erityisen suurta hajontaa. Standardiyhteenvedoa on käytetty apuna parannetun mittausohjeen teossa. SFS-EN ISO 15148 (2002) jättää joitain avoimia kysymyksiä, ja näihin on koetettu löytää yhteistä linjaa muiden standardien ohjeistuksista.

SFS-EN 1925 (1999) Annex A antaa ohjeet veden imeytymiskertoimen määrittämiseen eksponentiaalisesti hidastuvasta painonnousun kuvaajasta. Ensin sovitetaan järkeväksi todettu eksponenttifunktio punnitustuloksista muodostuvaan pistejoukkoon. Kyseinen eksponenttifunktio linearisoidaan olettaen pienet ajanhetket. Näin saadaan lineaarinen funktio, joka seuraa eksponenttifunktiota veden imeytyksen alkuvaiheessa, ja tämän linearisoinnin kulmakerrointa voidaan pitää alkuvaiheen veden imeytymiskertoimena.

Muutamissa standardeissa on annettu ohjeita mittaustilan vesihöyrypitoisuudesta. Käytännössä näitä ei ole mielekäästä noudattaa, kun mittaus tehdään kaapissa, jossa ilman suhteellinen kosteus nousee joka tapauksessa hyvin suureksi. Lämpötilan osalta ohjeistusta sen sijaan on hyvä noudattaa. SFS-EN ISO 15148 (2002) antaa hyvin laajan vaihteluvälin lämpötilalle. Muissa standardeissa mittaustilan olosuhteet on spesifioitu tarkemmin tai vaihtoehtoisesti olosuhteita ei olla ohjeistettu lainkaan. Esimerkiksi standardi SFS-EN 13057 (2002) ohjeistaa, että mittaustilassa ei saa olla ilmapvirtausta, lämpötilan tulee olla 21 ± 2 °C ja suhteellisen kosteuden 60 ± 10 % RH.

Veden tunkeutumiskertoimen määrittäminen on esitetty kolmessa standardissa:

- (a) NT Build 368 (1991)
- (b) SFS-EN 13057 (2002)
- (c) SFS-EN 15801 (2009).

Kaikissa määritystavoissa ideana on sijoittaa veden tunkeutumissyvyys ja tähän kuluva aika suoraan veden tunkeutumiskertoimen määrittävään yhtälöön (2.20). Tunkeutumissyvyytenä käytetään kappaleen kokonaispaksuutta ((a), (b)) tai kappaleen kylkeen määrättyllä ajanhetkellä merkittyä tunkeutumissyvyyttä ((b) ja (c)). Vastaavasti tunkeutumiseen kuluva aika joko lasketaan painonnousukäyrän kahden lineaarisen osan leikkauspisteestä ((a), (b)) tai se on määrätty syvyyden merkitsemishetken perusteella ((b) ja (c)). Standardin (c) menetelmässä saadaan useita tunkeutumissyvyys–aika -pareja, joista veden tunkeutumiskerroin voidaan laskea lineaarisella regressiolla.

3.2 Tieteelliset artikkelit

Veden imeytymiskertoimen määrittämiseen liittyviä kokeita on tehty paljon. Tämän diplomityön aineistoon on kerätty rajallinen otos näistä kokeista tehdyistä julkaisuista. Diplomityön kannalta mielenkiintoista on erilaisten käsittelyiden, jälkihoitojen ja mittausjärjestelyiden vaikutus koetuloksiin. Seuraavissa kappaleissa on esitelty artikkeleissa esiin nostettuja ja diplomityön aihealueen kannalta mielenkiintoisia kohtia.

Materiaaliryhmän materiaalien vertailuun tarkoitetuissa standardimenetelmiä tarkempaan materiaaliominaisuuden määrittämiseen tähtävissä menetelmissä on usein otettu käyttöön automaattinen mittaustaitteisto. Tällä tavalla voidaan eliminoida helposti tärkeitä virhelähteitä samalla kun mittauksapahtuman työpanostukset pienenevät. Osa virhelähteiden määrittämiseen tehdyistä kokeista on kuitenkin tehty standardia mukailevalta käsinmittausmenetelmällä. Tämä nopeuttaa hyvin suurien koesarjojen käsittelyä, koska automaattilaitteistossa yhtä aikaa mitattavien koekappaleiden määrä on rajallinen.

Kapillaarisen kosteusdiffusiviteetin määrittämisessä käytetään samaa vapaan veden imeytyskoetta kuin veden imeytymiskertoimen määrittämisessä. Myös tällaisia artikkeleita on poimittu. Näissä esitetyt veden imeytymiskertoimen mittaamiseen sovellettavissa olevat kohdat on otettu huomioon seuraavissa kappaleissa.

3.2.1 Materiaalit ja koekappaleet

Veden imeytymiskerroin on hyvin tunnettu ja vanha materiaaliominaisuus. Veden imeytymiskertoimia onkin määritetty useille huokoisille rakennusmateriaaleille. Esimerkiksi Tampereen Teknillisellä Yliopistolla on tehty 2000-luvun alussa koesarja, jossa tutkittiin useiden Suomessa käytössä olevien rakennusmateriaalien rakennusfysikaalisia ominaisuuksia veden imeytymiskerroin mukaan lukien (Vinha et al. 2005). Veden imeytymiskerroin (kapillariteettikerroin) määritettiin muun muassa usealle kapillaarisesti aktiiviselle eristemateriaalille (sahanpuru, puukuitu- ja pellavaeristeet), useille puusta valmistetuille eri jalostusasteen levyille (liimalevy, eri lastukoon lastulevyt, eri tiheyteen puristetut puukuitulevyt) sekä kipsilevyille (Vinha et al. 2005).

Ulkomailla on yleisesti tutkittu höyrykarkaistua kevytbetonia (Siporex) (Huang 2003 ; Kumaran 2006; Vejmelková et al. 2009), savitiiltä (Wilson et al. 1999;

Mukhopadhyaya et al. 2002; Bomberg et al. 2005 ; Kumaran 2006; Plagge et al.) ja betonia tai laasteja (Sabir et al. 1988; Martys & Ferraris 1997; Mukhopadhyaya et al. 2002; Courard & Degeimbre 2003; Kumaran 2006; Benazzouk et al. 2007; Vejmelková et al. 2009; Plagge et al.). Parhaiten teoriaan istuvia tuloksia on saatu kalsiumsilikaattilevyn imeytyskokeissa (Bomberg et al. 2005). Myös puulle (Kumaran 1999; Kurs & Vik 1999; Mukhopadhyaya et al. 2002; Kumaran 2006; Ioannou et al. 2008) ja useille muille materiaaleille (Wilson et al. 1999; Courard & Degeimbre 2003; Huang 2003; Kumaran 2006; Ioannou et al. 2008; Vejmelková et al. 2009) on tehty kokeita. Koe voidaan periaatteessa tehdä mille tahansa koekappaleen kokoon suhteutettuna homogeeniselle materiaalille (Hall 1989).

Koekappaleiden koko ja muoto seuraavat materiaaliominaisuuksista sekä käytännön järjestelyistä, kuten valusta tai kappaleen leikkaamisesta. Teorian mukaan koolla tai muodolla ei ole vaikutusta tuloksiin (Hall 1989). Välttämätön vaatimus on, että imu-suuntainen poikkileikkausala on vakio. Tästä seuraa, että kappaleet ovat muodoltaan joko sylinterimäisiä (Sabir et al. 1988; Pel et al. 1995; Bomberg et al. 2005; Benazzouk et al. 2007) tai prismoja/kuutioita (Hall 1989 ; Wilson et al. 1999; Mukhopadhyaya et al. 2002; Courard & Degeimbre 2003; Bomberg et al. 2005; Kumaran 2006; Benazzouk et al. 2007; Vejmelková et al. 2009; Pavlík & Černý 2012).

Prismoja käytettäessä yleinen koko on $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, joka lienee seurausta tällaisen muottikaluston yleisyydestä. Myös muun kokoisia kulmikkaita kappaleita on käytetty; kulmikkaiden kappaleiden usein neliön muotoinen imupinta on vaihdellut sivumitaltaan 40–100 mm välillä ja korkeus tyypillisesti välillä 20–300 mm. Vastaavaa vaihtelua on myös sylinterin muotoisissa kappaleissa halkaisijan ylärajan noustessa 160 mm:n. Korkeuden tulisi aina olla reilusti pienempi kuin kapillaarinen nousukorkeus (Huang 2003; Bomberg et al. 2005), mutta silti maksimirunkoainekokoa joitakin kertoja suurempi. Vastaava runkoainekokoon suhteutettu vaatimus on myös poikkileikkaus-
alassa, esimerkiksi Martys & Ferraris (1997) on käyttänyt betonisen koekappaleen halkaisijana seitsemän kertaa suurinta raekokoa.

Korkeuden valinnan tulisi perustua oletettuun vedenimunopeuden suuruusluokkaan. Näin saataisiin kokeen kesto rajoitettua järkeväksi. Useilla rakennusmateriaaleilla teoreettinen, huokoskoosta seuraava kapillaarinen nousukorkeus on useita metrejä, eikä siksi rajoita koekappaleiden korkeutta (Martys & Ferraris 1997). Veden imeytymiskerroin voidaan määrittää riippumatta kappaleen korkeudesta, mikäli punnituksia ehditään tehdä riittävästi veden imuvaiheen aikana (Mukhopadhyaya et al. 2002; Bomberg et al. 2005), eli ennen kuin vesirintama saavuttaa kappaleen yläpinnan. Korkeilla kappaleilla puolestaan voidaan rajoittaa tutkimaan vain alkuvaiheen punnitustuloksia (Martys & Ferraris 1997; Kurs & Vik 1999; Benazzouk et al. 2007).

3.2.2 Tasapainotus- ja jälkihoito-olosuhteet

Koekappaleiden valmistus, kuten valu tai leikkaaminen, on artikkeleissa usein jätetty kuvaamatta, koska se tehdään materiaalin valmistajan ohjeen mukaan ja soveltuvin työvälinein. Valettujen koekappaleiden jälkihoito sen sijaan on kuvailtu. NT Build -standardissa koekappale määrätään kyllästettäväksi vedellä ennen tasapainotusta koeolosuhteisiin (NT Build 368 1991). Veden kanssa reagoiville materiaaleille tämä on perusteltu vaatimus, ja usein tämä tulee hoidetuksi jälkihoidon yhteydessä kappaleen ollessa vesiuputuksessa tai hyvin kosteissa olosuhteissa (>95 % RH) pitkiä aikoja (Sabir et al. 1988; Martys & Ferraris 1997; Courard & Degeimbre 2003; Benazzouk et al. 2007). Jälkihoitoajat vaihtelevat 1–90 vrk välillä materiaalista ja kokeen luonteesta riippuen.

Vedenimukoe voidaan tehdä suoraan jälkihoito-olosuhteista määrätyn pituisen jälkihoitojakson jälkeen (Bomberg et al. 2005). Tavoitteiltaan korkeammalle luokiteltavissa kokeissa koekappale kuitenkin tasapainotetaan erikseen määrättyyn alkukosteuspitoisuuteen. Alkukosteuspitoisuudeksi tavoitellaan usein nolaa, jolloin tasapainotus tehdään uunissa. Tasapainotuksen katsotaan olevan riittävä, kun painon muutos on alle 0,1 % (Mukhopadhyaya et al. 2002), usein mittaussälinä käytetään vuorokautta.

Eri lämpötiloja on käytetty, mutta standardeissa yleisen 105 ± 5 °C lämpötilan on todettu muuttavan liiaksi etenkin sementtipitoisten materiaalien huokosrakennetta (Sabir et al. 1988; Martys & Ferraris 1997). Tätäkin korkeaa lämpötilaa on silti käytetty joissain kokeissa (Wilson et al. 1999; Huang 2003; Courard & Degeimbre 2003). Matalammaksi uunikuivauslämpötilaksi on ehdotettu 50 °C (Martys & Ferraris 1997; Benazzouk et al. 2007). Matalan kuivauslämpötilan vaikutusta voidaan tehostaa madaltamalla ilmanpainetta (Pavlík & Černý 2012). Kuivaus voidaan suorittaa myös huonelämpötilassa käyttäen kosteutta sitovaa materiaalia (Sabir et al. 1988; Martys & Ferraris 1997). Uuni-kuivatut kappaleet suositellaan jäähdytettäväksi huonelämpötilaan tällaisessa kuivakammiossa (Wilson et al. 1999). Myös olosuhdehuoneessa tasapainotusta on käytetty. Olosuhteet ovat kokeesta riippuen olleet $30\text{--}50 \pm 2\text{--}5$ % RH ja $20\text{--}23 \pm 2$ °C (Martys & Ferraris 1997; Courard & Degeimbre 2003; Bomberg et al. 2005; Plagge et al.).

3.2.3 Koekappaleiden leikkaus ja suojaus

Valetut koekappaleet voidaan tehdä oikean muotoisiksi mittausta varten (Wilson et al. 1999). Joissain tapauksissa imupintaa on hiottu esimerkiksi timantilla tai hiomapaperilla (Courard & Degeimbre 2003; Bomberg et al. 2005). Tavoitteista riippuen valmiiden materiaalikappaleiden pintakerrokset joko rikotaan (Sabir et al. 1988; Mukhopadhyaya et al. 2002; Huang 2003; Bomberg et al. 2005) tai jätetään mahdollisimman muuttumattomiksi (Wilson et al. 1999). Rikkominen tarkoittaa usein koekappaleen leikkaamista suuremman materiaalikappaleen keskiosista (Sabir et al. 1988; Mukhopadhyaya et al. 2002; Courard & Degeimbre 2003; Huang 2003; Vejmelková et al. 2009).

Sivupinnat suojataan, jotta taataan yksiulotteinen vesivirtaus. Joissain tapauksissa suojaaminen on kuitenkin jätetty tekemättä (Sabir et al. 1988; Martys & Ferraris 1997). Suojausmateriaalina käytetään vettä ja vesihöyryä läpäisemätöntä kalvoa tai pinnoitetta (Mukhopadhyaya et al. 2002; Bomberg et al. 2005). Kokeissa on sovellettu ainakin teippiä (Martys & Ferraris 1997; Vinha et al. 2005), epoksia (Kumaran 1999; Courard & Degeimbre 2003; Pavlík & Černý 2012; Plagge et al.), bitumimassaa (Hall 1989) ja parafiinivahaa (Huang 2003). Tärkeää on, ettei suojamateriaali imeydy juurikaan koekappaleen huokosiin tai muuta huokosrakennetta (Mukhopadhyaya et al. 2002). Suojamateriaali ei saisi myöskään muodostaa kappaleen ja suojauksen välille kapillaari-imukanaavaa, joka poissulkee esimerkiksi useimpien teippien käytön (Bomberg et al. 2005).

Vaikka kappaleen kyljet suojattaisiin tiiviisti, voi kosteudensiirtoa tapahtua yläpinnan kautta. Joissain tapauksissa yläpinnan suojaus on vältetty käyttämällä suljettua kammiota (Martys & Ferraris 1997; Bomberg et al. 2005). Ympäröivä korkea suhteellinen kosteuspitoisuus voi tällaisessa tapauksessa johtaa kosteuden sitoutumiseen yläpinnan kautta (Plagge et al.). Jos yläpinta jätetään suojaamatta (Hall 1989; Kumaran 1999; Mukhopadhyaya et al. 2002; Vinha et al. 2005; Benazzouk et al. 2007), ja ympäröivän tilan vesihöyrypitoisuus on matala, voi yläpinnan kautta haihtua reilusti kosteutta. Etenkin korkeilla koekappaleilla tämä saattaa johtaa tasapainotilanteeseen, jossa yläpinnan haihtuminen on yhtä nopeaa kuin veden imeytyminen (Martys & Ferraris 1997). Käyttöön on otettu yläpinnan suojaaminen rajalliseksi ilmatilaksi, joka tasapainottuu koekappaleen mukaisiin olosuhteisiin (Bomberg et al. 2005, Plagge et al.). Tällaisessa tapauksessa tulee pienellä reiällä estää ilmanpaineen nouseminen (Bomberg et al. 2005), joka on seurausta imeytyvän veden syrjäyttämän ilman pakenemisesta kappaleen yläpintaa kohti. Joissakin tapauksissa tästä ei ole huolehdittu, vaan yläpinta on suojattu samalla materiaalilla kuin sivupinnat (Huang 2003).

3.2.4 Mittausolosuhteet, upotussyvyys ja kannatinmekanismit

Veden imeytys tehdään astiassa, jossa on sopivat kannattimet, joilla kappale pidetään irti astian pohjasta. Usein kappale asennetaan koekappaleen pohjaan tukeutuvien kannakkeiden varaan (Sabir et al. 1988; Hall 1989; Pel et al. 1995; Vinha et al. 2005), jolloin kannattimen imua häiritsevä pinta-ala tulisi minimoida. Myös kyljistä puristamalla tehtyä kannattelua on käytetty (Mukhopadhyaya et al. 2002), jolloin imupinta on vapaa kannattimista. Kannakkeiden tulee olla sellaiset, että niillä taataan haluttu stabiili upotussyvyys. Bomberg et al. (2005) ovat asettaneet kannakkeille tarkkuusvaatimuksen 0,1 mm ja Mukhopadhyaya et al. (2002). ± 1 mm.

Upotussyvyys vaihtelee merkittävästi eri lähteissä. Pieniä, alle 3 mm upotussyvyyskyljiä on käytetty (Sabir et al. 1988; Pel et al. 1995; Huang 2003), mutta joissain kokeissa upotussyvyudeksi on sallittu jopa 10 mm (Vinha et al. 2005). Standardissa SFS-EN ISO 15148 (2002) esitetty 5 ± 2 mm upotussyvyuden suuruusluokka on kuitenkin yleinen (Hall 1989; Wilson et al. 1999; Mukhopadhyaya et al. 2002; Courard & Degeimbre

2003; Benazzouk et al. 2007). Upotussyvyyden vaihtelu kokeen aikana on poikkeuksetta rajattu ± 2 mm:iin (Mukhopadhyaya et al. 2002; Courard & Degeimbre 2003), mutta myös tarkempaa ± 1 mm:n tarkkuutta on käytetty (Huang 2003; Bomberg et al. 2005). Usein upotussyvyyden stabilointi on tehty lisäämällä tarvittaessa vettä käsin, mutta myös erilaisia ylivirtauslaitteita (Bomberg et al. 2005) tai ylösalaisin käännettyjä pulloja (Benazzouk et al. 2007; Vejmelková et al. 2009) on käytetty.

Mittaus tehdään yleensä huonelämpötilassa. Huonelämpötilana käytetään standardinomaista 21–23 °C (Kumaran 2006; Benazzouk et al. 2007), mutta joissain kokeissa lämpötilaa on tarkoituksella varioitu (Mukhopadhyaya et al. 2002; Pavlík & Černý 2012). Kaavan (2.19) mukaisesti eri lämpötiloissa mitatut veden imeytymiskertoimet voidaan skaalata vastaamaan vertailulämpötilan tuloksia. Esimerkiksi Hall käyttää vertailulämpötilana 20 °C, ja skaalaa kaikki tulokset tähän lämpötilaan (Hall 1989). Veden lämpötilan tulisi vastata huoneen lämpötilaa (Sabir et al. 1988; Kumaran 2006), tai ainakin se on syytä kirjata ylös (Hall 1989; Mukhopadhyaya et al. 2002). Joissain yhteyksissä veden ominaisuuksille on asetettu vaatimuksia, ja käyttöön on otettu tislattu tai deionisoitu vesi.

3.2.5 Mittaustekniikka, käsin punnitus

Käsinmittauksessa tulee tutkittavan materiaalin ominaisuuksista olla ennakkotietoa, jotta sopivat punnitusajankohdat voidaan määrittää. Vaikka standardissa on annettu ohjeita punnitusajankohtien valintaan, ei näiden soveltaminen käytännössä aina takaa riittävän hyvää lopputulosta. Etenkin nopeasti vettä imevillä materiaaleilla ensimmäisten punnituksen suorittaminen riittävän aikaisessa vaiheessa on tärkeää.

Ensimmäisten laskennassa käytettävien punnitusajankohtien valitsemiseen on annettu ohjeistusta. Tiilelle sopiva aika olisi 3–4 min ja kalsiumsilikaattilevyille minuutin luokkaa (Bomberg et al. 2005). Jos koekappale on ohut, tulee seuraavatkin mittaukset suorittaa riittävän pian, että saadaan riittävän monta punnitustulosta regressioanalyysiin. Liian harvat tai myöhäiset punnitusajankohdat voivat johtaa epävarmaan lopputulokseen (Mukhopadhyaya et al. 2002).

Artikkeleissa kuvattuja vedenimukokeita on yleensä jatkettu, kunnes vedenimu on lähes pysähtynyt (Huang 2003; Vinha et al. 2005). Joillain materiaaleilla tämä on tarkoitettu usean kuukauden mittaisia veden imeytysjaksoja (Vinha et al. 2005; Benazzouk et al. 2007). Pitkistäkin kokeista voidaan laskentaan käyttää vain kokeen alkuvaiheen tuloksia, mutta herkkyytarkastelun kannalta pitkät kokeet ovat perusteltuja. Lyhyissä kokeissa saattaa tulla esille vain materiaalin pintakerrosten vedenimua (Martys & Ferraris 1997), ja poikkeamat teorian mukaisesta käyttäytymisestä voivat jäädä huomaamatta (Bomberg et al. 2005).

Itse punnitustapahtuma tulee suorittaa mahdollisimman nopeasti. Kappale on punnituksen ajan pois vedestä, jolloin imu häiriintyy. Hall on esittänyt, että kappale saa olla pois vedestä korkeintaan 30 s, eikä ajanottoa keskeytetä punnituksen ajaksi, vaikka vesi-

kosketus katkeaakin (Hall 1989). Punnituksen tarkkuudeksi suositellaan 0,1 g (Hall 1989) tai 0,1 % kappaleen kuivapainosta (Mukhopadhyaya et al. 2002).

Koska kappale poistetaan vedestä punnituksen ajaksi, jää kappaleen pinnoille vesikalvo, joka ei ole imeytynyt kappaleeseen. Tämän irtoveden poistamiseen käytetään usein joko kuivaa tai kosteaa pyyhettä (Hall 1989) tai paperia (Kumaran 1999; Mukhopadhyaya et al. 2002). Huang on kokeillut myös luonnollista kuivausta, jossa veden annetaan haihtua kappaleen pinnalta (Huang 2003). Veden pyyhkimisen huolellisuus vaikuttaa merkittävästi punnitustuloksiin (Huang 2003), ja se tulee sen vuoksi suorittaa mahdollisimman toistettavalla tavalla.

3.2.6 Mittaustekniikka, automaattipunnitus

Automaattimittauksen selkein etu on vesikosketuksen ensimmäisiltä sekunneilta alkava painonnousudatan kerääminen (Sabir et al. 1988; Courard & Degeimbre 2003; Vejmelková et al. 2009). Käsinnmittausmenetelmässä koekappale joudutaan poistamaan vesikosketuksesta, mikä voi johtaa veden imeytymiskertoimen aliarviointiin (Sabir et al. 1988). Useissa kokeissa on todettu, että automaattimittauslaitteiston tulokset vastaavat standardin mukaisen käsinnmittauksen tuloksia (Bomberg et al. 2005; Plagge et al.).

Automaattisissa mittauslaitteissa vesiastia on lähes poikkeuksetta sijoitettu pieneen mittauskaappiin, jossa veden haihtuminen on mahdollisimman vähäistä (Sabir et al. 1988; Courard & Degeimbre 2003; Plagge et al.). Osassa artikkeleita on tehty mittauksia veden haihtumisnopeudesta, jotta haihtumisen nostevaikutus on voitu korjata (Plagge et al.). Joissain yhteyksissä nostevaikutukset on jätetty huomiotta. Nostevaikutusten huomiotta jättämistä voi perustella suurella vesiastialla (Sabir et al. 1988). Vastaavasti joissakin artikkeleissa vedenpinnan laskeminen koekappaleen imiessä vettä astiasta on huomioitu (Vejmelková et al. 2009; Plagge et al.) toisten jättäessä koko asian mainitsematta (Sabir et al. 1988; Courard & Degeimbre 2003). Upotussyvyyden vakioimiseksi on myös otettu käyttöön erilaisia vedenpinnan tason vakiointijärjestelmiä (Vejmelková et al. 2009).

Useimmat laitteistot on rakennettu siten, että mittausvesiastian korkeutta voidaan säätää (Courard & Degeimbre 2003; Plagge et al.). Tällä tavalla saadaan nostettua vedenpinta koekappaleeseen kiinni ja saavutetaan haluttu upotussyvyys. Yksinkertaisempi menetelmä on kaataa kannusta vettä mittausvesiastiaan, kunnes haluttu upotussyvyys täyttyy (Sabir et al. 1988). Korkeudensäätöön voi käyttää esimerkiksi usean kierretangon varaan asennettua tasoa tai saksinostinta.

Koekappale kannatellaan joko alapinnaltaan tukemalla tai kyljistään puristamalla. Kannatin voi olla esimerkiksi metallinen tarjotin, jossa on hivenen koekappaleen kokoa pienempi reikä keskellä (Sabir et al. 1988). Vastaavan kaltaisen tarjottimen varaan voidaan tehdä erilaisia irtonaisia kannattimia, joilla eri muotoiset koekappaleet saadaan helposti kannateltua (Plagge et al.). Sekä tarjotin että kannattimet on rakennettu niin,

että koekappaleen imupinta asettuu vaakasuoraan (Sabir et al. 1988; Vejmelková et al. 2009; Plagge et al.).

Kannatin on poikkeuksetta asennettu roikkumaan mittausvesiastian yläpuolelle asennetun vaa'an pohjasta. Usein vaaka on asennettu tasolle, joka toimii mittauskaapin yläpohjana (Sabir et al. 1988; Plagge et al.). Kannatinmekanismia varten yläpohjaan on tehty läpivienti. Vaa'an punnituslukema kerätään usein suoraan tietokoneelle (Sabir et al. 1988; Courard & Degeimbre 2003). Punnituslukemien tallennusväli on ollut mittauksen alussa usein 1–5 sekuntia (Courard & Degeimbre 2003; Plagge et al.), ja mittauksen kestäessä väliä on harvennettu (Plagge et al.). Joissain laitteissa tietokoneelle kerätään myös mittauskaapin kosteus- ja lämpötilaolosuhdemittausten tulokset (Plagge et al.).

3.2.7 Tulosten laskenta

Kaikissa artikkeleissa veden imeytymiskerroin on määritetty painonnousudatasta lineaarisella regressiolla. Joissain artikkeleissa on viitattu suoraan standardeihin (Mukhopadhyaya et al. 2002; Vinha et al. 2005; Kumaran 2006; Plagge et al.), kun muut ovat esittäneet laskentatavan perusteena veden imeytymiskertoimen teoriaa tai painonnousukäyrän sovitefunktiota. Harvinaisempi lähestymistapa on ollut lineaarisen sovitekäyrän korvaaminen kaarevaan painonnousudataan paremmin istuvalla sovitekäyrällä (Hall 1989).

Lineaarisen painonnousukäyrän y-akselin leikkauspiste ei ole origossa (Martys & Ferraris 1997; Wilson et al. 1999; Bomberg et al. 2005). Tähän on esitetty perusteluita useissa lähteissä, mutta asia on käsitelty tarkemmin luvussa 3.3. Useimmiten veden imeytymiskerroin on laskettu painonnousukäyrän ensimmäisestä lineaarisesta vaiheesta (Sabir et al. 1988; Vejmelková et al. 2009), vaikka joillakin materiaaleilla käyrästä voidaan löytää useita lineaarisia kohtia (Bomberg et al. 2005; Vejmelková et al. 2009). Veden imeytymiseen vaikuttavat muutkin kuin kapillaariset voimat, ja näiden vaikutus kasvaa mittausajan pidentyessä.

Veden imeytymiskertoimen laskennan lineaarisen regression ensimmäisen ja viimeisen datapisteen oikea määrittäminen on edellytys hyvälle laskentatulokselle. Mittauksen alusta tulee jättää huomioimatta materiaaliominaisuuksista riippuva ajanjakso (Sabir et al. 1988; Bomberg et al. 2005). Vastaavasti viimeinen mukaan otettava punnitustulos tulee arvioida. Hyvä lopputulos voidaan saavuttaa usein arvioiden painonnousukäyrää silmäääräisesti. Ensimmäisen ja viimeisen datapisteen määrittämiseen voidaan käyttää painonnousukäyrän derivaattaa, koska derivaattakuvaajasta on helpompi havaita painonnousukäyrän lineaarisesta osuudesta poikkeavat alueet (Bomberg et al. 2005). Vaihtoehtoisesti jakso voidaan rajoittaa sellaiseksi, jolla saavutetaan hyvä korrelaatio (Sabir et al. 1988).

Lopulta painon nousu lähes pysähtyy. Tätä edeltävässä käyrän taitekohdassa materiaali on saavuttanut kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden (Huang 2003; Vinha et al. 2005; Vejmelková et al. 2009; Plagge et al.). Taitekohdan tarkka arvo voidaan laskea

veden imeytymiskertoimen sovitekäyrän ja taitekohdan jälkeisen lineaarisen sovitekäyrän leikkauspisteestä (Vejmelková et al. 2009; Plagge et al.). Voimakkaasti kaareutuvalla painonnousukäyrällä tällä analyttisesti määritellyllä pisteellä laskettu kapillaarinen kylästyskosteuspitoisuus ei tosin ole materiaalin luokitteluun kelpaava materiaaliominaisuus (Vejmelková et al. 2009).

3.2.8 Soviteyhtälöt

Painonnousun kuvaaja ei aina noudata aina lineaarista trendiä. Tämä ei automaattisesti tarkoita, ettei veden imeytyminen ole teorian mukaista. Syy voi olla esimerkiksi hyvin voimakkaasti jakaantuneesta huokosrakenteesta (kevytbetoni) tai geelihuokosista, joihin vesi sitoutuu myös muilla kuin kapillaarivoimilla (betoni). Epälineaarisen trendin materiaaleja varten on kehitetty uusia painonnousukäyrän soviteyhtälöitä, joita on esitelty alla.

Tavanomaisesti vedenimu määritetään painonnousukäyrän lineaarisen osuuden kulmakertoimesta, eikä muita käyrän osia oteta huomioon. Tämä on ehkä yleisimmin esitetty funktio, mutta edellyttää regressoinnin alku- ja loppuajankohtien oikeaa määrittämistä. Funktio on esitelty kahdessa muodossa (3.1 (1), (2)), mutta käytännössä erona oleva vakio A_0 voidaan jättää huomiotta, koska vain kulmakerroin halutaan määrittää. (Huang 2003; Bomberg et al. 2005) Sama yhtälö on esitetty myös veden tilavuuspainolla jaettuna, jolloin yhtälössä veden imeytymiskerrointa vastaava suure saa saman yksikön kuin veden tunkeutumiskerroin (Benazzouk et al. 2007).

$$\begin{aligned} (1) \quad i &= A_w t^{0,5} \\ (2) \quad i &= A_0 + A_w t^{0,5} \end{aligned} \tag{3.1}$$

Vakio A_0 kuvaa epälineaarisuutta, joka on seurausta muun muassa imupinnan avoimien huokosten täyttymisestä (Bomberg et al. 2005), upotushetkellä materiaalin huokosiin syntyvän ylipaineen imua vastustavasta voimasta (Wilson et al. 1999), koekappaleen mahdollisesti suojaamattomien kylkien kautta imeytyvästä vedestä (Bomberg et al. 2005) ja imupinnan poikkeavasta huokosjaosta (Bomberg et al. 2005).

Jos materiaalin huokosalipaine on suuruusluokaltaan vain vähän suurempi kuin gravitaation aiheuttama hydrostaattinen paine, aiheuttaa gravitaatio imun hidastumista veden tunkeutuessa syvemmälle materiaaliin ja hydrostaattisen paineen näin kasvaessa. Tällaisessa tapauksessa painonnousukäyrää kuvaa parhaiten funktio (3.2). (Hall 1989)

$$i = A_0 + A_w t^{0,5} - Ct \tag{3.2}$$

Gravitaation vaikutus otetaan huomioon vakion C avulla. Vain mittauksen alun painonnousukäyrään rajautumalla voidaan termi Ct jättää huomiotta, ja yhtälö (3.2) yksinkertaistuu samaksi kuin yhtälö (3.1). (Hall 1989) Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi kevytsora ja kevytbetoni

Muuten lineaarisen mittauksen alussa oleva epälineaarinen osuus voidaan ottaa huomioon lisäparametrien avulla. Tällä tavalla mittauksen alun epälineaarista osuutta ei tarvitse jättää regressoinnin ulkopuolelle. Huang on esitellyt erään tällaisen yhtälön (3.3) (Huang 2003).

$$i = A_0 \left[1 - \left(\frac{1}{t+1} - 1 \right)^2 \right] + A_w t^{0,5} \quad (3.3)$$

Huang on tutkinut soviteyhtälön vaikutusta veden imeytymiskertoimen arvoon, ja havainnut merkittävän eron yhtälön (3.1) ja (3.3) välillä (Huang 2003). Bomberg et al. (2005) ovat kuitenkin todenneet termin A_0 merkityksettömäksi, jos alun epälineaarinen osuus yksinkertaisesti jätetään huomioimatta (3.2.7 Tulosten laskenta).

Joskus on tarpeen tehdä tavanomaista vedenimukoetta pidempiä veden imeytyksiä. Jos koekappale on äärettömän korkea, pienenee veden imeytymiskertoimen vaikutus ja lopulta diffuusio ja muut hitaat veden sitoutumis- ja siirtymisprosessit hallitsevat painon muutosta. Martys ja Ferraris ovat tutkineet tällaista betonin käyttäytymistä ja kehittäneet soviteyhtälön (3.4), jolla jo 17 vuorokauden pituisesta kokeesta voidaan arvioida usean vuoden imeytyksen painonnousu. (Martys & Ferraris 1997)

$$i = A_0 + A_{aw} (1 - e^{(-A_w t^{0,5}/A)}) + A_{dif} t^{0,5} \quad (3.4)$$

Motivaatio uudelle soviteyhtälölle on ollut betonilla tehdyt pitkät imeytyskokeet, joissa lopulta myös geelihuokokset saadaan täyttymään vedellä. Mittauksen alussa ajanhetkillä $t^{0,5} < A_{aw}/A_w$ yhtälö yksinkertaistuu ja lähestyy yhtälöä (3.1). Termi A_{dif} on merkittävästi pienempi kuin A_w , ja se kuvaa pienten huokosten imua sekä diffuusiota. (Martys & Ferraris 1997) Kyseinen soviteyhtälö voisi sopia myös lyhytkestoisille mittauksille, jos gravitaatio pysäyttää veden imeytymisen osaan huokosverkostosta jo mittauksen aikana.

3.3 Virhelähteet

Vapaan veden imukokeessa on paljon virhelähteitä. Virhelähteiden vaikuttavuuksia on tutkittu tai arvioitu useissa yhteyksissä. Kokeen suorittamista ohjaava standardi SFS-EN ISO 15148 (2002) ei aseta sellaisia reunaehtoja, että eri laboratoriot saisivat toistettavia tuloksia aikaiseksi. Tarkempaa ohjeistusta on tehty aiempien virhelähdekokeiden perusteella. Aiempaa tutkimusta virhelähteen aiheuttaman virheen minimoinnista sen sijaan ei ole tehty. (Bomberg et al. 2005)

Seuraavissa kohdissa käydään läpi virhelähteitä ja virhelähdekokeita. Kaikkia virhelähteistä ei ole tutkittu laajemmin, vaikka niiden vaikutusta tuloksiin on nostettu esiin koetuloksia esittelevissä julkaisuissa. Kaikkien virhelähteiden tiedostaminen on tärkeää, jotta niitä osataan minimoida kokeita tehtäessä, vaikka vaikutuksia tulokseen ei tarkasti tunnetaisikaan.

3.3.1 Tunnettuja virhelähteitä

Veden imeytymiskertoimen määrittämiseen pohjautuva teoria asettaa koejärjestelylle reunaehdot, joiden toteutuminen käytännössä ei ole aina varmaa. Lisäksi koetta toteutettaessa käytännön seikat, materiaalien huokosrakenteen epäideaalisuudet sekä teoriasta poikkeava käyttäytyminen aiheuttavat virhettä koetuloksiin.

Poikkeamat teoriasta

Kapillaarisen veden imeytymisen teoria on johdettu yhdensuuntaisten huokosputkien ajatuksesta (Martys & Ferraris 1997). Käytännössä materiaalien huokosrakenne ja jakauma on paljon monimutkaisempi. Teorian mukaisesti veden imeytyminen materiaaliin tapahtuu rintamana, jossa kosteuspitoisuus vaihtuu äärettömän lyhyellä matkalla alkukosteuspitoisuudesta kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen. Käytännössä näin ei ole, mutta esimerkiksi röntgensäteillä tehdyn mittauksen mukaan alue, jolla kosteuspitoisuus muuttuu, on hyvin pieni (Pel et al. 1995).

Vapaan veden imeytyskokeessa veden virtaus koekappaleeseen ja ilman virtaus ulos koekappaleesta oletetaan yksiulotteiseksi (Bomberg et al. 2005). Yksiulotteisen virtauksen toteutuminen koekappaleen reuna-alueella on kyseenalaista, koska satunnaisesti muodostunut huokosverkosto katkeaa reunoilla.

Myös kylkisuojaus vaikuttaa reuna-alueen veden virtaukseen (Roels et al. 2004; Bomberg et al. 2005). Teorian mukaan riittää, että pinta-ala on veden imun suunnassa vakio. Käytännössä reuna-alueiden virheet riippuvat imupinta-alasta sekä koekappaleen muodosta (Huang 2003; Bomberg et al. 2005). Myös imupinnan katvealueet aiheuttavat moniulotteista virtausta; ilmakuplat tai kappaletta kannattelevat tuet estävät niiden kohdalta veden imeytymisen (Sabir et al. 1988; Bomberg et al. 2005).

Imupinnan kosteuspitoisuus ja gravitaatio

Vapaan veden imeytyskokeesta tulisi saada lineaarinen painonnousukäyrä. Jotta vaatimus toteutuu, tulee veden imeytymisen olla kapillaaristen voimien hallitsemaa. Kapillaaristen voimien ollessa määrääviä ei imusuunnalla ole väliä (Sabir et al. 1988). Käytännössä sama tulos pitäisi tulla riippumatta veden imeytymisen suunnasta; vaakasuuntaan tai ylhäältä alaspäin tehtävällä veden imeytyksellä saadaan sama painonnousukäyrä kuin vapaan veden imeytyskokeesta, jos kapillaariset voimat ovat määrääviä.

Useimmilla huokoisilla rakennusmateriaaleilla kapillaarivoimat ratkaisevat (Sabir et al. 1988; Hall 2007). Jos materiaalissa on myös hyvin suuria huokosia, gravitaation aiheuttama hydrostaattinen paine on kapillaarivoimien suuruusluokkaa eikä lineaarista painonnousukäyrää saada (Sabir et al. 1988; Hall 2007; Vejmelková et al. 2009). Vapaan veden imeytyskokeessa hydrostaattinen paine vastustaa kapillaari-imua, ja sen vaikutus koetulokseen on kokeen alussa pieni. Suuren huokoskoon materiaaleilla voi olla tarpeen rajoittaa koekappaleen korkeutta. Samalla saadaan lyhennetyksi koekappaleen kyllästymiseen kuluvaa aikaa (Bomberg et al. 2005).

Hydrostaattinen paine aiheuttaa virhettä myös imupinnan kosteuspitoisuuteen, jonka tulisi pysyä vakiona kapillaarisessa kyllästyskosteuspitoisuudessa (Carmeliet et al. 2004; Bomberg et al. 2005). Veden alla oleva koekappaleen osuus saavuttaa kapillaarisesta kyllästyskosteuspitoisuutta suuremman kosteuspitoisuuden. Virheen minimoimiseksi upotussyvyyden tulisi olla mahdollisimman pieni ja vaihdella mahdollisimman vähän (Huang 2003; Bomberg et al. 2005) (ks. Luku 3.3.2).

Kokeen alussa imupinnan kosteuspitoisuuden vakio-oletus ei täyty. Upotushetkellä kosteuspitoisuus alkaa nopeasti nousta, mikä aiheuttaa pintahuokosiin imua rajoittavan ilmanpaineiikin (Bomberg et al. 2005). Samaan aikaan koekappaleen avoimet pintahuokokset täyttyvät hyvin nopeasti yli kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden (Sabir et al. 1988; Hall 2007). Tämä liian kosteaksi kyllästyneen materiaalin alue kasvaa kokeen edetessä (Pel et al. 1995), mikä johtuu ei kapillaaristen huokosten täyttymisestä. Nämä huokokset täyttyvät sekä ohi virtaavan veden vaikutuksesta, että ilman diffunoiutuessa veden ja lopulta ulos kappaleesta (Martys & Ferraris 1997; Carmeliet et al. 2004; Bomberg et al. 2005; Hall 2007).

Edellä mainitut asiat ovat pääasiallisena syynä painonnousukäyrän y-akselin leikkauskohdan poikkeamiseen origosta.

Koekappaleen kosteuspitoisuus

Vapaan veden imeytyskokeen painonnousukäyrästä voidaan määrittää veden imeytymiskerroin vain, jos kosteus on jakautunut tasaisesti koekappaleeseen (Sabir et al. 1988). Alkukosteuspitoisuus vaikuttaa koetulokseen, mutta hygroskooppisella alueella vaikutus voidaan jättää huomiotta (Bomberg et al. 2005). Uunikuivattu koekappale ei tuota hyvää tulosta, koska täysin kuivassa koekappaleessa saattaa olla mikrohalkeamia tai muita vaurioita (Martys & Ferraris 1997). Tämän lisäksi esimerkiksi sementtigeeli saattaa absorpoida kosteutta kuivassa betonissa (Sabir et al. 1988).

Veden imeytymiskertoimen määritelmässä on oletettu koekappaleen imun vastakkaiselle pinnalle vakio kosteuspitoisuus. Käytännössä yläpinnan kosteuspitoisuus tulisi pysyä koekappaleen alkukosteuspitoisuudessa koko veden imeytyksen ajan. Vaatimuksesta seuraa, ettei veden imeytymiskerrointa voi määrittää painonnousukäyrän siitä osasta, jossa yläpinnan kosteuspitoisuus on alkanut nousta vesirintaman lähestyessä (Bomberg et al. 2005).

Suljetussa tilassa, jossa suhteellinen kosteus on avoimen veden imeytysastian vuoksi korkea, imeytyy kosteutta koekappaleen yläpinnan kautta. Tämä voidaan havaita myös painonnousukäyrästä; aluksi paino nousee nopeammin ja lopussa hitaammin, koska osa huokosista on täyttynyt hygroskooppisesti yläpinnan kautta jo kokeen alussa (Plagge et al.).

Materiaali ja koejärjestelyt

Veden pintajännitys ja viskositeetti muuttuvat lämpötilan muuttuessa, mistä seuraa lämpötilan vaikutus veden imeytyskokeen tuloksiin (Pavlik & Černý 2012). Veden imeyty-

miskerroin kasvaa luokkaa 1 %, jos imeytettävän veden lämpötila nousee 1 °C (Wilson et al. 1999). Tästä johtuen veden imeytymiskerroin voisi olla järkevää skaalata aina esimerkiksi 20 °C lämpötilan arvoon (Hall 1989), eikä lämpötila saisi vaihdella kokeen aikana (Bomberg et al. 2005). Myös veden puhtaus vaikuttaa tuloksiin. Sementtipitoisista koekappaleista liukenee veteen suolaa, joka voi vaikuttaa veden imeytymiseen (Martys & Ferraris 1997).

Laastien ja betonien jälkihoito vaikuttaa materiaalin huokosjakaumaan. Jälkihoidon pidentämisen on osoitettu pienentävän veden imeytymiskerrointa (Sabir et al. 1988; Martys & Ferraris 1997). Puulla huokosjakaumaa voidaan modifioida esimerkiksi lämpökäsittelyllä. Lämpökäsittelyn vaikutus vedenimuominaisuuksiin riippuu veden imeytymissuunnasta (Pfriem 2011).

Vedenimuominaisuudet voivat muuttua materiaalissa vedenimusuunnassa eri syvyyksillä. Esimerkiksi tiilellä materiaalin pintaosa on ydintä tiiviimpää (Plagge et al.). Tämä aiheuttaa mutkan oletettuun lineaariseen painonnousukäyrään, jos imeytys tehdään tiiviimmän pintaosan kautta. Paremmiin vettä imevästä pinnasta tiiviimpää pintaa kohti imeytettäessä virhe ei tule niin selkeästi näkyviin; veden imeytyminen hidastuu sisäisen virtausvastuksen vuoksi jo ennen kuin vesirintama saavuttaa tiiviimpää materiaalikerrosta (Plagge et al.). Myös imupinnan käsittely vaikuttaa (Huang 2003; Bomberg et al. 2005). Esimerkiksi kokeen alussa imeytyminen on voimakkaampaa kiillotetun kuin hiekkapaperilla hiottun pinnan kautta (Courard & Degeimbre 2003).

