

Sami Huuhtanen

BETONIN HUOKOSJAKO – KOEKAP- PALEEN VALMISTUSVIRHEEN VAIKU- TUS TESTAUSTULOKSEEN

Opinnäytetyö
Rakennustekniikka

2017



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Sami Huuhtenen	Insinööri (amk), Rakennustekniikka	Joulukuu 2017
Opinnäytetyön nimi		42 sivua
Betonin huokosjako – koekappaleen valmistusvirheen vaikutus testaustulokseen		1 liitesivua
Toimeksiantaja Lujabetoni Oy Oy Sika Finland Ab		
Ohjaaja Lehtori Sirpa Laakso Laboratorioinsinööri Anna Eskola		
Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tuottaa tietoa erilaisten betonin huokosjaon määrittäystä varten valmistettavien koekappaleiden mahdollisten valmistusvirheiden vaikutuksesta testaustuloksiin. Lisäksi tutkittiin erilaisten koekappaletyyppien vaikutusta testaustulokseen, valmista rakennetta kuvaavan elementin testaustuloksia, kokeneen ja kokemattoman koekappaleenvalmistajan vaikutusta testaustuloksiin sekä vertailtiin samankaltaisten testausmenetelmien yhteneväisyyttä huokosjakolaskennan, laattakokeen sekä AVA-mittauksen osalta. Edellä mainittujen aiheiden ympäriltä on saatavilla niukasti tutkimustietoa.</p> <p>Tätä opinnäytetyötä varten valmistettiin erityyppisiä koekappaleita eri valmistajien toimesta kolmesta eri koemassasta. Valmistetuissa koekappaleissa simuloidut valmistusvirheet olivat koekappaleen yli- ja ali-tiivistäminen. Koekappaleet valmistettiin pintahieksi KymiLabs betonintestauspalveluiden laboratorioissa ja niistä selvitettiin huokosjako. Suoritetut laattakokeet sekä AVA-mittaukset tehtiin normaalein standardinmukaisin menetelmin.</p> <p>Opinnäytetyön tutkimusosiossa saatujen tulosten pohjalta voidaan päätellä, että valmistusvirheet aiheuttavat testaustuloksiin huomattavia poikkeamia normaalisti eli standardin osoittamalla tavalla valmistettuihin koekappaleisiin nähden. Koekappaleen valmistajan vaikutus testaustuloksiin ei selvinnyt kunnolla tässä opinnäytetyössä. Sen selvittämiseksi tulisi asiaa tutkia lisää ja suuremmalla otannalla.</p> <p>Opinnäytetyössä testien vertailemiseksi suoritetut laattakokeet ja AVA-kokeet osoittautuivat verrattuna pintahieestä määritettyyn huokosjakoon verrattuna samankaltaisiksi. Eri testausmenetelmien tuottamissa tuloksissa oli havaittavissa koemassojen kesken samansuuntaisia eroja.</p> <p>Tutkimuksen tuottamat tulokset edustavat osaltaan pientä otantaa. Otannan pienuus tulee huomioida tehtäessä johtopäätöksiä niiden pohjalta. Tulosten pohjalta on kuitenkin hyvin havaittavissa suuret linjat, joita olisi mahdollista hyödyntää jatkotutkimuksissa.</p>		
Asiasanat betoni, suojahuokosjako, pakkasenkestävyys, pintahie		

Author (authors)	Degree	Time
Sami Huuhtanen	Bachelor of Engineering	December 2017
Thesis title Spacing factor of concrete – failures while making test specimens and their effect on the test results		42 pages 1 pages of appendices
Commissioned by Lujabetoni Oy Oy Sika Finland Ab		
Supervisor Sirpa Laakso, Senior Lecturer Anna Eskola, Laboratory Engineer		
<p>Abstract</p> <p>The objective of this thesis was to produce knowledge of the differences in spacing factor test results of concrete caused by failure while making test specimens. The investigation was made with different types of specimens and some concrete elements to simulate real structure. The test results of specimens made by experienced and non-experienced specimen makers were also investigated. Determining the equality of different types of freeze resistance tests was also an objective of this thesis.</p> <p>The main test method used in this thesis was determining the spacing factor of surface section specimens. The specimens were made of three different concretes and with different types of specimen molds. The specimens were prepared for testing and analyzed in KymiLabs concrete testing services.</p> <p>The testing results of the investigation show that simulated failures while making test specimens cause significant difference in spacing factor of concrete compared to specimen made in a normal way as defined in standards. The effect on the test results caused by different specimen makers was not fully determined in this investigation.</p> <p>Different freeze resistance testing methods seemed to be well equal. The slab test and AVA-measurements used in this thesis gave quite similar test results compared to the spacing factor measured from the surface section. Differences in test results between different concretes were correlating well between used testing methods.</p>		
<p>Keywords</p> <p>concrete, spacing factor, freeze resistance, surface section</p>		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
1.1	Opinnäytetyön tavoitteet	6
1.2	Lujabetoni Oy.....	7
1.3	Oy Sika Finland Ab	7
2	TUTKIMUSMENETELMÄT	8
2.1	Betonin pakkasenkestävyys	8
2.2	Pakkasenkestävyyttä koskevat vaatimukset.....	9
2.3	Ilmahuokosparametrit	11
2.4	Määritelmiä liittyen pintahietutkimukseen	12
2.5	Jäädytys-sulatuskoe — pintarapautuminen	14
2.6	Jäädytys-sulatuskoe - sisäinen vaurio	16
2.7	AVA-kokeet.....	16
2.8	Ilmamäärämittaus	18
3	TUTKIMUS	19
3.1	Tutkimusohjelma.....	19
3.2	Tutkimuksessa käytetyt betonimassat	20
3.3	Koekappaleiden ulkomuoto	20
3.4	Koekappaleiden valmistustavat	22
3.4.1	Koekappaleiden normaali valmistus	22
3.5	Simuloidut virheet	23
4	TESTAUSTULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI	23
4.1	Koekappaleen valmistajan vaikutus.....	24
4.1.1	Valmistajan vaikutus huokosjakoon	25
4.1.2	Valmistajan vaikutus ilmamääriin.....	26
4.2	Koekappaletyypin ja valmistustavan vaikutus.....	28
4.2.1	Vaikutukset huokosjakoon	28
4.2.2	Vaikutus ilmamääriin.....	32

4.3	Huokosparametrit – visuaalinen analysointi.....	35
4.4	Ava-mittaukset.....	36
4.5	Laattakoe.....	38
5	POHDINTA.....	39
5.1	Koekappaleiden valmistustapa.....	39
5.2	Koekappaleiden valmistajan vaikutus testaustuloksiin.....	40
5.3	Testausmenetelmien keskinäinen vastaavuus.....	41
5.4	Jatkotutkimusehdotukset.....	41
	LÄHTEET.....	43

LIITE

Liite 1. Pintahiekokeiden tulosten koontitaulukko

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää betonin huokosjakotutkimusta varten valmistettujen koekappaleiden valmistajan ja mahdollisten valmistusvirheiden vaikutus testaustuloksiin. Lisäksi tässä työssä tutkittiin myös erilaisten pakkasenkestävyyden arviointiin tarkoitettujen testien yhtenevyyttä laattakokeen, huokosjakotutkimuksen ja Ava-kokeiden osalta.

1.1 Opinnäytetyön tavoitteet

Tähän opinnäytetyöhön ryhdyttiin, jotta Lujabetoni Oy:lle saataisiin tarkempaa ja laajempaa tietoa erilaisten betonin pakkasenkestävyydestien koekappaleiden valmistustavan sekä valmistajan vaikutuksesta kokeissa saatuihin testaustuloksiin. Työn tarkoituksena oli selvittää simuloitujen valmistusvirheiden vaikutus huokostetun betonin ilmahuokosparametreihin.

Tutkimuksia varten valmistettiin koekappaleita erikokoisiin ja erimuotoisiin muotteihin, joita betonitehtaat tyypillisesti käyttävät näytteitä valmistaessaan. Lisäksi valmistettiin betonilaattoja, joista myöhemmin porattiin näytteitä tavoitteena kuvata näytteenottoa valmiista betonielementistä. Vastaavanlaiset koekappalesarjat valmistettiin kolmesta eri betonilaadusta, jotta saavutettaisiin laajempi otanta ja voitaisiin arvioida betoniladun vaikutusta sen käyttäytymiseen näytteen valmistuksessa.

Työssä tutkittiin rinnakkain eri pakkasenkestävyyttä määrittäviä testejä suorittamalla kokeita varten valmistetuille betoneille pääasiallisena testinä käytetyn pintahiekokeen lisäksi AVA-mittauksia sekä laattakokeita. Pintahiekokeita varten tarvittuja koekappaleita valettiin kaksi keskenään samanlaista sarjaa kahden eri henkilön toimesta. Tavoitteena oli tutkia kokemuksen vaikutusta koekappaleiden valmistuksen onnistumiseen.

Tutkimuksen tavoitteena oli saada tietoa, jonka pohjalta voidaan muodostaa selkeä työohje tehtaalla tapahtuvaa koekappaleiden valmistamista varten. Lisäksi tavoitteena oli tutkia erilaisten betonin pakkasenkestävyyttä mittaavien testien tulosten yhtenevääsyyttä.

Tutkimuskysymykset:

- mikä on erilaisten valmistusvirheiden vaikutus betonin huokosjakoon?
- miten koekappale tulisi valmistaa, jotta saataisiin mahdollisimman luotettavia huokosjakotuloksia?
- millainen yhtäläisyys saavutetaan pintahie-, laatta- sekä AVA-kokeiden välillä?

1.2 Lujabetoni Oy

Lujabetoni Oy on suomalainen perheyhtiö ja yksi maamme suurimmista valmisbetoni- ja betonielementtitoimittajista. Yhtiöllä on vahva tausta kehitystoiminnasta alalla, ja se pyrkii aktiivisesti ylläpitämään innovatiivisuutta sekä kehityshakuisuutta toiminnassaan. Esimerkkejä kehitystyöstä ovat elementtirakenteiset tuulivoimaloiden jalustat ja se, että yhtiö on mukana maailman ensimmäisen betoniseinien 3D-tulostimen kehittämisessä. Lujabetoni Oy toimii Suomessa, Ruotsissa sekä Venäjällä ja yhtiöllä on kokonaisuudessaan 26 tehdasta. Määrä pitää sisällään elementti-, betonituote- sekä valmisbetonitehtaita. Lujabetonin palveluksessa työskentelee reilut 600 henkeä. (Lujabetoni Oy.)

1.3 Oy Sika Finland Ab

Oy Sika Finland Ab on vuonna 1985 suomeen perustettu maayhtiö. Se valmistaa betonin lisäaineita Espoossa sijaitsevassa tehtaassaan. Sen palveluksessa oli 47 henkilöä vuonna 2015. (Oy Sika Finland AB 2017a.)

Oy Sika Finland Ab tarjoaa kattavan valikoiman erilaisia betonin lisäaineita ja betoniteollisuudessa käytettäviä kemikaaleja. Valikoimaan kuuluvat muun muassa valmisbetonin lisäaineet elementtiteollisuudessa käytettävät lisäaineet, jälkihoitoon tarvittavat aineet, hidastimet sekä kiihdyttimet. (Oy Sika Finland AB 2017b.)

2 TUTKIMUSMENETELMÄT

2.1 Betonin pakkasenkestävyys

Betonin pakkasenkestävyyttä voidaan määrittää monella eri tavalla. Tyypillisiä tapoja ovat huokosjaon määrittäminen sekä betonin pinnan suora pakkasrasitustesti laattakokeella.

Betonin jäätymis-sulamisrasitusta koskevat rasitusluokat ovat XF1, XF2, XF3 sekä XF4. Taulukossa 1 on esitetty edellä mainittujen rasitusluokkien määritelmät sekä esimerkkitapauksia rasitusluokkiin kuuluvista rakenteista ja rakenneosista. Erottelevia tekijöitä rasitusluokilla on betonin odotettavissa oleva vedellä kyllästymisen aste, joka riippuu esimerkiksi siitä, onko kyseessä pystyrakenne, kuten seinäelementti, vai vaakarakenne kuten, parvekelaatta sekä mahdollisesti pinnan sulana pitämiseen käytettävät jäänsulatusaineet eli käytännössä esimerkiksi infrarakenteet, joissa käytetään sulana pitoon tiesuolaa.

Taulukko 1. betonin jäätymis-sulamirasitusluokkien määrätymisperusteet. (Suomen betoni-yhdistys 2016, 18.)

Jos betoni on märkä ja siihen kohdistuu kosteuden lisäksi merkittäviä jäätymis-sulamirasituksia, rasitus luokitellaan seuraavasti:

XF1	Kohtalainen vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita	Sateelle ja jäätymiselle alttiit pystysuorat betonipinnat. Julkisivut, sokkelit. Suolaamattomien teiden siltojen osat kuten kansilaatta, palkit, maa- ja välituet.
XF2	Kohtalainen vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet	Sateelle ja jäätymiselle alttiit pystysuorat betonipinnat, jotka ovat alttiina jäätymiselle ja ilman kuljettamalle jäänsulatusaineille. Meluseinät ja sokkelit tien vieressä. Suolattavien teiden siltojen osat kuten päällysrakenteen palkit ja kansilaatat, maa- ja välituet.
XF3	Suuri vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita	Sateelle ja jäätymiselle alttiit vaakasuorat betonipinnat. Parvekkeet, siltapilarit ja muut rakenteet sisävesien vesirajassa, patorakenteet, makean veden altaat. Suolaamattomien teiden siltojen osat kuten reunapalkit, siirtymälaatat, pilarimaiset välituet, rengaskehäsiltojen peruslaatat ja vesistösiltojen suojaamattomat vedenvaihtelualueen rakenteet.
XF4	Suuri vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet tai merivesi	Suoralle jäänsulatusaineroiskeelle ja jäätymiselle alttiit vaakasuorat betonipinnat ja jäänsulatusaineille alttiit teiden siltojen kannet. Pysäköintitasot, päällysteet, autotallit. Suolattavien teiden siltojen reunapalkit, siirtymälaatat, betonikaiteet, rengaskehän peruslaatat. Välituet, kun sillan alittavaa tietä suolataan. Meressä olevan sillan suojaamattomat rakenteet tasolta NW-1 ylöspäin.

2.2 Pakkasekestävyyttä koskevat vaatimukset

Koska jäätymis-sulamiskestävyyden testaamiseen on monia eri menetelmiä, on jokaista rasitusluokkaa koskevat vaatimukset määritetty erityyppisille testausmenetelmille erikseen. Taulukossa 2 on esitetty eri rasitusluokkien mukaan annettuja maksimiarvoja jäädytys-sulatuskestävyyttä kuvaaville parametreille. Taulukossa on myös hyvin havaittavissa laattakokeen ja huokosjaonmäärityksen tulosten väliset vastaavuudet toisiinsa nähden, eli se, millaiset arvot kustakin testistä tulisi betonin saada, jotta sen voidaan katsoa täyttävän sille annetut vaatimukset halutussa rasitusluokassa.

Taulukko 2. pakkasenkestävyydelle asetetut vaatimukset rasitusluokittain. (Suomen betoniyhdistys 2016, 158.)

