

Elli-Maria Tykkä

# VALUN AIKANA TAPAHTUVIEN POIKKEAMIEN VAIKUTUS BETONIN OMINAISUUKSIIN

Opinnäytetyö  
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

2020



**Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu**

<b>Tekijä/Tekijät</b>	<b>Tutkinto</b>	<b>Aika</b>
Elli-Maria Tykkä	Rakennusinsinööri (AMK)	Huhtikuu 2020
<b>Opinnäytetyön nimi</b>		43 sivua 5 liitesivua
Valun aikana tapahtuvien poikkeamien vaikutus betonin ominaisuuksiin		
<b>Toimeksiantaja</b>		
Ruskon Betoni Etelä Oy Laatu- ja kehitysjohtaja Vesa Anttila		
<b>Ohjaaja</b>		
Sirpa Laakso Anna Eskola		
<b>Tiivistelmä</b>		
<p>Opinnäytetyössä tutkittiin valun aikana tapahtuvien poikkeamien vaikutusta kovettuneen betonin lujuus- ja pakkasenkesto-ominaisuuksiin. Tutkimusta varten valettiin koekappaleita, joihin simuloitiin mahdollisia poikkeamia verrattuna standardin mukaiseen koekappaleen valmistukseen. Tutkimuksella pystyttiin osoittamaan tiivistämisen merkitys betonivaluissa. Tavoitteena oli saada työn tilaajalle materiaalia mm. henkilöstön kouluttamiseen.</p> <p>Simuloidut poikkeamat liittyivät tiivistyksen keston ja muotin täyttökerrosten määrään. Säilytysolosuhteiden vaikutusta ennen muotin purkua simuloitiin asettamalla koekappaleita valun päätyttyä sekä uuniin että pakastimeen. Työssä tutkittiin myös koekappaleen muodon sekä pinnan hiertämisen vaikutusta puristuslujuuteen. Valmistetuista koekappaleista testattiin puristuslujuus ja niiden pakkasenkestävyyttä tutkittiin huokosanalyysillä sekä laattakokeella.</p> <p>Tutkimusta varten valmistettu betonimassa oli lujuusluokaltaan C35/45. Puristuslujuustulokset ylsivät simuloituista poikkeamista huolimatta tavoitelujuuteen lukuun ottamatta jäätyneitä koekappaleita.</p> <p>Laattakokeissa rapaumat jäivät sallittuihin rajoihin. Tämä oli odotettavissa, sillä betonin tiedettiin olevan pakkasenkestävää. Selvää eroa standardin mukaisesti ja huonosti tiivistettyjen kappaleiden välillä ei ollut. Rapauma oli jopa vähäisempää poikkeavasti tiivistetyillä testikappaleilla.</p> <p>Huokosanalyysillä oli helppo osoittaa tiivistyksen vaikutus. Koekappaleiden ilmamäärä oli säännönmukainen: ylitivistetyissä kappaleissa kokonaisilmamäärä oli pienempi, koska huokosilmaa poistuu betonista tiivistettäessä. Analyysillä pystyi todentamaan betonin pakkasenkestävyyden, ja laattakokeiden tulokset korreloivat huokosanalyysien tulosten kanssa. Myös puristuslujuudet olivat yhteydessä kappaleista laskettuun ilmamäärään.</p>		
<b>Asiasanat</b>		
betoni, puristuslujuus, laattakoe, pakkasenkestävyys, huokosanalyysi, ilmamäärä		

<b>Author (authors)</b>	<b>Degree</b>	<b>Time</b>
Elli Tykkä	Bachelor of Engineering	April 2020
<b>Thesis title</b> Impact of deviations during the casting on the quality of concrete		43 pages 5 pages of appendices
<b>Commissioned by</b>  Ruskon Betoni Etelä Oy Vesa Anttila, Quality and Development Director		
<b>Supervisor</b>  Sirpa Laakso Anna Eskola		
<b>Abstract</b>  <p>The objective of this thesis was to study the impacts of the deviations during the casting of concrete. Test specimens were made with possible deviations that could be made while casting. With this study, it can be indicated how compendious it is to compact according to the standard procedure. The demand for the study was to gain results for the client to produce educational material.</p> <p>The simulated deviations were over-compaction, sub-compaction, the number of the layers the mold was filled with and conditions during final setting time. Also, the effect of the shape of the test specimen was studied.</p> <p>The test specimens were provided with freeze-thaw resistance, air void analyzing and the test for compressive strength. All the tests were carried out according to valid standards.</p> <p>The strength class of the tested concrete was C35/45. All of the specimens tested for compressive strength fulfilled the qualification, excluding the ones cured in a freezer.</p> <p>The freeze-thaw resistance test showed that there was no difference between specimens made by standard and specimens made with deviations. Actually, deviant test series performed better than the standard series. All the test results were within the limits given in the standard regarding.</p> <p>It was convenient to indicate the bearing of the compaction with the air void analyzing. The total air content of the specimens was ordinary: over-compaction causes the air to exit from concrete. With the analysis, it was possible to prove the resistance to freezing and thawing and the findings correlated with the results from the freeze-thaw resistance test.</p>		
<b>Keywords</b>  concrete, compressive strength, freeze-thaw resistance, air void analyzing, air content		

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	LAADUNVALVONTA VALMISBETONIASEMILLA JA TYÖMAILLA.....	7
3	TUTKIMUKSEN LÄHTÖTIEDOT.....	10
4	TUTKIMUSTULOKSET .....	13
4.1	PURISTUSLUJUUS .....	13
4.1.1	Koekappalemuotin täyttökerrosten lukumäärä.....	15
4.1.2	Tiivistyksen kesto.....	16
4.1.3	Pinnan viimeistely valun jälkeen.....	18
4.1.4	Tasausmenetelmä .....	19
4.1.5	Säilytysolosuhteet ennen muotin purkua.....	21
4.1.6	Koekappaleen muoto.....	23
4.2	PAKKASENKESTÄVYYS.....	26
4.2.1	Huokosanalyysi.....	27
4.2.2	Laattakoe .....	33
5	YHTEENVETO .....	37

## LIITTEET

Liite 1. Kuvaliite: Testisarjojen pintahieet mikroskooppikuvina

**KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY**

huokosanalyysi	optisesti mikroskoopilla suoritettu analyysi kovettuneen betonin huokosrakenteesta, josta tuloksena saadaan erinäisiä huokosparametrejä
huokosjako	ilmaisee suurimman etäisyyden sementtipastan mistä tahansa pisteestä lähimpään suojuhuokosen pintaan
kokonaisilmamäärä	kovettuneen betonin ilmamäärä suhteessa tilavuuteen [%]
laattakoe	suora pakkaskoe, jossa koekappaleet altistetaan jäätymiselle sykleittäin
ominaispinta-ala	huokosparametri, joka määritetään huokosten pinta-alan suhteesta niiden tilavuuteen [ $\text{mm}^2/\text{mm}^3$ ]
suojuhuukonen	ilmahuukonen, jonka halkaisija on 0,02...0,8 mm
tiivistyshuukonen	ilmahuukonen, jonka halkaisija on yli 0,8 mm
vaipan pinta-ala	huokosparametri, joka määritetään huokosten ominaispinta-alan ja kokonaisilmamäärän tulosta [ $\text{mm}^2/\text{mm}^3$ ]

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää valun aikana mahdollisesti tapahtuvien poikkeamien vaikutus betonin lopullisiin ominaisuuksiin.

Opinnäytetyön tarkoitus oli tuottaa samalla tutkimustuloksia Ruskon Betoni Oy:lle, joita voidaan käyttää koulutusmateriaaleissa. Vaikka tietoa poikkeamien vaikutuksista on saatavilla, niin vertailevalle tutkimukselle hallituissa oloissa oli tarve.

Huokosrakenteen tiedetään vaikuttavan betonin ominaisuuksiin. Suomessa asiaa tutkittiin vuonna 2017, kun betonirakenteissa huomattiin kohonneita ilmamääriä (Al-Neshawy & Punkki 2017). Kohonneet ilmamäärät aiheuttivat betonin lujuudenmenetystä. Myös betonin pakkasenkestävyyden kannalta huokossysteemin toimivuus on oleellista. Yleisesti merkityksellisimpänä huokosparametrina on pidetty huokosjakoa, jonka laskukaavan Powers on määrittänyt vuonna 1949.

Koekappaleiden valmistus vaikuttaa niiden lopullisiin ominaisuuksiin. Samasta massasta valmistettujen kappaleiden huokosrakenteet voivat olla hyvin poikkeavia riippuen kappaleiden valmistustavasta (Al-Neshawy & Punkki 2017, 14). On osoitettu, että kokonaisilmamäärän kasvaessa betonin puristuslujuus heikkenee (Haavisto & Laaksonen 2018, 10), mutta suojuhuokosten määrän tulee olla riittävä pakkasenkestävyyden varmistamiseksi (Leivo 2000, 10).

Tähän työhön päädyttiin, koska haluttiin osoittaa koekappaleiden valmistustavan vaikutus betonin ominaisuuksiin. Työ rajattiin tutkimaan poikkeavan valmistustavan vaikutusta puristuslujuus- ja pakkasenkestävyysominaisuuksiin. Suurin painoarvo tutkimuksella on puristuslujuuden osalta, sillä tutkimuksessa käytetyn massan tiedettiin olevan pakkasenkestävää.

## 2 LAADUNVALVONTA VALMISBETONIASEMILLA JA TYÖMAILLA

Laadunvalvonta on tarkkaa ja määriteltyä betonitöissä. Työmaaolosuhteissa laatua kontrolloidaan toteutusasiakirjoilla, jotka pohjautuvat työn toteutusluokkaan. Toteutusluokkia on kolme, joista luokat 2 ja 3 vaativat silmämääräisen tarkkailun lisäksi erilaisia testauksia. Tarkastukset tapahtuvat betonirakenteen toteuttajan omavalvontana ja lisäksi luokissa 2 ja 3 kaikkien työvaiheiden tarkastuksiin, jotka toteutetaan säännöllisesti ja järjestelmällisesti (by65 Betoninormit 2016, 95).

Betonin valmistajan tulee huomioida kansallisen standardit SFS-EN 13670 sekä SFS-EN 206 ja niiden vaatimukset. Standardissa vaaditaan ennakkokokeita ja alkutestauksia. Niiden perusteella määritetään valmistettavien betonien tavoitekoostumus ja säädetään niitä ominaisuuksiltaan halutunlaisiksi. Vaatimuksenmukaisuuden varmistaminen on tärkeää betoniasemilla.

Alkutestauksella varmistetaan sekä tuoreelle että kovettuneelle betonille määritettyjen ominaisuuksien toteutuminen. Alkutestauksessa valmistetaan vähintään yhdeksän koekappaletta, joiden puristuslujuus testataan. Testaus on tehtävä, kun käytetään koostumukseltaan uutta betonia tai jos betonin osat aineet muuttuvat merkittävästi. Jos valmistajalla on pitkäaikaista kokemusta samanlaisesta betonista, alkutestausta ei tarvitse tehdä. (SFS-EN 206.)

Ennakkokokeilla kartoitetaan betonin muita, kuin lujuusominaisuuksia. Kokeita varten betonit jaetaan arvostelueriin säilyvyyden samantyyppisyyden mukaan (by65 Betoninormit 2016). Arvosteluerille tehdään ennakkokokeet, ja testattava betoni valitaan valmistuserän yleisimpien koostumuksien joukosta.

Ennakkokokeessa tuoreelle massalle tehdään ilmamäärämittaus standardin SFS-EN 12350-7 mukaan ja kovettuneesta betonista testataan pakkasenkestävyys testauslaitoksessa.

Betonin valmistuksen voi aloittaa vasta hyväksytyjen ennakkokokeiden jälkeen. Ennakkokokeet pitää uusida, jos valmistuksessa tapahtuu merkittäviä muutoksia.

Betonin vesitiiviys testataan ennakkokokeilla. Valmistajan vesitiiviiksi ilmoittamista betonilaaduista valitaan kokeisiin ryhmän kaksi koostumuksen perusteella vähiten vesitiiviiksi oletettua koekappaletta. Vesitiiviys testataan standardin SFS-EN 12390-8 mukaisesti. Paineellisen veden tunkeutumasyvyyden tulee olla alle 100 mm, jotta betoni katsotaan vesitiiviiksi. Vesitiiviiksi luokiteltu betoni tulee testata vuosittain vesitiiveyden ylläpitämiseksi. (SFS 7022:2019, 5.5.3.)

Myös muita betonin ominaisuuksia seurataan tasokokein. Tasokokeilla varmistetaan betonin ominaisuuksien säilyminen betonin materiaalien ja valmistuksen toimintatapojen muuttuessa. Valmistaja vastaa jatkuvasta laadunhallinnasta toimittamalla koekappaleita testauslaitokselle testattavaksi määräajoin. Jos tasokokeissa tulee alituksia, ne uusitaan. Jos myös uusinta tuottaa alituksia sallittuihin viitearvoihin, tulee reseptiä muuttaa vaadittujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. Lujuustestaukset valmistaja voi tehdä itse. Tällöin puristuslujuuden tasotarkastus tulee tehdä vuosittain pätevässä testauslaboratoriossa (by65 Betoninormit 2016, 96).

Jos betonin toimittaja on tarkastamaton, tulee rakennuspaikalla valaa koekappaleita. Valmisbetonin ja betonielementtien laadunvalvonnan ollessa ympäristöministeriön hyväksymän toimielimen tarkastuksen alainen, sitä kutsutaan tarkastetuksi. (BY65 Betoninormit 2016.)

Myös tuoreelle massalle tehdään laadunvalvontaa sekä valmistuksen että betonoinnin aikana. Koekappaleita valmistettaessa voidaan mitata massan lämpötila, ilmamäärä, painuma, leviämä ja märkätiheys. Työmaalla oleellisin testaus on painuman mittausta (KUVA 1), jonka perusteella todennetaan notkeusluokka. Pakkaskestävää betonia tehtäessä myös ilmamäärän mittausta on oleellista.





Kuva 1. Painuman mittaus betoniasemalla.

Laadunvalvontaa tulee dokumentoida. Siihen liittyvät dokumentit ja tarkastusten tulokset säilytetään vähintään kaksi vuotta rakennuksen käyttöönoton jälkeen. Tallenteet voivat olla joko paperisia tai sähköisiä. Dokumentoinnit pitää olla riittävän tarkkoja työsuoritusten osalta. Laadunvalvonnan alaisia työvaiheita ovat muotti- ja tukirakenteet, raudoitustyöt, betonityöt, elementtien asennus ja saumaus sekä jännitystyöt. Valmisbetonin laadunvalvonnan asiakirjat säilytetään vähintään kolme vuotta. (by65 Betoninormit 2016).

### 3 TUTKIMUKSEN LÄHTÖTIEDOT

Tutkimusta varten valettiin koekappaleita, joihin simuloitiin mahdollisia koekappaleiden valmistuksen aikana tapahtuvia poikkeamia. Tutkimukseen valikoituivat todennäköisimmät poikkeamat työmaaolosuhteissa, jotka määritettiin yhdessä työn tilaajan kanssa. Jokaista poikkeamatyyppiä sisältävää koekappaletta valmistettiin vähintään kolme kappaletta varmuuden lisäämiseksi. Tutkimuksessa käytettiin verrokkiryhmänä standardin SFS-EN 12390-2 mukaan ja hyvällä tavalla valmistettuja kappaleita.

Tutkittava 3 m<sup>3</sup>:n betonierä valmistettiin Ruskon Betoni Etelä Oy:n Kotkan tehtaalla. Betoni on määritelty standardin SFS-EN 206 perusvaatimusten mukaisesti. Betoni oli lujuusluokaltaan C35/45 ja rasitusluokat ovat P50, XC4, XF4 ja XS3. Massan tavoiteltu notkeusluokka oli S4. Kiviaineksena käytettiin luokkia 0–8 mm ja 8–16 mm. Vesi-sementtisuhde oli 0,41. Lisäaineina massassa oli huokostin ja tehonotkistin. Betoni oli koostumuksen mukaista. Massan lämpötila valun alkaessa oli +19 °C ja päättyessä +21,2 °C.

