

Timo Ojaranta

# Huokostinaineiden testaus eri sementtityypeillä valmistetuissa betonilaaduissa.

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

rakennetekniikka

Insinöörityö

18.11.2016

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Timo Ojaranta Huokostinaineiden testaus eri sementtityypeillä valmistetuissa betonilaaduissa 56 sivua + 4 liitettä 18.11.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikan insinööri
Suuntautumisvaihtoehto	rakennetekniikka
Ohjaajat	Toimitusjohtaja Pirjo Tepponen Lehtori Juha Virtanen
<p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää huokostinaineiden toimintaa erilaisilla sementeillä ja betonilaaduilla. Työssä tutkittiin neljää erilaista huokostinainetta viiden eri sementin kanssa kahdessa eri betonireseptissä. Massoista mitattiin notkeus, ilmamäärä sekä huokosjako. Massoista otettiin myös puristuslujuutta varten testikuutiot, ja lujuudet mitattiin 1, 7, ja 28 vuorokauden ikäisinä. Työssä tehtiin myös kirjallista tutkimusta betonin pakkasvaurioiden syistä ja syntymekanismeista, sekä keinoista niiden ehkäisemiksi. Työssä asetettiin valmistettavalle massalle vaatimus notkeuden ja ilmamäärän suhteen. Tämän jälkeen kokeiltiin huokostimen ja tarvittaessa notkistimen annostusta muuttamalla saavuttaa nämä tavoitteet. Lopuksi hyväksytystä massasta mitattiin huokosjako AVA-mittarilla.</p> <p>Tuloksista havaittiin selkeitä eroja eri huokostinten toiminnassa eri sementeillä ja betonityypeillä. Merkittävin ero syntyi kahden eri huokostinvalmistajan tuotteiden välille, joista toisen tuotteet sopivat selkeästi paremmin testeissä käytetyn notkistimen kanssa yhteen. Havaitut ero ilmenivät sekä huokostinaineiden tehokkuudessa että mitattujen huokosjakojen saavutetuissa arvoissa.</p> <p>Lujuuksiin ei havaittu olevan huokostinkohtaisia eroja, jotka olisivat olleet riittävän toistuvia, jotta niistä olisi voitu tehdä suoria johtopäätöksiä. Lujuuksista yleisesti havaittiin, että ilman lisäys yhdellä tilavuus-%:lla laskee lujuutta noin 5 %.</p>	
Avainsanat	Betoni, pakkasenkestävyys, huokosjako, huokostin

Author Title Number of Pages Date	Timo Ojaranta Testing Of Air Entraining Agents With Different Types Of Cements on Two Types Of Concrete 56 pages + 4 appendices 18 October 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructors	Pirjo Tepponen, Chief Executive Officer Juha Virtanen, Senior Lecturer
<p>The purpose of this graduate study was to compare four different air entraining agents, five different cements, and two different concrete recipes. The slump, amount of air and spacing factor were measured from every successful test mass. The compressive strength was also measured, by taking in a total of six <math>100^3 \text{ mm}^3</math> test cubes which were compressed with a hydraulic press at the ages of 1, 7, and 28 days. A literature study was also done to determine the reasons for freezing damages of concrete, their mechanisms and how to avoid them. In the tests, an aim was set for the slump and amount of air in the concrete. Tests were done by trying different amounts of air entraining agents and superplasticizer. Once the aim for slump and amount of air was achieved, the spacing factor was measured with Air Void Analyzer.</p> <p>The results showed a great difference between air entraining agents of two manufacturers. By measuring the average dosage and standard deviation of air entraining agent, it was found that the same agent required the smallest dosage in each case. Also the smallest standard deviation was found in same agent in all cases. The best spacing factor was found in another air entraining agent of the same manufacturer. Based on the results it could be concluded that the agents of that manufacturer worked better with the used superplasticizer.</p> <p>By measuring compression strengths of the different test masses, it was found that different air entraining agents had no effect in comparison. The increased amount of air lowered the strengths by 5 % per each percent of added air, but all agents had relatively identical effects on strengths.</p>	
Keywords	Concrete, air entraining agent, spacing factor

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Betonin osa-aineet	3
2.1	Sementti	3
2.1.1	Sementin valmistus	3
2.1.2	Sementin seosaineet	4
2.2	Runkoaine	5
2.3	Vesi	6
2.4	Lisäaineet	6
3	Huokostuksen syyt säilyvyyden kannalta	8
3.1	Säärasitukset	8
3.2	Pakkasrasitukset ja niiden vaikutukset	8
3.3	Pakkasvaurioiden ehkäiseminen	9
3.4	Huokokset	11
4	Huokostimen toiminta	14
4.1	Huokostinten kemia	14
4.1.1	Vinsol-hartsit	15
4.1.2	Tensidit	16
4.2	Huokostinaineiden annostelu	16
5	Testaus	18
5.1	Materiaalit	19
5.1.1	Sementit	19
5.1.2	Runkoaine	20
5.1.3	Huokostimet	21
5.1.4	Notkistin	22
5.2	Esivalmistelut	24
5.3	Sekoitus	25
5.4	Testit	25
5.4.1	Notkeus	25
5.4.2	Ilmamäärä	26
5.4.3	Huokosjako	27

5.5	Jälkikäsittely ja puristukset	29
6	Tulokset	31
6.1	Huokostinten keskinäinen vertailu	31
6.1.1	Ilman sitomiskyky	31
6.1.2	Huokosjaon onnistuminen	33
6.1.3	Huokostimen annostuksen vaihtelu	34
6.2	Huokostimien toiminta eri sementeillä	37
6.2.1	Huokostin numero 1	38
6.2.2	Huokostin numero 2	39
6.2.3	Huokostin numero 3	40
6.2.5	Huokostin numero 4	41
6.3	Huokostimien vaikutus lujuuteen	41
6.4	Notkistimen ja huokostimen yhteistoiminta	42
6.5	Notkistimen toiminta eri sementeillä	43
7	Yhteenveto	46
7.1	Tulosten yhteenveto	46
7.2	Teorian yhteenveto	49
7.3	Onnistuminen ja jatkotoimenpiteet	50
7.4	Oma näkemys	51
	Lähteet	52
	Liitteet	
	Liite 1. Mittaus-, ja sekoitusohje	
	Liite 2. Lujuustulokset	
	Liite 3. Esimerkki notkistimen ja ilmamäärän yhteisvaikutuksesta	
	Liite 4. Esimerkki teollisella sekoittajalla sekoitetusta massasta saadusta huokosjakotuloksesta	

## Lyhenteet

AVA-mittari	Air Void Analyzer mittauslaite
eb	elementtibetoni
ka	keskiarvo
kh	keskihajonta
vb	valmisbetoni
v/s	Arvo, joka kuvaa veden ja sementin välistä suhdetta massana ilmoitettuna

## 1 Johdanto

Betoni on maailman käytetyin rakennusmateriaali [1]. Sillä on lukuisia erilaisia ominaisuuksia ja sen käyttö on levinnyt maailmanlaajuisesti. Yksinkertaisimmillaan betoni koostuu sementistä, vedestä ja runkoaineesta. Näiden lisäksi usein käytetään erilaisia lisäaineita, joilla pyritään vaikuttamaan betonin ominaisuuksiin niin, että ne palvelisivat käyttötarkoitusta paremmin [2].

Koska betonia käytetään usein säälle alttiissa tiloissa, on sen tärkeää kestää säästä aiheutuvat rasitukset. Ilmastoltaan Suomen kaltaisissa maissa lämpötilavaihtelut ovat erittäin voimakkaita. Eroa korkeimman ja matalimman Suomessa mitatun lämpötilan välillä on lähes 90 °C ja yhden vuorokauden vaihteluväli voi olla jopa yli 35 °C [3]. Näin suuret ja nopeat lämpötilavaihtelut asettavat merkittäviä vaatimuksia rakenteille.

Lämpötilan laskiessa pakkasen puolelle vesi jäätyy ja samalla laajenee noin 9 %. Koska betonissa on luontaisesti vettä sisällä [4], eikä se yleensä pääse kuivumaan täysin jo yksin ilmankosteuden takia, täytyy tämän sisäisen veden päästä jäätyessään tunkeutumaan johonkin. Mikäli betonissa ei ole oikeaa huokosjakoa, aiheuttaa tämä veden laajeneminen suuria sisäisiä jännityksiä, jotka aiheuttavat betonille merkittäviä sisäisiä vaurioita. Näiden vaurioiden välttämiseksi betonissa käytetään huokostinlisäaineita, joilla pyritään saamaan aikaiseksi toimiva huokosrakenne, ja täten antaa jäätyvälle vedelle tilaa johon laajentua [5].

Pakkasrasituksen kestämiseksi on siis tärkeää, että betonissa on oikean kokoisia ilmakuplia, ja että näiden ilmakuplien etäisyys toisistaan on sopiva. Mikäli molemmat kriteerit täyttyvät, vesi jäätyessään työntyy kapillaarihuokosista ilmahuokosiin, ja sulaessaan palaa takaisin. Tällöin betoniin ei synny vaarallisen korkeita jännityksiä veden jäätyessä. Näin huokostettua betonia kutsutaan pakkasenkestäväksi betoniksi. On erittäin tärkeää muistaa, että tämä on eri asia kuin pakkasbetoni, joka viittaa betonin lujittumisvaiheen jäätyksen kestävyys. Pakkasbetonia ei tässä työssä käsitellä [5].

Betonin lujuuteen ja muihin ominaisuuksiin vaikuttaa erityisen paljon veden ja sementin painosuhde. Suurempi määrä vettä suhteessa sementtiin laskee betonin lujuutta, lisää halkeilua, ja lisää kapillaarisuutta. Siksi on kehitetty erilaisia aineita, joita lisäämällä voidaan vähentää veden määrää. Sillä tavoin voidaan joko nostaa veden ja sementin

suhdetta, tai pienentää sementin määrää, jolloin myös kustannukset yleensä laskevat ominaisuuksien säilyessä. Nykyään kaikkein tehokkaimmissa notkistimissa, joissa notkistavana aineena on polykarboksylaattipolymeeri, joudutaan käyttämään ilmakehien muodostumista vähentäviä aineita, jottei betoniin muodostuisi turhaa ilmaa. Näiden aineiden haittapuolena on niiden yhteiskäyttö huokostinten kanssa, sillä niiden toiminta on täysin vastakkaista [6, s.64-67].

Tämän työn tarkoituksena on vertailla neljää erilaista huokostinta erilaisilla sementeillä valmistetuissa betonimassoissa. Valitut sementit ja betonimassojen valmistukseen käytettävät reseptit ovat tyypillisiä Suomessa käytettäviä esimerkkejä. Massoissa käytetään myös polykarboksylaattinotkistinta. Työn tuloksina pyritään saamaan tietoa siitä, kuinka huokostimen toimintaan vaikuttaa sideaineen määrälliset ja laadulliset muutokset. Toisena merkittävänä tuloksena pyritään saamaan tietoa huokostimen ja notkistimen yhteistoiminnasta.

Tämän insinööriyön tilaajana toimii Sementti Oy, joka on perustettu vuonna 1942. Yritys aloitti toimintansa pigmenttikaupalla betonisten kattotiilien valmistuksessa. Nykyään Sementin valikoima on laajentunut huomattavasti, ja nykyään tuotevalikoimasta löytyy huomattava määrä erilaisia betonialan koneita ja laitteita, kemikaaleja sekä kallio-, ja lattiatekniikan ratkaisuja. Insinööriyön tarkoitus on tutkia huokostinten toimintaa notkistimen kanssa eri sementtityypeillä ja erilaissa betoneissa [7].



## 2 Betonin osa-aineet

### 2.1 Sementti

Sementillä tarkoitetaan betonin kovettumisesta vastaavaa hydraulista sideainetta. Betonissa käytettävällä sementillä on merkittävä vaikutus betonin ominaisuuksiin ennen sitoutumisen alkua, sen aikana sekä kovettumisen jälkeen muun muassa betonin säilyvyyteen, lujuuteen ja ulkonäköön [6, s. 39]. Sementit jaetaan viiteen ryhmään koostumuksensa perusteella eurokoodin osoittamalla tavalla. Näitä ryhmiä kuvataan tunnuksilla CEM I-CEM V. CEM I luokan sementit koostuvat yli 95 %:sesti sementtiklinkkeristä. Luokat CEM II – CEM V sisältävät klinkkeriä alle 95 %. Sementin pääraaka-aineet esitetään kuvassa 1.

nimi	kemiallinen kaava	lyhenne
kalsiumkarbonaatti	CaCO <sub>3</sub>	C
piidioksidi	SiO <sub>2</sub>	S
rautaoksidi	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F
alumiinioksidi	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A

Kuva 1. Sementin pääraaka-aineet [6, s. 40]

#### 2.1.1 Sementin valmistus

Sementti valmistetaan Suomessa nykyaikana energiatehokkaalla kuivamenetelmällä. Valmistus tapahtuu syöttämällä murskatut pääraaka-aineet suureen uuniin, jossa ensin noin 900 celsiusasteessa kalsiumhydroksidi hajoaa kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi. Tämän jälkeen lämpötilaa nostetaan edelleen, jolloin kalsiumoksidi reagoi piidioksidin, rautaoksidin sekä alumiinioksidin kanssa ja lopulta sintraantuu muodostaen sementtiklinkkerin. Muodostuva materiaali muistuttaa ulkoisesti kevytsoraa. Tämän jälkeen materiaali jauhetaan hienoksi, jonka jälkeen sementti on valmista. Kuvassa 2 esitetään klinkkerin tyypillinen kemiallinen koostumus. Mikäli sementissä käytetään seosaineita, ne lisätään klinkkerin jauhamisen yhteydessä [6, s. 39].

	normaali klinkkeri %	SR-klinkkeri %	Valkoklinkkeri %
CaO	64	64	69
SiO <sub>2</sub>	21	22	25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,1	2,9	1,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,8	4,4	0,3
MgO	3,5	2,5	0,6
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	1,6	1	0,2
+pieni määrä muita			
minerologinen koostumus			
C <sub>3</sub> S	58	65	65
C <sub>2</sub> S	16	14	21
C <sub>3</sub> A	9	1	5
C <sub>4</sub> AF	8	13	1

Kuva 2. Tyypillinen koostumus erilaisilla sementeillä. [6. s, 41]

### 2.1.2 Sementin seosaineet

Seosaineita voidaan käyttää sementin ominaisuuksien muokkaamiseen. Seosaineina voidaan käyttää muun muassa lentotuhkaa, masuunikuonaa ja silikaa [8, s.159]. Lentotuhka on savukaasuista erotettava, kivihiilen poltosta syntyvä materiaali, jonka pozzolaaniset reaktiot ovat sementin reaktiota hitaammat. Lentotuhkaa sisältävän sementin hydrataatiolämpö on alhaisempi kuin sementin jossa lentotuhkaa ei ole. Lentotuhkan reaktionopeus riippuu paljon massan lämpötiloista, joten sen käyttö talvibetonoinnissa ei ole suositeltavaa. Lentotuhka jaetaan A ja B luokan lentotuhkiin hiilipitoisuuden mukaan. Mitä suurempi hiilipitoisuus on, sitä suurempi on myös veden tarve. Tuhkan mukana oleva hiili myös sitoo tehokkaasti huokostimissa olevia aineita, joten sen käyttöä on hyvä välttää huokostetuissa betoneissa. Lentotuhka voi aiheuttaa värieroja betonipinnoissa, joten tästäkin syystä sen käyttöä on syytä harkita tarkkaan. Lentotuhkan raekoko vaihtelee välillä 1-150 µm [6, s. 59].

Raudan valmistuksessa masuuniin kertyy emäksistä silikaattimateriaalia, jota voidaan hyödyntää sementin osa-aineena. Sen käyttöä suositaan erittäin massiivisissa valuisissa, sillä sen hydrataatiolämpö on huomattavasti sementtiä alhaisempi. Masuunikuona on itsessään myös sulfaatin kestävä. Masuunikuonan käyttö vaikuttaa loppulujuuteen korottaen, mutta alkulujuuteen laskien. Masuunikuonaa sisältävä betonin viruma ja

karbonatisoitumisnopeus ovat suurempia kuin kuonattomalla betonilla. Masuunikuonan hienous on sementin luokkaa [6, s. 60].

Silika on piin ja piiraudan valmistuksessa muodostuva, erittäin hienojakoinen pozzolaani. Silikan vaikutus betonin lujuuteen on merkittävä. Sitä käytetään valmistettaessa muun muassa korkealujuusbetoneita. Silikan käyttö vaikuttaa runsaasti tarvittavaan veden määrään lisäämällä massan vedentarvetta [6, s. 60].

## 2.2 Runkoaine

Toinen betonin pääraaka-aine on runkoaine, jonka sementtiliima sitoo yhteen. Runkoaineen tilavuusosuus vaihtelee betonilta vaadittavien ominaisuuksien mukaan välillä 65 - 80 %. Käytettävälle runkoaineelle luovat vaatimuksia lähinnä betonilta vaadittavat ominaisuudet. Usein merkittävimpiä ominaisuuksia käytettävälle kiviainekselle ovat sen lujuus, saatavuus ja hinta [6, s. 31].

Runkoaineen valinta vaikuttaa suuresti betonin ominaisuuksiin. Koska betonilaatuja ja käyttökohteita on lukemattomia, on mahdotonta nimetä suoraa esimerkkiä hyvästä runkoaineesta. Esimerkiksi maan alle jäävän anturabetonin runkoaineen vaatimukset liittyvät ainoastaan rakenteellisiin ominaisuuksiin. Vastaavasti pesupintaisessa parvekeelementissä saatetaan runkoaineelta vaatia myös visuaalista näyttävyyttä, jolloin sen värillä ja muodolla voi olla erityisiä vaatimuksia, jotka eivät välttämättä vaikuta rakenteen teknisiin ominaisuuksiin.

On kuitenkin olemassa asioita, jotka selkeästi huonontavat runkoainetta. Yleisesti voidaan todeta, että runkoaineen tulee olla puhdasta. Se ei saa sisältää liian suuria määriä betonille haitallisia kemikaaleja eikä orgaanisia tuotteita, jotka voivat ajan kuluessa hajota, ja täten vaikuttaa kovettuneen betonin ominaisuuksiin. Yleisesti voidaan myös todeta, että luonnon muovaama kiviaines on useimmiten parempaa kuin mekaanisesti murskattu. Tämä johtuu kivrakeen muodosta. Mekaanisesti murskattu kivi on kulmikas ja siinä on teräviä reunoja, kun vastaavasti luonnon muovaama kiviaines on usein muodoltaan pyöreää. Pyöreärakeinen kivi tekee betonimassasta notkeampaa kuin teräväreunainen. Huokostuksen kannalta myös raemuodolla on merkitystä. Mikäli runkoaineena käytetään murskattua kiviainesta, jonka raemuoto on valmistusprosessista johtuen kulmikas, voivat kivet vähentää ilmamäärä. Tämä ei kuitenkaan ole aina huono

asia. Kulmikkaat kivet voivat toimia silppurina suuremmille ilmahuokosille, jolloin valmiissa massassa olevien ilmakuplien koko pienenee. Tämä puolestaan laskee huokosjakoa. Rouhittu kiviaines sisältää myös pölyä. Kiviaines, jonka raekoko on pienempi kuin suojahuokosen halkaisija, sitoo itseensä huokostinainetta. Tästä johtuen rouheki-vestä tehdyissä massoissa joudutaan käyttämään suurempia huokostinannostuksia, kuin pyöreää luonnonkiveä sisältävissä massoissa. [6, s. 31; 9, s. 6.]

### 2.3 Vesi

Betonin kolmas osa-aine on vesi. Betonin kovettuminen perustuu sementin reagoimiseen veden kanssa. Tätä reaktiota kutsutaan hydrataatioksi. Sen seurauksena sementin hydraulisia ominaisuuksia omaavat aineet muodostavat sementtigelä, joka ajan kuluessa muuttuu kovaksi sementtikiveksi ja sitoo runkoaineen betoniksi. Veden tärkein vaatimus betonissa käytettäessä on sen puhtaus. Käytännössä voidaan yleistää että mikäli vesi on juomakelpoista, se kelpaa myös betoniin. Juomaveden lisäksi myös merivesi kelpaa usein betonin reaktioiden kannalta käyttövedeksi, mutta sen sisältämät kloridit voivat aiheuttaa raudoituksen korroosion nopeutumista, eikä sitä siksi tule käyttää raudoitetuissa betonirakenteissa. [6, s. 51; 6, s. 62.] Järvivesi kelpaa usein betonin valmistukseen. On kuitenkin syytä tarkistaa veden humuspitoisuus, ja esimerkiksi suoalueilla oleva vesi sisältää usein runsaasti sulfaatteja ja eloperäistä hienoainesta. Humusaineiden vaikutus betoniin tulee selvittää tapauskohtaisesti, ja vedessä olevat sulfaatit voivat aiheuttaa kalsiumaluminaatin paisumista, joten näiden yhteiskäyttöä tulee välttää. Etenkin sokeripitoinen vesi on betonille erittäin haitallista, sillä sokeri voi käytännössä pysäyttää kovettumisen kokonaan [10].