Suunniteltu käyttöikä [a]	Rasitusluokka	1		2			3	
		Huokosjako VTT TEST-R003-00-2010 tai SFS-EN 480-11:2005 mukaan ^{a)}		Jäädytys-sulatuskoe, SFS 5447 ^{c)}			Laattakoe CEN/TR 15177 luokissa XF1 ja XF3 ^{d)} , CEN/TS 12390-9 luokissa XF2 ja XF4, jälkimmäisessä väliaine 3 % NaCl-liuos	
		Enimmäisarvo [mm]		Sykliä lukumäärä	Taivutus- tai halkaisu-vetolu- juuksien suhde [%]	Suhteellinen dynaaminen kimmokerroin γ [%]	Rapauma m [g/m ²]	Suhteellinen dynaaminen kimmokerroin γ [%]
		$v/s > 0,40$	$v/s \leq 0,40$					
50	XF1	0,27	0,27	100	≥ 67	≥ 75	$m_{56} \leq 500$	$\gamma_{56} \geq 67$
	XF2	0,25	0,30	-	-	-	$m_{56} \leq 650$	-
	XF3	0,23	0,23	300	≥ 67	≥ 75	$m_{56} \leq 200$	$\gamma_{56} \geq 75$
	XF4	0,25	0,30	-	-	-	$m_{56} \leq 350$	-
100	XF1	0,25	0,25	300	≥ 67	≥ 75	$m_{56} \leq 200$	$\gamma_{56} \geq 75$
	XF2 ^{b)}	0,25	0,30	-	-	-	$m_{56} \leq 250$	-
	XF3	0,22	0,22	-	-	-	$m_{56} \leq 100$	$\gamma_{56} \geq 85$
	XF4 ^{b)}	0,25	0,30	-	-	-	$m_{56} \leq 150$	-

Lukuarvon puuttuminen ruudusta merkitsee, että kyseinen koemenetelmä ei sovellu rivin osoittamaan rasitusluokkaan.

^{a)} Referenssimenetelmänä käytetään VTT TEST-R003-00-2010. Huokosjako voidaan selvittää ohut- tai pintahieestä myös muulla soveltuvalla menetelmällä, jonka korrelaatio suhteessa referenssimenetelmään on todettu testauslaitosten välisellä tasokokeella.

^{b)} InfraRYL kohdan 42020.1.2 mukaiset vaatimukset.

^{c)} Vaatimuksenmukaisuus voidaan osoittaa joko betonin vetolujuuksien tai dynaamisten kimmokerrointen perusteella, joista toisen vaatimuksen tulee täytyä.

^{d)} Rasitusluokissa XF1 ja XF3 vaatimuksenmukaisuus on osoitettava sekä kimmokerroimen että pinnan rapauman osalta, joista kummankin on täyttyvä.

^{e)} Rasitusluokissa XF2 ja XF4 vaatimuksenmukaisuus osoitetaan pinnan rapauman perusteella.

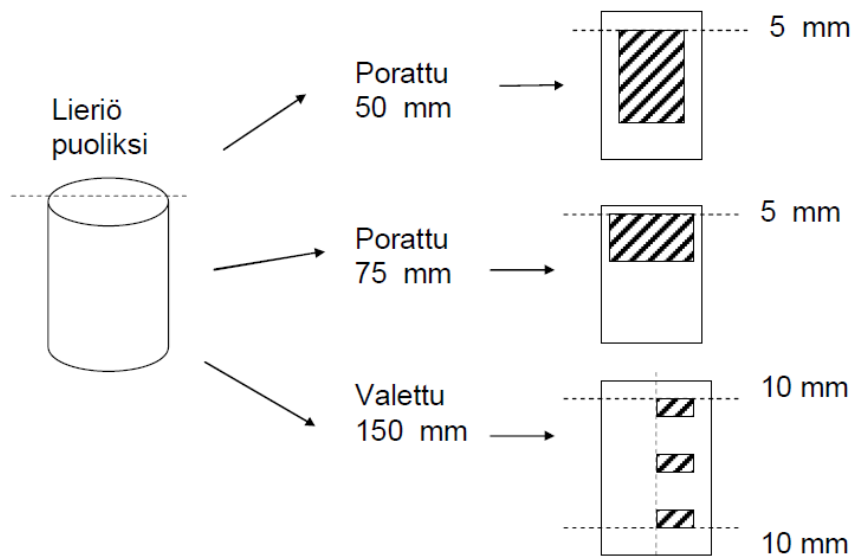
2.3 Ilmahuokosparametrit

Betonin pakkasenkestävyyttä tarkasteltaessa ohut- tai pintahiekokein kyse on eri ilmahuokosparametrien, kuten huokosjaon ja ominaispinta-alan, selvittämisestä. Pintahie on näyte, jota tarkastellaan suoraan hiotulta ja kiillotetulta betonipinnalta. Ohuthie eroaa pintahieestä siten, että siinä näyte on kiinnitettynä ohuelle lasille, jonka pinnalla se hiotaan ohueksi ja kiillotetaan analyysia varten. Ohuthieen paksuus tulisi olla 0,025mm. Tätä tutkimusta varten, kun hienäytteestä aiotaan määrittää vain huokosjakoa, on järkevin tapa käyttää pintahietttä ohuthieen sijaan. Pintahie on nopeampi ja helpompi valmistaa. Tässä tutkimuksessa menetelmänä käytetty pintahie on rinnakkaiskokein osoitettu vertailukelpoiseksi ohuthieen kanssa.

Pintahiekokeesta saatavat huokosparametrit:

- kokonaisilmamäärä
- suojahuokosten ilmamäärä
- tiivistyshuokosten ilmamäärä
- huokosjako
- huokosten ominaispinta-ala
- pastaprocentti

Ilmahuokosparametreja määritettäessä voidaan kerralla määrittää vain yhden betonikoostumuksen sekä valmistusmenetelmän aikaansaama huokoskoostumus. Hienäyte tulee valmistaa siten, että tutkittava pinta on kohtisuorassa betonin pintaa vasten. Tutkittavaksi pinnaksi valitaan useimmiten ulkopinta, sen suurimman pakkasrasituksen vuoksi. Valittaessa pintahieen valmistuskohtaa tulee huomioida, että jos betonissa kiviaineksen maksimiraekoko on yli 16 mm, valitaan näytteet aina sellaisesta kohdasta, jossa sementtipastaa on yli 23 % näytteen tutkittavasta pinta-alasta. Kuvassa 1 on esitetty periaatteet näytteen valmistuskohdista. Hieen tavanomaiset valmistuskohdat valitaan porakappaleista 5 mm ulkopinnasta lähtien syvemmälle. Käytettäessä pienempää kuin 30 x 50 mm² näytekokoa joudutaan 150 mm lieriöstä tai kuutiosta ottamaan kolme erillistä hietttä. (VTT Expert Services Oy 2011, 4-6.)



Kuva 1. Ilmahuokosparametrinäytteenoton periaatteet koekappaletyypeittäin. (VTT Expert Services Oy 2011, 6.)

Tutkimuksissa käytetään mikroskooppia, johon on liitetty erillinen siirtopöytä. Sen avulla voidaan tarkastella verrattain suuria pinta-aloja siirtämättä näytettä käsin. Siirtopöydän, mikroskoopin ja kameran toimintoja ohjataan tietokoneella, jossa käytetään erityistä ohjelmistoa. Käytännössä tietokone kuvaa näytettä ja analyysin tekijä lukee näytöltä muun muassa huokosten määrää ja kokoa tarkasteltavassa kohdassa.

2.4 Määritelmiä liittyen pintahietutkimukseen

Ilmahuokosella tarkoitetaan näytteessä olevan sementtipastan sisältämää yli 0,02 mm halkaisijaltaan olevaa ilmakuplaa. Ilmahuukonen voi olla joko suoja- tai tiivistyshuukonen riippuen sen koosta. **Suojahuukosella** tarkoitetaan 0,02 mm – 0,8 mm kokoista ilmahuukosta. **Tiivistyshuukoseksi** lasketaan siis suuremmat kuin 0,8 mm ilmahuukokset. Ilmamäärä on analyysissä havaittujen ilmahuukosten tilavuus suhteessa betonin tilavuuteen. Suojahuukosten vaipan pinnan sekä tilavuuden suhdetta kutsutaan **ominaispinta-alaksi**. **Pastaprosentti** tarkoittaa betonin sisältämän sementtipastan suhteellista määrää. Pastaprosenttiin ei kuulu sementtipastan sisältämien ilmahuukosten osuus. (VTT Expert Services Oy 2011, 4-6.)

Huokosjako tarkoittaa maksimietäisyyttä mistä tahansa kohtaa sementtipastaa suojahuokosen kehälle. (VTT Expert Services Oy 2011, 4). Asia on esitetty visuaalisesti kuvassa 2. Toisin sanoen kun betonissa on vettä sementtipastassa, joutuu se kulkemaan keskimäärin korkeintaan huokosjaon pituisen matkan päästäkseen suojahuokoseen. Huokosjako lasketaan alla esitetyllä Powersin kaavalla yhtälöstä 1, jos pastaprocentin suhde kokonaisilmamäärään on suurempi tai yhtä suuri kuin 4,34, ja yhtälöstä 2, jos edellä mainittu suhde on alle 4,34.

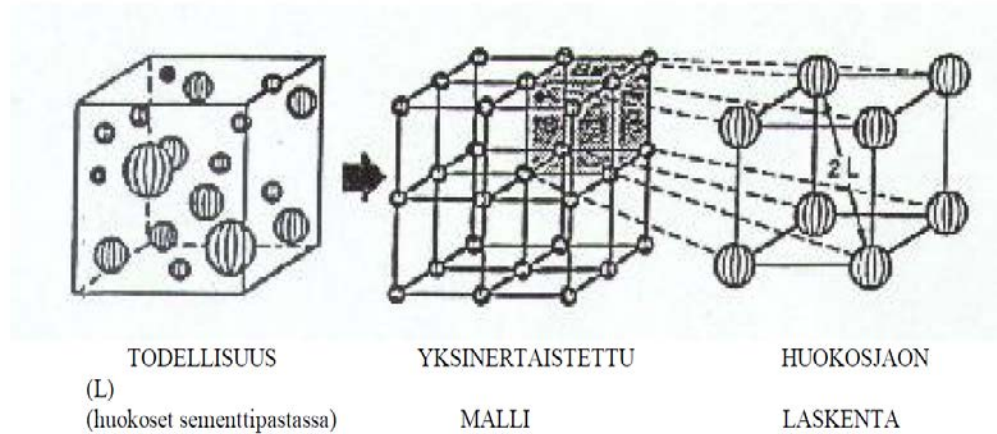
$$L = \frac{3}{\alpha} \left[1,4 \left(1 + \frac{P}{A} \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (1)$$

jossa	L	huokosjako	[mm]
	α	ominaispinta-ala	[mm ² /mm ³]
	P	pastaprocentti	[%]
	A	kokonaisilmamäärä	[%]

$$L = \frac{P}{A\alpha} \quad (2)$$

jossa	L	huokosjako	[mm]
	p	pastaprocentti	[%]
	A	kokonaisilmamäärä	[%],
	α	ominaispinta-ala	[mm ² /mm ³]

Kuvassa 2 on esitetty visuaalisesti periaate huokosjaon laskemisesta Powersin kaavalla. Kuvassa vasemmalla on todenmukainen tilanne näytteenä olevassa betonissa. Keskellä on kuvattu yksinkertaistettu tilanne, jossa näyte ja sen sisältämät suojahuokokset on jaettu tasaiseksi ruudukoksi. Oikealla on kuvattu yksi ruudukon osa. Oikeanpuoleisessa kuvassa 2L on suurin etäisyys huokosesta huokoseen, jolloin L on suurin etäisyys keskeltä sementtipastaa huokoseen.



Kuva 2. huokosjakolaskennan periaate Powers'in kaavalla kun pastaprosentti suhteessa kokonaisilmamäärään on suurempi tai yhtä suuri kuin 4,34. (VTT Expert Services Oy 2011, 5.)

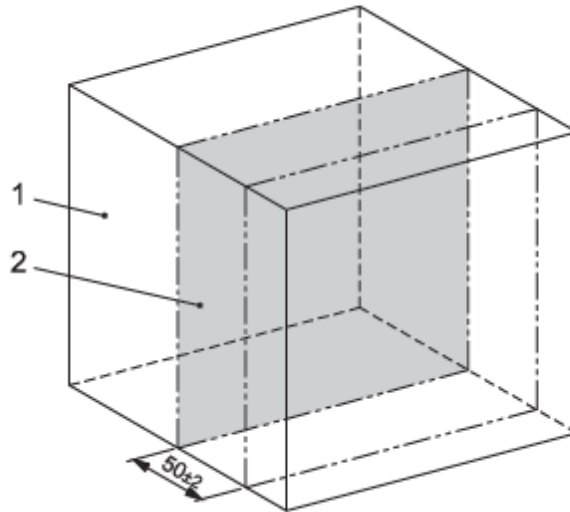
Ilmahuokosiin liittyen on todettu joissain tapauksissa huokosten yhdistyvän keskenään ennen betonin lopullista kovettumista. Yhdistymiseen voi johtaa esimerkiksi huokosten liikkuminen sementtipastassa niiden oman pintaan pyrkimisen vuoksi tai jokin ulkoinen tekijä. Huokosia analysoitaessa tulee aina kiinnittää huomiota siihen, ettei epäselvästi muodostuneita tai yhdistyneitä huokosia tulkita väärin.

2.5 Jäädytys-sulatuskoe — pintarapautuminen

Jäädytys-sulatuskestävyyttä mittaava laattakoe on betonin pakkasenkestävyyden testausmenetelmä. Menetelmä perustuu kappaleen sahatulla pinnalla pidettävän nesteen jäätymiseen ja sulamiseen ja kappaleesta irronneen materiaalin määrän tarkasteluun. Lisäksi voidaan suorittaa suhteellisen dynaamisen kimmokertoimen määrittäminen käyttäen ultraäänimittausta, jolla pyritään selvittämään mahdollista kappaleen sisäistä vaurioitumista. Ultraäänimittauksen tarve ja sille asetetut vaatimukset on esitetty taulukossa 2.

Kuvassa 3 on esitetty laattakokeen koekappaleen valmistusperiaate 150 mm kuutiosta. Koekappale sahataan halki ja saadusta puolikkaasta sahataan koetta varten 50 mm paksu pala. Koekappale vuorataan ulkopuolelta kosteuden siirtymisen estävällä kumimatolla. Koekappaleita säilytetään ennen testiä säähoneessa, jonka lämpötila on 20 ± 2 celsiusastetta ja suhteellinen kosteus 65 ± 5 %. (CEN/TS 12390-9 2016, 6-8.)

Dimensions in millimetres



Kuva 3. Laattakoe-koekappaleen valmistusperiaate. (CEN/TS 12390-9 2016, 8.)