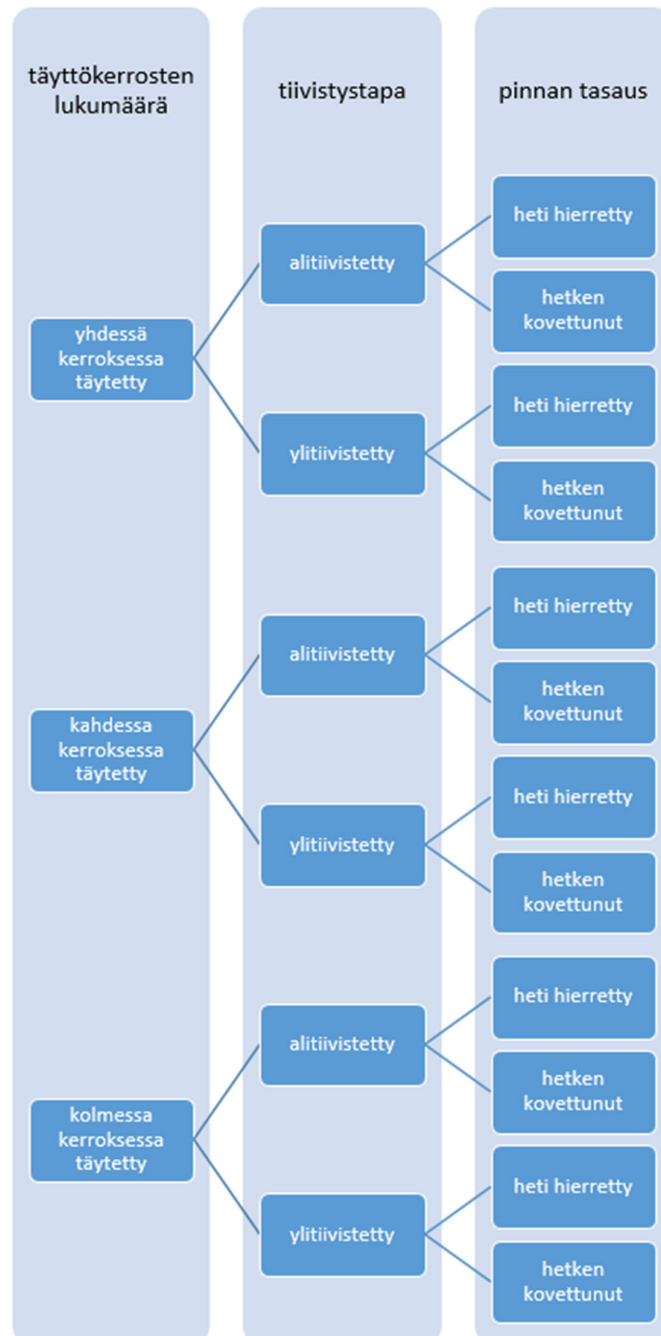
Tuoreesta betonimassasta testattiin lämpötila, painuma, leviämä ja ilmamäärä standardisarjan SFS-EN 12350 ja opinnäytetyötä varten laatimani tutkimussuunnitelman mukaisesti. Testaukset suoritettiin sekä ennen valua, että sen päätyttyä. Testausten ajankohdilla oli eroa 110 minuuttia. Painuma ei muuttunut testausten välillä, vaan oli molemmilla testauskerroilla 220 mm. Näin ollen tavoiteltu notkeusluokka S4 ei toteutunut, vaan massa oli luokkaa S5. Leviämän luokka oli F5, leviämän ollessa ennen valua 610 mm ja valun jälkeen 580 mm.

Tein koekappaleiden testaukset syksyllä 2019 Xamkin KymiLabs-tutkimusyksikössä, akkreditoidussa betonintestauslaboratoriossa, jossa toimin laboratorioinsinööriharjoittelijana.

#### **Tutkimuksessa simuloidut poikkeamat**

Tutkimusta varten valmistettiin kolmesta neljään koekappaletta kutakin myöhemmin kuvattua virhesimulaatiota kohden, ja niistä testattiin puristuslujuus ja tehtiin huokosanalyysi. Työn tilaajan edustajan mukaan

poikkeamat, jotka simuloitiin, ovat yleisesti mahdollisia valun aikana. Tutkimukseen valikoituivat täyttökerrosten lukumäärä, tiivistämiseen ja pinnan tasaukseen liittyvät työtavat sekä säilytyslämpötila ennen muotin purkua (Kuva 2). Myös koekappaleen muodon vaikutusta tutkittiin. Tutkimuksen koekappaleet olivat 150 × 300 mm:n lieriötä, pois lukien 150 mm:n kuutiot, joita käytettiin vertailumuotona. Tutkimuksen lieriöiden lujudet muunnettiin kuutiolujuuksiksi.



Kuva 2. Simuloitujen poikkeamien hierarkia. Jokaista koekappaletta valmistettiin kolmesta neljään kappaletta.

Standardin SFS-EN 12390-2 mukaan koekappale tulee valmistaa täyttämällä muotti kahdessa tai useammassa kerroksessa, jotta tiivistyminen on täydellinen. Jokainen kerros tiivistetään siten, ettei muodostu liiallista erottumista tai sementtikalvoa. Tiivistyminen on täydellistä, kun betonin pinnalle ei nouse enää isoja ilmakuplia ja pinta on sileä ja kiiltävä.

Koekappaleita valmistettiin täyttämällä muotti yhdessä, kahdessa tai kolmessa kerroksessa. Poikkeama edellä mainituista on ainoastaan yhdessä kerroksessa täytetty koekappalemuotti. Näin ollen kaksi jalkimmäistä ei itsessään ole poikkeamia, mutta niillä on vaikutusta betonin lujuusominaisuuksiin. Tutkimuksessa keskeisempää on muiden poikkeamien vaikutus.

Tiivistäminen tehtiin tärysauvalla. Standardin mukaisesti tiivistetyt kappaleet tiivistettiin kolmesta kohtaa jokaisesta täyttökerroksesta käyttäen lyhyintä tiivistämisaikaa, joka tarvittiin täydelliseen tiivistymiseen. Alitiivistetyt kappaleet tiivistettiin tärysauva nopeasti massassa käyttäen. Ylitiivistettäessä tärysauva oli massassa useita sekunteja jokaisessa tiivistyskohdassa. Tiivistyskohtia oli kolmesta neljään.

Valupinnan tasaamisesta tehtiin kahdella eri variaatiolla. Toinen oli hiertää pinta tasaiseksi heti tiivistämisen jälkeen. Toisessa variaatiossa muotin pinnalle jätettiin kasa tiivistämätöntä massaa. Täyttökehikkoja ei ollut käytössä, eikä standardissa sitä vaadita. Pinnan tasauksesta standardi ohjeistaa vain työvälineiden osalta, mutta tasauksen ajankohdan suhteen ei ole ohjeistusta.

Pinnan tasaaminen heti valun päätyttyä voi aiheuttaa ilman poistumista massasta, kuten tiivistettäessä. Tätä tapahtuu kuitenkin vain aivan pinnassa ja sen läheisyydessä (Yang 2012.) Näin ollen betonin tiheys ja sen vaikutuksesta myös lujuus olisivat hypoteettisesti korkeampia vain pienessä osassa koekappaletta, eikä sillä olisi suurta merkitystä kappaleen puristuslujuuteen. Tutkimuksen otanta on liian suppea johtopäätösten muodostamiseen, mutta saadut tulokset eivät tue teoriaa.

Lämpötilan vaikutusta valun päätyttyä tutkittiin siirtämällä yksi koekappaleryhmä uuniin ja yksi ryhmä pakastimeen. Uuni oli säädetty +30 °C:een, ja lämpötila pysyi tasaisena koko simulaation ajan. Pakastin oli lähtötilanteessa -11 °C astetta. Pakastimen lämpötilan kehitystä ei seurattu tässä tutkimuksessa. Lämpötila on todennäköisesti noussut simulaation aikana betonin eksotermisen reaktion ja kappaleisiin varastoituneen lämmön vuoksi. Simulaatio oli kuitenkin vertailukelpoinen, sillä olosuhteet vastasivat kylmänä pidettävää työmaakonttia pakkasjakson aikana.

Koekappaleen muodon vaikutusta tutkittiin testisarjoilla, joissa ei ollut virhesimulaatioita sekä sarjoilla, jotka olivat ylitiivistettyjä ja yhdessä kerroksessa täytettyjä. Tutkimusta varten valmistettiin standardin mukaisesti 150 mm kuutioita sekä 150 × 300 mm lieriöitä. Poikkeamasarjoissa kappaleiden pinnat tasattiin heti tiivistyksen jälkeen.

## **4 TUTKIMUSTULOKSET**

Betonin ilmamäärän tiedetään korreloivan sen puristuslujuuden kanssa (Haavisto & Laaksonen 2018, 10) ja tiivistyksen tiedetään vaikuttavan ilmamäärään (Al-Neshawy & Punkki 2017, 14). Tutkimus vahvisti käsitystä tiivistyksen vaikutuksesta ilmamäärään ja sitä kautta puristuslujuuteen.

Laattakokeiden ja huokosjakoanalyysien tulokset ovat myös toisiaan tukevia. Huokosjaon ollessa pientä kaikissa koekappaleissa, pintarapauma pysyi sallituissa rajoissa jokaisella testisarjalla. Huokosanalyysin tekeminen ei pakkasenkestävyyden määrittämiseksi ollut tutkimuksen kannalta merkittävä, koska betonin tiedettiin huokostettuna lähtökohtaisesti olevan pakkasenkestävää. Mutta huokosanalyysillä saatiin selville koekappaleiden kokonaisilmamäärä, jolla pystyttiin osoittamaan sen suora vaikutus puristuslujuuteen.

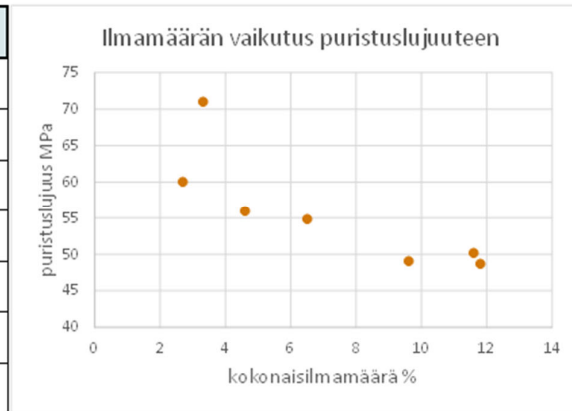
### **4.1 PURISTUSLUJUUS**

Valettujen koekappaleiden lujuusominaisuuksiin vaikuttaa moni seikka, kuten ilmamäärä, jonka vaikutusta tässä työssä on tutkittu. Tutkitut koekappaleet valmistettiin kaikki samasta massasta, mutta lopulliseen ilmamäärään vaikutettiin tiivistyksen kestolla. Testatuissa koekappaleissa korrelaatio

kokonaisilmamäärän ja puristuslujuuden välillä oli ennako-odotusten mukainen (Haavisto & Laaksonen 2018, 10). Ilmamäärän kasvaessa puristuslujuus heikkeni (Taulukko 1).

Taulukko 1. Testisarjojen kokonaisilmamäärä ja keskilujuus

	kokonaisilmamäärä [%]	puristuslujuus [MPa]
yhdessä kerroksessa täytetty, alitiivistetty	9,6	49,1
yhdessä kerroksessa täytetty, ylitiivistetty	6,5	54,9
kahdessa kerroksessa täytetty, alitiivistetty	11,8	48,7
referenssimassa	4,6	56,0
kahdessa kerroksessa täytetty, ylitiivistetty	2,7	60,0
kolmessa kerroksessa täytetty, alitiivistetty	11,6	50,1
kolmessa kerroksessa täytetty, ylitiivistetty	3,3	70,9



Betoniin muodostuu ilmaa mekaanisesti sekä kemiallisesti lisäaineita käyttämällä. Mekaaninen ilmanmuodostus tapahtuu massan sekoituksen aikana. Tiivistäminen tuottaa energiaa tuoreeseen betonimassaan. Vapautuneella energialla massa muodostaa rajapinnan veden ja ilman välille muodostaen suuria huokosia. Tiivistäminen myös liikuttaa massan kiviainesta, joka pilkkoo suuret tiivistyshuokokset pienemmiksi suojuhuokosiksi (Al-Neshawy & Punkki 2017). Suojuhuokokset ovat betonille kriittisiä pakkasenkeston kannalta.

Tiivistyksen keston uskottiin olevan merkityksellisin vertailluista poikkeamista. Täyttökerrosten lukumäärän uskottiin vaikuttavan, mutta pinnan hierron vaikutusta pidettiin marginaalisena. Se haluttiin ottaa tutkimukseen mielenkiinnosta mukaan, sillä sen vaikutuksen mahdollisuuden olemassaolo tiedetään (Yang 2012, 7). Selkeää vaikutusta sillä ei tutkimuksessa kuitenkaan havaittu olevan.

Ilman poikkeamia valmistetuista koekappaleista saatiin vertailukohta poikkeavalla tavalla valmistetuille kappaleille. Standardin mukaisia koekappaleita testattiin yhteensä 12 kappaletta. Referenssikappaleiden puristuslujuuden hajonta oli pientä, sijoittuen välille 54,6...57,1 MPa. Kappaleiden keskihajonta oli 1,1 MPa ja keskilujuus 56,0 MPa. Betonin lujuusluokka oli C35/45.

Puristuslujuus lasketaan yhtälöstä

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (1)$$

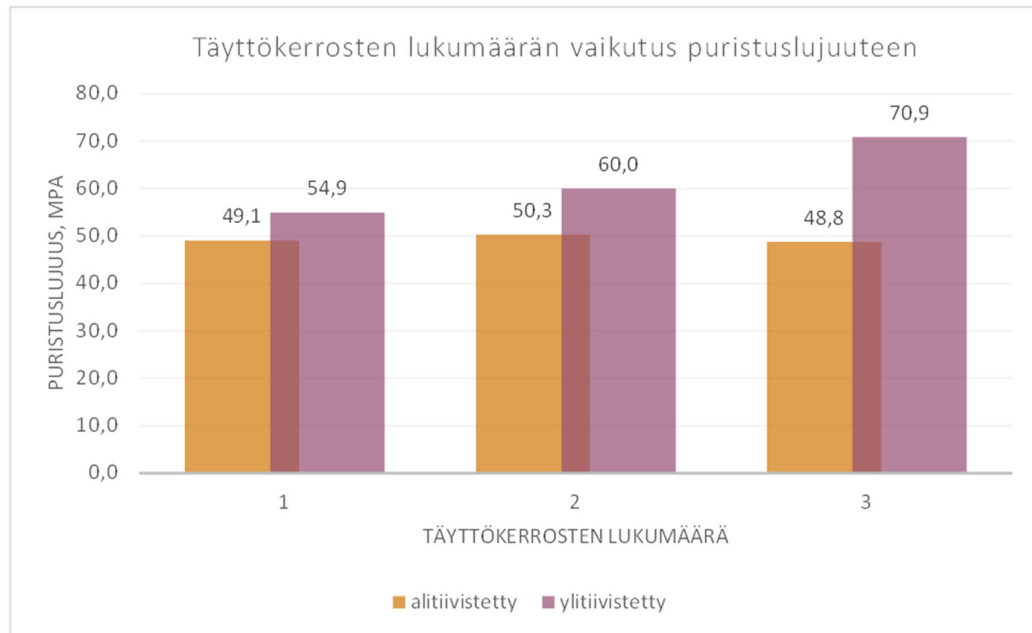
jossa

- $f_c$  on puristuslujuus [MPa]
- $F$  on kuormitusvoima [N]
- $A_c$  on kuormituspinta-ala [mm<sup>2</sup>]

Tulos ilmoitetaan pyöristettynä lähimpään 0,1 megapascaliin (N/mm<sup>2</sup>).

#### 4.1.1 Koekappalemuotin täyttökerrosten lukumäärä

Täyttökerrosten määrää ei pidetty tutkimuksen kannalta yhtä kiinnostavana, kuin tiivistyksen laatua. Tästä syystä yhdessä ja kolmessa kerroksessa täytettyihin kappaleisiin on simuloitu myös tiivistyksen vaikutus, eikä niistä ole pelkkää kerroslukumäärään perustuvaa poikkeamaa sisältäviä testisarjoja (Kuva 3).