Mittauksen kesto vaikuttaa tuloksiin (Huang 2003; Bomberg et al. 2005). Tämä on seurausta jo edellä mainituista poikkeamista oletetuissa kosteuspitoisuusjakaumissa. Painonnousukäyrän epälineaarisuoksien aiheuttamaa virhettä voidaan vähentää sovitefunktiota vaihtamalla (Hall 1989; Huang 2003). Myös mittajan kokemus vaikuttaa koetulokseen (Roels et al. 2004). Eroja voi syntyä ainakin koekappaleen vesikosketukseen saattamisessa ja käsin tehtävää punnitusta edeltävässä imupinnan vesipisaroiden poistossa.

Vesikosketukseen saattamisessa käytettävä toimintatapa vaikuttaa ilmakuplien muodostumiseen (Bomberg et al. 2005). Imupinnan vesipisaroiden poistamiseen käytetty materiaali ja kuivaustekniikka vaikuttavat punnitustulokseen (Huang 2003; Bomberg et al. 2005). Käsin mitattaessa virhettä syntyy, kun koekappale on punnituksen ajan pois vesikosketuksesta (Bomberg et al. 2005). Automaattimittauslaitteistoa käytettäessä sen sijaan punnitukseen syntyy virhettä jatkuvan vesikosketuksen aiheuttamasta nosteesta (Bomberg et al. 2005).

3.3.2 Virhelähdekokeita

Edellisessä kohdassa on käyty läpi virhelähteitä. Näistä osan vaikuttavuutta veden imeytymiskertoimen arvoon on tutkittu. Useimmat virhelähteet ovat osoittautuneet merkittäviksi. Virhelähteitä on vaikea eliminoida, ja useimmat virhelähteet on minimoitu ohjeistamalla yhdenmukaisempaa mittausmenetelmää. Näin virhelähde on kaikissa kokeissa

saman suuruinen ja tulokset saadaan vertailukelpoisiksi. Tässä kohdassa on käyty läpi virhelähdetutkimuksia sekä niiden johtopäätöksiä.

Koejärjestelyt

Huang (2003) sekä Liu (2003) ovat tehneet laajat virhelähdekokeet käyttäen hyödyksi Studentin t-testi -menetelmää. Käytetyssä testissä virhelähteen vaikuttavuus voidaan todeta merkityksettömäksi, jos t-luku on alle 1,90. Huangin kokeet on tehty imupinnaltaan neliön muotoisilla kevytbetonikoekappaleilla. Koekappaleet on punnituksen ajaksi poistettu vedestä, ja punnitukset on tehty käsin. (Huang 2003)

Bomberg et al (2005) ovat koonneet julkaistuja virhelähdekokeita ja tehnyt joitain kokeita itse, sekä antanut näiden perusteella suosituksia parhaasta vapaan veden imeytyskokeen toimintatavasta. Virhelähdekokeisiin on käytetty kalsiumsilikaattilevyä, ja kokeita on tehty sekä käsin punnitsemalla että automaattimittauslaitteistolla.

Martys ja Ferraris (1997) ovat tehneet betonisille koekappaleille hyvin pitkiä veden imeytyskokeita. Yli vuoden mittaisten kokeiden painonnousukäyriin on kehitetty uusi sovitefunktio, joka ottaa huomioon myös diffuusion ja muiden sekundääristen ilmiöiden vaikutuksen (kaava 3.4). Eri kylkisuojauksen, jälkihoidon ja veden puhtauden vaikutusta lopputulokseen on vertailtu. Myös Sabir et al (1988) ovat tutkineet jälkihoidon vaikutusta veden imeytymiskertoimeen erilaisilla resepteillä tehdyillä betonisilla koekappaleilla. Hall (1989) puolestaan esittelee sovitefunktion (kaava 3.2), joka ottaa huomioon gravitaation vaikutuksen laajasti veden imeytymiskertoimen teorian toimivuutta käsittelevässä artikkelissaan.

Mukhopadhyaya et al (2002) ovat tutkineet veden lämpötilan vaikutusta männyn, betonin ja savitiilen veden imeytymiskertoimeen. Koejärjestelyssä koekappaleet tasapainotettiin huoneen lämpötilaan. Vesiastian käytettiin ylivirtausjärjestelmää, jonka avulla astiaan saatiin syötettyä halutun lämpöistä vettä. Koekappaleet olivat neliön muotoisia; koekappaleiden imupinta-ala oli $50 \times 50 \text{ mm}^2$ ja korkeus 20 mm, paitsi puukappaleiden korkeus oli 50 mm. Punnitukset tehtiin määrääjain käsin. Tiilellä havaittiin koekappaleiden välillä kohtalaisesti hajontaa. Betonilla ensimmäinen punnitus on tehty liian myöhään, eikä veden imeytymiskertoimen määrittämiseen ole saatu käytettyä kuin mitausta edeltävän ja ensimmäisen punnituksen välistä painon nousua. Myös Pavlik ja Cerný (2012) ovat tutkineet lämpötilan vaikutusta kevytbetonin vedenimuun. He pilkoivat 200 mm korkeat koekappaleet ohuiksi viipaleiksi määrätyn vedenimujakson jälkeen, ja määrittivät kosteuspitoisuusjakauman koekappaleessa eri pituisten vedenimujaksojen jälkeen.

Painonnousukäyriissä on havaittu poikkeamia teoriasta. Näiden poikkeamien selittämiseksi Hall (2007) ja Ioannou et al (2008) ovat raportoineet n-dekaanilla tehtyjen imeytyskokeiden tuloksia. N-dekaani on orgaaninen neste, joka ei reagoi kemiallisesti useimpien materiaalien kanssa. N-dekaanin viskositeetti on hivenen matalampi kuin vedellä, ja pintajännitys neljän kertaluokkaa pienempi kuin vedellä. N-dekaanin ja ve-

den imeytyksestä saatuja painonnousukäyriä verrattiin skaalaamalla tulokset pintajännityksen ja viskositeetin avulla kaavalla (2.19).

Koekappaleen pinta-ala ja korkeus

Pinta-alan ei pitäisi vaikuttaa vapaan veden imeytyskokeen tulokseen. Käytännössä on osoitettu, että pinta-alalla on merkittävä vaikutus; eräässä kokeessa pinta-alaltaan 50x50 mm² ja 100x100 mm² koekappaleita verrattiin ja t-luvuksi saatiin 3,15 (Huang 2003). Toisessa tutkimuksessa suurempi pinta-ala oli 90x90 mm² ja t-luvuksi saatiin 10,95 (Bomberg et al. 2005 katso Liu 2003).

Koekappaleen korkeuden vaikutuksen pitäisi olla pinta-alan tapaan merkityksetön, ja sellaiseksi se on myös osoitettu (Huang 2003). Jos materiaalin huokokset ovat hyvin pieniä, on kapillaarinen imu niin voimakasta, että korkeidenkin koekappaleiden käyttö tuottaa teorian mukaista dataa; jopa 630 mm korkea kalkkikivikoekappale on tuottanut täysin teorian mukaisen painonnousukäyrän imun päättymisvaiheineen (Hall 2007). On myös osoitettu, että suuret huokokset täyttyvät pienien huokosten kautta myös kapillaarista nousukorkeutta ylempänä. Silloin huokosten täyttöaste jää vajaaksi, ja niihin jää ansaan ilmaa (Ioannou et al. 2008).

Alkukosteuspitoisuus ja imupinnan kosteuspitoisuuden virheet

Koekappaleen tulee veden imeytyksen alkaessa olla tasapainottunut johonkin kosteuspitoisuuteen. Hygroskooppisella alueella kosteus on sitoutunut materiaalin huokosiin vain huokosseinämille ja huokosilmaan (ks. luku 2.2.1). Kapillaarisella alueella huokokset alkavat täyttyä vedellä pienimmästä alkaen (ks. luku 2.2.2). Tästä johtuen kapillaarisen alueen alkukosteuspitoisuus vaikuttaa vapaan veden imeytymisnopeuteen (Janz 2002). Alkukosteuspitoisuuden varionti hygroskooppisella alueella on todettu merkityksettömäksi (Bomberg et al. 2005 katso Liu 2003). Uunikuivatun ja hygroskooppiseen olosuhteeseen tasapainotetun koekappaleen vedenimussa sen sijaan on osoitettu olevan eroa (Martys & Ferraris 1997; Huang 2003). Tämä saattaa olla seurausta uunikuivauksen koekappaleeseen synnyttämistä mikrohalkeamista (Martys & Ferraris 1997).

Upotussyvyyden vaikutuksen pitäisi olla mitätön, koska hydrostaattiset paineet ovat pieniä verrattuna kapillaariseen imuun (ks. luku 3.3.1). Studentin testillä on testattu upotussyvyyden vaikutusta: Upotussyvyyden arvoilla 3 mm ± 1 mm ja 1 mm ± 0,5 mm t-luvuksi saatiin 1,49 (Huang 2003). Vastaavasti 15 mm ± 0,5 mm ja 2 mm ± 0,5 mm upotussyvyksillä saatiin t-luku 1,07 (Bomberg et al. 2005 katso Liu 2003). Tulosten perusteella upotussyvyyden vaikutus veden imeytymiskertoimeen voidaan jättää huomiotta. Upotussyvyys vaikuttaa vain vapaan veden imeytyskokeen painonnousukäyrästä tehdyn lineaarisen regression y-akselin leikkauspisteeseen (Wilson et al. 1999).

Lineaarisen regression y-akselin leikkauspisteen nouseminen viittaa suurempaan painon nousuun kokeen alussa. Tämä on seurausta imupinnalla tapahtuvasta kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden ylittymisestä (Bomberg et al. 2005). Upotussyvyyden kasvu ilmeisesti kasvattaa ylikyllästyneen vyöhykkeen suuruutta. Ylikyllästynyt vyöhyke

tunkeutuu syvemmälle materiaaliin kokeen kestäessä pitkään (Pel et al. 1995). Tähän on useita syitä, joita on lueteltu edellä (ks. luku 3.3.1).

Ylikyllästyminen aiheuttaa virhettä koetulokseen. Tästä on saatu osoitus myös virhelähdekokeissa, joissa on varioitu mittauksen kokonaiskesto (Bomberg et al. 2005 katso Liu 2003). Lyhyellä mittausajalla niin ylikyllästymisen kuin muidenkin virhelähteiden vaikutus jää pienemmäksi (Huang 2003; Bomberg et al. 2005). Monet ajan kuluessa kokeeseen vaikuttavat virhelähteet tuottavat kapillaarisen imun tapaan ajan neliöjuuren suhteen lineaarista painon nousua, eikä niitä siksi pysty havaitsemaan painonnousukäyrästä (Martys & Ferraris 1997; Hall 2007).

Koekappaleen esikäsittelyt

Jälkihoidon vaikutus sementillä kovettujen materiaalien veden imeytymiskertoimeen on hyvin tunnettu. Jälkihoitoajan pidentäminen pienentää veden imeytymiskerrointa selvästi. Eräissä kokeissa veden imeytymiskerroin on noin puolittunut, kun verrataan 7 vrk ja 90 vrk jälkihoidettuja koekappaleita (Sabir et al. 1988). Ero näkyy merkittävänä jopa yli vuoden mittaisessa kokeessa (Martys & Ferraris 1997). Näin pitkällä imeytysjaksolla kaikki sementti on varmasti lopulta kerinnyt hydratoitumaan imeytyneen veden vaikutuksesta.

Kylkisuojauksella on suuri vaikutus lopputulokseen. Teipin ja vahan vertailussa t-luku oli jopa 30 (Huang 2003). Jos kylkisuojaus tehdään teipillä, voi teipin ja materiaalin väliin syntyä vesitaskuja, jotka vääristävät tulosta (Martys & Ferraris 1997; Huang 2003). Kylkisuojausmateriaalien välillä on havaittu eroa yleisemminkin. Samankaltaisella materiaalilla suojatuille koekappaleille on saatu laboratoriovertailussa yhteneviä veden imeytymiskertoimia (Roels et al. 2004; Bomberg et al. 2005). Myös yläpinnan suojaus saattaa vaikuttaa. Hygroskooppisen kosteuden sitoutumisen vaikutuksen voi havaita painonnousukäyrästä (Plagge et al.). Yläpinnan suojauksesta on saatu ristiriitaisia tuloksia; toisessa virhelähdekokeessa saatiin t-luku 3,49 (Huang 2003) kun toisessa vain 1,18 (Bomberg et al. 2005 katso Liu 2003).

Myös imupinnan hionnalla on vaikutusta veden imeytymiskertoimeen. Karhean ja siileän imupinnan vertailussa t-luvuksi on saatu 2,35 (Huang 2003). Hiotun ja kiillotetun imupinnan väliselle vedenimun erolle on myös esitetty syitä. Jos koekappaleet on satunnaisesti jaettu hiottaviin ja kiillotettuihin, eroa pitäisi olla vain avoimissa pintahuokosisa. Vedenimunopeus eroaa eniten alkuvaiheessa, mutta kiillotetun betonin imu on pysynyt nopeampana koko esitetyn 2400 sekunnin ajan. (Courard & Degeimbre 2003)

Mittaustapa ja laskenta

Koekappaleen painon muutosta voidaan seurata sekä käsin punnitsemalla että automaattisella punnituslaitteella. Molemmilla menetelmillä saadaan yhtä luotettavat painonnousukäyrät (Bomberg et al. 2005; Plagge et al.). Etenkin käsin punnitsemalla toteutetussa painon muutoksen seurannassa on monia punnituksen suorittajasta riippuvia virhelähteitä.

tä. Hyvällä ohjeistuksella kokeen tekijän vaikutus lopputulokseen on saatu eliminoitua (Bomberg et al. 2005).

Käsin punnittaessa koekappaleen imupinta puhdistetaan irtovedestä jokaisen punnituksen yhteydessä. Imupinnan puhdistustavan vaikutusta tuloksiin on vertailtu. Paperi-pyyhkeellä tehtävä kuivaus verrattuna määrätyn mittaiseen (1 tai 5 min) luonnolliseen kuivaukseen on tuottanut t-lukuja väliltä 2,9–9,9 (Huang 2003; Bomberg et al. 2005 katso Liu 2003). Imupinnan kuivaustavalla on todettu olevan suurempi vaikutus kuin punnituksesta aiheutuvalla veden imeytymisen tauolla (Huang 2003).

Huang (2003) on tutkinut myös sovitefunktion ja käyrän sovitukseen käytettävien punnitustulosten lukumäärän vaikutusta. Sovitefunktiolla on todettu olevan merkittävä vaikutus, mutta hänen käyttämänsä vaihtoehtoinen funktio lähinnä mahdollistaa aivan kokeen alussa olevan lineaarisesta poikkeavan imukäyttäytymisen huomioon ottamisen. Hän on todennut myös origon huomioon ottamisen vaikuttavan veden imeytymiskertoimen arvoon (ks. luku 3.3.1). Hänen esittämänsä vaihtoehtoinen sovitekäyrä auttaa poistamaan origon mukanaolon aiheuttaman virheen. Gravitaation tai diffuusion huomioon ottavia sovitekäyriä on tutkittu vain sen pohjalta, miten ne istuvat punnitustuloksiin (Hall 1989; Martys & Ferraris 1997).

Veden ominaisuudet

Tärkeät kapillaariseen imuun vaikuttavat nesteen ominaisuudet ovat viskositeetti ja pintajännitys. Lämpötilan vaihtelu vaikuttaa näiden suuruuteen. Veden lämpötilan vaikutusta veden imeytymiskertoimeen on tutkittu. Lämpötilan noususta tulisi seurata veden imeytymiskertoimen nousu (Pavlik & Černý 2012). Lämpötilavariaatioilla 3, 12, 21 ja 35 °C on saatu puulle lineaarinen riippuvuus veden imeytymiskertoimen ja veden lämpötilan välille, kun taas betonilla ei lämpötilavaikutusta havaittu. Tiilelläkään selkeää riippuvuussuhdetta ei ole havaittavissa. Tiiviimmillä materiaaleilla lämpötilavaikutukset ovat pienemmät. (Mukhopadhyaya et al. 2002) Kevytbetonille tehdyssä kokeessa lämpötilavariaatiot olivat 20, 40, 60 ja 80 °C. Tässä kokeessa havaittiin vedenimunoisuuden kasvua lämpötilan noustessa (Pavlik & Černý 2012).

Vesi reagoi monien materiaalien kanssa. Painonnousukäyristä havaittavat poikkeamat voivat teoriassa olla seurausta materiaalin reagoimisesta veden kanssa. N-dekaanilla tehtyjen imeytyskokeiden vertailu vedellä tehtyihin kokeisiin osoittaa, että luotettavankin olinen lineaarinen painonnousukäyrä voi sisältää teoriasta poikkeamia, jotka todennäköisesti johtuvat veden ja materiaalin välisistä kemiallisista reaktioista. (Hall 2007; Ioannou et al. 2008)

Sementtipitoisten materiaalien reaktiot veden kanssa aiheuttavat veden suolapitoisuuden nousua. Erot suolapitoisuuksissa voivat vaikuttaa veden imeytymiseen. Etukäteen suolalla kyllästetyn veden imeytymisellä ei kuitenkaan havaittu olevan eroa puhtaalla vedellä tehdyn kokeen imeytymisnopeuteen (Martys & Ferraris 1997).

3.3.3 Virhelähteiden yhteenveto

Edellä on käsitelty monia virhelähteitä ja niiden vaikuttavuuksia. Taulukossa 3.1 on yhteenveto mainituista virhelähteistä ja niiden vaikutuksista veden imeytymiseen.

Taulukko 3.1: Virhelähteiden yhteenveto

Virhelähde	merkitys
yhdensuuntaisten huokosputkien	Yhdensuuntaisissa huokosputkissa veden oletetaan etenevän yhtenäisenä rintamana, jossa huokoskoko ei vaikuta virtausvastukseen. Teoria ei myöskään tunnista kapillaarista nousukorkeutta.
yksiulotteisuuden oletus	
-kylkisuojaus	Diplomityössä testatut erilaiset kylkisuojaukset eivät vaikuttaneet tuloksiin. Teippiä ei kuitenkaan tule käyttää.
-koekappaleen muoto	Diplomityössä tehtyjen tutkimusten perusteella neliöiden ja pyöreiden koekappaleiden tulokset eroavat systemaattisesti.
-koekappaleen pinta-ala	Pinta-alan on todettu vaikuttavan mittaustuloksiin, mutta diplomityön kokeissa merkittäviä eroja eri pinta-alojen välillä ei ollut.
-imupinnan katvealueet	Jos katealueet ovat verrattain pieniä, niiden vaikutus katoaa kokeen alun muiden virheiden sekaan.
imusuunta; gravitaation vaikutus	Jos gravitaatiolla on vaikutusta, myös imusuunnalla on vaikutusta. Gravitaation vaikutus veden imeytymiseen vapaan veden imeytyskokeessa näkyy painonnousun käyrän kaareutumisena.
-koekappaleen korkeus	Korkeudella ei ole vaikutusta veden imeytymiskertoimeen.
imupinnan kosteuspitoisuus	Kosteuspitoisuus nousee yli kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden ja tämä näkyy ainakin y-akselin leikkauspisteen siirtymisenä.
-upotussyvyys	Vaikuttaa etenkin imupinnan kosteuspitoisuuteen ja siksi tulisi minimoida, vaikka vaikutus veden imeytymiskertoimeen on pieni.
jälkihoito	Jälkihoito vaikuttaa huokoskokojakaamaan ja siten myös veden imeytymiseen.
imupinnan käsittely	Kiillotettu imupinta imee vettä nopeammin kuin karkeaksi hiottu.
alkukosteuspitoisuus	Hygrokoopin alueen alkukosteuspitoisuudet eivät vaikuta veden imeytymiseen.
-uunikuiवास	Lisää ainakin betonilla mikrohalkeilua ja siten myös vedenimunopeutta.
-yläpinnan kosteuspitoisuus	Vaikutus painonnousun käyrään voidaan minimoida yläpinnan suojauksella.
imeytettävä vesi	Koekappaleista irronnut suola ei vaikuta veden imeytymisnopeuteen. Vesi reagoi monien materiaalien kanssa teoriasta poikkeavalla tavalla. Esimerkiksi puun soluseinämät imevät vettä ja sementti hydratoituu.
-mittaustilan lämpötila	Veden virtausominaisuudet muuttuvat lämpötilan mukana ja nyrkkisääntönä on, että vedenimeytymiskerroin kasvaa 1 % kun lämpötila nousee 1 %.
imupinnan veden poistaminen	Veden puistaaminen imupinnalta vaikuttaa merkittävästi punnitustulokseen. Vaikutus on suurempi kuin vedestä poistamisen aiheuttama veden imeytymisen tauko.
nostevaikutusten eliminointi	Hitaasti vettä imevillä materiaaleilla haihtumisen vaikutus mittaustulokseen on suuri ja haihtumisnopeus tulee määrittää oikein.
mittauksen kesto	Pitkään kestäneistä kokeista voidaan huomioida vain mittausdatan alkuosa. Jos koko data huomioidaan, voi tällä olla vaikutusta tuloksiin.
sovitefunktiot	Eri sovitefunktioilla voidaan huomioida esimerkiksi gravitaation vaikutus.

4 LABORATORIOKOKKEET

Laboratoriotutkimus on tehty useassa vaiheessa, joiden aikana tutkimuslaitteistoa on kehitetty. Mittauksen ohjenuorana käytettiin EN ISO 15148 (2002) standardia. Tutkimuksen ydinajatuksena on selvittää veden imeytymiskertoimen mittauksen virhelähteitä ja esittää niin kirjallisuuskatsauksen kuin käytännön kokeiden osalta mahdollisimman korkealaatuinen menetelmä veden imeytymiskertoimen määrittämiseksi.

Veden imeytymiskertoimen lisäksi materiaalin kapillaarisuuteen liittyviä ominaisuuksia ovat ainakin veden tunkeutumiskerroin, kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus ja kapillaarinen nousukorkeus. Veden imeytymiskertoimen määrittämisen yhteydessä pystytään määrittämään kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus ja veden tunkeutumiskerroin. Kapillaarisen nousukorkeuden määrittäminen vaatii erillisen koejärjestelyn, ja siksi se on rajautunut kokonaan käytännön kokeiden ulkopuolelle.

Jo aikaisessa vaiheessa tuli esille, että standardin mukaisessa veden imeytymiskertoimen mittaamenetelmässä suurena virhelähteenä ovat punnitseminen ja sen yhteydessä tehtävä veden puhdistus. Koska aiemmissa tutkimuksissa (ks. luku 3.2) tämän virhelähteen eliminoinemiseksi on otettu käyttöön automaattinen mittaustaitteisto, niin jo varhaisessa vaiheessa päätettiin rakentaa vastaava laitteisto myös TTY:n rakennusfyysiikan tutkimusryhmän laboratoriotiloihin.

Ensimmäiset mitattavat materiaalit valittiin käytettävissä olevien valmiiden koekappaleiden ja niiden tunnettujen materiaaliominaisuuksien perusteella. Tästä sarjasta mielenkiintoisin materiaali valittiin jatkotutkimuksiin. Lisäksi jatkotutkimuksissa oli mukana valitun tuotteen rinnakkaisvalmiste. Näistä kappaleista valmistettiin sarjat, joissa varioitiin kappaleiden suojausta, imupinnan muotoa ja kokoa.

4.1 Tutkimuslaitteisto

Materiaalikokeet päätettiin tehdä automaattista mittaustaitteistoa käyttäen. Hankintaprosessi automaattimittaukseen soveltuviin vaakoihin käynnistettiin välittömästi reunaehdoilla: lukematarkeuus 0,01 g, alapuolinen punnitusmahdollisuus, USB-liitäntämahdollisuus sekä yli 2 kg kapasiteetti. Hintatiedustelujen ja laadun arvioinnin perusteella vaaoksi valikoitui Precisa ES4200M. Edustavan materiaaliominaisuuden määrittämiseksi oli syytä tutkia ainakin kolme rinnakkaista koekappaletta. Jotta tulokset saatiin samanaikaisesti, hankittiin kolme vaakaa, ja mittaускаapit rakennettiin kolmen rinnakaisen koekappaleen samanaikaiseen mittaamiseen.

Mittauskaapin rakentaminen tehtiin alusta alkaen itse. Sopivaa runkoa ei löytynyt, koska vaatimuksena oli sopiva hyllyväli, jossa olisi riittävästi tilaa vaa'alle, korkea tila koekappaleen kannatintelineelle ja vesiastialle, sekä riittävä alapuolinen tila vesiastian korkeudensäätömekanismille (Kuva 4.1). Veden korkeuden vakioimiseksi mittauskaappeihin rakennettiin veden ylivirtausjärjestelmä, joka vaati oman tilansa. Mittaustilanteen olosuhteiden vakioimiseksi kannatintelineen ja vesiastian tila tehtiin mahdollisimman umpinaiseksi, ja mittauskaappi varustettiin läpinäkyvällä pleksiovellalla. Tähän tilaan asennettiin suhteellista kosteutta ja ilman lämpötilaa mittaava anturi, jonka tulokset kerättiin aika-ajoin erillisellä tietokoneella.



Kuva 4.1: Automaattinen vapaan veden imeytys laitteisto.

Veden korkeutta täytyi kokeen alussa voida säätää niin, että haluttu koekappaleen upotussyvyys saavutettiin. Tämän mahdollistamiseksi vesiastia asennettiin hydraulisen tunkin varaan. Tunkilla nostaminen on helppo tehdä stabiilisti, nopeasti ja portaattomasti. Tunkeissa havaittiin pientä hiipumaa; tunkit antoivat jo pienelläkin kuormalla periksi noin 0,1–1 mm/h, minkä vuoksi niihin piti järjestää mekaaninen varmistus. Varmistus toteutettiin tunkin varren ympärille kiristettävällä klemmarilla, joka tukeutuu tunkin runkoon.

Mittaustulosten keräämiseksi mittauskaapin yhteyteen asennettiin tietokone, jossa oli kyseisille vaa'oilta tätä mittausta varten räätälöity ohjelma. Ohjelman teki LabVIEW-ohjelmiston avulla sähkötekniikko Samu Häyrinen. Ohjelma tulosti tiedostoon määrättyin aikaväleihin päivämäärä–kellonaika -leiman, kuluneen ajan sekunteina mittauksen käynnistämisestä sekä vaakojen painolukeman. Myöhemmin ohjelmaan lisättiin toiminto keskitettyyn vaakojen sisäisen kalibroinnin käynnistämiseen. Ohjelmalla säädettiin lisäksi veden ylivirtaukseen käytettävän vesipumpun käyntijaksoja. Päivitysten yhteydes-

sä mittalaitteistoon lisättiin veden lämpötila-anturit, ja ohjelma päivitettiin keräämään myös näiden mittaustuloksia.

4.1.1 Kannatintelineet

Kannatinteline suunniteltiin toteutettavaksi kirjallisuudessa esiintyneiden telineiden pohjalta mahdollisimman yksinkertaiseksi. Kuvasta 4.2a voidaan nähdä kannatintelineen perusrakenne. Telineitä rakennettiin eri kokoisille kappaleille. Suurinta käytettyä halkaisijaa varten tehtiin myös pohjasta kannatteleva malli (kuva 4.2b). Ensimmäinen versio kannatintelineestä (kuva 4.2c) osoittautui hankalaksi käyttää, koska koekappale oli lähes mahdoton asentaa siihen siten, että imupinta olisi mittauksen aikana asettunut vaakasuoraan.



Kuva 4.2: Kannatintelineen kehitysversiot vasemmalta a) perusmalli, b) raskaat kappaleet, c) ensimmäinen versio.

Jotta imupinta olisi mahdollisimman vaakasuorassa mittauksen aikana, tehtiin kuhunkin kannatinmalliin säätövara, jonka avulla kannatin voitiin esisäätää. Kannattimet pyrittiin rakentamaan mahdollisimman korkeiksi, jotta pienet muutokset eri koekappaleiden painopisteissä eivät radikaalisti muuttaisi riippuvan kannattimen tasapainoasemaa. Näin saavutettiin koekappaleesta toiseen mahdollisimman vakaana pysyvä imupinnan vaakasuoruuden esisäätö, sekä mahdollisimman suuri koekappaleen korkeuden variointikapasiteetti.

Kannattimen perusmallissa (kuva 4.2a) koekappaletta kannatellaan kyljistä puristamalla. Painavilla koekappaleilla ja huonosti tarttuvilla kylkisuojusmateriaaleilla kitka osoittautui liian pieneksi, ja tuli tarpeelliseksi rakentaa myös imupinnasta kannatteleva malli (kuva 4.2b). Tämä malli osoittautui käteväksi myös hyvin ohuilla koekappaleilla, kun kylkipinta-alaa on hyvin vähän.

Kannatinteline (kuva 4.2a), jossa kappale kiinnitetään kyljistä puristamalla, osoittautui hyväksi ja helppokäyttöiseksi. Käytön kannalta ratkaisevaa on, että koekappaleen halkaisija on hyvin lähelle sama kuin mikä kannatinta tehdessä on ajateltu. Kun kannatinta

tinta ei tarvitse kiristää paljon, eli koekappale ei ole liian pieni, pysyy vaakasuoruuden esisäättö paremmin kohdillaan. Etenkin vahasuojauksia käytettäessä tämä kannattelutapa rikkoo helposti kylkisuojauksia, jos kannatin kiristetään tiukasti kappaleen ympärille.

Pohjasta kannatteleva malli (kuva 4.2b) poistaa kylkisuojauksen vaurioitumisriskin, mutta aiheuttaa imupinta-alan vääristymistä. Kannatteleva pinta-ala voidaan minimoida kannatinta muokkaamalla, mutta perusongelma säilyy. Toinen ongelma tässä kannattimessa on, että kappale ei ole kannattimessa mitenkään kiinni. Tämän vuoksi kappale liikkuu helposti kun kannatinta ripustetaan mittausrakenteeseen tai otetaan sieltä pois.

Kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden mittaamisessa on tärkeää saada kappaleen lopullinen paino mitattua ilman ylimääräistä vettä. Imupinnasta kannatteleminen vaikeuttaa tämän punnituksen onnistumista, kun tukipintojen ympäristöön jää helposti vettä.

4.1.2 Veden korkeuden stabilointi

Automaattisessa mittausrakenteessa koekappale punnitaan vesikosketuksen aikana. Vesikosketuksen vuoksi punnitustulokseen tulee aina systemaattinen virhe, joka johtuu veden paineesta kappaleen alapinnalla. Vaikka upotussyvyys on hyvin pieni, ja se muuttuu mittauksen kuluessa negatiiviseksi, ei vesikosketus katkea. Vesi ”roikkuu” kappaleen alapinnassa pintajännityksen avulla. Tässä tilanteessa roikkuva vesi lisää kappaleen painoa, jolloin on harhaanjohtavaa puhua nosteen aiheuttamasta punnitustuloksen virheestä.

Veden korkeuden vaihtelun tulee olla tunnettua, jotta voidaan puhua relevantista mittausten menetelmästä. Koska vaihtelu on hyvin pientä, ja useimmat veden tasoa mittaavat järjestelmät häiriintyvät reunakulman hystereesistä (ks. luku 2.4.1), ei suora vedenpinnan korkeuden mittaaminen ole järkevää.

Veden korkeuden vaihtelu määritettiin tekemällä tavanomaista mittausta vastaava koe, jossa vettä imevän koekappaleen tilalla käytettiin vastaavan pinta-alaista muovitulppaa. Näin tasovaihtelu saatiin laskettua punnitustuloksen huojunnasta luvun 5.1 mukaisesti.

Kehitysversio 1

Kokeessa käytettävän vesiasian pinta-ala oli rajallinen, koska astian tuli mahtua mittausta kaappiin. Tästä seurasi, että koekappaleen itseensä kokeen aikana imemä vesimäärä saattoi materiaalista riippuen aiheuttaa merkittäväkin vedenpinnan alenemista. Stabiili upotussyvyys on järjestetty aiemmissa kokeissa (ks. luku 3.2) esimerkiksi veden ylivirtausjärjestelmän avulla.

Ensimmäisessä mittausrakenteen versiossa vesiasioihin tehtiin V-muotoinen ylivirtausreitti, joka oli jäljitelty passiivisista patojärjestelmistä, joissa pyritään tasaamaan veden tasovaihteluita. Kun vedenpinta nousee, V-muotoisen virtauskanavan pinta-ala suurenee ja ylivirtaavan veden määrä kasvaa. Sama toimii myös kääntäen, ja tuloksena

on stabiilimpi vedenpinta, kuin jos tulviva vesi virtaa vaakasuoran reunaman yli. Vaaka-suoran reunan tapauksessa vesi saattaa nousta reilusti reunaman kynnykskorkeutta ylemmäs pintajännityksen pidättelemänä. Kun virtaus lopulta alkaa, ei se kuitenkaan lopu, ennen kuin veden taso on laskenut takaisin reunan kynnykskorkeudelle.

Veden jatkuvan ja vakaan ylivirtauksen aikaansaamiseksi rakennettiin mittauskaapiston yläosaan vesisäiliö, josta lähti putket mittauskaappien vesiasioihin. Vesi nostettiin ylävesisäiliöön pumppaamalla alemmasta varastosäiliöstä. Ylemmässä säiliössä vesi oli korkeammalla kuin mittausvesiasioissa. Vakio korkeuseron ajamana vesi virtasi melko vakaasti. Yläsäiliön veden tasovaihtelu tasattiin mahdollisimman pieneksi niin, että pumppu ei käynyt jatkuvasti ja käyntijaksot olivat järkeviä, luokkaa 5–10 sekuntia. Yhdysputket mittausasioihin valittiin niin, että niiden aiheuttama virtausvastus piti veden virtauksen rajallisena. Saavutettu virtausnopeus oli luokkaa 1 l/min.

Ensimmäinen koesarja tehtiin ylivirtausjärjestelmää käyttäen. Tässä yhteydessä muovitulpilla tehtyjen vertailumittausten perusteella havaittiin, että ylivirtausjärjestelmä ei pysynyt riittävän stabiilina. Kokeen aikana koekappaleista irtosi veteen epäpuhtauksia. Lisäksi mittaukseen käytettävästä hanavedestä erottui jonkin verran sakkaa. Näiden epäpuhtauksien myötä putkien virtausvastus kasvoi ja virtausnopeus hidastui. Vastaavasti ylivirtausaukkoihin kertyi epäpuhtauksia. Epäpuhtauksien mahdollisesti pintajännitykseen aiheuttamia muutoksia ei tutkittu, mutta tälläkin oli todennäköisesti vaikutusta ylivirtauskanavassa.

Ylivirtauksen stabiloimiseksi järjestelmä puhdistettiin huolellisesti, ja käyttöön otettiin käänteisosmoosilla puhdistettu vesijohtovesi. Puhtaalla järjestelmällä vedenpinta pysyi melko stabiilina, mutta mittauksen aloituksessa aiheutuvan korkeuden poikkeaman tasaantuminen vei silti aikansa. Alun tasaantumisen jälkeen vedenpinnan tasovaihtelu oli melko systemaattista ja huojunta pientä. Tätä on tarkasteltu luvussa 5.1.1. Muutamien koekappaleiden tehdyn kokeen jälkeen vedenpinnan stabiilius oli jo merkittävästi huonompi. Veden vaihto auttoi asiaa, mutta ei poistanut putkistöihin kertyneitä epäpuhtauksia.

Kehitysversio 2

Ylivirtausjärjestelmää ei saatu stabiloitua mielekkäälle tasolle, joten käyttöön otettiin ylivirtaukseton mittausmenetelmä. Koekappaleen itsensä imemän vesimäärän aiheuttama vedenpinnan tasomuutos on laskettavissa puhtaasti matematiikalla luvun 5.2.1 mukaisesti. Toinen tasoon vaikuttava tekijä oli veden haihtuminen vesiasistiasta. Suljetun mittauskaapin tilanteessa haihtuminen oli vähäistä, mutta silti havaittavaa.

Haihtuvan veden vuoksi tarvittiin suuri määrä haihtumiskokeita, joiden perusteella haihtumiselle saatiin lasketuksi sovitekäyrät ja riippuvuudet olosuhteista. Mittauskaappien olosuhteiden korrelaatio haihtumisnopeuteen jäi olemattomaksi, ja tuli tarpeelliseksi seurata mittaushuoneen olosuhteita. Mittaushuoneen suhteellinen kosteus korreloi varsin hyvin haihtumisnopeuden kanssa, ja haihtumisen eliminointi mittausdatasta lisät-

tiin Excel -laskentapohjaan regressiokäyrien ja suhteellisen kosteuden riippuvuuden avulla luvun 5.2.1 mukaisesti.

Virhelähdekokeet tehtiin pääasiassa tämän kehitysversion menetelmillä, osa ylivirtausta käyttäen ja osa haihtuvana mittauksena. Haihtuvalla mittausmenetelmällä tehdyissä kokeissa mittausastioiden vesi vaihdettiin joka toiselle koesarjalle. Tällä tavalla jokaista sarjaa edeltänyt haihtumiskoe tuli tehtyä sekä puhtaaseen että kertaalleen käytettyyn veteen. Koekappaleiden tuloksia laskiessa heräsi kysymys likaisen veden vaikutuksesta mittauksituloksiin. Vaikutusta ei pystytty poissulkemaan eikä varmistamaan.

Haihtumiskokeita analysoidessa alkoi niiden joukosta erottua systemaattisesti häiriintyneitä kokeen alkuvaiheen tuloksia. Tämä osoitti tarpeen systemaattisemmalle ja vakioidummalle toimintatavalle kokeen alussa. Osa häiriöistä oli jäljitettävissä vedenvaihdon yhteydessä tehtyyn mittausvesiastioiden pesuun, jonka jäljiltä vesiastian ulkopinnoille oli jäänyt haihtuvaa vettä.

Kehitysversio 3

Haihtuvaan veteen tehty mittaus osoittautui useimmille tutkituille materiaaleille hyvin sopivaksi menetelmäksi. Kehitysversion 2 haihtuvien mittauksien yhteydessä havaitut virhelähteet oli järkevää eliminoida, koska kyse oli lähinnä toimintatapojen yhtenäistämistä. Tämä oli viimeinen diplomityön yhteydessä sisään ajettu kehitysversio, ja vaati normaalin luotettavuus seurannan lisäksi ainakin haihtumiskokeiden osalta vielä täydentämistä.

Luvussa 4.1 mainittu tunkkien hiipuminen näkyi haihtumiskokeiden alussa nopeana veden laskeutumisena sekä suurehkona hajontana. Virheen minimoimiseksi tunkkien mekaanista lukitusta kehitettiin helpommaksi, ja lukitseminen nostettiin prioriteettilistalla ensimmäiseksi niin, että se tehdään mittauksen alussa heti veden nostamisen jälkeen. Mittauksen aloituksen työjärjestystä sekä menetelmiä kehitettiin muiltakin osin yhtenäisemmiksi, jotta haihtumisen korjauskäyrien hajonta jäisi mahdollisimman pieneksi.

Veden vaihtaminen otettiin osaksi jokaisen mittauksen lopettamista, eli laitteisto huuhdeltiin ja vesi vaihdettiin jokaisen mittauksen jälkeen. Tämä aiheutti viivettä seuraavan mittauksen aloittamiseen, koska veden lämpötilan oli annettava tasaantua mittauskaapeissa ennen seuraavan mittauksen tekemistä. Mittausvesiastian oli myös annettava kuivua ennen uuden mittauksen aloittamista, koska vesiastian pinnoille pesun jäljiltä jääneet vesipisarot aiheuttivat hajontaa haihtumisnopeuteen. Vetenä käytettiin aina laboratoriossa käänteisosmoosilla puhdistettua hanavettä.

Veden lämpötilan tasaamisen aikana mittauskaappien ovet olivat suljettuina. Näin myös kaapin kosteutta sitovat seinämateriaalit tasaantuivat mittausolosuhteisiin, eivätkä aiheuttaneet tuntematonta muuttujaa haihtumisnopeuteen. Uudistusten jälkeen haihtumiskokeet aloitettiin uudelleen tarkempien haihtumiskäyrien koostamiseksi. Tämän kehitysversion mukaisesta mittaustavasta tehtiin toimintatapaohje (Tuominen 2014) koetta tällä laitteistolla suorittavien ohjeistamiseksi.

Mittausjärjestelyn jatkokehitys

Haihtumisen aiheuttaman virheen eliminointia tehdessä esiin nousi vaihtoehto, jossa myös vesiastiaa punnittaisiin kokeen aikana. Tämä aiheuttaisi päivitystarvetta niin laskentapohjiin, mittauskaappiin kuin mittausohjelmaankin. Nostemuutosten eliminointia koekappaleen painon muutoksesta toisen vaa'an punnitustulosten avulla ei olla koitettu laskea. Laskenta on syytä tehdä ennen näin suuren mittakaavan laitteiston päivitystä, jotta voidaan varmistua muutoksen parantavan lopputuloksen luotettavuutta.

Pitkäkestoisissa kokeissa tai paljon vettä imevillä materiaaleilla voi vedenpinnan liian suuri laskeutuminen tulla ongelmaksi. Veden lisääminen kokeen aikana aiheuttaa uuden virhelähteen ja epäjatkuvuuden nostemuutosten korjaamiseen. Virhelähde saattaa eliminoidua suoraan käytettäessä toista vaakaa, mutta ainakin kehitysversio 3 mukaisessa mittauksessa veden lisäyksen aiheuttama nostemuutos on eliminoidava käsin, ja tämä vaatii hieman perehtymistä laskentapohjan toimintalogiikkaan.

Mikäli hydraulisia tunkkeja käytetään myös jatkossa, on niiden mekaanista lukitusta edelleen syytä kehittää. Lukituksen kanssa menee tarpeettomasti aikaa ja vaivaa, eikä nykyisten lukitusten kehittäminen kierrettävistä pikalukittaviksi ole suuri vaiva.

Haihtumiskorjausta saattaisi olla mahdollista tarkentaa, jos korjauskäyrät vaihtaisi paloittain tietyn aikavälin suhteellisen kosteuden mukaan määriteltäviksi funktioiksi. Tämä edellyttäisi mittaushuoneen olosuhteiden sisällyttämistä mittausdataan, eli tietokoneeseen tulisi liittää ainakin yksi suhteellista kosteutta mittaava anturi. Nyt haihtumiskorjaus tehdään mittauksen kokonaisuuden keskimääräisellä suhteellisen kosteuden arvolla. Haihtumisen alkuvaiheen epälineaarisen osan lyhentämiseksi mittauskaappien tiiviyyttä tulisi parantaa entisestään.

4.2 Tutkittavat materiaalit

Ensimmäisiksi tutkittaviksi materiaaleiksi valikoitui meneillään olleen tutkimusprojektin erilaiset laastit ja tasoitteet, joista valmiina olivat ominaislämpökapasiteetin määrittämiseksi tehdyt koekappaleet. Kaikkia käytettävissä olleita materiaaleja ei tutkittu, vaan valikointia tehtiin jo tunnettujen materiaaliominaisuuksien perusteella.

Virhelähdekokeisiin tarkoitettu ja isompi sarja samasta materiaalista valmistettuja koekappaleita valittiin jo mitattujen materiaalien joukosta kiinnostavuuden ja saatujen tulosten perusteella. Valittua laastia oli tarvetta myös vertailla rinnakkaisvalmisteeseen, josta valmistettiin vastaavan tyyppinen virhelähdekoesarja. Lopuksi tutkimukseen sisällytettiin muutamia muita kiinnostavia materiaaleja, joista oli koekappaleet valmiina aiempien materiaaliominaisuustutkimusten jäljiltä.

4.2.1 Ensimmäinen koesarja

Ensimmäisen sarjan kokeet tehtiin laitteiston kehitysversiolla 1. Koekappaleet valittiin Tiina Ruuskan diplomityössä (Ruuska 2014) tutkittujen materiaalien joukosta. Kutakin

materiaalia tutkittiin vähintään kolmen koekappaleen sarja, lisäksi kahdesta laastista tehtiin mittaukset myös ohuilla koekappaleilla.

Materiaalien tarkempi määrittely ja koekappaleiden valmistus on esitetty Tiina Ruuskan diplomityössä. Tutkitut materiaalit ja niiden tiedossa olevat perusominaisuudet on esitetty taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1: Ensimmäisen koesarjan materiaalit.