Koekappaleet altistetaan jäädytys-sulatusrasitukselle kaapissa, jonka lämpötilaa muutetaan syklistesti noin +20 ja -20 celsiusasteen välillä. Kukin sykli kestää vuorokauden. Syklejä suoritetaan jatkuvasti ja määrätyn väliajoin kappaleen pinnalle syntynyt rapautunut materiaali poistetaan mekaanisesti. Materiaali kerätään talteen, jonka jälkeen se kuivataan ja punnitaan. Irronnut materiaali kuvastaa tutkittavan pinnan rapautumaa. (CEN/TS 12390-9 2016, 10-12.)

Pintarapauma voidaan määrittää yhtälöstä 3.

$$S_n = \frac{m_{s,n}}{A} \cdot 10^3 \quad (3)$$

jossa	S_n	rapauma	[kg/m ²]
	$m_{s,n}$	irronnut materiaali	[g]
	A	koekappaleen testipinta-ala	[mm ²]

Tulokset kertovat kyseisen betonin pinnalta neliömetrin alueella jäädytys-sulatusrasituksen seurauksena irronnen materiaalin määrän. Tulosta voidaan verrata taulukossa 2 eri rasiusluokille annettuihin irronneen materiaalin raja-arvoihin joita taulukossa kuvastaa suure m_{56} . Joka esimerkiksi 50 vuoden suunnitellulla käyttöiällä ja XF1 rasiusluokalla on ≤ 500 g/m².

2.6 Jäädytys-sulatuskoe - sisäinen vaurio

Kuten taulukossa 2 on esitetty, on koekappaleen suhteellisen kimmokertoimen muutokselle laattakokeen aikana annettu vaatimuksia. Tällä menetelmällä selvitetään koekappaleeseen muodostunutta sisäistä vauriota sekä sen aiheuttamaa suhteellisen kimmokertoimen muutosta.

Jäädytys-sulatuskokeen aikana koekappaleeseen syntynyttä sisäistä vauriota voidaan mitata dynaamisen kimmokertoimen muutoksella, joka voidaan määrittää laskemalla ultraäänen läpäisyajasta tarkasteluhetkellä käyttäen referenssikohtana vastaavaa läpäisyaikaa testin aloitushetkellä. (CEN/TR 15177:2006, 12-13). Taulukossa 2 on esitetty rasitusluokkien mukaan vaatimukset suhteelliselle dynaamiselle kimmokertoimelle laattakokeen jälkeen.

2.7 AVA-kokeet

AVA-mittaus on tuoreen betonimassan testausmenetelmä, jolla pyritään saamaan tietoa betonin sisältämän ilman laadusta. Menetelmä perustuu betonimassasta otetun näytteen sekoittamiseen laitteessa ja siitä irtoavien ilmakuplien määrän ja koon havainnointiin. Laitteessa käytetään erityistä nestettä, johon vapautuessaan ilmakuplat säilyttävät alkuperäisen kokonsa sekä nousevat hitaammin ja hallitummin kohti keräysastiaa. Suuret ilmahuokokset nousevat nopeammin, pienemmät huokokset nousevat hitaammin. (Germann Instruments A/S 2006, 4.)

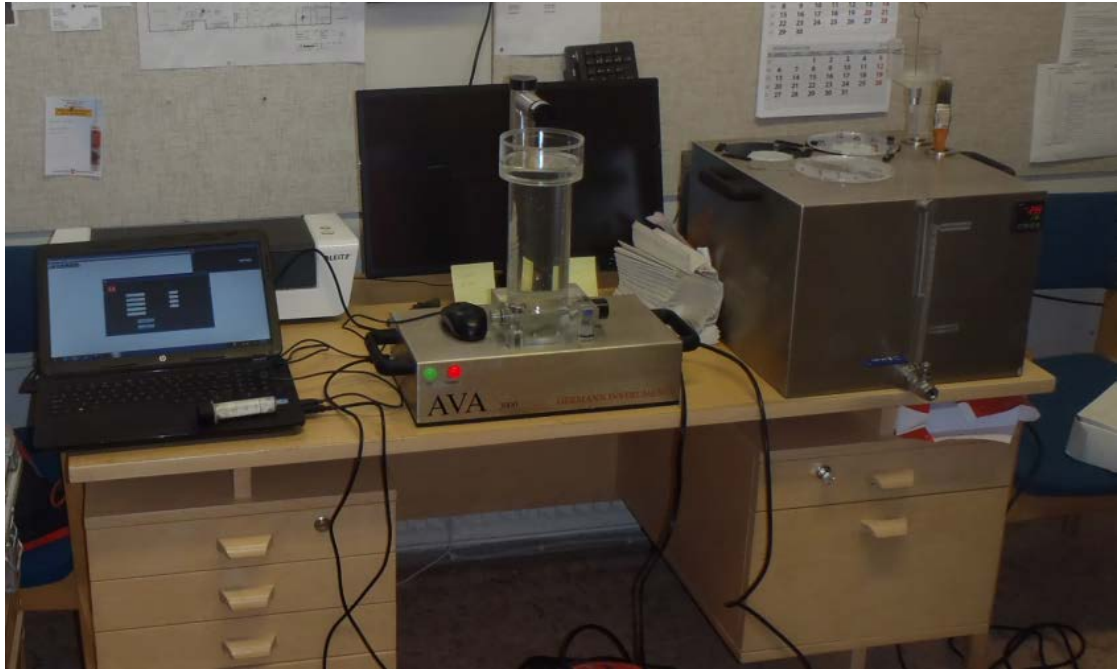
Ava-koe on tuoreelle betonimassalle tyypillisesti tehdasympäristössä tai sen välittömässä läheisyydessä tehtävä koe. Ava-kokeet antavat nopeasti tietoa betonin huokosrakenteesta, jolloin se on hyvä menetelmä esimerkiksi reseptien kehittämiseen ja säätöön. Ava-kokeita suoritetaan haluttaessa edellä esitettyjen menetelmien lisäksi, ja siitä saatuja tuloksia analysoidessa voidaan verrokkina käyttää hiekokein saadulle huokosjolle annettuja vaatimuksia.

AVA-koetta varten otettua näytettä tulisi altistaa mahdollisimman vähän tärinälle ja muille rasituksille, jotka voivat aiheuttaa ilman poistumista näytteestä. Myös kokeen aikana on laitteiston vaa'an erittäin suuren herkkyyden vuoksi varottava ja vältettävä mahdollisimman hyvin värähtelyä ympäristössä.

Saadut ilmahuokosmäärät ja koot muutetaan vastaamaan standardissa ASTM C 457 esitettyä kovettuneen betonin pakkasenkestävyyden arviointiin tarkoitettua huokosjaonmääritysmenetelmään tarvittavia laskuparametreja. (Germann Instruments A/S 2006, 4). Kyseessä on niin sanottu viivamenetelmä. Käytännössä siis normaalisti huokosjakolaskennasta saatavia arvoja korvataan AVA-mittauksesta saatavilla arvoilla.

Ava-mittaukselle on annettu laitevalmistajan puolesta määreitä mitattavan betoninäytteen laadulle sekä käytettävän veden ja mittaustnesteen lämpötilalle. Nesteiden lämpötila tulee mittaushetkellä vastata lämpötilaa, jolle laitteisto on kalibroitu. Nesteiden lämpötilan tulee olla 21 ja 25 celsiusasteen välillä. Jos mittauksia suoritetaan liian kylmällä tai lämpimällä nesteellä, vaikuttaa lämpötila nesteiden viskositeettiin, jolloin testaustuloksia ei voida pitää luotettavina. Mitattavan betonin ilmamäärän tulee olla yli 3,5 % ja alle 10 %. Alarajan alle jäävän ilmamäärän aiheuttama epävarmuus mittauksessa perustuu ilmahuokosten erittäin pieneen kokoon sekä laitteen vaa'an epätarkkuuteen niin pienillä massan muutoksilla. Liian suuri ilmamäärä voi aiheuttaa nesteessä hallitsematonta turbulenssia, joka aiheuttaa mittauksen epätarkkuutta. (Germann Instruments A/S 2006, 5.)

Kuvassa 6 nähdään AVA-3000-laitteisto toimintakunnossa. Oikealla on lämmittimellä varustettu vesisäiliö, keskellä varsinainen mittalaite ja vasemmalla datan keruuseen tarkoitettu tietokone. Keskellä oleva läpinäkyvä lieriö on kammio, jossa kuplien nousua erikoisnesteessä ja vedessä tutkitaan.



Kuva 4. AVA-3000 Laitteisto toimintakuntoon laitettuna.

2.8 Ilmamäärämittaus

Pakkasenkestävältä betonilta vaaditaan tyypillisesti halutuissa rajoissa olevaa ilmamäärää. Esimerkiksi Ava-koe sekä pintahiekoe tuottavat tietoa betonin ilmamäärästä, mutta se voidaan selvittää myös helposti tuoreelle betonille suoritetulla ilmamäärämittauksella.

Ilmamäärämittaus on hyvin yksinkertainen, nopea ja suhteellisen luotettava menetelmä määrittää tuoreen betonimassan kokonaisilmamäärä. Sen huono puoli on se, ettei se kerro huokosten koosta tai ovatko betonin sisältämät huokokset suoja- vai tiivistyshuokosia. Tutkimuksessa käytettiin ilmamäärämittaukseen niin sanottua painemenetelmää.

Painemittarimenetelmällä ilmamäärän mittaus perustuu tiedossa olevaan ilmamäärään tiedossa olevassa paineessa. Sitä verrataan betonin ilmamäärään, jota ei tunneta. Laitteistoon kuuluu painemittari, jonka asteikko on asetettu vastaamaan betonin ilmamäärää. Menetelmässä tarvittavaan laitteistoon kuuluu vähintään 5 l astia, johon tutkittava betoni laitetaan, astian kansi, jossa on painesäiliö ja -mittari sekä betonin tiivistämiseen tarvittava välineistö. Säiliö täytetään betonilla ja paine vapautetaan, jolloin painemittari saadaan osoittamaan betonin ilmamäärää. (SFS-EN 12350-7 2009. 5-9.)

3 TUTKIMUS

3.1 Tutkimusohjelma

Taulukossa 3 on esitetty eri valmistajien, valmistustapojen sekä koekappale-tyyppien muodostamat yhdistelmät. Koekappaleita valmistettiin sekä kokeen tekijän että harjoittelijan toimesta. Käytettyjä valmistustapoja oli normaali standardin mukainen valmistus, yli-tiivistys ja ali-tiivistys. Taulukossa esitettyjen koekappaleiden lisäksi porattiin elementeistä näytteitä. Taulukossa 3 esitettyjen koekappaleiden lisäksi valmistettiin elementtejä kuvaamaan valmiista rakenteesta tapahtuvaa näytteenottoa. Massasta 1 valmistettiin 80 mm korkea tärypöydällä tiivistetty elementti sekä 200 mm korkea tärysauvalla tiivistetty elementti. Massasta 2 ja 3 valmistettiin 80 mm korkeat elementit, joista massan 2 elementti tiivistettiin tärypöydällä ja massa 3 oli itsetiivistyvä. Elementteistä tutkittiin huokosjako keskialueelta sekä reuna-alueelta.

Käytetyt tuoreen betonin tutkimusmenetelmät:

- Ava-kokeet
- ilmamäärämittaus

Käytetyt kovettuneen betonin tutkimusmenetelmät:

- pintahietutkimus
- laattakoe

Taulukko 3. koekappaleiden valmistustapayhdistelmät.

			Massa 1		Massa 2		Massa 3	
			Kokenut tekijä	Harjoittelija	Kokenut tekijä	Harjoittelija	Kokenut tekijä	Harjoittelija
Koekappaleen valmistustapa	Normaali valmistus	Lieriö 150 mm	x	x	x	x	x	x
		Kuutio 150 mm	x	x	x	x	x	x
		Kuutio 100 mm	x	x	x	x	x	x
	Ali-tiivistys/ täyttö kerralla	Lieriö 150 mm	x	x	x	x	x	-
		Kuutio 150 mm	x	x	x	x	x	-
	Yli-tiivistys	Lieriö 150 mm	x	x	x	x	-	-
		Kuutio 150 mm	x	x	x	x	-	-

3.2 Tutkimuksessa käytetyt betonimassat

Tutkimuksessa käytettiin kolmea erilaista betonimassaa. Kaikki massat olivat huokostettuja betonimassoja. Ensimmäinen massa, massa 1, oli tavanomaista betonimassaa, jonka maksimiraekoko on 16mm. Toinen massa, massa 2, oli julkisivuihin käytettävä väriltään valkoinen rouhebetoni, jonka maksimiraekoko oli 12mm. Kolmas massa, massa 3, oli tyypiltään itsetiivistyvää ja sen maksimiraekoko oli 16 mm. Massat ja koekappaleet valmistettiin Lujabetoni Oy:n Taavetin tehtaalla.

3.3 Koekappaleiden ulkomuoto

Testauskäyttöön valmistettavat koekappaleet ovat pääsääntöisesti lieriöitä tai kuutioita. Käytetyimmät koekappaleetyypit ovat lieriö, jonka korkeus on 300 mm ja halkaisija 150 mm sekä kuutio, jonka korkeus, leveys ja syvyys ovat 150 mm. Näiden lisäksi käytetään joskus myös kuutiota, jonka korkeus, leveys ja syvyys ovat 100 mm. Edellä mainituista kaikki ovat soveltuvia pintahiheen valmistukseen mutta suuremmat ovat yleisempiä ja helpompia valmistaa hieksi.

Kuvassa 5 nähdään erilaisia koekappaletyyppejä valettuna muotteihinsa. Vasemmalla on 150 mm lieriöitä teräksisissä muoteissaan ja oikealla 150 mm sekä 100 mm kuutioita muovisissa muoteissa. Tätä tutkimusta varten valmistetut pintahieet sahattiin koekappaleista 15 mm sen ulkoreunasta sekä 15 mm sen ylä-, tai alapinnasta.



Kuva 5. erilaisia valettuja koekappaleita muoteissaan laboratoriossa.

Valmiista rakenteesta näytteenotto tapahtuu yleensä timanttikoralla, jolla porataan rakenteesta halutun kokoinen koekappale. Lujuustestauksesta poiketen voidaan näytteenottoon käyttää myös piikkausta. Näytteenotto toteutetusta rakenteesta antaa aina suoraa tietoa betonin toteutuneista ominaisuuksista kyseisessä kohteessa ja vallitsevissa olosuhteissa. Näytteenotto rakenteesta on kuitenkin harvinaisempaa, sillä se lisää huomattavasti laadunvarmistuksesta koituvia kustannuksia. Lisäksi haittapuolena ovat rakenteisiin jäävät jäljet, jotka tosin useissa kohteissa voidaan hyväksyä tai jättää näkymättömiin esimerkiksi pellitysten alle. Tätä tutkimusta varten tehty näytteenotto elementeistä tehtiin Hilti DD-120 timanttikoralla.

Testejä varten koekappaleen tulee olla silmämääräisesti arvioituna ehjä sekä kyseistä betonierää tai ympäröivää rakennetta mahdollisimman hyvin edustava. Joskus tutkimusta varten valmistetuissa kappaleissa on havaittavissa epätäydellistä tiivistymistä, joka jättää etenkin koekappaleen valupintaan nähdessä alempaan puoliskoon suurikokoisia tiivistyshuokosia.