### 2.4 Lisäaineet

Betonissa käytetään usein erilaisia lisäaineita, joilla pyritään vaikuttamaan joko valetavan tai jo kovettuneen betonin ominaisuuksiin. Kovettuneen betonin lisäaineita ovat muun muassa tietynlaiset kiihdyttimet, huokostimet, halkeilunestoaineet ja tiivistysaineet. Vastaavasti valetavan betonin ominaisuuksiin vaikutetaan esimerkiksi notkistimilla, hidastimilla ja kiihdyttimillä. [11; 12.]

Kiihdyttimillä tarkoitetaan aineita, joilla vaikutetaan joko betonin sitoutumiseen tai sen alkulujuuden kehitykseen. Kiihdyttimiä voidaan käyttää esimerkiksi silloin, kun betonointia tehdään kylmissä olosuhteissa. Tällöin voi olla työn etenemisen kannalta tärkeää, että betoni saavuttaa riittävän lujuuden aikataulussa, jolloin voidaan käyttää kovetumisvaiheeseen vaikuttavia kiihdyttimiä [13]. Halkeilunestoaineilla puolestaan pyritään vähentämään valetun tuotteen lopullista halkeilua. Tällaisia aineita voidaan käyttää esimerkiksi lattioissa ja muissa vastaavissa kohteissa, joissa halkeilu voi aiheuttaa rakenteellisia tai visuaalisia ongelmia [14, s. 438]. Tiivistysaineilla voidaan lisätä betonin vedenpitävyyttä. Niitä käytetään muun muassa erilaisissa nestemäistä vettä sisältävissä rakenteissa, kuten jätevesialtaissa [15]. Hidastinaineilla siirretään juoksevan betonimassan sitoutumisen alkamisajankohtaa. Tämä tulee tarpeelliseksi esimerkiksi valmisbetonituotannossa, jossa betonia voidaan joutua kuljettamaan pitkiä matkoja, ja massa voi joutua seisomaan autossa pitkään ennen kuin se päästään purkamaan. Toinen käyttökohde hidastimille ovat massiiviset valut, joissa betonin lämmöntuotto voi nostaa massan lämpötilaa liian korkeaksi. Tällöin hydrataatiota voidaan hidastaa ja jakaa ajallisesti pidemmälle ajanjaksolle, jolloin lämpö ehtii tasautumaan ja siirtymään ulos valettavasta kappaleesta. [16]

Tämän opinnäytetyön kannalta merkittävimpiä ovat huokostinten lisäksi notkistimet. Notkistimia käytetään joko vedenvähennykseen, jolloin samalla sementtimäärällä saadaan lujempaa betonia, tai vastaavasti voidaan sementin määrää laskea, jolloin lujuus pysyy samana, mutta kustannukset laskevat. Toinen käyttötarkoitus on notkeuden lisääminen, jolloin veden ja sementin määrä pysyy samana, mutta massan notkeus kasvaa, jolloin pumppaus ja massan tiivistys helpottuvat. Nykypäivänä käytetyimpiä notkistimia ovat polykarboksylaattipohjaiset notkistimet. Niiden etuna aiemmin käytettyihin notkistintyyppisiin ovat niiden erittäin suuret notkistustehot. Haittapuolena käytetyt polymeerit luovat betoniin paljon ilmakuplia, jotka ovat liian suuria toimiakseen suojahuokosina. Tästä syystä polykarboksylaattinotkistinten kanssa joudutaan käyttämään ilmantappajaksi kutsuttavia aineita, jotka ominaisuuksillaan hajottavat syntyviä ilmakuplia. Tämä ei ole ongelma betonissa, joka ei pääse jäätymään. Jos betonia pitää huokostaa jäätymistä vastaan, toimii ilmantappaja päinvastaisesti huokostinaineen kanssa, jolloin huokostuksen onnistuminen muuttuu vaikeammaksi.

### 3 Huokostuksen syyt säilyvyyden kannalta

#### 3.1 Säärasitukset

Suomessa ulkotiloissa olevat rakenteet ovat voimakkaan säärasituksen alaisina. Kesäisin rakenteisiin voi muodostua merkittäviä lämpötilaeroja, jos rakenne on esimerkiksi osittain auringonpaisteessa, ja osittain esimerkiksi viileässä vedessä, tai ulottuu maan alle, jossa lämpötila pysyy matalampana kuin suorassa auringonpaisteessa. Tämä aiheuttaa eri lämpötiloissa tapahtuvista erisuurista lämpölaajenemisista johtuvia jännityksiä [17. s, 3]. Talvisin lämpötilat taas voivat laskeutua erittäin alhaisiksi, ja kesäisin nousta hyvin korkeiksi. Rakenteiden kannalta hyvin raskasta aikaa ovat kevät ja syksy, jolloin lämpötila voi vaihdella vuorokauden aikana hyvin paljon, silloin ulkona, sekä rakenteiden pintaosissa oleva vesi voi käydä sulamis-jäätymissyklin läpi jopa vuorokauden sisällä. Luontaisen sulamisen ja jäätymisen lisäksi jäätä usein poistetaan kulkuteiltä erilaisilla jäätymisenestoaineilla. Nämä aineet voivat olla esimerkiksi tavallista suolaa, jota levitetään esimerkiksi piharappusille. Tämä lisää betonin rasitusta entisestään, kun sulamisesta ja jäätymisestä johtuvan veden tilavuudenmuutoksen lisäksi betoni altistuu suolalle

#### 3.2 Pakkasrasitukset ja niiden vaikutukset

Pakkasen voidaan katsoa aiheuttavan kahta erilaista vauriotyyppiä, jotka ovat sisäinen pakkasvaurio, ja suola-pakkasrapautuminen [18, s. 17]. Suola-pakkasrapautuminen vaikuttaa betonin pintakerrokseen ja sen vaikutus on sekä visuaalinen että rakenteellinen, sillä se pienentää betonin tehollista poikkipinta-alaa. Suola-pakkasrapautumisen edetessä raudoitteiden tasalle, se alkaa vaikuttaa terästen korroosion etenemiseen. Suolan betonille tuhoisa vaikutus johtuu suolan aiheuttamasta paineen kasvusta jääkiteen kasvaessa betonin sisällä. Koska jääkiteet syntyvät ensimmäisenä suuriin huokosiin, huokosessa olevan jäätymättömän veden suolapitoisuus kasvaa. Tällöin betonin sisälle syntyy suolaepätasapainoja eri alueiden välille. Epätasapainon takia pienemmissä huokosissa oleva vesi virtaa suurempaan huokoseen tasapainottaakseen tilanetta ja aiheuttaa samalla paineen kasvua ensimmäisessä huokosessa. Pinnan rapautumiseen vaikuttaa myös suolan sulattava vaikutus. Kun suola sulattaa jäätä ja lunta betonin pinnalta, vaatii veden olomuodonmuutos merkittävän määrän energiaa tapah-

tuakseen. Tällöin tarvittava energia johtuu lämpönä betonin pinnasta jäähän, ja samalla betonin pintaosan lämpötila laskee merkittävästi. [19, s. 27.]

Sisäinen pakkasvaurio syntyy, kun betonin sisällä sen huokosissa oleva vesi jäätyy ja laajenee tällöin noin 9 %. Jäätyvä vesi tarvitsee tilaa laajentuakseen, ja tällöin aiheuttaa jännitystä betoniin sisältäpäin. Tapahtuma itsessään on varsin samankaltainen kuin tilanne, jossa vedellä täytetty astia pullistuu tai halkeaa pakastimessa tai pakkasilmassa.

Sisäinen pakkasvaurio on ainoastaan rakenteellinen, eikä sitä voida useinkaan havaita visuaalisesti tarkastelemalla. Sen aiheuttamat muutokset ovat betonissa varsin laajoja. Betonin sisäisen kosteuden ollessa yli kriittisen vaurioitumisrajan, heikentää jäätyminen useita sen mekaanisia ominaisuuksia. Selkeää johdonmukaisuutta ei eri ominaisuuksien heikkenemisellä toisiinsa verrattuna ole. Jäätyminen vaikuttaa kutakuinkin kaikkiin betonin mekaanisiin ominaisuuksiin heikentäen niitä. Käytännössä voidaan sanoa että pakkasvaurion laajuuteen vaikuttavat lähes kaikki betonin ominaisuudet. Aiheen vakaavuudesta huolimatta sisäistä pakkasvauriota on kuitenkin tutkittu melko vähän [18, s. 18].

Kokeissa, joissa sisäisen pakkasvaurion vaikutuksia tutkittiin, käytettiin eri kyllästysasteisia koekappaleita. Suurin kyllästysaste vastasi tilannetta jossa koekappale oli lähes täysin kyllästynyt vedellä. Tällainen tilanne on kokeellinen, eikä sellaista todennäköisesti tapahdu käytännössä [18, s. 18]. Kokeista saaduista tuloksista havaittiin, että betonin puristuslujuus voi pienentyä jopa 35 %. Vastaava arvo halkaisuvetolujuudelle oli 70 %. Kimmokertoimen pienenemiselle ei kokeissa löydetty mitään selkeää, lineaarisesti muutosta kuvaavaa kaavaa, vaan muutokset vaikuttivat toimivan sattumanvaraisesti. Betoniterästankojen tartuntalujuuden huomattiin kokeissa putoavan puoleen pakkasvaurioitumisen seurauksena. Sileillä tangoilla tartuntalujuus katosi kokeissa lähes kokonaan, ja pienin todettu lujuuden arvon aleneminen oli 70 % vaurioitumattomasta lujuudesta [18, s. 18-24].

### 3.3 Pakkasvaurioiden ehkäiseminen

Pakkasvaurion muodostumista voidaan hallita usealla eri tavalla. Vaurio syntyy, kun veden jäätymisestä syntyvä paine ylittää betonin lujuuden. Yksinkertaisin keino ehkäis-

tä pakkasvauriota onkin käyttää riittävän lujaa betonia. Mikäli betonin lujuus on korkeampi kuin jäädästä syntyvä paine, ei vauriota synny. Näin lujan betonin valmistaminen on kuitenkin monessa tapauksessa turhan kallista ja siksi epäkäytännöllistä. Betonin lujuus nousee, kun käytetään pienempää v/s suhdetta, enemmän sementtiä, tai suuremman lujuuden omaavaa sementtiä. Myös tiettyjen seosaineiden, kuten silikan käyttö, voi lisätä betonin lopullista lujuutta huomattavasti. Mikäli betonilta rakenteellisesti vaadittu lujuus on kuitenkin alhainen, esimerkiksi kevyehkön rakennuksen maanpinnalle jäävässä sokkelissa, ei ole taloudellisesti järkevää käyttää hyvin korkean lujuuden omaavaa betonia. Pakkaskestävyyttä määrittäessä korkean lujuuden perusteella testaus suoritetaan suorana rasituskokeena, jossa koekappaleita jäädytetään ja sulatetaan laboratorio-olosuhteissa useita kertoja peräkkäin.

Toinen tapa hallita pakkasvaurion muodostumista on määrittää betonin pakkaskestävyysluku  $P$ .  $P$ -lukuun vaikuttavat betonin suhteutustekijät, jälkihoitoaika, käytetyn sideaineen laatu, veden ja sideaineen suhde, sekä ilmamäärä.  $P$ -luku voidaan laskea oheisesta kaavasta [20, s. 7].

$$P = \frac{46 * k_{jh} * k_{sid}}{\frac{10 * (WAS)^{1,2}}{\sqrt{a}} - 1}$$

Kaavassa  $k_{jh}$  on jälkihoitotekijä,  $t_{jh}$  on jälkihoitoaika,  $k_{sid}$  on sideainetekijä, WAS on reductoitu ilma-sideainesuhde ja  $a$  on ilmamäärä tilavuusprosentteina [20, s. 16].  $P$ -luku ei siis ota kantaa massassa olevan ilman laatuun ja jakaumaan. Tästä syystä esimerkiksi ilmamittariin jäänyt suurikokoinen ilmahuokonen voi antaa  $P$ -lukua laskettaessa huomattavasti todellisuutta paremman tuloksen.  $P$ -luku menettely on käytössä lähinnä liikenneviraston siltabetoneita koskevissa tapauksissa.

Kolmas tapa hallita pakkasvaurion syntymistä perustuu pitkälti suojahuokosiin. Ne toimivat jäätyvälle vedelle pakotilana tilavuuden kasvun yhteydessä. Teorian mukaan kapillaarihuokosissa tapahtuva jään muodostuminen työntää nestemäistä vettä geelihuokosia pitkin lähimpään tyhjään huokoseen, tai kappaleen ulkopinnalle. Veden työntäytessä eteenpäin, se aiheuttaa hydraulista painetta. Mikäli tämä paine kasvaa yli betonin lujuuden, syntyy pakkasvaurioita. Teorian mukaan jäätymisestä muodostuvan hydraulisen paineen määrä riippuu jään muodostumisnopeudesta, kapillaarihuokosten keskinäisestä etäisyydestä, matkasta lähimpään vapaaseen tilaan, sekä geelihuokos-



ten läpäisevyydestä. Hydraulisen paineen esitetään muodostuvan oheisen kaavan mukaisesti [21, s. 2].

$$P = a \left( 1,09 - \frac{1}{s} \right) * \frac{uR}{K} * \left( \frac{L^3}{r_b} + \frac{3L^2}{2} \right)$$

Kaavassa P on syntyvä hydraulinen paine, a on muun muassa veden viskositeetista riippuva tekijä, s on sementtipastan vedellä kyllästymistä kuvaava kerroin, u on se veden määrä, joka jäätyy sementtikilossa, kun lämpötila putoaa yhden asteen, R on jäähtymisnopeus °C/s, K on sementtipastan luontainen läpäisykyky neliometriä kohden,  $r_b$  on ilmahuokosten keskimääräinen halkaisija, ja L on lyhin etäisyys kahden ilmahuokosen välillä. Viimeisenä esitettyä arvoa kutsutaan myös huokosjaksi. Kuten kaavasta voidaan lukea, on huokosjaon merkitys erittäin voimakas syntyvän paineen kannalta, sillä se on korotettuna kolmanteen potenssiin. Huokosjako on myös ainoa tekijä johon vaikuttaminen on suhteellisen yksinkertaista [21, s. 2].

Tässä opinnäytetyössä ei varsinaisesti oteta kantaa eri menetelmien toimivuuteen, eikä niitä vertailla keskenään. Tehtävistä kokeista mitataan ilmamäärä sekä huokosjako. Kaikkia muodostuvien P-lukujen ja hydraulisten paineiden laskentaan tarvittavia arvoja ei tässä työssä tunneta, joten lopullisiin arvoihin ei oteta kantaa.

### 3.4 Huokokset

Huokosten syntyminen betoniin on sen ominaisuuksille luontaista, eikä sitä voi välttää [6, s. 75]. Huokosten koko, määrä ja jakautuminen voivat kuitenkin vaihdella hyvin paljon, ja nämä asiat usein määrittävätkin hyvin paljon betonin laatua. Betonissa on neljää erilaista huokostyyppiä. Nämä eritellään kokonsa ja syntytapansa mukaan [6, s. 77].

Kaikkein pienimpiä ovat geelihuokokset. Niiden halkaisija vaihtelee välillä 0,001-0,002 mikrometriä. Kokonsa vuoksi näissä huokosissa oleva vesi ei Suomen talviolosuhteissa yleensä jäädy. Nämä huokokset muodostavat 25-30 % sementtigelin kokonaistilavuudesta. Niiden merkitys on kuitenkin varsin suuri rakenteellisesti, sillä viruma johtuu kuormitetussa rakenteessa siitä, kun vesi virtaa ulos puristuksen alaisista geelihuokosista, huokokset tiivistyvät, eikä kuormituksen lakattua vesi enää palaudu alkuperäiseen määrään tiivistyneessä geelihuokostossa [6, s. 88].

Seuraavaksi pienimpiä ovat kapillaarihuokokset. Nämä syntyvät, kun kovettumattomassa sementtiliimassa on ylimääräistä vettä, joka ei osallistu sementin kanssa reaktioon. Teoriassa v/s suhteen ollessa 0,4, ja hydrataatioasteen ollessa lähellä 100 %, ei kapillaarihuokosia synny. Käytännössä hydrataatio ei kuitenkaan koskaan ole täydellistä, joten kapillaarihuokosia ei voi täysin välttää. Betonissa, jonka v/s suhde on alle 0,7, geelihuokokset sulkevat kapillaarihuokokset ajan kuluessa. V/s arvolla 0,4 tämä tapahtuu noin kolmen vuorokauden kuluessa, ja tätä suuremmilla arvoilla aika kasvaa merkittävästi. Betonin ominaisuuksien kannalta kapillaarihuokosilla on suuri merkitys. Niitä pitkin betoniin nousee vettä ja veden mukana voi tulla haitallisia aineita, kuten klorideja. Kapillaarihuokosten koko vaihtelee välillä  $10^{-5}$  mm – 0,05 mm [6, s. 76-77].

Toiseksi suurimpia ovat suojahuokokset. Niiden merkitys nimensä mukaisesti on suojata betonia jäätyksen aiheuttamilta ongelmilta. Käytännössä hyvin huokostetussa betonissa suojahuokosten osuus kokonaisilmamäärästä on suuri, ja ne ovat ilman täyttymiä. Tällöin betonin jäätyessä, ja kapillaarihuokosissa olevan veden tilavuuden kasvaessa, jäätymisestä aiheutuvalla paineella on mahdollisuus purkautua suojahuokosten sisään. Veden taas sulaessa pääsee se virtaamaan suojahuokosista takaisin kapillaarihuokosiin. Tällöin vältetään haitallisilta sisäisiltä jännityksiltä, ja betonin käyttöikä paranee huomattavasti. Mikäli betoni on kuitenkin kyllästynyt vedellä, jolloin myös suojahuokokset ovat täyttyneet, ei niistä ole enää hyötyä jäätymistä vastaan. Suojahuokosten koko vaihtelee välillä 0,01 mm – 0,3 mm [6, s. 77].

Kaikkein suurimpia ovat tiivistyshuokokset, jotka syntyvät nimensä mukaan valun ja tiivistyksen yhteydessä. Käytännössä ne ovat huonosti tiivistettyyn betoniin jääviä, ylimääräisiä ilmakuplia. Tiivistyshuokokset laskevat betonin lujuutta, eikä niistä ole käytännön hyötyä. Tämän takia niitä tulee pyrkiä välttämään hyvällä tiivistyksellä [6, s. 77].

Käytännössä pelkkä ilmamäärän mittaus ei vielä kerro juuri mitään betonin säänkestävyydestä. Kahdessa eri betonierässä voi olla täysin sama määrä ilmaa sisällä, mutta ilman jakautuminen voi olla täysin erilainen. Mikäli mittauserässä on muutama suurempi tiivistyshuokonen jäänyt mittausastian pohjalle, eivätkä ne tällöin ole ehtineet nousta pintaan, voidaan ilmamääräksi saada esimerkiksi 5 %. Tällöin huokostamaton betoni ei ensinnäkään ole pakkasen kestävä, mutta se on myös kovettuttuaan heikompaa. Ilmamäärän lisäys betoniin pienentää lopullista lujuutta. Vastaavasti hyvin huokostettu betoni, jossa ei ole yhtään tiivistyshuokosta, voi saada arvon 4,5 % ilmaa. Karkeasti voidaan laskea, että 1 % ilmamäärän nosto laskee loppulujuutta noin 5 %. Tästä syystä

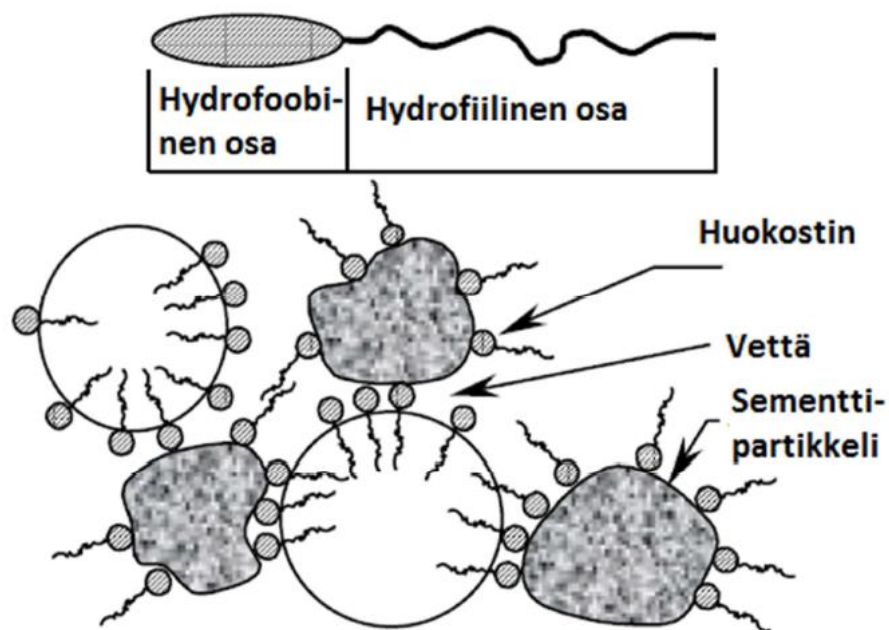
betonin onnistunut tiivistäminen on yhtäläillä ensiarvoisen tärkeää, kuin oikean huokosmäärän ja -jaon aikaiseksi saaminen [22, s. 6; 22, s. 3].