Tuote	Tyyppi	Raekoko [mm]	Tiheys [kg/m ³]	Lämmönjohtavuus [W/mK]
Kiilto 70	Lattiatasoite	3	2089	2,20
Tasoflex	Lattiatasoite	0,5	1916	1,09
Lattialaasti DF	Kiinnityslaasti	0,5	1539	0,72
Highflex S2	Kiinnityslaasti	0,3	1058	0,44
Kiilto OTR	Seinätaasoite	2	1465	0,78
Kiilto KL	Seinätaasoite	1,5	1341	0,60
Kiilto Saumalaasti no. 39	Seinätaasoite	0,2	1471	0,92
EPS-pitoinen laasti	Muut	?	500	0,16
PCM-laasti*	Muut	?	1198	0,35

* PCM-laasti on PCM-materiaalia sisältävää, muokattua KL-laastia

Koekappaleiden koko ja muoto oli valittu ominaislämpökapasiteetin mittausslaitteen mukaisesti. Lieriön muotoiset koekappaleet olivat halkaisijaltaan noin 57 mm ja kappaleiden korkeus oli luokkaa 17–21 mm pois lukien ohuet koekappaleet, jotka olivat noin 8 mm paksuja.

4.2.2 Virhelähde- ja täydentävät kokeet

Virhelähdekokeet tehtiin marmorinvalkoisella ”Saumalaasti no. 39”-materiaalilla (myöhemmin tavanomainen saumalaasti) sekä hiilenharmaalla ”Lattiasaumalaasti”-materiaalilla (myöhemmin modifioitu saumalaasti). Modifioidun saumalaastin vedenimuominaisuuksia on muokattu, ja se on rinnakkainen valmiste saumalaastille.

Saumalaasti tuli valituksi virhelähdekokeisiin, koska saumalaastien vedenimuominaisuudet ovat yleisesti kiinnostavampia kuin esimerkiksi seinätasoitteiden. Rinnakkaisvalmiste otettiin mukaan, koska haluttiin selvittää vedenimuominaisuuksien muokkauksen vaikutus veden imeytymiskertoimeen. Ensimmäisen mittasarjan perusteella oli tiedossa, että saumalaastin vedenimuominaisuudet ovat lähes samat betonin kanssa, mikä oli lupaava lähtökohta virhelähdekokeiden kannalta.

Mittauksiin valittiin edellä mainittujen materiaalien lisäksi muutama vedenimuominaisuuksiltaan mielenkiintoinen rakennusmateriaali. Tarkoituksena oli tehdä vertailumittausta kirjallisuusarvoihin sekä testata laitteiston soveltuvuutta eri nopeuksilla vettä imeviin materiaaleihin.

Betonin veden imeytymiskerroin on yleisesti mielenkiintoinen, ja betonille löytyy hyvin myös veden imeytymiskertoimen kirjallisuusarvoja. Betonikappaleita mitattiin

yhteensä 18 kpl, joista kuusi edusti puretusta rakennuksesta otettuja näytteitä (Köliö 2015). Loput koekappaleet olivat Elina Maneliuksen diplomityöhön (Manelius 2013) vesihöyrynläpäisevyyskokeita varten valmistettuja muotoon valettuja kiekkoja.

Maneliuksen työssä valmistettiin koekappaleita myös muista materiaaleista, vaikka näiden vesihöyrynläpäisevyyttä ei mitattu. Kevytsorabetonista ja kevytbetonista mitattiin yksittäiset koesarjat niiden poikkeavien huokosrakenteiden vuoksi. Hitaasti vettä imevä polymeerimodifioitu julkisivurappauslaasti otettiin mittauksiin mukaan, koska haluttiin selvittää automaattilaitteiston soveltuminen tällaisen materiaalin mittaamiseen.

Käytettävissä olevat yksilöintitiedot toisessa vaiheessa tutkituista materiaaleista on esitetty taulukossa 4.2.

Taulukko 4.2: Virhelähde- ja täydentävien kokeiden materiaalit.

Alkuperä	Tuote	Raekoko [mm]	Tiheys [kg/m ³]
Kiilto	Saumalaasti no.39	<0,2	1640
Kiilto	Lattiasaumalaasti	<0,3	1665
Manelius	Betoni C20/25	<16	2365
Manelius	Betoni C32/40	<16	2285
Purkukohde	Valkoinen pesubetoni	-	2365
Purkukohde	Pesubetonikuoren taustabetoni	-	2333
Manelius	Kevytsorabetoni	-	735
Manelius	Kevytbetoni	-	430
Caparol	Capatect-Klebe- und Armierungsmasse 186M	-	1400

Kaikkien materiaalien valmistajaa tai alkuperää ei pystytty tarkasti määrittämään. Koekappaleet otettiin silti mukaan mittauksiin, koska niistä saatiin helposti materiaalityyppejä edustavat ja koelaitteiston toimivuutta osoittavat tulokset.

4.3 Koekappaleiden valmistaminen

Kaikki tutkitut koekappaleet valmistettiin valamalla. Aiemmissä tutkimuksissa valmistetut koekappaleet olivat valmiiksi varastossa, eikä niiden valamista käsitellä tässä työssä. Virhelähdekokeisiin valmistettiin tavanomaisesta ja modifioidusta saumalaastista koekappaleet tämän tutkimuksen yhteydessä, ja seuraavassa on kuvattu niiden valu- ja jälkihoitoprosessi.

Koekappaleiden mittaukseen liittyvät valmistelut on kuvattu kaikkien koekappaleiden osalta. Näitä olivat tasapainotus valittuun kosteuspitoisuuteen, imupintojen hionta ja suojaaminen. Eri tutkimuksen vaiheissa käsitellyt kappaleet hiottiin eri tavalla, koska hiontaan sopivaa laitteistoa kehitettiin tutkimuksen edetessä. Tasapainotus ja suojaaminen sen sijaan tehtiin samoin kaikille koekappaleille pois lukien virhelähdekokeiden yhteydessä tarkoituksella tehdyt varioinnit.

4.3.1 Valu ja jälkihoito

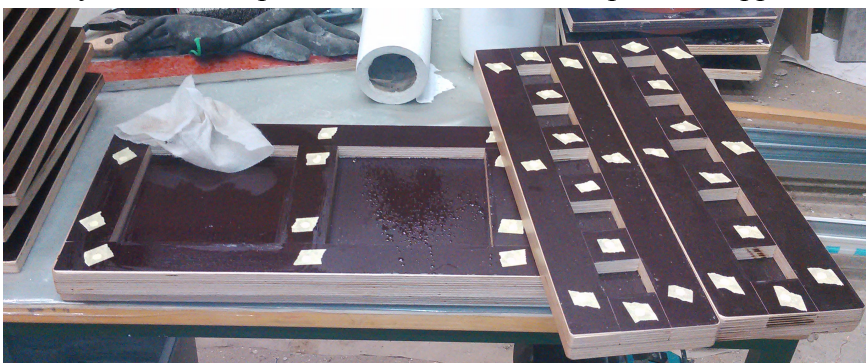
Valu suoritettiin kolmessa erässä; tavanomaisen saumalaastin koekappaleet tehtiin kahdesta erästä, ja modifioidun saumalaastin koekappaleet yhdestä laastierästä. Tavanomaisen saumalaastin tapauksessa ensimmäisestä valmistuserästä tehtiin halkaisijaltaan 185 mm koekappaleet, ja toisesta valmistuserästä kaikki muut koekappaleet. Modifioidun saumalaastin tapauksessa koekappaleita oli vähemmän, ja yksi valmistuserä riitti kaikkien koekappaleiden valmistamiseen.

Laastijauhe ja vesi punnittiin valmistusohjeen mukaisen seoksen valmistamiseksi. Punnituksessa tyydyttiin ± 5 g tarkkuuteen; valmistuserät tehtiin vähintään 5 kg jauhemäärällä ja alle promillen punnitusvirheellä ei ajateltu olevan vaikutusta laastin koostumukseen. Laasti sekoitettiin tuotepakkauksen osana toimitettuun ämpäriin käsikäyttöisellä laastisekoittajalla (Kuva 4.3) käyttäen valmistajan ohjeistusta.



Kuva 4.3: Laastisekoittaja ja tavanomaisen saumalaastin valmistuserä.

Valumuotit valmistettiin 15 mm vanerista ja muoviputkesta (Kuva 4.4 ja 4.5). Suurimpien halkaisijaltaan 185 mm koekappaleiden muotit tehtiin vaneripohjalla, mutta reunoina käytettiin muoviputkesta katkaistua 15 mm pituista kappaletta.



Kuva 4.4: Valumuotteja ja muottiöljyn levittäminen paperia käyttäen.

Pienempien kappaleiden muotit ovat kokonaan vanerisia, mutta vanerin sahapinnat on lakattu veden imeytymisen estämiseksi. Muotit numeroitiin ja merkittiin, jotta koekap-

paleiden mahdollisista poikkeamista valussa voitiin tehdä tarvittaessa yksilöityjä huomautuksia.

Muotit öljyttiin ruiskua käyttäen muottiöljyllä ennen valua. Öljyminen tehtiin mahdollisimman pienellä öljymäärällä; muottiin ruiskutettu pieni öljymäärä levitettiin paperia käyttäen. Ennen öljyämistä muottien purkuun ja kasaukseen käytettävien ruuvien kannat suojattiin teippaamalla. Osa teipeistä lähti valun aikana pois, mikä osoitti teippauksen tarpeellisuuden; muotit oli vaikea purkaa, kun ruuvien kannat olivat tukkeutuneet laastista.

Laasti valettiin muottiin vähän kerrallaan sulloen muurauskauhaa käyttäen. Laastin sitkeyden vuoksi etenkin suurien koekappaleiden muotit oli vaikea saada sullotuksi täyteen, koska laasti tarttui kauhaan. Kuvassa 4.5 nähdään esimerkki täyteen sullotusta muotista.



Kuva 4.5: Tavanomaisella saumalaastilla täyteen sullottu muotti.

Sullomisen jälkeen muottia tärytettiin. Tavanomainen tärytys tärypöydällä ei saanut saumalaastia juoksemaan, joten tärytys tehtiin kolmessa vaiheessa käsin. Ensin muottia tiputettiin noin 30 cm korkeudesta pöydälle niin, että laasti selvästi asettui muottiin. Tämän jälkeen aiheutettiin iskuporakoneella sopivaa pyörimisnopeutta hakemalla muotin pohjalevyyn resonanssi, joka sai laastin hyvin juoksevaksi. Kun kuplien nousu massan seasta hidastui, tiputettiin muottia taas pöydälle, kunnes enimmät kuplat saatiin nousemaan ulos koekappaleesta. Kuplien muodostus tärytyksessä näkyi selvästi tärytyksen yhteydessä otetusta kuvasta (Kuva 4.6).



Kuva 4.6: Kuplien muodostuminen tärytyksen yhteydessä.

Tärytyksen jälkeen muottien yli vedettiin muovikalvo estämään veden haihtuminen, ja muotit pinottiin runojensa varaan. Koekappaleiden annettiin kovettua tällä tapaa 7 vrk ajan. Tämän jälkeen muotit purettiin, ja koekappaleet vietiin olosuhdehuoneeseen 22 °C ja 70 % RH olosuhteisiin 21 vrk ajaksi. Olosuhdehuone hajosi tavanomaisen saumalaastin koekappaleiden jälkihoidon aikana, ja lämpötila nousi välillä reilusti yli asetetun. Suhteellinen kosteus sen sijaan pysyi oikeana.

Jälkihoito-olosuhteet valittiin käyttäen perusteluna saumalaastien tavanomaista asennusta, jossa jälkihoitoa ei juurikaan tehdä. Nyt veden haihtuminen estettiin pitkäksi aikaa, vaikka koekappaleita ei välillä kasteltu. Märissä tiloissa käytettäessä saumalaasti kastuu useita kertoja käyttökänsä aikana. Sellaista tapausta mallinnettaessa jälkihoitaminen vesiupotuksella voisi olla perusteltua.

4.3.2 Tasapainotus ja valmistelevat käsittelyt

Jälkihoidon jälkeen koekappaleet siirrettiin tasapainotusolosuhteisiin toiseen olosuhdehuoneeseen. Tässä kohtaa olosuhteet valittiin standardin SFS-EN ISO 15148 (2002) mukaiseksi; olosuhdehuoneen lämpötilaksi asetettiin 23 °C, joka oli mittaustilan sen hetkinen lämpötila, ja suhteelliseksi kosteudeksi 50 % RH, joka on standardin antamien rajojen keskiarvo.

Osa koekappaleista siirrettiin välillä suolakosteushuoneeseen, jonka suhteellinen kosteus 54 % RH valittiin lähimmäksi osuvan suolan mukaan. Siirto tehtiin olosuhdehuoneiden jäähtytynyksikön hajottua, koska lämpötilat huoneissa nousivat tavattoman korkeiksi.

Olosuhdehuoneista koekappaleita valittiin valmistelevaan käsittelyyn satunnaisesti, koska sitä ei nähty järkeväksi tehdä koko koesarjalle kerralla. Ensiksi koekappaleet hiottiin. Ensimmäisen sarjan koekappaleiden hionta tehtiin nauhahiomakoneella. Osa laasteista oli hyvin kovia, eikä hiomanauha osoittautunut erityisen kestäväksi ratkaisuksi. Suurin ongelma oli kuitenkin, että nauhalla hioessa koekappaleiden tasapaksuus oli vaikea saavuttaa.

Hiottu koekappale laitettiin takaisin olosuhdehuoneeseen, ja painon muutosta seurattiin. Koekappaleille tehtiin kylkien ja yläpinnan suojaukset aikaisintaan, kun standardin mukainen vaatimus alle 0,1 % painon muutoksesta vuorokaudessa saavutettiin. Suojauksien lopuksi koekappaleet asetettiin olosuhdehuoneeseen ainakin yhden vuorokauden ajaksi, jotta suojauksen aikana aiheutetut häiriöt ehtivät tasaantua.

Ennen suojaamista koekappaleen dimensiot mitattiin. Sekä korkeus että halkaisija mitattiin kolmesta kohtaa, ja näistä laskettiin keskiarvo ja keskihajonta myöhempää laskentaa varten. Mittaukset tehtiin työntömitalla, ja lukematarkkuus oli aina vähintään 0,1 mm. Neliön muotoisilla kappaleilla sivumitat mitattiin kolmesta kohtaa. Koska laskentapohja tehtiin pyöreille kappaleille, määritettiin neliön muotoisille kappaleille laskentaa varten teoreettinen halkaisija yhtälön (4.1) mukaisesti.

$$\pi d^2/4 = a \cdot b \quad (4.1)$$

Yhtälössä a ja b ovat neliön sivumittojen keskiarvot, ja d laskennassa käytetty teoreettinen halkaisija.

Hiomalaitteen kehittäminen

Virhelähdemittauksia varten kehitettiin koekappaleiden hiontaan sopiva laite. Aikaa oli rajallisesti, ja päädyttiin käyttämään olemassa olevia laitteita itse rakennetuin lisävarustein. Hiomalaitteen (Kuva 4.7) idea oli yksinkertainen. Pylväsporakoneen pöydän korkeusasema on vakaa, mutta pöytä oli nivelöity niin, että sitä voitiin liikutella pora-akselin alapuolella. Pora-akselille voitiin järjestää jousikuormitus alaspäin ja lisäksi alimman tason määräävä rajoitin. Tällä tavalla pöydän ja pora-akseliin kiinnitetyn hiomalaitteen väli voitiin säätää halutuksi. Tavanomaisen saumalaastin tapauksessa kaikkien koekappaleiden kolmesta kohtaa tehtyjen korkeusmittausten keskihajontojen keskiarvo oli 0,32 mm.



Kuva 4.7: Koekappaleiden hiomalaite.

Pylväsporakoneen pora-akseliin tehtiin sovitekappale, jolla laitteeseen voitiin kiinnittää mikä tahansa kulmahiomakoneen laikka. Tällä tavalla kullekin materiaalille voitiin valita sopiva hiontaväline. Kaikkien tällä laitteella hiottujen materiaalien hiontaan käytettiin tämän tutkimuksen yhteydessä timanttilaikkaa.

Kylkien suojaaminen

Lähes kaikkien koekappaleiden kylkisuojauksiin käytettiin vahan (Sasolwax 1800; 60 %) ja parafiinin (Sasolwax 5603; 40 %) seosta. Tämä vahaseos on otettu käyttöön vesihöyrynläpäisevyyskokeissa koekupin ja koekappaleen välisen sauman tiivistämisessä. Erilaisia vahaseoksia on kirjallisuuden perusteella käytetty useammassa tutkimuksessa. Näin ollen vahaseoksen valmistukseen käytettiin vesihöyrynläpäisykokeisiin hankittuja raaka-aineita ja valmiiksi määritettyä sekoitussuhdetta; vahaseosta ei lähdetty muokkamaan.

Virhelähdekokeiden yhteydessä kylkisuojausmateriaali vaihdettiin, ja osasta koekappaleita kylkisuojaus jätettiin kokonaan pois. Variointi on esitetty luvussa 4.5.

Vahalla suojauksessa tärkeäksi osoittautui sopivan lämpötilan saavuttaminen. Vaha sulatettiin kattilassa, jota lämmitettiin valurautaliedellä. Lämpötilan hallinta oli helpointa järjestää virransyötön termostaattiohjauksella. Vahan levitys tehtiin pensseliä käyttäen.

Vahaus tehtiin kahdessa vaiheessa. Ensimmäinen kerros vaha levitettiin hyvin juoksevana. Näin saavutettiin parempi tartunta kuin liian paksua ja kylmää vaha käytettäessä. Ensimmäisen vahakerroksen perään levitettiin heti toinen kerros, johon vaha otettiin sulan vahan pinnalla kelluvasta viileämmästä osasta. Jäähtyessään hivenen läpinäkyvyyttä menettänyt vaha muodosti helposti paksun kalvon, mutta oli riittävän lämmintä tarttuakseen alempaan vahakerrokseen.

Yläpinnan suojaaminen

Yläpinta suojattiin käyttäen noin 1 mm paksuista pleksiä (polykarbonaattilevy). Tämä materiaali valittiin, koska se ei läpäise kosteutta ja on suhteellisen jäykkää ja läpinäkyvää. Läpinäkyvyydestä oli hyötyä, kun koekappaleen yläpinnan vettymistä tarkkailtiin kokeen edetessä. Myös koekappaleen yläpinnalle tehdyt yksilöintimerkinnät näkyivät pleksin läpi. Kun uusia merkintöjä ei tarvinnut tehdä, virheiden mahdollisuus pieneni.

Pleksi asennettiin noin 1 mm etäisyydelle koekappaleen yläpinnasta. Sopiva ilma- raon paksuus järjestettiin kylkisuojauksen yhteydessä yläpinnan reunoille tehdyillä vahapurseilla. Pleksiä kiinnitettäessä koekappale laitettiin tasaisella alustalla lepäävän pleksin päälle vahapurseiden varaan, ja sauma tiivistettiin.

Riittävän korkea ilmatila tarvittiin, jotta koekappaleen yläpintaan nouseva vesi ei imeydy kapillaarisesti pleksin ja koekappaleen väliseen tilaan. Tiivistämistä helpotti, kun pleksi leikattiin koekappaleen muotoon. Pleksin ja koekappaleen välisen sauman tiivistäminen oli helpointa, kun pleksi oli ympäriinsä noin 2–5 mm koekappaleetta suurempi.

Sauman tiivistys tehtiin merkittävästi viileämmällä vahalla kuin kylkien suojaus. Sopivan lämpöinen vaha oli helposti muovailtavaa, mutta se oli menettänyt jo läpinäkyvyytensä. Tiivistyksen lopuksi vahasaumaan pistettiin rautalangalla pieni reikä. Reikä esti ilmanpaineen nousemisen kappaleen yläpinnalla, kun huokosista poistuva ilma pääsi virtaamaan pois pleksin ja kappaleen välisestä tilasta.

4.4 Automaattilaitteistolla mittaaminen

Mittauksesta on kirjoitettu erillinen toimintatapaohje (Tuominen 2014). Toimintatapaohje sisältää myös mittaustapahtuman muistilistan, jota kohta kohdalta seuraamalla mittaus tulee suoritettua oikein. Diplomityöhön tällaista toimintatapaohjetta ei ole kirjoitettu. Seuraavissa kappaleissa on esitetty perusteluita toimintatapaohjeen lopulliselle mittaustavalle.

Mittaustuloksista tehtävä laskenta suoritetaan erikseen ja lähes poikkeuksetta vasta jonkin aikaa itse mittauksen jälkeen. Tämän vuoksi mittausta varten tehty lomake on varustettu useilla ”huomautukset”-kohdilla. Näihin kohtiin voi merkitä kaikki huomiot, jotka mittausta tehdessä tulevat mieleen.

Tämän tutkimuksen yhteydessä tulosten analysoinnissa tuli melko aktiivisesta huomioiden kirjaamisesta huolimatta usein vastaan kysymyksiä, joihin olisi saattanut löytyä vastaus huomautuksista, jos kaikki asiat olisi tullut kirjoitettua ylös. Koska kaikkea ei voi kirjata muistiin, tulisi laskenta suorittaa mahdollisimman pian mittauksen jälkeen.

4.4.1 Mittauskaapin olosuhteiden tasaannuttaminen

Koekappaleeseen imeytettävän veden lämpötilan tulisi olla tasainen ennen kokeen aloitusta. Lämpötilan stabiloimiseksi vettä säilytettiin aina ensin mittaushuoneessa sijaitsevassa astiassa muutaman päivän ajan. Kun vettä lisättiin mittalaitteistoon, annettiin veden lämpötilan vielä stabiloitua ainakin yön yli ennen seuraavaa mittausta.

Ensimmäisen kehitysversion laitteistossa vettä oli yli 10 l, joten vettä ei vaihdettu mittausten välissä. Tässä kehitysversiossa käytettiin virtaavaa vettä, ja mittausta edeltävä tasaantumisaika varattiin veden virtauksen tasaantumiseen. Ylivirtausjärjestelmää pidettiin päällä useamman tunnin ajan ennen varsinaisen mittauksen aloittamista, jotta ylivirtaus ja veden korkeusasema tasaantuivat.

Seuraavassa kehitysversiossa ylivirtaus poistettiin käytöstä, ja vedenpinnan annettiin laskea haihtumalla. Veden vaihdon jälkeen odotettiin muutama tunti ennen mittausta, jotta mittauskaappien mittausvesiastioihin lisätyn veden lämpötila ehti tasaantumaan. Veden vaihdon ja laitteiston mittausvesiastioiden pesun yhteydessä mittaushuoneessa erillisessä astiassa ollut vesi lisättiin laitteistoon välittömästi, ja pian tämän jälkeen aloitettiin kalibrointimittaus muovitulppia käyttäen.

Haihtumismittauksista kertyneen kokemuksen myötä myös mittauskaapin olosuhteisiin alettiin kiinnittää enemmän huomiota. Kolmannen kehitysversion mittauksissa vedenvaihdon ja pesun jälkeen mittausvesiastian annettiin ensin kuivahtaa. Kun mittausvesiastioiden pinnoille pesussa jääneet vesipisarot olivat haihtuneet, lisättiin uusi vesi. Vasta tämän jälkeen mittauskaapit suljettiin vähintään 12 h ajaksi, jotta haihtuminen kerkisi varmasti stabiloitumaan, ja mittauskaappien seinät tasapainottumaan kosteampiin olosuhteisiin.

4.4.2 Laitteiston kalibrointi

Digitaaliset vaa'at täytyy kalibroida lämpö- tai kosteusolosuhteen muuttuessa. Automaattilaitteistoa käyttäessä tämä toteutetaan vaakojen sisäisellä punnuksella tapahtuvalle automaattisella kalibroinnilla. Automaattinen kalibrointi voidaan tehdä mittalaitteiston vaa'oilta kootusti mittausohjelman avulla. Myös pöytävaaka kalibroidiin vastaavalla automaattisella sisäisellä kalibrointijärjestelmällä aina ennen päivän ensimmäistä punnitusta.

Automaattinen kalibrointi tehtiin jokaisen mittauksen aluksi. Tästä tulostui mittausdatan alkuun kalibroitiedot ja samalla varmistui, että ainakin mittauksen alkuvaiheessa vaakojen lukemat pitivät mahdollisimman tarkasti paikkansa. Vaakojen välisten virheiden seuraamiseksi jokainen koekappale punnittiin aina mittauksen alussa ja lopussa sekä pöytävaakaalla että mittauslaitteiston vaakaalla. Havaitut suuret poikkeamat kielivät virheestä, joka oli ennen mittauksen aloitusta usein vielä mahdollista korjata.

Absoluuttisen virheen seuraamiseksi tehtiin sisäisen kalibroinnin jälkeen jokaiselle vaakalle noin kuukauden välein punnitus vertailupunnuksilla. Toisen kehitysvaiheen aikana vertailupunnuksina alettiin käyttää jokaisella kerralla punnuksia, joiden painot olivat: 0,5; 1 ja 2 kg. Punnituslukemat kerättiin taulukkolaskentaan kalibrointimittauspohjaan, jotta vaakojen mahdollisen virheen muuttumista voitiin seurata.

4.4.3 Haihtumisen määrittäminen

Haihtumisnopeuden määrittämiseksi tehtiin tavanomaista mittausta vastaava koe, jossa koekappaleiden tilalla käytettiin vettä imemättömiä kappaleita. Uputussyvyyden vaihtuessa vettä imemättömän koekappaleen vettä syrjäyttävä pinta-ala ei saanut vaihtua. Tällainen koekappale oli helpointa valmistaa viemäriputken muovisesta tulpasta, josta reunapyörästys hiottiin pois (Kuva 4.8).



Kuva 4.8: Kalibrointikoekappale.

Ensimmäiset vettä imemättömillä koekappaleilla tehdyt mittaukset tehtiin ylivirtaavaan veteen, jolloin ideana ei ollut määrittää haihtumisnopeutta vaan ylivirtaavan veden stabiiliutta. Näissä mittauksissa käytettiin muovitulppien sijaan alumiinisia kippoja, joiden pinta-ala ei ollut täysin vakio kartiomaisen muodon vuoksi. Kartiomaisuudesta johtuen upotussyvyyden muuttuessa aiheutui mittaukseen systemaattinen virhe. Virheen poistamiseksi siirryttiin käyttämään muovitulppia.

Muovitulpilla tehdystä mittauksesta oli helppo laskea veden tasovaihtelu hyvin tarkasti. Hydrostaattisen paineen muutoksesta syntyvä punnitustuloksessa näkyvä noste-

muutos oli suoraan verrannollinen veden pinnan tasovaihteluun. Kun vettä imemättömän kappaleen vedessä oleva pinta-ala tunnettiin, saatiin korkeusvaihtelu laskettua.

4.4.4 Veden imeytyksen aloitus

Mittauskaapin vaa'assa kannatintelineen avulla roikkuva koekappale saatettiin vesikosketukseen nostamalla hydraulisen tunkin varassa olevaa vesiastiaa ylöspäin. Vesikosketuksen hetkellä koekappale ei saanut olla aivan suorassa, jottei imupinnalle jäänyt ilmakuplia. Pintajännityksen vuoksi imupinnalle jäänyt ilmakupla oli todella vaikea poistaa, kun koekappaletta ei voinut irrottaa vedestä.

Paras tapa estää ilmakuplien muodostuminen oli veden sopivan hidas nostaminen niin, että vesi ikään kuin kiipesi koekappaleen kaltevaa imupintaa pitkin reunasta toiseen. Jos koekappale oli laitettu kannattimeen aivan suoraan, kannatinta painettiin vesikosketuksen hetkellä kädellä hivenen vinoon. Näin vesikosketus saatiin syntymään yhdestä reunasta alkaen. Osalla koekappaleista ilmakuplia muodostui huolellisesta työstä huolimatta. Suurimmat ilmakuplat pyrittiin poistamaan heti mittauksen alussa pyyhkimällä vesiupotetun kappaleen alapintaa rautalangalla.

Kun nosteen vaikutus oli otettu erillisillä mittauksilla huomioon, ei upotussyvyydellä ollut muita merkittäviä vaikutuksia lopputulokseen. Tämän vuoksi tarkkaa upotussyvyuden määrittämistä ei tehty kuin muutamalle kappaleelle. Muille kappaleille upotussyvyys arvioitiin silmämääräisesti kokemuksen perusteella. Upotussyvyuden määrittäminen hankalaa; vesi kiipesi koekappaleen seinää pitkin, eikä tämän vuoksi koekappaleeseen merkittävä tavoitesyvyyttä kyetty helposti näkemään. Koska upotussyvyys vaikutti nosteeseen, kiristettiin hydraulisten tunkkien mekaaniset lukitukset aina heti tavoitesyvyteen upottamisen jälkeen.

4.4.5 Lämpötila- ja kosteusolosuhteiden mittaukset

Mittausvesiastioiden haihtumisnopeus osoittautui korreloivan parhaiten mittaushuoneen ilman suhteellisen kosteuden kanssa. Tästä johtuen mittaushuoneen olosuhteet laitettiin jatkuvaan seurantaan. Lämpötila- ja kosteusolosuhteita mitattiin kokeiden yhteydessä myös mittauskaapeista ja olosuhdehuoneista, joissa koekappaleita säilytettiin.

Kaikki lämpötila- ja kosteusmittaukset tehtiin ”Rotronic HydroLog” -laitteilla, joissa oli kolme mittausanturia ja muisti, johon mittausdata kerättiin. Mittauskaappien olosuhteet saatiin mitatuksi yhdellä laitteella, mittaus- ja olosuhdehuoneiden olosuhteet mitattiin kolmesta kohtaa yhdellä laitteella. Mittausaikavälinä kaikissa laitteissa käytettiin 5, 10 tai 15 min. Lämpö- ja kosteusolosuhteet eivät heilahdelleet merkittävästi lyhyellä aikajaksolla, ja mahdollista heilahtelua oli vaikea ottaa huomioon laskennassa. Käytetty mittausväli oli näin ollen riittävä.

Myös mittausvesiastioiden veden lämpötilaa mitattiin. Lämpötilamittaus tehtiin kalibroimattomilla termopari-langoilla, koska veden lämpötilaa ei käyty laskennan lähtötietona. Veden lämpötila oli kuitenkin tärkeä tietää, kun laskennan tuloksia analysoitiin.

Veden lämpötilamittaus oli automaattinen ja yhdistetty punnituslukemien mittauksen kanssa.

4.4.6 Veden imeytyksen päättäminen

Automaattilaitteistolla vettä imeytettäessä veden haihtumisesta johtuva pinnan aleneminen aiheuttaa epävarmuutta. Tämän vuoksi laitteistolla ei tule tehdä yli viikon pituisia mittauksia. Pidemmät mittaukset kannattaa saattaa loppuun käsin mittaamalla. Useat, tässäkin tutkimuksessa lähes kaikki, materiaalit imevät vettä niin nopeasti, että noin 20 mm paksu koekappale kyllästyy täysin alle kahden päivän mittauksen aikana.

Kun kokeen alku tehdään automaattilaitteistolla ja täydentävät mittaukset käsin, saadaan lisävarmuutta. Kokeen kestänyttä pidemmän aikaa on veden imeytyminen jo hyvin hidasta, ja siksi punnituksen ajaksi vedestä poistaminen ei aiheuta virhettä käytännössä lainkaan. Irtoveden poistaminen koekappaleen imupinnalta ennen punnitusta jää virhelähteeksi, mutta tässä tehdyt virheet on helppo huomata, kun automaattilaitteistolla saadun painonnousukäyrän trendi on jo tiedossa.

Kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden saavuttaminen voidaan huomata joidenkin materiaalien osalla koekappaleen yläpinnalta, kun pinta muuttuu märäksi. Kaikilla materiaaleilla tätä ei voi nähdä. Kokeen etenemistä voidaan seurata mittausdatasta tehtävien lineaaristen trendien avulla (ks. luku 5.2). Standardin (SFS-EN ISO 15148 2002) mukaisesti kokeen saa päättää, jos imunopeus on riittävän pieni tai määrätty aikaraja on ohitettu. Näistä kumpikaan ei ole hyvä peruste kokeen lopettamiselle.

Kokeen lopussa on tärkeää tuntee koekappaleen omapaino. Suojausten ja kannatintelineen takia tätä painoa ei voi suoraan mitata. Automaattilaitteistoa käytettäessä tarkistus tehtiin seuraavalla tavalla: Vesikosketuksen irrottamisen jälkeen imupinnan irtovesi poistettiin kostutettua sientä käyttäen. Kappaleen annettiin vielä olla ripustettuna mittauslaitteiston vaakaan, kunnes mittausdataan saatiin kerättyä 2–3 stabiilia punnitustulosta. Tämän jälkeen koekappale kannatintelineineen punnittiin pöytävaa'alla, jotta vaakojen väliset ja punnitusten virheet saatiin esiin. Välittömästi tämän jälkeen koekappale punnittiin ilman kannatintelinettä ja asetettiin mittausta edeltäviin olosuhteisiin kuivumaan. Kun kuivuminen hidastui, voitiin kappaleesta poistaa suojaukset. Poistettujen suojausten painon ja aiemmin tehtyjen punnitusten avulla saatiin lasketuksi pelkän koekappaleen ja siihen sitoutuneen veden paino vedenimun päättämishetkellä.

4.4.7 Laitteiston pesu

Mitattavana olevasta koekappaleesta liukenee mittausvesiastian veteen erilaisia epäpuhtauksia. Laitteiston peseminen mittauksen välissä tai vähintään aika-ajoin on tästä johtuen välttämätöntä. Seisovaa vettä eli haihtuvaa mittausmenetelmää käytettäessä laitteiston peseminen on verrattain helppoa. Ylivirtausjärjestelmässä epäpuhtaudet pääsevät kertymään myös putkistoon ja muihin vesisäiliöihin, mikä vaikeuttaa pesemistä.

Haihtuvan mittausmenetelmän tapauksessa kokeen päätyttyä vanhat vedet poistettiin lappopotkea käyttäen. Tyhjät mittausvesiastiat oli helppo ottaa pois mittauskaapeista ja pestä. Tämän tutkimuksen yhteydessä pesu tehtiin sientä ja juoksevaa vesijohtovettä käyttäen. Kun pesun teki välittömästi mittauksen jälkeen, ei epäpuhtauksia juurikaan ehtinyt pinttymään mittausvesiastian pinnoille; veden vaihtaminen ja runsaalla vedellä huuhteleminen riittivät laitteiston puhdistamiseen, jos ne tehtiin ennen kuin laitteisto oli kuivunut mittausten jäljiltä.

Ylivirtausjärjestelmän puhdistaminen osoittautui puolestaan hyvin haastavaksi. Putkistoon kertynyt lika oli lähes mahdotonta poistaa. Voimakkaita pesuaineita ei kokeiltu, koska pienetkin pesuainejäämät aiheuttavat muutoksia veden pintajännitykseen. Ylivirtausjärjestelmän putkisto huuhdeltiin kytkemällä laitteiston putket yksi kerrallaan vesijohtoverkkoon ja laskemalla runsaasti lämmintä vettä putken läpi. Vettä imemättömillä kappaleilla tehtyjen mittausten perusteella voitiin todeta, että pesulla oli positiivinen vaikutus laitteiston toimintaan. Pesu vei kuitenkin niin paljon aikaa, ettei sitä ollut käytännössä mahdollista tehdä jokaisen yksittäisen mittauksen jälkeen.

4.5 Virhelähdekokeet

Virhelähde- ja vertailukokeet tehtiin pääasiassa koelaitteiston toisella kehitysversiona (ks. luku 4.1.2). Osa kokeista tehtiin ylivirtausjärjestelmää ja osa haihtuvaa vettä käyttäen. Myös tätä virhelähdettä on analysoitu mittaustuloksista, jotta ensimmäisen koesarjan luotettavuus voitiin arvioida. Virhelähteistä päätettiin selvittää helposti varioitavat ja mittauksen työläyteen paljon vaikuttavat muuttujat:

- pinta-ala,
- kylkisuojausmateriaali,
- yläpään suojauksen tarpeellisuus ja
- koekappaleen imupinnan muoto.

Yllä mainittujen virhelähteiden lisäksi kokeen yhteydessä mitatuista muista suureista etsittiin korrelaatiota veden imeytymiskertoimen suuruuteen.

Valun yhteydessä massan tiivistäminen osoittautui vaikeaksi, ja oli odotettavissa, että koekappaleiden tiivistymisasteeseen jää eroja. Tästä johtuen koekappaleiden tilavuuspainon mahdollista korrelaatiota koekappaleen pinta-alaan, korkeuteen sekä määritettyihin kapillaarisuusominaisuuksiin etsittiin.

Mittaustilanteessa luontaista variointia syntyi upotussyvyyteen, veden lämpötilaan ja imupinnalle jääneiden ilmakuplien määrään. Upotussyvyyden osalta pyrittiin hyvin pieniin, nollassa kahden millimetrin syvyyksiin. Suurempia syvyyksiä saattoi syntyä, jos esimerkiksi virhe vesiastian nostamisessa tapahtui virhe. Upotussyvyys jätettiin aina siihen arvoon, johon se vesiastian noston yhteydessä asettui. Vesiastiaa ei laskettu, vaikka upotussyvyys olisi tullut tavoiteltua suuremmaksi. Veden lämpötila seurasi mittaushuo-

neen lämpötilaa, joka ei pysynyt mittauksen aikana vakiona. Lämpötilaa mitattiin ensin käsin ja myöhemmin automaattisesti.

Imupinnalle jäi hyvin usein pieni määrä hyvin pieniä ilma kuplia, jolloin niitä ei kokeen häiriintymisen välttämiseksi edes yritetty poistaa. Suuremmat kuplat sen sijaan poistettiin aina kokeen aluksi. Kuplamäärää merkittiin indeksillä 0–5. Asteikko on empiirinen; suurin lukema tarkoittaa suurinta kuplamäärää, joka sallittiin. Kuplamäärä merkittiin ensiksi sanallisesti, ja kokemuksen kartuttua alettiin käyttämään numeroarvoista kuplamääräindeksiä.

4.5.1 Tavanomainen saumalaasti

Tavanomaisella saumalaastilla tehtiin tutkimuksen pisin yksittäisen materiaalin koesarja. Virhelähdevaariointien perustapauksessa käytettiin samaa vahalla ja pleksillä suojausta kuin ensimmäisen vaiheen mittauksissa. Kaikkia eri pinta-alaisia ja eri muotoisia koekappaleita suojattiin tällä tavalla.

Ylivirtausjärjestelmän ongelmien ja epävarmuuden vuoksi osa koekappaleista jouduttiin käyttämään ylivirtausjärjestelmän ja haihtuvan veden mittaustavan vertailuun. Varsinaisesti tutkittuja virhelähteitä olivat tämän lisäksi muoto, pinta-ala sekä suojauskappaleiden vaikutus.

Veden imeytymiskertoimen teorian mukaisesti veden imeytymisen tulisi olla yksiulotteista. Joissain aiemmissä kokeissa ja standardeissa on hyväksytty myös neliön tai suorakaiteen muotoisten kappaleiden käyttö. Neliskanttisen kappaleen kulma-alueilla yksiulotteinen virtaus ei todennäköisesti toteudu. Kulma-alueen vaikutus tuloksiin on epäselvä, ja siksi koekappaleita valmisteltiin sekä neliön että ympyrän muotoisilla imupinnoilla.

Edellä mainitusta yksiulotteisen virtauksen vaatimuksesta seuraa myös pinta-alan valinta virhelähdekokeisiin. Reuna-alueella yksiulotteisuus ei varmaankaan toteudu reunan aiheuttaman epäjatkuvuuden vuoksi. Mitä suurempi pinta-ala on, sitä vähemmän reuna-alueella on suhteessa imupintaan. Pyöreitä koekappaleita valittiin useita kokoja, jotta pinta-alan vaikutusta voitiin arvioida tarkemmin. Valitut halkaisijat olivat 50, 90, 140 ja 185 mm. Suurin halkaisija rajautui vesihöyrynläpäisevyyskokeissa käytettävän koekappaleen mukaiseksi. Neliön muotoisista kappaleista tehtiin vain suurimmat ja pienimmät, koska jo tällä tavalla oli nähtävissä mahdollinen pinta-alan vaikutus. Neliöiden sivumitoiksi valikoitui 40 ja 150 mm.

Kylkisuojamateriaalia käytetään yksiulotteisuuden vaatimuksen saavuttamiseksi. Kylkisuojamateriaalin imeytyminen koekappaleeseen vaikuttaa häiriintymättömään imupinta-alaan. Jos kylkisuojaus ei tartu koekappaleeseen kunnolla, voi suojauksen ja koekappaleen väliin muodostua kapillaarinen kanava. Tavanomaisen saumalaastin tapauksessa kylkisuojaus tehtiin luvun 4.3.2 mukaisesti tai jättämällä kyljet kokonaan suojaamatta.

Yläpinnan suojauksen idea on estää kosteuden sitoutuminen tai haihtuminen koekappaleen yläpinnan kautta. Yläpinnan suojauksen vaikutusta tutkittiin kahdella variaatiolla: Suojaus tehtiin pleksillä luvun 4.3.2 mukaisesti, tai yläpinta jätettiin kokonaan suojaamatta. Tavanomaisen saumalaastin tapauksessa yläpinnan suojaus tehtiin kaikkiin kyljiltään suojattuihin materiaaleihin, ja kylkisuojaamattomista ei suojattu edes yläpintaa.

Virhelähdevariaatiot ja koekappaleiden lukumäärät on esitetty taulukossa 4.3. Kaikki toisen ja kolmannen mittauskerran koekappaleet mitattiin haihtuvaa menetelmää käyttäen.

Taulukko 4.3: Saumalaasti no.39 virhelähdekokeet.

Kappaleiden lkm [kpl]	Koko, sivumitta/halkaisija [mm]	Kylkisuojaus	Yläpään suojaus	Muoto	Mittaustapa
6	50	vahaseos	pleksi	pyöreä	ylivirtaus
6	50	vahaseos	pleksi	pyöreä	haihtuva
6	50	ei mitään	ei mitään	pyöreä	haihtuva
12	90	vahaseos	pleksi	pyöreä	haihtuva
12	140	vahaseos	pleksi	pyöreä	haihtuva
3	185	vahaseos	pleksi	pyöreä	haihtuva
6	185	vahaseos	pleksi	pyöreä	ylivirtaus
6	185	ei mitään	ei mitään	pyöreä	haihtuva
6	150	vahaseos	pleksi	neliö	haihtuva
3	40	vahaseos	pleksi	neliö	haihtuva
6	40	ei mitään	ei mitään	neliö	haihtuva
3	185	vahaseos	pleksi	pyöreä	2. mittauskerta
3	140	vahaseos	pleksi	pyöreä	2. mittauskerta
3	185	ei mitään	ei mitään	pyöreä	2. mittauskerta
3	185	vahaseos	pleksi	pyöreä	3. mittauskerta
3	185	ei mitään	ei mitään	pyöreä	3. mittauskerta
87	yhteensä				

Toisen ja kolmannen mittauskerran tarkoituksena oli määrittää koekappaleiden huokosrakenteen muutoksia veden imeytyksen aikana. Kertaalleen kasteltujen kappaleiden huokosverkosto saattaa muuttua esimerkiksi hydratoitumattoman sementin sitoutuessa. Toisen ja kolmannen mittauskerran materiaalit mitattiin samoilla virhelähdevaarioinneilla kuin ensimmäisellä mittauskerralla. Kolmas mittauskerta tehtiin, jotta vedenimunoisuuden mahdollista muutosta voitaisiin arvioida; kolmannella veden imeytyskerralla haluttiin tarkistaa, muuttuiko koetulos edelleen, vai tapahtuiko kaikki muutos ensimmäisen ja toisen mittauskerran välillä.

4.5.2 Modifioitu saumalaasti

Modifioidun saumalaastin tapauksessa koekappaleen muodon vaikutusta ei tutkittu. Perustapaukseksi valittu vaha- ja pleksisuojausten käyttö toteutettiin myös tässä sarjassa, jotta saataisiin vertailukelpoisia tuloksia ensimmäisen virhelähdekoesarjan kanssa.

Ylivirtausmenetelmä oli tässä vaiheessa poistettu kokonaan käytöstä, ja kaikki mittaukset tehtiin haihtuvalla menetelmällä. Pinta-alan variointi tehtiin kuten tavanomaisellekin saumalaastille, mutta koekappaleen halkaisijoiksi valittiin vain 50 ja 185 mm. Myös yläpinnan suojauksen variaatiot ja useammat mittauskerrat toteutettiin samaan tapaan kuin tavanomaiselle laastille.

Kylkien suojaamisessa haluttiin kokeilla myös eri suojausaineiden vaikutusta. Aiemmin tehdyissä kokeissa on käytetty ilmastointiteippiä ja kaksikomponenttista lattialiimaa. Ilmastointiteippi jätettiin testien ulkopuolelle, koska teippien tiedetään olevan huonoja kapillaarikanavan muodostumisriskin vuoksi. Lattialiimaa on vaikeampaa käsitellä kuin vahaa, mutta oletettavasti sen ominaisuudet ovat suojaukseen paremmin soveltuvat. Lattialiiman tartunta laastiin on hyvä, ja paksuna kerroksena sen kosteudenläpäisevyys on heikko. Liima ei myöskään merkittävästi imeydy alustaansa. Kaikki lattialiimalla suojatut kappaleet suojattiin yläpinnaltaan pleksillä, joka kiinnitettiin parafiinin ja vahan seoksella. Modifioidun saumalaastin virhelähdevarioinnit on esitetty tarkemmin taulukossa 4.4.