3.4 Koekappaleiden valmistustavat

3.4.1 Koekappaleiden normaali valmistus

Koekappaleita valmistettaessa voidaan käyttää ei-reaktiivista irrotusainetta muotin sisäpinnoilla, jotta betoni ei jäisi kiinni muotin pinnoille. Muottien täyttö tehdään aina kahdessa tai useammassa osassa. Täyttökertojen määrään vaikuttaa betonin notkeus sekä se, mitä tiivistysmenetelmää aiotaan käyttää betonin tiivistämiseen. Itsetiivistyvän betonin kohdalla tulee muotti täyttää aina kerralla eikä sitä tule lainkaan mekaanisesti tiivistää koekappaleen valmistuksen aikana eikä sen jälkeen. (SFS-EN 12390-1: 2009, 5.)

Ennen muotin täyttämistä tulee valmistua siitä, että betonimassa, josta näyte aiotaan ottaa, on sekoitettu huolellisesti esimerkiksi lapiolla. Betoni sijoitetaan muottiin kahdessa tai useammassa osassa siten, että saavutetaan täydellinen tiivistyminen. Täydellisellä tiivistymisellä tarkoitetaan sitä, että koekappaleen pinnalle ei tule enää suuria ilmakuplia ja pinta tasoittuu ja kiillottuu. Merkkejä liiallisesta erottumisesta ei tule esiintyä. Jokainen valettu kerros tiivistetään mekaanisesti täryttämällä joko tärysauvalla, tärypöydällä tai käyttäen sullontasauvaa tai -tankoa. Tärysauvalla tiivistämisen on havaittu aiheuttavan huokosilman poistumista betonista. Tämän vuoksi erityisesti tärysauvaa käytettäessä on käytettävä mahdollisimman lyhyttä tärytysaikaa, jolla kuitenkin päästään täydelliseen tiivistymiseen. Kun muotti on täytetty ja tiivistetty tulee pinta tasoittaa. Tarkoituksena on saattaa muotissa olevan betonin pinta tasaiseksi sekä poistaa ylimääräinen betonimassa näytteen päältä. (SFS-EN 12390-1: 2009, 5.)

Tutkimuksessa käytetyillä betonimassoilla itsetiivistyvää betonia lukuun ottamatta katsottiin sopivaksi täyttää muotit kahdessa kerroksessa. Tiivistys suori-

tettiin tärysauvalla jokaisen täyttökerran jälkeen. Täydellisen tiivistymisen aikaansaamiseksi todettiin tarvittavan tiivistysajan olevan noin 1,5 sekuntia tai sen aikaa, että koekappale vaikuttaa saavuttaneen täydellisen tiivistymisen. Itsetiivistyvän betonin kohdalla muotit täytettiin kerralla eikä erillistä tärytystä suoritettu.

3.5 Simuloidut virheet

Tutkimuksessa tehdyissä koekappaleiden valmistuksessa tehtiin tarkoituksella valmistusvirheitä, jotta nähtäisiin niiden vaikutus testaustuloksiin. Virheet tehtiin tiivistämällä näytettä liian kauan, jonka odotettiin aiheuttavan huokosilman pakenemista näytteestä ja päinvastoin riittämättömällä tiivistyksellä, jonka odotettiin jättävän näytteeseen paljon suurikokoisia huokosia.

Alitiivistyksessä koekappale täytettiin normaalisti kahdessa osassa mutta kerroksia tiivistettiin riittämättömän vähän. Tiivistys tehtiin kuitenkin siten, että muottiin valettu betonimassa tasoittui kohtuullisesti. Ali-tiivistettäessä tärytysaika oli noin 0,5 – 1 sekuntia tiivistettävää kerrosta kohti.

Yli-tiivistettäessä pyrittiin päinvastaiseen eli tiivistettiin koekappaleita tarkoituksella liikaa. Kerroskohtainen tiivistysaika oli noin 3 - 5 sekuntia tai niin kauan, että betonista ei enää näyttänyt nousevan ilmaa. Ylitiivistys sai betonin koekappalemuoteissa tasoittumaan voimakkaasti. Ylitiivistettyjen koekappaleiden odotettiin sisältävän vähäisissä määrin tiivistyshuokosia mutta kysymyksiä herätti se, että poistuuko liiallisen tiivistyksen tuloksena betonista myös toivottuja suojahuokosia.

Massan 3 kohdalla kyse oli itsetiivistyvistä betonista, joten simuloitu valmistusvirhe oli koekappalemuotin liian nopea ja huolimaton täyttö. Itsetiivistyvistä massasta tehtäviä koekappaleita ei tiivistetä.

4 TESTAUSTULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

Tässä luvussa esitellään opinnäytetyön tutkimusosion tuloksia. Pintahieko-keesta saadaan tulokseksi paljon erilaisia parametreja.

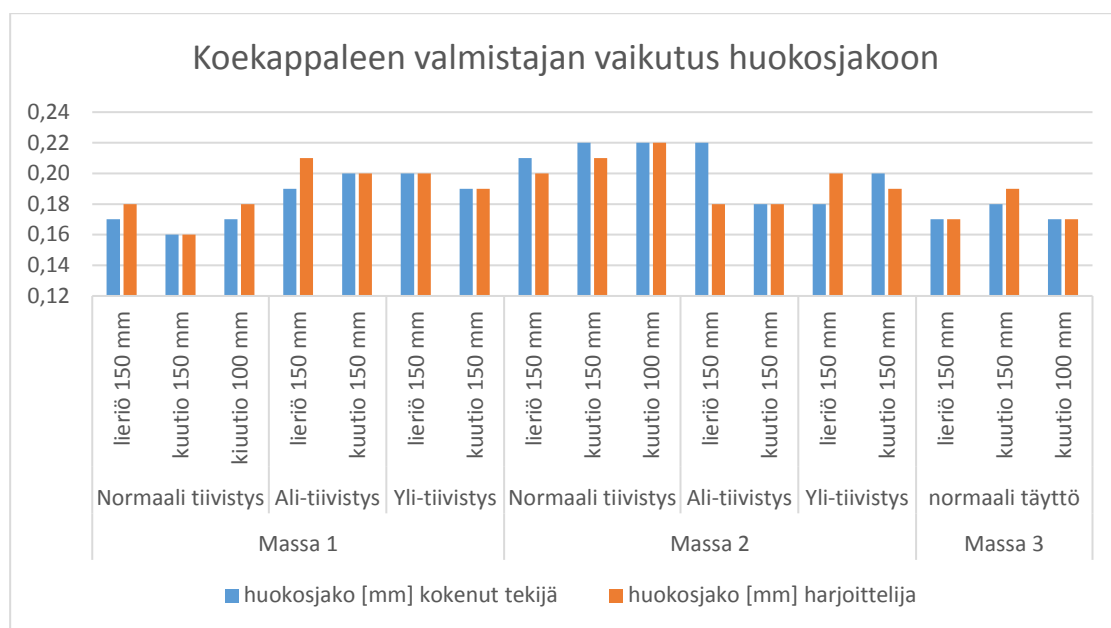
Pintahiekokeesta saadut huokosparametrit:

- kokonaisilmamäärä
- suojahuokosten ilmamäärä
- tiivistyshuokosten ilmamäärä
- huokosjako
- huokosten ominaispinta-ala
- pastaprosentti

Pintahiekokeiden tulosten tarkastelu on alla esitetty huokosjaon, suojahuokosten ilmamäärän, tiivistyshuokosten ilmamäärän sekä kokonaisilmamäärän näkökulmista. Kaikki tulokset suoritetuista pintahiekokeista on esitetty koontitaulukkona liitteessä 1.

4.1 Koekappaleen valmistajan vaikutus

Koekappaleen valmistajan vaikutuksen selvittämiseksi laskettiin keskiarvot sekä kokoneen tekijän, että harjoittelijan tekemien kappaleiden tuottamista huokosjaoista massoittain. Lisäksi kuvassa 6 on esitetty rinnakkain huokosjakotulokset molempien tekijöiden valmistamien koekappaleiden osalta tapauksissa, joissa vastaavat koekappaleet on valmistettu molempien toimesta.



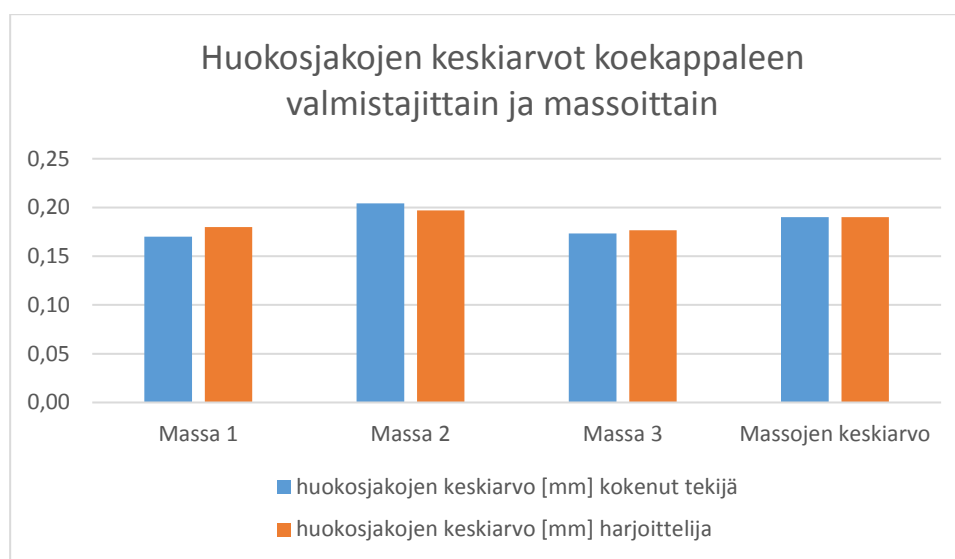
Kuva 6. koekappaleista saadut huokosjakotulokset valmistajittain rinnan

Kuvan 6 kuvaajasta nähdään, että eri koekappaleen valmistaja vaikuttaa joissain tapauksissa testaustulokseen ja joissain tapauksissa tulokset vastaavat

hyvin toisiaan. Esimerkiksi massasta 1 valmistettu alitiivistetty 150 mm lieriö tuotti kokeneen tekijän tekemänä huokosjaon 0,19 mm, kun harjoittelijan valmistamasta koekappaleesta huokosjaoksi saatiin 0,21 mm. Kuitenkin toisaalta esimerkiksi massasta 2 valmistetun alitiivistetyn 150 mm lieriön huokosjako oli kokeneen tekijän valmistamana 0,18 mm ja harjoittelijan valmistamana 0,22 mm.

4.1.1 Valmistajan vaikutus huokosjakoon

Kuvassa 7 on esitetty koekappaleen valmistajan vaikutus huokosjakojen keskiarvoon massoittain. Massan 1 kohdalla voidaan huomata huokosjaon olevan hieman suurempi harjoittelijan valmistamissa koekappaleissa, kuten myös massan 3 kohdalla. Toisaalta taas massan 2 tapauksessa harjoittelijan tekemissä koekappaleissa huokosjako on kokeneen tekijän valmistamia kappaleita keskimäärin pienempi. Kuten kahdesta viimeisestä kaavion pylväästä voidaan huomata, keskimäärin harjoittelijan ja kokeneen tekijän valmistamien koekappaleiden suojahuokosten ilmamäärät vastasivat hyvin toisiaan.

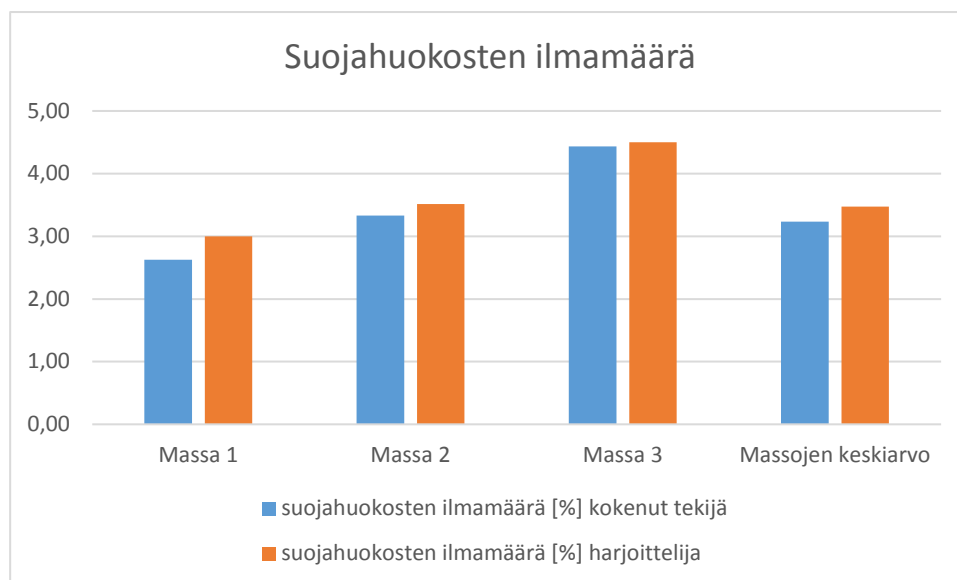


Kuva 7. huokosjakojen keskiarvot massoittain

Tulosten pohjalta on melko vaikeaa arvioida syitä huokosjaoissa esiintyviin eroihin. Eroja voisi aiheuttaa esimerkiksi kokemattoman tekijän käyttämän tiivistysajan epätasaisuus, mutta sen vaikutuksen selvittäminen vaatisi lisätutkimuksia. Mahdollisissa lisätutkimuksissa olisi hyvä käyttää suurempaa otantaa.

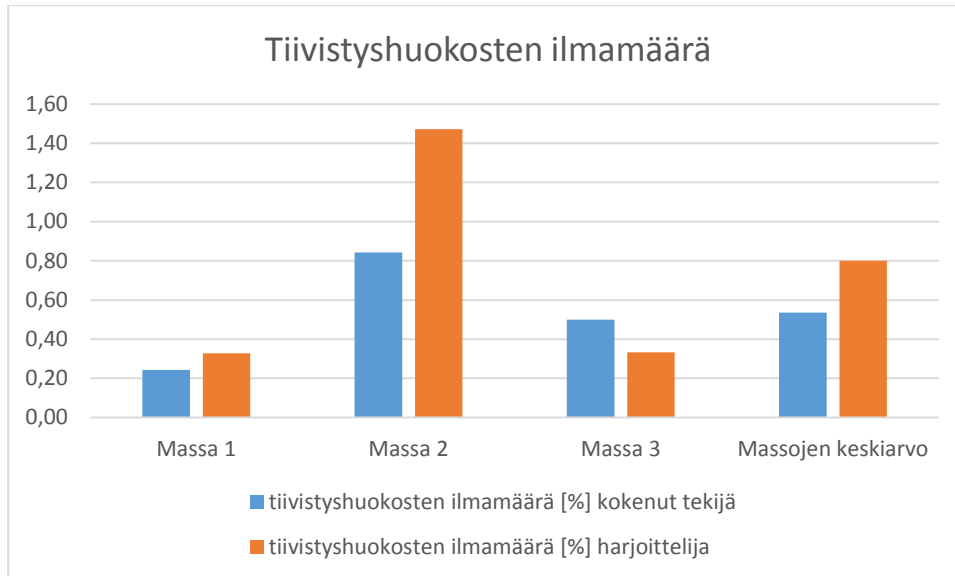
4.1.2 Valmistajan vaikutus ilmamääriin

Seuraavissa kuvissa 8, 9 ja 10 on esitetty ilmamäärien vaihtelua tutkituissa koekappaleissa. Esitetyt arvot ovat kunkin massan ja valmistajan yhdistelmien keskimääräisiä ilmamääriä. Arvot ovat pintahiekokeesta saatuja ilmamäärän arvoja.