Sen lisäksi, että huokosten tulee olla oikean kokoisia jotteivät ne täyty helposti itsensä vedellä, niiden tulee myös olla sopivalla etäisyydellä toisistaan. Tätä mitattavaa arvoa kutsutaan huokosjaoksi. Huokosjaolla tarkoitetaan pisintä teoreettista matkaa mistä tahansa sementtipastan pisteestä lähimpään suojahuokoseen. Käytännössä vaadittavat huokosjaon arvot vaihtelevat betonin suunnitellun käyttöiän ja oletetun pakkasrasituksen mukaan välillä 200 - 400  $\mu\text{m}$  [8, s. 234]. Huokosjakoa on mahdollista tutkia joko hie kokeella kovettuneesta näytteestä, tai tuoreesta massasta AVA-mittarilla. [23, s. 293; 24, s. 4.]

## 4 Huokostimen toiminta

### 4.1 Huokostinten kemia

Huokostimet ovat pinta-aktiivisia aineita. Nykyään on olemassa kaksi pääryhmää, johon merkittävä osa huokostimista voidaan jakaa, ja johon kaikki tässä tutkimuksessa käytetyt huokostimet kuuluvat: vinsol-hartsipohjaiset huokostimet, sekä tensidit. Vinsol-hartsipohjaiset aineet valmistetaan kantopihkasta kemiallisesti ja synteettisesti jalostamalla, ja tensidit ovat täysin kemianteollisuuden tuotos. Molempien huokostimien toiminta perustuu molekyyliiryhmiin, joissa yksi osa on luonteeltaan hydrofiilinen, ja toinen osa hydrofobinen. Kun nämä molekyylit asettuvat ilma-, ja vesifaasien rajapintaan, veden pintajännitys alenee, ja ilmakuplan rakenne stabiloituu [22, s.4; 22, s. 9]. Kuvassa 3 esitetään periaatekuva huokostinaineen toiminnasta betonimassassa.



Kuva 3. Periaatekuva huokostimen toiminnasta betonimassassa. [22. s, 4]

Hydrofobisuus huokostimessa vaikuttavaan molekyyliin syntyy useimmiten karboksyylihaposta sekä sulfoonihaposta. Hydrofiilisuus puolestaan muodostuu alifaattisten ja aromaattisten hiilivetyjärjestelmien ansiosta. Kemiallisilta ominaisuuksiltaan huokosti-

met muistuttavatkin paljon puhdistusaineita. Pinta-aktiiviset aineet voidaan jaotella hydrofobisen osansa polariteetin mukaan anionisiin aineisiin, kationisiin aineisiin, ionittomiin aineisiin, sekä amfoteerisiin aineisiin. Käytännössä olemassa olevien huokostusaineiden jaottelu edellä mainittuihin osioihin on kuitenkin hankalaa, sillä käytettävä tuote muodostuu usein eri ryhmien aineista, ja sisältää lisäksi muita kemikaaleja [26, s. 6].

On tärkeää, että huokosrakenne pysyy stabiilina, eivätkä kuplat yhdisty helposti tiivistyksenkään yhteydessä. Myös huokosten täytyminen vedellä diffuusion takia on tuoreessa betonimassassa merkittävä negatiivinen tekijä. Näitä ominaisuuksia parantaa huokosten ulkopinnalle muodostuva ulkokuori. Selityksenä kuoren muodostumiselle on esitetty [26, s. 2-3] että pinta-aktiivisten molekyylien hydrofiilinen osa on negatiivisesti varautunut, ja täten vetää puoleensa varautuneita kalsium ioneja, jotka muodostavat ilmakuplan ympärille stabiiloivan kuoren. Tästä mekanismista ei kuitenkaan ole tutkimustietoa, jolla tapahtumaa voitaisiin todistaa.

#### 4.1.1 Vinsol-hartsit

Vinsol-hartsit on kantopihkasta saatava, pitkän jalostuksen vaativa tuote, jonka raaka-aineita syntyy männystä tuotettavien kemian tuotteiden, kuten liuotinten valmistuksen yhteydessä. Kemialliselta koostumukseltaan Vinsol-hartsit on hyvin monimutkainen. Sen koostumuksesta noin 60 % on fenolisia yhdisteitä, 15 % vahoja ja terpeenejä, ja loppu koostuu hartsihapoista. Koska tuote ei tällaisenaan ole hyvin liukenevaa, täytyy se neutraloida natriumhydroksidilla liukenevuuden parantamiseksi. Tässä muodossa aine alkaa muodostamaan betoniin sekoitettuna ilmakuplia koossa pitäviä ja niiden yhdistymistä estäviä rakenteita. Rakenteiden muodostus alkaa heti, koska neutraloimiseen käytetty natrium on valmiiksi tuotteessa, eikä aineen tarvitse erikseen reagoida betonin alkalien kanssa aloittaakseen toimintansa. Myös muita puuteollisuudesta saatavia tuotteita voidaan käyttää huokostimina. Esimerkkinä oleiinihappoa sisältävät jalostustuotteet, joissa esiintyy pitkiä hiiliketjuja, ja jotka päättyvät karboksyyliinryhmään. Nämä aineet tuottavat ilmaa hitaammin kuin vinsol-hartsit, mutta ilmankuplien koko on pienempi kuin muissa huokostinaineissa [25, s. 8-9].

#### 4.1.2 Tensidit

Tensidihuokostinten valmistukseen tarvittavat aineet syntyvät esimerkiksi voiteluöljyjen sekä kerosiinien valmistuksen sivutuotteina. Näitä tuotteita ovat muun muassa aromaattiset sulfaattihapot. Näitä aineita neutralisoidaan natriumilla, jotta niiden vesiliukoisuus, ja sitä kautta käytettävyys paranee. Tensideillä tehty huokostus on usein nopeampaa kuin vinsol-hartsipohjaisilla aineilla tehty, mutta huokosten koko jää myös usein suuremmaksi. Tensideillä on käyttöä myös vettä vähentävinä tuotteina [25, s.9].

#### 4.2 Huokostinaineiden annostelu

Käytännössä huokostimen valitseminen ja oikea annostelu tapahtuvat kokeilemalla. Huokostimen toimintaan vaikuttavatkin erittäin monet asiat. Esimerkiksi runkoaineen rakeisuudella on erittäin suuri merkitys huokostamiseen: jos runkoaineessa on liian vähän hienoainesta, ei huokosille ole tarpeeksi massaa johon muodostua. Vastaavasti taas jos fillerin osuus kiviaineksesta on liian suuri, voi syntyvä huokosrakenne olla epästabiili, jolloin se ei säily, vaan hajoo tiivistyksen yhteydessä. Myös sementtilaadulla, massan lämpötilalla, v/s suhteella, sekoitusajalla ja muilla samassa massassa käytettävillä lisä-, ja seosaineilla on suuri merkitys syntyvään huokosjakoon. Näistä muuttujista johtuen ei ole useinkaan mahdollista sanoa suoraan toimintatapaa, jolla saataisiin varmasti hyvä huokosjako [22, s. 6].

Tämän työn kannalta yksi tärkeimmistä huokostimen annosteluun vaikuttavista tekijöistä on notkistinaine. Vaikka polykarboksylaattinotkistin ei itsessään oletettavasti vaikuta huokostimen toimintaan ja annosteluun, on siihen kuitenkin sekoitettuna ilmantappajainetta, joka myös sekoittuu massaan. Tästä syystä on oletettavaa, että mikäli samat testit tehtäisiin eri notkistimella, voisivat tulokset olla hyvin erilaisia. Vastaavasti mikäli notkistimessa käytettäisiin toista ilmantappajainetta, voisivat tulokset taas muuttua. On siis erittäin tärkeää ymmärtää, että testeissä saatavat tulokset, ja niistä tehtävät päätelmät, ovat vertailukelpoisia ainoastaan keskenään, eikä niistä siksi voi tehdä suoria johtopäätöksiä mihinkään muuhun betonimassaan, jonka raaka-aineissa tai sekoitusmenetelmissä on eroja tämän työn vastaaviin muuttujiin.

Yleisesti on havaittu, että huokostimen annostelun lisäys ei vaikuta suuresti syntyvien ilmakuplien kokoon, vaan ainoastaan määrään [9, s. 12]. Tästä syystä, jos tiedetään, että jokin huokostin antaa tietyllä annostuksella esimerkiksi 6 tilavuus-% ilmaa, mutta

liian suuren huokosjaon, ei useinkaan ole enää kannattavaa nostaa annostusta, vaan vaihtaa joko huokostinta tai massan muita ominaisuuksia. Näin voi todeta, sillä mikäli ilmamäärä nousee kovin korkeaksi, alkaa se vaikuttaa lujuuksiin huomattavasti. Tässä työssä tehtyjen kokeiden pohjalta voidaan todeta, että on mahdollista saada hyvä huokosjako jopa alle 5 tilavuus-% ilmamäärällä. Tästä voidaan päätellä, että suuri ilmamäärä, ja korkea huokosjako tarkoittavat, että ilmakuplat ovat suurikokoisia, eikä niillä siksi ole mahdollista saada matalaa huokosjakoa. Vastaavasti mikäli ilmamäärä on 4 tilavuus-%, ja huokosjako on kohtalaisen hyvä, on järkevää koettaa pienentää huokosjakoa nostamalla ilman ja huokostimen määrää.

Koska huokostinaineiden annostelumäärät ovat hyvin pieniä, joudutaan tuotteita usein laimentamaan vedellä käyttöä varten. Käytettävät laimennussuhteet vaihtelevat käyttökohteen tapojen ja toiveiden mukaan. Mitä voimakkaammin huokostinta laimennetaan, sitä tarkemmaksi annostelu saadaan. Tavanomaisia laimennussuhteita ovat muun muassa 1:9 ja 1:19. Erityisesti tehdasoloissa, joissa osa-aineiden annostelu on hyvin pitkälle automatisoitu, on tärkeää, että tuotetta laimennetaan riittävästi, jotta annosteluvaa'an mahdollinen epätarkkuusvaikutus saadaan minimoitua, ja annostelu pysymään tarkkana. Käytettyyn laimennussuhteeseen vaikuttaakin voimakkaasti annostelulaitteiston ominaisuudet.

## 5 Testaus

Valittaessa testeissä käytettyjä betonireseptejä, mietittiin tulosten sovellettavuutta käytäntöön. Suuri osa betonista, jota valmistetaan, käytetään työmailla valmisbetonimassana, jolloin se tuodaan kuljetusautolla paikalle, ja sen jälkeen puretaan esimerkiksi pumppaamalla tai rännillä joko suoraan valukohteeseen tai kuljetusastiaan [27]. Toinen merkittävä käyttökohde betonille on suur-elementtien valmistuksessa. Tällöin betoni valmistetaan elementtitehtaassa ja se valetaan elementtimuotteihin paikan päällä. Betonilla on myös huomattava määrä muita käyttökohteita, kuten erilaiset pienet elementit kuten pihakivet, tai työmaalla sekoitettavat kuivabetonit. Usein erilaisia betonityyppejä käytetään yhdessä. Esimerkiksi elementtien saumoissa voidaan käyttää paikan päällä sekoitettua kuivabetonia, tai tehtaalta tilattua valmisbetonia. Vastaavasti anturat ovat hyvin usein paikallavalettuja, ja niiden päälle asennetaan tehdasvalmisteisia elementtejä, jotka kiinnitetään anturaan valmisbetonilla valamalla [28].

Työssä saatavista tuloksista haluttiin saada käyttökelpoista tietoa tuotteiden toiminnasta tavanomaisissa tapauksissa, joten käytettäviksi resepteiksi valittiin tyypillistä valmisbetonireseptiä ja tyypillistä elementtimassareseptiä vastaavat reseptit. Käytetyt reseptit esitetään kuvassa 4.

valmisbetonimassa		elementtimassa	
filleri	5 %	filleri	5 %
0-8 mm	50 %	0-8 mm	50 %
8-16 mm	45 %	8-16 mm	45 %
sementti	320 kg	sementti	380 kg
v/s	0,6	v/s	0,45

Kuva 4. Taulukot käytetyistä betonirespteistä.

Taulukossa esitetään kiviaineksen määrä rakeisuusalueittain kokonaisrunkoaineen tilavuudesta. Käytetyistä kiviaineksista filleri on luonnon muovaamaa kiviainesta. Myös kiviaines rakeisuusalueelta 0-8 mm on luonnon muovaamaa. Kiviaines alueelta 8-16 mm on murskattua kiviainesta. Tämän lisäksi reseptiin kuului notkistin- ja huokostinaineet. Kiviainesten kosteus mitattiin, ja niiden tehollinen vesimäärä vähennettiin lisätyn veden määrästä. Samoin tehtiin huokostinten sekä notkistinten sisältämälle veden määrälle.

Valmisbetonin ja elementtibetonin tavallisimmat erot liittyvät työskentelyajan keston, sekä varhaislujuuden kehitykseen. Koska työmaalla oleva käyttökohde voi olla pitkän-



kin ajomatkan päässä betonitehtaasta, on tärkeää, että betonimassa pysyy oikeassa notkeusluokassa työmaalle saakka. Liian nopeasti jäykistyvä betoni voi olla työmaalla mahdoton tiivistää tai pumpata muottiin. Pahimmassa tapauksessa betoni voi jäädä kuljetusautoon sisälle. Näistä syistä on tärkeää, että betoni ei sitoudu liian nopeasti. Vastaavasti elementtitehtaalla liian hitaasti jähmettyvä betoni on ongelma, sillä elementin pinnan viimeistely täytyy pystyä tekemään oikeassa vaiheessa, ja mikäli lujisuuden kehitys on liian hidasta, voi muottikierto viivästyä, joka puolestaan pienentää tehtaan tehokkuutta. Valmisbetonimassoissa tulee vastaan myös erilaisia vaatimuksia valukohdeesta riippuen, toisin kuin elementtimassoissa. Esimerkiksi talvella valettaessa kylmä ilma voi aiheuttaa lisävaatimuksia betonimassalle. Heti valun jälkeen betonin jäätyminen on estettävä, sillä liian aikainen jäätyminen voi kriittisesti vaikuttaa betonin loppulujuuteen. Kun betoni on saavuttanut jäätymlujuutensa, on sen lämpötilalla edelleen paljon merkitystä, sillä kovettuminen hidastuu merkittävästi lämpötilan laskiessa. Tämä aiheuttaa ongelmia, mikäli työmaan aikataulun takia muottien purkamiselle ja rakenteen kuormittamiselle on asetettu aikataulu [29; 30]. Elementtitehtaassa lämpötilojen vaihtelu ei useinkaan aiheuta samankaltaisia ongelmia, sillä olosuhteita voidaan tehtaassa hallita melko suurella tarkkuudella.

## 5.1 Materiaalit

### 5.1.1 Sementit

Testeissä käytettiin viittä erilaista sementtiä. Tässä raportissa sementeistä käytetään nimikkeitä sementti 1-5. Kuvassa 5 esitetään sementtien tyyppi ja lujuusluokka.

Käytettävä nimi	laatu	lujuusluokka
sementti 1 (C II /42,5 N)	CEM II/ B-M(S-LL)	42,5 N
sementti 2 (C II /42,5R)	CEM II/ A-LL	42,5 R
sementti 3 (C I /52,5 R)	CEM I	52,5 R
sementti 4 (C I /42,5N)	CEM I	42,5N
sementti 5 (C I /52,5R)	CEM I	52,5 R

**Kuva 5. Sementtityypit, lujuusluokat, ja työssä käytettävät nimet.**

### 5.1.2 Runkoaine

Yksi merkittävä tekijä huokostuksen onnistumiseen on huokostimen yhteistoiminta muiden käytettävien aineiden kanssa. Runkoaineessa merkittävin yksittäinen tekijä on hienoaineuksen oikea määrä. Koska suojahuokokset muodostuvat sementin, fillerin ja veden muodostaman massan sekaan, on fillerin oikea määrä tärkeä. Jos filleriä on liian vähän, ei ole mahdollista saada tarvittavaa määrää ilmaa sekoittumaan mukaan. Jos filleriä taas on liian paljon, jää huokoston rakenne epästabiiliksi, ja voi tällöin hajota tiivistämisen yhteydessä [31, s. 41].

Kokeiden tarkkuuden lisäämiseksi runkoaineiden kosteus mitataan maanantaisin ja keskiviikkoisin. Tämä tapahtuu punnitsemalla ensin käytössä oleva kiviaines, ja merkittävällä tulos ylös. Tämän jälkeen kiviainesta pidetään uunissa 150°C:n lämpötilassa 120 minuuttia, jonka jälkeen kuiva tuote punnitaan uudestaan. Vertaamalla alkuperäisen ja kuivan kiviaineuksen painoeroja, lasketaan käytössä olevan tuotteen kosteuspi-toisuus.

Runkoaineen rakeisuuskäyrän selvittämiseksi kustakin kiviaineesta otetaan kuiva näyte, joka seulotaan seulasarjan läpi täryttämällä. 15 minuutin tärytyksen jälkeen jokaisesta seulasta punnitaan siihen jääneen kiviaineuksen massa. Tällä tavalla saadaan selville sekoitettavan kiviaineuksen raekokojakauma. Kun kustakin kivityypistä lasketaan käytettävään runkoaineeseen tuleva suhteellinen osuus, saadaan tuloksena käytettävän runkoaineen rakeisuuskäyrä. Kuvassa 6 esitetään testeissä käytetyn kiviainessekoituksen rakeisuuskäyrä



Kuva 6. Kokeissa käytetyn runkoaineseoksen rakeisuuskäyrä.

### 5.1.3 Huokostimet

Testeissä käytettiin neljää erilaista huokostinainetta. Huokostimet 1 ja 3 olivat tensideihin perustuvia aineita, huokostin numero 2 oli vinsol-hartsin perustuva aine, ja huokostin numero 4 oli sekoitus tensidejä ja vinsol-hartsia. Nämä esitetään kuvassa 7.

käytettävä nimi	pohjaisuus	laimennussuhde
huokostin 1	tensidi	1:19
huokostin 2	vinsol-harts	1:19
huokostin 3	tensidi	1:03
huokostin 4	tensidi ja vinsolharts	1:03

Kuva 7. Käytetyt huokostimet, niiden käyttönimet, vaikuttava aine, sekä laimennussuhde

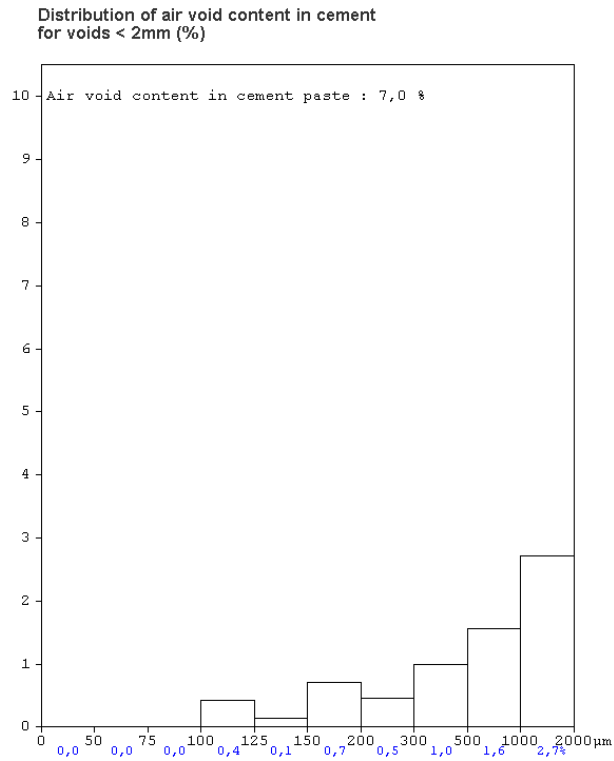
Huokostimet 1 ja 2 laimennettiin veteen suhteessa yksi osa huokostinta, 19 osaa vettä, huokostimet 3 ja 4 laimennettiin suhteessa yksi osa huokostinta, 3 osaa vettä. Näihin laimennus suhteiden käyttämiseen päädyttiin, koska käytetyt huokostinmäärät olisivat puhtaana aineena olleet niin pieniä, että annostelu olisi ollut vaikeaa. Esimerkiksi sementillä numero 4 huokostimen numero 1 määrä valmisbetonireseptissä oli puhtaana aineena ainoastaan 1,65 grammaa. Tämän kokoisen määrän annostelu olisi hyvin vaikeaa, sillä mitta-astian täydellinen tyhjentäminen on haastavaa ja aikaa vievää. Laimentamalla tuotetta saatiin mahdollisesti mitta-astiaan annostelun jälkeen

jäävää vaikuttavaa materiaalia, ja jäännöksestä johtuvaa virhettä pienennettyä merkittävästi. Huokostimen numero 3 tiedettiin olevan valmiiksi laimeampaa kuin huokostin numero 1, joten sitä päätettiin laimentaa vain suhteessa 1:3. Huokostimen numero 2 laimennus suhde päätettiin samaksi kuin huokostimen numero 1, sillä näillä on sama valmistaja, ja oletettiin että niiden kuiva-ainespitoisuus on sama. Vastaavasti toimittiin huokostinten 3 ja 4 kohdalla. Huokostinten laimennukseen käytetyt suhteet esitetään kuvassa 7.