Taulukko 4.4: Lattiasaumalaasti virhelähdekokeet.

Kappaleiden lk [kpl]	Koko, sivumitta halkaisija [mm]	Kylkisuojaus	Yläpään suojau	Muoto	Mittaustapa
3	50	vahaseos	pleksi	pyöreä	haihtuva
6	50	vahaseos	ei mitään	pyöreä	haihtuva
3	50	ei mitään	ei mitään	pyöreä	haihtuva
5	50	lattialiima	pleksi	pyöreä	haihtuva
3*	50	vahaseos	pleksi	pyöreä	haihtuva
6	185	vahaseos	pleksi	pyöreä	haihtuva
6	185	vahaseos	ei mitään	pyöreä	haihtuva
3	185	ei mitään	ei mitään	pyöreä	haihtuva
4	185	lattialiima	pleksi	pyöreä	haihtuva
3	50	vahaseos	pleksi	pyöreä, ohennettu	2. mittauskerta
3	50	lattialiima	pleksi	pyöreä	2. mittauskerta
3	185	vahaseos	pleksi	pyöreä, ohennettu	2. mittauskerta
3	185	vahaseos	ei mitään	pyöreä	2. mittauskerta
2	185	lattialiima	pleksi	pyöreä	2. mittauskerta
1	185	ei mitään	ei mitään	pyöreä, ohennettu	2. mittauskerta
3	185	vahaseos	pleksi	pyöreä, ohennettu	3. mittauskerta
57	yhteensä	*imupinta on jätetty hiomatta eli muottipintainen			

Lattialiiman levittäminen tehtiin metallista vannenauhaa käyttäen, koska lattialiima tah-rasi runsaasti. Vannenauhasta oli helppo tehdä useita levitykseen soveltuvan mittaisia kappaleita, jotka heitettiin roskeen käytön jälkeen. Lattialiiman levittämisessä ongelmal-liseksi muodostui pitkä kuivumisaika. Koekappaleita piti pystyä säilyttämään useita tun-teja ennen kuin ne lakkasivat tahrimasta. Tästä johtuen pleksin kiinnitys vahaa käyttäen tehtiin liimasuojauksesta seuraavana päivänä.

Osa koekappaleista madallettiin ensimmäisen mittauskerran jälkeen, koska havait-tiin, että vesi ei noussut kappaleen yläpintaan asti pitkässäkään imeytyksessä.

Ylijääneistä koekappaleista jätettiin imupinta hiomatta, koska siten näistä saatiin pie-nellä vaivalla yksi mielenkiintoinen virhelähde mukaan tutkimukseen. Imupinnan hionta on aiemmin todettu imunopeuteen vaikuttavaksi tekijäksi.

5 TULOKSET

Automaattilaitteistosta saadaan mittaustuloksena punnitustuloksia, joista voidaan laskea kappaleen painon nousu. Punnitustuloksista täytyy eliminoida nosteen muutoksen vaikutukset, ja näin saadusta painon noususta voidaan regressiolla laskea veden imeytymiskerroin. Joissain tapauksissa painon nousu voi kaksijakoisen huokosverkoston vuoksi vaatia muokkausta, jotta veden imeytymiskerrointa pystytään paremmin arvioimaan. Painonnousukäyrien eri kohdista tehtyjen regressioiden avulla lasketaan myös veden tunkeutumiskerroin ja kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus.

Jotta painon muutoksesta päästään geometrian huomioiviin pinta-alaan ja tilavuuteen vertautuviin materiaaliominaisuuksiin, tulee myös kappaleiden koko mitata. Pinta-alaan ja korkeuden mittaustulokset kytkeytyvät laskentaan suoraan. Muu kerättävä mittausdata, esimerkiksi koekappaleiden tasapainotusolosuhteista ja koetilan olosuhteista sekä mittaustapahtuman aikaisista muistiinpanoista on sen sijaan mielenkiintoista, mutta lopputuloksen laskemisen kannalta tarpeetonta tietoa.

Tuloksien osalta on ensin esitetty nostemuutosten eliminointilaskennassa tarvittavien kalibrintimittausten tulokset ja tulosten käsittely. Tämän jälkeen on johdettu mittausdatan muokkauksen laskentatapa, sekä selostettu kunkin suureen laskentamenetelmä. Lisäksi on esitetty tulosten luotettavuuden arvioinnissa käytetty virheen laskenta.

Laskentaosion jälkeen on esitelty mittaustuloksia niin mittausten yhteydessä tehtyjen muistiinpanojen kuin laskettujen suureiden osalta. Mittaustulosten yhteydessä on esitetty myös laskentaan liittyvää analysointia. Laskennan lopputulosten analyysit sen sijaan on esitetty omana kohtanaan.

5.1 Veden korkeuden stabiiliusmittaukset

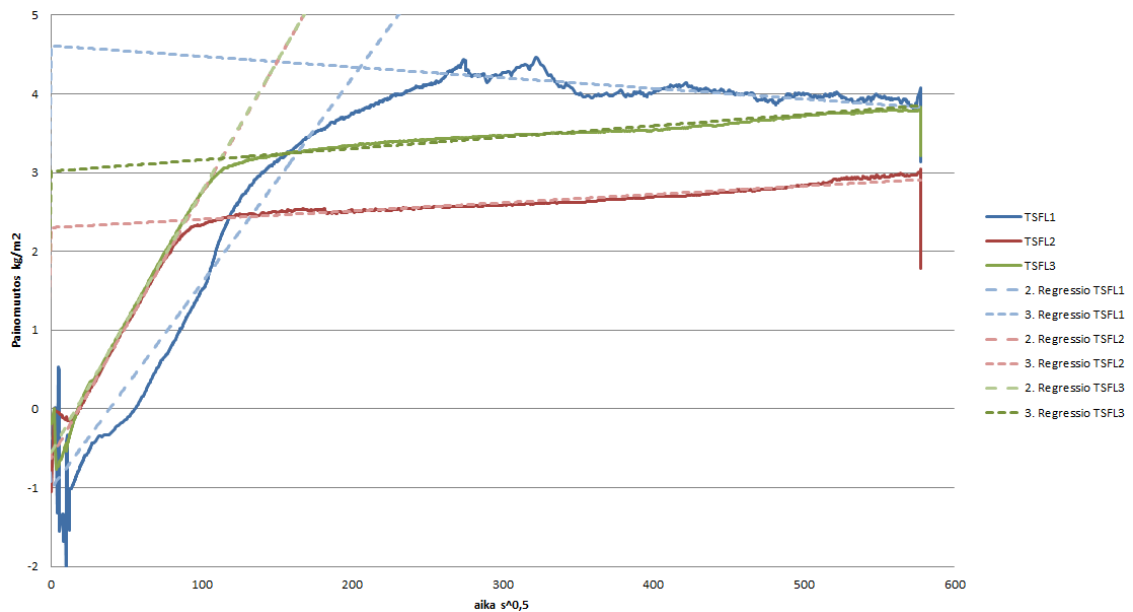
Veden korkeuden stabiiliuden määrittäminen tehtiin mittaamalla vettä imemättömien koekappaleiden painon muutosta tavanomaista veden imeytystä vastaavassa mittaustilanteessa. Aluksi käytössä oli veden ylivirtausjärjestelmä, mutta varsinaisia koekappaleita mitattaessa esiin tullut punnitustulosten hajonta johti tarpeeseen tutkia veden korkeusaseman pysyvyyttä.

Kun ylivirtausjärjestelmän ongelmat todettiin vaikeiksi eliminoida, alettiin tekemään kehitystyötä veden haihtumisnopeuden määrittämiseksi. Haihtumiskokeita tehtiin erikoisilla koekappaleilla useita sarjoja. Kokeiden avulla niin mittaushuoneen kuin mittaushuoneen olosuhteiden vaikutus haihtumisnopeuteen saatiin selville kappaleen koosta riippumattomasti. Veden korkeuden muutosta aiheuttaa myös itse koekappaleeseen

imeytyvä vesi, mutta sen vaikutus voidaan eliminoida matematiikan avulla. Laskenta käsitellään luvussa 5.2.1.

5.1.1 Ylivirtausjärjestelmän stabiiliusmittaukset

Ylivirtausjärjestelmällä mitattaessa mittausdatassa esiintyi epäjohdonmukaisia punnitus-tuloksia. Esimerkki tällaisesta painonnousukäyrästä näkyy kuvassa 5.1 koekappaleella TSFL1 (lyhenteet ks. liite 3). Myös muilla kappaleilla näkyy painonnousukäyrässä pientä hajontaa, joka selittyy tavanomaisella pienellä vedenpinnan korkeusaseman huojunnalla.

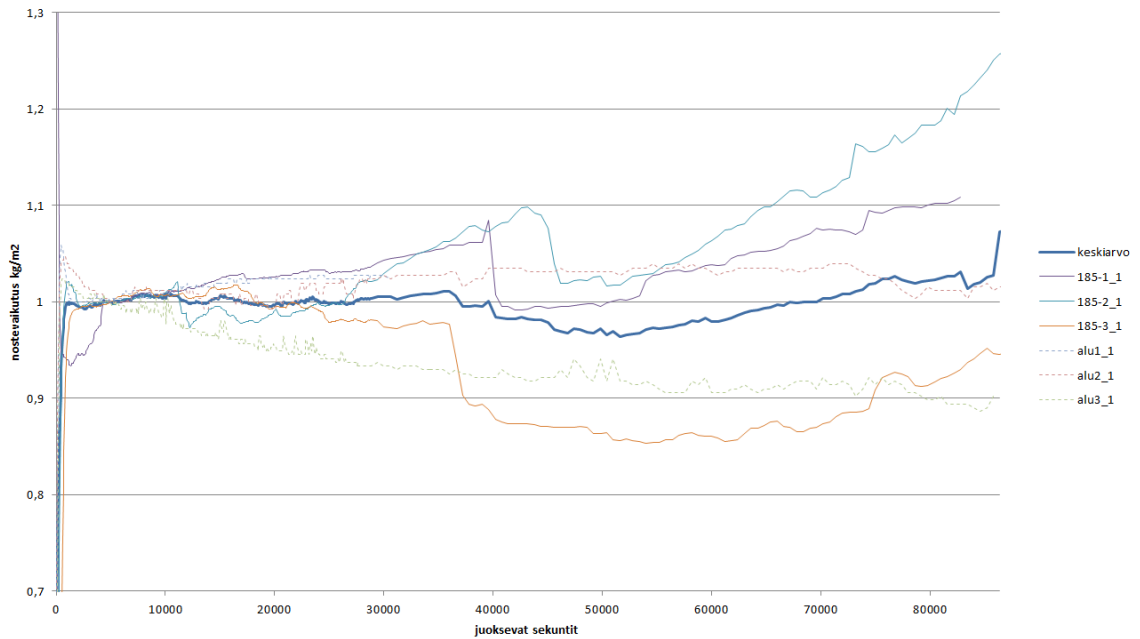


Kuva 5.1: Ylivirtausjärjestelmällä mitattujen koekappaleiden painonnousukäyrän virhe.

Kappaleen TSFL1 painonnousukäyrä näyttää vastaavan pääpiirteittäin kahden muun kappaleen käyriä. Poikkeama teorian mukaisesta lineaarisesta painon noususta ja imun päätyttyä näkyviin nouseva huojunta ovat seurausta veden pinnan stabiiliusongelmista koekappaleen TSFL1 mittausvesiastiassa.

Kun veden korkeusaseman stabiiliteettiongelma oli havaittu, alettiin tehdä stabiiliteettia määrittäviä kokeita. Ajatuksena oli hakea virherajat ja määrittää veden luontainen tasovaihtelu. Lisäksi ideana oli löytää jokaiselle tyypilliselle koekappaleen halkaisijalle ajanjakso, joka tulisi jättää regressiosta pois koekappaleen vesikosketuksesta aiheutuvan veden korkeusaseman häiriintymisen vuoksi.

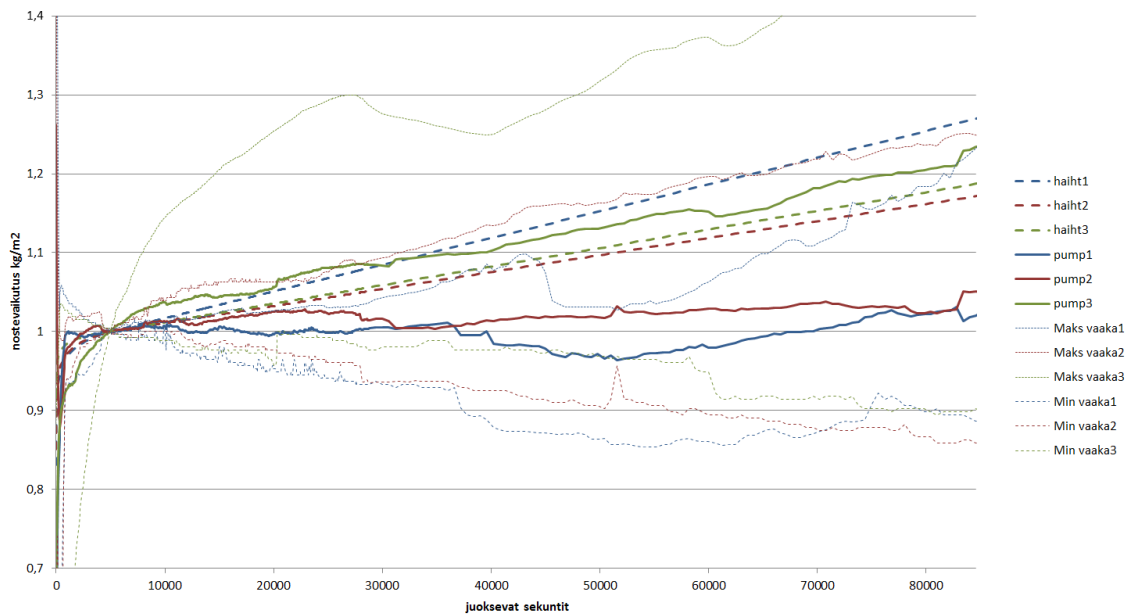
Kuvassa 5.2 on esitettyä mittauskaapin 1 mittausvesiastian stabiiliteettimittauksia (ks. luku 4.4.3). Kuvan 5.1 koekappale TSFL1 on mitattu tässä mittauskaapissa. Tuloksista huomataan, että alun poikkeamat eivät ole erityisen suuria; veden korkeusasema on vaihdellut paljon myös mittauksen aloituksen jälkeen. Ensimmäinen viisitoista minuuttia ($\sim 1000 \text{ s} = \sim 30 \text{ s}^{0,5}$) tulisi kuitenkin jättää laskennan ulkopuolelle.



Kuva 5.2: Mittausvesiastian 1 ylivirtausjärjestelmällä tehdyt stabiliteettimittaukset, ajanjaksona ensimmäinen vuorokausi. Kalibrointikoekappaleet 185-1_1 ... 185-3_1 ovat muovitulppia ja alu_1_1 ... alu_3_1 alumiinikippoja (ks. luku 4.4.3).

Kuvan käyrät on skaalattu niin, että 5000 s kohdalla kaikki saavat arvon 1. Kuvasta huomataan myös, että painonnousukäyrien keskiarvo on kohtalaisen lähellä tätä ”tasapainoasema” -arvoa. Äärimmäiset virheet ovat kuitenkin jo sitä luokkaa, että kuvan 5.1 kappaleen TSFL1 käyrän poikkeamat selittyvät.

Kaikkien vertailukelpoisten ylivirtausjärjestelmän stabiliteettikokeiden kooste on esitetty kuvassa 5.3. Kuvassa on esitetty kunkin mittausvesiastian minimi-, maksimi- ja keskiarvokäyrä. Keskiarvokäyrä (pump1 ... pump3) on laskettu kuvan 5.2 mukaisesta käyräparvesta. Minimi- ja maksimikäyrä edustavat kuvan 5.2 mukaisen käyräparven minimi- ja maksimiarvoa kullakin ajanhetkellä (min/maks vaaka1 ... min/maks vaaka 3). Lisäksi kuvassa on luvun 5.1.2 mukaisesti määritettävä 2. kehitysvaiheen haihtumiskorjauskäyrä (haiht1 ... haiht3).



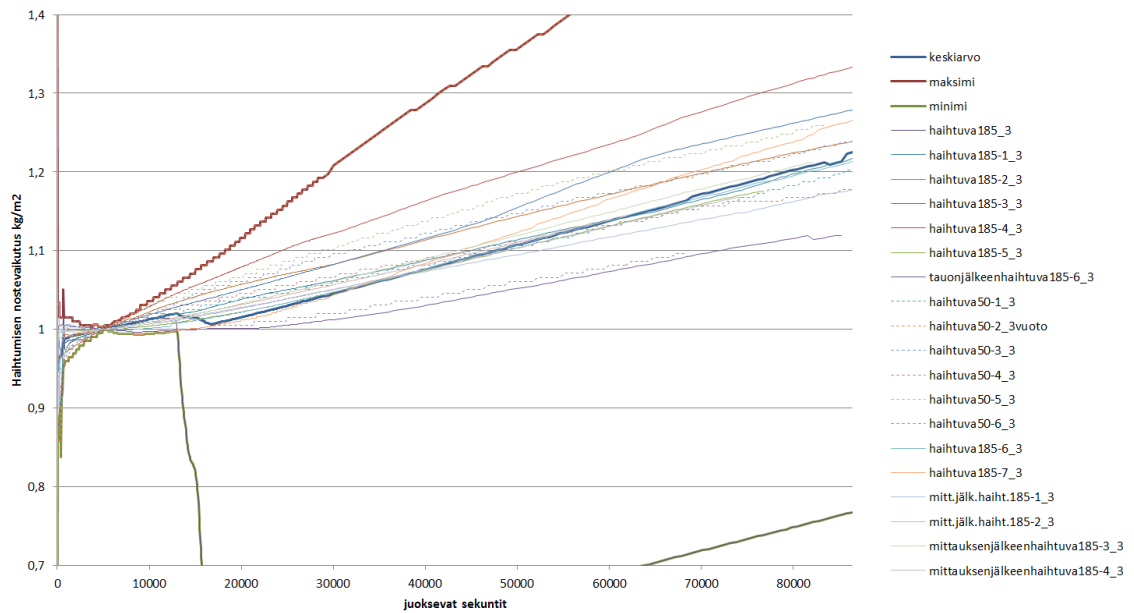
Kuva 5.3: Ylivirtauksen stabiliteettimittausten kooste sekä haihtumiskorjauskäyrät.

Kuvasta 5.3 voidaan havaita, että ylivirtausjärjestelmän minimi ja maksimi nostevaikutukset ovat vaikutukseltaan eri suuntaiset. Tästä johtuen nostevaikutusta ei pysty ylivirtausjärjestelmällä mitattaessa eliminoimaan. Nostevaikutus jää luotettavuutta heikentäväksi virhelähteeksi. Haihtuvaan veteen tehtävässä mittauksessa käytettävät haihtumiskorjauskäyrät puolestaan ovat ennustettavissa kohtalaisella tarkkuudella. Kuvasta havaitaan, että haihtumisen aiheuttama nostemuutos ei ole merkittävästi suurempi kuin tavanomaisen ylivirtauksen nostemuutos. Haihtumisen nostemuutos on mahdollista eliminoida, joten ylivirtausjärjestelmän käyttö lopetettiin.

5.1.2 Haihtumisnopeuden määrittäminen

Koekappaleen upotussyvyyden muutoksen tarkka mittaaminen on vaikeaa, joten haihtumisnopeutta alettiin tutkia. Mittauksen toimintatapa pyrittiin pitämään samanlaisena kuin tulevilla kokeilla, jotta määritetty haihtumisnopeus vastaisi mittaustilanteen haihtumisnopeutta mahdollisimman tarkasti.

Haihtumismittauksia tehtiin kahden kokoisilla koekappaleilla; kokeissa käytettiin halkaisijaltaan noin 50 ja 185 mm muovitulppia. Haihtumiskokeita tehtiin uuteen, vasta mittausvesiastiaan kaadettuun ja vanhaan, jo kerran mittauksessa olleeseen veteen. Eräs koe tehtiin koelaitteiston oltua pitkään pois käytöstä. Odotettavissa oli tavanomaista suurempi haihtumisnopeus, koska mittauskaappien seinämät olivat saaneet kuivua lähelle mittaushuoneen kosteusolosuhteita. Kuvassa 5.4 on esitetty kaikkien mittauskaappien 3 haihtumismittausten tulokset ensimmäisen vuorokauden ajalta. Myös selkeästi virheelliseksi todetut käyrät ovat mukana.



Kuva 5.4: Haihtumismittausten nostevaikutuskäyrät, ensimmäinen vuorokausi, kolmas mittausvesiastia.

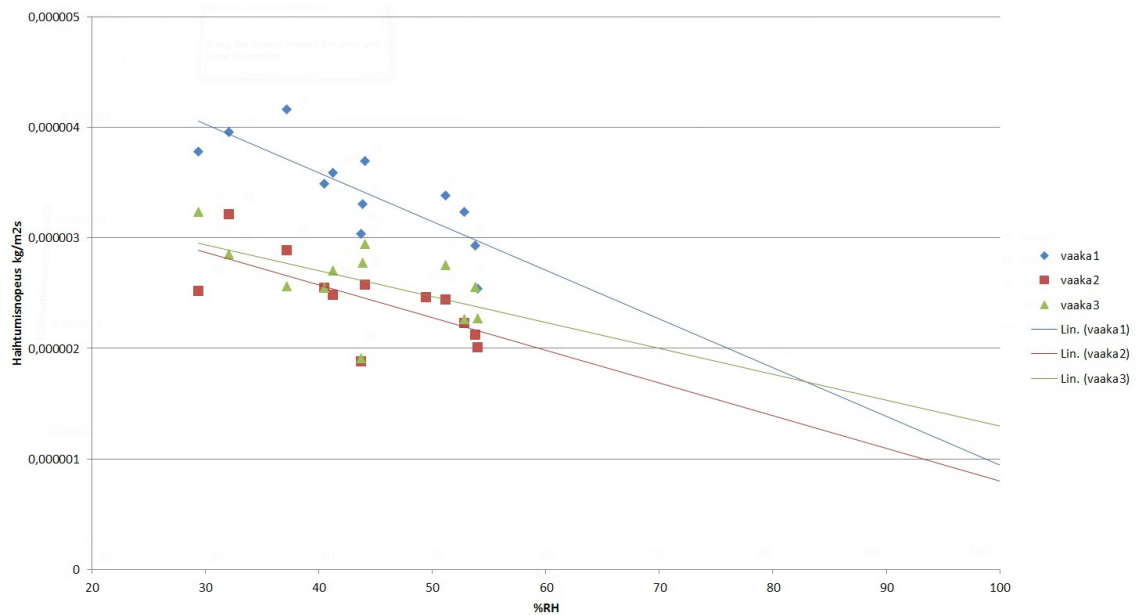
Jos virheelliset, veden vuotoa tai muita häiriöitä sisältävät käyrät jätetään pois, huomataan haihtumisnopeuksien hajonnan olevan pientä. Yhdensuuntaiset käyrät ovat haihtumisnopeudeltaan yhtäläisiä, ja ero y-akselin lukemassa johtuu mittauksen alussa olleista poikkeamista. Kaikki haihtumismittaus tulokset on skaalattu niin, että niiden arvo 5000 s kohdalla on 1 kg/m^2 . Vertailut eri pinta-alaisten koekappaleiden ja eri veden mittaushistorioiden välillä osoittivat, etteivät ne vaikuta haihtumisnopeuteen. Mittauksen alussa hajonta on suurta. Ainakin osa hajonnasta pystytään yhdistämään tunkkien lukituksen viivästyntymiseen, ilmakuplien poistoon tai mittausvesiastioiden pesun yhteydessä syntyneeseen ylimääräiseen veden haihdutuspintaan. Tämä hajonta pyrittiin poistamaan kehitysvaiheessa 3 yhtenäisellä kokeen aloituksen toimintatavalla.

Haihtumiskäyrien lineaariselle osalle sovitetuista suorista saatiin määritettyä kulmakertoja, joka vastaa haihtumisnopeutta. Oli odotettavaa, että haihtumisnopeuden ja ympäröivän tilan olosuhteiden väliltä löytyisi korrelaatiota. Korrelaatio haihtumisnopeuteen laskettiin mittauskaappien ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan, mittausve-

den lämpötilan sekä mittaushuoneen suhteellisen kosteuden osalta. Mittaushuoneen suhteellinen kosteus osoittautui parhaiten korreloivaksi suureksi.

Mittauskaappien olosuhteet ovat lähes vakiot eri mittausten välillä (ks. luku 5.3.1). Nopea ilman suhteellisen kosteuden nousu heti mittauksen alussa näkyy haihtumiskäyrän alussa haihtumisnopeuden alenemisena. Kun mittauskaappien olosuhteet ovat saantuneet, tapahtuu kosteusvirta vesiastiasta mittauskaappin ilmaan, joka puolestaan kuivuu konvektiolla ja mittauskaappin seinien läpi myös diffuusiolla mittaushuoneen ilmaan. Tästä johtuen lineaarisen haihtumisosuuden haihtumisnopeus korreloi parhaiten mittaushuoneen ilman suhteellisen kosteuden kanssa.

Kuvassa 5.5 on esitetty haihtumisnopeuden ja mittaustilan suhteellisen kosteuden riippuvuus. Kuvasta on jätetty pois haihtumisnopeudet, jotka ovat poikenneet trendistä, ja joiden poikkeama on pystytty jäljittämään johonkin eliminoitavissa olevaan mittausvirheeseen. Trendistä poikkeavia tuloksia on hylätty esimerkiksi, jos mittaushuoneen ilman suhteellinen kosteus on muuttunut paljon mittauksen aikana.

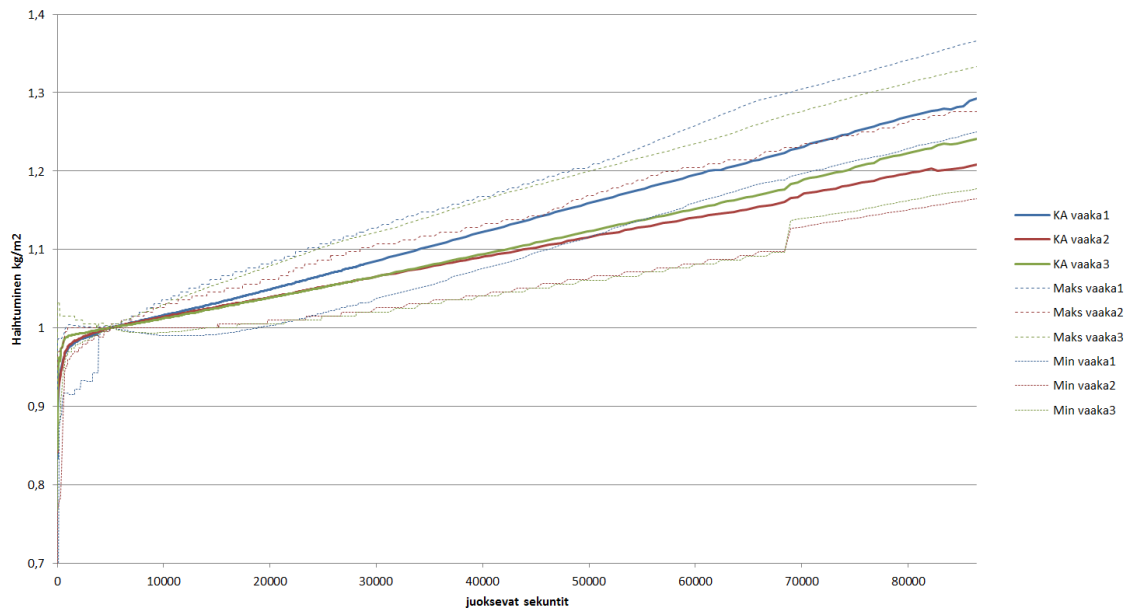


Kuva 5.5: Haihtumisnopeuden ja mittaushuoneen suhteellisen vesihöyrypitoisuuden välinen korrelaatio.

Kuvan perusteella mittaushuoneen suhteellisen kosteuden ja haihtumisnopeuden välinen riippuvuus on selkeä. Oletettavaa olisi, että haihtumisnopeus menee nollassa suhteellisen kosteuden saavuttaessa 100 % RH. Hypoteesi ei toteudu, mutta toisaalta mittaushuoneessa ei ole esiintynyt edes yli 60 % RH suhteellisia kosteuksia, jolloin käytännön koeolosuhteissa esitetyt korrelaatiokäyrät toimivat hyvin.

Haihtumisen hajonta on varsin pientä. Haihtumisnopeuden vaihtelu mittaushuoneen suhteellisen kosteuden vaihdella välillä 30 % RH – 60 % RH on luokkaa 50 % maksimiarvosta. Suuri osa tästä vaihtelusta voidaan poistaa ottamalla huomioon mittaushuoneen suhteellisen kosteuden ja haihtumisnopeuden välinen riippuvuus. Kuvassa 5.6 on

esitetty karsituista haihtumiskäyristä lasketut minimi, maksimi ja keskiarvot. Karsinta on tehty pääosin graafisesti poistamalla poikkeukselliset pisteet, mikäli poistamiselle on löytynyt järkevä syy. Osa karsinnasta on tehty mittauksen aikana tapahtuneiden poikkeamien vuoksi. Poikkeama on voinut olla esimerkiksi muovitulpan korkeusaseman muuttuminen kannattimessa, mikä on johtanut nosteen radikaaliin muuttumiseen kesken mittauksen.



Kuva 5.6: Haihtumisnopeusmittausten kooste ensimmäisen vuorokauden ajalta.

Kuvasta voidaan havaita selkeitä eroja eri mittauskaappien haihtumisnopeuksissa. Mittauskaappi 2 sijaitsee kaappien 1 ja 3 välissä, ja siksi sille on odotettavissa pienin haihtumisnopeus. Kolmannen mittauskaapin haihtumisnopeus sen sijaan ei ole odotusten mukaisesti lähellä kaapin 1 haihtumisnopeutta. Syynä lienevät erot mittauskaappien läpivientien tiiviydessä.

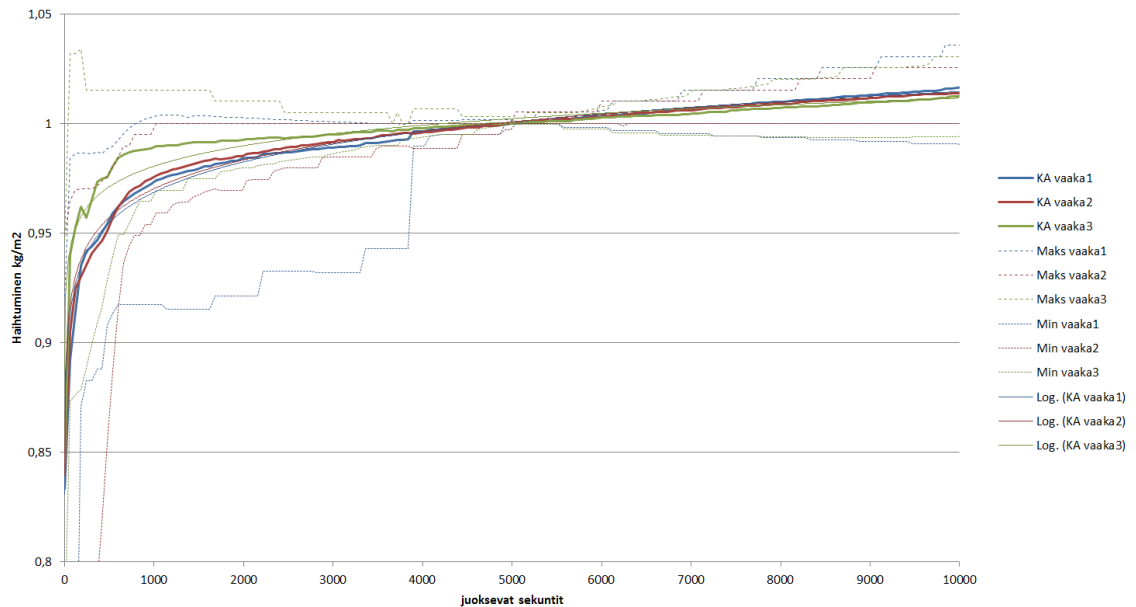
Käyrien muodot sen sijaan ovat yhteneväiset niin minimien, keskiarvojen kuin maksimienkin osalta. Minimiarvojen kohdalla näkyvä hyppäys johtuu alle vuorokauden mittaisen mittauksen loppumisesta, joka on tässä tapauksessa sattunut olemaan myös minimikäyrä. Kuvassa olevat minimi ja maksimi edustavat myös mittaushuoneen suhteellisen kosteuden ääripäitä.

5.1.3 Haihtumiskorjauskäyrä

Haihtumismittaustuloksista lasketaan haihtumiskorjauskäyrä, jota voidaan käyttää koekappaleiden mittaustulosten nostemuutosten eliminoinnissa. Haihtumiskorjauskäyrän määrittäminen on tehty regressioiden avulla kuvan 5.6 mukaisista keskiarvokäyristä.

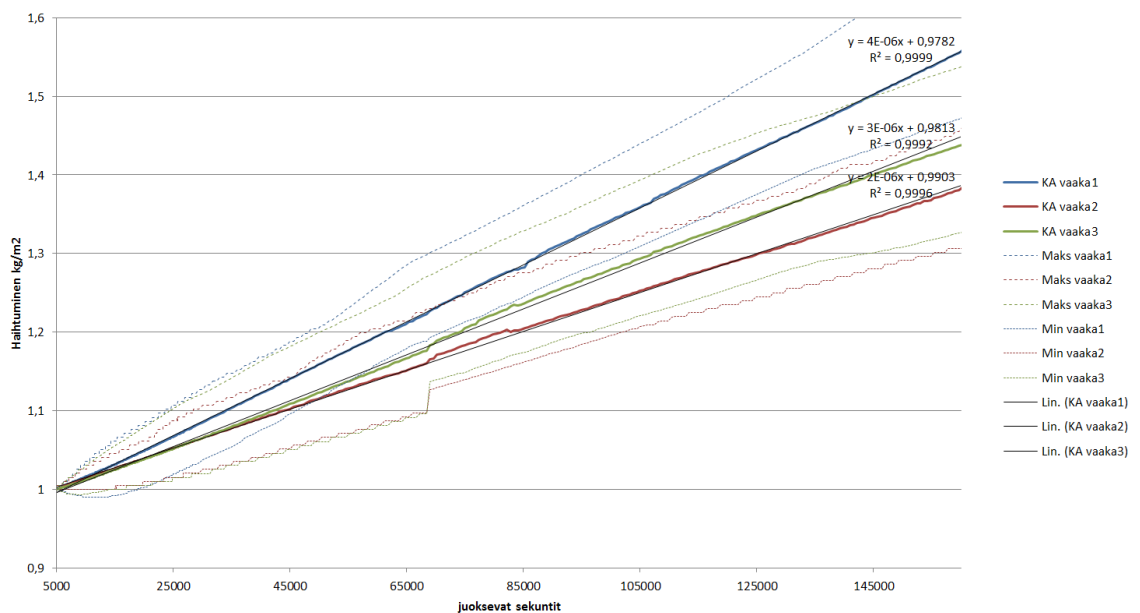
Keskiarvokäyrän määrittämisen yhteydessä virheelliset ja poikkeavat koetulokset on jätetty pois. Etenkin mittauksen alkuvaiheessa tällaisen karsinnan perustelemiseksi tarvitaan hyviä muistiinpanoja mittaustapahtumasta, koska mittaustuloksissa on paljon ha-

jontaa. Mittauksen alussa aikavälillä 0 – n. 2 h 45 min (0 – 10 000 s) keskiarvokäyrään on sovitettu logaritminen regressio. Kuvassa 5.7 on esitetty haihtumisnopeusmittausten kooste ensimmäisen noin 2 h 45 min (10 000 s = 100 s^{0,5}) ajalta sekä keskiarvokäyristä lasketut regressiot.



Kuva 5.7: Haihtumisnopeusmittausten alkuvaiheen kooste ja logaritmiset regressiot.

Haihtuminen alkaa linearisoitua selkeästi noin 5000s kohdalla, mikä on ollut perusteena tulosten yhteismitallistamiseen tälle ajanhetkelle. Kuvassa 5.8 on esitetty haihtumismittaustulosten kooste noin 1 h 20 min – 41 h 40 min (5000–150 000 s = ~70–390 s^{0,5}) aikaväliltä. Tämän aikavälin keskiarvokäyristä on laskettu myös keskiarvokäyrien lineaariset regressiot.



Kuva 5.8: Haihtumisnopeusmittausten lineaarisen vaiheen kooste rajattuna 41,5 h ajanjaksoon sekä lineaariset regressiot.

Edellä esitettyjen (kuvat 5.7 ja 5.8) keskiarvokäyrien regressioiden avulla lasketaan haihtumiskorjauskäyrä paloittain määriteltynä funktiona (5.1). Tämä haihtumiskorjauskäyrä edustaa mittaushuoneen keskimääräistä kosteusolosuhdetta, koska siinä on otettu huomioon kaikki eri kosteusolosuhteissa mitatut haihtumiset. Mittaushuoneen keskimääräinen kosteusolosuhde on haihtumismittausten kosteusolosuhteiden keskiarvo. Kunkin haihtumismittauksen kosteusolosuhde puolestaan on kyseiseltä mittausajanjaksoilta määritetyn huoneen suhteellisen kosteuden keskiarvo.

$$\frac{m_h(t) - m_h(5000)}{A_k} = \begin{cases} a_{\ln} \cdot \ln(t) + b_{\ln} & , \text{kun } t < 5000 \text{ s} \\ a_{RH} \cdot t + b_{RH} & , \text{kun } t \geq 5000 \text{ s} \end{cases} \quad (5.1)$$

Kaavassa $m_h(t)$ [kg] on haihtumismittauksen punnitustulos, $m_h(5000)$ [kg] haihtumismittauksen skaalaustermi, jolla punnitustulos asetetaan nollassa 5000 s kohdalla, A_k [m²] haihtumismittauksen koekappaleen pinta-ala ja t [s] juokseva aika.

Vakiotermi a_{\ln} lasketaan logaritmisien regression avulla sovittamalla funktio $a_{\ln} \cdot \ln(t) + b_{ka}$ haihtumismittausten keskiarvokäyrään aikavälillä 0–10 000 s (ks. kuva 5.7) ja a_{RH} kaavan (5.2) mukaan.

Vakiotermi b_{\ln} ja b_{RH} lasketaan siten, että haihtumiskorjauskäyrän funktio saa juoksevan ajan hetkellä 5000 s arvon yksi. Suhteellisen kosteuden vaikutus haihtumisnopeuteen otetaan huomioon kuvan 5.5 lineaarisen regression mukaisesti. Alkuvaiheen logaritmisuhteeseen haihtumisnopeuteen tätä riippuvuutta ei ole laskettu. Lineaarisen osuuden haihtumisnopeuden vakiotermi a_{RH} lasketaan kaavalla (5.2).

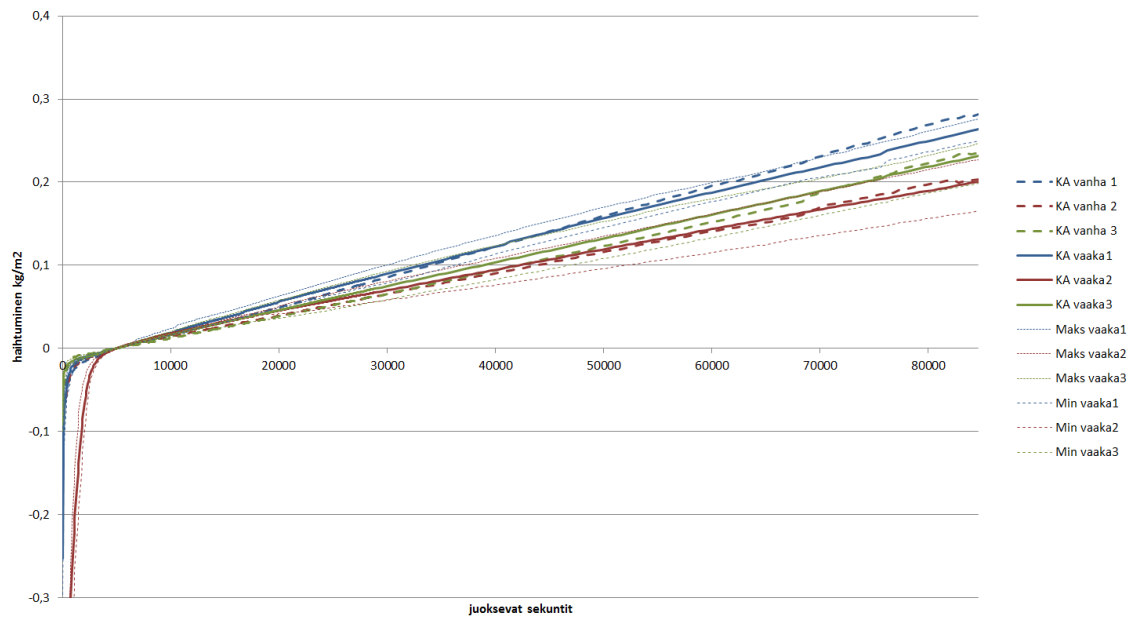
$$a_{RH} = b_h + a_h \cdot RH \quad (5.2)$$

Kaavassa a_h on kuvan 5.5 lineaarisen regression kulmakerroin, RH mittauksen aikana vallitseva suhteellisen kosteuden keskiarvo mittaushuoneessa ja b_h lasketaan kaavalla (5.3).

$$b_h = a_{ka} - RH_{ka} \cdot a_h \quad (5.3)$$

a_{ka} kuvan 5.8 mukainen haihtumisen keskiarvokäyrän lineaarisen regression kulmakerroin ja RH_{ka} haihtumismittausten suhteellisten kosteuksien keskiarvo mittaushuoneessa.

Kolmannen kehitysvaiheen haihtumiskorjauskäyrissä mittauksen alun nostemuutoksen virhelähteitä on poistettu. Tästä johtuen tehtiin uusi haihtumismittauskoesarja, jonka kooste on esitetty kuvassa 5.9. Kuvassa on vertailun vuoksi nähtävillä myös kuvan 5.6 mukainen haihtumisen keskiarvokäyrä.



Kuva 5.9: Kolmannen kehitysversion haihtumismittauskooste sekä toisen kehitysvaiheen haihtumismittausten keskiarvokäyrät.

Kuvasta nähdään, että lineaarisen osuuden keskiarvokäyrät eivät juurikaan muutu kehitysvaiheiden välillä. Alkuvaiheen hajonnan pienentyminen sen sijaan näkyy. Mittauskaapin 2 alkuvaiheen haihtumisnopeus ei noudata täydellisesti logaritmistä käyrää, mikä heikentää haihtumiskorjauksen tarkkuutta. Parempi sovite löytyisi neljännen asteen polynomista. Koska tulos poikkeaa merkittävästi kehitysvaiheen 2 haihtumismittausten tuloksista, täytyy se vielä tarkistaa ennen työlästä sovitekäyrän vaihtoa laskentapohjiin.

Suhteellisen kosteuden korrelaatio haihtumisnopeuteen osoittautui hyväksi. Kolmannen kehitysvaiheen mittauksissa haihtumisen mittaustulos hylättiin, mikäli mittauksen alkuvaiheesta ei löytynyt vähintään 1 vrk kestoista vakaan suhteellisen kosteuden aluetta. Vakaaksi lasketulla alueella suhteellisen kosteuden trendin kulmakertoimen tulisi olla lähes nolla, ja keskihajonnalle sopivana rajana on pidetty alle 5 % RH.

5.2 Tulosten käsittely ja laskenta

Mittausdatan analysointi ja laskenta tehtiin taulukkolaskennassa. Laskennan tehostamiseksi laskentapohjaa kehitettiin monessa vaiheessa, ja kokonaisuus tehtiin lopulta pitkälti makroavusteisena toimivaksi. Lopullinen laskentapohja on siinä määrin pitkälle ohjelmoitu, että vastaava laskentaskripti voisi olla relevanttia tehdä tehokkaasti matriisilaskentaa pyörittävään matematiikkaohjelmaan. Viimeisin laskentapohjan versio toimii suhteellisen varmasti, joten vastaavan toiminnallisuuden toteuttaminen toiseen ohjelmaan voisi olla tarpeettoman raskas projekti.

Laskenta jakaantuu selkeästi useampaan vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa automaattilaitteesta saatu mittausdata korjataan muun muassa poistamalla tyhjä datapistee. Tämän jälkeen mittausdataan voidaan tarvittaessa yhdistää käsinmitattua dataa.