Kuva 8. suojahuokosten ilmamäärät massoittain

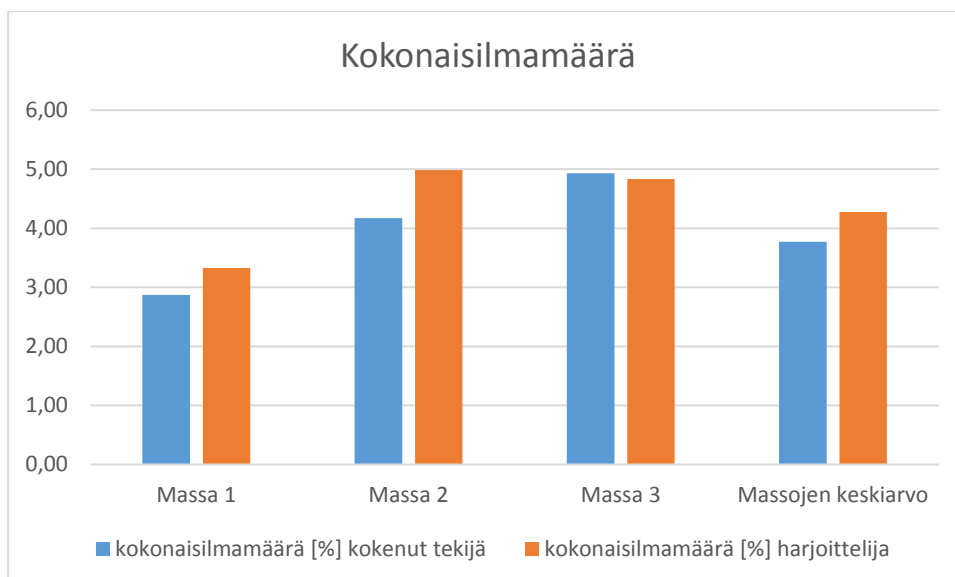
Suojahuokosten ilmamäärää tarkasteltaessa voidaan kuvasta 8 huomata, että keskimäärin harjoittelijan valmistamissa koekappaleissa se oli hieman suurempi kuin vastaavissa kokeneen tekijän valmistamissa koekappaleissa. Esimerkiksi massan 1 kohdalla keskimääräisessä suojahuokosten ilmamäärässä esiintyvä ero harjoittelijan ja kokeneen tekijän välillä oli 0,37 %. Massojen 2 ja 3 kohdalla erot olivat hieman pienempiä mutta samansuuntaisia.



Kuva 9. tiivistyshuokosten ilmamäärät massoittain

Kuva 9 esittää tiivistyshuokosten ilmamäärää harjoittelijan ja kokeneen tekijän valmistamissa koekappaleissa. Erityisesti huomion arvoista on se, että massassa 2 harjoittelijan valmistamissa koekappaleissa tiivistyshuokosten ilmamäärä oli radikaalisti suurempi, kuin kokeneen tekijän valmistamissa. Harjoittelijan valmistamissa koekappaleissa keskimääräinen tiivistyshuokosten ilmamäärä oli peräti 1,47 % kun taas kokeneen tekijän valmistamissa koekappaleissa se oli 0,84 %. Kuitenkin massan 3 kohdalla harjoittelijan valmistamissa koekappaleissa tiivistyshuokosten ilmamäärä oli pienempi kuin vastaavissa kokeneen tekijän valmistamissa. On kuitenkin huomioitava, että massa 3 oli tyypiltään itsetiivistyvä betoni.

Kaikkien massojen keskiarvoista voidaan todeta, että harjoittelijan valmistavat koekappaleet sisältävät keskimäärin enemmän tiivistyshuokosia, kuin kokeneen tekijän valmistamat. Syynä tähän voi olla esimerkiksi se, että kokeneella tekijällä on kehittynyt niin sanotusti parempi silmä koekappaleen tiivistämiseen ja sitä kautta hän pystyy paremmin havaitsemaan koekappaleen täydellisen tiivistymisen merkit. Vastaavasti kokemattomampi harjoittelija voi lopettaa tiivistämisen keskimäärin liian aikaisin, jolloin tiivistyshuokosia voi esiintyä koekappaleessa.



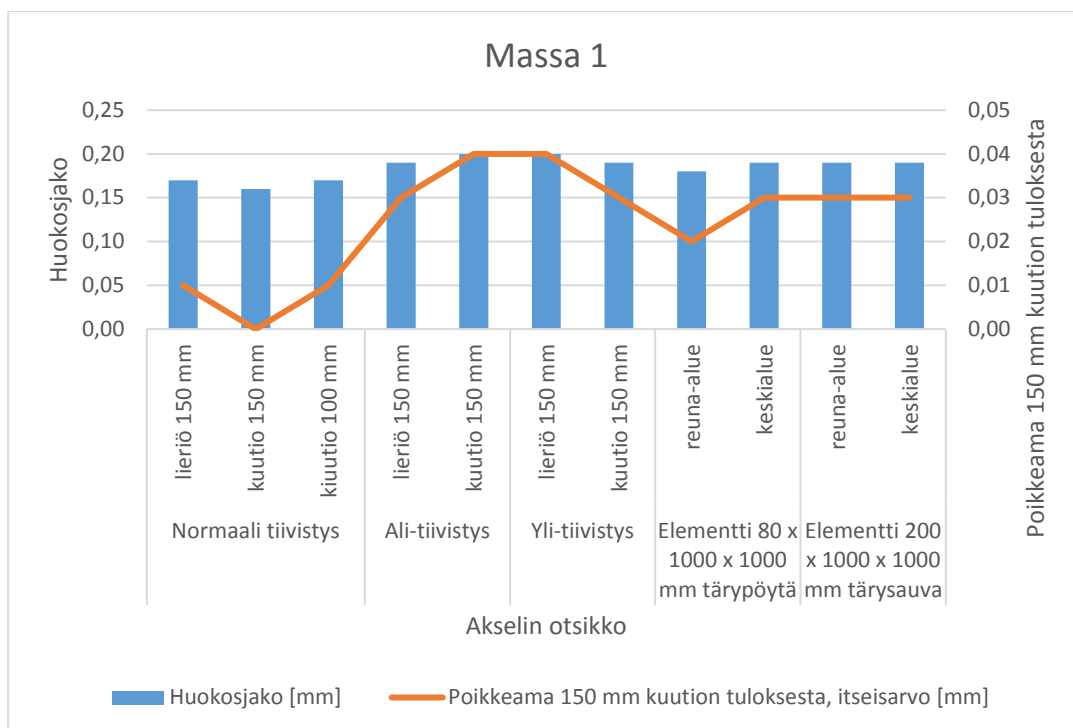
Kuva 10. kokonaisilmamäärät massoittain

Kokonaisilmamäärän ollessa suojahuokosten ja tiivistyshuokosten ilmamäärien summa ovat sen kuvassa 10 nähtävät arvot hyvin samaa linjaa noudattavia kuin aiemmin esitetyissä ilmamäärissä. Kaikkien massojen keskiarvoa tarkasteltaessa huomataan kokonaisilmamäärän olevan harjoittelijan valmistamissa koekappaleissa keskimäärin 0,51 % suurempi, kuin vastaava kokonaisilmamäärien keskiarvo kokeneen tekijän valmistamissa koekappaleissa.

4.2 Koekappaletyypin ja valmistustavan vaikutus

4.2.1 Vaikutukset huokosjakoon

Kuvissa 11, 12 ja 13 on esitetty massojen 1, 2 ja 3 huokosjakotulokset sekä itseisarvona niiden poikkeamat kunkin massan vertailukohtana käytetystä normaalisti tiivistetyn, kokeneen tekijän valmistamasta 150 mm kuution huokosjakoista. Taulukoissa vasemmanpuoleinen arvoasteikko kuvaa huokosjakoa ja oikeanpuoleinen poikkeaman itseisarvoa. Koska kokeneen tekijän ja harjoittelijan valmistamien koekappaleiden välisistä testaustuloksista ei voida vetää selkeitä johtopäätöksiä tekijän vaikutuksesta testaustulokseen, on kuvissa 11, 12 ja 13 selkeyden vuoksi esitetty koekappaleista saadut testaustulokset ainoastaan kokeneen tekijän osalta.



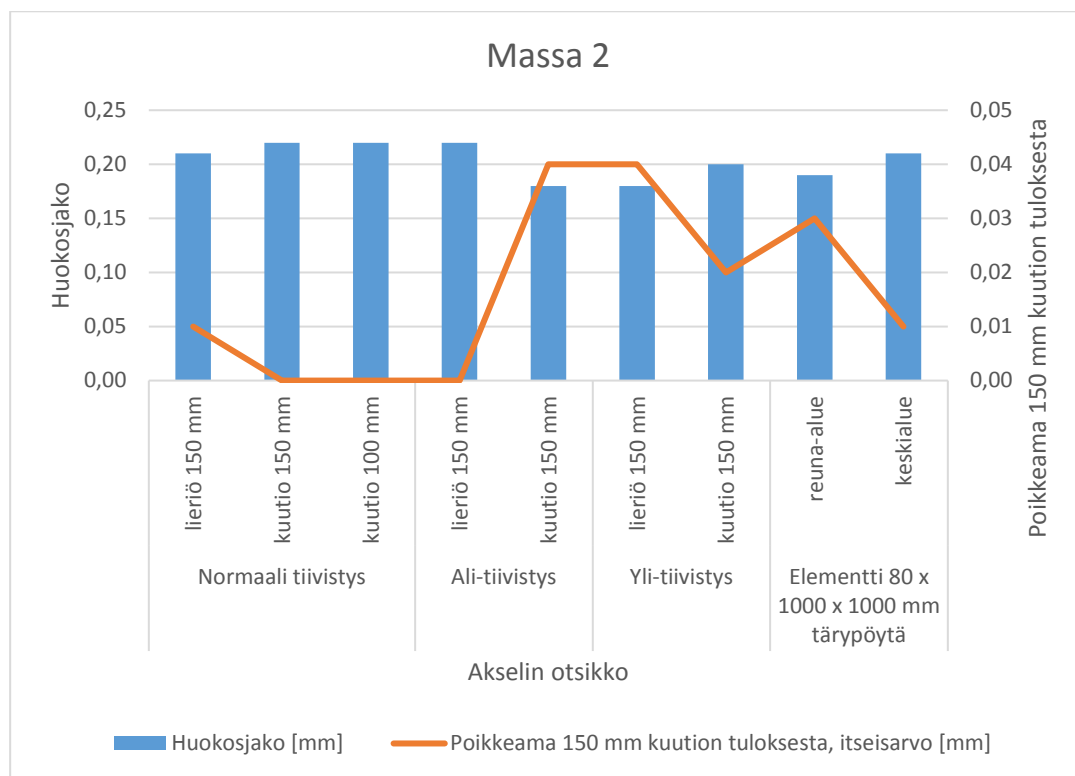
Kuva 11. massan 1 huokosjaot ja niiden poikkeamat vertailukohtana käytetystä 150 mm kuution huokosjaosta

Massan 1 kohdalla voidaan kuvasta 11 huomata huokosjaon olevan alimmillaan normaalin tiivistystavan mukaisesti valmistetun 150 mm kuution kohdalla. Sekä yli-, että ali-tiivistys lisäävät poikkeamaa vertailukohtana käytetystä normaalisti tiivistetystä 150 mm kuutiosta. Valmistusvirheen aiheuttamaa poikkeamaa huokosjaossa voidaan havaita selkeästi riippumatta koekappaleen tyypistä. Suurimmillaan ero saadun huokosjakotuloksen ja vertailukohdan välillä on ali-tiivistetyssä 150 mm kuutiosta sekä yli-tiivistetyssä 150 mm lieriössä, molemmissa 0,04 mm vertailukappaleen omaa suurempi.

Elementeissä saadut koetulokset ovat hyvin samankaltaisia keskenään. Elementeistä matalammassa 80 mm korkeassa reuna-alueelta porattu koekappale tuotti hieman pienemmän huokosjaon verrattuna keskialueelta porattuun eron ollessa 0,01 mm. 200 mm korkeassa elementissä vastaavaa eroa ei havaittu vaan huokosjaot olivat sekä reunassa, että keskellä samat, molemmissa 0,19 mm.

Massan 1 kohdalla erot testaustuloksissa näyttävät johtuvan selkeästi valmistusvirheiden vaikutuksesta. Havaitut erot normaalisti tiivistettyjen koekappaleiden välillä olivat melko pieniä poikkeaman 150 mm kuution huokosjaosta ol-

lessa korkeintaan 0,01 mm. Elementtien kohdalla 80 mm korkeassa elementissä esiintyvä ero reuna- ja keskialueelta saaduissa tuloksissa voi johtua esimerkiksi mahdollisesta tärypöydän erilaisesta vaikutuksesta elementin reuna-alueisiin.