#### 5.1.4 Notkistin

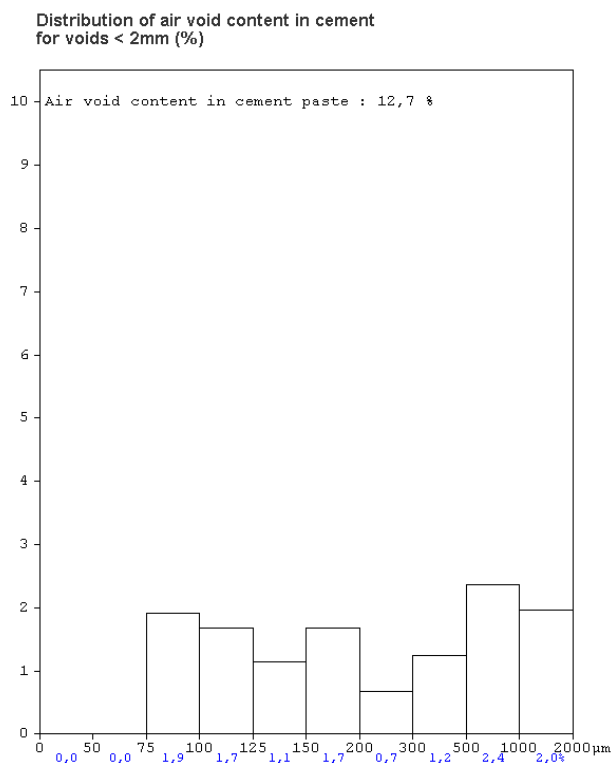
Toinen erityisen merkittävä tekijä tehtävissä kokeissa on notkistimen tyyppi. Tämän opinnäytetyön kokeissa käytetään polykarboksylaattinotkistinta. Tällaisille notkistimille on tyypillistä, että ne sisältävät ilmantappajaksi kutsuttavaa ainetta. Ilmantappajan tarkoitus on estää notkistinnestettä vaahtoamasta. Ilmantappajan toiminta perustuu sen kykyyn rikkoa syntyviä ilmakuplia, jolloin vaahtoa ei pääse muodostumaan. Ilmantappajan funktio on siis täysin vastakkainen kuin mitä huokostimen on tarkoitus tehdä. Helposti voitaisiin todeta, että tällaisten notkistinten käyttöä tulisi välttää huokostetussa betonissa. Käytännössä kuitenkin polykarboksylaattinotkistinten teho on kiistämättömän suuri verrattuna esimerkiksi melamiininotkistimiin, joissa ei ole ilmantappajaa. Tästä johtuen on päädytty tilanteeseen, jossa joudutaan käyttämään ilmantappajaa sisältäviä notkistimia yhtä aikaa huokostinaineiden kanssa [6, s. 64–67; 32].

Kuvassa 8 Esitetään sementtipastassa olevan ilman huokoskoon jakautuminen massassa, jossa notkistimena on käytetty polykarboksylaattinotkistinta joka ei sisällä ilmantappajaa. Koko massan ilmamäärä oli 8 tilavuus-%:a, ja huokosjako oli 0,497 mm. Pastan ilmamäärä oli 7 tilavuus-%:a.



**Kuva 8. Ilmahuokosten jakautuminen koon mukaan huokostamattomassa massassa, jossa notkistin ei sisällä ilmantappajaa.**

Kuvassa 9 esitetään samat tiedot massasta, jonka kokonaisilmamäärä oli 5,1 tilavuus-%:a, huokosjako 0,184 mm, ja sementtipastan ilman määrä 12,7 tilavuus-%:a. Massa sisälsi notkistinta, jossa oli ilmantappajaa, sekä huokostinta.



**Kuva 9. Ilmahuokosten kokojakauma huokostetussa massassa, jonka notkistin sisältää ilmantappajaa.**

Vertailumassa kuvassa 8 oli reseptiltään sama lukuunottamatta huokostinta, jota ei käytetty ollenkaan. Näitä tietoja vertailemalla nähdään polykarboksylaatin kyky tuottaa ilmaa betoniin, sekä ilman huono laatu betonin lujuuden sekä pakkasenkestävyyden lisääntymisen kannalta. Tämän lisäksi nähdään selkeästi kuinka pelkkä ilmamäärän tunteminen ei vielä kerro mitään hyödyllistä betonin huokosjaosta. Huokostetun massan sekä vertailumassan eroissa näkyy myös huokostimen kyky tuottaa ilmaa betoniin.

## 5.2 Esivalmistelut

Kokeiden esivalmistelu aloitettiin määrälaskennalla. Kun resepti, testattavien aineiden määrä, sekä betonityyppien määrä tiedetään, voidaan laskea työn valmistumiseksi vaadittavien onnistuvien kokeiden määrä. Kun huokostinaineita on neljä kappaletta, sementtejä viisi erilaista, sekä kaksi betonityyppiä, voidaan laskea lopulliseksi kokeiden määräksi 40 testikoetta, sekä 10 nollakoetta. Yhteensä kokeiden määräksi tulee tällöin 50 koetta. Koska on oletettavaa, että notkeusluokka ei ilmamäärän tavoin todennäköi-

sesti tule onnistumaan joka kokeessa ensimmäisellä yrittämällä oikein, kerrotaan onnistuneiden kokeiden määrä arvolla 2,5, joka oletetaan toteutettavien kokeiden keskimääräiseksi toistuvuudeksi onnistumista varten. Lopulliseksi kokeiden määräksi tulee tällöin 125 koetta. Tämä arvion perusteella lasketaan tarvittava tavaramenekki, ja käytettävät tuotteet tilataan.

### 5.3 Sekoitus

Testimassan sekoitus pyritään tekemään jokaisessa kokeessa samalla tavalla. Työohjeeksi kasatun työjärjestyksen pohjana käytetään standardin EN 480–1:2006 (E) kohdan 6.2 sekoitusohjetta. Tähän ohjeeseen on tehty muutoksia lisäaineiden annostelun ajankohtaan liittyen huokostimen ja notkistimen yhteistoiminnan parantamiseksi. Myös standardissa esitettyihin sekoitetun massan vaatimukseen tehtiin muutoksia siitä syystä, että standardin esittämä notkeusluokka ei ole yleisesti käytössä työmailla eikä muussa teollisuudessa. Kokeiden tarkoitus ei ole tuottaa standardin mukaisia tuloksia, vaan käyttökelpoista, mahdollisesti myyntitiedoiksi kelpavaa tietoa, joten sekoitettavan massan tahdotaan olevan käytännötilanteisiin soveltuvaa. Käytetty sekoitus ohje esitetään liitteessä 1.

### 5.4 Testit

#### 5.4.1 Notkeus

Notkeus mitataan asettamalla painuman määrittämiseksi käytetty kartio vanerilevyn päälle, (esitetty kuvassa 10), jonka jälkeen se täytetään puoleenväliin asti massalla. Tämän jälkeen massaa tiivistetään lyömällä tiivistyssauvalla kaksikymmentä kertaa pohjaan saakka. Seuraavaksi kartio täytetään loppuun, ja sauvalla lyödään uudestaan kaksikymmentä kertaa niin, että tiivistys ulottuu puoleenväliin saakka. Tämän jälkeen kartion pinta tasataan ja yli työntynyt massa poistetaan kartion reunoilta. Seuraavaksi kartio nostetaan pois, ja asetetaan levylle niin, ettei se häiritse massan leviämistä. Lopuksi mitataan painuneen massan yläpinnan ja kartion yläpinnan välinen etäisyys, joka kirjataan ylös massan painumana.



Kuva 10. Painumanmittaus laitteet.

#### 5.4.2 Ilmamäärä

Ilmamäärän mittaamiseen käytetään painemittaria (esitetty kuvassa 11). Mittaus tapahtuu täyttämällä viiden litran mittausastia täyteen betonia, jonka jälkeen massa tiivistetään tärypöydällä täryttämällä viiden sekunnin ajan. Tämän jälkeen astian yläpinta tasataan, reunat pyyhitään yli valuneesta betonista, ja astian kansi kiinnitetään paikalleen. Astiasta poistetaan ylimääräinen ilma pumppaamalla vettä kannessa olevista aukoista vuorotellen, samalla astiaa kallistaen ilman poistumisen varmistamiseksi. Kun ilma on saatu pois, astian kannen aukot suljetaan niissä olevilla venttiileillä, kansi painistetaan ja tasataan mittausta varten pumppauskammella ja tasauspainikkeella. Lopuksi suoritetaan mittaus painamalla ja pitämällä testauspainike pohjassa, kunnes mittari pysähtyy ja ilmamäärä voidaan lukea.

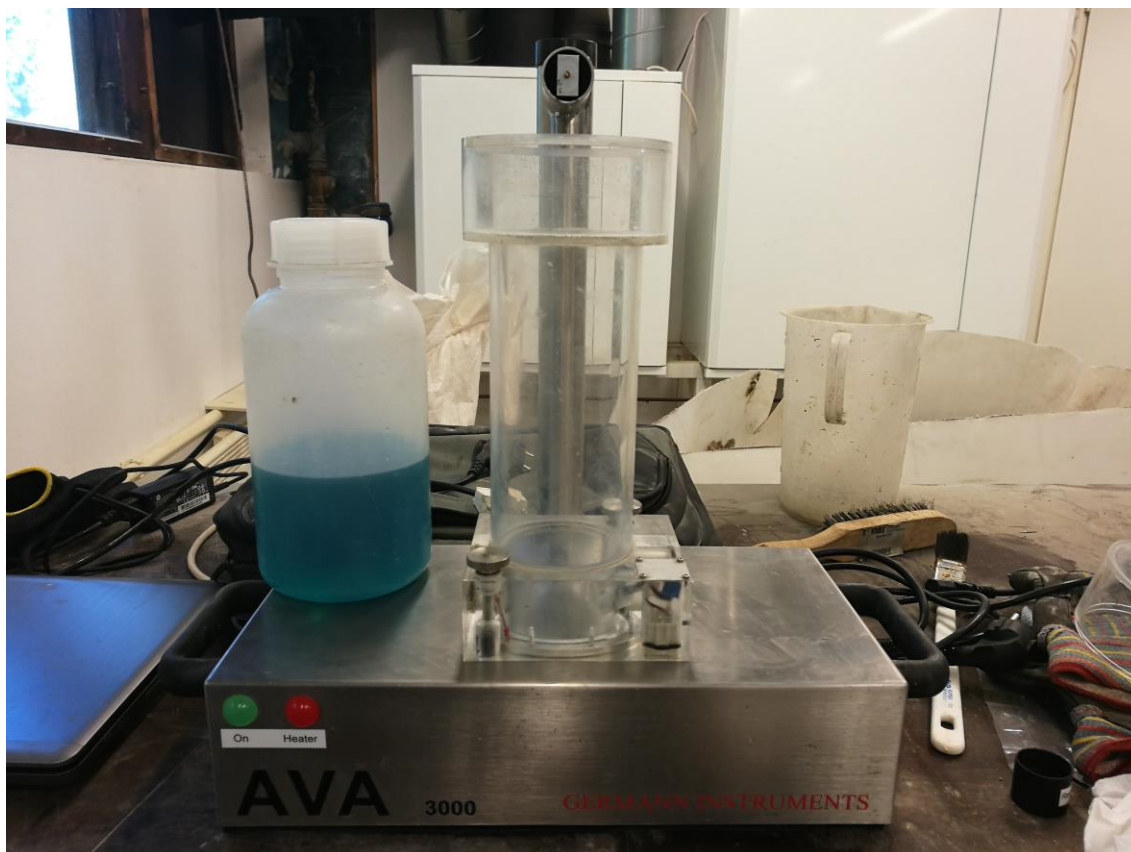




Kuva 11. Kokonaisilmamäärämittari.

#### 5.4.3 Huokosjako

Huokosjaon mittaamiseen käytetään AVA-mittaria (kuvassa 12). Ennen massan sekoitusta on hyvä valmistella AVA-mittari, jotta sen lämpötila ehtii saavuttaa mittausvaatimukset ennen näytteen valmistumista. Valmisteluun kuuluu mittarin kasaus, täyttö vedellä, AVA-nesteen annostelu, kuvassa 12 sininen neste, sekä lähtötietojen syöttö.



Kuva 12 AVA-mittari sekä AVA-neste.

Mittauksessa käytettävä näyte otetaan ilmamittaukseen käytetystä massasta. Jotta ilmamittauksessa lisätty vesi ei vaikuttaisi huokosjakoon, mittausastiasta poistetaan ensin noin viisi senttimetriä massaa astian pinnalta, ja se korvataan uudella massalla. Vaihdon jälkeen astia täyrytetään tiivistämiseksi. Mitattava näyte otetaan tähän tarkoitukseen erikseen suunnitellulla laitteella. Laite seuloo ja kerää 20 millilitran kokoisen näytteen, alle kuusi millimetriä halkaisijaltaan olevan osuuden betonimassasta. Lopuksi näyte syötetään mittariin, ja mittaus käynnistetään.

AVA-mittarin toiminta perustuu erisuuruisten ilmakuplien koon suhteen muuttuvaan nousunopeuteen AVA-nesteessä, jonka viskositeetti on vettä suurempi. Kun näyte on syötetty mittariin, ja mittaus käynnistetään, käynnistyy ensimmäisenä mittarin pohjalla oleva magneettinen sekoitinsauva, joka hajottaa näytteen AVA-nesteen sekaan, ja vapauttaa samalla kaikki näytteessä olevat ilmakuplat. Vapauduttuaan ilmakuplat alkavat nousta nosteen vaikutuksesta ylöspäin. Suuremmat kuplat nousevat pienempiä kuplia nopeammin, koska niillä on suurempi noste. Mittarin yläpäässä on vaaka, joka on osittain veden alla. Kun ilmakupla on noussut koko mittari läpi ja se törmää vaakaan, se

aiheuttaa vaakalevyyn nostetta, joka havaitaan mitattavan painon pienenemisenä. Painon pienenemisestä voidaan laskea vaa'alle saapuneiden kuplien kokonaistilavuus. Koska AVA-nesteen viskositeetti tunnetaan, voidaan laskea kuinka pitkä aika erikokoisilla kuplilla kestää nousta nesteen läpi. Kun yhdistetään tieto siitä, kuinka kauan tietyn kokoisella kuplalla kestää nousta pohjalta vaa'alle, sekä vaa'an antama tieto siitä kuinka paljon sen kuorma on keventynyt tietyllä aikavälillä, voidaan laskea tietyn kokoisten kuplien lukumäärä. Kokonaisuudessaan yksi mittaus kestää enintään 25 minuuttia, tai mikäli vaaka ei havaitse muutosta nosteessa kahden peräkkäisen minuutin aikana, mittaus loppuu. Mittauksen lopussa saadaan tieto eri aikaväleillä vaa'alle saapuneiden kuplien kokonaistilavuudesta, ja koska tunnetaan aikaväli, jossa tietyn kokoiset kuplat saavuttavat vaa'an, voidaan tästä laskea kuplien jakauma kuplan tilavuuden suhteen. Kun lähtötiedoissa esitetään sementtipastan määrä, alle kuusi millimetriä halkaisijaltaan olevan aineksen määrä sekä näytteen tilavuus, voi mittausohjelma lopuksi laskea ilmakuplien keskimääräisen etäisyyden pastassa, ja siten ilmoittaa huokosjaon.

## 5.5 Jälkikäsitteily ja puristukset

Tuoreen massan mittausten jälkeen massasta otetaan testikuutiot. Kuutioina käytetään 100 mm x 100 mm x 100 mm kappaleita. Kuutioita tehdään jokaisesta kokeesta kuusi kappaletta, ja niiden puristusajat ovat 1, 7 ja 28 vuorokautta. Muotteina käytetään öljytyjä, paineilmapurkamiseen soveltuvia muotteja. Muotit täytetään ensin puoleenväliin betonilla, jonka jälkeen niitä tärytetään viisi sekuntia. Tärytyksen jälkeen muotit täytetään loppuun, ja tärytetään uudestaan viisi sekuntia. Lopuksi massan pinta tasataan, ja muotit jätetään huoneen lämpöön muovilla peitettynä odottamaan purkamista. Muottien purku tapahtuu seuraavana päivänä. Purkamisen jälkeen kuutiot merkataan kokeen tunnuksella, valupäivällä, sekä puristusajalla. Seitsemän ja 28 vuorokauden kuutiot upotetaan säilytysaltaaseen, jossa ne ovat veden alla vakio-lämpötilassa.

Puristuspäivänä kuutiot siirretään aamulla pois säilytysaltaasta, ja niiden annetaan kuivua huoneenlämmössä. Ennen puristusta kuutiot punnitaan ja painot kirjataan ylös. Lopuksi kuutio puristetaan rikki testauspuristimella (kuvassa 14), johon on syötetty kuution puristus-pinta-ala. Puristin ilmoittaa kuution murtolujuuden megapascalissa.



Kuva 13. Testaukseen käytetty hydraulinen puristin.

## 6 Tulokset

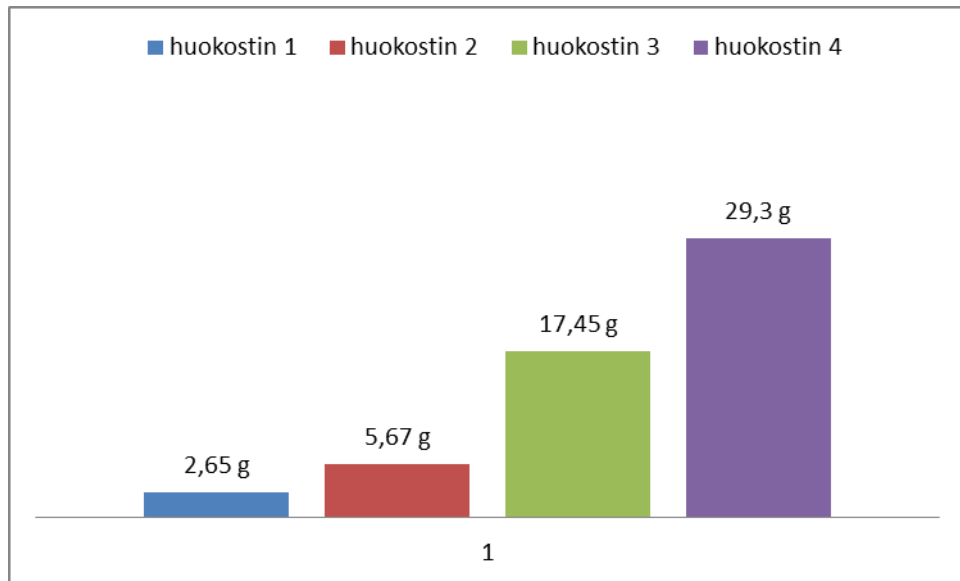
Merkittävämpänä tuloksena työstä saatiin tietoa huokostinaineiden keskinäisistä eroista, sekä niiden ominaisuuksista eri sementtien ja v/s suhteiden kanssa. Tehtyjen kokeiden sivutuotteena syntyi huomattava määrä tietoa käytetyn notkistimen toiminnasta eri sementtityyppien kanssa, sekä v/s suhteen vaikutuksesta tarvittavan notkistimen määrään. Myös notkistimen ja huokostimen keskinäisissä määrissä löydettiin muutamia raja-arvoja, joissa esimerkiksi notkistimen määrän laskeminen nosti ilmapitoisuutta huomattavan paljon.

### 6.1 Huokostinten keskinäinen vertailu

Kokeissa löydettiin merkittäviä eroja huokostinten välillä. Selkein ero havaittiin vaadittavassa annostelussa, ja AVA-mittauksen kautta saatiin myös tuloksia aineen luomien suojuhuokosten ominaisuuksista. Koska huokostimen toimintaa voidaan tarkastella usealta eri suunnalta, on alla eritelty aineiden kykyä pelkän ilman sitomisen suhteen, käytettävyyden ennustamisen suhteen, sekä mitatun huokosjaon onnistumisen suhteen.

#### 6.1.1 Ilman sitomiskyky

Kaikkein tehokkain oli huokostin numero 1. Sen kaikkien testien yhteenlasketun kulutuksen keskiarvo oli 2,65 grammaa laimentamatonta ainetta. Toiseksi tehokkain oli huokostin numero 2. Sen keskiarvo kokeissa oli 5,67 grammaa. Kolmanneksi vähiten ainetta kului huokostimessa numero 3, 17,45 grammaa, ja kulutukseltaan suurin oli huokostin numero 4, 29,3 grammalla. Koska huokostinten 3 ja 4 valmistaja ilmoittaa tuotteiden olevan käyttövalmiita ilman laimennusta, on mielekästä olettaa että näiden huokostinten vaikuttavan aineen pitoisuus on matalampi, kuin huokostimilla 1 ja 2, joita puolestaan täytyy laimentaa. Tämä oletamus huomioon ottaen voidaan olettaa että huokostinten 1 ja 2 puhtaan aineen käyttömäärät eivät ole suoraan verrattavissa huokostinten 3 ja 4 käyttömääriin, eikä täten voida ottaa kantaa siihen, kuinka tehokkaita huokostinten vaikuttavat aineet ovat suhteessa toisiinsa. Kuvassa 14 esitetään käytetyt huokostinmäärät graafisesti.