Viimeistely mittausdata säädetään aloitushetkiltään yhtenäiseksi. Samalla painon muutoksen nollakohdat yhtenäistetään. Seuraavaksi koekappaleen pinta-ala tuodaan mukaan mittausdataan. Tällä tavoin yhteismitallistetuille painolukemille tehdään nostemuutosten vaikutuksen eliminointi.

Todellista painon muutosta kuvaava mittausdata lyhennetään karsimalla datapisteiden määrää. Painon muutuskäyriin tehdään lineaariset regressiot määrittämällä käyrien lineaaristen alueiden alku- ja loppupisteet käsin. Tässä yhteydessä datalle saattaa olla tarpeellista tehdä vielä muuta muokkausta, jotta kaksiosaisen huokosverkoston imuvaiheet saadaan erotetuksi toisistaan.

Laskentapohjalla saadut regressointi- ja muut laskentapohjan tiedot viedään mittauslomakkeelle, jota on täytetty jo aiemmin tutkimusten edetessä. Mittauslomakkeella lasketaan tietojen avulla lopullisia materiaaliominaisuuksia ja näiden virherajoja. Regressiotietojen lisäksi hyödynnetään esimerkiksi kuivapainomittausta ja mitattujen suureiden keskihajontoja.

5.2.1 Nostemuutosten eliminointi

Vedenpinnan tasovaihtelut muuttavat veteen upotetun kappaleen pintoihin kohdistuvaa hydrostaattista painetta. Paineen pystysuuntainen komponentti vaikuttaa samaan suuntaan painovoiman kanssa ja aiheuttaa nostevaikutuksen, joka vaikuttaa TTY:llä käytössä olevassa mittauslaitteistossa vaa'an punnitustulokseen.

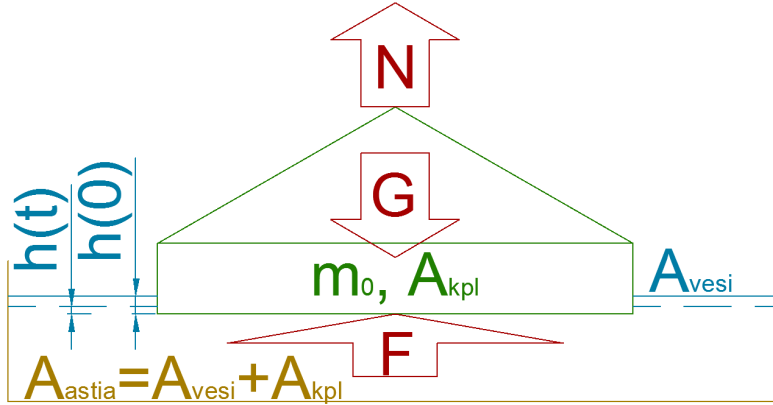
Mittauksen alussa koekappaleen vesikosketuksesta syntyvää nostetta ei ole tarpeen määrittää. Veden imeytymiskertoimen laskennan kannalta on tärkeää tuntea nosteen muuttuminen mittauksen aikana. Kapillaarista kyllästyskosteuspitoisuutta laskettaessa nosteen arvo on tunnettava, jotta koekappaleen vesipitoisuus kyllästymishetkellä voidaan laskea. Tämä voidaan tehdä jälkikäteen luvun 5.2.6 mukaisesti.

Ylivirtausjärjestelmässä nostevaikutusta ei voitu eliminoida, koska tasovaihtelulle ei löytynyt systemaattista trendiä. Sen sijaan haihtuvaan veteen tehdyssä mittauksessa nostevaikutus voidaan laskea. Tasomuutosta aiheuttavat sekä veden haihtuminen että veden imeytyminen koekappaleeseen. Molemmat vähentävät mittausvesiastiassa olevaa vesimäärää.

Kuvassa 5.10 on esitetty koejärjestelystä vapaakappalekuva, johon on merkitty tärkeimmät suureet:

- | | | |
|-------------|---------------------------------------|-----------------|
| • N | vaa'an kannattelema paino | N |
| • G | kappaleen paino | N |
| • F | kappaleeseen kohdistuva nostevaikutus | N |
| • m_0 | kappaleen alkupaino | g |
| • A_{kpl} | kappaleen pinta-ala | mm ² |

- A_{vesi} vapaan veden pinta-ala mm^2
- $h(t)$ kappaleen upotussyvyys juoksevan ajan (t) funktiona mm
- $h(0)$ kappaleen upotussyvyys kun $t=0$ ja mm
- A_{astia} vesiastian pinta-ala. mm^2



Kuva 5.10: Automaattimittauslaitteiston koejärjestelyn vapaakappalekuva.

Muodostetaan kuvan 5.10 mukainen pystysuuntainen tasapainoyhtälö ja puretaan se alkutekijöihinsä (kaava 5.4).

$$\begin{aligned} \uparrow N - G + F &= 0 \\ \wedge \\ N &= m(t)g \\ G &= [m_0 + \Delta m_w(t)]g \\ F &= \rho_w h(t) A_{kpl} g \end{aligned} \quad (5.4)$$

Kaavassa $m(t)$ on vaa'an punnituslukema [g], g on putoamiskiihtyvyys [m/s^2], $\Delta m_w(t)$ on koekappaleeseen ajanhetkellä t [s] imeytyneen vesimäärän massa [g] ja ρ_w on veden tiheys [kg/m^3].

Upotussyvyys juoksevan ajan funktiona on jaettu osiin kaavassa (5.5). Toinen termi $\Delta h_{\text{imu}}(t)$ kuvaa veden pinnan tasomuutosta kappaleeseen imeytyneen vesimäärän seurauksena ja kolmas termi $\Delta h_h(t)$ veden haihtumisen aiheuttamaa tasomuutosta.

$$h(t) = h(t_{\text{vert}}) - \Delta h_{\text{imu}}(t) - \Delta h_h(t) \quad (5.5)$$

Kappaleen upotussyvyuden vertailuarvo ($t=t_{\text{vert}}$) voidaan laskea sijoittamalla upotussyvyys (5.5) tasapainoyhtälöön (5.4). Vertailuajaksi on valittava mittauksen aloitushetki ($t_{\text{vert}}=0$), koska kaikki Δ -termit ovat arvoltaan nolla mittauksen aloitushetkellä. Tuloksena saadaan kaava (5.6).

$$h(0) = \frac{m_0 - m(0)}{\rho_w A_{kpl}} \quad (5.6)$$

Tavanomaisessa mittauksessa lukeman $m(0)$ määrittäminen mittausdatasta on lähes mahdotonta, koska koekappaleen paino alkaa nousta välittömästi vesikosketuksen alet-

tua. Punnituslukema sen sijaan on luotettava usein vasta useampien sekuntien vesikosketuksen jälkeen. Tästä johtuen on tyydyttävä mahdollisimman tarkkaan arvioon. Tällä ei kuitenkaan ole vaikutusta tuloksiin, koska laskennassa eliminoidaan ainoastaan nostemuutokset.

Tasovaihtelun laskenta

Kappaleen itsensä imemän vesimäärän aiheuttama vedenpinnan lasku lasketaan seuraavalla tavalla: Ensin lasketaan koekappaleen massan muutoksen avulla kappaleen imemä vesimäärä (V_{imu}) [mm^3] (5.7 (1)). Toiseksi lasketaan veden tasomuutos, kun astiasta otetaan vettä pois määrätty tilavuus (V_{vesi}) [mm^3] (5.7 (2)). Merkitään tilavuudet yhtä suureksi ja saadaan kaavan (5.5) toinen termi ($\Delta h_{imu}(t)$) [mm] (5.7 (3)).

$$\begin{aligned}
 (1) \quad \Delta m_w(t) &= \rho_w V_{imu}(t) \\
 V_{imu}(t) &= \frac{\Delta m_w(t)}{\rho_w} \\
 (2) \quad \Delta V_{vesi}(t) &\stackrel{\dots}{=} A_{vesi} \Delta h_{imu}(t) \\
 V_{imu}(t) &\stackrel{\dots}{=} \Delta V_{vesi}(t) \\
 &\Leftrightarrow \\
 \frac{\Delta m_w(t)}{\rho_w} &= A_{vesi} \Delta h_{imu}(t) \\
 &\Leftrightarrow \\
 (3) \quad \Delta h_{imu}(t) &= \frac{\Delta m_w(t)}{\rho_w A_{vesi}}
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

Vielä on laskematta kaavan (5.5) kolmas termi ($\Delta h_h(t)$) [mm]. Käytetään edelleen vaapakappalekuvaa (Kuva 5.10), mutta sekaannuksen välttämiseksi muutetaan merkintöjen alaindeksit vastaamaan haihtumiskoetta seuraavasti:

- $m(t) \rightarrow m_h(t)$ vaa'an punnituslukema g
- $m_0 \rightarrow m_k$ kappaleen alkupaino g
- $A_{kpl} \rightarrow A_k$ koekappaleen pinta-ala mm^2
- $h(t) \rightarrow h_h(t)$ kappaleen upotussyvyys juoksevan ajan (t) funktiona mm
- $h(0) \rightarrow h_h(0)$ kappaleen upotussyvyys kun $t=0$ ja mm.

Haihtumisen vaikutus korkeusasemaan on määritetty haihtumismittauksilla. Haihtumismittauksissa käytetään vettä imemättömiä kappaleita (muovitulppia). Tästä seuraa, että veden imeytymisen painon muutosta ei ole ($\Delta m_w(t)=0$), eikä tästä aiheutuvaa veden tason laskuakaan ($\Delta h_{imu}(t)=0$). Muutetuin alaindeksin pätee edelleen kaavat (5.4), (5.5) ja (5.6). Haihtumisen aiheuttama tasomuutos voidaan nyt laskea (kaava 5.8) käyttämällä tasapainoyhtälöä (5.4).

$$\begin{aligned}
& \uparrow N - G + F = 0 \quad | : g \\
& \quad \quad \quad \Rightarrow \\
& m_h(t) - m_k + \rho_w [h_h(0) - \Delta h_h(t)] A_k = 0 \\
& m_h(t) - m_k + \rho_w A_k \frac{m_k - m_h(0)}{\rho_w A_k} - \rho_w A_k \Delta h_h(t) = 0 \\
& \quad \quad \quad \Leftrightarrow \\
& m_h(t) - m_h(0) = \rho_w A_k \Delta h_h(t) \\
& \quad \quad \quad \Leftrightarrow \\
& \Delta h_h(t) = \frac{m_h(t) - m_h(0)}{\rho_w A_k}
\end{aligned} \tag{5.8}$$

Nyt saatiin tasovaihtelu laskettua. Huomataan, että tasovaihtelun yhtälön oikea puoli voidaan korvata luvussa 5.1.3 lasketulla haihtumiskorjauskäyrällä (5.1). Lukemien skaa-laustermi $m_h(0)$ voidaan korvata termillä $m_h(5000)$, koska haihtumismittauksessa $\Delta m_w(t)$ ja $\Delta h_{imu}(t)$ ovat nolliä vertailuajasta (t_{vert}) riippumatta.

Todellisen painon muutoksen laskenta

Veden tasovaihtelu on saatu määritettyä sijoittamalla tasapainoyhtälöön (5.4) ajasta riippuvat tunnetut reunaehdot. Nyt tasapainoyhtälö voidaan kirjoittaa auki ajasta riippumattomasti. Sijoitetaan tasapainoyhtälöön kaava (5.5) ja tämän termien ratkaisut (kaavat (5.6), (5.7 (3)) ja (5.8)). Tuloksena saadaan kappaleeseen ajanhetkellä t imeytyneen vesimäärän massa $\Delta m_w(t)$, joka suhteutetaan koekappaleen pinta-alaan (kaava 5.9).

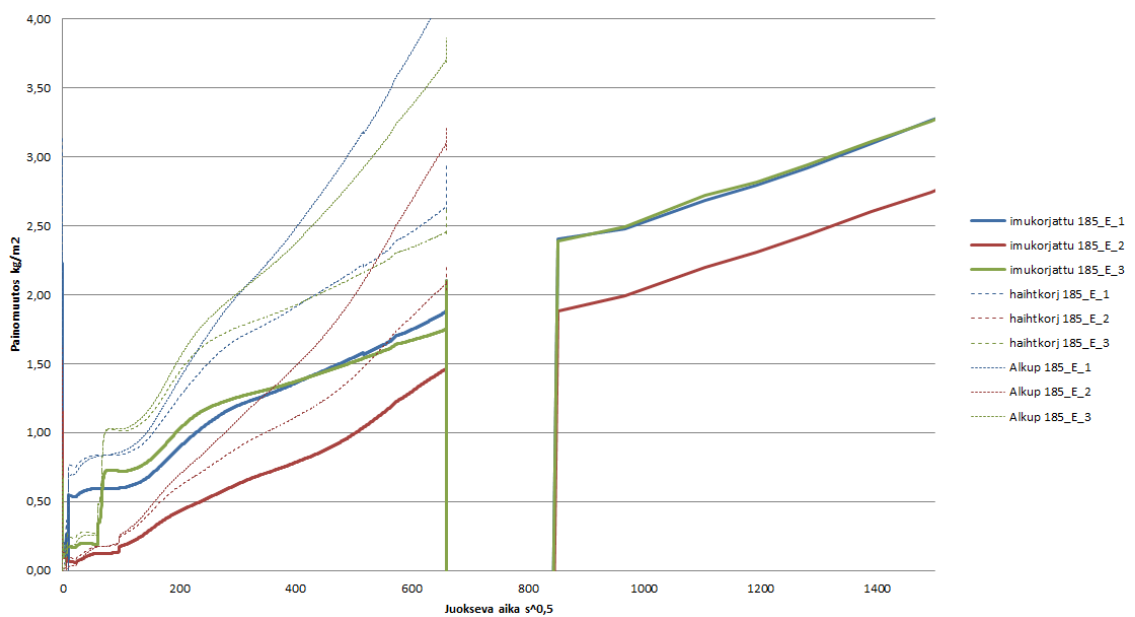
$$\begin{aligned}
& \uparrow N - G + F = 0 \quad | : g \\
& \quad \quad \quad \Rightarrow \\
& m(t) - [m_0 + \Delta m_w(t)] + \left\{ m_0 - m(0) - \frac{A_{kpl}}{A_{vesi}} \Delta m_w(t) - \frac{A_{kpl}}{A_k} [m_h(t) - m_h(5000)] \right\} = 0 \\
& m(t) - m(0) - \frac{A_{kpl}}{A_k} [m_h(t) - m_h(5000)] = \left\{ \frac{A_{kpl}}{A_{vesi}} + 1 \right\} \Delta m_w(t) \quad | \cdot A_{kpl} \\
& \quad \quad \quad \Rightarrow \\
& \frac{\Delta m_w(t)}{A_{kpl}} = \frac{\frac{m(t) - m(0)}{A_{kpl}} - \frac{[m_h(t) - m_h(5000)]}{A_k}}{\left\{ \frac{A_{kpl}}{A_{vesi}} + 1 \right\}}
\end{aligned} \tag{5.9}$$

Laskentapohjaa käytettäessä kaavaa sovelletaan vaiheittain. Muistetaan, että $m(t)$ on mittausdatassa näkyvä vaa'an punnitusulos. Jotta erisuuret mittausdatan punnitusluke-mat saadaan vertailukelpoisiksi keskenään, vähennetään kaikista vakioarvo $m(0)$. Kun nolllalukeman tarkka määrittäminen tiedetään mahdottomaksi, tyydytään mahdollisim-man tarkkaan arvioon. Laskentapohjan oletuksena on käyttää upotushetkestä seuraavaa punnituslukemaa, joka on käytännössä sama kuin laskennassa käytettävä ajanhetki 0 s.

Nollalukeman korjauksen jälkeen tehdään haihtumiskorjaus käyttäen haihtumiskor-jauskäyrää (5.1). Haihtumiskorjauskäyrä on riippuvainen mittaushuoneen ilman suhteel-lisestä kosteudesta, joka on syötettävä koko mittausajanjakson keskiarvona. Jos kosteus-

olosuhde on vaihdellut voimakkaasti, voi olla järkevää käyttää mittauksen alkuajalta laskettua keskiarvoa ja jättää loppu mittausdata pois laskennasta.

Hitaasti vettä imevillä kappaleilla haihtumisen osuus punnitustuloksen muutoksesta on suuri, ja näin ollen haihtumisen epävarmuus vaikuttaa merkittävästi laskennan tulosten luotettavuuteen. Kuvasta 5.11 nähdään polymeerimodifioidun julkisivurappauslaastin punnituslukemat sekä nostevaikutuksen eliminointi. Mittausta on jatkettu käsin noin $650 \text{ s}^{0,5}$ jälkeen. Kuvasta huomataan, että mittaustavan vaihtuessa painonnousun trendi pysyy odotetusti samana. Trendin pysyminen on osoitus onnistuneesta nostevaikutuksen eliminoinnista. Käsinmittauksen aikana koekappaleet punnitaan vedestä poistettuna eikä nostevaikutusta ole.



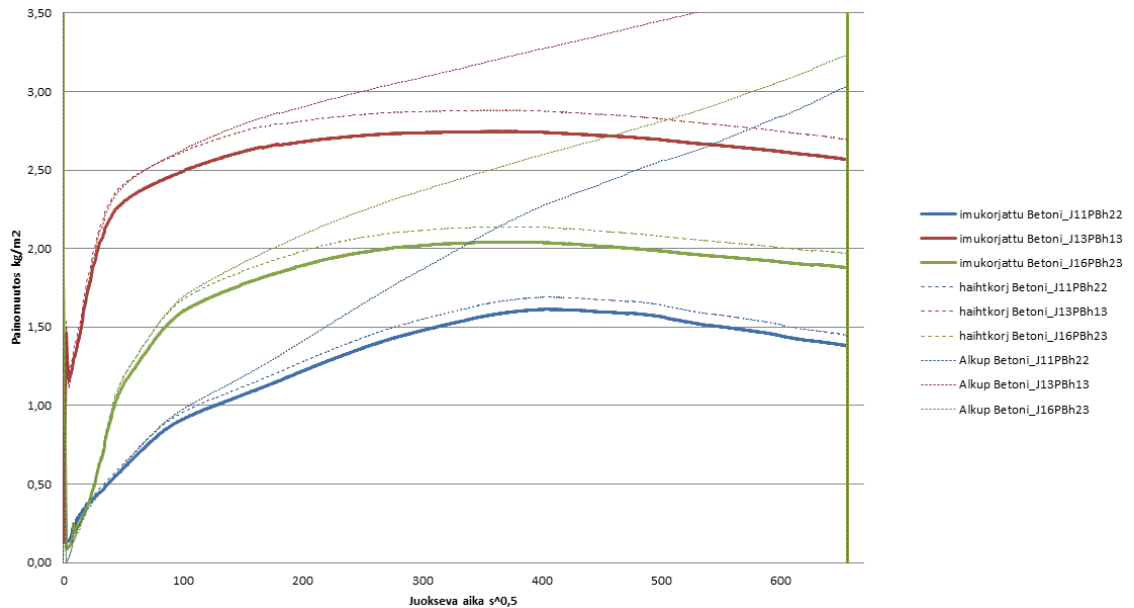
Kuva 5.11: Polymeerimodifioidun julkisivurappauslaastin painonnousudata.

Alkup -käyrät edustavat kaavan (5.10) termiä $[m(t)-m(0)]/Ak_{pl}$.

Haihtkorj -käyrät edustavat vastaavasti koko osoittajan arvoa, jossa alkuperäiseen dataan on tehty haihtumiskorjaus, eli yhtälön (5.8) mukainen tasovaihtelu on huomioitu.

Imukorjattu -käyrät edustavat arvoa, jossa myös osamäärä on laskettu, eli myös kaavan (5.7) mukainen tasovaihtelu on huomioitu.

Joillakin koekappaleilla haihtumiskorjauksesta on seurannut koekappaleen painon näennäinen putoaminen mittauksen loppuvaiheella (kuva 5.12). Haihtuminen on lineaarista ajan suhteen, mutta painon muutosta tarkastellaan ajan neliöjuuren suhteen. Tästä seuraa haihtumisen suureneva vaikutus mittauksen edetessä. Kuvan 5.12 koekappaleita mitattaessa mittaushuoneen suhteellinen kosteus on noussut mittauksen aikana (noin 25 % RH \rightarrow 40 % RH). Tämä korostaa entisestään mainittua haihtumisen vaikutuksen kasvua mittauksen edetessä, mikäli haihtumisnopeus on väärin määritetty.

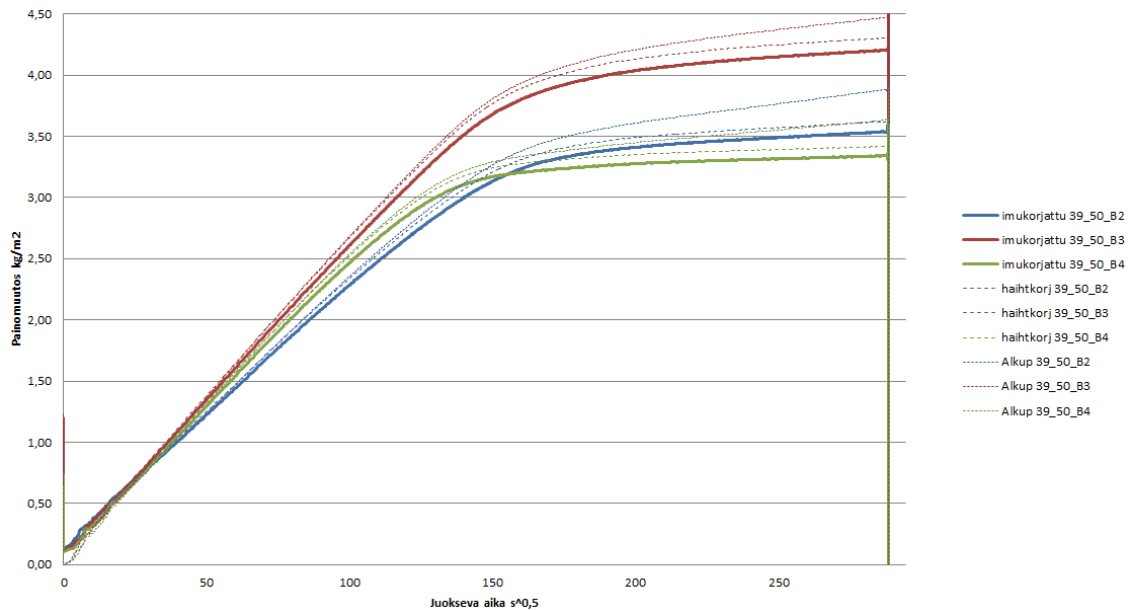


Kuva 5.12: Valkoisen pesubetonin painonnousudata, mittaushuoneen suhteellinen kosteus on noussut voimakkaasti mittauksen aikana.

Yllä olevista kuvista nähdään myös koekappaleen itsensä imemän vesimäärän aiheuttaman nostevaikutuksen eliminointi punnitustuloksesta. Kuten kaavasta (5.9) voidaan nähdä, tämä korjaus on prosentuaalinen ja sen merkittävyyteen vaikuttaa kappaleen ja vapaan veden pinta-alojen suhde. Tämä on havaittavissa myös kuvista 5.11 ja 5.12. Ensimmäisessä kuvassa koekappaleiden halkaisija on ollut 185 mm ja toisessa vain 75 mm. Pienempien koekappaleiden tapauksessa prosentuaalinen korjaus jää hyvin pieneksi.

5.2.2 Teorian mukainen veden imeytymiskerroin

Veden imeytymiskertoimen laskenta tehtiin Excel -taulukkolaskentaohjelmalla laske-
malla lineaarisia regressioita painonnousudatasta. Mittausdata käsiteltiin nostemuutos-
ten eliminoinniseksi, kuten edellä on esitetty. Kuvassa 5.13 on esimerkki tavanomaiselle
saumalaastille tehdystä hyvin onnistuneesta veden imeytyskokeesta. Kuvassa näkyvän
nostemuutosten eliminoinnin jälkeen mittausdatan loppuosasta karsittiin mittauslukemia
pois, jotta mittauksen loppuvaiheen punnitustulokset eivät saisi regressiossa liian suurta
painoarvoa.



Kuva 5.13: Tavanomaisen saumalaastin painonnousudata ja nostemuutosten eliminointi.

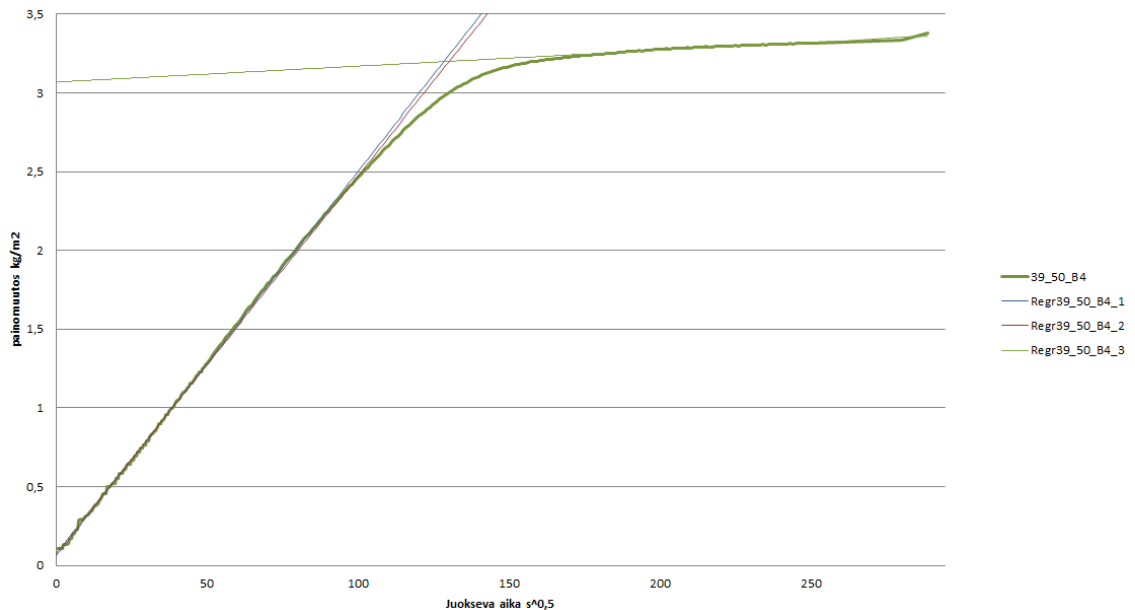
Mittausdatan keräämiselle ei määritetty erityistä ohjeistusta, vaan punnituslukemien tallennusväli säädettiin helpoksi koetulla tavalla jokaiselle sarjalle. Tavanomaiseksi toimintatavaksi muodostui aloittaa mittaus 5 s tallennusvälillä. Mittauksen alkutoimien jälkeen muutaman minuutin tai viimeistään puolen tunnin jälkeen tallennusväli nostettiin 55 s arvoon. Vakio datapisteiden tallennusväli johtaa mittauksen loppuvaiheessa hyvin suureen pistemäärään suhteessa painon nousuun. Jotta alkuvaiheen data ei jäisi painoarvoltaan liian pieneksi, päädyttiin karsimaan datapisteitä.

Ensimmäisissä laskentapohjissa karsintaa ei tehty lainkaan. Lopulta vakiintui seuraava karsintamenetelmä: Ensimmäisestä osasta lukemia kerättiin $0,5 \text{ s}^{0,5}$ välein $50 \text{ s}^{0,5}$ arvoon asti. Tämän jälkeen käytettiin $1 \text{ s}^{0,5}$ askellusta $250 \text{ s}^{0,5}$ asti ja tästä mittauksen loppuun askellus oli $10 \text{ s}^{0,5}$. Karsinnassa mittausdatasta etsittiin kyseistä aika-arvoa lähimpänä oleva aika-arvo ja poimittiin vastaava nostemuutosten osalta korjattu painon muutoslukema, loput mittausdatan pisteet jätettiin huomioimatta.

Käsinmitattua dataa ei karsittu, vaan kaikki mitatut pisteet otettiin regressiolaskentaan mukaan tarkan aikaleimansa mukaisina. Käsinmitatussa datassa punnitukset tehdään harvoin ja datapisteiden väliksi muodostuu kymmenien neliöjuurisekuntien suuruusluokka. Jotta käsin mitatut datapisteet vaikuttavat regression arvoon, tulee automaattidataa karsia yhtäläiselle datapistevälille.

Karsituista datapisteistä kootusta painonnousukäyrästä tehtiin kuvan 5.14 mukaiset lineaariset regressiot. Regressioita on tehty kolme; toinen regressio on tarkoitettu varsinaisen veden imeytymiskertoimen määrittämiseen, ensimmäinen herkkyystarkasteluun ja kolmas regressio imun päättymisvaiheen linearisoimiseen. Herkkyystarkastelussa en-

ensimmäisen ja toisen regression määrittämisen aikavälejä voidaan vaihdella ja katsoa kuinka paljon se vaikuttaa niiden kulmakertoimiin.



Kuva 5.14: Tavanomaisen saumalaastin karsitulle painon muutoskäyrälle tehdyt lineaariset regressiot.

Esimerkkikuvassa ensimmäinen regressio on tehty aikavälille 3–50 s^{0,5}, toinen regressio välille 3–115 s^{0,5} ja kolmas aikavälille 170–280 s^{0,5}. Tästä voidaan huomata, että kyseinen koekappale on noudattanut veden imeytymiskertoimen teoriaa todella hyvin. Ensimmäisen ja toisen regression suorat ovat lähes yhdensuuntaiset, vaikka ensimmäisen regression laskennassa on mukana vain puolet toisen regression laskentaan käytetyistä datapisteistä.

Painonnousukäyrän akselien yksiköt on valittu siten, että veden imeytymiskerroin on suoraan lineaarisen regression kulmakerroin. Nyt jokaisen laskentapohjan lineaarisen regression voidaan ajatella edustavan veden imeytymiskerrointa, joka pätee tietyissä olosuhteissa. Mikäli materiaalin painonnousukäyrä on teorian mukainen, kuvaavat sekä ensimmäinen että toinen regressio materiaalin aitoja veden imeytymiskertoimia. Vastavasti kolmas regressio voidaan ajatella veden imeytymiskertoimena, joka on voimassa olosuhteissa, joissa kapillaarisessa kyllästyskosteuspitoisuudessa oleva materiaalikappale päättyy vesikosketukseen. Mikäli selkeää lineaarista imuvaihetta ei löydy, voi veden imeytymiskerrointa yrittää määrittää luvun 5.2.3 tai 5.2.4 mukaan.

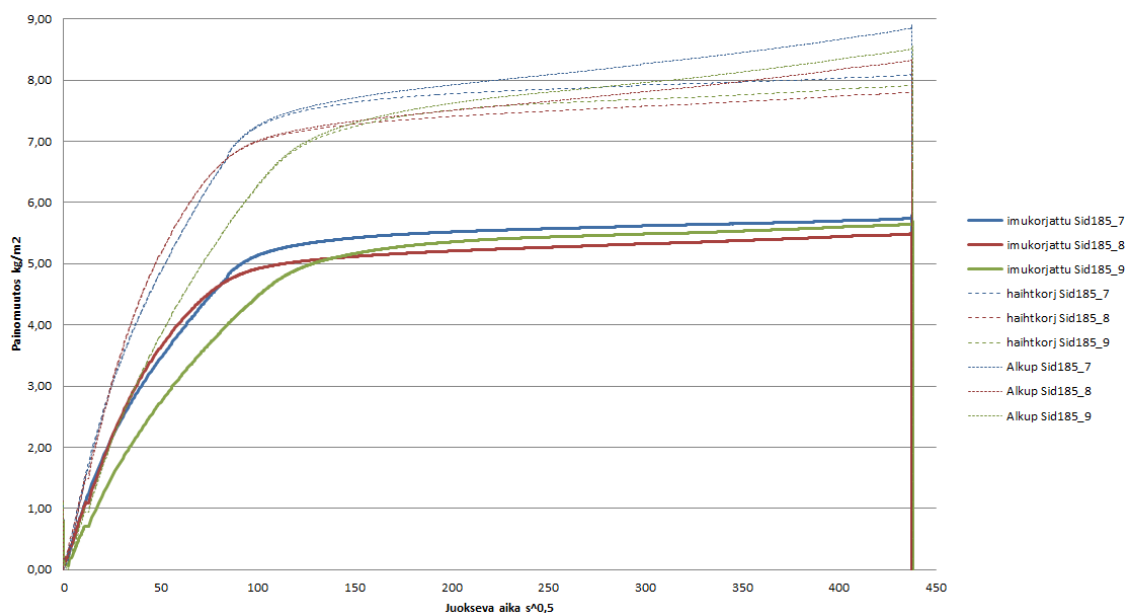
Nopean imun materiaaleille, joilla imuvaihe päättyy ensimmäisen vuorokauden aikana, ei haihtumiskorjauksen pienellä epävarmuudella ole käytännössä merkitystä. Vaikka mittausdata olisi kuvan 5.12 tapaan vääristynyttä, ei haihtumiskorjauskäyrän varioinnilla ole juurikaan vaikutusta veden imeytymiskertoimen suuruuteen. Esimerkiksi kuvan 5.12 painonnousukäyrästä määritettyihin veden imeytymiskertoimiin syntyy vain alle 1 % vaihtelu, vaikka haihtumiskorjauskäyrää määrittäessä suhteellisen kosteuden

varioisi hyvin kuivista (20 % RH) olosuhteista hyvin kosteisiin (80 % RH) olosuhteisiin.

Vastaavasti kuvan 5.11 mukaisella hitaasti vettä imevällä laastilla haihtumisen variaointi voi johtaa useiden kymmenien prosenttien vaihteluun veden imeytymiskertoimessa. Tästä johtuen hitaasti vettä imeville laasteille on perusteltua täydentää automaattimittausdataa käsinmitatulla datalla. Näin nostemuutosten eliminoinnin virheet saadaan esiin.

5.2.3 Veden imeytymiskertoimen määrittäminen epälineaarista mittausdatasta

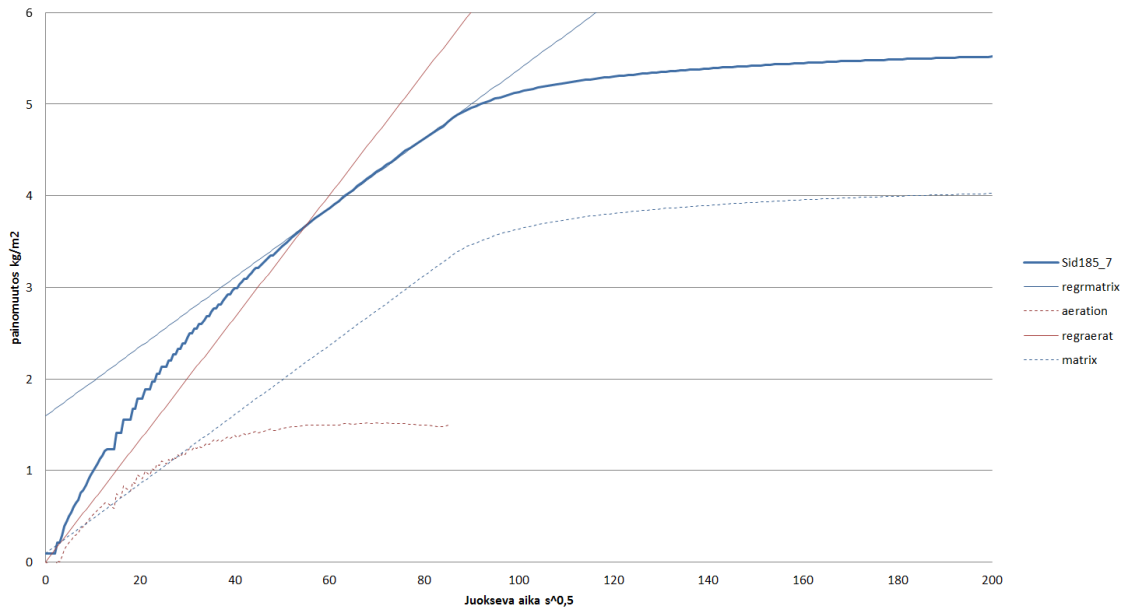
Jos mittausdatasta ei löydy yksittäistä lineaarista imuvaihetta, joka päättyy selkeästi kuten kuvassa 5.14, on veden imeytymiskertoimen laskenta vaikeaa. Yksi syy mittausdatan epälineaarisuudelle voi olla mitatun materiaalin huokosrakenteen epäjatkuvuus; kun huokosrakenteeltaan kaksijakoiseen materiaaliin imeytetään vettä, suurten huokosten kapillaarinen nousukorkeus tulee rajoittavaksi tekijäksi veden imeytymiselle. Pienissä huokosissa imu voi jatkua vielä pitkään. Esimerkki tällaisesta materiaalista on kevytbetoni, jolle tehdyn mittauksen painonnousudata nähdään kuvassa 5.15.



Kuva 5.15: Kevytbetonin painonnousudata, ei selkeää lineaarista imuvaihetta.

Ioannou et al [9] esittelevät kevytbetonin vedenimudatan käsittelyyn sopivan menetelmän perusteluineen. Ideana on käyttää korkeita koekappaleita, jolloin alumiinijauheella huokostamalla tehty suurempi huokosverkosto saavuttaa kapillaarisen nousukorkeuden rajan. Tämän rajan yläpuolella vain kiintoaineksen huokosverkosto jatkaa vedenimua. Kiintoaineksen veden imeytymiskerroin voidaan määrittää käyrän lineaariselta osalta kun suurten huokosten imu on loppunut.

Kuvassa 5.16 on esitetty seuraavaa: kuvan 5.15 koekappaleen Si185_7 painonnousukäyrä, siitä tehty kiintoaineen (regrmatrix) veden imeytymiskertoimen määrittävä lineaarinen regressio, tämän avulla laskettu huokostuksella aiheutettujen huokosten vedenimukäyrä (aeration = Sid185_7 - regrmatrix), näiden huokosten veden imeytymiskertoimen määrittävä lineaarinen regressio (regraerat) sekä kiintoaineen laskettu painonnousukäyrä (matrix = Sid185_7 - aeration).



Kuva 5.16: Kevybetonin painonnousudatan jako kahteen huokosverkostoon.

Suurten huokosten veden imeytymiskerroin ei oletettavasti ole oikein, sillä niiden kapillaarinen nousukorkeus tiedetään pieneksi. Tämä tarkoittaa painovoiman vaikutuksen olevan samaa suuruusluokkaa kapillaari-imun kanssa. Tästä seuraa, ettei lineaarinen sovitte enää päde. Jos suurten huokosten huokostilavuus tunnettaisiin, voitaisiin nyt laske-
tusta tuloksesta arvioida kapillaarista nousukorkeutta.

Epälineaarista painonnousua noudattaville materiaaleille on esitetty myös vaihtoehtoisia sovitekäyriä (ks. luku 3.2.8). Näitä ei ole testattu tämän tutkimuksen tulosten analysoinneissa.

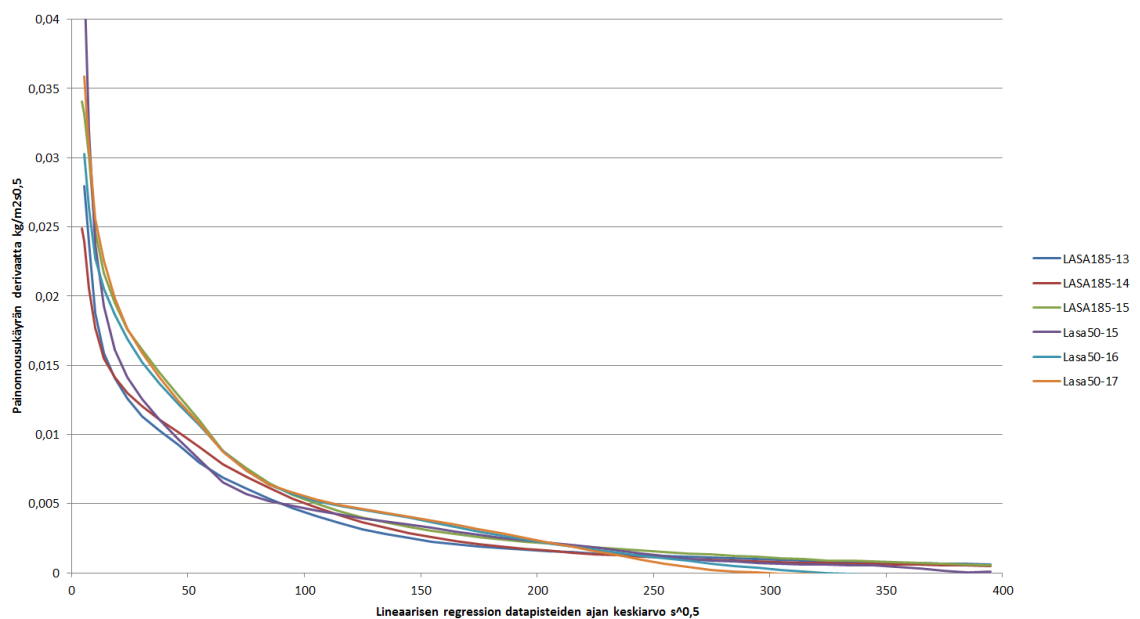
5.2.4 Veden imeytymiskertoimen soveltaminen teoriaa noudattamattomalle mittausdatalle

Tutkimuksessa tehtiin kokeita myös modifioidulle saumalaastille, jonka vedenimuominaisuudet muuttuvat vesikosketuksen aikana. Tällainen materiaali ei voi noudattaa veden imeytymiskertoimen teoriaa, joka perustuu muuttumattomaan huokosverkostoon. Jotta mittausdataa pystyi vertailemaan vedenimukokeen virhelähteiden kannalta, otettiin käyttöön seuraava metodi:

Mittausdatasta tehtiin nostemuutoksen eliminointi kuten muustakin datasta. Tässä yhteydessä osoittautui lähes poikkeuksetta, ettei selkeää lineaarista imuvaihetta ole. Nyt

mittausdataa karsittiin radikaalisti, jotta saatiin jokainen mittaussarja samoilla datapisteillä helposti käsiteltäväksi. Datapisteiksi valittiin 1–10 s^{0,5} 1 s^{0,5} askeleella, 10–500 s^{0,5} 10 s^{0,5} askeleella ja tästä eteenpäin 200 s^{0,5} askeleella. Karsitusta mittausdatasta tehtiin lineaariset regressiot kymmenestä vierekkäisestä datapisteestä. Ensimmäinen regressio oli siis väliltä 1–10 s^{0,5}, toinen väliltä 2–20 s^{0,5} ja niin edelleen. Viimeinen vertailuun mukaan otettu regressio kattaa aikavälin 350–440 s^{0,5}.

Tällä tavalla analysoitu data on käytännössä derivaatta painonnousukäyrästä, mikä voidaan tulkita myös ajan suhteen muuttuvaksi veden imeytymiskertoimeksi. Tämä derivaatta piirrettiin mittauspisteiden ajan keskiarvon mukaisesti kaavioon. Kyljiltään ja yläpinnaltaan suojaamattomien modifioitujen saumalaastien koesarjan painonnousukäyrän derivaatat voidaan nähdä kuvasta 5.17.



Kuva 5.17: Modifioidun saumalaastin painonnousukäyrän derivaatta, täysin suojaamattomat koekappaleet.

Derivaatan esittäminen veden imeytymiskertoimen sijasta olisi mahdollista myös luvun 5.2.3 mukaisille materiaaleille. Tämä ei ole mielekäästä, koska veden imeytymiskerroin on johdettu luotettavaksi todetusta teoriasta. Mikäli materiaalin tiedetään noudattavan teoriaa, kannattaa painonnousudataa käsitellä siten, että veden imeytymiskerroin saadaan määritetyksi. Näin veden imeytymiskerrointa voidaan käyttää myös lähtötietona laskentaohjelmissa, kunhan tiedostetaan määrittelyn yhteydessä tehtyjen oletusten vaikutus lopputulokseen.