Kuva 3. Täyttökerrosten ja tiivistystavan vaikutus koekappaleen puristuslujuuteen.

Yhdessä kerroksessa täytetyissä kappaleissa puristuslujuuden vaihteluväli oli muita sarjoja pienempi. Testitulokset vaihtelivat välillä 48,1...57,6 MPa. Tiivistystapa vaikutti enemmän hajontaan kuin täyttökerrosten lukumäärä. Yhdessä kerroksessa valettujen kappaleiden keskilujuus oli 52,0 MPa ja keskihajonta oli 2,7 MPa.

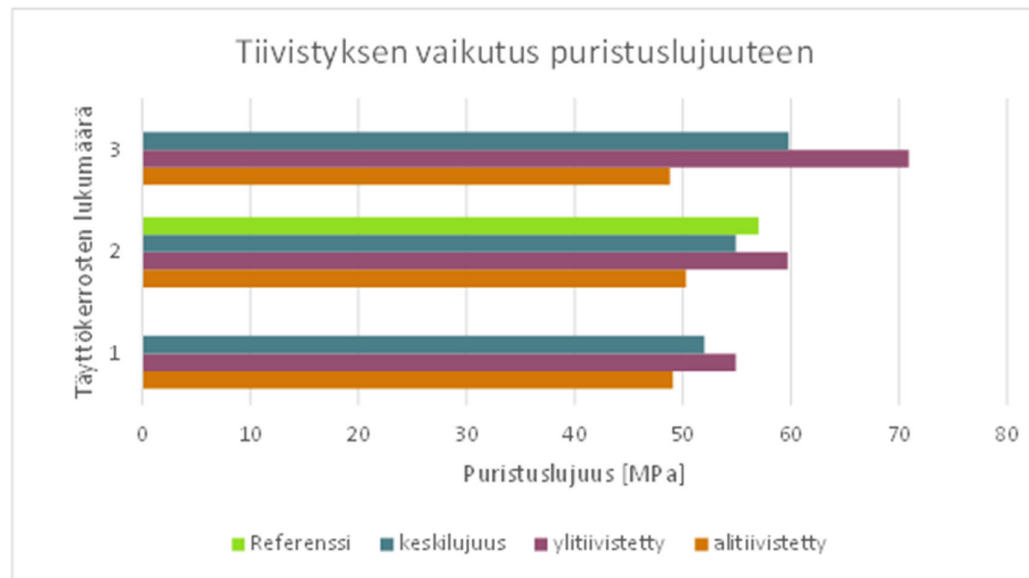
Myös kahdessa kerroksessa täytetyissä kappaleissa korostui tiivistystavan vaikutus. Hajonta oli hieman suurempaa, kuin yhdessä kerroksessa täytetyillä kappaleilla ollen keskimäärin 5,9 MPa. Puristuslujuudet sijoituivat välille 47,9...61,8 MPa. Tulosten keskiarvo on 3 MPa suurempi aiempaan vertailuryhmään nähden, ollen 55,0 MPa.

Kolmessa kerroksessa täytetyistä muoteista tuli tutkimuksen lujimmat kappaleet. Tulosten vaihtelu tapahtuu välillä 49,3...74,1 MPa. Sarjassa oli yksi selkeästi huonompi tulos, joka jätettiin vertailun ulkopuolelle sen vääristäessä tulosta. Betonin tunnistustestauksen mukaan samasta näytteestä valmistetuista koekappaleista yhden testaustuloksen poiketessa tuloksista lasketusta keskiarvosta enemmän kuin 15 %, tulosta ei oteta huomioon (by65 Betoninormit, 2016). Yksi poikkeava tulos huomioimatta jätettynä, kolmessa kerroksessa täytettyjen koekappaleiden keskilujuus oli merkittävästi verrokkeja suurempi. Lujuuksien keskiarvo oli 61,4 MPa, keskihajonnan ollessa 11,8 MPa.

#### **4.1.2 Tiivistyksen kesto**

Tiivistyksen kestolla oli tutkimuksen mukaan suurin vaikutus puristuslujuuteen (Kuva 4). Tiivistäminen poistaa betonista huokosilmaa, jolloin sen tiheys kasvaa. Tiheämmällä betonilla on suurempi puristuslujuus (Mehta & Monteiro 2014). Näin ollen myös tutkimuksen ylitiivistetyt kappaleet olivat lujempia, kuin alitiivistetyt. Ylitiivistettyjen keskimääräinen puristuslujuus oli 61,9 MPa sijoittuen vaihteluvälille 52,0...74,1 MPa. Alitiivistettyjen koekappaleiden lujuus vaihteli välillä 47,9...50,7 MPa. Keskilujuus oli 49,4 MPa, keskihajonnan ollessa vain 0,8 MPa.





Kuva 4. Kuvaaja tiivistyksen vaikutuksesta täyttökerrosten lukumäärän suhteen puristuslujuuteen.

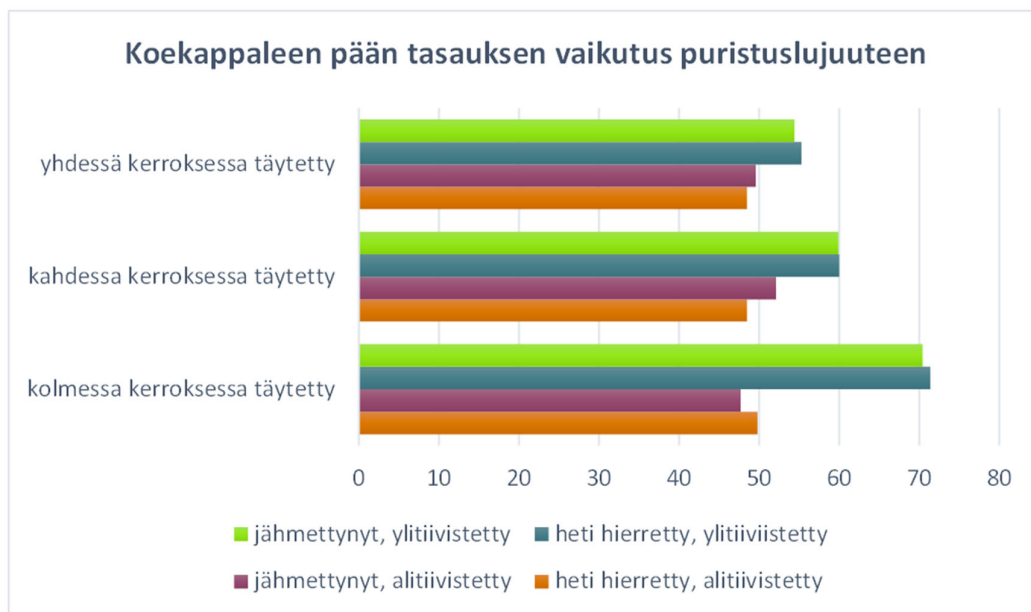
Täyttökerrosten lukumäärään verrattessa ei alitiivistettyjen koekappaleiden puristuslujuuksissa ollut suurta eroa. Heikoimpia olivat kolmessa kerroksessa täytetyt. Näiden keskilujuus oli 48,8 MPa ja puristustulosten vaihteluväli oli 42,5...50,7 MPa. Kahdessa kerroksessa täytettyjen alitiivistettyjen koekappaleiden puristuslujuudet vaihtelivat välillä 48,4...58,1 MPa. Myös yhdessä kerroksessa täytetyt koekappaleet ylsivät saman kaltaisiin puristuslujuuksiin. Niiden tulosten keskiarvo oli 49,1 MPa. Vaihteluväli oli testisarjalla pienempi verrattuna kahdessa ja kolmessa kerroksessa täytettyihin kappaleisiin. Lujuudet vaihtelivat välillä 48,1...49,9 MPa.

Ylitiivistetyissä kappaleissa puolestaan täyttökerrosten määrällä oli suuri vaikutus. Lujimpia kappaleita tuli kolmessa kerroksessa tiivistetyistä kappaleista. Niiden lujuudet sijoituivat välille 68,9...74,1 MPa. Kahdessa kerroksessa täytetyt ylitiivistetyt kappaleet olivat keskilujuudeltaan 60,0 MPa tulosten vaihdella välillä 59,0...61,8 MPa. Yhdessä kerroksessa täytetyt ja ylitiivistetyt kappaleet olivat vertailuryhmiään heikompia. Niiden keskilujuus oli 54,9 MPa ja puristuslujuuden vaihtelu koekappaleiden välillä oli 52,0...57,6 MPa.

### 4.1.3 Pinnan viimeistely valun jälkeen

Yang (2012) on esittänyt, että pinnan viimeistely betonimassan ollessa tuoretta voisi vähentää massasta ilmaa samaan tapaan kuin tiivistäminen. Hänen mukaansa normaalisti kuitenkin vaikutus olisi vain suuriin huokosiin ja ilmamäärän muutos tapahtuisi vain kappaleen valupinnan läheisyydessä. Tämän teorian mukaan menetelmällä ei ole suurta vaikutusta puristuslujuuteen. Tutkimus tukee olettamusta vaikutuksen vähäisyydestä. Tuoreeltaan hierrettyjen kappaleiden keskilujuus tutkimuksessa oli 55,6 MPa, kun taas hetken jähmettymisen jälkeen hierrettyjen kappaleiden keskimääräinen puristuslujuus oli 56,1 MPa.

Suppean otannan ja muiden vaikuttavien simulaatioiden vuoksi saadusta tuloksesta ei voida tehdä luotettavia päätelmiä. Kuudesta testisarjasta kolmella välittömästi hierretyllä oli suurempi lujuus, kuin vertailuryhmällä, joiden päälle jätettiin kasa tiivistämätöntä massaa hetkeksi sitoutumaan (Kuva 5). Erot olivat kuitenkin korkeintaan yhden megapascalin luokkaa, joten selvää vaikutusta ei hierron ajankohdalla ollut. Keskimääräisesti heti tiivistymisen päätyttyä hierretyt kappaleet pärjäsivät vertailuryhmiään hieman heikommin.



Kuva 5. Koekappaleen pään viimeistelyn vaikutus valun päätyttyä puristuslujuuteen.

#### 4.1.4 Tasausmenetelmä

Puristuslujuutta testatessa lieriömäisten koekappaleiden päät voidaan tasata kolmella tapaa. Tasausmenetelmiä ovat hionta, pinnoitus ja hiekkalaatikkomenetelmä (SFS-EN 12390-3). Tutkimuksessa vertailtiin kahta edellä mainittua ja pinnoitteena tasoituksessa käytettiin rikkisulfaattiseosta. Testisarjoina olivat standardin mukaan valmistettu referenssisarja ja sarja, jossa poikkeamina olivat täyttämisen yhdessä kerroksessa ja ylitiivistys.

Hionta koekappaleille suoritettiin standardin SFS-EN 12390-3 liitteen A mukaan. Hionnan jälkeen kappaleesta tarkistettiin tasomaisuus, jolla todetaan kuormituksen jakautuvan tasaisesti kappaleen testauspinnalle. Myös kappaleen suorakulmaisuus tarkistettiin. Jos kappale ei ole suorakulmainen, rasisitus ei tule aksiaalisesti. Standardin mukaan kappaletta ei tulisi testata, jos suorakulmaisuus ei ole mittatoleranssin rajoissa. Tutkimuksen hiomalla tasatut koekappaleet olivat suorakulmaisia.

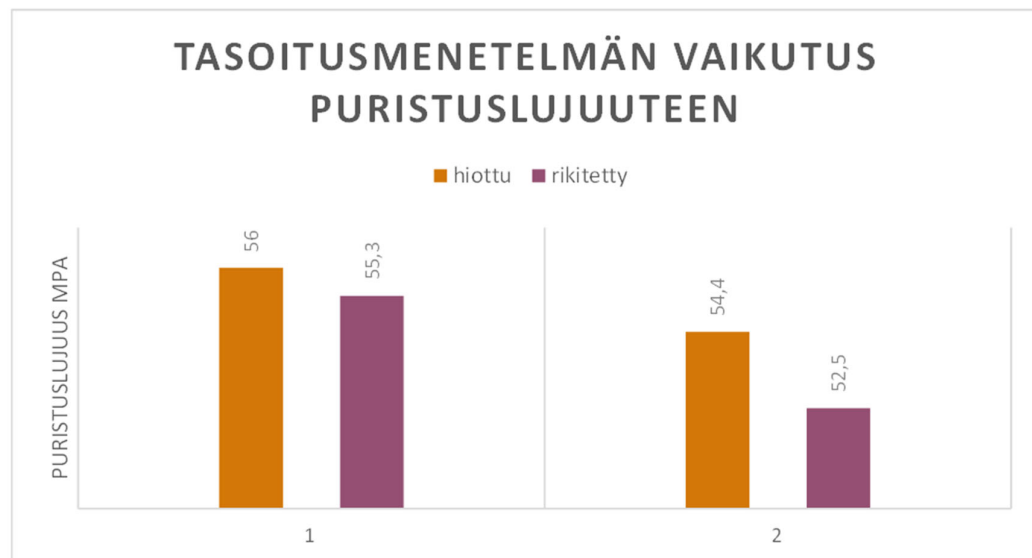
Tasoittaminen rikittämällä suoritettiin standardin SFS-EN 12390-3 liitteen A mukaan. Sulaa rikkiseosta kaadettiin tasomaiselle pinnalle ja kappaleen pää painettiin seokseen. Seoksen kovetettua tuloksena oli tasomainen pinta. Suorakulmaisuutta on haastavampaa saada toteutumaan rikittämällä, kuin hiomalla. Testatut koekappaleet eivät olleet suorakulmaisia rikityksen jälkeen. Rikitettyt kappaleet pärjäsivät testauksessa hiottuja heikommin.

Puristuslevyjen ja koekappaleen pinnan välinen kitka vaikuttaa madaltavasti kappaleen vaakasuuntaisiin muodonmuutoksiin (Husso 2019, 33). Materiaaliparien betoni-teräs ja rikkisulfaatti-teräs kitkakertoimet eivät ole toisiaan vastaavat. Edellä mainitulla on oletettavasti suurempi kitkakerroin, jolloin kitkan edullinen vaikutus puristuslujuuteen on suurempi (Husso 2019, 186). Tämä selittää myös osaltaan heikompia puristuslujuustuloksia pinnoitetuilla koekappaleilla. Standardin mukaan ristiriitatilanteissa hiontaa tulee pitää vertailumenetelmänä (SFS-EN 12390-3:2019, A.1).

Tutkimuksessa hiomalla tasattujen referenssikappaleiden puristuslujuudet sijoittuivat välille 54,6... 57,1 MPa, keskihajonnan ollessa 1,1 MPa. Testisarjan keskimääräinen puristuslujuus oli 56,0 MPa. Poikkeamia

sisältävän testisarjan puristustulokset olivat vaihteluvälillä 52,0...57,6 MPa, keskiarvon ollessa 54,9 MPa. Keskihajonta sarjan kappaleiden välillä oli 2,4 MPa. Kaikissa testisarjoissa oli neljä koekappaletta.

Rikittämällä pinnoitettujen testikappaleiden referenssarjan lujuudet olivat selkeästi hiomalla tasattuja heikompia sijoittuen välille 52,8...55,5 MPa. Hajontaa sarjan sisällä oli keskimäärin 1,2 MPa. Keskilujuus näillä kappaleilla oli 54,4 MPa. Sama tilanne oli havaittavissa myös virhesimulaatiosarjalla. Sarjan puristuslujuudet sijoituivat välille 50,5...55,6 MPa, keskihajonnan ollessa 2,2 MPa. Keskilujuus sarjalla oli 52,5 MPa (Kuva 6).



Kuva 6. Tasoitusmenetelmän vaikutus puristuslujuuteen

Tämän otannan perusteella täysin standardin mukaan valmistettujen kappaleiden pinnoitusmenetelmällä oli vaikutus puristuslujuuteen. Puristuslujuus oli 3 % heikempi rikittämällä tasatuissa koekappaleissa. Poikkeamia sisältävien sarjojen ero oli 5 % hionnan hyväksi.