Kuva 14. Kymmenestä kokeesta laskettu huokostimen kulutuksen keskiarvo koetta kohden.

Koska erilaisia betoneita on olemassa erittäin paljon, on hyvin vaikeaa esittää tarkkaa ohjetta siihen, millainen annostelu toimii missäkin betonilaadussa. Tehdyissä kokeissa havaittiin kuitenkin selkeitä eroja huokostinten välillä niiden annosteluvälistä. Kun vertailtiin huokostimia toisiinsa, kaikissa kymmenessä koesarjassa pienimmän huokostinmäärän tavoitellun ilman saavuttamiseksi antoi huokostin numero 1. Annostelun keskiarvo oli 2,65 grammaa laimentamatonta ainetta, ja annostelun keskihajonta oli 0,98 grammaa. Keskihajonta on 37 % keskiarvosta. Kaikkein suurimmat annostelumäärät olivat kahdeksassa kokeessa kymmenestä huokostimella numero 4. Kahdessa poikkeuksessa suurin annostelumäärä oli huokostimella numero 3.

Kaikilla huokostimilla yhteinen ominaisuus liittyi elementtimassan ja valmisbetonimassan eroihin. Lähes kaikissa tapauksissa valmisbetonimassa vaati huomattavasti vähemmän huokostinta kuin elementtimassa. Tälle tulokselle on tehtyjen kokeiden perusteella mahdotonta antaa yksiselitteistä selitystä, koska muuttujien määrä on liian suuri. Mahdollisia syitä kyseiselle havainnolle on useita. Oletettavasti yksi tärkeimmistä vaikuttajista on valmisbetonimassan 15,8 % pienempi sementtimäärä. Koska huokostimen toiminta perustuu sen ominaisuuteen toimia sementin kanssa, on oletettavissa että pienempi sementtimäärä vaatii pienemmän määrän huokostinta saavuttaakseen saman ilmamäärän. Toisena syynä voi olla pienemmän v/s suhteen, mutta saman notkeuden omaavassa elementtimassassa huomattavasti suurempi notkistimen määrä. Elementtimassassa sekä notkistimen absoluuttinen että suhteellinen määrä ovat korkeampia kuin valmisbetonimassassa. Kokeissa huomattiin, että polykarboksylaattinot-

kistimella voi olla ilmaa vähentävä vaikutus massassa. Tätä tukee myös teoria notkistimessa käytetyn ilmantappajan vaikutuksesta betonin huokostukselle [32]. On oletettavaa että myös v/s suhteen muutos vaikuttaa huokostuksen onnistumiseen ja vaadittavaan huokostimen määrään, mutta tässä työssä ei kyseisiin tekijöihin ollut resursseja eikä erityistä tarvetta perehtyä, joten sen vaikutuksia ei käsitellä.

### 6.1.2 Huokosjaon onnistuminen

Koska betonin pakkasen kestävyys perustuu suojahuokosten kykyyn ottaa vastaan jäätyvästä vedestä syntyvä paine, on huokosten välisellä etäisyydellä erittäin suuri merkitys. Koska ilmamäärämittari kertoo ainoastaan kokonaisilman määrän, ei pelkkiin ilmamääräarvoihin kannata perustaa olettamusta betonin pakkasen kestävyydestä. Luvussa 5.3 esitetään esimerkki massasta, jossa on korkea ilmamäärä, mutta täysin riittämätön huokosjako.

Huokosjakoa mitattiin tuoreesta massasta AVA-mittarilla. Tuloksista nähtiin, että vaikka massan ilmamäärän kasvattamiseen vaadittiin enemmän vinsol-hartsihuokostinta, saatiin sillä vastaavasti parempia huokosjakoja. Elementtimassoista parhaan keskiarvon huokosjaoille antoi huokostin numero 2, keskiarvolla 0,198 mm. Kyseisen arvon keskihajonta on 0,029 mm. Valmisbetonimassassa parhaan huokosjaon antoi huokostin numero 4 arvolla 0,196 mm. Kyseisen keskiarvon keskihajonta on 0,037 mm. Kun vertaillaan huokosjakoja yleisesti kaikissa massoissa, parhaan tuloksen antaa huokostin numero 2 keskiarvolla 0,221 mm, jonka keskihajonta on 0,021 mm. Molempia massoja erikseen sekä yhdessä vertaillen huonoimman huokosjaon keskiarvon antaa huokostin numero 3. Sen elementtimassan keskiarvo on 0,307 mm, valmisbetonissa 0,285 mm, ja kokonaisuutena 0,296 mm. Kokonaisuudessaan huokosjakojen keskiarvot ja keskihajonnat esitetään kuvassa 15 huokostimittain.

		ka eb	kh eb	suhde	kh vb	kh ele	suhde
huokostin	1	0,2406 mm	0,035 mm	14,52 %	0,267 mm	0,029 mm	10,85 %
huokostin	2	0,1978 mm	0,029 mm	14,56 %	0,244 mm	0,014 mm	5,67 %
huokostin	3	0,307 mm	0,015 mm	4,99 %	0,285 mm	0,084 mm	29,41 %
huokostin	4	0,2656 mm	0,096 mm	36,32 %	0,196 mm	0,037 mm	18,88 %

**Kuva 15. Huokostimittain mitattujen huokosjakojen keskiarvot ja tulosten keskihajonnat esitettynä elementti-, sekä valmisbetonimassoissa.**

Kaiken kaikkiaan huokosjaot vaihtelivat 0,128 mm – 0,441 mm. Parhaan tuloksen antoi heikoimmasta keskiarvosta huolimatta huokostin numero 3, ja heikoimman puolestaan huokostin numero 4. Kaikissa kokeissa tasaisimman tuloksen antoi huokostin numero 2 keskihajonnalla 0,021 mm. Toiseksi tasaisimman tuloksen antoi huokostin numero 1, keskihajonnalla 0,032 mm. Toiseksi eniten vaihtelua oli huokostimessa numero 3, keskihajonnalla 0,05 mm, ja voimakkain vaihtelu oli huokostin numero 4 keskihajonnalla 0,067 mm.

Tulosten perusteella voidaan päätellä että vinsol-hartsihuokostimilla samasta ilmamäärästä on mahdollista saada pienempi huokosjako kuin vastaavasti tensidihuokostimilla. Tätä ei kuitenkaan tule yleistää, sillä tulokseen vaikuttaa myös monet muut asiat, joiden muuttuminen voi vaikuttaa tulokseen radikaalisti. On siis syytä ymmärtää, että mikäli esimerkiksi sekoitus tapahtuu teollisessa käytössä olevalla suurella myllyllä, tai käytetään erilaista notkistintyyppiä, voivat esitetyt tulokset muuttua.

### 6.1.3 Huokostimen annostuksen vaihtelu

Kun vertailtiin elementti-, ja valmisbetonimassoja keskenään, huomattiin että huokostimilla 1, 3 ja 4, oli valmisbetonimassojen huokostimen annostelumäärän suhde keskihajontaan pienempi kuin elementtimassoissa. Huokostimella 1 annostelumäärän ja keskihajonnan välinen suhde oli valmisbetoni massassa noin 67 % elementtimassan vastaavasta suhteesta. Huokostimilla 3 ja 4 vastaava suhdeluku oli 90 % ja 96 %. Ainoana poikkeuksena oli huokostin numero 2, jolla kyseinen suhdeluku oli 134 %. Tästä voidaan päätellä että huokostimella numero 1, esiintyy suurempaa vaihtelua massoissa, joissa käytetään suurta määrää sementtiä, pientä v/s suhdetta, sekä paljon notkistinta, kuin massoissa joissa on vähemmän sementtiä, suurehko v/s suhde, ja vähän notkistinta. Huokostimilla 3 ja 4 ei esiinny vastaavaa eroa, vaan tuotteiden annostelun vaihtelu on paljon tasaisempaa vertaillaessa elementti-, ja valmisbetonimassoja. Huokostimella numero 2 puolestaan esiintyi vähemmän vaihtelua elementtimassoissa kuin valmisbetonimassoissa. Massojen väliset erot annostelun vaihtelevuudesta esitetään kuvassa 16.

Vertaillaessa massoja erikseen, huomattiin että sekä elementti- että valmisbetonimassassa pienin suhdeluku annostelun keskiarvon, ja keskihajonnan välillä oli huokostimella numero 1. Elementtimassoissa keskihajonta oli 31 % keskiarvosta, ja valmisbetonimassoissa 21 %. huokostimet 3 ja 4 sijoittuivat samalla tavalla molemmissa massois-

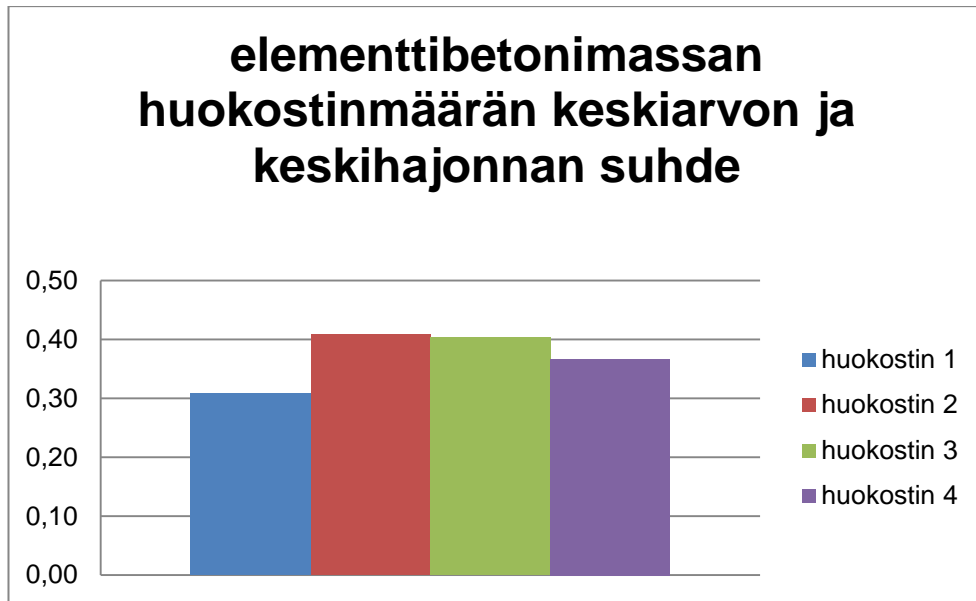


sa. Huokostin numero 2 käyttäytyi toisin. Sillä oli enemmän vaihtelua valmisbetonimassassa kuin elementtimassassa. Huokostimet tasaisimmasta vaihtelevimpaan olivat seuraavassa järjestyksessä: 4, 3, 1, 2. Kuvassa 16 esitetään tarkat suhdeluvut eri huokostimille molemmissa massoissa.

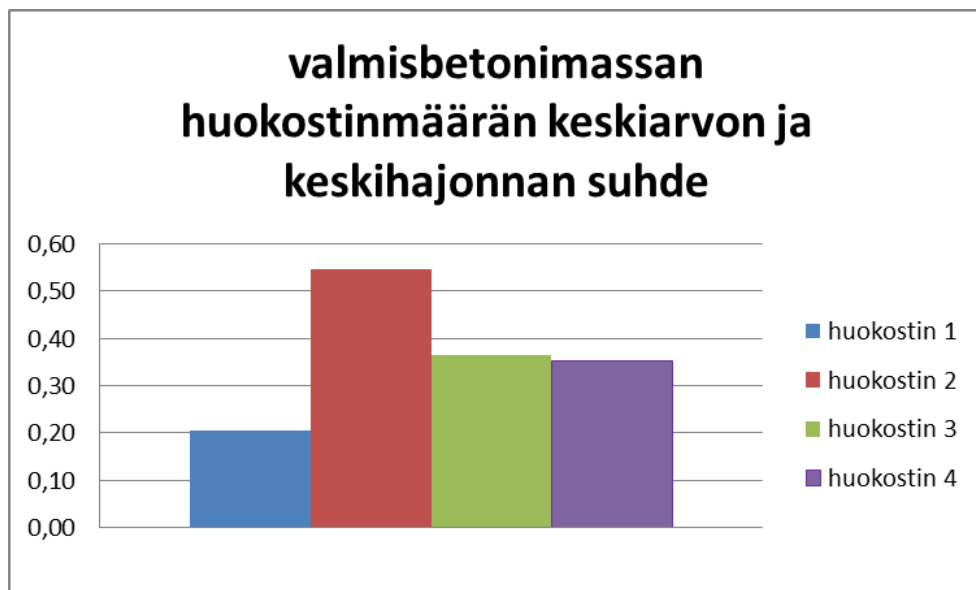
	ka ele	kh ele	suhde ele	ka vb	kh vb	suhde vb
1	3,25 g	1 g	30,82 %	2,05 g	0,42 g	20,64 %
2	7 g	2,86 g	40,85 %	4,33 g	2,36 g	54,58 %
3	20,5 g	8,28 g	40,37 %	14,4 g	5,23 g	36,34 %
4	43 g	15,76 g	36,66 %	15,6 g	5,51 g	35,29 %
	ele-, ja vb massojen keskiarvon ja keskihajonnan suhteiden suhde					
	66,97 %	huokostin 1				
	133,60 %	huokostin 2				
	90,00 %	huokostin 3				
	96,27 %	huokostin 4				

**Kuva 16.** Kuvassa elementti-, ja valmisbetonimassojen huokostinmäärän keskiarvo, keskihajonta sekä näiden välinen suhde. Alla esitettyinä laskettujen suhteiden suhde.

Tulosten perusteella voidaan päätellä että vertailtavista huokostimista annostelun tasaisuuden suhteen parhaiten toimii huokostin numero 1. Huokostimen numero 1 verrattavissa massoissa suuremman vaihtelun tuottanut elementtimassan keskihajonnan suhde keskiarvoon oli pienempi kuin millään muulla huokostimella pienemmän hajonnan tuottaneen massatyyppin keskiarvon ja keskihajonnan suhde. Koska huokostinten annostelumäärät vaihtelevat erittäin paljon, ei pelkän keskiarvon tai keskihajonnan arvolla voida vielä päätellä huokostimen toiminnan tasaisuutta. Jotta keskihajontojen arvoja voidaan vertailla toisiinsa, täytyy niitä verrata keskiarvoihin. Kuvissa 17 ja 18 esitetään elementtibetonimassojen sekä valmisbetonimassojen keskiarvojen ja keskihajontojen väliset suhteet huokostimittain.



Kuva 17. Elementtimassojen huokostinmäärien keskiarvon ja keskihajonnan välinen suhde huokostimittain.



Kuva 18. Valmisbetonimassojen huokostinmäärän keskiarvon ja keskihajonnan välinen suhde huokostimittain

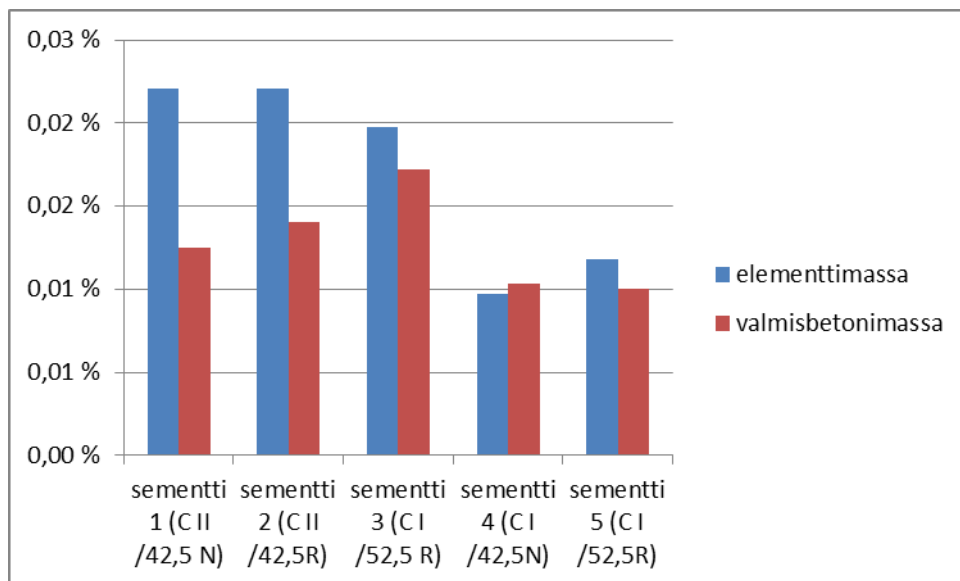
Kuvista näkyy, että valmisbetonimassoissa huokostimen numero yksi annostelun hajonta on lähes puolet pienempää kuin seuraavaksi tasaisimmalla, huokostimella numero 4. Elementtimassoissa erot ovat merkittävästi pienempiä, mutta osoittavat silti samansuuntaisen tuloksen.

## 6.2 Huokostimien toiminta eri sementeillä

Kaikilla testatuilla huokostimilla havaittiin eroja eri sementtien kanssa käytettäessä anostelumäärässä. Selkeimmät erot havaittiin CEM I ja CEM II sementtilaatujen välillä, sekä betonilaadun muuttuessa. Kaikilla sementeillä havaittiin samansuuntaisia tuloksia valmisbetoni- ja elementtimassojen välisissä eroissa. Myös muutamia poikkeuksia esiintyi, mutta näitä aiheuttavien syiden selvittämiseen ei tehtyjen kokeiden määrä riittänyt. Seuraavissa luvuissa käydään läpi huokostinten toiminta eri sementeillä.

### 6.2.1 Huokostin numero 1

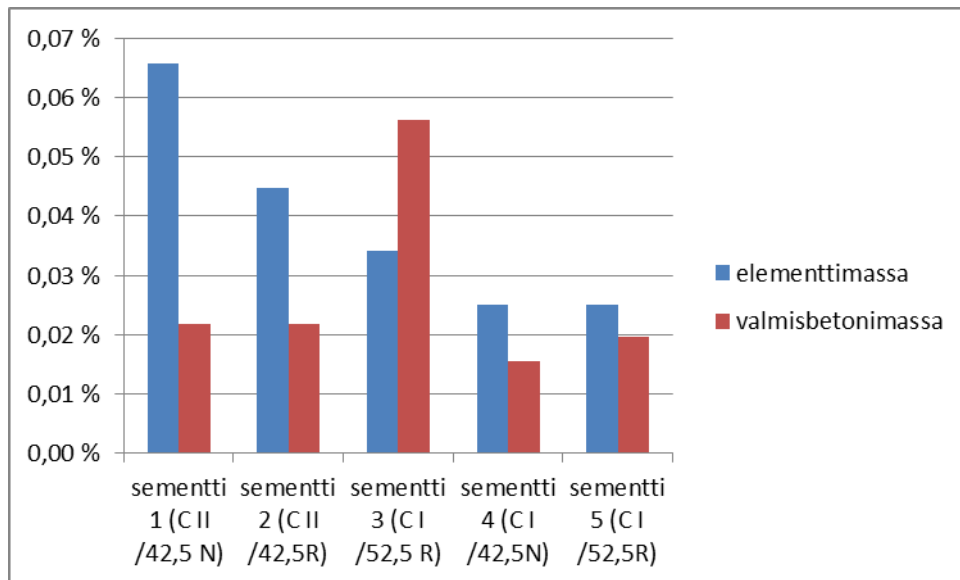
Huokostimella numero 1 havaittiin erittäin voimakkaita muutoksia annostelumäärässä, kun sitä vertailtiin CEM I ja CEM II sementtien välillä. Sementeillä 1 (C II/42,5N) ja 2 (C II/42,5R), käytettiin elementtimassassa 84 grammaa huokostinta. Ilmamääräksi saatiin 5,1 ja 5,0 tilavuus %. Sementillä numero 3 (C I /52,5R), huokostinta käytettiin 75 grammaa, jolloin ilmamääräksi tuli 5,4 tilavuus %. Sementeillä 4 (C I/42,5N) ja 5 (C I/52,5R) huokostimen annostus oli 37 ja 45 grammaa. Ilmamäärät kokeissa olivat 5,2 ja 5,5 tilavuus %. CEM II luokan sementeissä elementtimassassa käytetyn huokostimen määrän keskiarvo oli 61 % suurempi kuin CEM I luokan sementeissä. CEM II luokan sementeillä valmistetussa valmisbetonimassassa käytettiin sen sijaan vain 6,3 % enemmän huokostinta kuin vastaavissa massoissa joissa sementti oli CEM I luokkaa. Yllättävänä poikkeuksena kokonaisuuteen sijoittuu sementillä numero 3 (C I/52,5R) tehdyt kokeet. Elementtimassoissa sen vaatima huokostin annostelu on huomattavasti lähempänä CEM II sementtejä, kuin muita CEM I sementtejä. Valmisbetonimassoissa sillä on kaikkein suurin annostelu, joten sekin eroaa odotetusta. Huokostimen numero 1 annostelu sementeittäin esitetään kuvassa 19.