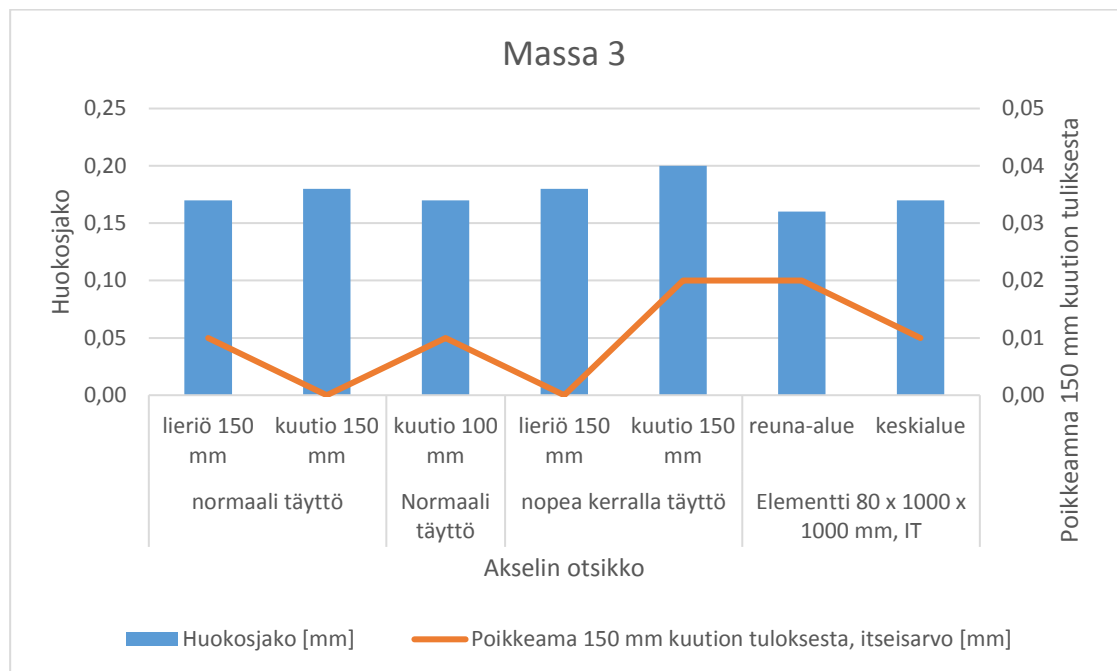
Kuva 12. massan 2 huokosjaot ja niiden poikkeamat vertailukohtana käytetystä 150 mm kuution huokosjaosta

Kuvan 12 kuvaajasta voidaan huomata, että tulokset ovat huokosjaon osalta lähes päinvastaiset verrattuna kuvassa 11 esitettyihin massan 1 tuloksiin, mutta poikkeamassa vertailukappaleen arvosta voidaan havaita samankaltaisuutta. Massan 2 huokosjaoista pienimmät syntyivät ali-tiivistetyllä 150 mm kuutiolla ja yli-tiivistetyllä 150 mm lieriöllä molempien huokosjaon ollessa 0,18 mm. Vertailukohtana käytettävän normaalisti tiivistetyn 150 mm kuution huokosjako puolestaan oli 0,22 mm. Kuten massan 1 kohdalla, suurimmat poikkeamat vertailukohdasta esiintyivät myös massan 2 kohdalla ali- ja yli-tiivistetyistä koekappaleista saaduissa tuloksissa. On kuitenkin huomattava, että ali-tiivistetty 150 mm lieriö tuotti huokosjaon 0,22 mm, joka vastaa vertailukappaleen huokosjakoa.

Syytä massan 2 täysin päinvastaiselle käyttäytymiselle ei voida varmasti selittää. Massat ovat kuitenkin jo visuaalisilta olemuksiltaan erilaisia ja sisältävät

erilaista kiviainesta, joten niiden keskinäinen vertailu ei ole helppoa. Huomion arvoista on kuitenkin se, että erot tuloksissa vertailukohtaan ovat itseisarvona hyvin samankaltaisia. Toisaalta tulee myös huomioida, että koekappaleiden yli- ja ali-tiivistyksen ovat toisiinsa nähden päinvastaisia valmistustapoja.

Massasta 2 valmistetussa 80 mm korkeassa elementissä ero huokosjakojen välillä reuna- ja keskialueelta otetuissa näytteissä oli 0,02 mm. Reuna-alueelta saatu tulos oli 0,20 mm kun keskialueelta saatu tulos oli 0,22 mm. Kuten massan 1 kohdalla, voisi myös tässä ero johtua tärypöydän mahdollisesta erilaisesta vaikutuksesta elementin reuna-alueisiin.



Kuva 13. massan 3 huokosjaot ja niiden poikkeamat vertailukohtana käytetystä 150 mm kuution huokosjaosta

Massa 3 osoittautui koemassoista huokosjakojen osalta tasaisimmaksi. On kuitenkin huomattava kyseessä olevan itsestivistävä betoni, joten valmistustavat ovat erilaiset verrattuna aiempiin. Tämän vuoksi eri valmistustapojen suora vertaaminen muiden massojen vastaaviin ei ole mahdollista. Massalla 3 vertailukohtana käytetyn 150 mm normaalia valmistustapaa edustavan kuution huokosjako oli 0,18.

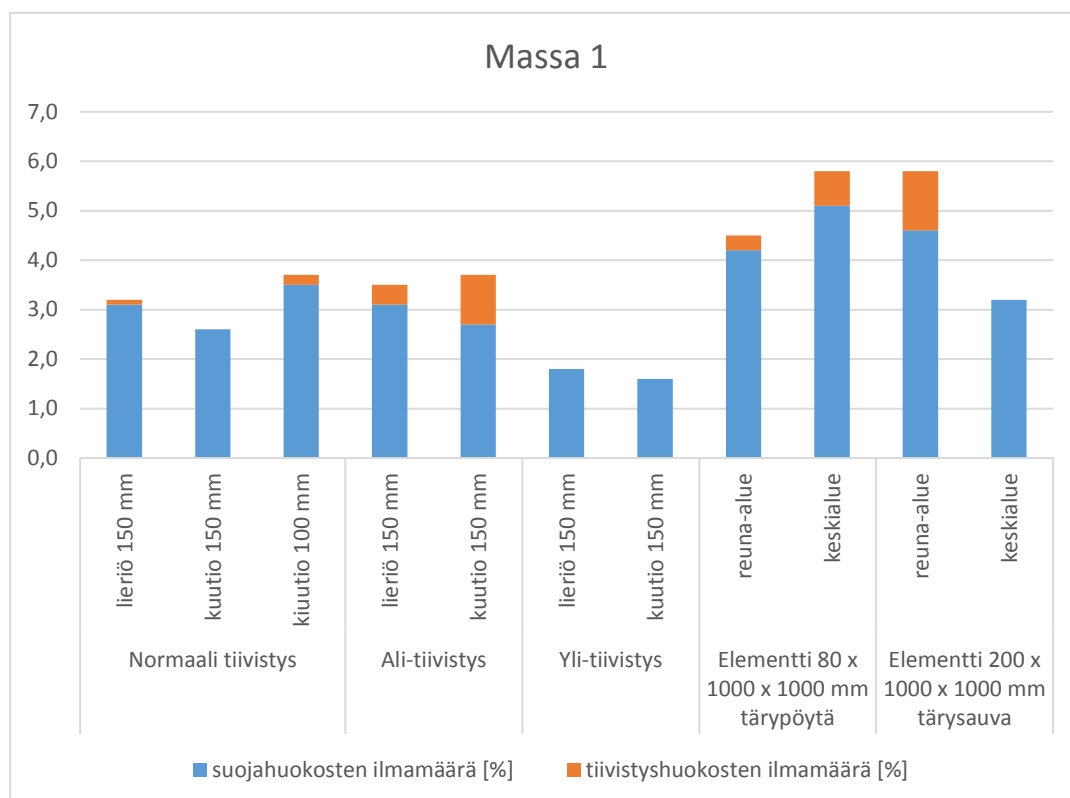
Kuvasta 13 voidaan todeta, että valmistetuissa koekappaleissa suurin poikkeama vertailukohdasta oli nopeasti kerralla täytetyssä 150 mm kuutiossa. Kyseisen koekappaleen huokosjako oli 0,20 mm ja poikkeama vertailukohdasta

0,02 mm. Nopeasti kerralla täytetty 150 mm lieriö antoi kuitenkin saman huokosjakotuloksen, kuin vertailukappale, mutta jos tarkastellaan normaalisti nopeasti kerralla täytettyjen koekappaleiden huokosjakojen keskiarvoa, voidaan todeta sen aiheuttavan hieman suuremman huokosjaon, kuin normaalisti täytetty koekappale.

Myös massasta 3 valmistetussa 80 mm korkeassa elementissä reuna-alueen huokosjako oli pienempi kuin keskialueella. Reuna-alueella se oli 0,16 ja keskialueella 0,17. Kun kyseessä on itsetiivistyvä betoni, ei elementille ole tehty tärytystä. Tuloksista voisi päätellä, että elementin reuna-alueelta saatava pienempi huokosjako ei selity tärytyksen vaikutuksella. Mahdollisia syitä eroavalle tulokselle voisi olla esimerkiksi erilaiset lämpöolosuhteet elementin keskellä ja sen reuna-alueilla.

4.2.2 Vaikutus ilmamääriin

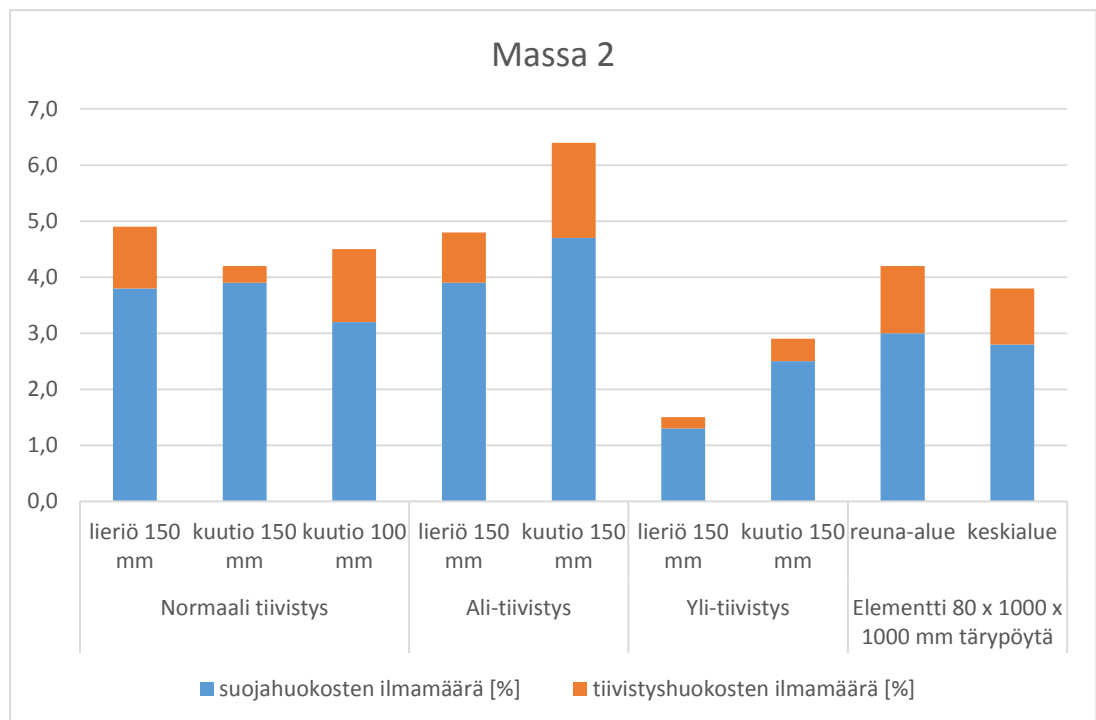
Kuvissa 14, 15 ja 16 on esitetty pintahiekokeesta saadut ilmamäärät koekappaletyypeittäin. Tulosten vertailemisen selkeyttämiseksi on kuvaajissa esitetty ilmamäärät kokoneen tekijän valmistamista kappaleista.



Kuva 14. massa 1 ilmamäärät koekappaletyypeittäin ja valmistustavoittain

Kuvassa 14 on esitetty massan 1 koekappaleiden ilmamäärät valmistustavoittain ja koekappaletyypeittäin. Koekappaleiden osalta erot eri tiivistystapojen välillä ovat huomattavia ja selkeästi kuvaajasta havaittavissa. Ylitiivistyksen voidaan selkeästi katsoa poistavan ilmaa koekappaleesta sekä suojahuokosten, että tiivistyshuokosten osalta. Normaalisti tiivistetyn 150 mm kuution kokonaisilmamäärä oli 2,6 % kun taas yli-tiivistetyn saman koekappaletyyppin kokonaisilmamäärä oli vain 1,6 %. Ali-tiivistetyissä koekappaleissa suojahuokosten ilmamäärä oli hieman suurempi kuin vastaavissa normaalisti tiivistetyissä koekappaleissa mutta ne sisälsivät huomattavasti enemmän tiivistyshuokosia. 100 mm kuution havaittiin ilmamäärän olevan hieman suurempi kuin 150 mm lieriössä ja kuutiossa.

Elementtien osalta voidaan todeta, että niistä saadut ilmamäärät ovat keskimäärin korkeampia kuin normaalisti tiivistetyistä koekappaleista saadut. Esimerkiksi 80 mm korkean elementin keskialueelta saatu kokonaisilmamäärä oli 5,8 % eli huomattavasti korkeampi, kuin 150 mm normaalisti tiivistetyn kuution 2,6 %.

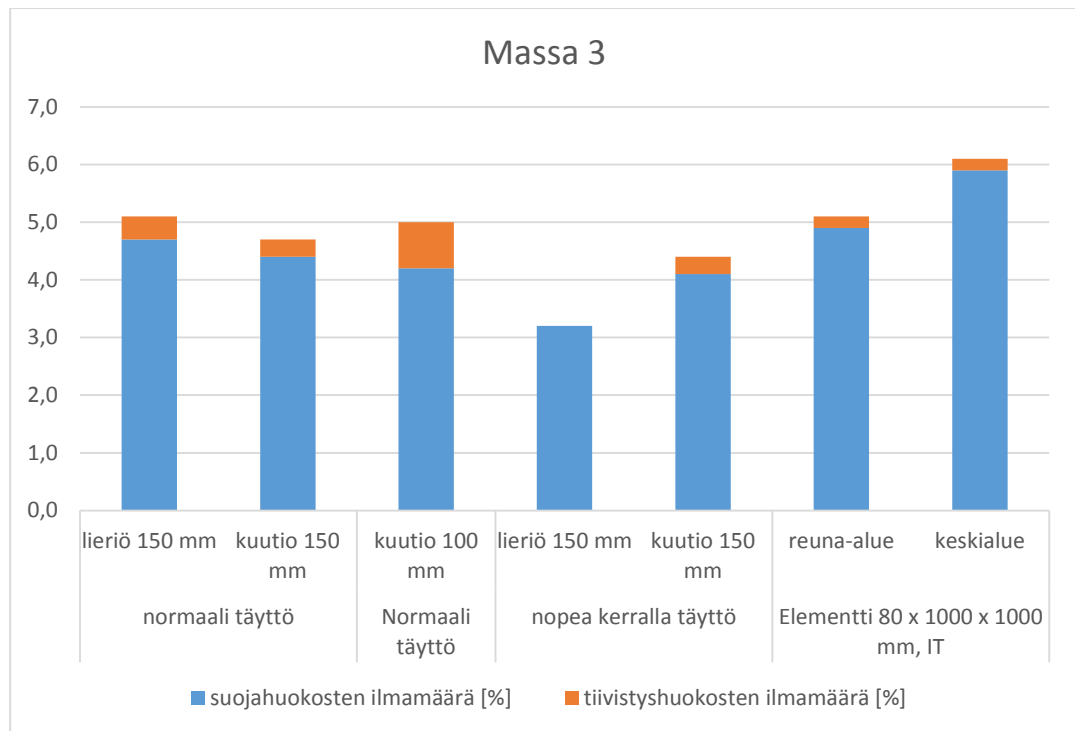


Kuva 15. massa 2 ilmamäärät koekappaletyypeittäin ja valmistustavoittain

Massan 2 kohdalla voidaan kuvasta 15 todeta massasta valmistetuissa koekappaleissa olleen enemmän tiivistyshuokosia verrattuna kuvassa 1 esitettyihin massan 1 koekappaleisiin. Massan 2 kohdalla suurin kokonaisilmamäärä

oli ali-tiivistetyssä 150 mm kuutiossa 6,4 % ja pienin yli-tiivistetyssä 150 mm lieriössä 1,5 %. Normaalin tiivistystavan voidaan todeta tuottaneen melko taseisen kokonaisilmamäärän riippumatta koekappaletyypistä. 100 mm kuutio toisaalta sisälsi toisaalta suhteessa enemmän tiivistyshuokosia, kuin 150 mm kuutio ja lieriö.