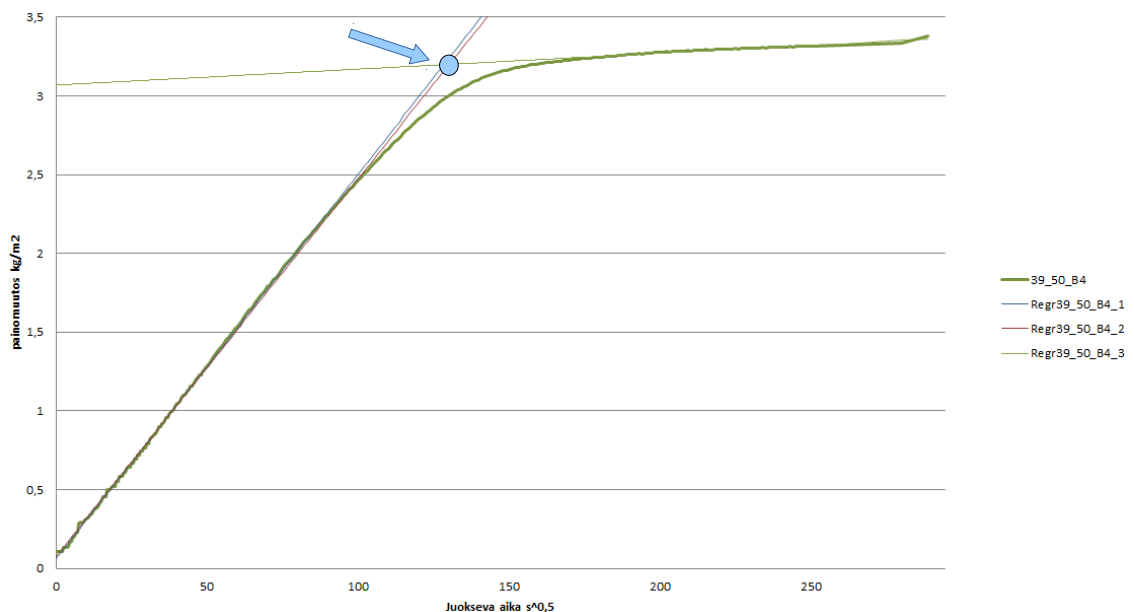
5.2.5 Veden tunkeutumiskerroin

Veden tunkeutumiskerroin voidaan määrittää kappaleessa 5.2.2 esitettyjen lineaaristen regressioiden avulla. Veden tunkeutumiskerroin kuvaa veden etenemisnopeutta materiaalissa, eikä sen määrittäminen ole järkevää, ellei mittausdata ole teorian mukaista.

Seuraavassa esiteltävällä veden tunkeutumiskertoimen laskentamenetelmällä saadaan määritetyksi veden tunkeutumiskerroin yksittäiselle materiaalipaksuudelle. Jos mittausdata noudattaa teorian mukaisesti lineaarista painonnousukäyrää, voidaan yksittäisen materiaalipaksuuden veden tunkeutumiskerroin tulkita materiaalia edustavaksi veden tunkeutumiskertoimeksi.

Veden tunkeutumiskertoimen määrittävästä kaavasta (2.20) havaitaan, että veden tunkeutumiskerroin voidaan laskea suoraan, jos tunnetaan vesipatsaan veden tunkeutumissyvyys ja veden tunkeutumiseen kulunut aika. Ideaalitulanteessa veden tunkeutumissyvyys–aika -pareja tulisi olla useita jokaisesta koekappaleesta, jolloin veden tunkeutumiskerroin voitaisiin määrittää näiden pariin muodostamasta pistejoukosta lineaarisen regression avulla. Veden tunkeutumissyvyysmittaaminen on vaikeaa, joten tyydymme yhteen tunkeutumissyvyys–aika -pariin.

Koekappaleen vedellä kyllästymiseen kuluva aika on sama kuin veden koekappaleen läpi tunkeutumiseen kuluva aika. Kuvan 5.18 mukaisesti voimme laskea tämän ajan painonnousukäyrän toisen ja kolmannen regression avulla.



Kuva 5.18: Koekappaleen kyllästymishetken määrittäminen regressioista.

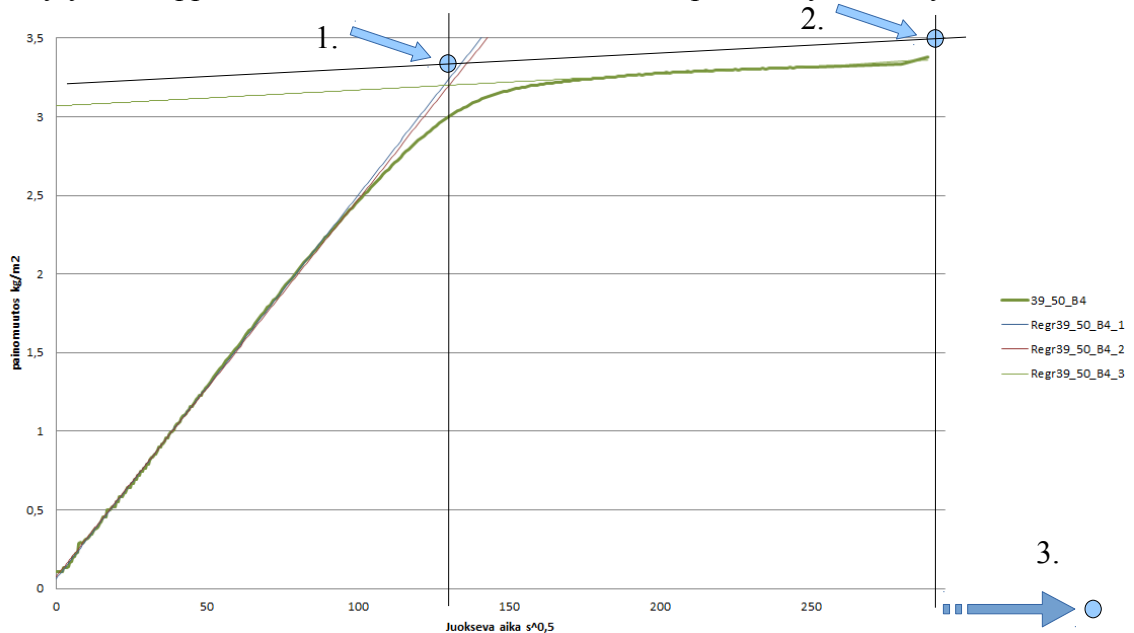
Regressiosuorien leikkauspisteen x-koordinaatti kertoo koekappaleen kyllästymiseen kuluvan ajan. Edellytyksenä on, että mittauksen aloitushetki on määritetty oikein ja painonnousukäyrästä löytyy kaksi lineaarista osuutta kyllästymishetken määrittämiseksi. Veden tunkeutumissyvyys on nyt koekappaleen paksuus, ja veden tunkeutumiskerroin voidaan laskea.

Jos otetaan huomioon kaavan (2.21) yhteys, ja kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus on tiedossa, voidaan painonnousukäyrän avulla laskea myös muita tunkeutumissyvyys–aika -pareja. Tällä tavalla voidaan laskea veden tunkeutumiskerroin, vaikka imun päättymisen jälkeistä lineaarista vaihetta ei painonnousukäyrässä olisi. Kapillaari-

sen kyllästyskosteuspitoisuuden määrittämisessä tehty virhe aiheuttaa systemaattisen virheen painonnousukäyrästä tehtävään tunkeutumissyvyyden laskentaan. Tämän tutkimuksen menetelmällä kapillaarista kyllästyskosteuspitoisuutta ei saada laskettua, jos imun päättymisen jälkeistä lineaarista vaihetta ei ole. Siksi veden tunkeutumiskertoimet laskettiin vain sellaisille koekappaleille, joille kyllästymishetki saatiin määritetyksi.

5.2.6 Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus

Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus saadaan määritettyä koekappaleen kyllästymishetken perusteella (kuva 5.18). Kun koekappaleen tilavuus on tiedossa, tarvitaan kyllästyskosteuspitoisuuden määrittämiseen vain koekappaleeseen imeytyneen vesimäärän paino kyllästymishetkellä. Vesimäärän paino kyllästymishetkellä voidaan laskea veden imeytyksen loppuvaiheen avulla kuvan 5.19 mukaisia pisteitä hyväksi käyttäen.



Kuva 5.19: Kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden määrittämisessä käytettävät painonnousukäyrän pisteet.

Koekappale saavuttaa kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden 1. nuolen osoittamassa pisteessä. Aika on tässä pisteessä kuvan 5.18 mukainen kyllästymishetki eli regressiosuorien leikkauspisteestä saatava ajanhetki.

Koekappaleen paino 1. nuolen osoittamassa pisteessä lasketaan 2. nuolen osoittaman pisteen avulla. Tämä piste on määritetty välittömästi mittauksen päätyttyä. Kyseinen paino on koekappaleen ja kiinteiden suojauksien yhteinen paino välittömästi, kun vesikosketus on katkennut. Käytännössä tämä paino saadaan punnittua vasta vähän myöhemmin, kun koekappale on ensin puhdistettu irtovedestä ja irrotettu kannatintelineestä.

Tästä painolukemasta päästään kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen, kun korjataan saatua painolukemaa 3. regressiosuoran avulla. Tästä johtuen imun päättymisen

jälkeinen lineaarinen osuus tulisi olla riittävän pitkä, muuten koekappaleen loppupainosta ei voida laskea luotettavasti koekappaleen painoa kyllästymishetkellä.

Kyllästymishetkellä kappaleeseen sitoutunut vesimäärä saadaan tietoon, kun kappale kuivataan. Kolmannen nuolen osoittama piste kuvaa uunikuivauksen jälkeistä koekappaleen painoa. Toisen ja kolmannen nuolen välissä koekappaleesta on myös poistettu suojaus, jotka vahingoittuisivat uunikuivauksessa. Suojauksien poistamisen aiheuttama painon muutos huomioidaan, ja lopulta saadaan lasketuksi ensimmäisen ja kolmannen pisteen välissä tapahtunut kosteuden poistumisesta johtuva painon muutos.

Nuolien osoittamat 1. ja 2. piste eivät sijaitse mittausdatasta piirretyllä käyrällä, koska mittausdatassa on nosteen vaikutus mukana. Kun nostemuutosten eliminointi tehdään luvun 5.2.1 mukaisesti, tulee huomioiduksi vain nosteen muuttuminen mittauksen aikana. Alkuperäistä nosteen arvoa ei pystytä määrittämään niin tarkasti, että sitä kannattaisi eliminoida.

5.2.7 Virheen ja luotettavuuden laskenta

Mittaustuloksen virhelaskenta jakaantuu kolmeen osaan. Lisäksi jokaiselle mittasarjasta lasketulle tulokselle voidaan laskea luotettavuusrajat. Virhelaskennan ensimmäisessä vaiheessa lasketaan yksittäisen koetuloksen virhe virheen kasaantumislain avulla (kaava 5.11). Seuraavat kaavat on kirjoitettu veden imeytymiskertoimelle, mutta vastaavat kaavat pätevät myös muille suureille.

$$\begin{aligned}
 A'_{w,i} &= \frac{\Delta m_{w,i}(t)}{\sqrt{t_i}} \\
 A_{kpl,i} &= \frac{\pi d_i^2}{4} \\
 \Rightarrow A_{w,i} &= \frac{4 A'_{w,i}}{\pi d_i^2}
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

$$\Delta A_{w,i} = \sqrt{\left(\frac{\partial A_{w,i}}{\partial A'_{w,i}} \cdot \Delta A'_{w,i} \right)^2 + \left(\frac{\partial A_{w,i}}{\partial d_i} \cdot \Delta d_i \right)^2}$$

Kaavassa $A'_{w,i}$ on koekappaleen (i) painomuutoksesta laskettu veden imeytyminen aika-yksikköä kohti, jossa ei olla huomioitu pinta-alaa (ks. kaava 5.9), $A_{kpl,i}$ vastaavan koekappaleen pinta-ala ja $A_{w,i}$ koekappaleen veden imeytymiskerroin.

Käytetyssä virheen laskentatavassa otetaan huomioon kaikkien laskennan lähtötietoina olleiden suureiden virheet osittaisderivaattojen avulla. Mitattujen suureiden virheinä käytetään joko mittauslaitteen tarkkuutta tai toistokokeiden otoskeskihajontaa. Esimerkiksi halkaisijan mittaus tehdään kolmesta kohtaa, jolloin halkaisijana käytetään näiden mittausten keskiarvoa ja virheenä mittausten otoskeskihajontaa. Kaikki laskennan lähtötiedot ja niiden virhemäärittelyt on lueteltu liitteessä 2.

Toisessa vaiheessa lasketaan mittaussarjan keskiarvo ja ideaalimateriaalin keskiarvon keskivirhe suurimman uskottavuuden (likelihood) -menetelmällä. Menetelmä ei ota

huomioon materiaalin sisäistä hajontaa. Keskiarvon keskivirhe lasketaan kaavalla (5.12).

$$\Delta A_{w, \min} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{1}{(\Delta A_{w,i})^2}}} \quad (5.12)$$

Kaavasta huomataan, että virhe syntyy yksinomaan yksittäisten mittaustulosten virheestä ($A_{w,i}$). Tätä voitaneen pitää keskiarvon keskivirheen alarajana, joka on mittauslaitteista, koekappaleen muodon epäsäännöllisyydestä ja muista fyysisistä tekijöistä seuraava virhe.

Menetelmällä lasketaan myös mittaussarjan keskiarvo (kaava 5.13), joka on mittaustulosten virheillä painotettu keskiarvo.

$$A_w = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{A_{w,i}}{(\Delta A_{w,i})^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{(\Delta A_{w,i})^2}} \quad (5.13)$$

Jos oletetaan kaikkien vaikuttavien suureiden virheet normaalijakaantuneiksi, tällä kaavalla saadaan paras arvio todellisesta keskiarvosta.

Kolmannessa vaiheessa lasketaan materiaaliominaisuuden otoskeskihajonta, joka ei ota huomioon yksittäisten mittaustulosten sisäisiä virheitä. Rakennusfysikaalisissa mittauksissa materiaalin sisäinen hajonta peittää alleen mittauslaitteiden virheet, joten tämä on usein riittävän tarkka lähestymistapa. Otoskeskihajonta lasketaan kaavalla (5.14).

$$\Delta A_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (A_{w,i} - A_w)^2}{N-1}} \quad (5.14)$$

Otoskeskihajonta ei kerro suureen keskiarvon keskivirhettä. Tästä johtuen otetaan käyttöön luottamusväli. Keskiarvon luottamusväli lasketaan t-jakaumaa hyväksi käyttäen. Materiaaliominaisuuksien luontainen hajonta on suurta ja useita rinnakkaisia koekappaleita on usein vaikeata saada tutkimuksiin. Jotta luottamusväli pysyy suuruusluokaltaan mielekkäänä, valitaan tavanomaisen 95 % luottamustason sijaan 90 % luottamustaso. Kaava (5.15) esittää keskiarvon sekä rajat, joiden väliin keskiarvo osuu 90 % todennäköisyydellä.

$$A_w \pm t_{1-\alpha/2}(N-1) \frac{\Delta A_w}{\sqrt{N}} = A_w \pm \Delta A_{w,t,0,90} \quad (5.15)$$

Kaavassa $t_{1-\alpha/2}(N-1)$ on Student-jakauman arvo, jossa $\alpha=0,1$ haettaessa 90 % luottamustasoa.

5.3 Mittaustulokset

Mittaustulokset voidaan jakaa tyypillisesti kolmeen eri kategoriaan:

- ennen mittausta kerätyt tiedot,
- mittauksen aikana ja yhteydessä kerätty tieto sekä
- edellä kerätyistä tiedoista edelleen lasketut tulokset.

Mittauksen aikana kerätään paljon tietoa, jota ei hyödynnetä suoraan tulosten laskennassa. Näistä tiedoista löytyy usein vastauksia tulosten analysoinnissa herääviin kysymyksiin. Kaikki tieto on koostettu excel-pohjaisille mittauslomakkeille, jotka ovat liitteenä.

Tutkimuksen eri vaiheissa tutkimustuloksia on hyödynnetty eri tavoin:

- Sisäänajovaiheen kokeiden ideana oli löytää laitteiston käytön ongelmakohdat.
- Virhelähdekoevaiheessa tehtiin suuri määrä rinnakkaisia kokeita, jotta virhelähteiden vaikutuksia pystyttiin arvioimaan.
- Loppuvaiheessa tehtiin kokeita myös muutamille muille materiaaleille, joiden mittaaminen oli mielenkiintoista paitsi koejärjestelyn niin myös koetulosten vuoksi.

Seuraavissa kohdissa esitellään laskennan lopputulokset, ja lisäksi nostetaan esiin laskennan tuloksiin vaikuttaneita mittauslomakkeen tietoja.

5.3.1 Ensimmäinen koesarja

Ensimmäisen koesarjan mittauslomake kokonaisuutena on esitetty liitteessä 3. Alla käydään läpi mittauslomakkeen kohdat vasemmalta oikealle. Samalla tehdään havaintoja merkinnöistä.

Tasapainotusolosuhteita ei ole tarkistettu, eikä niitä ole sen vuoksi merkitty lomakkeelle joka riville. Tasapainotukset alkoivat kosteuskaapissa suolaliuoksen avulla ja jatkuivat kosteushuoneissa, joiden säätö oli 50 % RH ja 22,5 °C. Kosteushuone kuitenkin hajosi mittauksen aikana, jolloin lämpötila nousi tavoitellusta, mutta suhteellinen kosteus pysyi oikeana. Pääosa koekappaleista on tasapainotettu vasta suojaamisen jälkeen, ja tasapainotilan tilavuuspaino sisältää myös suojausten painon.

Koesarjan materiaalit poikkesivat hyvin paljon toisistaan. Tasapainotusolosuhteiden tilavuuspaino vaihtelee 500–2100 kg/m³ välillä. Suurimmalle osalle tehtiin kolmen koekappaleen mittausarja, mutta materiaaleilta KL ja OTR mitattiin lisäksi kolmen ohuemman koekappaleen mittausarja. Ohuille koekappaleille ei käytetty lainkaan suojauksia, mutta muilla suojauksena oli vaha ja pleksi.

Mittausarja tehtiin veden ylivirtausjärjestelmää käyttäen (ks. luku 4.1.2). Mittauksen aikana mittauskaappien olosuhteita mitattiin. Mittauslomakkeen tuloksista havaitaan, että olosuhteet ovat lähes samat kaikilla mittauskerroilla. Ohuilla koekappaleilla mittaus on tehty ovet avonaisina, josta seuraa mittauskaappien matala suhteellinen kosteus. Kaappien ollessa suljettuna suhteellinen kosteus on luokkaa 95 % RH, ja lämpötila seurailee mittaushuoneen lämpötilaa.

EPS-laastille käytetty kuivauslämpötila oli liian korkea, ja oletettavasti kuivaaminen vaikutti materiaalin rakenteeseen. Tästä johtuen EPS-laastin kuivapainomittaus ja tämän avulla laskettu kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus ovat vain suuntaa-antavia.

Mittauslomakkeelle tuodaan painonnousukäyrän regressioiden laskentapohjasta regressiotiedot. Näiden perusteella lasketaan lopulliset materiaaliominaisuudet. Kaikki painonnousukäyrät mahdollisine kommentteineen on esitetty liitteessä 4. Lisäksi liitteen kuvissa näkyy sekä veden imeytymiskertoimen laskentaan käytetty että veden tunkeutumiskertoimen ja kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden laskentaan käytetty regressiosuora. Ylivirtausjärjestelmän vuoksi painonnousukäyrissä näkyy systemaattista huojuntaa. Laskenta on silti voitu tehdä kaikille koekappaleille. Myös laitteiston sisäänajosta johtuvia mittaajan tai mittauslaitteiston virheitä voidaan löytää.

Lopulliset laskentatulokset löytyvät alta taulukosta 5.1. Taulukkoon on koostettu kunkin materiaalin mittausarjasta saatu materiaaliominaisuus 90 % luottamusvälille. Vastaavat tulokset visuaalisesti esitettynä löytyvät liitteestä 4.

Taulukko 5.1: Ensimmäisen koesarjan laskennan tulokset. KL-ohuet -koekappaleille ei voitu laskea luottamusvälejä, koska hyväksytyjä mittaustuloksia oli vain yksi (ks. liite

Tuote	Veden imeytymiskerroin A_w [kg/m ² s ^{0,5}]	Veden tunkeutumiskerroin B_w [m/s ^{0,5}]	Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus w_{cap} [kg/m ³]
Kiilto 70	0,0053±0,0011	0,0508±0,0127	145,6±16,7
Tasoflex	0,0332±0,0014	0,1493±0,0158	262,7±12,6
Lattialaasti DF	0,0048±0,001	0,0382±0,0000	250,9±10,4
Highflex S2	0,0034±0,001	0,0154±0,0018	294,1±8,9
Kiilto OTR	0,0368±0,0172	0,1790±0,0400	252,3±33,9
Kiilto OTR-ohuet	0,0852±0,0173	0,3039±0,0278	209,8±78,9
Kiilto KL	0,025±0,0012	0,1314±0,0045	215,5±2,5
Kiilto KL-ohuet	0,0277±0,0034	0,1714	189,7
Kiilto Saumalaasti no. 39	0,0182±0,001	0,0834±0,0013	297,9±18,3
EPS-pitoinen laasti, ensimmäinen	0,0016±0,0005	0,0432±0,0075	-
EPS-pitoinen laasti, toinen	0,0029±0,0008	0,0154±0,0025	108,6±7,7
PCM laasti	0,0123±0,0086	0,0759±0,0157	209,2±133,5

4).

Painonnousukäyrien yhteydessä olevista kommentteista voi löytää selityksiä suurille luottamusväleille. Samassa yhteydessä on myös merkinnät hylätyistä painonnousukäyristä.

Esimerkiksi EPS-pitoisen laastin ensimmäinen mittauskerta on epäonnistunut mittauksesta johtuneista syistä. Laskenta on voitu tehdä, mutta painonnousukäyrästä ei löydy yksiselitteistä lineaarista osuutta. Toisen mittauskerran tuloksesta löytyy lineaarinen osuus, mutta painonnousukäyrä ei ole odotetun muotoinen.

OTR -laastilla koekappaleen paksuus on vaikuttanut selkeästi veden imeytymiskertoimeen, mutta syy ei ole mittauksen tunnetuissa virhelähteissä. KL -laastin ohuempien

kappaleiden suurempi vedenimu- ja veden tunkeutumiskerroin voidaan selittää tasapainotuksella, joka on tehty poikkeuksellisesti lyhyen vesikosketuksen jälkeen desorptiossa. Tarkemmin eri virhelähteitä on käsitelty omassa luvussa 5.4.

5.3.2 Tavanomaisen saumalaastin virhelähdekokeet

Tavanomaisen saumalaastin mittauslomake on esitetty kokonaisuutena liitteessä 5. Koekappaleita on yhteensä 87 kappaletta. Koekappaleiden painonnousukäyrät on esitetty liitteessä 6. Alla on nostettu esiin mittauslomakkeesta sellaisia merkintöjä, jotka saattavat vaikuttaa laskentatuloksiin. Tulosten ja etenkin virhelähteiden analysointi on esitetty myöhemmin luvussa 5.4.1.

Tasapainotusolosuhteet kullekin kolmen koekappaleen sarjalle on annettu mittausta edeltävien viiden vuorokauden mitattujen olosuhteiden keskiarvona. Mikäli mittausdataa ei ole syystä tai toisesta ollut käytettävissä, on tästä maininta liitteen 5 lomakkeen huomautuksissa, ja lisäksi tasapainotusolosuhdetiedon perässä on kysymysmerkki. Muutaman koekappaleen osalla huomataan kahden viimeisen tasapainotusolosuhteissa tehdyn punnituksen välillä standardin sallimaa suurempi painon muutos. Tämä on sallittu, koska punnitusten aikaväli on pidempi kuin yksi vuorokausi.

Neliön muotoisille koekappaleille halkaisijan arvot on korostettu, koska ne on laskettu kaavan (4.1) avulla. Hajonta on neliön sivumitan mittausten keskihajonta.

Reunapinnoitukset ja yläpään suojaukset on merkitty lomakkeelle numeroin. Reunasuojauksissa numero 1 vastaa perustapausta eli vahaseoksella suojausta, numero 2 vastaa vaihtoehtoisella eli lattialiimalla suojausta, ja numero 3 vastaa tilannetta, jossa kylki-suojausta ei ole tehty lainkaan. Vastaavasti yläpinnan numero 1 vastaa pleksillä tehtyä onnistunutta suojausta, numero 2 vastaa pleksisuojausta, joka syystä tai toisesta on ennen mittausta osittain irronnut, ja numero 3 vastaa täysin suojaamatonta tapausta. Pleksin ja vahan välinen tartunta on heikko, ja osalla koekappaleista huolimaton käsittely ennen mittausta sai pleksin osittain irtoamaan vahasta, jolloin muodostui perustapausta suurempi ilmanvaihtoreitti pleksin ja koekappaleen väliseen tilaan.

Mittauskaapin ja pöytävaan välisissä punnitustuloksissa on ollut pientä eroa sekä ennen veden imeytystä että veden imeytyksen jälkeen. Mittauslomakkeelle on korostettu yli 0,1 g virheet. Tämä suuruusluokka osoittautui tavanomaisen virheen ylärajaksi. Usein tätä suurempi virhe oli yhdistettävissä mittaushuoneen lämpötilan vaihteluun, joka vääristää vaakojen punnitustuloksia.

Mittaushuoneen olosuhteet on laskettu mittauksen aloitus- ja lopetusajan välisestä mittausdatasta keskiarvona. Huoneen olosuhdemittaus tallennettiin 15 min välein. Kaikille kappaleille tietoa ei ole käytettävissä tallennuslaitteen paristojen loppumisen vuoksi. Ylivirtausjärjestelmällä tehdyissä mittauksissa olosuhdetietoa ei myöskään tarvita, koska haihtumiskorjausta ei tehdä.

Kuivapainomittauksia ei ole tehty niille koekappaleille, joille veden imeytyskoe on tehty uudelleen. Kapillaarista kyllästyskosteuspitoisuutta ei voida laskea näille koekap-

paleille. Poikkeuksena on muutama koekappale, joille on pystytty määrittämään yhteys lopullisen kuivapainomittauksen ja suojausten poistoa edeltävän punnituksen välille. Joidenkin koekappaleiden kuivapainomittauksen ero on yli sallitun 0,1 % arvon. Muutos on sallittu, koska punnitusten aikaväli on ollut pidempi kuin 1 vuorokausi.

Painonnousukäyrän regressioiden laskentapohjaan on virhelähdekokeiden yhteydessä lisätty mittaustulokkeellakin näkyvä virheintegraali. Virheintegraali kuvaa painonnousukäyrän ja siitä tehtyjen lineaaristen regressioiden väliin jäävän alueen pinta-alaa. Virheintegraalin on tarkoitus kuvata materiaalin painonnousukäyrän istumista veden imeytymiskertoimen teoriaan.

Tässä tutkimusosiossa kaikki koekappaleet ovat samaa materiaalia, joten tulokset on esitetty kullekin virhelähdevariaatiolle. Taulukossa 5.2 on esitetty luvun 5.2.7 menetelmällä lasketut sellaisten sarjojen keskiarvot ja luottamusvälit, joiden luvussa 4.5.1 mainituissa virhelähdevariaatioissa ei ole ollut eroa. Taulukossa 5.2 on esitetty myös tavanomaisen saumalaastin mittaustulokset 2. ja 3. mittauskerran jälkeen.

Taulukko 5.2: Tavanomaisen saumalaastin laskennan tuloksia.

Virhelähde-	Veden	Veden	Kapillaarinen
ominaisuus	imeytymiskerroin	tunkeutumiskerroin	kyllästyskosteuspitoisuus
	A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	B_w [m/s ^{0.5}]	w_{cap} [kg/m ²]
Pyöreät perustapaus	0,0233±0,0007	0,097±0,002	263,6±9,1
Pyöreät suojaamaton	0,024±0,0007	0,105±0,003	262,6±9,1
Neliöt perustapaus	0,0271±0,0008	0,115±0,004	274,0±4,9
Neliöt suojaamaton	0,0286±0,0019	0,125±0,006	280,5±7,5
Ylivirtausjärjestelmä	0,0208±0,0014	0,094±0,005	177,9±7,2
2./3. mittauskerta	0,0146±0,0006	0,067±0,017	119,0±37,7
2/3. mittauskerta suojaama	0,0149±0,0018	0,118±0,143	161,0±24,7
Kaikki	0,0205±0,0009	0,094±0,012	239,7±16,7

Yksittäisten koekappaleiden tulokset on esitetty liitteen 5 mittaustulokkeiden lisäksi visuaalisesti liitteessä 6. Liitteen 6 kuvissa on korostettu keskiarvojen laskennassa huomioimatta jätetyt koekappaleet.

Sekä pyöreiden että neliöiden perustapaukset ja suojaamattomat koesarjat ovat olleet sen verran laajoja ja tulokset yhtäläisiä, että luottamusvälit ovat jo hyvin pieniä. Ylivirtausjärjestelmällä mitattujen koekappaleiden tuloksissa luottamusväli kasvaa, ja tulokset poikkeavat edellisistä hyvin paljon. Tässä vaiheessa ylivirtausjärjestelmän luotettavuus oli laitteiston likaantumisen vuoksi huono, kuten voidaan havaita liitteen 6 painonnousukäyrästä.

Toisen ja kolmannen mittauskerran tulokset eivät sinällään ole vertailukelpoisia muihin tuloksiin, mutta osoittavat jälkihoidon vaikutuksen tuloksiin. Saumalaasti vastustaa veden imeytymistä selkeästi enemmän ensimmäisen veden imeytyksen jälkeen.

5.3.3 Modifioidun saumalaastin virhelähdekokeet

Modifioidun saumalaastin mittauslomake on esitetty kokonaisuutena liitteessä 7. Koekappaleita on yhteensä 39. Mittauslomake on vastaava kuin tavanomaisella saumalaastilla. Tämän vuoksi kaikkia mittauslomakkeeseen liittyviä huomioita ei ole käsitelty tässä kohdassa yhtä tarkasti kuin tavanomaisen saumalaastin kohdalla. Tulosten ja etenkin virhelähteiden analysointi on esitetty myöhemmin luvussa 5.4.2.

Ennen liitteen 7 mittauslomakkeella näkyviä tasapainotuspunnituksia koekappaleet on hiottu sekä ylä- että alapinnoiltaan käyttäen timanttilaikkaa luvussa 4.3.2 esitetyllä laitteella. Lomakkeelle kirjatut tasapainotusolosuhteet on ilmoitettu mittauksen aloitusta edeltävän viiden vuorokauden olosuhdehuoneissa mitattujen olosuhteiden keskiarvona. Tasapainotusolosuhteiden vaihtelu ja keskiarvo ovat kaikilla koekappaleilla olleet standardin SFS-EN ISO 15148 (2002) vaatimusten mukaiset.

Kappaleen 50-200 pinta-ala on poikkeava, koska kappaleesta lohkesi ohennuksen yhteydessä jänteeltään noin 44 mm segmentti. Segmentin ala on poistettu pinta-alasta. Muilta osin koekappaleet jakaantuvat kahteen pinta-alavariaatioon. Toisella mittauskeralla tasapainotuksen jälkeen laskettu tilavuuspaino vääristyy, koska koekappaleisiin jäi suojuuksia ensimmäiseltä mittauskerralta.

Reunapinnoitevariaation 2 eli lattialiimalla kyljistään suojatuttujen koekappaleiden suojaus on tehty kahdessa vaiheessa. Näille kappaleille liiman levityksen jälkeinen paino on ilmoitettu ”Paino suojuuksen jälkeen” -sarakkeessa ja lopullinen, pleksin kiinnityksen jälkeinen paino ”Koekappale” -sarakkeessa ”Paino ennen mittausta” kohdan alla.

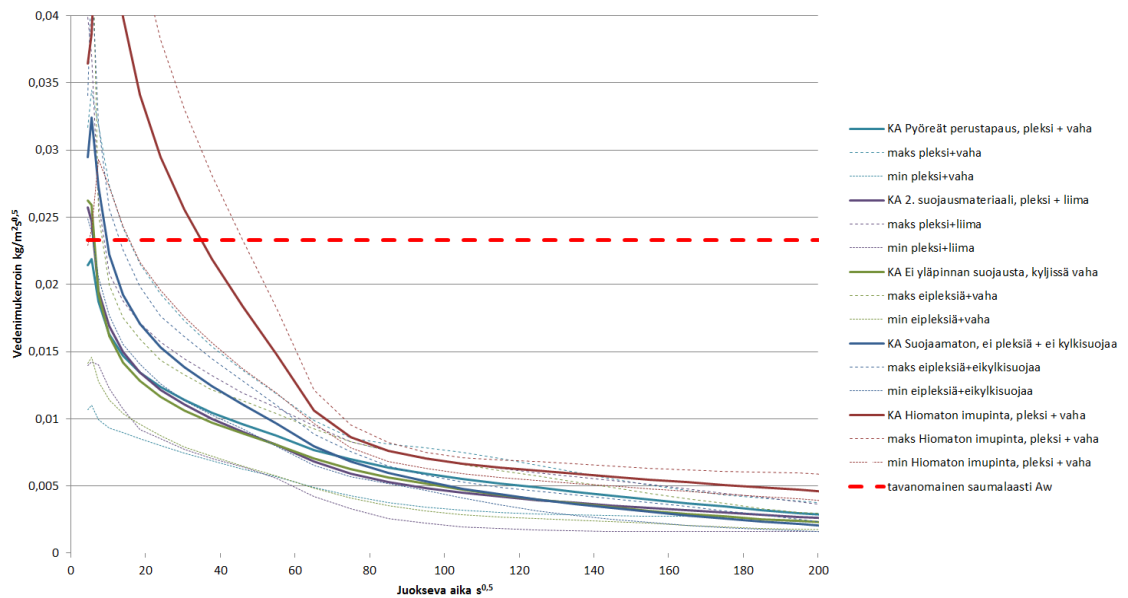
Mittausohjelman vaakojen ja pöytävaan välistä punnitustulosta vertaavista sarakkeista huomataan ajoittain merkittävä virhe sekä ennen mittausta että mittauksen jälkeen mittauskaapin 1 osalta. Selkeää syytä tälle ei ole löytynyt, saman suuruusluokan virhe on sekä mittauksen alussa että lopussa, eikä virhe poistunut, vaikka punnitus toistettiin uudelleen molemmilla vaaioilla.

Modifioidun saumalaastin mittaukset ovat ajoittuneet syksyyn, mikä näkyy mittaushuoneen olosuhteista. Suhteellinen kosteus on kaikilla sarjoilla melko alhainen. Myös lämpötila on joillain mittauskerroilla ollut kohtalaisen alhainen, vain 17°C. Mittausasttiasta mitatut veden lämpötilat ovat olleet poikkeuksellisen alhaisia vain kolmella mittauskerralla, jotka on korostettu mittauslomakkeen ”keskimääräinen veden lämpötila” -sarakkeeseen.

Mittauksen huomautuksista havaitaan jokseenkin usein toistunutta ongelmaa; monella koekappaleella vahaus on särkynyt tai irronnut kannattimien kiinnityksen yhteydessä. Tämä aiheuttaa epäluotettavuutta myös kuivapainomittauksen yhteydessä laskettuihin asennettujen ja poistettujen suojausten painoihin; osa suojausten painosta on saattanut jäädä ottamatta huomioon, kun suojuuksia on korjattu pikaisesti mittauksen aloituksen yhteydessä.

Kaikille koekappaleille ei ole tehty uunikuivausta ja punnituksia. Osa on mitattu toiseen kertaan, ja osalla kuivapainomittaus on jätetty tekemättä, koska kapillaarista kylästyskosteuspitoisuutta ei kuitenkaan olisi saatu määritettyä.

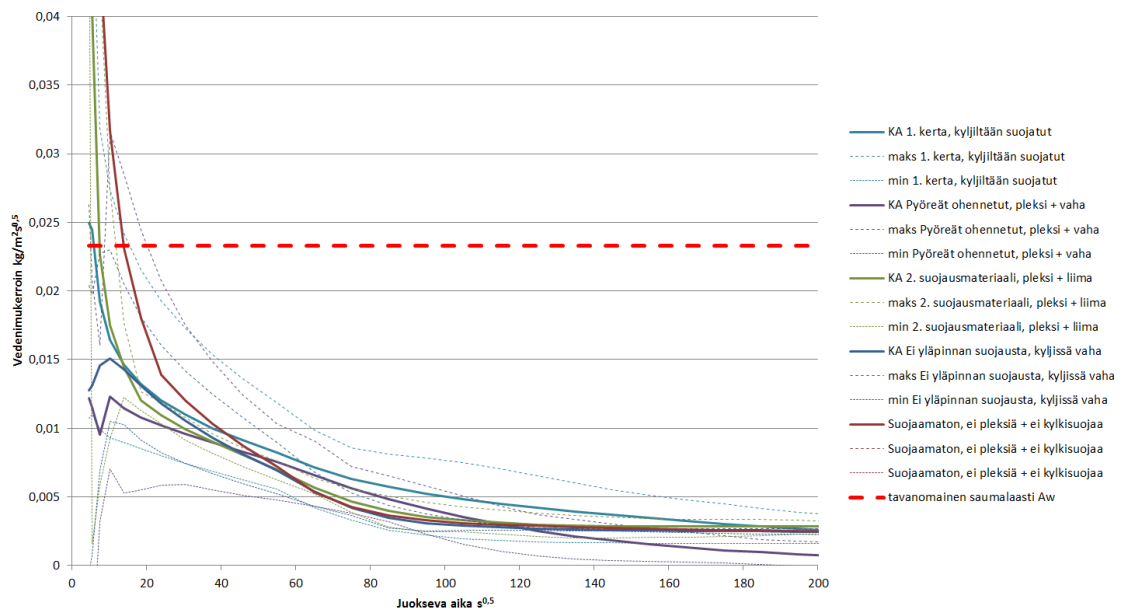
Modifioidun saumalaastin painonnousukäyrät eivät noudata teoriaa, jonka mukaan veden imeytymiskerroin lasketaan. Siksi painonnousukäyrien avulla on laskettu luvun 5.2.4 mukaiset ajan suhteen muuttuvat veden imeytymiskertoimet. Kuvassa 5.20 on kooste ensimmäisen imeytyskerran tuloksista. Kunkin sarjan kaikki käyrät, hylätyt mukaan lukien, löytyvät liitteestä 8. Vertailtavuuden vuoksi tavanomaisen saumalaastin perustapauksen vakio veden imeytymiskerroin on piirretty kaavioon.



Kuva 5.20: Modifioidun saumalaastin ensimmäisen veden imeytyskerran tuloksien kooste.

Veden imeytymiskertoimet yhtenäistyvät noin $300 \text{ s}^{0.5}$ kohdalla tasolle $0,0025 \text{ kg/m}^2\text{s}^{0.5}$, ja lähestyvät tämän jälkeen asymptoottisesti nollaa. Useimpien koekappaleiden yläpinnalla ei havaittu silmin nähtävää kosteutta, vaikka imeytysajat olivat useita viikkoja. Ei ole varmuutta, johtuiko asymptoottinen nollan lähestyminen kappaleen kyllästymisestä.

Vastaava kooste 2. mittauskerran tuloksista sekä 1. mittauskerran kyljistään suojattujen kolmen virhelähdevariaation yhteinen keskiarvokäyrä on esitetty kuvassa 5.21.



Kuva 5.21: Modifioidun saumalaastin toisen veden imeytyskerran tuloksien kooste.

Ohennettujen koekappaleiden veden imeytyminen jää muita hitaammaksi noin 150 s^{0,5} jälkeen. Tämä on seurausta kapillaarisesta kyllästymisestä. Muilla toiseen kertaan mitatuilla virhelähdevariaatioilla veden imeytymiskerroin vakiintuu jo 100 s^{0,5} kohdalla, ja pysyy tällä tasolla ainakin 400 s^{0,5} asti. Alkuvaiheen veden imeytymiskerroin on samaa luokkaa kaikilla virhelähdevariaatioilla, mukaan lukien myös ensimmäisen mittauskerran eri tavoin kyljiltään suojattujen virhelähdevariaatioiden keskiarvo.

5.3.4 Muut tutkitut materiaalit

Muita materiaaleja tutkittiin sekä virhelähdekokeiden yhteydessä että niiden jälkeen. Liitteessä 9 esitetty mittauslomake on samanlainen kuin edellä esitellyissä sarjoissa. Mittaustulokset on saatu vastaavasti, eikä lomaketta käydä nyt kaikkien tulosten osalta läpi.

Joidenkin koekappaleiden mittausdatan käsittely ja laskenta on tehty vanhaa, toisen kehitysvaiheen laskentapohjaa käyttäen. Suurin osa on laskettu kolmannen kehitysvaiheen haihtumiskorjauksen avulla. Käytetystä laskentapohjasta on merkintä ”Missä mennään” -sarakkeessa.

Betonisista koekappaleista kuusi on valmistettu purettavan rakennuksen julkisivusta otetuista näytelieriöistä. Kolmesta näytelieriöstä on leikattu sekä valkoista pesubetonipintaa että värjäämätöntä taustabetonia edustavat koekappaleet. Pesubetonipintoja ei ole hiottu mittaukseen. Vesi on imeytetty muokkaamattomaan julkisivupintaan.

Painonnousukäyristä tehdyn laskennan tulokset on esitetty taulukossa 5.3. Ainoastaan veden imeytymiskerroin on saatu määritettyä kaikista mittauskerroista. Muiden

suureiden määrittäminen vaatii selkeän imun päättymisvaiheen näkymistä painonnousukäyrässä.

Taulukko 5.3: Laskennan tuloksia, muut tutkitut materiaalit.

Materiaali	Veden imeytymiskerroin	Veden tunkeutumiskerroin	Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus
ja halkaisija / koekappale	A_w [kg/m ² s ^{0,5}]	B_w [m/s ^{0,5}]	w_{cap} [kg/m ³]
Julkisivurappauslaasti 55_1-3	0,0021±0,0005	-	-
Julkisivurappauslaasti 100_1-3	0,0008±0,0002	0,0077±0,0013	-
Julkisivurappauslaasti 185_1-3	0,0016±0,0001	0,0053±0,0004	-
Julkisivurappauslaasti 185_4-6	0,0012±0,0005	-	-
Betoni C32/40 185	0,0062±0,0045	0,10±0,03	135±4
Betoni C20/25 185	0,0138±0,0016	0,14±0,01	110±5
Betoni C20/25 50_21-23	0,0139±0,0020	0,14±0,01	137±110
Betoni C20/25 50_11-13	0,0135±0,0125	0,15±0,04	118±13
Taustabetoni 75	0,0045±0,0044	0,10±0,03	139±82
Valkoista pestyä betonia 75	0,0080±0,0241	0,27±0,04	-
Kevytsojarahkko 185	0,0481±0,0158	1,34±0,23	198±12
Kevytbetoni 185	0,0370±0,0040	0,20±0,04	-

Tulosten pohjana olevat painonnousukäyrät on esitetty kommentteineen liitteessä 10. Vaikka varsinaisia virhelähdekokeita ei näillä materiaaleilla tehty, on luvussa 5.4.3 esitetty syitä samalle materiaalille tehtyjen kokeiden mittauskertojen välisille eroille.

5.4 Tulosten analysointi

Ensimmäisen koesarjan tuloksia ei ole analysoitu erikseen. Painonnousukäyrät on käyty läpi ja kommentoitu liitteessä 4. Virhelähdekokeet, jotka tehtiin sekä tavanomaisella että modifioidulla saumalaastilla, on käyty läpi seuraavissa kohdissa. Virhelähteistä on analysoitu sekä tarkoituksella luotuja virhelähteitä että muiden mitattujen suureiden vaikutuksia tuloksiin.

Tulosten vertailu suhteessa muihin muuttujiin kuin tutkittuihin virhelähteisiin lisää varsinaisten virhelähteiden analyysien luotettavuutta. Sellaiset odotusten mukaiset muuttujien ja tulosten väliset riippuvuudet osoittavat, että virhelähdekokeiden tuloksista voidaan löytää suuresta tulosten hajonnasta huolimatta mitattujen suureiden välisiä riippuvuussuhteita.

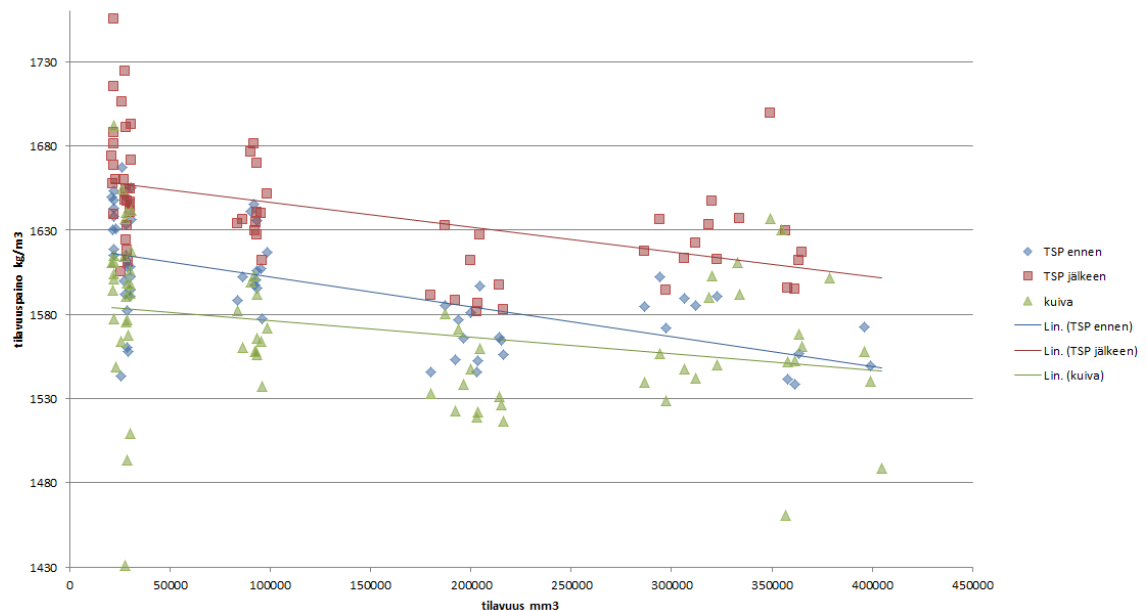
Virhelähteiden variaatioissa varioitiin standardin SFS-EN ISO 15148 (2002) asettamia vaatimuksia. Seuraavissa alakohdissa viittaukset standardiin viittaavat tähän veden imeytymiskertoimen määrittämistä yleisesti ohjaavaan standardiin.