**Kuva 19. Huokostimen numero 1 annostelumäärä sementin määrästä eri sementtityypeillä elementti-, ja valmisbetonimassoissa tavoitellun ilmamäärän saavuttamiseksi.**

### 6.2.2 Huokostin numero 2

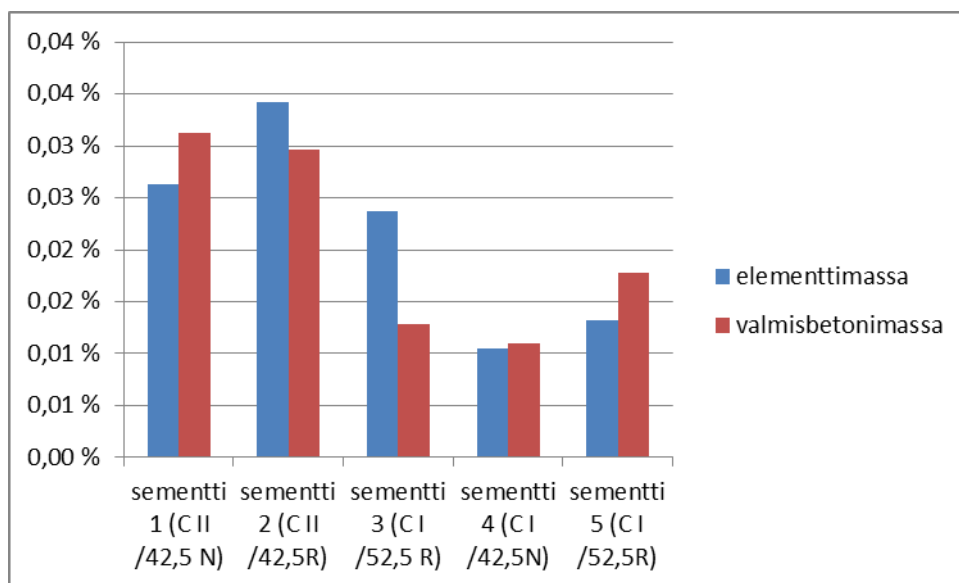
Huokostimella numero 2 havaittiin osittain samanlaista toimintaa kuin huokostimella numero 1. Huokostimen annostelun muuttuminen oli kokeissa samansuuntaista kuin huokostimella 1. Selkeänä erona havaittiin kuitenkin että vaihtelua oli merkittävästi enemmän. Erityisen suurta vaihtelua oli sementillä numero 1 (C II/42,5N), mutta myös muissa tapauksissa oli erittäin selkeitä eroja havaittavissa. Kaikkein yllättävin tapaus havaittiin sementillä numero 3 (C I/52,5R), jossa valmisbetoni massa vaati lähes kaksikertaa niin suuren annostelun huokostinta kuin elementtimassan vastaava annostelu tavoitellun ilmamäärän saavuttamiseksi. Huokostimen numero 2 annostelu sementeittäin esitetään kuvassa 20.



**Kuva 20. Kuvassa huokostimen numero 2 annostelu sementin määrästä sementeittäin tavoitellun ilmamäärän saavuttamiseksi**

### 6.2.3 Huokostin numero 3

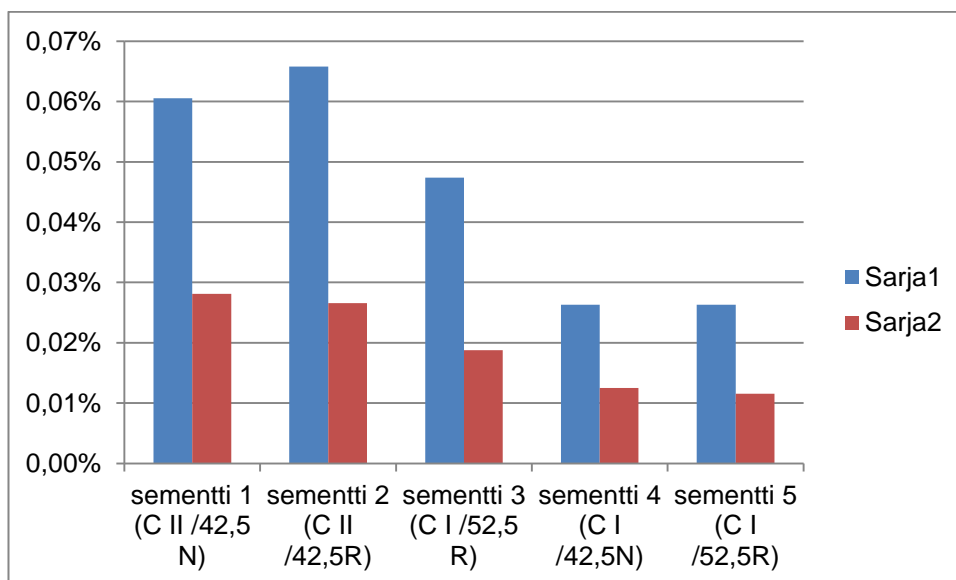
Huokostimen numero 3 käyttäytyminen erosi kahden ensimmäisen huokostimen toiminnasta. Elementtimassoissa annostelu oli sementteillä 1 (C II/42,5N) ja 3 (C I/52,5R) yhtäläinen. Sementillä numero 2 (C II/42,5R) annostus oli kolmanneksen suurempi sementteihin 1 (C II/42,5N) ja 3 (C I/52,5R) verrattuna. Sementteillä 4 (C I/42,5N) ja 5 (C I/52,5R) huokostimen annostelu oli huomattavasti pienempi elementtimassoissa, kuin kolmella muulla. Huokostin numero 3 annostelu oli myös poikkeuksellinen kahteen aikaisempaan verrattuna, kun verrattiin elementti-, ja valmisbetonimassoja keskenään. Ainoa tapaus jossa selkeää eroa betonilaatujen välillä esiintyi, oli sementillä numero 3 (C I/52,5R). Muissa tapauksissa annostelu oli hyvin lähelle sama molemmissa massoissa. Sementillä numero 1 (C II/42,5N), 4 (C I/42,5N) ja 5 (C I/52,5R), oli valmisbetonimassassa jopa korkeampi annostelu kuin elementtimassassa. Huokostimen numero 3 annostelu sementeittäin esitetään kuvassa 21.



**Kuva 21. Kuvassa huokostimen numero 3 annostelu sementin määrästä sementeittäin tavoitellun ilmamäärän saavuttamiseksi**

### 6.2.5 Huokostin numero 4

Huokostimella numero 4 korostui erityisen paljon elementti-, ja valmisbetonimassojen välinen ero. Kokonaisuudessaan elementtimassoihin käytettiin laimennettua huokostinta 860 grammaa, kun vastaavasti valmisbetonimassojen yhteenlaskettu laimennetun huokostimen massa oli ainoastaan 312 grammaa. Suurimmillaan ero betonilaatujen välillä oli sementillä numero 3 (C I/52,5R), jolloin elementtimassan huokostinmäärä oli lähes kolminkertainen valmisbetonimassan huokostinmäärästä. Pienimmillään ero massojen huokostinannostuksen välillä oli sementillä numero 4 (C I/42,5N), jossa elementtimassan huokostinmäärä oli noin kaksinkertainen valmisbetonimassan vastaava. Huokostimen numero 4 annostelu sementeittäin esitetään kuvassa 22.



**Kuva 22. Kuvassa huokostimen numero 4 annostelu sementin määrästä sementeittäin tavoitellun ilmamäärän saavuttamiseksi**

### 6.3 Huokostimien vaikutus lujuteen

Koemassoista otettiin jokaisesta kuusi koekuutiota, jotka puristettiin 1, 7 ja 28 vuorokauden iässä. Selkein havainto, joka huokostimen vaikutuksesta lujuteen saatiin, oli ilmamäärän lisääntymisen suhde puristuslujuuden heikkenemiseen. Keskimäärin huokostetuissa kokeissa oli ilmaa 5,4 tilavuus %. Vastaavasti 0-kokeissa oli ilmaa keskimäärin 1,7 tilavuus-%. Huokostettujen kuutioiden ilmapitoisuus oli keskimäärin 3,7 tilavuus-% suurempi kuin vertailukuutioissa. Huokostettujen kuutioiden lujuus oli keskimäärin 19 % pienempi kuin vertailukuutioiden. Tällöin voidaan esittää, että 1 %:n ilman lisäys tes-

tikappaleessa alentaa lujuutta noin 5,1 %. Laskennallisesti 1 %:n ilman lisäys heikentää betonin puristuslujuutta noin 5 % [6, s. 67], joten lujuuden kehittymisen ja arvojen oikeellisuuden voi olettaa pitävän paikkansa.

Vertailtaessa miten eri huokostimet vaikuttavat lujuuteen samassa massassa, ei löydetty selkeitä eroavaisuuksia. Joissakin massoissa erottui yksittäisiä lujuuseroja, mutta näille havainnoille ei löytynyt selkeää toistuvuutta. Tästä syystä voidaan olettaa, että lujuuserot eri huokostinta käytettäessä samassa massassa voidaan selittää osittain betonin voimakkaan heterogeenisyyden avulla, sekä ilmamäärän eroilla, jotka kokeissa esitettyjen rajojen mukaan voivat olla 1 tilavuus-% saman massan eri kokeissa. Tulokset ovat tältä osin täysin oletettuja. Liitteessä 2 esitetään saadut lujuudet huokostimittain pylväskaavioina.

#### 6.4 Notkistimen ja huokostimen yhteistoiminta

Huokostimen ja notkistimen yhteistoiminnan tutkimustiedon kannalta niin kutsutusti epäonnistuneet kokeet olivat hyödyllisempiä kuin varsinaiset tuloksia antavat kokeet. Pelkästään notkistinta käytettäessä on aikaisemmissa kokeissa huomattu, että notkistin ei itsessään vaikuta suoraan ilmamäärään. (Liite 3). Huokostimen kanssa yhteiskäytössä esiintyi kuitenkin useita tilanteita joissa notkistimen lisäys pahimmillaan romahdutti täysin betonin ilmamäärään. Vastaavasti joissain kokeissa havaittiin notkistimen vähentämisen lisäävän ilmaa huokostetussa massassa. On myös syytä huomata, että notkeaa massaa tiivistettäessä suuret ilmakuplat pääsevät vapaammin nousemaan massan yläpintaan ja täten poistumaan massasta, kuin vastaavasti jäykässä massassa. Tämä on kuitenkin varsin karkean mekaaninen vaikutus, eikä siihen juurikaan vaikuta onko massa notkistettu vedellä vai notkistimella.

Kaikkein voimakkain havainto notkistimen suorasta vaikutuksesta tuli vastaan sementtilä numero 4 (C I/42,5N) tehdystä elementtimassakokeesta, jossa käytettiin huokostinta numero 1. Kuvassa 24 esitetään erittäin suurta ilmamäärän vaihtelua notkistimen määrän vaihtelusta johtuen. Kokeessa tehdystä massasta tuli aluksi liian notkeaa, joten notkistimen määrää pudotettiin yli 30 % samalla kun huokostinta lisättiin 10 %. Tämän seurauksena painuma laski arvosta 230 mm arvoon 150 mm, ja vastaavasti ilmamäärä nousi arvosta 4,8 % arvoon 9,5 %. Seuraavassa kokeessa notkistimen määrää nostettiin arvosta 55 grammaa arvoon 60 grammaa. Samalla huokostimen määrä pudotettiin



arvoon 37 grammaa. Tämän seurauksena ilmamäärä putosi arvoon 6,8 % notkeuden laskiessa arvoon 145 mm. Seuraavaksi notkistimen määrä nostettiin arvoon 70 grammaa ja huokostimen annettiin olla muuttumattomana. Seurauksena ilmamäärä laski arvoon 5,2 %, ja painuma nousi arvoon 200 mm.

ilma	9,5 %	4,8 %	4,8 %	9,5 %	6,8 %	5,2 %
painuma	240 mm	235 mm	230 mm	150 mm	145 mm	200 mm
notkistin	90 g	85 g	80 g	55 g	60 g	70 g
huokostin	80 g	45 g	50 g	55 g	37 g	37 g
huokosjako						0,249 mm

Kuva 23. Ote koesarjasta, jossa neljästä viimeisestä kokeesta näkee notkistimen vaikutuksen myös ilmamäärään, sekä ilmamäärän vaikutuksen notkeuteen.

Edellä esitetystä koesarjasta voidaan nähdä erittäin voimakkaasti notkistimen, huokostimen, ilmamäärän, sekä notkeuden toisistaan riippuva yhteys. Notkeuden putoamisen notkistinta lisättäessä selittää ilmamäärän muutos, joka oli lähes 3 %. Yleisesti kokeita tehdessä huomasi ilman lisääntymisen notkistavan vaikutuksen. Kyseisestä koesarjasta näkee myös selkeästi, kuinka suuri vaikutus polykarboksylaattinotkistimella voi olla huokostuksen onnistumiseen. Kolmas erittäin tärkeä asia joka esitetystä koesarjasta näkyy voimakkaasti, on aineiden pitoisuuksien kriittiset määrät. Notkistimen nostaminen 60 grammasta 70 grammaan nosti painumaa 55 mm, ja pudotti ilmamäärää 1,6 %. Vastaavasti nosto 55 grammasta 60 grammaan, pudotti huokostimen vähentämisen yhteisvaikutuksella sekä ilmaa että notkeutta alaspäin. Molemmat tapaukset osoittavat, että notkistin vaikuttaa ilmamäärään, ja ilmamäärä notkeuteen.

## 6.5 Notkistimen toiminta eri sementeillä

Notkistimen toiminnassa eri sementeillä oli havaittavissa ero CEM I ja CEM II sementtiä sisältävissä massoissa. Selkein ero näkyi elementtimassoissa, joissa v/s suhde oli 0,45, ja sementtiä käytettiin  $380 \text{ kg/m}^3$ . Sementeillä 1 (CII/42,5N) ja 2 (C II/42,5R) käytettiin notkistinta 1,21-, ja 1,24 paino-% notkistinta sementin määrästä. Sementeillä 3 (C I/52,5R), 4 (C I/42,5N) ja 5 (C I/52,5R) tehtiin vastaavat koesarjat, ja niissä käytetyn notkistimen määrät verrattuna sementtiin olivat 0,72, 0,93 ja 0,89 paino-%. Erityisen alhainen notkistimen tarve oli sementillä numero 3 (C I/52,5R), joka oli koesarjan ainoa valkosementti. Kuvassa 24 esitetään sementeittäin notkistimen vaikutus elementtimas-

salla tehtyihin koesarjoihin. Mukana on notkistimen määrä, osuus sementistä, sen keskihajonta, painuman määrä, sekä painuman keskijointa.

	eb	notksitin ka	notkistin kh	painuma ka	painuma kh
vs 0,45	sementti 1(C II/42,5N)	92 g	8,9 g	160 mm	10 mm
	prosentteina	1,21 %	9,62 %		6,43 %
vs 0,45	sementti 2 (C II/42,5R)	94 g	5,6 g	177 mm	17 mm
	prosentteina	1,24 %	5,94 %		9,72 %
vs 0,45	sementti 3 (C I/52,5R)	55 g	0 g	178 mm	17 mm
	prosentteina	0,72 %	0		9,67 %
vs 0,45	sementti 4 (C I/42,5N)	71 g	9,7 g	179 mm	15 mm
	prosentteina	0,93 %	13,66 %		8,17 %
vs 0,45	sementti 5 (C I/52,5R)	68 g	4 g	189 mm	10 mm
	prosentteina	0,89 %	5,88 %		5,13 %

**Kuva 24. Notkistimen annostelun keskiarvo ja keskihajonta eri sementtityypeillä, sekä painuman vastaavat arvot elementtimassoissa**

Valmisbetonimassoissa, joissa käytettiin sementtiä  $320 \text{ kg/m}^3$ , ja sementti numero kolme (C I/52,5R) lukuun ottamatta v/s suhdetta 0,6, ei ilmaantunut yhtä suuria eroja. Poikkeuksena sementti numero 3 (C I/52,5R), jonka kohdalla reseptiä jouduttiin muuttamaan, koska v/s suhteella 0,6 painuma nousi liian korkeaksi. Koska notkistimen annostelu tahdottiin pitää yli 0,5 painoprosentissa sementtiin nähden, jotta sen vaikutus todella on merkittävä, päätettiin kyseisen sementin kohdalla laskea v/s suhde arvoon 0,55. Vastaavia tuloksia on saatu myös käytännön tehtävissä työmailla. [33. s, 6.] Kuvassa 25 esitetään valmisbetonimassoissa käytetyn notkistimen vaikutus. Kuvassa esitetään notkistimen määrä ja osuus sementin määrästä, notkistinmäärien keskihajonta, painuman keskiarvo sementtityypeittäin ja painuman keskijointa.

	VB	notkstin ka	notksitin kh	painuma ka	painuma kh
vs 0,6	sementti 1(C II/42,5N)	42 g	0 g	183 mm	12,1 mm
	prosentteina	0,66 %	0,00 %		6,60 %
vs 0,6	sementti 2 (C II/42,5R)	38,2 g	2,5 g	177 mm	93,3 mm
	prosentteina	0,60 %	6,50 %		5,24 %
vs 0,55	sementti 3 (C I/52,5R)	38,8 g	2,4 g	168 mm	10,3 mm
	prosentteina	0,61 %	6,19 %		6,13 %
vs 0,6	sementti 4 (C I/42,5N)	35 g	0 g	178 mm	2,4 mm
	prosentteina	0,55 %	0,00 %		1,38 %
vs 0,6	sementti 5 (C I/52,5R)	33,8 g	1,5 g	187 mm	10,3 mm
	prosentteina	0,53 %	4,35 %		5,51 %

**Kuva 25. Notkistimen annostelun keskiarvo, keskiarvon osuus sementistä ja keskihajonta eri sementtityypeillä, sekä painuman vastaavat arvot valmisbetonimassoissa.**

## 7 Yhteenveto

### 7.1 Tulosten yhteenveto

Betonia valmistettaessa huokostinaineiden käyttömäärät ja kustannukset ovat hyvin pieni osa kokonaiskustannuksista. Siksi huokostinta valittaessa tahdotaan tuote, joka toimii mahdollisimman tasaisesti ja hyvin, vaikka sitä jouduttaisiin käyttämään suurempia määriä. Riittämätön huokosjako voi jopa aiheuttaa massan käyttökiellon, mikäli käyttökohde on erityisen vaativa. Tästä syystä huokostimen käyttövarmuus on erittäin tärkeä. Kuvassa 26 on kasattu yhteen mitattujen huokosjakojen keskiarvojen, huokosjakojen keskihajontojen, annostelu keskiarvojen, sekä annostelun keskihajontojen parhaat ja toiseksi parhaat tulokset. Paras tulos on saanut kaksi pistettä lukuun ottamatta annostelukategoriaa, jossa paras tulos on saanut yhden pisteen. Toiseksi parhaita tuloksia tuottanut tuote on saanut yhden pisteen lukuun ottamatta annostelukategoriaa, jossa toiseksi paras on saanut 0,5 pistettä. Lopussa pisteet on laskettu yhteen. Pisteistä näkee että kaksi ensimmäistä huokostinta ovat keränneet yhdessä 80 % kaikista pisteistä. Näiden kahden tuotteen välille pisteet ovat jakautuneet melko tasaisesti. Tästä voidaan päätellä, että kaksi ensimmäistä huokostinta toimivat huomattavasti paremmin yhteen testeissä käytetyn notkistimen kanssa.

	huokostin 1	huokostin 2	huokostin 3	huokostin 4
huokosjako eb	1	2		
huokosjaon vaihtelu		1	2	
kahden edellisen suhde	1		2	
annostelu eb	1	0,5		
annostelun vaihtelu	2	1		
kahden edellisen suhde	2			1
huokosjako vb		1		2
huokosjaon vaihtelu	1	2		
kahden edellisen suhde	1	2		
annostelu vb	1	0,5		
annostelun vaihtelu	2	1		
kahden edellisen suhde	2			1
kaikkien huokosjako		2		1
kaikkien vaihtelu	1	2		
kahden edellisen suhde	1	2		
kaikkien annostelu	1	0,5		
kaikkien annostelun vaihtelu	2	1		
kahden edellisen suhde	2		1	
	21	18,5	5	5

**Kuva 26.** Kuvassa esitetään elementtimassojen, valmisbetonimassojen, sekä kokonaisuudessaan paras ja toiseksi paras huokostin eri kategoriota tutkimalla.

Kuvasta käy ilmi, että annostelun määrän ja tasaisuuden suhteen huokostin numero 1 on kaikissa kategorioissa paras. Vastaavasti huokosjaon suhteen huokostin numero 2 on kolmea poikkeusta lukuun ottamatta paras. Huokostimille 3 ja 4 kertyy hyvin vähän parhaita tuloksia.

Kokeissa tuli ilmi, että huokostimet numero 3 ja 4 voivat antaa erittäin hyviä huokosjakoja, mutta niiden käyttövarmuus on kyseenalainen. Niillä molemmilla oli erittäin paljon vaihtelua sementin ja betonilaadun mukaan. Tämä voi olla suuri riskitekijä. On ongelmallista, mikäli betoniasemalla tai elementtitehtaalla tahdotaan tehdä uudentyypinen massa, vaihtaa jotakin käytössä olevaa lisäainetta, tai mikäli runkoaineen rakeisuus muuttuu, ja aina tällaisessa tilanteessa täytyy käytännössä aloittaa alusta huokostimen annostelun määrittäminen. Huokostimella 1 oli huomattavasti vähemmän vaihtelua, ja sen annostelu osoittautuikin lopulta suhteellisen hyvin ennustettavaksi. Tällöin reseptin muuttaminen on huomattavasti helpompaa. Toisaalta huokostin numero 1 ei antanut yhdessäkään testisarjassa parasta huokosjakoa. Etsittäessä parasta huokosjakoa, paras vaihtoehto tulosten perusteella on huokostin numero 2. Annostelumäärän vaihtelu on kuitenkin suurehko, joten reseptin muuttamisen yhteydessä joudutaan tekemään

enemmän työtä, jotta saadaan oikea annostelu. Tästä syystä on vaikea ottaa kantaa siihen, kumpaa huokostinta kannattaa suositella paremmaksi vaihtoehdoksi.