Standardin mukaan rikitystä ei pitäisi käyttää tasoitusmenetelmänä, jos kappaleen oletettu lujuusmittaustulos ylittää 50 MPa (SFS-EN 12390-3). Tutkimuksessa käytetty betoni oli lujuusluokaltaan C35/45, jolloin ei ollut syytä olettaa puristuslujuuden ylittävän standardin asettamaa rajaa. Pinnoite pysyi kappaleiden pinnassa, kuten sen pitääkin. Pinnoitus oli siis tasoitusmenetelmänä sopiva, vaikka puristuslujuustulokset ylittivätkin 50 megapascalin ylärajan.

#### 4.1.5 Säilytysolosuhteet ennen muotin purkua

Olosuhteilla betonin kovettumisen aikana on suuri vaikutus betonin lopulliseen lujuuteen. Tuoretta betonia tulee suojata liian suurelta ympäristön lämpötilaerolta. Se voi aiheuttaa halkeilua, joka vaikuttaa lujuuteen ja välillisesti pakkasenkestävyyteen – halkeamiin voi päästä vettä, jolle ei ole rakenteessa tilaa laajentua jäätyessään. Ongelma korostuu etenkin viileässä ympäristössä. Betonin ja sen ympäristön välinen lämpötilaero tulisi pitää alle +20 °C:ssa. (Betonin valinta rakenteisiin – olosuhdehallinta s.a.)

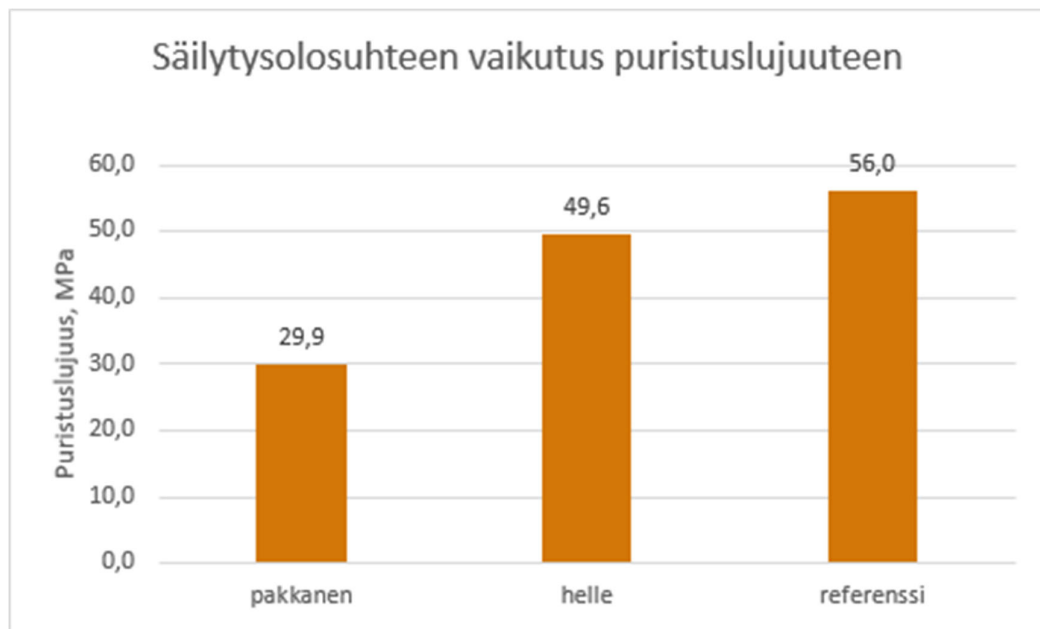
Hydrataatioreaktiossa vapautuu lämpöä, eli betonissa tapahtuu eksoterminen reaktio. Lämpötilan noustessa betonimassa laajenee. Hydrataation alkuvaiheessa betoni on vielä niin plastista, ettei laajeneminen aiheuta suuria jännityksiä. Betonin alkaessa jäähtyä se on jo sen verran lujittunutta, että muodonmuutokset aiheuttavat vetojännityksiä. Koska betoni on kuitenkin vielä heikkoa tässä vaiheessa, se ei kestä syntynyttä vetoa, vaan halkeaa. (Betonin valinta rakenteisiin – olosuhdehallinta s.a.) Lämpötilan noustessa tuoreessa massassa +70 °C:een, lujuuskato on 30-70 % (Paukku 2016, 98.) Lujuuden heikkenemistä oli havaittavissa myös tutkimuksen kappaleissa. Lämpötilan kehitystä koekappaleen sisällä ei seurattu, mutta säilytykseen käytetty uuni oli +30 °C säilytyksen ajan.

Tutkimuksessa simuloidut olosuhteet vastasivat Suomen kesä- ja talviolosuhteita. Koekappaleita voi mahdollisesti jäädä valun päätyttyä ulos pakkaseen, tai ne siirretään työmaakonttiin, jossa ei ole lämmitystä. Kesäisin muotin säilytysolosuhde ei välttämättä johdu edes epähuomiosta, vaan muotille ei vain ole huoneenlämpöistä säilytyspaikkaa. Koekappaleet ovat työmaalla tai tehtaalla muoteissa ensimmäiset 16-72 tuntia valun päätyttyä ja lämpötilan tuolla ajanjaksolla tulisi olla +20 ± 5 °C (SFS-EN 12390-2, 6.5.1). Tutkimuksen olosuhdesäilytys kesti 48 tuntia. Muita poikkeamia ei olosuhdekappaleisiin simuloitu.

Lämpötilasimulaatioissa lujuudenkehityksen alkuvaiheessa olleet kappaleet olivat poikkeavassa olosuhdesäilytyksessä ensimmäiset kaksi vuorokautta valun päätyttyä. Uunin lämpötila oli +30 °C ja pakastimen -11 °C.

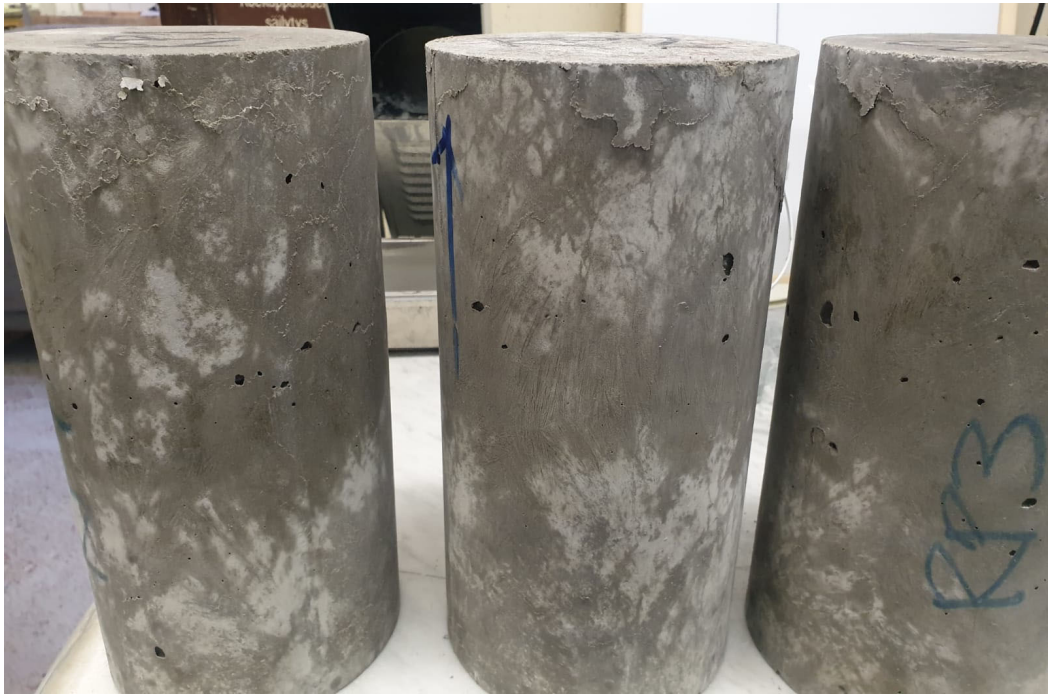
Koekappaleet purettiin muoteista kolmen vuorokauden ikäisenä. Kolmannen vuorokauden ne olivat normaalissa säilytyksessä n. +20 °C:ssa, jonka jälkeen ne siirrettiin vesisäilytykseen.

Puristuslujuustulokset olivat ennakoitavissa aiemman tiedon perusteella. Pakkasessa säilytetyt kappaleet eivät kehittäneet lujuutta riittävästi päästäkseen tavoitelujuuteen, ja uunissa säilytetyt pääsivät tavoitelujuuteen, mutta eivät yltäneet samoihin tuloksiin referenssikappaleiden kanssa (Kuva 7).



Kuva 7. Säilytysolosuhteiden vaikutus puristuslujuuteen

Puristuslujuuden vaihteluväli pakkasessa säilytetyillä kappaleilla oli 21,4...35 MPa. Kappaleet olivat ulkonäkönsä osalta poikkeavia, sillä ne olivat väritykseltään epätasaisia (Kuva 8). Ne murtuivat muista koekappaleista poiketen pinnastaan, etenkin kappaleen yläpinnasta. Muihin kappaleisiin ei tullut merkittäviä ulkoisia vaurioita. Keskilujuus pakkaselle altistuneilla kappaleilla oli 29,9 MPa.



Kuva 8. Pakkasen vaurioittamat koekappaleet.

Uunissa säilytetyt kappaleet olivat keskilujuudeltaan 49,5 MPa, mikä on noin 88,5 % referenssarjan lujuudesta. Pientä lujuuskatoa on havaittavissa. Mikään sarjan kappaleista ei yltänyt lujuudeltaan samalle tasolle edes heikoimman referenssikappaleen kanssa.

#### 4.1.6 Koekappaleen muoto

Lieriönmallisten koekappaleiden puristuslujuus muunnetaan Suomessa 150 mm:n kuutiolujuudeksi. Näin ollen lujuutta pystytään arvioimaan standardin SFS 7022 mukaisesti. Lujuusluokkaa ilmoitettaessa ensimmäinen luku tarkoittaa standardilieriön puristuslujuutta ja jälkimmäinen 150 mm:n kuution puristuslujuutta megapascalina. Tavoitelujuus siis riippuu koekappaleen muodosta: esimerkiksi lujuusluokan ollessa C35/45, 150×300 mm:n lieriö saavuttaa tavoiteluujuden ollessaan 35 MPa. Kuutionmallisen koekappaleen tavoitelujuus samalla betonilla on 45 MPa.

Betonin lujuuden ja kappaleen muodon ja koon suhteelle on kehitetty kaava (Neville 1995). Sillä voidaan verrata lieriönmallisen koekappaleen lujuutta 150 mm kuution lujuuteen. Muodon ja koon suhde lasketaan kaavalla

$$\frac{f_i}{f_{cube:150}} = 0,56 + 0,697 / \left( \frac{V}{150 \cdot L \cdot D} + \frac{L}{D} \right) \quad (2)$$

jossa

- V on betoninäytteen tilavuus [dm<sup>3</sup>]
- L on betoninäytteen pituus [mm]
- D on betoninäytteen pienin sivumitta tai halkaisija [mm]

Kaavan perusteella on määritetty standardissa SFS 7022 esitetyt muunnoskertoimet lieriölujuuksista kuutiolujuuksiin (Taulukko 2).

Taulukko 2. 150×300 mm lieriön lujuuden muuntaminen kuutiolujuutta vastaavaksi lujuudeksi (mukaillen SFS 7022;2019)

Lieriöllä määritetty lujuus (Mpa)	Vastaava kuutiolujuus saman lujuusalueen alarajalla (Mpa)	Alarajan ylittävän lujuustuloksen muunnoskerroin
12-20	15	1,25
20-25	25	1,00
25-30	30	1,40
30-35	37	1,60
35-50	45	1,00
50-55	60	1,40
55-60	67	1,60
60-90	75	1,00

Standardilieriön 150×300 mm koetulokset muunnetaan 150 mm kuutiolujuutta vastaaviksi tuloksiksi taulukon 1 mukaisesti ja väliarvot määritetään interpoloimalla suoraviivaisesti. Tulokset ilmoitetaan yhden desimaalin tarkkuudella. (SFS 7022, 5.5.1.2.)

Lieriön muunnettu kuutiolujuus on todellista kuutiolujuutta hieman korkeampi. Tutkimuksen koekappaleissa ero oli n. 9...12 %. Kappaleen muodon vaikutusta tutkittiin sekä referenssisarjoilla, että sarjoilla, jotka olivat täytetty yhdessä kerroksessa ja ylitiivistettyjä. Taulukoissa 3 ja 4 on esitetty kappaleiden murtokuormat, ominaislujuudet ja kuutiolujuudet.



Taulukko 3. Referenssitestisarjojen murtokuormat, ominaislujuudet ja kuutiolujuudet.

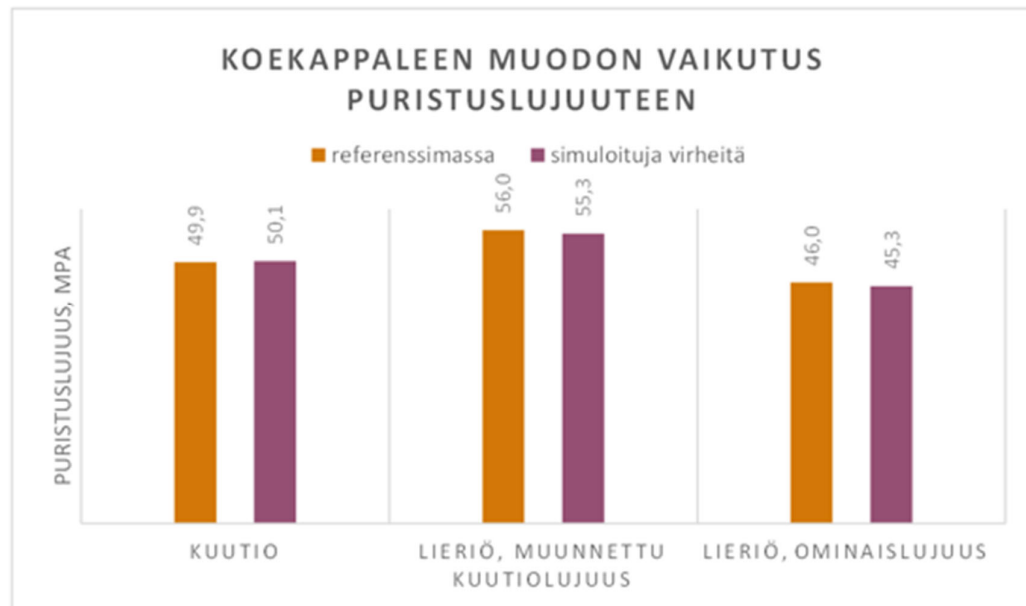
	murtokuorma [kN]	ominaislujuus [MPa]	kuutiolujuus [MPa]
kuutio 1	1101	48,5	48,5
kuutio 2	1142	50,3	50,3
kuutio 3	1108	49	49
kuutio 4	1164	51,6	51,6
lieriö 1	833	47,1	57,1
lieriö 2	814	45,8	55,8
lieriö 3	790	44,6	54,6
lieriö 4	821	46,6	56,6

Taulukko 4. Poikkeamatestisarjojen murtokuormat, ominaislujuudet ja kuutiolujuudet.

	murtokuorma [kN]	ominaislujuus [MPa]	kuutiolujuus [MPa]
kuutio 1	1168	50,9	50,9
kuutio 2	1179	50,9	50,9
kuutio 3	1165	50,9	50,9
kuutio 4	1138	50	50
lieriö 1	839	47,6	57,6
lieriö 2	808	45,8	55,8
lieriö 3	807	45,8	55,8
lieriö 4	741	42	52

Lieriöiden pienemmät murtokuormat selittyvät pinta-alalla. Lieriön keskimääräinen pinta-ala on 17 700 mm<sup>2</sup> ja kuution 22 500 mm<sup>2</sup>. Koska lieriön pinta-ala on pienempi, se kykenee ottamaan vastaan vähemmän voimaa murtumatta. Lieriö on myös muotona kuutiota heikompi ollessaan mitoiltaan 2:1 (L/D). Kun pituuden ja halkaisijan suhde on 2,0 tai enemmän, kitkavaikutus kappaleen ja puristuslujuuden testauslaitteen kuormituslevyjen välillä ei ole merkittävä (Husso 2019, 178). Kitkavaikutus on edullisempi suhteen ollessa 1,0, kuten kuutioissa on.