Massasta valmistetun 80 mm korkean elementin tulokset osoittavat massan 2 kohdalla elementistä porattujen näytteiden omaavan reuna-alueella yhtä suuren ja keskialueella pienemmän kokonaisilmamäärän kuin normaalisti tiivistetty 150 mm kuutio. Toisaalta elementistä poratuissa näytteissä tiivistyshuokosten osuus kokonaisilmamäärästä on suurempi. Tämä voi johtua esimerkiksi tärypöydän ja tärysauvan erilaisesta toimintatavasta.



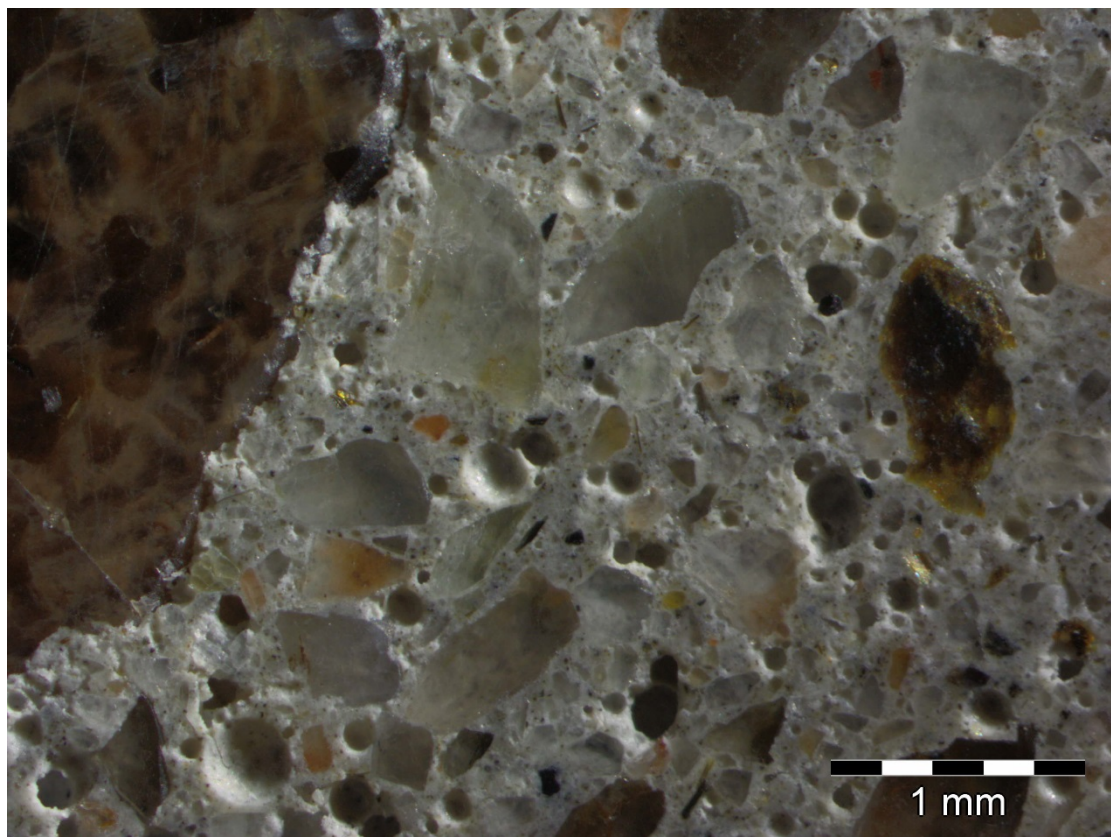
Kuva 16. massa 3 ilmamäärät koekappaletyypeittäin ja valmistustavoittain

Kuvassa 16 on esitetty massan 3 ilmamäärät valmistustavoittain ja koekappaletyypeittäin. Massa 3 oli tyypiltään itsetiivistyvä joten erot valmistustavoissa liittyivät enemmän muotin täyttöön. Koekappaleista saaduista ilmamääristä kokonaisilmamäärästä pienimmät olivat nopeasti kerralla täytetyissä 150 mm lieriössä sekä 150 mm kuutiossa 3,2 % ja 4,4 %. Suurimmat kokonaisilmamäärät olivat normaalisti täytetyissä 150 mm lieriössä 5,1 % ja 80 mm korkean elementin keskialueella 6,1 %. Tiivistyshuokosten osuus kokonaisilmamäärästä oli selvästi suurin 100 mm kuution kohdalla.

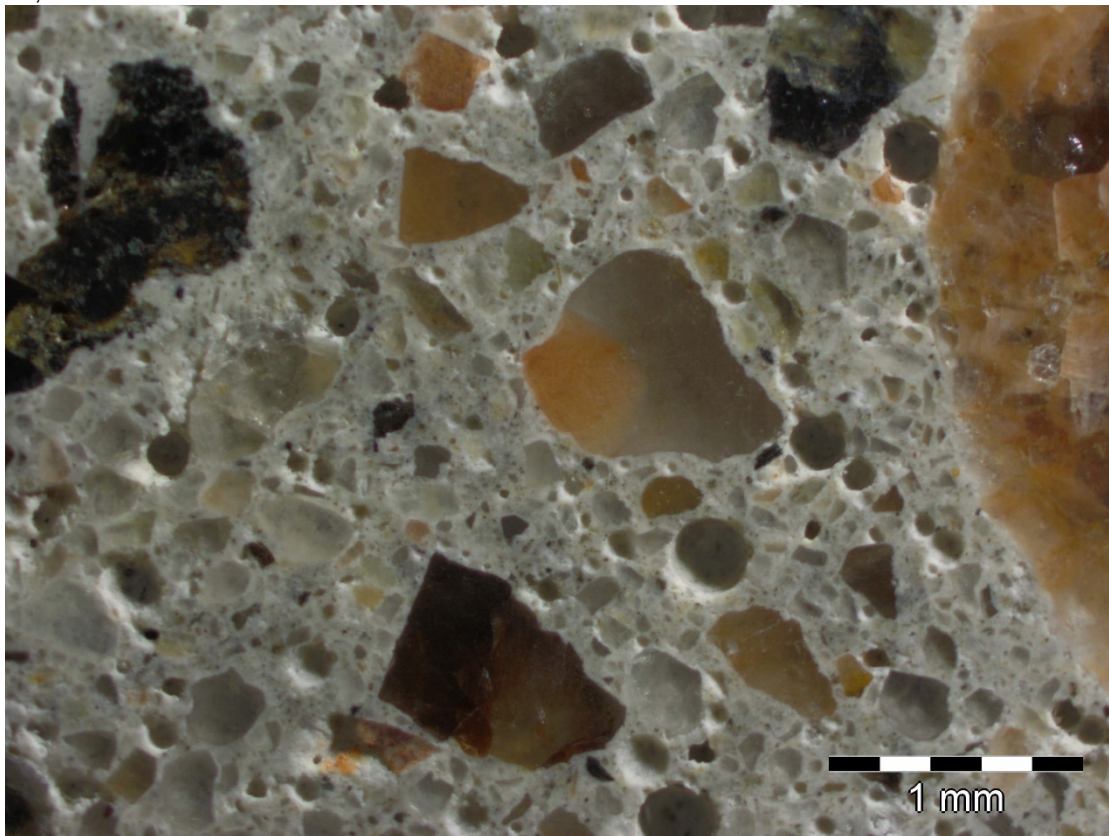
4.3 Huokosparametrit – visuaalinen analysointi

Tutkittaessa pintahienäytettä mikroskoopilla voidaan myös näytettä visuaalisesti tarkastellen tehdä havaintoja ilmahuokosten määrästä, koosta sekä jakautumisesta. Kuvissa 17 ja 18 nähdään massan 1 suurimman ja pienimmän huokosjaon omaavien kappaleiden testipintaa mikroskoopilla tarkasteltuna. Kuvista ensimmäinen edustaa normaalin valmistustavan mukaista 150 mm:n kuutiota, ja jälkimmäinen ali-tiivistettyä 150 mm lieriötä. Ensimmäisen kuvan näytteen huokosjako oli 0,16 mm kun taas jälkimmäisen kuvan näytteen huokosjako oli 0,21. Ero on melko huomattava ja nähtävissä myös silmämääräisesti. Kuvissa ero näkyy huokosten lukumäärässä tarkasteltavalla alueella ja niiden sijoittumisessa suhteessa toisiinsa.

Kuvissa 17 ja 18 näkyvissä näytteissä oli myös toisistaan huomattavasti poikkeava ominaispinta-ala. Kuvan 17 pienemmän huokosjaon omaavassa näytteessä ominaispinta-alan arvo oli $39,6 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$ kun taas kuvan 18 näytteen ominaispinta-ala oli $30,7 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$. Ominaispinta-alan suureneminen on tyyppillistä, kun näyte sisältää enemmän ja pienikokoisempia huokosia.



Kuva 17. massa 1 normaalisti tiivistetty 150 mm kuutio: huokosjako 0,16 mm ominaispinta-ala 39,6 mm²/mm³



Kuva 18. massa 1 ali-tiivistetty 150 mm lieriö: huokosjako 0,21 mm, ominaispinta-ala 30,7 mm²/mm³

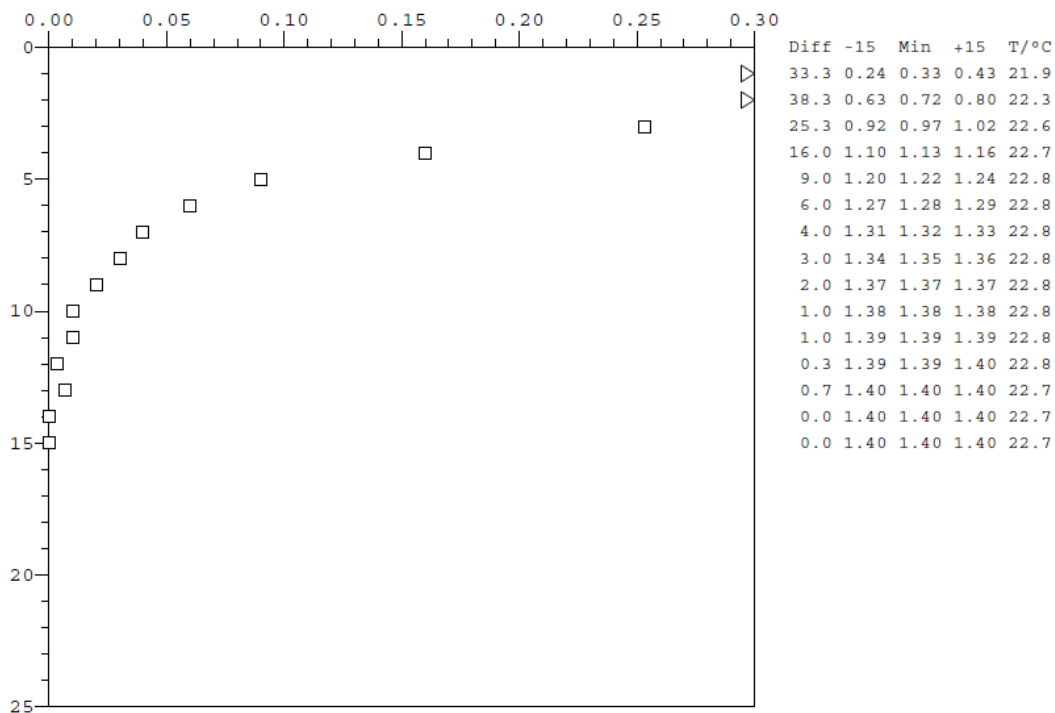
4.4 Ava-mittaukset

Suoritettujen AVA-mittausten perusteella voidaan taulukosta 4 huomata, että mittaustulokset ovat huokosjaon osalta suhteellisen yhteneväisiä pintahieanalyysistä saatujen tulosten kanssa. Esimerkiksi massan 1 normaalisti tiivistetyn koekappaleen pintahieestä saadun huokosjaon ollessa 0,16 mm, oli AVA-mittauksella saatu vastaava huokosjako myös 0,16 mm. Massalla 2 AVA-kokeen tuottama huokosjako oli 0,22 mm, ja vastaava pintahiekokeen huokosjako normaalisti tiivistetyllä 150 mm kuutiolla oli 0,22 mm. Koemassoista ainoastaan massan 3 kohdalla AVA-mittauksen tuottama huokosjako oli kauempana normaalisti valmistetun 150 mm kuution pintahieestä määritetystä huokosjaosta. Normaalisti täytetyn 150 mm kuution pintahiekokeesta saatu huokosjako oli 0,18 mm kun AVA-kokeesta saatu tulos oli 0,15 mm. On kuitenkin muistettava että massa 3. oli tyypiltään itsetiivistyvää betonia.

Taulukko 4. AVA-kokeiden ja pintahiekokeiden huokosjaot sekä ilmamäärät

Koemassa:	huokosjako, AVA [mm]	huokosjako, pintahie, normaalisti valmistettu kuutio 150 mm [mm]	ilmamäärä, AVA [%]	ilmamäärä, pintahie [%]
Massa 1	0,16	0,16	4,6	2,6
Massa 2	0,23	0,22	2,7	3,0
Massa 3	0,15	0,18	5,2	4,7
Keskiarvo	0,18	0,19	4,2	3,4

AVA-kokeista saadut kokonaisilmamäärät vaihtelevat enemmän verrattuna pintahiekokeesta saatuihin. Massan 1 kohdalla normaalisti tiivistetyn 150 mm kuution pintahieestä saatu ilmamäärä oli 2,6 % ja AVA-mittausten perusteella 4,6 %. Massalla 2 150 mm normaalisti tiivistetyn kuution ilmamäärä oli pintahieellä 4,2 % ja AVA-mittauksella 2,7 %. Itsetiivistyvää betonia edustavan massan 3 osalta ero normaalisti täytetyn 150 mm kuution kokonaisilmamäärän arvoissa oli huomattavasti pienempi. Pintahiekokeella kokonaisilmamäärä oli 4,7 % ja AVA-kokeella 5,2.



Results (adjusted to correlate with ASTM C457)

Chord length : < 2mm < 0.35mm
 Air-% concrete : 5.2 % 4.5 %
 Air-% paste : 17.8 % 15.3 %
 Air-% putty : 15.1 % 13.0 %
 Specific surface : 31.6 mm⁻¹
 Spacing factor : 0.154 mm

Kuva 19. AVA-mittaustulosten kuvaaja

Kuvassa 19 on esitetty kuvaaja AVA-mittaustuloksista massalla 3. Kuvaajassa näkyvät pisteet kuvaavat huokosten massaa ajan edetessä. Lisäksi kuvassa näkyy saadut tulokset kuten huokosjako ja ilmamäärä. Ilmamäärän arvoja tarkasteltaessa on huomioitava se, että kyseessä on kokonaisilmamäärä.