5.4.1 Tavanomaisen saumalaastin virhelähdekokeet

Tavanomaisen saumalaastin virhelähdekokeita tehtäessä vakio-olosuhdehuone hajosi, josta seurasi hajontaa tasapainotusolosuhteisiin. Korrelaatiota koekappaleen tasapaino-

tusolosuhteiden tilavuuspainon ja olosuhdehuoneiden keskimääräisen lämpötilan tai suhteellisen kosteuden väliltä ei löytynyt.

Koekappaleiden tasapainotusolosuhteiden tilavuuspainot ennen koetta ja kokeen jälkeen sekä unikuivattuna määritettiin mahdollisimman tarkasti. Tilavuuspainot on esitetty koekappaleiden tilavuuden funktiona kuvassa 5.22. Tasapainokosteuskäyrän hystereesi on helppo havaita kuvasta: kokeen jälkeinen tasapainotilan tilavuuspaino oli järjestelmällisesti koetta edeltävää tasapainotilan tilavuuspainoa suurempi. Ero kuivatilavuuspainon ja koetta edeltävän tasapainotilan tilavuuspainon välillä oli samaa suuruusluokkaa hystereesin aiheuttaman tasapainotilan tilavuuspainoeron kanssa.



Kuva 5.22: Tavanomaisesta saumalaastista valmistetun koekappaleen tilavuuden ja tilavuuspainon riippuvuus.

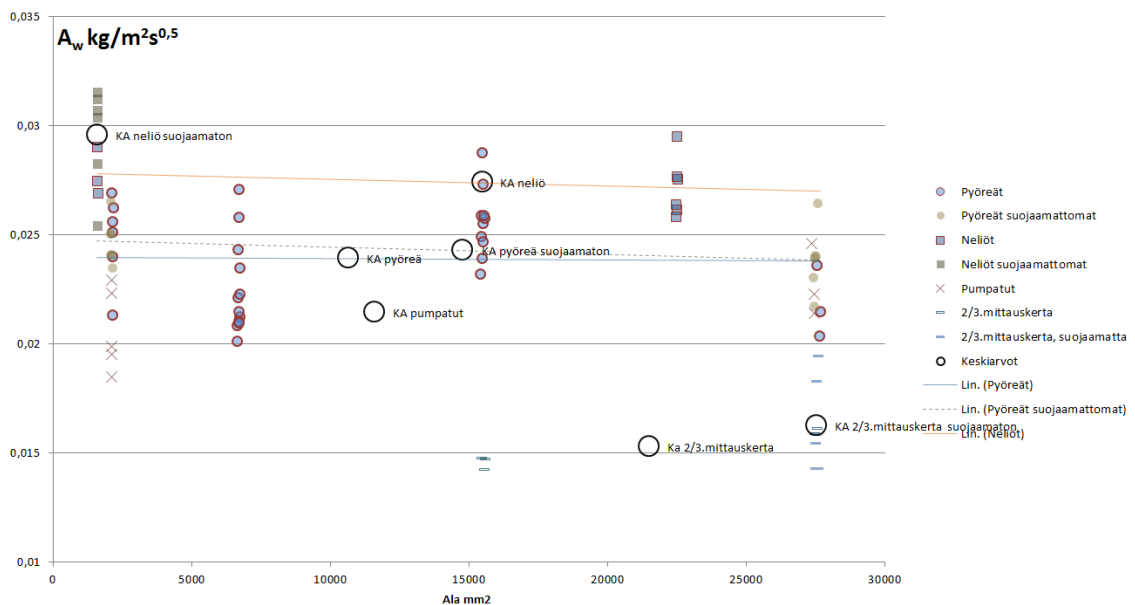
Kuvan 5.22 trendiviivoista voidaan havaita, että koekappaleiden tilavuuspaino on pienentynyt tilavuuden kasvaessa. Ero on seurausta pinta-alan ja tilavuuspainon riippuvuudesta. Paksuudessa riippuvuus on pienempää mutta päinvastaiseen suuntaan; koekappaleiden tilavuuspaino kasvaa paksuuden mukana. Riippuvuudet ovat havaittavissa, mutta lähes merkityksettömiä; tilavuuspainon keskihajonta koko otoksesta on vain alle 3 % koko otoksen keskiarvon suuruudesta.

Veden imeytymiskerroin

Tässä kohdassa on lyhyesti käyty läpi kaikki mitatut suureet tarkastelemalla niiden vaikutusta veden imeytymiskertoimen suuruuteen. Riippuvuudet on tarkistettu kullekin neljälle virhelähdevariaatiolle oman sarjan sisällä. Virhelähdevariaatiot (ks. luku 4.5.1) on nimetty kuten liitteessä 6: pyöreät perustapaus, pyöreät suojaamaton, neliöt perustapaus ja neliöt suojaamaton. Lisäksi erillisenä virhelähdevariaationa käsitellään sekä ylivirtausjärjestelmällä mitatut (pumpatut) että toiseen ja kolmanteen kertaan mitatut koe-

kappaleet. Ylivirtausjärjestelmällä mitatut koekappaleet oli suojattu samalla tavalla, kuin pyöreät perustapauksen.

Pinta-alan vaikutus veden imeytymiseen ja veden imeytymiskertoimeen voitiin tarkastaa luotettavasti kolmella virhelähdevariaatiolla. Kuvassa 5.23 nähdään trendiviivat virhelähdevariaatioille, joilla pinta-alan hajonta oli riittävän suurta johtopäätösten tekemiselle. Nämä virhelähdevariaatiot ovat neliön muotoiset suojatut sekä pyöreät suojatut ja suojaamattomat koekappaleet. Trendiviivoista huomataan, ettei pinta-alariippuvuus ole merkityksellistä. Hajonta on merkittävästi suurempaa yksittäisen pinta-alarajan sisällä kuin eri pinta-alojen välillä.



Kuva 5.23: Pinta-alan ja veden imeytymiskertoimen riippuvuus tavanomaisella saumalaastilla.

Kuvasta 5.23 havaitaan myös, että neliön muotoisilla koekappaleilla veden imeytymiskertoimet ovat systemaattisesti suuremmat kuin pyöreillä. Tämä ero näkyy sekä suojaetuilla että suojaamattomilla koekappaleilla.

Suojaustavan vaikutus voidaan havaita kuvan 5.23 veden imeytymiskertoimien keskiarvoja tarkastellen. Pyöreillä koekappaleilla suojaustapa ei vaikuta keskiarvoon juuri lainkaan. Neliön muotoisilla suojaamattomien koekappaleiden veden imeytymiskertoimen keskiarvo puolestaan on selkeästi suurempi kuin suojattujen koekappaleiden veden imeytymiskertoimen keskiarvo. Suojaamattomien neliöiden virhelähdevariaation tulokset eivät ole yhtä luotettavia kuin muut, koska kaikki tutkitut koekappaleet ovat olleet pieniä. Suojaustavan vaikutuksen tarkempaa tutkimista varten täytyisi vertailla eri virhelähdevariaatioiden välisiä painonnousukäyriä.

Tasapainotusolosuhteiden suhteellisen kosteuden ja veden imeytymiskertoimen riippuvuus ei ole systemaattista eri virhelähdevariaatioiden välillä. Koekappaleiden kosteuspitoisuus 50 % RH tasapainotusolosuhteessa on matala. Kun suhteellisen kosteuden

vaihtelu tasapainotuksessa oli pientä, jää vaikutus koekappaleen kosteuspitoisuuden pieneksi. Luotettavaa riippuvuussuhdetta tasapainotusolosuhteen ja veden imeytymiskertoimen välille ei voi johtaa näin pienellä tasapainotusolosuhteiden hajonnalla.

Pyöreiden koekappaleiden perussarjalla tasapainotuksen lämpötilan hajonta oli standardin sallimaa suurempi. Tästä johtuen lämpötilan hajonta on riittävää riippuvuuden tutkimiseen. Lämpötilan nouseminen vaikuttaa veden imeytymiskertoimeen alentavasti. Vastaava riippuvuus voidaan havaita myös mittausvesiastian keskimääräisen veden lämpötilan sekä mittaushuoneen keskimääräisen lämpötilan ja veden imeytymiskertoimen väliltä. Myös mittaushuoneen ilman vesihöyrypitoisuudella on jonkinasteista epäsystemaattista vaikutusta veden imeytymiskertoimen suuruuteen eri virhelähdevariaatioissa.

Koekappaleen korkeuden ja veden imeytymiskertoimen riippuvuus on eri virhelähdevariaatioiden välillä epäjohdonmukainen. Riippuvuus ei myöskään ole kovin merkittävää. Koekappaleiden korkeudet vaihtelivat välillä 11–15 mm, joten vaihtelu on liian pientä johtopäätösten tekemiseen.

Koekappaleiden upotussyvyys pienenee jonkin verran kokeen aikana johtuen veden haihtumisesta ja koekappaleen itsensä imemän vesimäärän poistumisesta mittausvesiastian. Upotussyvyyden aloitusarvo on merkitty mittauslomakkeelle, ja tämän aloitusarvon ja veden imeytymiskertoimen riippuvuus tarkastettiin. Korrelaatiota upotussyvyyden ja veden imeytymiskertoimen välillä ei ole. Upotussyvyyden vaihteluväli oli 0–3 mm ja keskiarvo luokkaa 1 mm. Suurimmalla osalla koekappaleista upotussyvyys oli välillä 0,5–1,5 mm.

Imupinnalle jää kokeen alkaessa usein ilmakehä, joiden määrä merkittiin ylös käyttäen kuplamääräindeksiä (ks. luku 4.5). Kuplamääräindeksin ja veden imeytymiskertoimen väliltä ei löytynyt riippuvuutta.

Veden imeytymiskertoimien hajonta on yleisesti hivenen pienempää yksittäisen mittauskerran sisällä kuin koko tutkittujen koekappaleiden joukossa. Erityisesti tämä on havaittavissa ylivirtausjärjestelmällä tehdyissä kokeissa. Syy on ylivirtauksen aiheuttaman virheen vaihtelu, joka on todennäköisesti sama mittauskerran kaikille kolmelle koekappaleelle. Muilla virhelähdevariaatioilla vaihtelu on pienempää satunnaista vaihtelua.

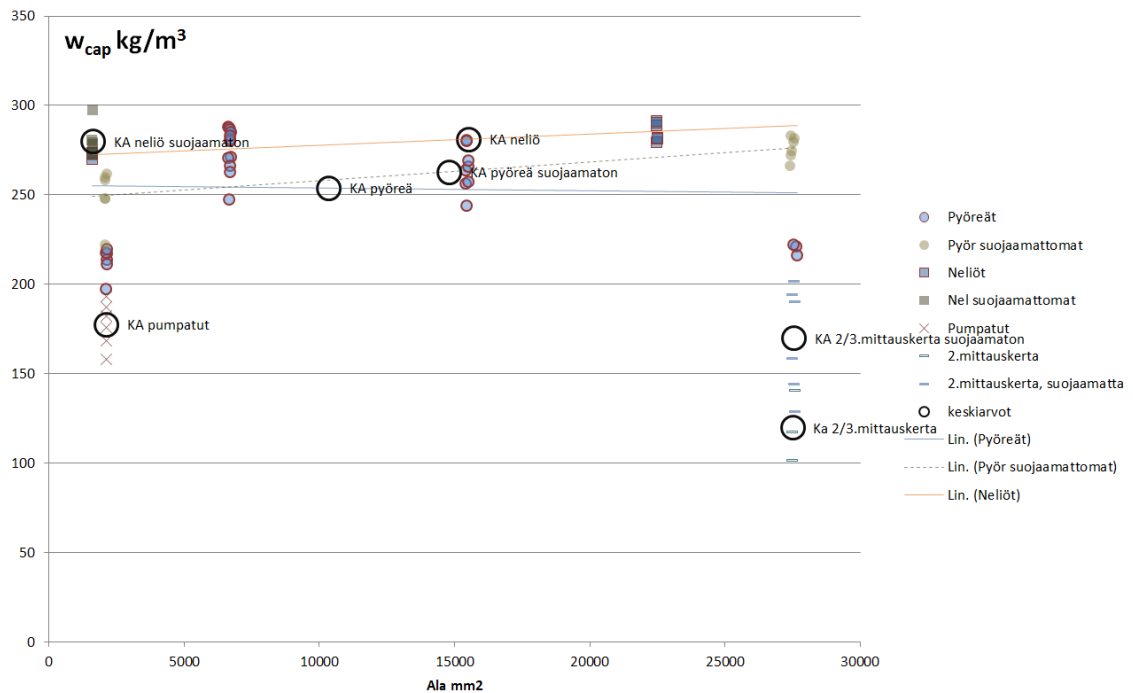
Toisen ja kolmannen mittauskerran tuloksista ei voida tehdä monipuolisia johtopäätöksiä lyhyiden koesarjojen vuoksi. On kuitenkin selvää, että veden imeytymiskerroin pienenee useimmilla koekappaleilla ensimmäisen ja toisen mittauskerran välillä. Poikkeavalla koekappaleiden 185_4, -5 ja -6 mittasarjalla veden imeytymiskerroin pienenee vasta kolmannella mittauskerralla.

Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus

Tässä kohdassa on käyty läpi lyhyesti kaikki mitatut suureet tarkastelemalla niiden vaikutusta kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden suuruuteen. Riippuvuudet on tarkastettu samaan tapaan kuin veden imeytymiskertoimelle edellisessä kohdassa.

Pinta-alan ja kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden riippuvuus nähdään kuvasta 5.24. Havaitaan, että pyöreiden perussarjalla pinta-alan kasvu pienentää kapillaarista

kyllästyskosteuspitoisuutta, jos jätetään huomiotta kaikista pienimmän pinta-alan mitaustulokset. Muilla virhelähdevariaatioilla on vain kahden kokoisia koekappaleita. Näillä riippuvuutta ei ole havaittavissa. Virhelähdevariaatiot ovat samat kuin edellisessä kohdassa; kapillaariset kyllästyskosteuspitoisuudet on määritetty samoille koekappaleille samoista mittaustuloksista kuin veden imeytymiskertoimet edellisessä kohdassa.



Kuva 5.24: Pinta-alan ja kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden riippuvuus tavanomaisella saumalaastilla.

Kuten veden imeytymiskertoimen osalla huomattiin, neliön muotoiset koekappaleet vettyvät nopeammin kuin pyöreät. Nyt voidaan kuvasta 5.24 huomata, että myös neliön muotoisten kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus on suurempi. Sekä suojaattujen että suojaamattomien sarjojen osalla pyöreiden ja neliön muotoisten välinen ero on yli 10 %, jos verrataan samanpinta-alaisia ja -muotoisia kappaleita. Vastaavasti nähdään, että suojaamattomien koekappaleiden kyllästyskosteuspitoisuus on suurempi kuin vastaavan kokoisten ja -muotoisten suojaattujen.

Pyöreiden perussarjan kohdalla tasapainotusolosuhteiden seuranta on ollut puutteellista. Tasapainotusolosuhteiden vaikutus kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen on arvioitu vain niiltä koekappaleilta, joille tasapainotusolosuhteet on mitattu. Ainoastaan pyöreät ja pyöreät suojaamattomat -sarjojen sisällä olosuhteiden hajontaa on riittävästi. Näillä sarjoilla riippuvuudet ovat päinvastaiset, joten johtopäätöksiä ei voi tehdä. Tasapainotusolosuhteiden ja kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden väliltä merkittävää riippuvuutta ei löydy.

Suuri pinta-alariippuvuus heikentää muiden tulosten tulkintaa kuvaa 5.24 vastaavista kuvaajista, joissa x-akselille vaihdetaan jokin toinen suure. Seuraavissa kohdissa riippu-

vuustarkastelut on siksi tehty sekä koko mittaustulosjoukolla että sellaiselle joukolle, josta alle 5000 mm² pinta-alaiset koekappaleet on jätetty pois.

Korkeuden vaikutus kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen osoittaa pientä riippuvuutta, mutta riippuvuus on osin seurausta pinta-alan ja korkeuden välisestä korrelaatiosta. Korkeuden vaihteluväli on joka tapauksessa suhteellisen pieni. Vastaavat riippuvuudet nähdään, vaikka jätetään huomiotta kaikki alle 5000 mm² pinta-alaiset koekappaleet.

Koekappaleen tilavuuspainon vaikutus kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen voidaan havaita, mutta tulokset ovat ristiriitaiset. Suojatuilla pyöreillä koekappaleilla suurempi tilavuuspaino johtaa suurempaan kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen, suojaamattomilla pyöreillä vaikutusta ei ole, ja suojatuilla neliöillä riippuvuus on lähes yhtä suuri kuin suojatuilla pyöreillä, mutta vastakkaiseen suuntaan. Pinta-alarajaus ei tuo merkittävää muutosta.

Sekä pinta-alarajatulle että rajaamattomalle sarjalle tehdyllä tarkastelulla huomataan upotussyvyyden selkeä vaikutus kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen. Suurempi upotussyvyys nostaa kyllästyskosteuspitoisuuden arvoa kaikilla neljällä mittaustapavariaatiolla. Imupinnalle jääneiden kuplien määrä sen sijaan ei juurikaan vaikuta kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen.

Imeytetyn veden lämpötila vaikuttaa merkittävästi kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen. Pinta-alarajauksesta riippumatta kyllästyskosteuspitoisuus kasvaa keskimääräisen veden lämpötilan kasvaessa. Suojatuille koesarjoille riippuvuus on luokkaa 10 kg/m³ /K ja suojaamattomille noin viidesosa tästä. Veden lämpötila on vaihdellut välillä 20–24 °C.

Mittaushuoneen suhteellinen kosteus mittauksen aikana näyttäisi vaikuttavan etenkin pyöreiden suojattujen sarjalla. Pinta-alarajatulla tapauksella muiden mittaustapavariaatioiden riippuvuudet katoavat tai kääntyvät toisen suuntaiseksi.

Veden imeytymiskertoimen ja kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden välinen riippuvuus on hyvin erisuuri pinta-alarajatulle verrattuna koko otantaan. Riippuvuus on hajontoihin verrattuna pientä.

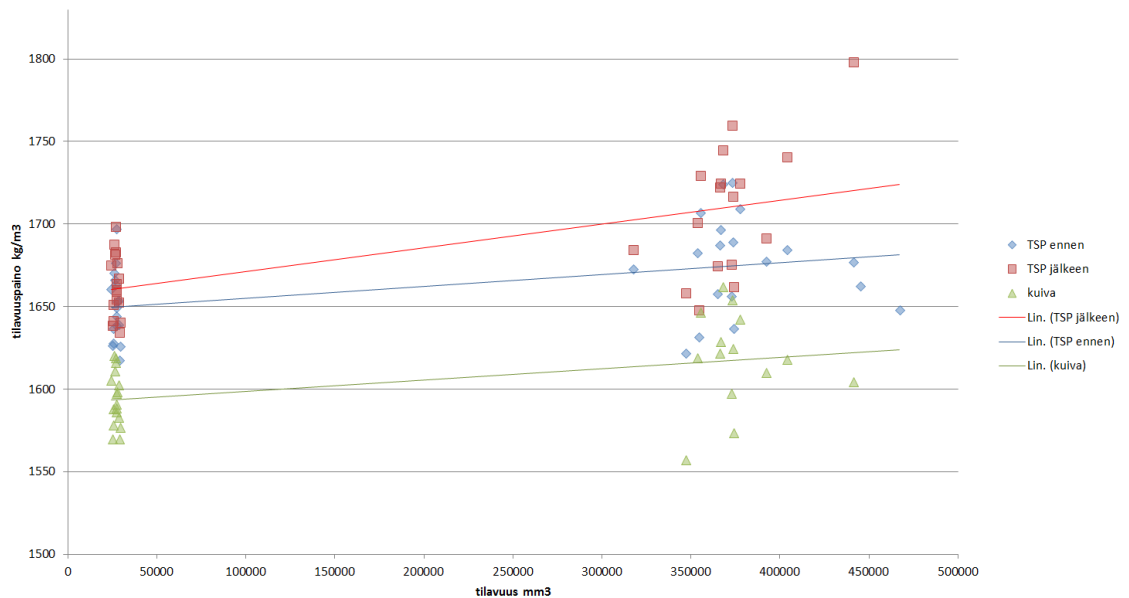
Ylivirtausjärjestelmällä mitatuista tuloksista saatiin määritettyä kapillaarista kyllästyskosteuspitoisuutta vain pienillä koekappaleilla. Pienillä koekappaleilla havaitaan matalat kyllästyskosteuspitoisuudet, jotka mukailevat veden imeytymiskertoimien osalla havaittua pienemmän veden imeytymisen trendiä. Näiden koekappaleiden suojaus oli sama, kuin pyöreät perustapauksen.

Vastaava trendi veden imeytymiskertoimen ja kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden riippuvuudesta nähdään toisen ja kolmannen mittauskerran tuloksilla. Koekappaleet ovat imeneet vettä sekä hitaammin että myös selvästi vähemmän toisella ja kolmannella mittauskerralla kuin ensimmäisellä mittauskerralla.

5.4.2 Modifioidun saumalaastin virhelähdekokeet

Modifioidulle saumalaastille ei voitu tehdä yhtä kattavia virhelähdeanalyyssejä kuin tavanomaiselle, koska yksikäsitteistä veden imeytymiskerrointa ei saatu määritetyksi. Veden tunkeutumiskerroin ja kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus jäivät kokonaan määrittämättä, koska vesirintama saavutti koekappaleen yläpinnan vain muutamalla koekappaleella.

Modifioidulla saumalaastilla useimmat koekappaleet eivät saavuttaneet kapillaarista kyllästyskosteuspitoisuutta. Kokeen jälkeen koetta edeltäviin tasapainotusolosuhteisiin kuivuneista koekappaleista mitatut tilavuuspainot ovat kohtalaisen lähellä koetta edeltävää tasapainotilan tilavuuspainoa. Kuvassa 5.25 on esitetty koekappaleiden tilavuuspainot tilavuuden funktiona. Tilavuuspainon skaalaus on sama kuin kuvassa 5.22.



Kuva 5.25: Modifioidusta saumalaastista valmistettujen koekappaleiden tilavuuden ja tilavuuspainon riippuvuus.

Modifioidun saumalaastin tilavuuspaino on vähän suurempi kuin tavanomaisen saumalaastin. Merkittävämpi ero huomataan tilavuuspainon tilavuusriippuvuudessa. Riippuvuus on suuruusluokaltaan sama kuin tavanomaisella saumalaastilla mutta päinvastaiseen suuntaan.

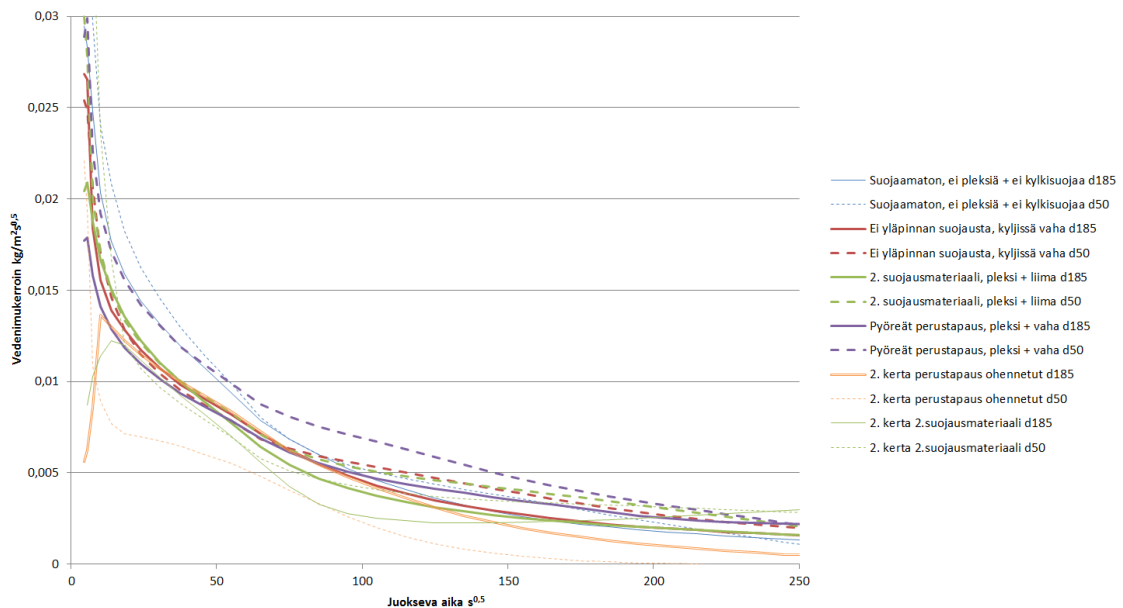
Ajan suhteen muuttuva veden imeytymiskerroin

Tässä kohdassa on käyty läpi virhelähdevariaatioiden vaikutus ajan suhteen muuttuvaan veden imeytymiskertoimeen. Riippuvuuden arviointi on tehty kuvan 5.21 mukaisia keskiarvokäyriä vertailemalla. Virhelähdevariaatiot (ks. luku 4.5.2) on nimetty kuten liitteessä 8: pyöreät perustapaus, 2. suojausmateriaali, ei yläpinnan suojausta, suojaamaton ja hiematon imupinta. Toisen mittauskerran tulokset on jaettu vastaaviin alaryhmiin.

Toisen mittauskerran virhelähdevariaatio on ollut kullekin koekappaleelle sama kuin ensimmäisellä mittauskerralla.

Modifioidun saumalaastin veden imeytymiskerroin pienenee ajan kuluessa. Veden imeytymiskerroin muuttuu pieneksi verrattuna haihtumisen nostekorjauksen aiheuttamaan virheeseen ajanhetken $250 \text{ s}^{0,5}$ jälkeen. Tästä johtuen johtopäätökset on tehty pääosin tätä aiempien ajanhetkien perusteella. Näin pitkä ajanjakso on usein vähintään riittävä kuvaamaan materiaalin vesikosketusta. Kysymys on yli 17 h pituisesta veden imeytysajasta, ja materiaalin vedenimu on tässä kohtaa jo hyvin hidasta. Liitteessä 8 on esitetty yksittäisen mittauskerran painonnousukäyrä, josta havaitaan haihtumisen nostekorjauksen suhteellisen osuuden suuri kasvu. Kyseisen mittauskerran mittauksia on jatkettu käsin mittauksena. Painonnousun trendi ei muutu, joten haihtumiskorjaus on tehty oikein.

Pinta-alan vaikutus on arvioitu kuvassa 5.26 nähtävien virhelähdevariaatioiden keskiarvokäyrien avulla. Keskiarvokäyrissä ei ole otettu huomioon liitteessä 8 yksilöityjä epäluotettavia mittauksituloksia. Mittauksen alkuvaiheessa eri suuruisten koekappaleiden keskiarvokäyrissä on eroa vain perustapauksen virhelähdevariaatiolla. Eron suuruus on luokkaa 25 % kyseisen virhelähdevariaation keskiarvosta aikavälillä $10\text{--}70 \text{ s}^{0,5}$. Tämän virhelähdevariaation pienimmät koekappaleet on mitattu kaikista modifioidun saumalaastin koekappaleista ensimmäisinä.



Kuva 5.26: Pinta-alan osalta varioitujen koekappaleiden ajan suhteen muuttuva veden imeytymiskerroin modifioidulla saumalaastilla.

Kyljiltään suojatuilla eli ”2. suojausmateriaali” ja ”ei yläpinnan suojausta” sekä ”2. kerta 2. suojausmateriaali” -virhelähdevariaatioilla pinta-alan vaikutusta ei ole mittauksen alussa havaittavissa lähes lainkaan. Suojaamattomilla eroa sen sijaan on luokkaa 20 % mittauksen alussa, mutta ero katoaa $70 \text{ s}^{0,5}$ jälkeen. Pienen pinta-alan toiseen kertaan mi-

tattujen ohennettujen koekappaleiden veden imeytymiskertoimet ovat yleiseen tasoon verrattuna poikkeavan alhaisia. Pinta-ala ei ole ainoa muuttuja, joten pinta-alan vaikutusta poikkeamaan ei voi arvioida. Kaikilla virhelähdevariaatioilla pienten koekappaleiden imunopeuden suhteellinen suuruus kasvaa ollen maksimissaan 30–50 %. Virhelähdevariaatiosta riippuen ero alkaa kasvaa 40–80 s^{0,5} kohdalla, mutta maksimi on kaikilla hyvin lähellä samaa 160 s^{0,5} arvoa. Tämän jälkeen erot katoavat systemaattisesti suunnitteen samalla aikavälillä kuin ovat syntyneet.

Kuvasta 5.26 nähdään selvästi, kuinka suojaamattomien koekappaleiden vedenimu on alussa nopeampaa kuin muilla, mutta erot häviävät 100 s^{0,5} (<3 h) kohdalla. Perustapauksen suurista koekappaleista määritetty veden imeytymiskerroin puolestaan on systemaattisesti muita suurempi myöhemmillä ajanhetkillä. Muilla suojaustapaeroilla ei ole havaittavaa vaikutusta veden imeytymiskertoimeen.

Mittausvesiastian veden lämpötila on ollut keskimäärin 19,7 °C. Ainoastaan koekappaleella 50-6 veden lämpötila oli yli yhden asteen suurempi, ja tämän kappaleen painonnousukäyrä on hylätty kannattimen luistettua (ks. liite 8). Vastaavasti alle 18,7 °C lämpötiloja on ollut yhdeksällä koekappaleella. Suojaamattomien pienten koekappaleiden mittausveden lämpötila on ollut 18,4 °C, eivätkä tulokset poikkea merkittävästi. Toiseen kertaan mitattujen ohennettujen koekappaleiden pienemmillä kappaleilla lämpötila on ollut luokkaa 17,6 °C, ja vastaavan variaation suurten koekappaleiden lämpötila on ensimmäisellä kerralla ollut 16,9 °C ja toisella kerralla 20,4 °C. Paitsi lämpötilassa, myös tuloksissa on suurta hajontaa eikä lämpötilan vaikutusta voi arvioida.

Mittaushuoneen olosuhteiden hajonta on standardin vaatimuksen mukaista, kun se lasketaan kaikkien mittauskertojen olosuhteiden keskiarvoista. Vaihtelu on pientä, eikä olosuhteiden vaikutusta ajan suhteen muuttuviin veden imeytymiskertoimiin tehdä. Vastaava tilanne on upotussyvyyden osalla. Myöskään kuplamääräindeksin vaihtelu ei ole suurta eikä pienellä vaihtelulla näy systemaattista vaikutusta painonnousukäyrään tai veden imeytymiskertoimeen.

Pyöreiden koekappaleiden perussarja on ohennettu ensimmäisen mittauskerran jälkeen. Ensimmäisellä mittauskerralla korkeus oli luokkaa 13 mm ja toisella kerralla 6 mm. Kuvasta 5.26 voidaan huomata, että mittauksen alussa paksuuden muutos on tuonut eroa tuloksiin ainoastaan pienemmillä koekappaleilla. Myöhemmillä ajanhetkillä ohennettujen koekappaleiden veden imeytymiskerroin jää pienemmäksi kuin paksuilla.

Toisen mittauskerran tulokset eivät merkittävästi poikkea samojen koekappaleiden ensimmäisen mittauskerran tuloksista. Kuvasta 5.21 huomataan, että toisella mittauskerralla alkuvaiheen veden imeytymiskerroin on pienempi kuin ensimmäisellä mittauskerralla. Ensimmäisestä mittauskerrasta poiketen veden imeytymiskerroin muuttuu vakioksi noin 100 s^{0,5} kohdalla.

Perustapauksen koekappaleet on mitattu toisella mittauskerralla ohennettuna. Suuremmat koekappaleet on mitattu ohennettuna kahteen kertaan. Jos suurempien kappaleiden kahta mittauskertaa vertaa keskenään, huomaa toiseen kertaan ohennettuna mitattu-

jen koekappaleiden osalta samanlaisen trendin kuin mikä on nähtävissä yleisesti ensimmäisen ja toisen mittauskerran välillä.

Modifioidulla saumalaastilla kolmen pienikokoisen koekappaleen imupinta jätettiin hiomatta. Imupintana käytettiin filmivanerimuotista jäänyttä sileää pintaa. Imetty veden kokonaismäärä on merkittävästi suurempi kuin muilla koekappaleilla, vaikka koekappaleiden korkeus ei ole erityisesti suurempi. Myös veden imeytymiskerroin on selkeästi muita virhelähdevariaatioita suurempi, ja tippuu samalle tasolle muiden koekappaleiden kanssa vasta $300 \text{ s}^{0.5}$ kohdalla.

5.4.3 Muut tutkitut materiaalit

Muiden tutkittujen materiaalien osalta tarkastelut keskittyvät yksittäisten koekappaleiden tai mittauskertojen painonnousukäyrien (ks. liite 10) virheiden analysointiin. Muut materiaalit valittiin sellaisiksi, että niiden kanssa kohdattaisiin joko nopean tai hitaan vedenimun aiheuttamat mittauslaitteiston ongelmat. Muiden materiaalien osalla otettiin käyttöön myös laitteiston kehitysversio 3 (ks. luku 4.1.2).

Päivitetty mittaustapa toi esiin odottamattoman virheen haihtumiskorjausfunktion soveltamisessa haihtumismittaustuloksiin. Mittauskaapin 2 haihtumiskäyrät eivät ole saman muotoiset kuin muilla mittauskaapeilla. Muodon jäljitteleminen samoilla funktioilla, joita kahdella muulla kaapilla käytetään, ei ole mahdollista hyvällä tarkkuudella. Samaa funktiota on nyt kuitenkin käytetty kaikille mittauskaapeille, ja tämä näkyy toisen kaapin painonnousukäyrässä systemaattisena virheenä ensimmäisten $40 \text{ s}^{0.5}$:n aikana. Sovitefunktioon on tehty korjaus, jota ei enää raportoida diplomityön osana, koska tarkistus vaatii kokeita, jotka eivät valmistu riittävän nopeasti.

Polymeerimodifioitu julkisivurappauslaasti

Polymeerimodifioidun julkisivurappauslaastin painonnousukäyrissä (liite 10) näkyy haihtumiskorjauksen merkittävä vaikutus kulmakertoimeen. Halkaisijaltaan 100 mm kappaleilla haihtumiskorjaus aiheuttaa painonnousukäyrän kääntymisen laskuun. Mittausta on jatkettu käsin mittauksena, ja tuloksista voidaan havaita vedenimun jatkuneen edelleen. Halkaisijaltaan 185 mm koekappaleita on ollut kuusi kappaletta. Huomataan, että niiden tulokset ovat samaa suuruusluokkaa. Jälkimmäisellä mittauskerralla ei ole käytettävissä käsin mitattua dataa. Haihtumiskorjauksen suhteellisen kosteuden arvoa muuttamalla tulokset voidaan muuttaa saman suuruisiksi kuin ensimmäisellä mittauskerralla. Molemmat mittausdatat on korjattu vanhalla haihtumiskorjausfunktiolla.

Halkaisijaltaan 185 mm ja 100 mm koekappaleiden veden imeytymiskertoimen ero tasoittuisi hieman, jos automaattimittausdata jätettäisiin huomioon ottamatta imuvaiheen lineaarisista regressioista. Pienimpien, halkaisijaltaan 55 mm koekappaleiden vedenimu puolestaan on lähes kertaluokkaa suurempi kuin kaikkien muiden. Mittaustilan olosuhteita ei ole mitattuna tälle mittauskerralle. Käyttämällä haihtumiskorjausfunktiossa kor-

keampaa suhteellisen kosteuden arvoa (50–60 % RH) saadaan veden imeytymiskerroin asettumaan muiden kanssa samaan suuruusluokkaan.

Betoni

Purettavan rakennuksen julkisivusta otetut betoninäytteet osoittavat, että betonin laatu-vaihtelu samankin rakennuksen julkisivussa voi olla merkittävää (ks. liite 10). Näytteet 13 ja 16 ovat tuloksiltaan vertailukelpoisia, näytteen 11 merkittävästi heikompi vedenimu voi olla seurausta poikkeavasta rasitusolosuhteesta, mutta todennäköisemmin kyse on elementtien luontaisesta vaihtelusta. Julkisivun pinnan valkoinen pesubetoni osoit-tautui merkittävästi paremmin vettä imeväksi kuin saman näytteen taustabetoni.

Kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden luotettava määrittäminen olisi edellyttänyt mittauksen päättämistä käsinmittauksena. Nyt haihtumisen vaikutus painonnousukäyrän loppupäähän aiheuttaa merkittävän virhelähteen etenkin taustabetonikappaleilla. Herkkyystarkasteluiden perusteella suurimmat haihtumiskorjaukset johtavat noin ± 5 % vaihteluun kapillaarisessa kyllästyskosteuspitoisuudessa.

Maneliuksen (2013) aiemmin tutkimien betonikappaleiden painonnousukäyrät ovat teoriaa jokseenkin paremmin noudattavia kuin julkisivusta otettujen näytteiden. Eron saattaa selittää ero koekappaleiden valmistustekniikassa; julkisivun betoninäytteet on otettu timanttikoralla märkäporauksena, joka voi vaikuttaa imuominaisuuksiin, kun muut koekappaleet on valettu laboratoriossa muotoonsa. Kaikilla koekappaleilla nähdään mittauskaapin 2 haihtumiskorjauksen aiheuttama virhe painonnousukäyrän alkupäässä.

Koska lujempi betoni imi vettä selvästi hitaammin, sille tehtiin käsinmittaus, joten koko painonnousukäyrä on hyvin luotettava. Kappaleen Bed185X_10 painonnousukäyrä (ks. liite 10) on jostain syystä poikkeava. Koekappaleen ulkonäkö ei poikkea muista, joten syytä tälle on vaikea löytää.

Koekappaleen Bed50_12 vedenimu- ja veden tunkeutumiskerroin on hylättävä niiden poikkeavuuden vuoksi. Kyseessä on ohut ja pieni kappale, jonka ulkonäkö ei poikkea. Kyseisen koekappaleen koko imuvaihe on huonoksi osoittautuneen haihtumiskorjauksen alueella. Jos haihtumiskorjaus tehdään polynomiregressiolla, niin veden imeytymiskertoimen poikkeavuudesta puolet saadaan pois. Korjaus ei vaikuta veden tunkeutumiskertoimeen eikä kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen.

Koekappaleiden Bed50_21, -22 ja -23 mittauskerralla haihtumiskorjaus aiheuttaa virheen kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden laskemiseen (ks. liite 10). Kuten edellä on mainittu, ei tämä lopulta vaikuta kuin ± 5 % koekappaleiden välisen hajonnan ollessa vähintään samaa suuruusluokkaa. Muilta osin tämän betonilaadun koekappaleet saavat yhteneviä tuloksia.

Kevytsojaraharkko ja kevytbetoni

Kirjallisuuden perusteella tiedetään, että höyrykarkaistussa kevytbetonissa suurempien huokosten kapillaarinen nousukorkeus on vain joitain millejä. Jos koekappale on riittä-

vän korkea, niin veden imeytymiskerroin voidaan laskea erikseen sekä näille suuremmille huokostuksella tuotetuille huokosille että pienemmille kiinteän materiaalin huokosille. Liitteestä 10 löytyville kevytbetonin painonnousukäyrille on tehty tämä jako. metodi sekä esimerkki painonnousukäyrästä on tarkemmin esitetty luvussa 5.2.3. Tämä kapillaarisen nousukorkeuden ylittyminen voidaan havaita myös painonnousukäyrän käsinmitatulta osuudelta. Painon nousu on alkanut uudestaan käsinmittauksessa, koska koekappaleen upotussyvyys on kasvanut.

Kevytbetonilla esitetty huokosverkoston jakautumisen vaikutus painonnousukäyrään oli odotettavissa myös kevytsoraharkolla. Kevytsoraharkolle nyt käytetty 20 mm materiaalipaksuus ei osoittautunut riittäväksi veden imeytymiskertoimen määrittämiseen. Kevytsoraharkon sorapapujen väliin muodostuu paljon huokostilaa, joka on kapillaarisesti aktiivista, mutta jonka kapillaarinen nousukorkeus on korkeintaan joitain senttimetrejä. Nyt tehdyssä kokeessa suuretkin huokokset täyttyivät ainakin osin vedellä koekappaleiden yläpintaan asti aiheuttaen painonnousukäyrän imuvaiheeseen merkittävää kaareutumista.

5.4.4 Analyysin johtopäätökset

Tässä kohdassa käydään läpi edellisissä kohdissa esitettyjen riippuvuuksien syitä. Useille riippuvuussuhteille ei voida antaa yksikäsitteistä selitystä. Nyt esitettävien todennäköisten syiden vaikutusta tuloksiin tulee seurata, kun tehdään vapaan veden imeytyskokeita.

Tilavuuspainon riippuvuus koekappaleen pinta-alasta voi olla seurausta koekappaleiden tiivistämisestä. Suuremmat koekappaleet ovat vaikeampia tiivistää. Saumalaastin käsiteltävyys oli hyvin samanlaista sekä modifioidulla että tavanomaisella laastilla. Näiden pinta-alan ja tilavuuspainon riippuvuudet ovat vastakkaiset. Tämä heikentää tiivistyshypoteesin uskottavuutta. Vaihtoehtoinen selitys tilavuuspainoerolle on hydrataatioaste. Eri kokoiset ja eri materiaalista tehdyt koekappaleet kuivuvat eri tavoin, mikä voi johtaa erisuuriin hydrataatioasteisiin, kun jälkihoitoa ei tehdä vesiupotuksessa.

Jotta tilavuuspainon hajontaa saadaan supistettua, niin huomiota tulee kiinnittää sekä jälkihoitoon että yhtenäiseen valutekniikkaan eri koekappaleiden välillä. Useita laasteja ei ole tarkoitettu käytettäväksi koekappaleeksi soveltuvan paksuisina kerroksina. Jotta saadaan laastin todellista käyttötilannetta vastaava materiaaliominaisuus mitattua, täytyy koekappaleen valmistustekniikan sekä jälkihoidon olla mahdollisimman samankaltainen laastin todellisen käytön kanssa.

Pinta-alan ja muodon sekä suojaustavan vaikutus vedenimukokeen tuloksiin

Pinta-alan vaikutus veden imeytymiskertoimeen on pientä ja se voi olla seurausta muista pienten ja suurten kappaleiden eroista. Tavanomaisella saumalaastilla eroja ei käytännössä voida havaita, kun tarkastellaan vain kokeiden perusteella tehdyn laskennan lopputuloksia. Modifioidulla saumalaastilla eroja löytyy, mutta mittauksen kestäessä erot

tasoittuvat. Pienten koekappaleiden tietyllä aikavälillä merkittävästikin nopeampi imu kaikilla eri virhelähdevariaatioilla on seurausta joko erilaisesta valun jälkeisestä kuivumisnopeudesta tai erisuuresta reuna-alueen pinta-alasta. Yksittäisen mittauskerran poikkeavat tulokset puolestaan voidaan yhdistää esimerkiksi poikkeavaan veden lämpötilaan tai mittausajankohtaan.

Kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuden pinta-ala sen sijaan vaikuttaa. Tavanomaisen saumalaastin perussarjassa pienimpien, alle 50cm² kappaleiden kyllästyskosteuspitoisuus on pienempi kuin muun kokoisten koekappaleiden kautta piirretty trendiviiva antaa olettaa. Muiden virhelähdevariaatioiden tulokset eivät ole tämän kanssa ristiriidassa, mutta niissä on vain kaksi pinta-alavaihtoehtoa, eikä riippuvuutta voida näiden avulla varmistaa.

Neliön muotoisia koekappaleita valmistettiin vain tavanomaisesta saumalaastista. Neliön muotoiset kappaleet imivät vettä järjestelmällisesti sekä nopeammin että enemmän. Koska pinta-alavaikutusta ei ole havaittavissa neliöilläkään, ei reuna-alueen erisuuri pituus suhteessa pinta-alaan yksin selitä neliöiden ja pyöreiden vedenimun eroja. Sen sijaan syy lienee nurkka-alueessa, joka saattaa jo valuvaiheessa jäädä koostumukseltaan erilaiseksi.