Tutkimuksen lieriöiden pinta-alalle jakautui voimaa keskimäärin 45,5 NN/mm<sup>2</sup> ja kuutioille 50,9 NN/mm<sup>2</sup> ennen kappaleen murtumista. Todellisuudessa kuutionmallinen koekappale kestää siis puristusta standardilieriötä enemmän, mutta muunnetun kuutiolujuuden ansiosta lieriöt pärjäävät testauksessa verrokkejaan paremmin (Kuva 9).



Kuva 9. Koekappaleen muodon vaikutus puristuslujuuteen.

## 4.2 PAKKASENKESTÄVYYS

Kovettuneesta betonista voidaan arvioida pakkasenkestävyyttä joko suoralla pakkaskokeella tai huokosjakoanalyysillä. Pakkasenkestävyyden määrittäminen on tärkeää rakenteissa, jotka altistuvat jäätymiselle ja sulamiselle. Etenkin infrapuolen rakenteissa betonin tulee kestää myös klorideja jäätyessään. Rasitusluokat XF1 ja XF3 ovat suunniteltu kestäämään pelkkää veden jäätymistä, ja luokat XF2 ja XF4 jäätymistä ympäristössä, jossa on suolarasitusta.

Huokosanalyysillä selvitetään kovettuneesta betonista kokonaisilmamäärän lisäksi mm. suojahuokosten laatu, ja näin ollen epäsuorasti betonin pakkasenkestävyys. Pakkasen kestävyys kannalta on olennaista, että suojahuokokset ovat riittävän lähellä toisiaan, jolloin jäätyessään laajentuvalla vedellä ja nestemäisenä olevan veden aiheuttamalle hydrauliselle paineelle on tilaa. Vesi kulkee betonissa kapillaarihuokosia pitkin suojahuokosiin. Jos suojahuokosia ei ole tarpeeksi, jäätyvä vesi saa aikaan hydraulista painetta nesteenä olevan veden vaikutuksesta (Yang 2019, 3). Tämä paine kapillaarihuokosissa voi aiheuttaa betonin halkeilua ja rapautumista. Huokosjakoa pidetään olennaisimpana parametrina pakkasenkestävyyttä määritettäessä. Huokosjako ilmoitetaan millimetreinä, ja enimmäisarvo määräytyy koekappaleen rasitusluokan ja suunnitellun käyttöikänsä mukaan.

Enimmäisarvot sijoittuvat vaihteluvälille 0,22...0,27 mm (SFS 7022, 18). Huokosjaon perusteella ei voi arvostella rasitusluokkien XF2 ja XF4 pakkasenkestävyyttä, vaan ne pitää arvostella laattakokeen perusteella.

Suoralla pakkaskokeella, eli laattakokeella, voidaan selvittää kahden tyyppistä heikentymistä betonissa: pintarapaumaa ja sisäistä vauriota. Testikappaleen ollessa luokkaa XF1 tai XF3, punnitaan pintarapautumana irronnut materiaali sekä mitataan ultraäänilaitteella sisäinen vaurio. Luokissa XF2 ja XF4 sisäistä vauriota ei mitata.

#### 4.2.1 Huokosanalyysi

Huokosanalyysissa analysoidaan kovettuneen betonin huokosrakenne. Pakkaskestävyyden kannalta erityisen kiinnostavana parametrinä pidetään huokosjakoa. Powers (1949) on kehittänyt kaavan, jolla pystyy määrittämään betonista huokosjaon. Hänen mukaansa betoni tarvitsee riittävän pitoisuuden huokosia ollakseen immuuni pakkasen aiheuttamalle rasitukselle (Hasholt 2014, Powersin 1975 mukaan). Suojahuokosten tulee olla riittävän lähellä toisiaan, jolloin mistä tahansa betonimassan pisteestä on riittävän lyhyt matka lähimpään huokoseen, jossa jäätyvälle vedelle on tilaa laajeta. Tämä on yleisesti hyväksytty toteamus, mutta edelleen on haaste määrittää riittävä pitoisuus ilmamäärälle. (Hasholt 2014.)

Huokosjako  $L$  lasketaan seuraavaan kaavan mukaan (Powers 1949):

$$L = \begin{cases} \frac{p}{A} \cdot \frac{1}{\alpha} & \text{,jos } \frac{p}{A} < 4,342 \\ \frac{3}{\alpha} [1,4(\frac{p}{A} + 1)^{1/3} - 1] & \text{,jos } \frac{p}{A} > 4,342 \end{cases} \quad (3)$$

jossa

- $L$  on huokosjako [mm]
- $p$  on sementtipastan määrä [%]
- $A$  on kokonaisilmamäärä [%]
- $\alpha$  on ominaispinta-ala [mm<sup>-1</sup>]

Hasholt (2014) haastaa Powersin teorian huokosjaon absoluuttisuudesta pakkasenkestävyyden määrittämisessä. Hänen mukaansa huokosjakoa olennaisempi parametri on huokosten vaipan pinta-ala. Hasholt (2014, 4) myöntää, että huokosjako useissa tapauksissa antaa oikeansuuntaisia tuloksia pakkasenkestävyyttä määritettäessä, vaikka sille ei ole vankkaa teoreettista perustaa.

Huokosten vaipan pinta-ala [ $\text{mm}^2/\text{mm}^3$ ] on parametri huokosanalyysissä, mutta sitä harvemmin rekisteröidään (Hasholt 2014, 5). Muunnettu pistelaskumenetelmä ei anna parametrille arvoa valmiiksi, mutta sen arvonn saa huokosten ominaispinta-alan ja kokonaisilmamäärän tulosta.

Hasholtin mukaan (2014) todennäköisyys kapillaarihuokosen liittymiselle suojuhuokoseen riippuu enemmän systeemin huokosten vaipan pinta-alasta, kuin huokosjaosta. Hän referoi omassa tutkimuksessaan julkaisua, jossa on todettu, ettei huokosjaon ja pintarapauman välinen yhteys ole johdonmukainen (Hasholt 2014, Mielenzin ym. 1958b, 507-517 mukaan).

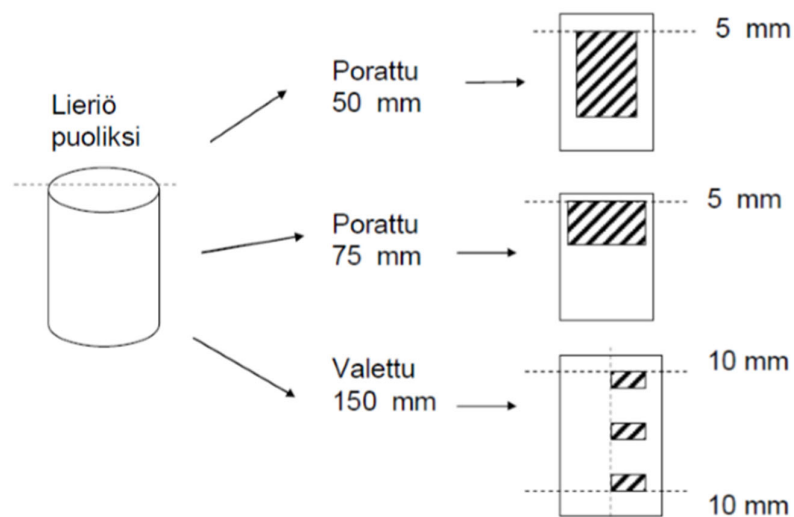
Valmistin tutkimustani varten huokosanalyysipreparaatit seitsemästä eri virhesimulaatiosta. Pinnan hierron vertailua ei huokosanalyysiin otettu tutkittavaksi, sillä preparaattia ei oteta koekappaleen pinnasta. Pinnan hierron ei oleteta vaikuttavan näytteenottokohtaan asti. Tein huokosanalyysin VTT-TEST-R003-00-2010 -ohjeen mukaisesti sekä ohutkie- että pintahiemenetelmänä. Pintahiiden mikroskooppikuvat ovat opinnäytetyön liitteenä 1. Tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään huokosanalyysia määritettäessä, ja menetelmien vertailu ei tuota tutkimuksellista tulosta. Analysoin näytteet optisesti, jolloin analysoiminen kahteen kertaan heikentää inhimillisen virheen mahdollisuutta.

Huokosanalyysillä määritetään kovettuneesta betonista laskennallinen kokonaisilmamäärä, suojuhuokosten ilmamäärä ja ominaispinta-ala, tiivistyshuokosten ilmamäärä sekä huokosjako. Pakkaskestävyyden kannalta keskeisimpänä parametrina analyysissä pidetään viimeksi mainittua. Huokosjako ilmaisee suurimman etäisyyden sementtipastan mistä tahansa pisteestä lähimpään suojuhuokosen pintaan (VTT Expert

Services Oy 2011, 4). Suojahuokoseksi luokitellaan ilmahuokonen, jonka halkaisija on 0,02–0,80 mm. Tätä suuremmat huokokset ovat tiivistyshuokosia.

Jos tiivistysaika on liian pitkä, huokosjako kasvaa (Yang 2012, Shangin 2010, mukaan). Tämä johtuu siitä, että pitkä tiivistysaika saa pienet ilmahuokokset sulautumaan yhteen muodostaen suurempia huokosia. Suurilla huokosilla on taipumusta nousta pintaan, sillä niiden tiheys on huomattavasti ympäröivää betonimassaa pienempi. (Yang 2012.) Tämä oli havaittavissa tutkimuksen hieissä. Ylitiivistetyissä kappaleissa huokosjako oli korkeampi ja tiivistyshuokosten osuus pienempi. Kaikki huokosjakotulokset kuitenkin pysyivät enimmäisarvon alapuolella. Rasitusluokan XF4 pakkasenkestävyyttä ei määritetä huokosjaon perusteella, vaan pelkän suoran pakkaskokeen tulosten perusteella (SFS 7022:2019, 18). Aiemmassa standardiversiossa myös huokosjaon perusteella pystyi todentamaan pakkasenkestävyyden kyseiselle rasitusluokalle, jolloin huokosjaon yläraja oli 0,30 mm.

Huokosanalyysi tehdään ohuthieestä tai pintahieestä. Analyysia varten valmistetaan preparaatti, jonka pinta-ala on vähintään 3000 mm<sup>2</sup> ja joka on valmistettu vähintään kahdesta hieestä. Hieet valmistetaan 5-35 mm kappaleen ylä- ja alapinnasta kohtisuorassa olevana leikkeenä (Kuva 10). Yhden hieen koko on vähintään 30 × 50 mm<sup>2</sup>.



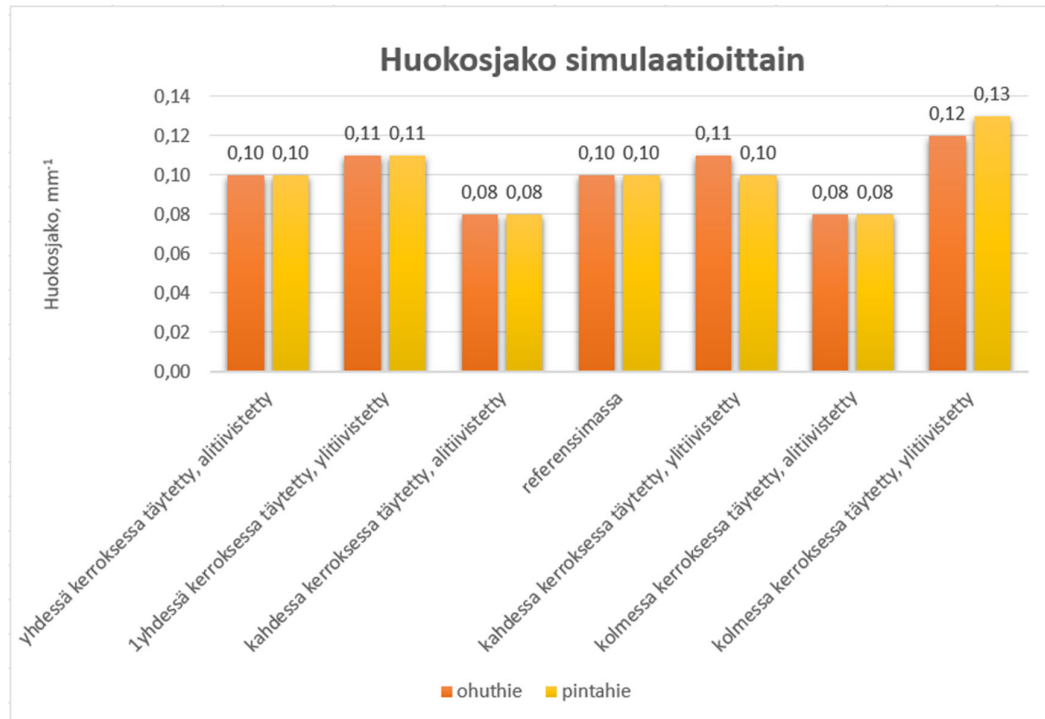
Kuva 10. Ilmahuokosparametrinäytteenoton periaatteet koekappaletyypeittäin. (VTT Expert Services Oy 2011, 6.)

Analyysi tehdään muunnettua pistelaskumenetelmää käyttäen. Menetelmä on esitetty standardeissa NT BUILD 381 ja ASTM C 457. Menetelmässä analyysipisteiden lukumäärän tulee olla vähintään 1500 kappaletta preparaattia kohden. Analyysipisteet ovat toisistaan 1-1,5 mm etäisyydellä ja analyysiviivan vähimmäispituus on 2300 mm. Analyysipisteen pysähdyspaikka rekisteröidään ja se voi olla kiviaines, sementtipasta tai huokonen. Lisäksi rekisteröidään kaikki analyysiviivaa leikkaavat huokokset. Mikroskoopin suurenoksen tulee olla 100-kertainen. (VTT-TEST R003-00-2010.)

Tutkimuksen hieet tutkittiin VTT:n menetelmäohjeen mukaisesti. Analyysipisteiden välimatka oli 1,09 mm ja analyysiviivan pituus oli 2320 mm. Hieet olivat kooltaan  $40 \times 70 \text{ mm}^2$ . Näytteet valmistettiin kaikista tutkittavista koekappaleista sekä ohut- että pintahieenä.

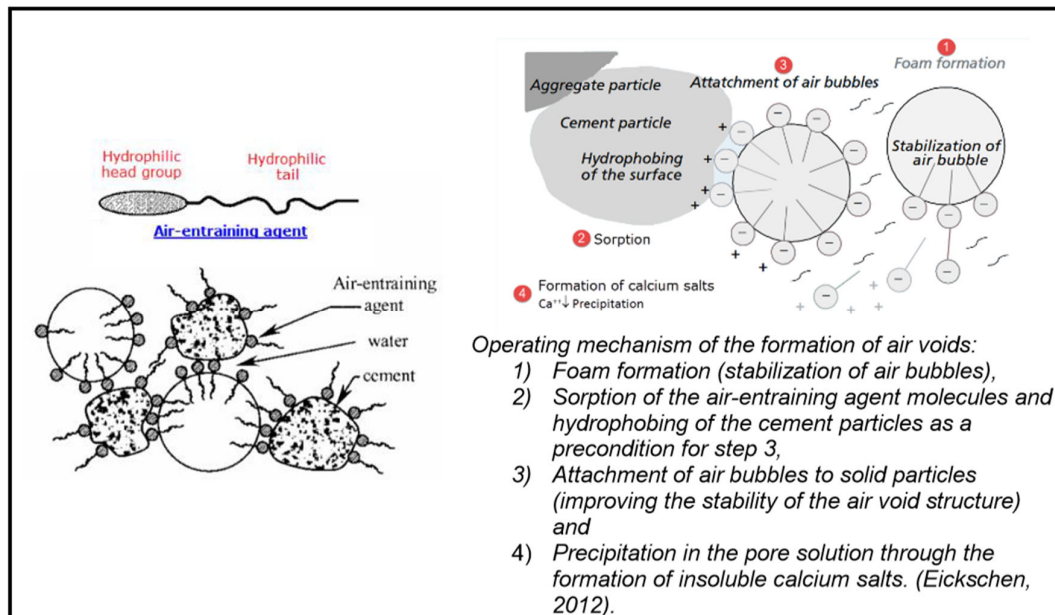
Huokosanalyysit tutkimistani kappaleista olivat säännönmukaisia. Niistä pystyi osoittamaan tiivistystavan vaikutuksen huokosrakenteeseen. Suurin vaikutus oli tiivistyksen kestolla. Se vaikutti sekä huokosrakenteeseen, että betonin homogeenisyyteen. Ylitiivistetyissä kappaleissa kivet olivat painuneet kappaleen pohjalle, jolloin sementtipastaa oli verraten vähemmän. Tiivistyskerrosten vaikutus oli pieni huokosrakenteeseen.