Tämän työn tuloksia tulkitessa on erittäin tärkeää ymmärtää kokeiden suppeus, ja muuttujien suuri määrä. Näitä ovat esimerkiksi laboratorion ilmankosteus ja lämpötila. Osa testeistä ajoittui viileille ajankohdille, jolloin laboratorion lämpötila oli useita asteita viileämpi, kuin Heinäkuun lämpimimpinä ajanjaksoina. Myös laboratorion ilmankosteus vaihteli runsaasti. Käytännössä maanantaisin ilmankosteus oli alhaisempi, koska viikonlopun aikana ilmanvaihto oli kuivattanut huonetta. Huomattavasti enemmän kokeisiin vaikuttava tekijä oli runkoaineen kosteusvaihtelu. Kokeita tehtiin yhteensä 140 kappaletta. Tämän lisäksi tehtiin muita kokeita, joista useisiin käytettiin samoja runkoaineita. Vaikka kosteusmittaus suoritettiin kahdesti viikossa, sekä jos oli syytä epäillä että kosteus on muuttunut merkittävästi, syntyi silti koe-erien välille kosteuseroja runkoaineen takia.

Varsinaisten kokeisiin vaikuttavien muuttujien lisäksi on syytä ymmärtää, että betoni-reseptissä hyvin pieni muutos voi vaikuttaa hyvin yllättävällä tavalla. Tästä syystä ei tässä työssä tehtyjen kokeiden perusteella voi tehdä suoria oletuksia käytettyjen huokostinten toiminnasta tilanteessa, jossa mikä tahansa muuttuja eroaa tämän työn koetilanteista. Mikäli esimerkiksi notkistinta muutetaan, täytyy ehdottomasti tehdä testaus huokostimen toiminnasta ennen kuin uusi resepti voidaan ottaa käyttöön. Vaikka käytettäisiin täysin samaa reseptiä samoilla kiviaineksilla, mutta sekoituslaitteena toimii esimerkiksi suuri, monen kuution kokoinen mylly, voi huokostuksen tulos olla erilainen.

Mitattavissa tuloksissa epätarkin on huokosjako. Tämä johtuu betonin erittäin voimakkaasta heterogeenisyydestä. Sekoitettavan reseptin kokonaistilavuus oli 20 litraa, ja näyte, josta huokosjako mitattiin, oli tilavuudeltaan 20 millilitraa. Myös myllyn sekoitus-teho vääristää huokosjaon arvoja. Käytännössä usein myllyn sekoitustapa eroaa laboratoriossa käytetyn myllyn sekoitusperiaatteesta, joten on oletettavaa, että huokosjaot voivat olla tehdyissä kokeissa pienempiä, kuin käytännössä teollisuudessa käytetyllä myllyllä sekoittaessa. Tätä oletusta tukevat mittaukset todellisessa betonitehtaassa tehdyistä betonimassoista. (Liite 4). Tästä syystä on syytä huomauttaa erityisesti, että mitatuista huokosjaon arvoista ei tule vielä vetää suoria johtopäätöksiä. Kuten missä tahansa mittauksessa, tulee myös huokosjaon tutkimisessa ottaa useita näytteitä epätarkkuuden vähentämiseksi. Tässä työssä päädyttiin ottamaan vain yksi näyte jokaisesta kokeesta aikataulullisista syistä. Useamman näytteen ottaminen olisi venyttänyt ko-

keiden suoritusta huomattavasti, jolloin työlle asetettu aikataavoite olisi tullut ylittymään huomattavan paljon.

Vaikka testitulokset ovatkin tapauskohtaisia, on niillä silti runsaasti käyttöarvoa. Koska sekoitus tapahtui jokaisessa kokeessa samalla tavalla, tulokset ovat vertailukelpoisia. Käytetyt massat, runkoaineet, sekä sementit ovat varsin tyypillisiä betoniteollisuudessa, ja tämän takia saadut tulokset ovat hyvää pohjatietoa, kun esimerkiksi asiakkaalle halutaan suositella sopivaa huokostinta tietyn notkistimen tai sementin kanssa. Saatujen tulosten pohjalta voidaan aloittaa sopivan huokostimen etsiminen esimerkiksi huokostimesta numero 1 kohteeseen, jossa käytetään useita eri sementtityyppejä ja useita erilaisia betonilaatuja. Vastaavasti jos tiedetään, että huokostinta tarvitseva osapuoli valmistaa ainoastaan muutamaa betonilaatua, voidaan esittää käytettäväksi esimerkiksi huokostinta numero 2.

## 7.2 Teorian yhteenveto

Tämän työn huokosia käsittelevässä kappaleessa mainitaan kapillaarihuokosten sulkeutumisaikasta, ja syntymekanismista. Teorian mukaan kapillaarihuokosten muodostuminen ja säilyminen on riippuvaista käytetystä vedestä ja sementin suhteesta. Teoriansa alle 40 % vettä sementin määrästä sisältävään betoniin ei tule välttämättä yhtään kapillaarihuokosia. Pakkasvaurioiden muodostumismekanismeja selittävissä kappaleissa puolestaan esitetään kaava, joka kuvaa hydraulisen paineen muodostumista. Tämän kaavan käyttöön liittyy teoria, jonka mukaan kapillaarihuokosissa oleva vesi aiheuttaa jäätyessään pakkasvaurion riskin.

Kahta edellä esitettyä asiaa vertaillen voi syntyä ristiriita. Mikäli alhainen  $v/s$  suhde voi poistaa kapillaarihuokokset betonista lähes kokonaan, vähentääkö se silloin myös ongelmaa vedestä jätymisestä? Koska geelihuokokset ovat niin pieniä, ettei vesi niissä yleensä pääse jäätyämään, on oletettavaa että kapillaarihuokosten vesi on kriittisessä asemassa pakkasvaurion synnyssä. Niiden poistaminen betonista voisi siis oletettavasti toimia tehokkaana ratkaisuna pakkasvaurion torjuntaan. Riittävän korkea lujuus toimii pakkasvaurion estäjänä. Betonissa yksi merkittävimmistä lujuuteen vaikuttavista tekijöistä on  $v/s$  suhde. Tästä voidaan esittää jatkokysymys, liittyykö korkean lujuuden tuoma pakkasvaurionestisyys korkeaan lujuuteen, vai sen saavuttamiseksi käytettyyn alhaiseen  $v/s$  suhteeseen, ja pienempään määrään kapillaarihuokosia? Vastaavasti

syntyy seuraava kysymys: mikäli kapillaarihuokokset ovat sulkeutuneet, mutta niiden sisällä on edelleen vettä, eikö veden tunkeutuminen ulos vaadi sen että kapillaarihuokosen kuori rikkoutuu, jolloin betoniin tulee pienikokoisia rikkoutumia? Mikäli näin todella tapahtuu, voinee olettaa että näiden pienten vaurioiden vaikutus betonin ominaisuuksille on negatiivinen. Tästä jatkopäätelmänä voidaan kysyä, ovatko pakkasvaurion kannalta edullisempia avoimet vai sulkeutuneet kapillaarihuokokset?

### 7.3 Onnistuminen ja jatkotoimenpiteet

Työn tarkoituksena oli saada tietoa eri huokostinten toiminnasta toisiinsa vertailtuna, sekä sementtityypin ja betonilaadun merkityksestä huokostimille. Tavoitteena oli myös saada tietoa testattujen huokostinten toiminnasta käytetyn notkistimen kanssa. Näissä tehtävissä onnistuttiin kohtalaisen hyvin. Tuloksista nähdään selkeitä eroja eri huokostinten annostelussa ja toimintakyvyssä. Lisäksi saatiin huomattava määrä tietoa siitä, kuinka sementin muuttaminen vaikuttaa muista muuttujista riippuen jopa hyvinkin radikaalisti käytetyn huokostimen toimintaan. Saatiin myös selkeää näyttöä betonityypin muuttumisen vaikutuksesta huokostimen annosteluun. Kokeista, joita jouduttiin toistamaan useita kertoja halutun notkeuden ja ilmamäärän saavuttamiseksi, saatiin tietoa notkistimen ja huokostimen yhteistoiminnasta. Näiden tietojen perusteella voidaan todeta, että notkistimen määrän muuttaminen reseptissä voi vaikuttaa merkittävästi ilmamäärään.

Koska koesarjan koko oli opinnäytetyön laajuudesta johtuen hyvin rajoitettu, jäi paljon avoimia kysymyksiä jäljelle. Selkein jatko tälle työlle on suorittaa sama koesarja eri notkistimilla. Tällöin saadaan tietoa kahden eri notkistimen välisestä erosta, sekä lisätietoa notkistimien vaikutuksesta huokostimeen. Yleisen perustutkimuksen kannalta olisi varsin mielenkiintoista suorittaa kokeita, joissa samaa reseptiä ja sementtiä testattaisiin niin, että joko notkistimen, huokostimen tai molempien määrää muutettaisiin porrastaen, jolloin saataisiin esiin tietoa siitä, kuinka lineaarista tai epälineaarista aineen vaikutus massalle on. Samalla saataisiin myös tietoa siitä, miten nämä aineet käyttäytyvät keskenään.



#### 7.4 Oma näkemys

Henkilökohtaisesti uskon, että varsinaisesti epäonnistuneet kokeet olivat onnistuneita kokeita huomattavasti hedelmällisempiä. Koesarjan osat, joita jouduttiin toistamaan useita kertoja ennen kuin painuma ja ilma saatiin toleransseihin, osoittivat huomattavan määrän yksityiskohtia eri lisäaineiden ja sementtien toiminnasta. Opinnäytetyön aikana käsitteli niin monia koemassoja, että esimerkiksi sopivan notkeuden oppi tunnistamaan suhteellisen tarkasti pelkästään siitä, miten massa liikkui, kun myllyn pyörimisen pysäytti. Myös käsitys massan työstettävyydestä kasvoi huomattavasti. Työn loppupuolella oli jo selkeä käsitys notkeuskoetta tehdessä siitä, millaisen tuloksen ilmanmittari todennäköisesti tulee antamaan. Vastaavasti massasta oppi näkemään arvion käytetystä vesisementtisuhteesta, notkistimen määrästä, ja muista vastaavista asioista. Käytännössä ei näitä asioita tietenkään voi tarkasti lähteä pelkästään massaa katsomalla kertomaan, mutta kokeita tehdessä oppi ymmärtämään miten esimerkiksi alhainen v/s suhde ja korkea notkistin määrä vaikuttavat massan työstettävyyteen ja liikkuvuuteen. Erityisesti massasta oppi tunnistamaan korkean ilmamäärän, ja usein massasta osasi arvioida onko sen ilmapitoisuus lähelläkään tavoiteltua.

## Lähteet

- 1 Mihin betonia käytetään. Betoniteollisuus ry. Verkkodokumentti.  
<<http://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/mihin-betonia-kaytetaan/>>  
Luettu 27.5.2016
- 2 Betonin lisäaineet. Semtu Oy. Verkkosivu.  
<<http://www.semtu.com/fi/tuotteet/betonin-lisa-aineet/>> luettu 27.5.2016
- 3 Lämpötilaennätyksiä. Ilmatieteenlaitos. Verkkosivu.  
<<http://ilmatieteenlaitos.fi/lamputilaennatyksia>> Luettu 27.5.2016
- 4 Lindberg Ralf. Rakennusmateriaalien käyttäytyminen ja maanvastaiset rakenteet. Verkkodokumentti. <<https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK050302.pdf>>  
Luettu 1.9.2016
- 5 Betonin pakkasen kestävyys. VTT. Verkkosivu.  
<<http://www.vttexpertservices.fi/palvelut/testaus-ja-tarkastus/rakentamisen-tuotteet-ja-materiaalit/rakennusmateriaalien-testaus/betoni-rakennusmateriaalit/betoni-laasti-tasoite/kunto/pakkaskestavyys>> Luettu 27.5.2016
- 6 Suomen betoniyhdistys ry. 2012. Betonitekniikan oppikirja 2004 by 201. Helsinki. BY-koulutus Oy
- 7 Semtu - Betoniteollisuuden vaikuttaja jo vuodesta 1942. Semtu Oy. Verkkosivu.  
<<http://www.semtu.fi/fi/yritys/historia/>>. luettu 21.9.16

- 8 Suomen betoniyhdistys ry. 2005. Betoninormit 2004 by 50. Helsinki. Suomen betonitieto Oy
- 9 Kronlöf Anna. 2002. Ilmaa vähän – paljon? isoa – pientä?. PowerPoint esitys.
- 10 Betonin valmistus. Betoniteollisuus ry. Verkkosivu. <<http://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/betonin-valmistus/>>. Luettu 27.10.16
- 11 Lisäaineet. Betoniteollisuus ry. Verkkosivu. <<http://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/lisaaineet/>>. Luettu 20.9.16
- 12 Betonin Lisäaineet. Semtu Oy. Verkkosivu. <<http://www.semtu.fi/fi/tuotteet/betonin-lisa-aineet/>>. Luettu 20.9.16
- 13 Kiihdyttimet. Semtu Oy. Verkkosivu. <<http://www.semtu.fi/fi/tuotteet/betonin-lisa-aineet/kiihdyttimet/>>. Luettu 15.8.16
- 14 Kommonen Juha. Betonirakenteiden kutistuminen ja halkeamien ehkäisy. Verkkodokumentti. <<https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjskbXmospvQAhXLjiwKHb-paDf4QFggaMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.rakennustieto.fi%2Fbin%2Fget%2Fid%2F631CStSjs%253A%2447%24RK100402%2446%24pdf%2FRK100402.pdf&usg=AFQjCNFUf5e7Ki8YZuXrEbRtNe1rhC6pmQ&sig2=JUMwTsLbneeT2xFqHXhdlw&cad=rja>>. Luettu 17.8.16

- 15 Betocrete C36. Semtu Oy. Verkkosivu  
<[http://www.semtu.fi/index.php/download\\_file/view/1412/157/](http://www.semtu.fi/index.php/download_file/view/1412/157/)>. Luettu 9.11.16
  
- 16 Hidastimet. Semtu Oy. Verkkosivu. <<http://www.semtu.fi/fi/tuotteet/betonin-lisa-aineet/hidastimet/>>. Luettu 27.10.16
  
- 17 Suomen betoniyhdistys ry. 1994. Verkkodokumentti RakMK B4.Kohta 2.3.3.3 Halkeilun rajoittaminen. 1994.
  
- 18 Rappautumisen vaikutukset betonisillan kantokykyyn. 2005. Verkkodokumentti.  
<[https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjMyl2jtpvQAhXJ3iwKHYzUBj8QFggaMAA&url=http%3A%2F%2Falk.tiehallinto.fi%2Fsillat%2Fjulkaisut%2Frappeutumisen\\_betonisillat2005.pdf&usg=AFQjCNH1nEVuvIEAURGq3BrahzdulQ3cg&sig2=VKeAdbil72dpdYSPj3Bg1w](https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjMyl2jtpvQAhXJ3iwKHYzUBj8QFggaMAA&url=http%3A%2F%2Falk.tiehallinto.fi%2Fsillat%2Fjulkaisut%2Frappeutumisen_betonisillat2005.pdf&usg=AFQjCNH1nEVuvIEAURGq3BrahzdulQ3cg&sig2=VKeAdbil72dpdYSPj3Bg1w)>. Luettu 1.8.16
  
- 19 Suomen betoniyhdistys ry. 1989. BY 32 Betonirakenteiden säilyvyysohjeet ja käyttöikämitoitus. 1989. Gummerus kirjapaino Oy.
  
- 20 Siltabetonien P-lukumenettely. 2013. Verkkodokumentti.  
<[https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwj639yat5vQAhXL2SwKHburAp4QFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fwww2.liikennevirasto.fi%2Fjulkaisut%2Fpdf%2Flo\\_2013-37\\_siltabetonien\\_p-lukumenettely\\_web.pdf&usg=AFQjCNG2RAebWe7g59c1DsykIHZLS6sXtA&sig2=J4w93nK7h\\_E2\\_r2sOVI4IQ&cad=rja](https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwj639yat5vQAhXL2SwKHburAp4QFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fwww2.liikennevirasto.fi%2Fjulkaisut%2Fpdf%2Flo_2013-37_siltabetonien_p-lukumenettely_web.pdf&usg=AFQjCNG2RAebWe7g59c1DsykIHZLS6sXtA&sig2=J4w93nK7h_E2_r2sOVI4IQ&cad=rja)>. Luettu 22.8.16
  
- 21 Chatterji S. 2001. Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air-entraining agents. Verkkodokumentti.  
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946502000999>>. Luettu 30.9.16

- 22 Tepponen Pirjo. 2014. Betonin huokostus. Verkkodokumentti.  
<[http://www.semtu.fi/index.php/download\\_file/view/1329/552/](http://www.semtu.fi/index.php/download_file/view/1329/552/)>. Luettu 15.7.16.
- 23 Klieger Paul ja Lamond Josef F. 1994. Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials. Philadelphia, USA. ASTM.
- 24 Tepponen Pirjo. 2004. Huokostetun betonin valmistus. Verkkodokumentti.  
<[https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiboJDdyJvQAhUB-WywKHW5FBJcQFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.semtu.fi%2Findex.php%2Fdownload\\_file%2Fview%2F643%2F317%2F&usg=AFQjCNE4SBPQaEtlrc3mQi5GnaHkl7KrA&sig2=wyqptQVImPakjOf0MHcnbg&cad=rja](https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiboJDdyJvQAhUB-WywKHW5FBJcQFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.semtu.fi%2Findex.php%2Fdownload_file%2Fview%2F643%2F317%2F&usg=AFQjCNE4SBPQaEtlrc3mQi5GnaHkl7KrA&sig2=wyqptQVImPakjOf0MHcnbg&cad=rja)>. Luettu 22.7.16.
- 25 Ansari Farhad, Zhang Zhijin, Luke Allan ja Maher Ali. 1999. Effects of Synthetic Air Entraining Agents on Compressive Strength of Portland Cement Concrete- Mechanism of Interaction and Remediation Strategy. Verkkodokumentti.  
<[https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiD7KLVyZvQAhUL3SwKHcO2CFwQFggYMAA&url=http%3A%2F%2Fciteseerx.ist.psu.edu%2Fviewdoc%2Fdownload%3Fdoi%3D10.1.1.199.3756%26rep%3Drep1%26type%3Dpdf&usg=AFQjCNEarVi8BRCzjsZTNT0aySN6\\_lhtVQ&sig2=8eavJfZ0DRhg6X2dDd9W5Q&bvm=bv.138169073,d.bGg](https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiD7KLVyZvQAhUL3SwKHcO2CFwQFggYMAA&url=http%3A%2F%2Fciteseerx.ist.psu.edu%2Fviewdoc%2Fdownload%3Fdoi%3D10.1.1.199.3756%26rep%3Drep1%26type%3Dpdf&usg=AFQjCNEarVi8BRCzjsZTNT0aySN6_lhtVQ&sig2=8eavJfZ0DRhg6X2dDd9W5Q&bvm=bv.138169073,d.bGg)>. Luettu 4.7.16.
- 26 Lay M. Tyler, Chancey Ryan, Juenger Maria C.G. ja Folliard Kevin j. 2009. The physical and chemical characteristics of the shell of air-entrained bubbles in cement paste. Verkkodokumentti.  
<[https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjYI4iCypvQAhWL1iwKHZj\\_Ad8QFggYMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.sciencedirect.com%2Fscience%2Farticle%2Fpii%2FS0008884609000441&usg=AFQjCNFmahbdKXE9vnzNxUq-rmTxWyeXww&sig2=1v96\\_Mc9I8IND\\_w5k01EAg](https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjYI4iCypvQAhWL1iwKHZj_Ad8QFggYMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.sciencedirect.com%2Fscience%2Farticle%2Fpii%2FS0008884609000441&usg=AFQjCNFmahbdKXE9vnzNxUq-rmTxWyeXww&sig2=1v96_Mc9I8IND_w5k01EAg)>. Luettu 1.10.116.

- 27 Yleistä. Betoniteollisuus ry. Verkkosivu.  
<<http://www.valmisbetoni.fi/paikallavalurakentaminen/yleista>>. Luettu. 17.10.16
- 28 Betoni hakemisto. Betoniteollisuus ry. Verkkosivu.  
<<http://www.betoniteollisuus.fi/tuotteet>>. Luettu. 17.10.16
- 29 Lujuudenkehitys. Betoniteollisuus ry. Verkkosivu.  
<<http://www.valmisbetoni.fi/toteutus/betoniteknologia/lujuuden-kehitys>>. Luettu  
17.10.16
- 30 Betonointi. Betoniteollisuus ry. Verkkosivu.  
<<http://www.valmisbetoni.fi/toteutus/betoniteknologia/betonointi>>. Luettu 17.10.16
- 31 Lisäainekoulutus 2013. Semtu Oy. 2013. PowerPoint esitys.
- 32 Tepponen Pirjo. Haastattelu. 22.9.16
- 33 Marjalaakso Mikko. 2016. Väribetonia paikallavalaen. Sementti-lehti, 2/2016.