Modifioidun saumalaastin tuloksista voidaan havaita, ettei kylkisuojausmateriaali juurikaan vaikuta veden imeytymiskertoimeen. Tosin vahalla suojatuilla suurilla koekappaleilla veden imeytymiskerroin ei laske ajan kuluessa yhtä matalalle tasolle kuin muilla. Tämä voi olla seurausta vahan ja koekappaleen väliin jääneestä kapillaarisesti aktiivisesta saumasta.

Mittauskaapissa suhteellinen kosteus nousee korkeaksi, ja suojaamattomien koekappaleiden pintahuokosiin sitoutuu kosteutta. Suojatuilla kappaleilla vastaavat huokokset ovat täynnä suojausmateriaalia, mikä voi selittää suojaustavan aiheuttamat pienet erot kyllästyskosteuspitoisuudessa. Yläpinnan suojaus johti yksittäisillä koekappaleilla vesipisaroiden muodostumiseen koekappaleen yläpinnan ja pleksin väliin. Tällaisessa tilanteessa kapillaarista kyllästyskosteuspitoisuutta ei voi laskea.

Modifioidun saumalaastin veden imeytymiskertoimesta huomataan, että suojaamattomilla koekappaleilla veden imeytyminen on kokeen alussa suojattuja nopeampaa. Sama vaikutus varmaankin voitaisiin havaita myös tavanomaisen saumalaastin painonousukäyriä tutkimalla. Virhe on seurausta kylkien kautta imeytyvästä vedestä sekä mittauskaapin ilmasta koekappaleeseen sitoutuvasta kosteudesta, ja se näkyy siksi selvemmin pienillä koekappaleilla. Suojauksen puuttuminen ei vaikuta veden imeytymiskertoimeen, jos alun häiriöaltis osuus jätetään huomiotta.

Sekä koko-, muoto- että suojaustavan vaikutus voidaan yhdistää koekappaleen reuna-alueen erilaisiin vedenimuominaisuuksiin. Koekappaleet on valettu muotoon, joten kysymys voi olla myös valussa muottipintojen lähelle syntyneestä erilaisesta huokosjakaumasta. Lisäksi eroon voi vaikuttaa reuna-alueella syntyvä epäjatkuvuus.

Suojausmateriaalin vaikutus on lopulta pieni, ja kapillaarisen kanavan muodostuminen saadaan estettyä huolellisella työllä. Jos upotussyvyys on mitätön ja vedenimuneisuus suuri suhteessa hygroskooppiseen kosteuden sitoutumiseen, ei suojauksella ole vaikutusta veden imeytymiskertoimeen. Kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen suojauksen vaikutus sen sijaan on suuri. Kaavan (2.21) yhteys pätee paremmin suojatuille kappaleille, joten suojaamattomien kappaleiden tulokset ovat vähemmän teoriaa vastaavat kuin suojattujen. Suojaaminen ylipäättään on tarpeellista; mittauksen alun epäluotettava ajanjakso lyhenee, kun kyljet suojataan veden imua vastaan. Huolellinen vahalla tehtävä suojaus on mittaustyön kannalta helppo ja lopputuloksen kannalta luotettava vaihtoehto.

Koon ja muodon erot eivät näy juurikaan veden imeytymiskertoimessa mutta kapillaarisessa kyllästyskosteuspitoisuudessa ne näkyvät. Muotovaikutuksen osalta voidaan todeta, että neliön muotoiset koekappaleet tuottavat poikkeavia tuloksia. Neliön muotoisia kappaleita ei tulisi käyttää mittauksissa, koska teorian asettamat reunaehdot toteutuvat huomattavasti huonommin neliön muotoisilla kuin pyöreillä. Tämä näkyy myös siitä, että kaava (2.21) ei päde neliöille yhtä hyvin kuin pyöreille. Pinta-alan vaikutus sen sijaan ei ole yksiselitteinen. Standardin vaatimusten täyttäminen riittää nyt tutkituilla materiaaleilla reunavaikutusten eliminointiin. Koekappaleen kasvattamisesta ei ole suoraa hyötyä.

Kosteus- ja lämpötilaosuhteiden vaikutukset vedenimukokeen tuloksiin

Tavanomaisen saumalaastin tasapainotusolosuhteet eivät olleet kaikilta osin standardin (SFS-EN ISO 15148 2002) mukaisia. Tasapainotusolosuhteen vaikutus koekappaleen tilavuuspainoon, toisin sanoen kosteuspitoisuuteen ennen koetta, oli kuitenkin pieni. Tämä johtuu materiaalien pienestä kosteuspitoisuudesta hygroskooppisissa olosuhteissa. Pienen kosteuspitoisuuden pienet vaihtelut peittyvät suurempien muuttujien alle. Standardin vaatimukset tasapainotusolosuhteista ovat riittävät.

Mittaushuoneen ilman suhteellinen kosteus vaikuttaa selvästi mittaustulokseen, koska se on yksi muuttuja haihtumiskorjauskäyrässä. Haihtumiskorjauskäyrän laskennassa käytetty huoneen suhteellinen kosteus ei herkkyytarkasteluiden perusteella vaikuttanut merkittävästi tuloksiin materiaaleilla, joilla imuvaihe sijoittui aikavälille 20–200 s^{0,5}. Mittauslaitteiston kehitysversiossa 3 mittauskaapin 2 haihtumiskorjauskäyrän funktionaalinen muoto osoittautui vääräksi. Mittaushuoneen kosteusolosuhde ei kuitenkaan ole syytä tähän. Itse mittaukset tehdään suljetuissa kaapeissa, joissa suhteellinen kosteus mittauksen aikana on aina luokkaa 95 % RH. Tästä johtuen mittaushuoneen ilman suhteellisella kosteudella ei pitäisi olla suoraa vaikutusta vedenimukokeen tuloksiin. Koska joitain epäsystemaattisia riippuvuuksia löytyi, olisi suositeltavaa stabiloida mittaushuoneen olosuhteet standardin vaatimusten tasolle.

Kokeessa koekappaleeseen imeytettävän veden lämpötila vaikuttaa sekä veden imeytymiskertoimeen että kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen. Koekappaleen tasapainotuslämpötila vaikuttaa veden lämpötilaan kokeen alussa, jos näiden lämpötilaero on suuri. Pääasiassa veden lämpötila seuraa kuitenkin mittaushuoneen lämpötilaa. Ve-

den imeytymiskertoimen lämpötilariippuvuus on useimmille virhelähdevariaatioille ollut päinvastainen kuin teoria antaisi odottaa. Toisaalta lämpötilan vaihtelu on ollut aika pientä. Lämpötilan vaikutusta yksittäisiin poikkeaviin tuloksiin on vaikea poissulkea. Modifioidun saumalaastin pienet ja ohennetut koekappaleet, jotka on mitattu toiseen kertaan, ovat saaneet poikkeavia tuloksia, ja niiden veden lämpötila on ollut poikkeuksellisen alhainen.

Veden lämpötila vaikuttaa myös kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen. Lämpötilan nousu vaikuttaisi myös kasvattavan virheintegraalin suuruutta. Tulosten luotettavuuden kannalta olisi selkeintä saada veden lämpötila vakioitua. Tämä olisi helpointa toteuttaa vakioimalla mittaushuoneen lämpötila. Suora veden lämmittäminen aiheuttaisi ongelmia ainakin haihtumisen nostekorjaukseen, koska haihtumisnopeus riippuisi oletettavasti voimakkaasti veden ja huoneen lämpötilaerosta. Standardin vaatimus koekappaleen ja veden lämpötilan tasaannuttamisesta mittaustilanteen lämpötilaan on perusteltu.

Koekappaleen korkeuden, upotussyvyyden ja imupinnan ilmakuplien määrän vaikutukset vedenimukokeen tuloksiin

Tutkituilla saumalaasteilla koekappaleen korkeus ei juuri vaikuta vedenimuneuteen tai kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen. Korkeuden vaikutus tuloksiin voi tulla näkyviin suuremmilla korkeuseroilla, kun paksuilla koekappaleilla painovoima alkaa vastustaa veden nousua yhä enemmän. Liian ohuilla koekappaleilla luotettavan painonnousudatan määrä käy vähäiseksi. Kevytsoraharkon kokeesta voidaan huomata, että joillain materiaaleilla riittävä koekappaleen paksuus saattaa olla luokkaa 5 cm, kun taas polymeerimodifioidun saumalaastin riittävä materiaalipaksuus olisi oletettavasti ollut alle 10 mm.

Upotussyvyys ei vaikuta veden imeytymiseen materiaaleilla, joilla on pienet huokokset. Upotuksen aiheuttama veden paine koekappaleen alapinnalla on pieni verrattuna tällaisen materiaalin kapillaariseen imuvoimaan. Koska veden pinnan alapuolella oleva osuus koekappaleesta kyllästyy yli kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden, upotussyvyyden tulisi olla mahdollisimman pieni. Kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden ylityminen huomataan erityisesti kevytbetonikappaleilla, joiden painon nousu alkoi uudelleen kasvaa, kun ne laitettiin käsinmittaukseen, ja samalla upotussyvyys kasvoi. Tutkitujen materiaalien perusteella 0,5–1,5 mm upotussyvyys on sopiva, vaikkakin hyvin nopeasti vettä imevillä materiaaleilla on käytettävä suurempaa upotussyvyyttä, jotta vettä ei jouduta lisäämään jatkuvasti.

Imupinnalle vesiupotuksen alkaessa jääneet ilmakuplat eivät ole vaikuttaneet veden imeytymiseen. Tämä osoittaa, etteivät pienet imupinnan katvealueet vaikuta tuloksiin. Vesi imeytyy näiden katvealueiden taakse heti kokeen alkaessa, ja kokeen edetessä vaikutus veden virtauksen yksiulotteisuuteen jää pieneksi. Suurimmat ilmakuplat on kuitenkin poistettu aina heti upotuksen jälkeen. Pienimpiä, halkaisijaltaan alle 2 mm ilmakuplia ei ole pakko poistaa imupinnalta.

Joillain koekappaleilla ilmakuplien määrä imupinnalla lisääntyi kokeen aikana. Tämä voitiin havaita silmämääräisesti, koska mittausvesiastian sivupinnat ovat läpinäkyvät. Tarkkaa ajankohtaa ei ole tiedossa, koska kokeet suoritettiin automaattilaitteistolla, eikä kokeen etenemistä valvottu. Oletettavasti ilmakuplat ovat syntyneet ansaan jääneen ilman poistuessa kappaleesta kapillaarisesti huokosiin tunkeutuvan veden voimasta. Ilmiö oli harvinainen, ja voidaan ajatella, että tämä ansaan jääneen ilman poistuminen on seurausta kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden ylittymisestä. Automaattilaitteistolla ei saada tarkkaa kuvaa tällä tavalla imeytyneestä vesimäärästä, koska alapinnalle muodostuvat ilmakuplat lisäävät koekappaleeseen kohdistuvaa nostetta.

Jälkihoidon vaikutukset vedenimukokeen tuloksiin

Useimmilla tutkituilla tavanomaisen saumalaastin koekappaleilla ensimmäisen vesikosketuksen perusteella laskettu veden imeytymiskerroin oli selkeästi suurempi kuin toisen tai kolmannen vesikosketuksen perusteella laskettu. Myös kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus on laskenut huomattavasti. Modifioidun saumalaastin osalla mittauskertojen väliset erot ovat pienemmät.

Mittauskertojen väliset erot veden imussa selittyvät huokosrakenteen muuttumisella. Koekappaleita ei ole jälkihoidettu vesiupotuksessa, joten niihin on jäänyt hydratoitumaton sementtiä. Ensimmäisen vesikosketuksen aikana tämä sementti hydratoituu ja tiivistää koekappaleen huokosrakennetta hidastaen näin veden imeytymistä sekä vähentäen imetyksen veden kokonaismäärää. Modifioidussa saumalaastissa on myös muita vesikosketuksesta aktivoituvia huokosrakenteeseen vaikuttavia prosesseja.

Modifioidun saumalaastin veden imeytymiskerroin stabiloituu toisen mittauskerran ohentamattomilla ja suurilla koekappaleilla jo $100 \text{ s}^{0.5}$ kohdalla. Materiaalin huokosrakenteen muutokset ovat siis pääosin tapahtuneet jo ensimmäisen imeytyksen yhteydessä, ja nyt saadaan veden imeytymiskertoimelle vakioarvo, jos alusta jätetään riittävästi dataa ottamatta huomioon. Vastaavasti toiselle mittauskerralle ohennetuista modifioidun saumalaastin koekappaleista on hiottu tämä vedelle altistunut osuus pois, ja veden imeytymiskerroin on samaa luokkaa kuin ensimmäisellä imeytyskerralla.

Tavanomaisella saumalaastilla on poikkeava mittauskerta, jossa ensimmäisen ja toisen mittauskerran välillä ei tapahdu merkittävää muutosta veden imeytymisessä. Yksinkertaisin selitys on mittausvesi. Tämä poikkeava sarja on ensimmäisellä kerralla mitattu vanhaan mittausveteen, jolloin aiempien mittauskertojen aikana veteen liuenneet epäpuhtaudet ovat estäneet huokosrakenteen muutoksen mittauksen aikana.

Modifioidun saumalaastin perustapauksen pienet koekappaleet, joista saatiin muita suurempi veden imeytymiskerroin, on mitattu kaikista kyseisen materiaalin koekappaleista ensimmäisinä. On siis mahdollista, että niissä hydratoituminen ei ole ollut yhtä pitkällä kuin muilla, myöhemmin mitatuilla koekappaleilla. Laastin kaikilla suurilla koekappaleilla oli saman virhelähdevariaation pieniin koekappaleisiin verrattuna hitaamman vedenimun jakso. Veden imeytymiskertoimen ero saavutti huippunsa noin kolme tuntia veden imeytyksen alkamisesta. Selitys voisi löytyä laastin modifiointiin käy-

tetystä aineesta. Modifioinnista ei ole tarkempaa tietoa, ja erot vedenimunopeuksissa jäävät selittämättä.

Jälkihoitoon tulee kiinnittää huomiota. Nyt tehdyt kokeet sinänsä edustavat hyviä veden imeytymiskertoimen tuloksia, mutta eivät kuvaa materiaalin pitkäaikaista veden imeytymisen käyttäytymistä. Yli kuukauden vanhan koekappaleen hydratoitumisnopeus on pieni verrattuna vedenimunopeuteen, eikä mittausdatasta näy hydratoitumisen vaikutus vedenimuoiminaisuuksiin. Modifioidulla saumalaastilla vedenimuoiminaisuus kuitenkin muuttuu kokeen aikana, mikä on seurausta laastin vedenimuun vaikuttavan lisäaineen toiminnasta.

Muita havaintoja vedenimukokeista

Ylivirtausjärjestelmällä mitatut koekappaleet saivat poikkeavia tuloksia verrattuna muihin virhelähdevariaatioihin. Ensimmäinen selitys tähän on nostekorjauksen yhteydessä todettu vedenpinnan epästabiilius. Lisäksi heikompaan veden imeytymiseen on voinut vaikuttaa ylivirtausjärjestelmässä käytetty vesi. Ylivirtausjärjestelmässä veden vaihtaminen ja laitteiston puhdistaminen oli hidasta ja vaikeaa. Tästä johtuen useimmat peräkkäiset mittauskerrat on tehty käyttäen samaa vettä. Kokeessa tulisi aina käyttää puhdistettua vettä, ja myös mittausvesiastiat tulee puhdistaa jokaisen mittauksen jälkeen.

Modifioidulla saumalaastilla kapillaarista kyllästyskosteuspitoisuutta ei saatu määritettyä. Joillain ohennetuilla koekappaleilla vesi tunkeutui kokeen aikana läpi koekappaleesta. Myös muutamalla paksulla, lähes vuoden vesikosketuksessa olleella koekappaleella vesi tunkeutui koekappaleen reuna-alueella läpi asti. Koska ohennetut koekappaleet ovat kyllästyneet 100–200 s^{0.5} aikana, niin voitaisiin vetää oletus, että paksummilla koekappaleilla vastaava kyllästymisen tapahtunut 200–400 s^{0.5} välisenä aikana. Ainakin toisella mittauskerralla tätä kyllästymistä näkyy painonnousukäyrästä heikosti vasta ensimmäisen 500 s^{0.5} jälkeen. Vedenimunopeuden muuttuminen materiaalissa vesikosketuksen aikana on ilmeisesti estänyt aidon kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden saavuttamisen.

Tätä käsitystä tukee kuvasta 5.25 havaittava ”TSP jälkeen” -tilavuuspainon odotettua pienempi arvo. Kokeen jälkeinen tilavuuspaino ei edusta luotettavasti tasapainokosteuskäyrän desorption arvopistettä. Oletettavasti osa koekappaleen huokosista on adsorptio-tilassa epätäydellisen kyllästymisen vuoksi.

Modifioidun saumalaastin imupinnaltaan hiomattomien koekappaleiden merkittävästi muita suurempi vedenimunopeus osoittaa koekappaleen pinnan merkittävän vaikutuksen vedenimunopeuteen. Hiomaton pinta on muottipinta. Pinnalla ollut muottiöljyjäämä on voinut vaikuttaa veden imeytymiseen. Hiomattomien kappaleiden imemä kokonaisvesimäärä on suurempi kuin muilla modifioidun saumalaastin koekappaleilla. Myös tämä tukee käsitystä, että modifioidun saumalaastin koekappaleet eivät ole kyllästyneet vedellä, vaikka teoreettisesti imujakson pituus olisi tämän saattanut mahdollistaa. Jatkossa imupinnan esikäsittelyn vaikutusta tulisi tutkia tarkemmin.

Modifioidulla saumalaastilla tehdyt kokeet antoivat viitteitä siitä, ettei automaattilaitteistolla kannata tehdä hyvin pitkään kestäviä veden imeytyksiä. Käsitystä vahvistaa polymeerimodifoidulla julkisivulaastilla tehdyt hyvin pitkät kokeet. Nostekorjausta ei voi tehdä pitkäkestoisissa kokeissa haihtumiskorjauskäyrien avulla, vaan nosteen muutoksesta täytyisi olla kokeen ajalta mitattua tietoa. Paras tapa toteuttaa vedenimukokeet on aloittaa mittaus automaattilaitteistolla, ja viimeistään kahden vuorokauden jälkeen vaihtaa mittaus käsinmittaustekniikkaan. Tällä tavalla saadaan mahdollisimman tarkka tieto kokeen alun painonnoususta, ja mahdolliset nostekorjauksen virheet tulevat esiin käsinmittauksen trendin avulla.

Viimeiset diplomityön aikana tehdyt kokeet osoittivat, että haihtumisen nostekorjaus on hyvin herkkä mittaускаappien tiiviydelle. Mittauskaapin 2 poikkeava haihtumiskäyrä on ilmeisimmin seurausta kaapin muita suuremmasta ilmanvaihdosta. Nostekorjaus on siksi hyväksi osoittautuneesta tarkkuudestaan huolimatta epävarma; pienet erot mittaускаappien ovien sulkemisessa ja tiivisteiden väsyminen saattavat muuttaa haihtumiskorjausta merkittävästi, vaikka koe suoritettaisiin ohjeiden mukaan. Haihtumiskorjauskäyrien paikkansapitävyyttä on seurattava säännöllisillä tarkistusmittauksilla.

5.5 Vertailu aiempiin tutkimuksiin

Kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden ja veden imeytymiskertoimen arvoja löytyy kirjallisuudesta. Joissain lähteissä on ilmoitettu myös veden tunkeutumiskertoimen arvoja. Kirjallisuudesta saatuja arvoja verrataan diplomityössä tutkituista materiaaleista laskettuihin arvoihin.

Kohdassa 3 on esitelty aiempia virhelähdetutkimuksia. Aiemmissä virhelähdetutkimuksissa on käyty läpi osin samoja virhelähteitä kuin nyt tehdyissä kokeissa. Nyt diplomityössä tehdyn tutkimuksen päätelmiä verrataan kirjallisuustutkimuksen päätelmiin.

5.5.1 Veden imeytymiskertoimen ja kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden vertailut

Vedenimukokeista laskettuja ja edellä esiteltyjä suureita ovat kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus, veden imeytymiskerroin ja -tunkeutumiskerroin. Oheisessa taulukossa 5.4 on eri kirjallisuuslähteistä kerättyjä laskettujen suureiden arvoja.

Taulukko 5.4: Kirjallisuudesta löytyviä veden imeytymiskertoimen ja kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden arvoja.

Veden imeytymiskerroin		Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus	
Materiaali	A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	w_{cap} [kg/m ³]	Lähde
Tiili 1700 kg/m ³	0,3700		(Vinha 2011)
Brick	0,1900	248	(Plagge et al.)
Keraaminen tiili	0,1600	147	(Roels et al. 2004)
Savitiili	0,1490		(Bomberg et al. 2005)
Ceramic Brick	0,1460	169	(Plagge et al.)
Red clay brick	0,084	188	(Mukhopadhyaya et al. 2002)
Keraaminen tiili		150	(Carmeliet et al. 2004)
Sementtilaasti	0,0300		(Vinha 2011)
Kalkkilaasti	0,2500		(Vinha 2011)
Lime cement plaster	0,0735	306	(Plagge et al.)
Lime sand stone	0,056	190	(Plagge et al.)
Concrete	0,1840	117	(Mukhopadhyaya et al. 2002)
Betoni Sementti/hiekka/vesi 1/3/0,5	0,0462		(Sabir et al. 1988)
Betoni W/C = 0,7	0,0280		(Vinha 2011)
Betoni W/C = 0,5	0,0200		(Vinha 2011)
Betoni W/C = 0,3	0,01		(Vinha 2011)
high performance concrete	0,0057-0,0105	80-104	(Vejmelková et al. 2009)
Autoclaved aerated concrete	0,1680	300	(Vejmelková et al. 2009)
Kevytbetoni 500 kg/m ³	0,0800		(Vinha 2011)
Aerated Concrete	0,0398	330	(Plagge et al.)
Kevytbetoni 500 kg/m ³	0,036		(Kumaran 2006)
Autoclaved aerated concrete	0,031	289	(Roels et al. 2004)
siporex	0,020-0,088		(Huang 2003)
Kalsiumsilikaatti		810	(Carmeliet et al. 2004)
Calcium silicate	1,1800	820	(Plagge et al.)
Kalsiumsilikaattilevy	1,2230	803	(Roels et al. 2004)
Tuulensuojakipsilevy	0,0760	500	(Vinha et al. 2005)
Ekovilla 37kg/m ³	0,0950	440	(Vinha et al. 2005)
Hydrophilic mineral wool 160 kg/m ³	9,5	310	(Vejmelková et al. 2009)
Oak	0,1	500	(Kurs & Vik 1999)
Puu, syysuuntaan	0,016		(Vinha 2011)
Lämpökäsitelty puu (spruce), syysuuntaan	0,0134666667		(Pfriem 2011)
Spruce	0,0116	600	(Kurs & Vik 1999)
Eastern white pine	0,0112	622	(Mukhopadhyaya et al. 2002)
Spruce syysuuntaan	0,01025		(Pfriem 2011)
Spruce	0,0096	785	(Kumaran 1999)
Puu, säteen suuntaan	0,004		(Vinha 2011)
Spruce säteen suuntaan	0,0018		(Pfriem 2011)
Lämpökäsitelty puu (spruce), säteen suuntaan	0,0009666667		(Pfriem 2011)
Tuulileijona puukuitulevy	0,004	210	(Vinha et al. 2005)

Ensimmäisen koesarjan materiaalit edustavat useita eri laastityyppejä. Kirjallisuudessa annetut laastien ja betonien veden imeytymiskertoimet ovat suuruusluokaltaan samoja. Alhaisemman veden imeytymiskertoimen laasteilta osasi jo ulkonäön perusteella odottaa hidasta vedenimua. Koostumukseltaan tyypillisen oloisista laasteista, kuten Kiilto KL ja Tasoflex, on mitattu kirjallisuudessa puolta pienemmät veden imeytymiskertoimet ja kapillaariset kyllästyskosteuspitoisuudet kuin kalkkisementtilaastille. Osaksi ero on seurausta materiaalien eroavaisuuksista, mutta myös mittaustavalla on ollut vaikutusta luvun 5.4.4; ”Muita havaintoja vedenimukokeista” mukaisesti.

Virhelähdekokeista tavanomaiselle saumalaastille laskettu veden imeytymiskerroin ja kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus ovat samaa suuruusluokkaa kuin muilla betonituotteilla. Veden imeytymiskerroin on hyvin vertailukelpoinen tiiviin betonin kanssa. Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus on toiseen ja kolmanteen kertaan mitatuilla näytteillä samassa suuruusluokassa betonin kanssa. Ensimmäisen mittauskerran merkittävästi korkeammat kapillaariset kyllästyskosteuspitoisuudet eivät ole vertailukelpoisia hyvin jälkihoidetun betonin kanssa.

Muista tutkituista materiaaleista kevytbetoni ja betoni ovat suoraan vertailtavissa kirjallisuusarvoihin. Tavanomaisen betonin veden imeytymiskerroin on noin kaksinkertainen lujaan verrattuna. Tulos on yhtenevä aiempien tutkimusten kanssa. Myös kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus on suuruusluokaltaan järkevä. Julkisivusta purettujen betoninäytteiden alkuperäisistä ominaisuuksista ei ole tiedossa edes tavoitearvoja, mutta tulokset ovat odotettua suuruusluokkaa.

Kevytbetonille ei nyt laskettu kapillaarista kyllästyskosteuspitoisuutta. Veden imeytymiskerroin, kuten kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuuskin, ovat olleet kevytbetonilla tunnetusti kiistanalaisia. Hajonta veden imeytymiskertoimelle on kirjallisuudessa suuri. Diplomityön yhteydessä määritetty veden imeytymiskerroin edustaa kirjallisuudesta löydettyjen arvojen suurempaa arvoa erittäin hyvin.

Kevytsoraharkko vertautuu parhaiten kevytbetoniin. Veden imeytymiskerroin on suurempi, mutta tulos oli odotettu. Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus on matalampi kuin kevytbetonille on kirjallisuudessa annettu, mikä voidaan pitää osoituksena suuresta määrästä huokostilaa, joka ei täyty kapillaarisesti.

Julkisivurappauslaastista voidaan huomata, että veden imeytymiskertoimen suuruusluokka on sama kuin puulla säteen suunnassa. Puu on julkisivumateriaalina paljon käytetty, ja julkisivurappauslaastille yhtä hitaaseen vedenimun suuruusluokkaan pääsy on hyvä saavutus. Vanhoista julkisivuista purettu betoni on moninkertaisesti nopeammin vettä imevää, vaikka onkin matalan lujuuden betoneita tiiviimpää.

5.5.2 Virhelähdekokeiden tulosten vertailu

Virhelähdetutkimuksia on käyty läpi luvussa 3.3.1. Tässä yhteydessä aiempien tutkimuksien tuloksia verrataan luvussa 5.4.4 esitettyihin tämän tutkimuksen virhelähdekokeiden tuloksiin.

Jälkihoidon vaikutus on osoitettu merkittäväksi niin diplomityön kokeissa kuin kirjallisuudessa. Lyhyt jälkihoito verrattuna tavanomaiseen jälkihoitoon vaikuttaa sekä kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen että veden imeytymiskertoimeen. Tavanomaisella jälkihoidolla saadaan molemmille luokkaa puolet pienempiä arvoja kuin lyhyellä.

Jos tasapainotusolosuhde pysyy hygroskooppisella alueella, pysyy alkukosteuspitoisuuden vaikutus veden imeytymiskertoimeen merkityksettömänä. Tasapainotusolosuhteet voidaan valita vapaasti; standardin (SFS-EN ISO 15148 2002) vaatimukset ovat vähintään riittävät. Uunikuivauksen vaikutusta vedenimukokeen tulokseen ei nyt tutkittu, kirjallisuuden perusteella uunikuivausta ei tulisi tehdä ennen veden imeytystä.

Imupinnan hionta ja kylkisuojaus on osoitettu merkittäviksi tekijöiksi. Hionnan suhteen kaivattaisiin lisätutkimusta. Nyt käytettävissä olleet koetulokset koskevat saumalaastia ja betonia. Esimerkiksi kevytbetonin ja puun imupinnan hionnan vaikutusta tulisi tutkia. Nyt hiomaton laastipinta imi vettä merkittävästi nopeammin kuin hiottu, mutta tulos on saatu pienellä koesarjalla. Kylkisuojausmateriaalin valinta voidaan edelleen jättää kokeen tekijälle. Vertailukelpoisia tuloksia saadaan käyttämällä siveltävää ja hyvin suojattavaan materiaaliin tarttuvaa materiaalia.

Koon vaikutusta diplomityön kokeissa havaittiin vain kapillaarisessa kyllästyskosteuspitoisuudessa, vaikka kirjallisuuden perusteella korrelaatiota myös veden imeytymiskertoimeen olisi voinut löytyä. Ikävä tosiasia on, että tulosten suuri hajonta saattoi nyt tehdyissä kokeissa peittää alleen pienen pinta-alan korrelaation. Muodon vaikutus tuloksiin sen sijaan on huomattava. Muodon vaikutuksesta ei ole nyt löydetty aiempaa tutkimustietoa. Suuri osa käytettävissä olleista virhelähdekokeista on tehty neliön muotoisilla koekappaleilla. Diplomityön kokeiden perusteella aiempien virhelähdekokeiden tulokset ovat relevantteja muodosta huolimatta, mutta lukuarvot eivät ole vertailukelpoisia pyöreillä koekappaleilla tehtyihin kokeisiin.

Koekappaleen korkeudelle on vaikea antaa ohjeita. Niin kirjallisuuskatsauksen kuin tehtyjen kokeiden perusteella on selvää, että koekappaleen korkeus tulee valita tunnetun vedenimukäyttämisen perusteella. Sopivimman korkeuden määrittämiseksi voi olla tarpeen tehdä useampia erikorkuisia koekappaleita. Myös haluttu tulos vaikuttaa korkeuden valintaan. Vesirintaman tunkeutuminen koko koekappaleen läpi tasaisena rintamana ei ole välttämättä tärkeintä; korkeilla koekappaleilla tehtyjen kokeiden epälineaarisesta painonnousukäyrästä voidaan määrittää veden imeytymiskerroin vähintään yhtä luotettavasti kuin matalasta kappaleesta saadusta lyhyestä mittausdatasta. Koekappaleen korkeudella on suurempi merkitys kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden ja veden tunkeutumiskertoimen määrittämiseen.

Upotussyvyys ja katvealueet on todettu kirjallisuudessa ja nyt tehdyissä kokeissa pieniksi virhelähteiksi. Upotussyvyydellä on kuitenkin todettu näkyviä vaikutuksia materiaalin kyllästymisasteeseen ja siksi se tulisi rajoittaa pieneksi, ja suurta vaihtelua kokeen aikana tulisi välttää. Katvealueiden vaikutusta ei ole tutkittu, käsin mitattaessa koekappale usein kannatellaan alapinnaltaan, mutta näitä kannattimia ei ole nyt käsitel-

lyissä lähteissä kuvattu erityisen tarkasti. Diplomityön kokeiden perusteella pienet ilmakuplat eivät vaikuta koetulokseen. Ilmakuplat rinnastuvat muihin imupinnan katvealueisiin. Katvealueiden vaikutus hukkuu kokeen alun muiden virheiden joukkoon.

6 YHTEENVETO

Diplomityössä kehitettiin automaattinen vapaan veden imeytyslaitteisto sekä menetelmä veden imeytymiskertoimen, veden tunkeutumiskertoimen ja kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden laskemiseksi laitteistolla tehdyistä kokeista. Veden imeytymiskertoimen taustalla oleva teoria selvitettiin, ja teorian vedenimukokeelle asettamat reunaehdot kirjoitettiin auki. Teoriaan liittyy yhä myös epävarmuustekijöitä, mutta kirjallisuuskatsauksen perustella nykyinen teoria pitää paikkansa riittävän suurella varmuudella.

Laitteistolla tehtyjen kokeiden sekä kirjallisuuskatsauksen avulla selvitettiin vedenimukokeessa vaikuttavia virhelähteitä sekä niiden merkittävyyttä. Myös standardikatsaus tehtiin. Vapaan veden imeytyskoe -menetelmän sisältävistä standardeista kerättiin kokeen suorittamiseen liittyviä ohjeita. Laitteistolla tehdyissä virhelähdekokeissa varioitiin pinta-alaa, imupinnan muotoa sekä kylki- ja yläpinnan suojauksia. Tutkimuksen perusteella kirjoitettiin toimintatapaohje veden imeytymiskertoimen ja kapillaarisen kylästyskosteuspitoisuuden mahdollisimman luotettavaan määrittämiseen.

6.1 Mittaustekniikka

Automaattinen vapaan veden imeytyslaitteisto auttaa eliminoimaan koekappaleen punnitusta edeltävän kuivauksen aiheuttaman virhelähteen. Lisäksi saadaan mittauksen alkuvaiheesta luotettavia punnitustuloksia häiritsemättä veden imeytymistä. Automaattilaitteistolla tehtävässä kokeessa punnitus tehdään vesikosketuksen aikana, ja noste vaikuttaa punnitustulokseen. Nosteen vaikutus tuloksiin voidaan eliminoida joko vakioimalla upotussyvyys tai laskemalla upotussyvyyden muutosten vaikutus nosteeseen.

Upotussyvyyden vakiointi osoittautui vaikeaksi, ja lopullisessa mittaustavassa nostevaikutus eliminoidaan laskennallisesti kalibroitimittausten avulla. Kalibroitimittauksissa selvitettiin veden haihtumisnopeus, joka osoittautui riippuvaiseksi mittaushuoneen ilman suhteellisesta kosteudesta. Lisäksi haihtumisnopeuteen vaikuttaa oleellisesti mittaustaappien tiiviys. Haihtumisnopeuden arvioinnissa tapahtuvien virheiden vuoksi mittaustulokset ovat luotettavimpia verrattain nopeasti vettä imevillä materiaaleilla. Hitaasti vettä imevillä materiaaleilla on mielekästä jatkaa automaattilaitteistolla tehtyä mittausta käsinmittauksena.

6.2 Virhelähdekokeet

Virhelähdekokeiden perusteella imupinnan muotoon tulisi kiinnittää huomiota. Nyt tehdyissä kokeissa neliön muotoiset koekappaleet saivat systemaattisesti pyöreitä koekappaleita suuremmat veden imeytymiskertoimet ja kapillaariset kyllästyskosteuspitoisuudet. Tämän hetkisen tiedon mukaan kokeissa tulisi käyttää imupinnaltaan pyöreitä koekappaleita.

Imupinnan pinta-ala sekä kylki- ja yläpinnan suojaukset eivät nyt tehdyissä kokeissa osoittautuneet veden imeytymiskertoimen kannalta merkittäviksi muuttujiksi. Kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden arvoon näillä oli vaikutusta. Kylkien suojaus on syytä tehdä kosteutta läpäisemättömällä ja helposti levittyvällä sekä hyvin tarttuvalla aineella. Yläpinnan suojaaminen esimerkiksi pleksillä on järkevää tehdä kylkisuojauksen yhteydessä. Pinta-alan osalta standardin EN ISO 15148 noudattaminen tuottaa hyviä tuloksia.

Virhelähdekokeiden varmentamiseksi vastaavat tulokset tulisi toistaa muotoon leikatuilla koekappaleilla, jotta voidaan eliminoida valun vaikutus tuloksiin. Lisätutkimusta kaivattaisiin myös imupinnan hionnan karheuden vaikutuksesta veden imeytymiseen.

LÄHTEET

ASTM C1585-13. Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic cement concretes. 2013 ASTM International 6p.

ASTM C1699-09. Standard test method for moisture retention curves of porous building materials using pressure plates. 2009 ASTM International 4p.

Benazzouk A., Douzane O., Langlet T., Mezbreb K., Roucoult J.M., Quéneudec M. Physico-mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes. *Cement & Concrete Composites* 23(2007) pp.732-740

Bomberg M., Pazera M. Plagge R. Analysis of Selected Water Absorption Coefficient Measurements. *Journal of thermal environment & building sciences* 28(2005)3, pp.227-243.

Butt H-J., Graf K., Kappl M. *Physics and Chemistry of Interfaces*. Weinheim 2003 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 361 p.

Carmeliet J., Hens H., Roels S., Adan O., Brocken H., Cerny R., Pavlik Z., Hall C., Kumaran K., Pel L. Determination of the liquid water diffusivity from transient moisture transfer experiments. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*. 27(2004)4 pp.277-305.

Courard L., Degeimbre R. A capillary action test for the investigation of adhesion in repair technology. *Canadian Journal of Civil Engineering* 30(2003)6 pp.1101-1110

Hagentoft C-E. *Introduction to building physics*. Sweden, 2001, Studentlitteratur, Lund. 422p.

Hall C. Anomalous diffusion in unsaturated flow: Fact or fiction? *Cement and Concrete Research*. 37(2007) pp.378-385.

Hall C. Water sorptivity of mortars and concretes: a review. *Magazine of Concrete Research* 41(1989)147 pp.51-61

Hall C., Hoff W. D., Skeldon M. The sorptivity of brick: dependence on the initial water content. *Journal of Physics D: Applied Physics* 16(1983) pp.1875-1880.

Hall C., Hoff W. D., Wilson M. A. Effect of non-sorptive inclusions on capillary absorption by a porous material. *Journal of Physics D:Applied Physics* 26(1993) pp.31-34

Huang Y. An engineering approximation of material characteristics for input to heat, air and moisture transport model simulations. A Thesis in The Department of Building, Civil and Environmental Engineering. Canada 2003. Concordia University Montreal, Quebec, Degree of Master of Applied Science. 142p.

Ioannou I., Hamilton A., Hall C. Capillary absorption of water and n-decane by autoclaved aerated concrete. *Cement and Concrete Research* 38(2008) pp.766-771

Janz M. Moisture diffusivities evaluated at high moisture levels from series of water absorption tests. *Materials and Structures* 35(2002) pp.141-148

Kumaran M. K. A Thermal and Moisture Property Database for Common Building and Insulation Materials. Canada. 2006, Institute for Research in Construction, ASHRAE Transactions. 24p.

Kumaran M.K. Moisture Diffusivity of Building Materials from Water Absorption Measurements. *Journal of Building Physics* 22(1999)4 pp.349-355

Kurs M. Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral Building Materials. Fraunhofer-Institut 1996, Fraunhofer IRB Verlag. 106p.

Kurs M., Kiebl K. Determination of the moisture storage characteristics of porous capillary active materials. *Materials and Structures* 31(1998)10 pp.522-529.

Kurs M., Vik T. A. Determination of hygric material properties and calculation of the moisture balance of wooden prisms exposed to natural weathering. *Proceedings of the 5th Symposium 'Building Physics in the Nordic Countries', Göteborg, August 24-26, 1999.* pp.313-320

Köliö A., Lahdensivu J. 2015. Karbonatisoitumisen eteneminen olemassa olevissa betonijulkisivuissa ja -parvekkeissa sekä sisä rakenteissa. *Betoni* 1/2015. ss.64-69

Leppänen Minna. Diplomi-insinööri, yliopisto-opettaja, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikka / Maa- ja pohjarakenteet. Vapaamuotoinen haastattelu TTY:n maa- ja pohjarakenteiden laboratoriossa maamateriaaleille tehtävistä kosteusominaisuuksiin liittyvistä kokeista syksyllä 2013.

Liu Ch. Ruggedness Test of Water Absorption in AAC, Project in Building Materials Class B 6221 (Prof. Bomberg), Concordia University 2003

Lockington D., Parlange J. -Y., Dux P. Sorptivity and the estimation of water penetration into unsaturated concrete. *Materials and Structures* 32(1999) pp.342-347

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

Martys N. S., Ferraris, C. F. Capillary transport in mortars and concrete. *Cement and Concrete Research* 27(1997)5 pp.747-760.

Mittaustulosten käsittely. 2010 Helsinki, Aalto University, Department of Applied Physics. Laskentaohje. 31s. Saatavilla [<http://viesti.physics.aalto.fi/pub/kurssit/Tfy-3.15xx/Luentomat/Tulostenkasittely.pdf>]

Mukhopadhyaya P., Kumaran K., Normandin N., Goudreau P. Effect of Surface Temperature on Water Absorption Coefficient of Building Materials. *Journal of Building Physics* 26(2002)2 pp.179-195

NT Build 368. Concrete, repair materials: Capillary absorption. 1991 Nordtest. 3p.

NT Build 481. Building materials; Retention curve and pore size distribution. 1997 Nordtest. 3p.

Parlange M. B., Prasad S. N., Parlange J.-Y., Römkens M. J. M. Extension of the Heaslet-Alsne technique to arbitrary soil water diffusivities. *Water resources research* 28(1992)10 pp. 2793-2797

Pavlik Z., Černý R. Determination of Moisture Diffusivity as a Function of Both Moisture and Temperature. *International Journal of Thermophysics* 33(2012)8-9 pp.1704-1714

Pel L., Kopinga K., Brocken H. Moisture transport in porous building materials. Technische Universiteit Eindhoven, 1995. 105p.

Plagge R., Scheffeler G., Grunewald J. Automatic Measurement of Water Uptake Coefficient of Building Materials. Dresden University of Technology, Institute of Building Climatology, Germany. 8p.

Pfriem A.. Alteration of Water Absorption Coefficient of Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) due to Thermal Modification. *Drvna industrija* 62(2011)4, pp.311-313

RIL 255-1-2014 Rakennusfysiikka I. 2014, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 500s.

Roels S., Carmeliet J., Hens H., Adan O., Brocken H., Černý R., Pavlik Z., Hall C., Kumaran K., Pel L., Plagge R. Interlaboratory Comparison of Hygric Properties of Porous Building Materials. *Journal of Thermal Envelope and Building Science* 27(2004)4 pp.307-325

Ruuska T. Laastin ja betonin lämmönjohtavuuden ja ominaislämpökapasiteetin määrittäminen lämpövirtalevylaitteella. Diplomityö. Tampere 2014. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. 70s.

Sabir B.B, Wid S., O'Farrell M. A water sorptivity test for mortar and concrete. *Materials and Structures* 31(1988)10, pp.568-574

Scheffler G. Validation of hygrothermal material modelling under consideration of the hysteresis of moisture storage. Thesis of the academic degree doctor of engineering. Dresden 2008. Dresden University of Technology, Faculty of Civil Engineering. 236 p.

Scheffler G., Grunewald J., Häupl P. Calibration of an Engineering Model of hygrothermal material characteristics. contribution to the CIB W40 conference held in Glasgow, 1st-3rd September 2004

SFS-EN 1015-18. Methods of test for mortar for masonry – Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. 2002, CEN. 8p.

SFS-EN 1062-3. Paints and varnishes – Coating materials and coating systems for exterior masonry and concrete – Part 3: Determination of liquid water permeability. 2008, CEN. 8p.

SFS-EN 1097-10. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 10: Determination of water suction height. 2014, CEN. 13p.

SFS-EN 12087. Thermal insulating products for building applications - Determination of long term water absorption by immersion. 2013, CEN. 13p.

SFS-EN 12808-5. Grouts for tiles - Part 5: Determination of water absorption. 2008, CEN. 6p.

SFS-EN 13057. Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of resistance of capillary absorption. 2002, CEN. 12p.

SFS-EN 15801. Conservation of cultural property - Test methods – Determination of water absorption by capillarity. 2009, CEN. 11p.

SFS-EN 1609. Thermal insulating products for building applications - Determination of short term water absorption by partial immersion. 2013, CEN. 10p.

SFS-EN 16302. Conservation of cultural heritage - Test methods – Measurement of water absorption by pipe method. 2013, CEN. 15p.

SFS-EN 1925. Natural stone test methods - Determination of water absorption coefficient by capillarity. 1999, CEN. 7p.

SFS-EN 480-5. Admixtures for concrete, mortar and grout. Test methods. Part 5: Determination of capillary absorption. 2005, CEN. 6p.

SFS-EN 772-11. Muurauskappaleiden testimenetelmiä. Osa 11: Betoniharkkojen sekä keinokivi- ja luonnonkivikappaleiden kapillaarisen vedenimukyvyn ja poltettujen tiilien vedenalkuimunopeuden määrittäminen. 2000, CEN. 5s.

SFS-EN ISO 15148. Hygrothermal performance of building materials and products- Determination of water absorption coefficient by partial immersion. 2002, CEN. 16p.

SFS-EN ISO 15148. Hygrothermal performance of building materials and products- Determination of water absorption coefficient by partial immersion. 2002, CEN. 16p.

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

Vejmelková E., Pavlíková M., Jerman M., Černý R. Free Water Intake as Means of Material Characterization. Journal of Building Physics 33(2009)1 pp.29-44

Vinha J. RTEK-3511 Rakennusfysiikka. Luentomoniste 2011. Tampereen teknillinen yliopisto / Rakennustekniikan laitos. 520+246s.

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

Wilson M. A., Carter M. A., Hoff W. D. British Standard and RILEM water absorption tests: A critical evaluation. Materials and Structures 32(1999)10, pp.571-578