Huokosjako oli kaikissa tutkimuksen preparaateissa melko alhainen. Edes ylitiivistetyissä kappaleissa huokosjako ei kohonnut. Se oli korkeimmillaan vain 0,13 mm kolmessa kerroksessa täytetyssä, ylitiivistetyssä kappaleessa. Huokosjako vaihteli välillä 0,08...0,13 mm tiivistystavasta riippuen (kuva 11). Pienin huokosjako oli alitiivistetyissä kappaleissa, jotka oli täytetty kahdessa ja kolmessa kerroksessa.



Kuva 11. Huokosjako ohut- ja pintahiemenetelmillä määritettynä poikkeamasimulaatioittain.

Ominaispinta-ala kasvoi tiivistyksen keston kasvaessa. Tämä johtuu huokostimen toimintaperiaatteesta (Kuva 12). Huokostimen käyttäminen auttaa ilman muodostumisessa ja vakauttaa huokosia vähentämällä veden pintaenergiaa. Suurin osa huokostimista on pinta-aktiivisia aineita, jotka koostuvat pitkistä orgaanisista molekyyliketjuista, joilla on hydrofiilinen häntä ja hydrofobinen pää. Nämä molekyylit keskittyvät sementtipastan ja huokosen rajapintaan muodostaen huokosen ympärille elastisen kalvon. (Al-Neshawy & Punkki 2017, Xiaon 2010 mukaan.)



Kuva 12. Huokostimen toimintaperiaate sementtipastassa.

Ilman huokostiinta ilmakuplat pyrkisivät sulautumaan yhteen muodostaen suurempia huokosia (Al-Neshawy & Punkki 2017, Xiaon 2010 mukaan). Huokostamisen ansiosta huokokset pysyvät stabiileina. Mekaaninen täytytys voi hajottaa huokosia. Huokosessa ollut ilma jakautuu useampaan huokoseen, jolloin ominaispinta-ala kasvaa.

Kokonaisilmamäärän vaihtelu preparaattien välillä oli suurta. Alitiivistetyissä kappaleissa kokonaisilmamäärä näytti nousevan täyttökerrosten lukumäärän noustessa. Ominaispinta-ala oli lähes sama täyttökerroksista huolimatta, mutta huokosjako oli pienempi korkeamman ilmapitoisuuden sisältävissä preparaateissa. Tiivistyshuokokset olivat siis samankokoisia kaikissa alitiivistetyissä kappaleissa, mutta niitä muodostui enemmän täyttökerrosten lisääntyessä. Ylitiivistetyissä kappaleissa ei vastaavaa ollut havaittavissa.

Muunnetulla pistelaskumenetelmällä ei kokonaisilman osuus ole erityisen luotettava, jos näytteessä on suuria tiivistyshuokosia. Tiivistyshuokonen rekisteröidään vain, jos se sattuu osumaan analyysipisteen pysähdyspaikalle. Näin ollen ilmaa saattaa olla todellisuudessa huomattavasti paljon enemmän. Analyysipisteelle osuneen tiivistyshuokosilman osuus oli tutkimuksen heiissä



noin yhden prosentin suuruusluokkaa. Tutkimuksen eniten ilmaa sisältävässä kappaleessa se oli lähes kolme prosenttia. (Taulukko 5.)

Taulukko 5. Huokosanalyysin parametrit tutkimuksen kappaleista.

	huokosjako [mm]	ominaispinta-ala [mm <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> ]	suojahuokosten ilmamäärä [%]	kokonais- ilmamäärä [%]	tiivistyshuokosten ilmamäärä [%]	menetelmä
yhdessä kerroksessa	0,10	35	8,4	9,6	1,2	ohuthie
täytetty, alitiivistetty	0,10	32,4	8,5	10,2	1,7	pintahie
yhdessä kerroksessa	0,11	45,7	5,4	6,5	1,1	ohuthie
täytetty, ylitiivistetty	0,11	43,8	5,2	6,6	1,4	pintahie
kahdessa kerroksessa	0,08	41,9	10,2	10,8	0,6	ohuthie
täytetty, alitiivistetty	0,08	37,7	10,2	11,8	1,6	pintahie
referenssimassa	0,10	58,8	3,6	4,2	0,6	ohuthie
	0,10	63	3,7	4,6	0,9	pintahie
kahdessa kerroksessa	0,11	74,5	2,3	2,6	0,3	ohuthie
täytetty, ylitiivistetty	0,10	67,9	2,3	2,7	0,4	pintahie
kolmessa kerroksessa	0,08	38,8	8,9	11,6	2,7	ohuthie
täytetty, alitiivistetty	0,08	44,3	8,7	11,7	3,0	pintahie
kolmessa kerroksessa	0,12	58,1	2,1	2,8	0,7	ohuthie
täytetty, ylitiivistetty	0,13	50,5	3,2	3,3	0,1	pintahie

#### 4.2.2 Laattakoe

Opinnäytetyössä tutkittiin yleisesti infrapuolella käytettyä massaa, jonka rasiusluokka on XF4. Näin ollen laattakokeet tehtiin standardin CEN/TS 12390-9 menetelmäohjeen mukaan käyttäen väliaineena suolaa. Suolaliuos oli kolme prosentista natriumkloridiliuosta.

Laattakoetestisarja sisältää neljä tutkittavasta betonista valmistettua koekappaletta. Kappaleiden reunat vuorataan kumibitumikermillä, ja vuorauksen tiiviiden testaamisen jälkeen niille laitetaan väliaine testipinnalle. Kappaleet asetetaan testikaappiin, jonka lämpötila vaihtelee sykleittäin välillä +24 °C...-22 °C. Yhden syklin kesto on 24 tuntia ja koko testin kesto on 56 sykliä. Sykliä 7 ± 1, 14 ± 1, 28 ± 1, 42 ± 1 ja 56 ± 1 jälkeen kappaleet nostetaan kaapista testattavaksi. Niiden testipinnasta rapsutetaan irronnut materiaali, joka kuivataan +105 ± 5 asteisessa uunissa ja punnitaan. Testin päätyttyä pintarapautumat ilmoitetaan kumulatiivisena ja pyöristetään lähimpään 0,1 grammaan.

Kumulatiivinen pintarapautuma lasketaan kaavasta:

$$m_{s,n} = m_{s,before} + m_{c+f+b} \quad (4)$$

jossa

- $m_{s,n}$  on kumulatiivinen pintarapautuman kokonaispaino [g]
- $m_{s,before}$  on rapautuman massa aiemmalta mittauskerralta [g]
- $m_{c+f+b}$  on rapautuman kokonaispaino viimeisimmältä mittauskerralta [g]

Tutkimusta varten valmistettiin kaksi vertailusarjaa. Toinen valmistettiin ja säilytettiin testiin asti täysin standardien mukaan, toiseen simuloitiin valun aikana tapahtuvia poikkeamia. Poikkeamia sisältäväksi testisarjaksi valittiin koekappaleita, jotka olivat yhdessä kerroksessa täytettyjä ja ylitiivistettyjä.

Laattakoetta varten sahattiin standardilieriöistä neljä 50 mm paksua testikappaletta kumpaakin testisarjaa varten. Testikappaleet säilytettiin standardin mukaisesti olosuhdekaapissa, jossa oli  $20 \pm 2$  °C ja suhteellinen kosteus oli  $65 \pm 5$  %. Kappaleet vuorattiin bitumikermillä niiden ollessa 25 vuorokauden ikäisiä. Kappaleille tehtiin vesitesti, jolla testattiin vuorauksen tiiveys. Testaukset, eli rapsutukset, tehtiin standardissa annettujen testaus syklien jälkeen.

Molempien testisarjojen tulokset olivat pintarapautuman osalta standardissa SFS 7022 määritetyn sallitun viitearvon sisällä (Taulukko 6). Luokan XF4 betonin pintarapautuma saa olla 100 vuoden suunnitellulla käyttöiällä  $250 \text{ kg/m}^2$  ja 50 vuoden  $350 \text{ kg/m}^2$  (SFS 7022, 18). Tutkimuksessa käytetyn betonin suunnittelukäyttöikä oli 50 vuotta. Molempien testisarjojen rapautuma jäi alle 100 grammaan.

Taulukko 6. Kovettuneen betonin pakkasenkestävyyden vaatimukset (SFS 7022).

Suunniteltu käyttöikä (a)	Rasitusluokka	1		2			3	
		Huokosjako VTT TEST R003-00-2010 tai SFS-EN 480-11:2005 mukaan <sup>1)</sup>		Jäädytys-sulatuskoe, SFS 5447 <sup>2)</sup>			Laattakoe CEN/TR 15177 luokissa XF1 ja XF3 <sup>3)</sup> , CEN/TS 12390-9 luokissa XF2 ja XF4 <sup>4)</sup> , jälkimmäisessä väliaine 3 % NaCl-liuos	
		Enimmäisarvo (mm)		Syklien lukumäärä	Taivutus- tai halkaisuveto-lujuuksien suhde (%)	Suhteellinen dynaaminen kimmo-kerroin RDM (%)	Rapauma 56 syklin jälkeen m (g/m <sup>2</sup> )	Suhteellinen dynaaminen kimmo-kerroin RDM 56 syklin jälkeen (%)
w/c > 0,40	w/c ≤ 0,40							
50	XF1	0,27	0,27	100	≥ 67	≥ 75	m <sub>56</sub> ≤ 500	RDM <sub>56</sub> ≥ 67
	XF2	-	-	-	-	-	m <sub>56</sub> ≤ 650	-
	XF3	0,23	0,23	300	≥ 67	≥ 75	m <sub>56</sub> ≤ 200	RDM <sub>56</sub> ≥ 75
	XF4	-	-	-	-	-	m <sub>56</sub> ≤ 350	-
100	XF1	0,25	0,25	300	≥ 67	≥ 75	m <sub>56</sub> ≤ 200	RDM <sub>56</sub> ≥ 75
	XF2	-	-	-	-	-	m <sub>56</sub> ≤ 500	-
	XF3	0,22	0,22	-	-	-	m <sub>56</sub> ≤ 100	RDM <sub>56</sub> ≥ 85
	XF4	-	-	-	-	-	m <sub>56</sub> ≤ 250	-

Standardi CEN/TS 12390-9 ohjeistaa ottamaan testikappaleet kuution mallisista koekappaleista, mutta tässä tutkimuksessa koekappaleet olivat lieriöitä. Menetelmän tulokset perustuvat irronneen materiaalin massan suhteeseen testipinta-alaa kohden, joka on määritetty jokaisesta testipinnasta ennen testin alkua. Tulokset tästä tutkimuksesta ovat siis vertailukelpoisia huolimatta lieriön kuutiota pienemmästä pinta-alasta.

Taulukossa 7 esitetään kumulatiivisesti testisarjojen keskimääräiset pintarapauumat testaussykleittäin. Irronneen materiaalin massa lisätään aiemmillä testauskerroilla irronneen materiaalin massa, jolloin saadaan selville kokonaisrapautuma pinta-alaa kohden testin ajalta. Eniten rapautumista tapahtui testin alussa. Seitsemän jäädytys-sulatussyklin jälkeen pintarapautuma tasaantui, ja se hidastui testin loppua kohden. Poikkeamia sisältävässä testisarjassa materiaalia irtosi 14 viimeisen syklin aikana testikappaleiden pinnasta vain 5 g/m<sup>2</sup>, kun ensimmäisen seitsemän syklin aikana rapautuma oli 25 g/m<sup>2</sup>.

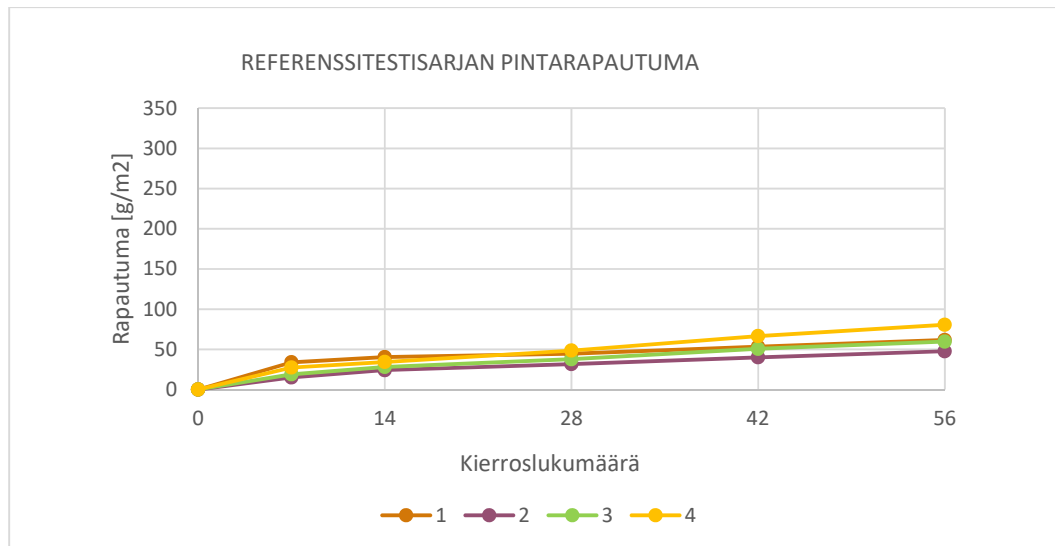
Taulukko 7. Keskimääräiset kumulatiiviset pintarapautumat laattakoetestisarjoissa.

syklien lukumäärä	pintarapautuma [g/m <sup>2</sup> ]	
	referenssitestisarja	poikkeamia sisältävä testisarja
0	0	0
7	24	25
14	32	33
28	41	39
42	53	43
56	62	48

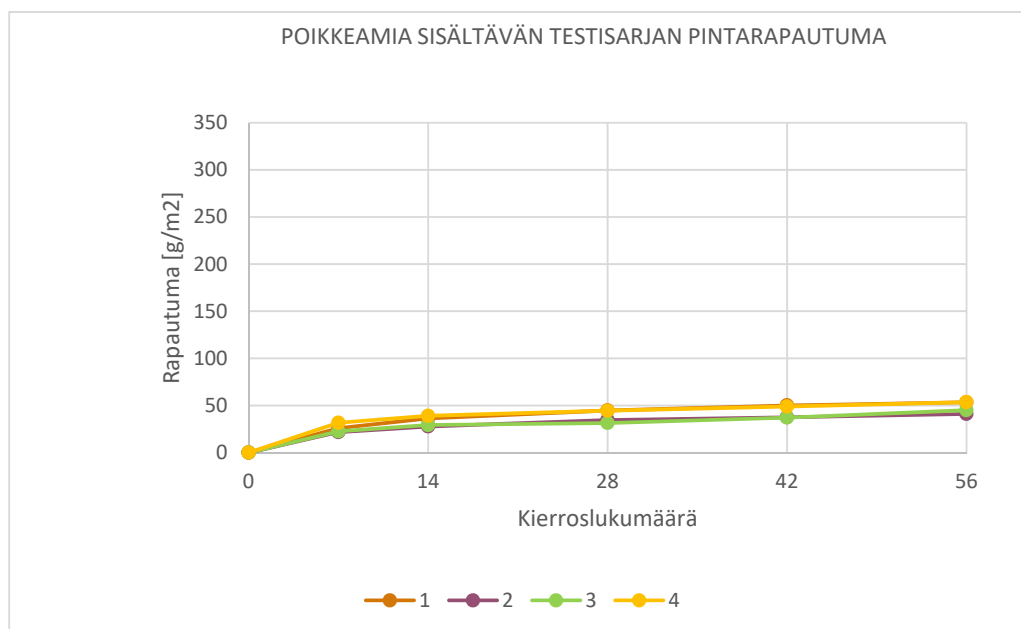
Referenssitestisarjasta irtosi pintamateriaalia 14 g/m<sup>2</sup> enemmän, kuin poikkeamia sisältävästä testisarjasta. Kummassakin testisarjassa pintarapautuma oli vähäistä, eli ne olivat molemmat pakkasenkestäviä. Suoralla pakkasenkestävyyden testillä ei saatu selville mainittavia keskinäisiä eroja. Huokosanalyysistä selvisi molemmissa testisarjoissa olevan pieni huokosjako, jolla on todettu olevan selkeä korrelaatio laattakokeen kanssa (Makkonen ym. 2019, 94).