## Mittaus-, ja sekoitusohje

Ennen sekoituksen aloitusta mitataan kaikki tarvittavat tuotteet valmiiksi astioihinsa. Tämän lisäksi valmistellaan muotit tulppaamalla niiden pohjat, sekä öljymällä muotit. Myös AVA-mittari tulee valmistella kokeensuorittamista varten ennen sekoituksen aloittamista.

filleri, 0-8, 8-16, vesi, notkistin, huokostin, sementti

### **Sekoitus ja testaus ohje**

- puhtaan myllyn kostutus harjalla
- kiviainekset karkeimmasta hienoimpaan myllyyn sekä puolet vedestä
- sekoitus 2 min
- seisotusaika 2 min
- Noin hetkellä 3:45, nostetaan kansi, ja kaadetaan sementti sekaan
- lopun veden lisäys, sekoitus 30 sekuntia
- huokostimen lisäys, sekoitus 90 sekuntia
- notkistimen lisäys, sekoitus 2 minuuttia
- kokonaisaika 8 minuuttia
- **Painuman mittaus**
- testauskartion, alustan ja sauvan kastelu
- kartion täyttä puoleen väliin
- 20 tiivistystä sauvalla
- Kartion täyttö loppuun
- 20 tiivistystä tuoreen täytön alueella
- yläpinnan tasoitus
- kartion nosto ja painuman mittaus → 175 mm +/- 25 mm
- **Ilman mittaus**
- Mitta-astian kastelu
- Astian täyttö, kauha kerrallaan välissä astiaa heiluttaen
- 5 sekunnin tärytys tärypöydällä
- astian kannen nollaus, kiinnitys, veden lisäys, paineistus, tasoitus ja testi. → 5,5 % +/- 0,5 %
- **AVA-mittaus**
- mittauslieriön paikalleen asetus ja ruuvien kiinnitys
- sekoitinsauvan paikalleen asetus ja tulppasauvan paikalleen asetus
- täyttö vedellä ja kuplien poisto
- AVA-nesteen mittaus ja lisäys lieriön pohjalle
- Näytteen otto, ilmakuplien poisto, ja näytteen asettaminen syöttövalmiuteen
- Lähtötietojen syöttö tietokoneelle, tulppasauvan ulosveto, mittauksen käynnistys, näytteen syöttö, ja toiminnan alun seuraaminen
- **Koekuutioiden otto**
- valetaan kuusi koekuutiota



- muotin täyttö puoleenväliin → tärytys 5 sekuntia → täyttö → tärytys 5 sekuntia → pinnan tasaus
- Koestus iät 1d, 7d ja 28d, kaksi kappaletta jokaista.

Muotin purku seuraavana päivänä, kuutioiden merkkkaus ja siirto säilytysaltaaseen.

## **Lujuustulokset**

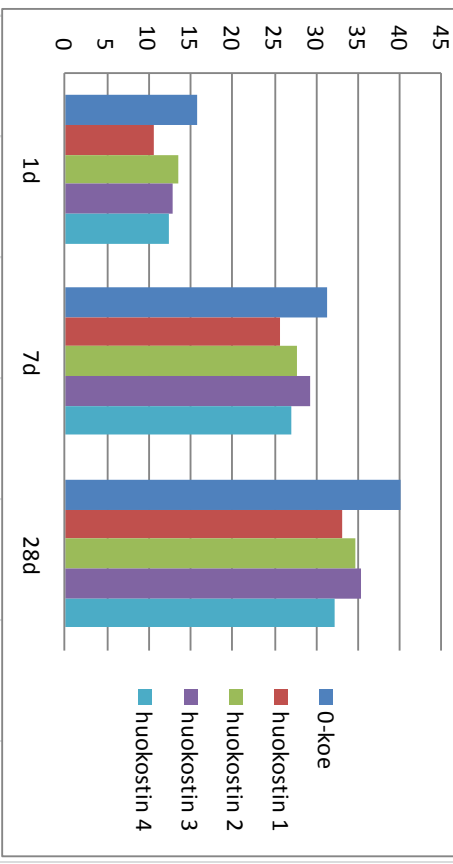
Liitteessä 2 esitetään puristuksista saadut tulokset taulukkoarvoina, sekä pylväsdia-grammeina. Taulukoissa kokeiden tulokset esitetään koodinimikkeillä muodossa: X.Y.Z. Koodi luetaan seuraavasti. X vaihtelee välillä 1-5, ja kuvaa käytettyä sementtiä. Y vaihtelee välillä 1-2, ja kuvaa käytettyä betonimassaa. 1 tarkoittaa elementtimassaa, ja 2 tarkoittaa valmisbetonimassaa. Z vaihtelee välillä 1-4, ja kuvaa käytettyä huokos-tinta. Tähän koodijärjestelmään päädyttiin kuutioiden säilytyksen aikaisen merkkäämi-sen helpottamiseksi.

koodi	1.1.0	koodi	1.1.1	koodi	1.1.2	koodi	1.1.3	koodi	1.1.4
1d	28,76	1d	24,45	1d	24,275	1d	23,095	1d	22,245
7d	46,44	7d	39,365	7d	39,88	7d	35,26	7d	33,93
28d	58,475	28d	50,44	28d	43,49	28d	43,675	28d	43,255

**sementti 1 v/s 0,45**

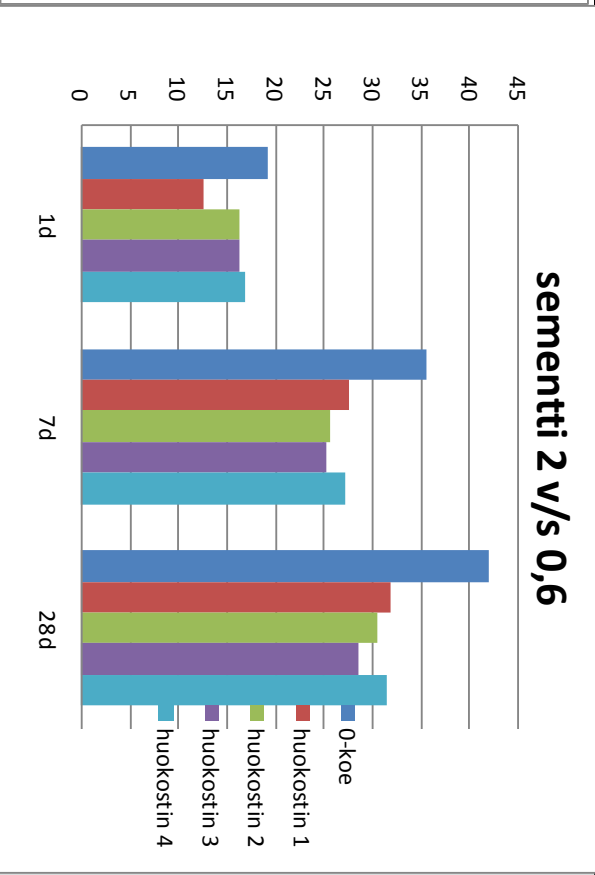
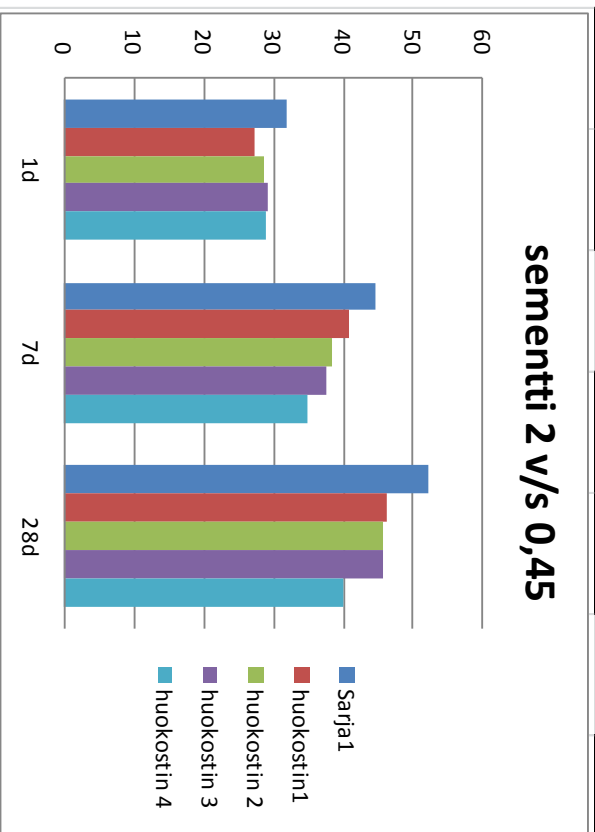


**SEmentti 1 v/s 0,6**



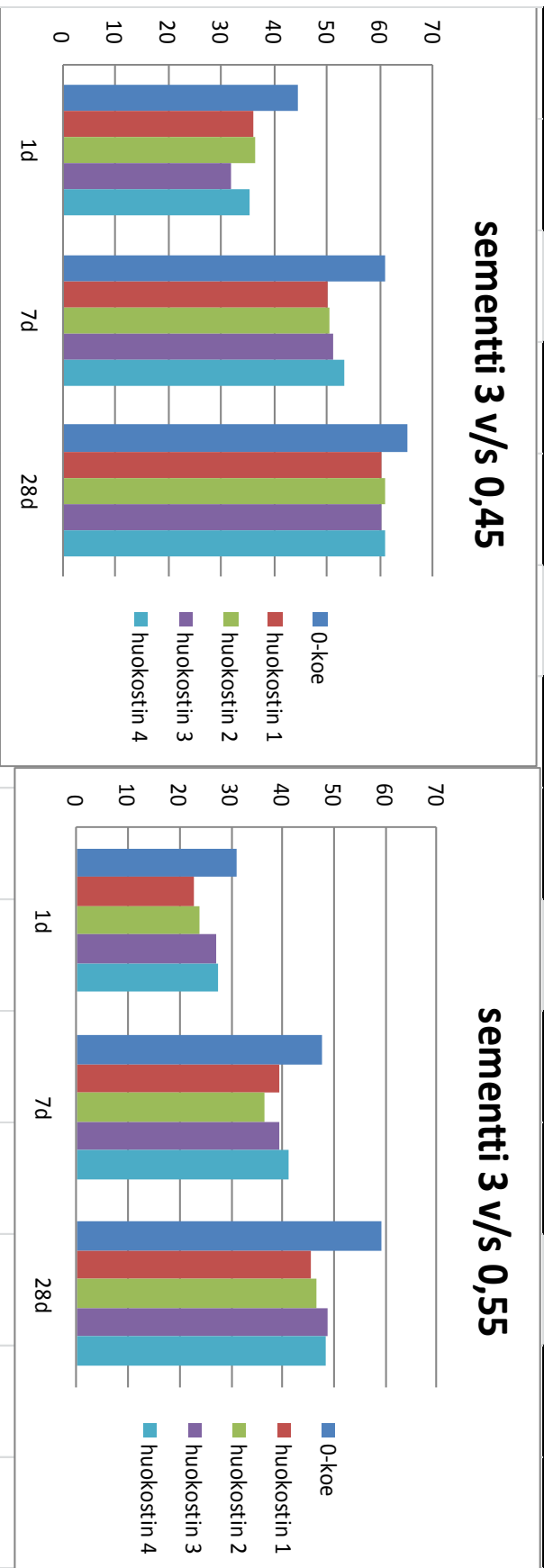
koodi	1.2.0	koodi	1.2.1	koodi	1.2.2	koodi	1.2.3	koodi	1.2.4
1d	15,69	1d	10,585	1d	13,62	1d	12,76	1d	12,33
7d	31,275	7d	25,655	7d	27,675	7d	29,385	7d	27,135
28d	40,085	28d	33,19	28d	34,665	28d	35,3	28d	32,165

koodi	2.1.0	koodi	2.1.1	koodi	2.1.2	koodi	2.1.3	koodi	2.1.4
1d	31,77	1d	27,15	1d	28,49	1d	29,03	1d	28,98
7d	44,585	7d	40,895	7d	38,23	7d	37,57	7d	34,73
28d	52,1	28d	46,175	28d	45,595	28d	45,75	28d	40,065



koodi	2.2.0	koodi	2.2.1	koodi	2.2.2	koodi	2.2.3	koodi	2.2.4
1d	19,16	1d	12,56	1d	16,255	1d	16,185	1d	16,945
7d	35,59	7d	27,65	7d	25,66	7d	25,21	7d	27,2
28d	42,05	28d	31,925	28d	30,46	28d	28,545	28d	31,38

koodi	3.1.0	koodi	3.1.1	koodi	3.1.2	koodi	3.1.3	koodi	3.1.4
1d	44,575	1d	36,085	1d	36,185	1d	31,92	1d	35,345
7d	60,75	7d	50,1	7d	50,215	7d	50,98	7d	53,07667
28d	65,095	28d	60,04	28d	60,765	28d	60,235	28d	60,75



koodi	3.2.0	koodi	3.2.1	koodi	3.2.2	koodi	3.2.3	koodi	3.2.4
1d	31,11	1d	22,745	1d	23,765	1d	27,03	1d	27,595
7d	47,505	7d	39,425	7d	36,545	15d	39,335	7d	41,035
39d	59,375	28d	45,635	28d	46,505	28d	48,77	28d	48,53

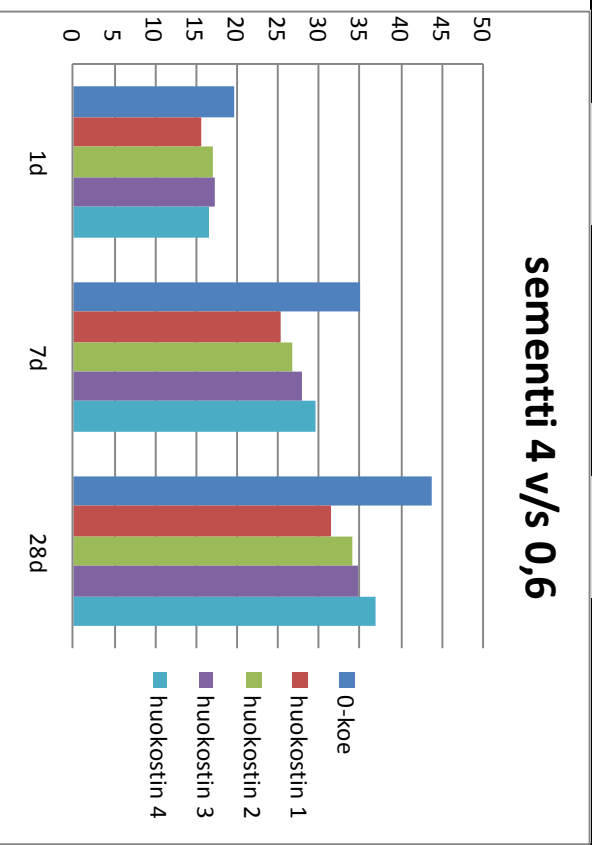
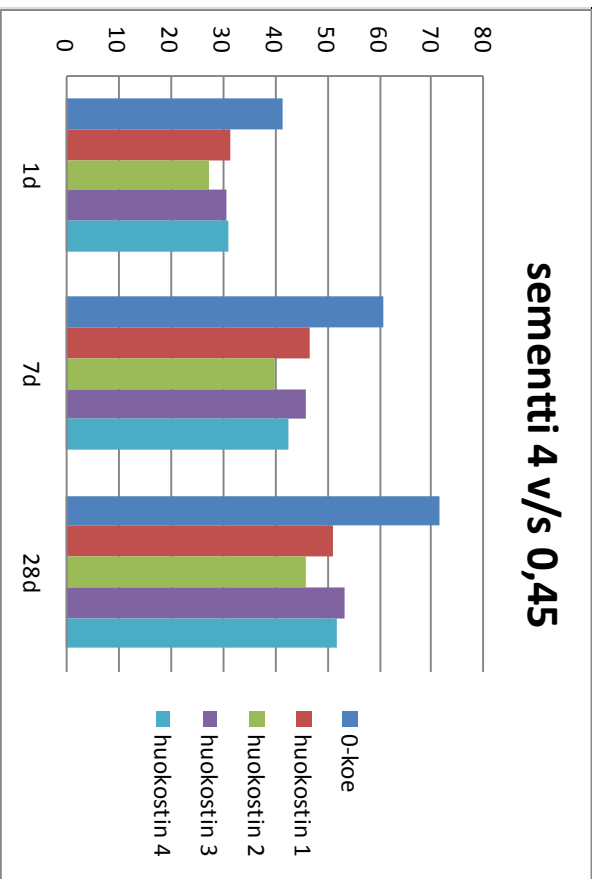
koodi	4.1.0
1d	41,42
7d	60,675
28d	71,355

koodi	4.1.1
1d	31,275
7d	46,64
28d	51,055

koodi	4.1.2
1d	27,385
7d	39,83
28d	45,84

koodi	4.1.3
1d	30,56
7d	45,93
28d	53,365

koodi	4.1.4
1d	30,89
7d	42,455
28d	51,825



koodi	4.2.0
1d	19,715
7d	34,965
28d	43,71

koodi	4.2.1
1d	15,63
7d	25,26
28d	31,4

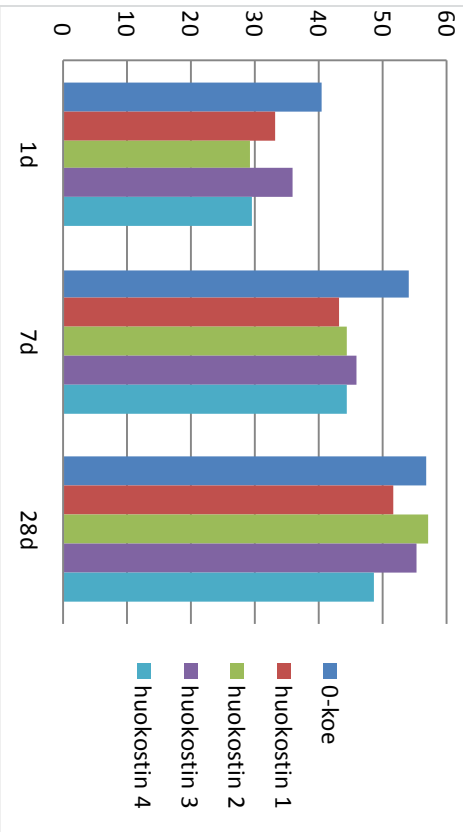
koodi	4.2.2
1d	16,945
7d	26,81
28d	34,155

koodi	4.2.3
1d	17,275
7d	28,01
28d	34,85

koodi	4.2.4
1d	16,625
7d	29,465
28d	36,965

koodi	5.1.0	koodi	5.1.1	koodi	5.1.2	koodi	5.1.3	koodi	5.1.4
1d	40,425	1d	33,085	1d	29,22	1d	35,925	1d	29,28
7d	53,98	7d	43,135	7d	44,135	7d	45,66	7d	44,235
28d	56,72	28d	51,635	28d	57,045	28d	55,325	28d	48,515

**sementti 5 v/s 0,45**



**sementti 5 v/s 0,6**



koodi	5.2.0	koodi	5.2.1	koodi	5.2.2	koodi	5.2.3	koodi	5.2.4
1d	18,37	1d	17,49	1d	14,955	1d	14,91	1d	13,4
7d	35,515	7d	29,94	7d	27,285	7d	27,225	7d	28,06
28d	42,11	28d	36,42	28d	34,125	28d	32,81	28d	33,88

### Esimerkki notkistimen ja ilmamäärän yhteisvaikutuksesta

Liitteessä on esitetty notkistinkokeen tuloksia. Tuloksista näkyy, kuinka ilmamäärä ei eroa 0-kokeen ilmamäärästä, vaikka notkistinta lisätäänkin koemassaan. Kuvassa olevat mustatut laatikot ovat salassa pidettävää tietoa.

sementti					
filleri					
0-8					
sepeli					
<b>testi</b>				0-koe	
vs	0,45			vs	0,58
painuma				painuma	
ilma	2,3			ilma	1,4
1d				1 d	
28d				28d	
<b>testi</b>				0-koe	
vs	0,5			vs	0,5
painuma				painuma	
painuma 30				ilma	2,2
ilma	1,5				



**Esimerkki teollisella sekoittajalla sekoitetusta massasta saadusta huokosjakotuloksesta**

Liitteen 4 kuvassa esitetään suuren mittakaavan teollisessa myllyssä sekoitetun massan AVA-mittaus tulokset. Mitattu huokosjako on huomattavasti alhaisempi kuin yksikään tässä insinööriyössä saaduista huokosjaoista. Tästä voidaan päätellä, että myllyn sekoitusteholla on erittäin merkittävä vaikutus huokostuksen onnistumiseen. Ilmamittarilla mitattu ilmamäärä oli kyseisessä kokeessa 5,6 %.