4.5 Laattakoe

Tutkimusta varten tehtiin laattakokeet kullekin koemassalle. Tutkimukset suoritettiin käyttäen kappaleiden pinnalla väliaineena vettä ja sen lisäksi koekappaleille tehtiin ultraäänimittaukset suhteellisen dynaamisen kimmokertoimen muutoksen selvittämiseksi.

Taulukko 5. laattakoetulokset

Laattakoetulokset:			
Testimassa	Kokonaispinta rapauma g/m ²	Suhteellinen dynaaminen kimmokerroin [%]	Normaalisti valmistetun 150 mm kuution huokosjako, kokenut tekijä [mm]
Massa 1	45,35	99	0,16
Massa 2	56,03	99	0,22
Massa 3	54,36	98	0,18

Laattakokeiden tulokset on esitetty taulukossa 5, jossa myös vertailukohtana on esitetty kokoneen tekijän valmistaman normaalisti valmistetun 150 mm kuution huokosjako. Suoritettujen laattakokeiden tulokset kertovat pintarapaumasta, sekä kappaleen sisäistä vauriota kuvaavasta suhteellisen dynaamisen kimmokertoimen muutoksesta. taulukosta 3 voidaan havaita massojen tulosten keskinäisten suhteiden myötäilevän saatuja vastaavia huokosjakotuloksia. Pintarapauman osalta paras tulos saavutettiin massan 1 kohdalla. Pintarapaumaksi tuli testin päätyttyä $45,35 \text{ g/m}^2$ kun vastaavan koemassan normaalin tavan mukaisesti tiivistetty 150 mm kuutio antoi pintahiekokeessa huokosjaon 0,16. Massoista heikoimman huokosjaon samalla koekappaletyypillä ja valmistustavalla antoi massa 2, jonka laattakoetulos on vastaavasti suurempi kuin muiden massojen, $56,03 \text{ g/m}^2$. Massalla 3 laattakoetulos oli $54,36 \text{ g/m}^2$.

Tämän tutkimuksen osalta voidaan todeta laattakokeen ja pintahiekokeen antavan näillä koemassoilla melko vertailukelpoisia tuloksia. Molempien menetelmien osalta voidaan taulukosta 2 todeta koemassojen betonien läpäisevän pakkasenkestävyydelle asetetut vaatimukset kaikissa rasitusluokissa. Tehtäessä johtopäätöksiä näiden tulosten perusteella on kuitenkin erittäin tärkeää muistaa, että tässä käytetty otanta on melko pieni.

5 POHDINTA

5.1 Koekappaleiden valmistustapa

Testaustuloksista voidaan päätellä, että koekappaleet on valmistettava normaalilla standardin mukaisella valmistustavalla, jotta tuloksesta saadaan mahdollisimman luotettava. Esimerkiksi yli-tiivistetyissä koekappaleissa ilmamäärä laski tyypillisesti todella alhaiseksi vaikka huokosjaot vaikuttivat normaaleilta. Tutkimuksessa käytetyllä massalla 2 tulokset osoittivat, että kyseisellä massalla voi ali- tai yli-tiivistäminen tuottaa huokosjaon osalta pienemmän testituloksen huokosjaon osalta. Vaikka tuloksissa on eroja, on toisaalta huomioitava myös, että testaustuloksissa esiintyvät suuremmatkin huokosjakotulokset ovat betonin pakkasenkestävyyden kannalta suhteellisen hyviä tarkasteltaessa taulukossa 2 esitettyjä vaatimuksia.

Massan 1 tulokset vaikuttavat järkeenkäyville verrattuna ennakko-odotuksiin tutkimukseen ryhdyttäessä. Erityisesti massan 2 kohdalla tulisi suorittaa lisätutkimusta, jotta pystyttäisiin lisäämään tutkimustulosten luotettavuutta. Toisaalta tutkimuksessa kuitenkin havaittiin myös massan 2 kohdalla valmistusvirheiden aiheuttavan huomattavia poikkeamia verrokkikappaleiden testaustuloksista. Massan 3 kohdalla testaustulokset olivat keskenään tasaisempia kuin muissa, mutta niitä ei voida suoraan verrata muiden massojen tuloksiin massojen erilaisuuden vuoksi.

Koekappaleityypeistä 100 mm kuutio vaikuttaisi tutkimustulosten pohjalta tuottavan hieman korkeampia ilmamääriä, kuin muut normaalisti tiivistetyt koekappaleet. Lisäksi tiivistyshuokosten osuus kyseisen koekappaleityypin ilmamäärästä oli suurempi kuin muissa normaalisti valmistetuissa koekappaleissa. Testaustulosten perusteella koekappaleityypeistä pintahiekokeelle edullisimmat ovat 150 mm lieriö sekä 150 mm kuutio.

5.2 Koekappaleiden valmistajan vaikutus testaustuloksiin

Testaustuloksista ei voida vetää selkeitä johtopäätöksiä siitä, kuinka paljon ja mihin suuntaan koekappaleen valmistaja vaikuttaa testaustuloksissa. Kuitenkin on tärkeää kiinnittää riittävästi huomiota valmistustapaan, sillä pieneltäkin maallikon mielestä kuulostavat virheet voivat aiheuttaa erilaisia ongelmia koekappaleen valmistusvaiheessa. Jos testaustulokset vääristyvät vääränlaisen valmistustavan seurauksena voi esimerkiksi reseptien kehittäminen olla todella vaikeaa. Reseptien kehittämisen kannalta olisikin tärkeää, että koekappaleen valmistaa aina mahdollisuuksien mukaan sama henkilö mahdollisimman samalla tavalla. Toimittaessa näin varmistetaan luotettavin mahdollinen tulos suhteessa aiempaan tulokseen, jolloin tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia.

5.3 Testausmenetelmien keskinäinen vastaavuus

Saatujen testaustulosten perusteella voidaan AVA-kokeiden perusteella saatuja huokosjakoja pitää hyvin vastaavina verrattuna pintahiekokein saatuihin vastaaviin koetuloksiin. Massoilla 1 ja 2 saatu huokosjakotulos ja AVA-tulos olivat samat. Massan 3 kohdalla kyseisten tulosten ero oli suurempi kuin massoilla 1 ja 2 Eron ollessa 0,03 mm voidaan sitä kuitenkin pitää jo huomattavana. Ilmamäärien osalta oli yllättävää, että massojen 1 ja 2 osalta ilmamäärissä havaittiin melko suuria eroja mutta massan 3 kohdalla ilmamäärien ero oli huomattavasti pienempi. Toisin sanoen massoilla, joilla huokosjakojen vastaavuus oli hyvä, oli ilmamäärien vastaavuus heikompi ja toisaalta taas massalla, jolla huokosjaon osalta vastaavuus oli heikompi, olivat eri menetelmin saadut kokonaisilmamäärät hyvin samankaltaiset.

Myös laattakokeiden voidaan todeta olevan vastaavuudeltaan hyvä. Tutkimuksessa käytettyjen betonien pienimmän huokosjaon omaava tuotti laattakokeella myös pienimmän pintarapauman tuloksen ja päinvastoin suurimman huokosjaon tuottanut antoi suurimman pintarapauman.

5.4 Jatkotutkimusehdotukset

Koska tutkimuksessa jäi epäselväksi, millaisia eroja koekappaleen valmistaja voi aiheuttaa testaustuloksiin, tulisi koekappaleen valmistajan vaikutusta testaustuloksiin tutkia lisää esimerkiksi siten, että niin sanotun harjoittelijan tilalle otettaisiin henkilö, joka ei omaa minkäänlaista aikaisempaa kokemusta koekappaleiden valmistamisesta. Harjoittelijalle tulisi antaa ohjeeksi standardin määrittämät ohjeet ja vaatimukset koekappaleen valmistukseen, jonka jälkeen hän voisi valmistaa koekappaleet siten, kuin standardin pohjalta on ymmärrettävissä. Vaihtoehtoisesti voisi ohjeena olla esimerkiksi kokeneemman tekijän lyhyt ohjeistus aiheesta tai jokin muu ohje koekappaleen valmistukseen.

Jotta jatkotutkimuksista saataisiin luotettavampaa tietoa, tulisi tutkimuksen otanta olla suurempi kuin tässä opinnäytetyössä. Olisi hyvä selvittää erilaisten valmistusvirheiden vaikutus tuloksiin perin pohjin, jolloin esimerkiksi viiden

kappaleen sarja kyseisellä massalla ja samalla valmistusvirheellä antaisi luotettavampaa tietoa virheen suunnasta ja suuruudesta. Epäselväksi myös jäi massan 2 massaan 1 nähden päinvastainen valmistusvirheiden aiheuttaman poikkeaman suunta, joten myös erityyppisten betonien käyttäytymistä voisi tältä osin tutkia tarkemmin.

LÄHTEET

Germann Instruments A/S 2015. Instruction and maintenance manual for Air Void Analyzer, AVA-3000.

Lujabetoni Oy 2017. Kehityshakuisuutta ja innovatiivisuutta. WWW-dokumentti. Saatavissa: www.lujabetoni.fi [viitattu 9.9.2017].

Oy Sika Finland Ab 2017a. Betoniteknologia. WWW-dokumentti. Saatavissa: http://fin.sika.com/fi/solutions_products/Rakennustuotteetjamenetelmat/Betoni/02a001.html [viitattu 22.10.2017].

Oy Sika Finland Ab 2017b. Sika Finland. WWW-dokumentti. Saatavissa: http://fin.sika.com/fi/group/Aboutus/sika_finland.html [viitattu 22.10.2017].

Suomen Betoniyhdistys 2016. by 65 Betoninormit 2016. Oy Fram AB, Vaasa 2016.

Suomen standardisoimisliitto SFS-EN 12390-2. 2009 Kovettuneen betonin testaus. Osa 2: Koekappaleiden valmistus lujuustestejä varten.

SFS-EN 12350-7. 2009 Tuoreen betonin testaus. Osa 7: Ilmamäärä. Paine-
menetelmät.

CEN/TS 12390-9. 2016 Testing hardened concrete. Part 9: Freeze-thaw resistance with de-icing salts. Scaling.

CEN/TR 15177:2006 Testing the freeze-thaw resistance of concrete. Internal structural damage.

VTT Expert Services 2011. VTT-TEST-R003-2010: Betonin ilmahuokosparametrien määrittäminen ohuthieestä.

PINTAHIEKKEIDEN TULOSTEN KOONTITÄULUKKO

Massa	Tekijä	Tiivistys/ valmistustapa	Koekappale- tyyppi	Huokosjako [mm]	Ominaispinta-ala [mm ² /mm ³]	Kokonaisilmamäärä [%]	Suojahuokosten ilmamäärä [%]	Tiivistyshuokosten ilmamäärä [%]	Pastaprocentti [%]	
Massa 1	Kokenut tekijä	Normaali tiivistys	lieriö 150 mm	0,17	32,2	3,2	3,1	0,1	26,3	
			kuutio 150 mm	0,16	44,6	2,6	2,6	0,0	30,3	
			kuutio 100 mm	0,17	38,0	3,7	3,5	0,2	34,7	
		Ali-tiivistys	lieriö 150 mm	0,19	32,7	3,5	3,1	0,4	29,8	
			kuutio 150 mm	0,20	33,0	3,7	2,7	1,0	30,8	
		Yli-tiivistys	lieriö 150 mm	0,20	35,6	1,8	1,8	0,0	24,8	
	kuutio 150 mm		0,19	44,4	1,6	1,6	0,0	29,9		
	Harjoittelija	Normaali tiivistys	lieriö 150 mm	0,18	31,4	4,1	3,9	0,2	31,1	
			kuutio 150 mm	0,16	39,6	3,0	2,9	0,1	30,3	
			kuutio 100 mm	0,18	37,2	3,2	2,9	0,3	33,4	
		Ali-tiivistys	lieriö 150 mm	0,21	30,7	3,3	3,1	0,2	31,2	
			kuutio 150 mm	0,20	32,6	4,7	3,3	1,4	33,2	
		Yli-tiivistys	lieriö 150 mm	0,20	35,4	2,5	2,4	0,1	31,1	
	kuutio 150 mm		0,19	33,9	2,5	2,5	0,0	27,1		
	Elementit	Elementti 80 x 1000 x 1000 mm tärypöytä	reuna-alue	0,18	32,0	5,8	4,2	0,3	33,4	
			keskialue	0,19	29,1	5,8	5,1	0,7	35,4	
		Elementti 200 x 1000 x 1000 mm tärysauva	reuna-alue	0,19	30,3	5,8	4,6	1,2	35,8	
			keskialue	0,19	33,5	3,2	3,2	0,0	30,6	
	Massa 2	Kokenut tekijä	Normaali tiivistys	lieriö 150 mm	0,21	32,9	4,9	3,8	1,1	33,2
				kuutio 150 mm	0,22	27,0	4,2	3,9	0,3	34,2
				kuutio 100 mm	0,22	28,8	4,5	3,2	1,3	33,7
Ali-tiivistys			lieriö 150 mm	0,22	26,6	4,8	3,9	0,9	31,1	
			kuutio 150 mm	0,18	28,0	6,4	4,7	1,7	29,0	
Yli-tiivistys			lieriö 150 mm	0,18	53,9	1,5	1,3	0,2	32,4	
		kuutio 150 mm	0,20	33,9	2,9	2,5	0,4	29,6		
Harjoittelija		Normaali tiivistys	lieriö 150 mm	0,20	33,1	4,5	3,3	1,2	38,2	
			kuutio 150 mm	0,21	28,5	7,2	3,7	3,5	33,3	
			kuutio 100 mm	0,22	28,2	5,2	3,7	1,5	35,2	
		Ali-tiivistys	lieriö 150 mm	0,18	30,9	5,0	3,7	1,3	29,3	
			kuutio 150 mm	0,18	30,4	6,1	4,3	1,8	32,0	
		Yli-tiivistys	lieriö 150 mm	0,20	33,5	3,5	3,0	0,5	35,6	
kuutio 150 mm			0,19	33,8	3,4	2,9	0,5	30,6		
Elem.		Elementti 80 x 1000 x 1000 mm tärypöytä	reuna-alue	0,19	35,3	4,2	3,0	1,2	32,6	
	keskialue		0,21	30,6	3,8	2,8	1,0	28,3		
Massa 3	Kokenut tekijä	normaali täyttö	lieriö 150 mm	0,17	31,8	5,1	4,7	0,4	33,3	
			kuutio 150 mm	0,18	31,3	4,7	4,4	0,3	33,1	
		Normaali täyttö	kuutio 100 mm	0,17	31,5	5,0	4,2	0,8	29,2	
			nopea kerralla täyttö	lieriö 150 mm	0,18	34,7	3,2	3,2	0,0	31,6
	nopea kerralla täyttö	kuutio 150 mm	0,20	29,5	4,4	4,1	0,3	33,2		
		Normaali täyttö	lieriö 150 mm	0,17	32,7	4,6	4,5	0,1	32,6	
	kuutio 150 mm		0,19	27,3	5,5	5,0	0,5	30,4		
	Elem.	Elementti 80 x 1000 x 1000 mm, IT	reuna-alue	0,16	33,5	5,1	4,9	0,2	31,9	
			keskialue	0,17	29,0	6,1	5,9	0,2	32,4	