Tutkimuksen otanta on liian suppea tukemaan Hasholtin (2014) teoriaa huokosen vaipan pinta-alan merkityksellisyydestä. Tämän otannan perusteella näyttää siltä, että teoria voi olla paikkansa pitävä. Huokosten vaipan pinta-ala oli referenssitestisarjassa 264,9 mm<sup>2</sup>/mm<sup>3</sup> ja poikkeamatestisarjassa 293,1 mm<sup>2</sup>/mm<sup>3</sup>. Kapillaarihuokosilla oli enemmän liittymispinta-alaa huokosiin poikkeamasarjassa, kuin referenssarjassa. Tulos saattaa olla pelkkää sattumaa, sillä vertailtavana oli vain kaksi sarjaa. Näin ollen kummallakin sarjalla oli yhtä suuri todennäköisyys olla vähemmän rapautuva. Tässä tutkimuksessa huokosten vaipan pinta-ala oli edukkaampi vähemmän rapautuneessa sarjassa.

Kuten kuvista 13 ja 14 näkyy, pintarapautuma jäi molemmissa testisarjoissa selvästi alle rapautuman enimmäismäärän. Rasitusluokalla XF4 kumulatiivisen pintarapautuman 50 vuoden suunnittelukäyttöiällä tulee olla alle 350 g/m<sup>2</sup>.



Kuva 13. Referenssitestisarjan kumulatiivinen pintarapautuma testikappaleittain.



Kuva 14. Poikkeamia sisältävän testisarjan kumulatiivinen pintarapautuma testikappaleittain.

## 5 YHTEENVETO

Tutkimustulokset vastasivat työn tilaajan tarpeisiin. Työllä pystyttiin osoittamaan koekappaleen ohjeenmukaisen valmistuksen merkitys. Etenkin tiivistystapa on kriittinen betonin lopullisten lujuusominaisuuksien kannalta.

Puristuslujuuden arvoja vertailtaessa voidaan päätellä, että muotti kannattaa täyttää standardin mukaisesti kahdessa tai useamassa kerroksessa.

Tiivistyksen ollessa täydellistä, puristuslujuus korreloi suhteessa

täyttökerrosten määrään. Täyttökerrosten lukumäärän kasvaessa myös puristuslujuus kasvaa. Standardin mukaan tiivistetyt, kolmessa kerroksessa täytetyt koekappaleet olivat tutkimuksen vahvimpia, mutta alitiivistetyt kappaleet olivat heikoimpia.

Yllätyin, kun vertailin yhdessä kerroksessa ja kolmessa kerroksessa täytettyjen kappaleiden lujuuksia. Kolmessa kerroksessa täytetyt ja alitiivistetyt kappaleet olivat heikompia, kuin yhdessä kerroksessa täytetyt, alitiivistetyt koekappaleet. Oletin, että kun täyttökerroksia on enemmän, myös pidempi kokonaistiivistysaika olisi saanut kappaleista lujempia. Vaikka tiivistys ei ulotu ylemmistä täyttökerroksista alempiin, niin sen aiheuttaman värinän voisi uskoa vaikuttavan myös aiemmin tiivistettyihin kerroksiin. Näin ollen ilmaa pitäisi poistua enemmän, minkä johdosta lujuuden tulisi kasvaa.

Puutteellinen tiivistys jättää betoniin suuria tiivistyshuokosia, jotka pienentävät betonin tiiveyttä ja näin ollen heikentävät lujuutta. Runsaasti tiivistyshuokosia sisältävä betoni ottaa heikommin vastaan puristusta kuin betoni, jossa huokossysteemi on tasainen. Suuremmissa huokosissa on pienempi sisäinen paine, kuin pienissä, jolloin ne painuvat kasaan helpommin. Yksi selitys verrokkeja heikommalle lujuudelle voisi olla huokosilman uudelleen järjestäytyminen - pienet suojahuokoset sulautuvat yhteen muodostaen suurempia tiivistyshuokosia. Tämän ei kuitenkaan pitäisi tapahtua, jos betonimassassa on käytetty huokostinta.

Yksi vaikuttava seikka saattoi olla myös kiviaineksen painuminen kappaleen pohjalle. Koekappaleesta hieitä valmistettaessa kappale halkaistaan keskeltä pituussuunnassa. Tässä yhteydessä oli selvästi havaittavissa, että kappale oli epähomogeeninen. Koska kiviä oli huomattavasti paljon enemmän kappaleen toisessa päässä, se ei todennäköisesti kestänyt puristuskuormaa yhtä hyvin, kuin tasalaatuinen kappale. Yhdessä kerroksessa täytetyt kappaleet olivat tasalaatuisempia, ja mahdollisesti sen takia kestävämpiä.

Ylitiivistetyissä kappaleissa puolestaan täyttökerrosten määrällä oli suuri vaikutus. Tämä tukee hypoteesia tiivistyskertojen lukumäärän vaikutuksesta jo tiivistettyihin kerroksiin.

Tutkimuksen kannalta olisi ollut tuottavampaa ottaa erilaiset lähtökohdat sekä massan ominaisuuksien, että tiivistystavan suhteen. Huonoa tiivistystapaa simuloivaksi vertailusarjaksi olisi kannattanut ottaa alitiivistetty testisarja. Alitiivistämisen vaikutus on suurempi puristuslujuuteen, kuin yliitiivistämisen. Tutkittavaksi betoniksi olisi kannattanut valita huokostamaton massa. Huokostetussa betonissa on runsaasti huokosia tiivistystavasta riippumatta. Huokostamattomassa massassa tiivistystavan vaikutus olisi korostunut enemmän ja tutkimustulokset olisivat olleet selkeämpiä. Näin ollen olisi ollut selkeämpi löytää optimaalinen tiivistystapa ottaen huomioon puristuslujuus ja pakkasenkesto.

Koekappaleiden tasoitusmenetelmän vaikutusta puristuslujuuteen on aiemminkin tutkittu. Tutkimusten mukaan hiomalla tasoitetusta kappaleesta saadaan teoreettisesti suurempi puristuslujuustulos kuin rikittämällä tasoitetusta perustuen materiaaliparien kitkakertoimiin. Myös tämä tutkimus tukee teoriaa. Materiaaliparien kitkakertoimien lisäksi uskon omassa työssäni vaikuttavan myös kappaleiden suorakulmaisuuspoikkeaman. Rikittetyt kappaleet eivät olleet suorakulmaisia, jolloin kuormitus ei kohdistunut kappaleisiin täysin aksiaalisesti. On myös tutkimuksia, joissa rikittäminen on ollut edullisempi tasoitusmenetelmä, joten vahvoja johtopäätöksiä ei tästä tutkimuksesta voida vetää.

Laattakokeiden ja huokosanalyysin korrelaatio on selkeä. Huokosjaon ollessa pientä, myös pintarapautuma oli vähäistä. Koska molemmissa testisarjoissa huokosjako oli erittäin pieni, ei sarjoja voi verrata keskenään. Laattakokeessa korostuu massan valinnan merkitys. Huokostamattomalla massalla olisi saatu selkeämpi ero huokosjakoihin, jolloin sitä olisi voinut verrata pintarapautumaan.

Tutkimus kuitenkin herätti mielenkiintoni Hasholtin teoriaa kohtaan, jonka mukaan huokosten vaipan pinta-ala olisi huokosjakoa ratkaisevampi parametri pakkasrapautuman korrelaation kannalta. Tätä teoriaa tämä tutkimus tukee, mutta koska otanta oli suppea, se ei ole luotettava. Koska testisarjoja oli vain kaksi, on 50 %:n todennäköisyys sille, että rapautuma on pienempää kappaleissa, joissa vaipan pinta-ala on suurempi.

Tutkimus osoittaa sen, että betonisten koekappaleiden valamista varten olisi syytä kouluttaa osaavaa henkilöstöä ja siihen tulisi vaatia pätevyys. Jotta koekappaleilla pystyttäisiin todentamaan betonin todelliset ominaisuudet, koekappaleiden valaminen on kriittinen työvaihe. Opinnäytetyötä tehdessä sain selville, että tällainen kurssimuotoinen koulutus olisi suunnitteilla.



## LÄHTEET

Haavisto, J. & Laaksonen, A. 2018. Betonin puristuslujuus. Esiselvitys: Tausta ja määrittäminen koetuloksista. Helsinki: Liikennevirasto. PDF-dokumentti.

Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts\\_2018-32\\_betonin\\_puristuslujuus\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2018-32_betonin_puristuslujuus_web.pdf) [viitattu 11.1.2020].

Hasholt, M. T. 2014. Air void structure and frost resistance: A challenge to Powers' spacing factor. Materials and Structures. WWW-dokumentti.

Saatavissa:

[https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/117273209/MAAS\\_D\\_12\\_0\\_54421.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/117273209/MAAS_D_12_0_54421.pdf) [viitattu 13.2.2020].

Husso, A. 2019. Betoninpuristuslujuus rakennekoekappaleessa. Diplomityö. Tampereen yliopisto. Rakennetun ympäristön tiedekunta. WWW-dokumentti.

Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-201912036505> [viitattu 8.2.2020]

Leivo, M. 2000. Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen. Osa

2.Laadunvalvonta ja –varmistus. Espoo: VTT. PDF-dokumentti. Saatavissa:

<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2000/T2047.pdf> [viitattu 19.2.2020]

Makkonen, T., Al-Neshawy, F. & Punkki, J. 2019. Korkealujuusbetonin pakkasenkestävyys alhaisilla ilmamäärillä. PDF-dokumentti. Saatavissa:

[https://betoni.com/wp-content/uploads/2019/12/BET1904\\_88-95.pdf](https://betoni.com/wp-content/uploads/2019/12/BET1904_88-95.pdf) [viitattu 10.2.2020]

Mehta, P & Monteiro, P. 2014. Concrete Microstructure, Properties and Materials. 4. painos. New York: McGraw-Hill Education.

Neville, A. M. 1995. Properties of concrete. 5. Uudistettu painos. Essex, Englanti: Longman Group Limited

NT BUILD 381:1991, Concrete, hardened: Air void structure and air content

Paukku, E. 2016. Massiivisten betonirakenteiden perusvaatimuksia. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://betoni.com/wp-content/uploads/2016/12/BET1604\\_92-99.pdf](https://betoni.com/wp-content/uploads/2016/12/BET1604_92-99.pdf) [viitattu 10.2.2020]

Rudus Oy s.a. Betonin valinta rakenteisiin – olosuhdehallinta. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.rudus.fi/Download/23940/Betonin%20valinta%20rakenteisiin%20-%20olosuhdehallinta.pdf> [viitattu 15.3.2020]

SFS 206. 2014. Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus.

SFS 7022. 2019. Betoni. Standardin SFS-EN 206 käyttö Suomessa.

SFS-EN 12390-2. 2019. Testing hardened concrete. Part 2: Making and curing specimens for strength tests.

SFS-EN 12390-3. 2019. Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens.

SFS-EN 12390-8. 2019. Testing hardened concrete. Part 8: Depth of penetration of water under pressure.

SFS-EN 12390-9. 2016. Testing hardened concrete. Part 9: Freeze-thaw resistance with de-icing salts. Scaling.

SFS-EN 13670. 2010. Betonirakenteiden toteutus.

SFS-EN 12350-7. 2019. Testing fresh concrete. Part 7: Air content. Pressure methods.

Suomen Betoniyhdistys. 2016. by 65 Betoninormit 2016. Helsinki: BY-Koulutus Oy.

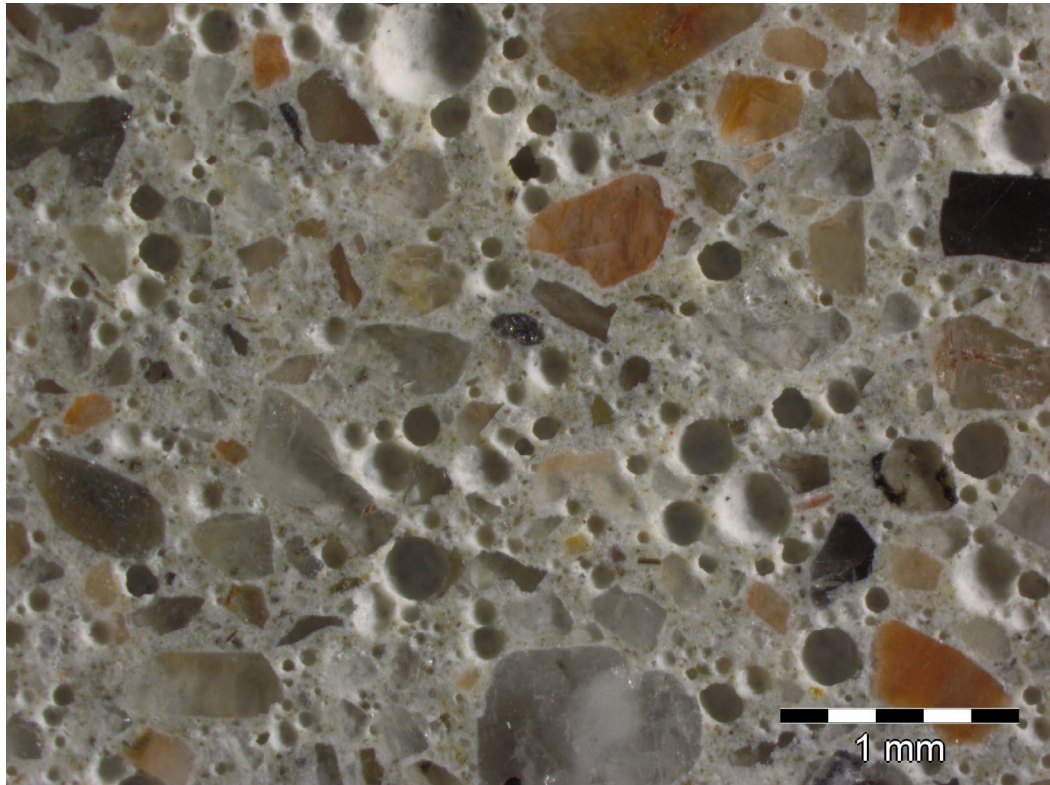
Yang, Q. 2012. Stability of air bubbles in fresh concrete. Diplomityö. Chalmers University. Division of Building Technology. WWW-dokumentti. Saatavissa:

<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/168457/168457.pdf> [viitattu

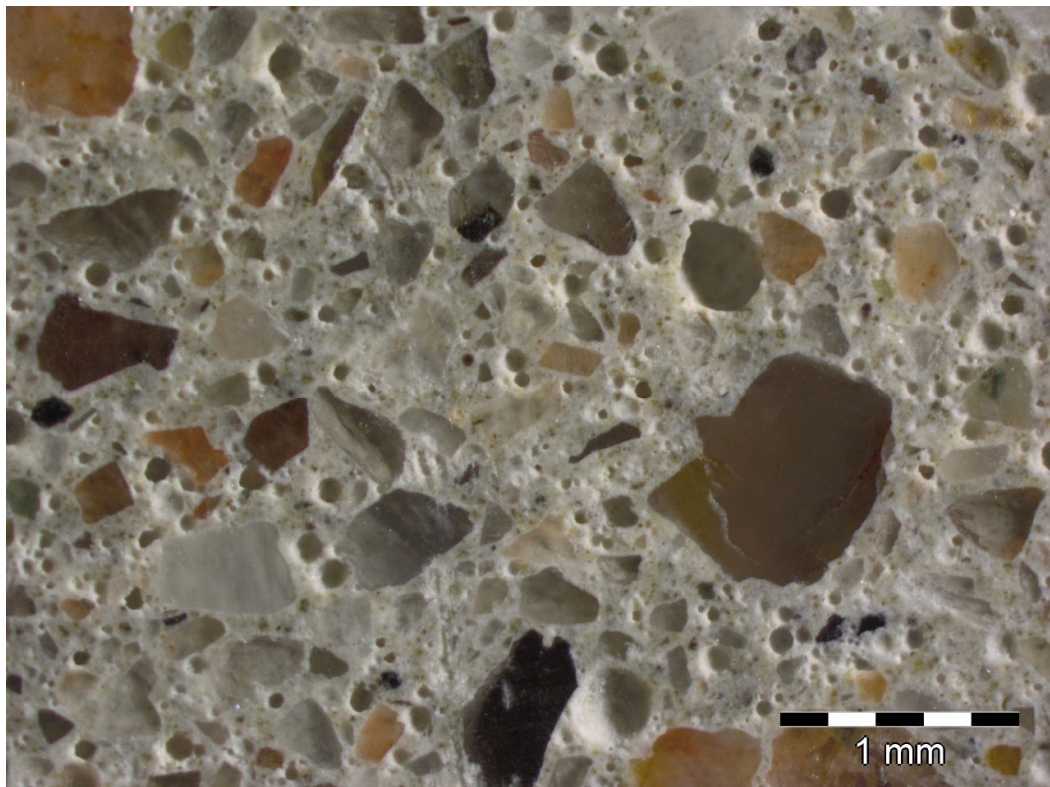
7.1.2020]

## **LIITE 1**

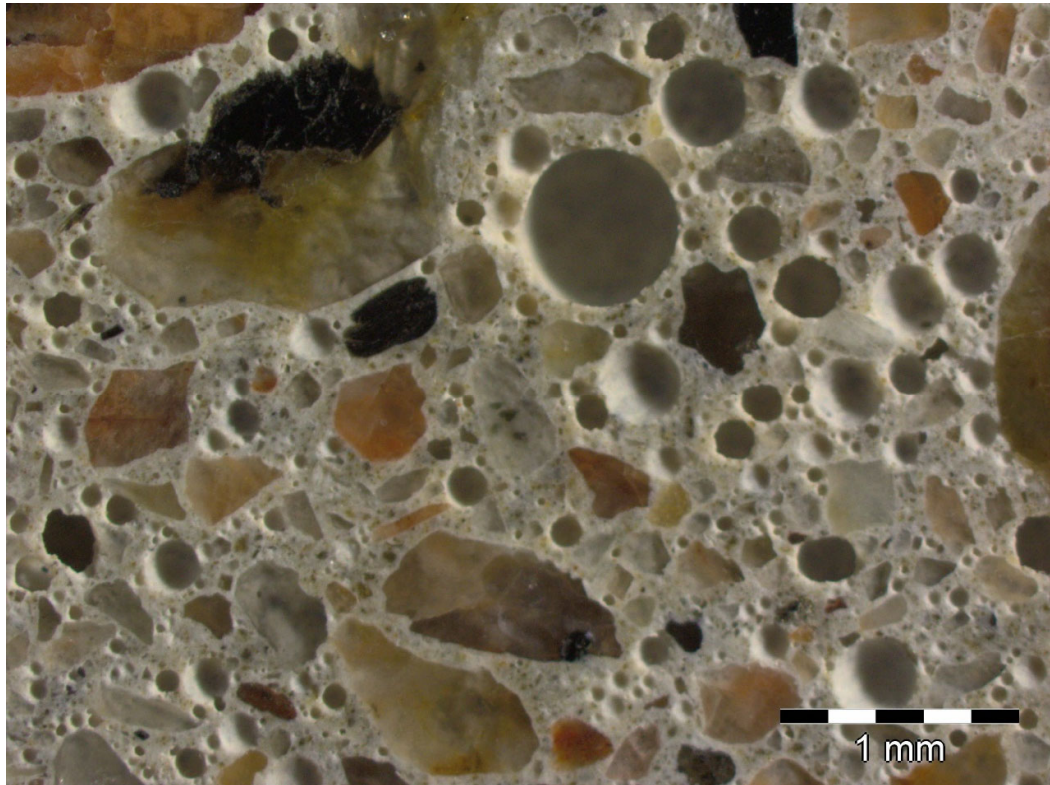
Kuvaliite: Testisarjojen pintahieet mikroskooppikuvina



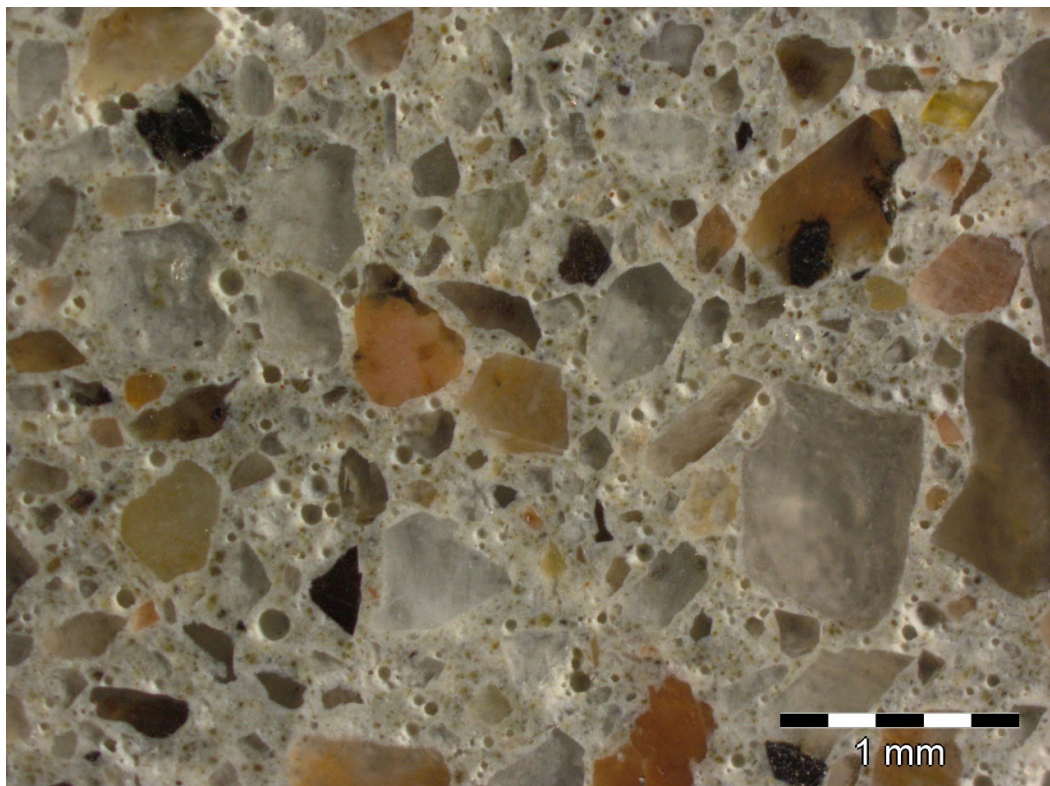
Kuva 15. Muotti yhdessä kerroksessa täytetty, alitiivistetty. Huokosjako 0,10 mm, suojarahukosten ilmamäärä 8,4 % ja ominaispinta-ala 35 mm<sup>-1</sup>.



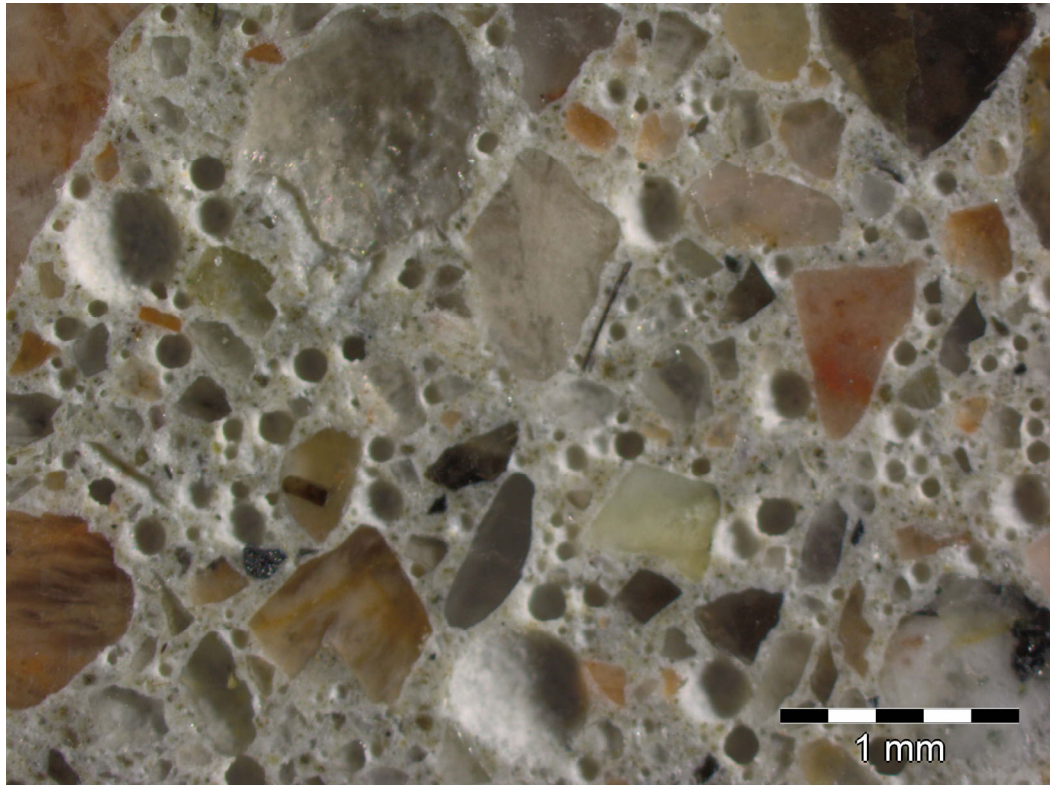
Kuva 16. Muotti yhdessä kerroksessa täytetty, yltiivistetty. Huokosjako 0,11 mm, suojarahukosten ilmamäärä 5,3 % ja ominaispinta-ala 44 mm<sup>-1</sup>.



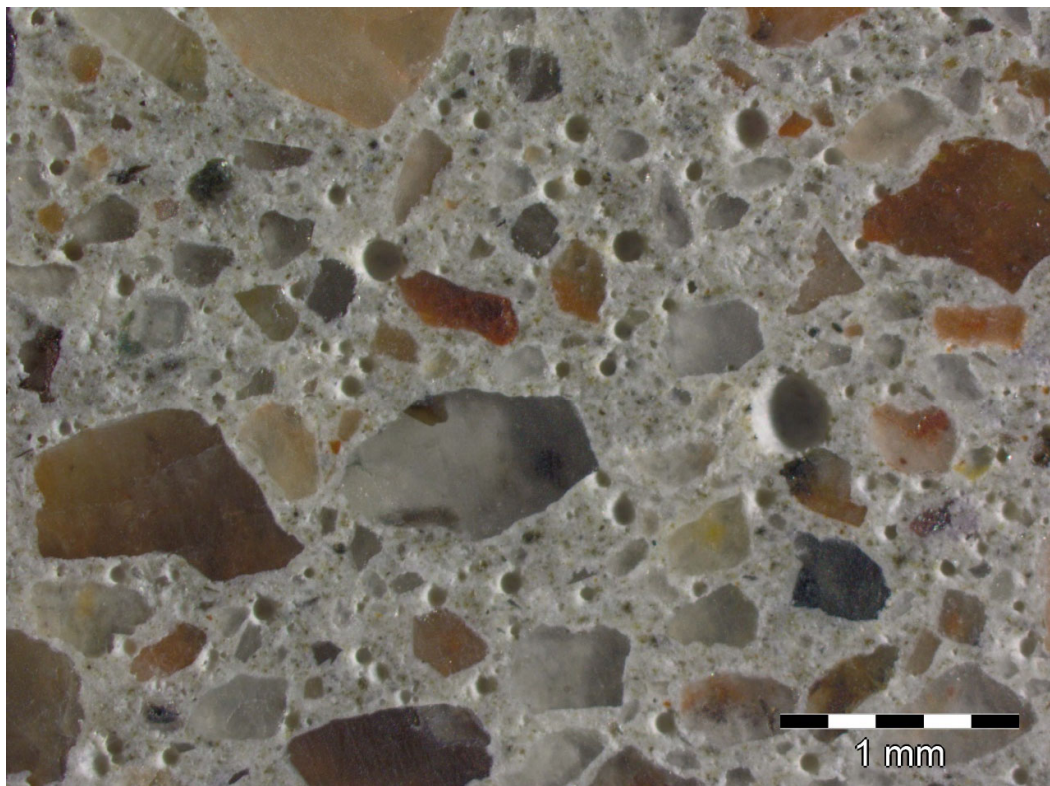
Kuva 17. Muotti kahdessa kerroksessa täytetty, alitiivistetty. Huokosjako 0,08 mm, suojarahukosten ilmamäärä 10,2 % ja ominaispinta-ala 39 mm<sup>-1</sup>.



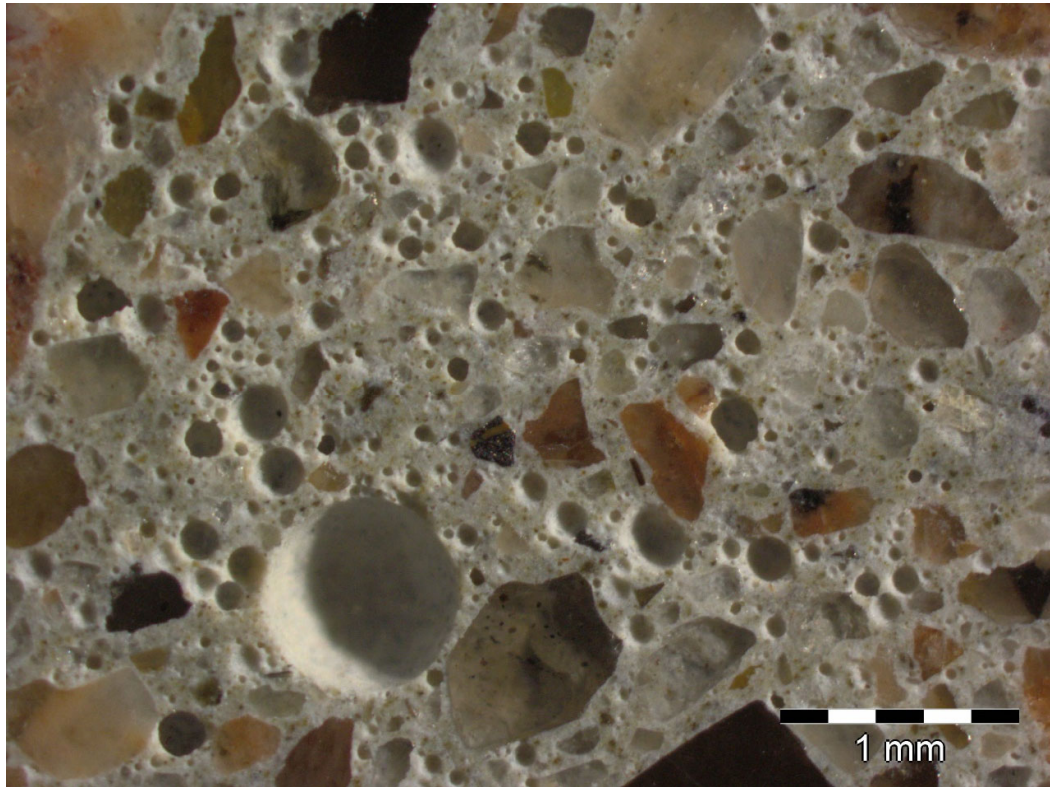
Kuva 18. Muotti kahdessa kerroksessa täytetty, yliitiivistetty. Huokosjako 0,11 mm, suojarahukosten ilmamäärä 2,3% ja ominaispinta-ala 69 mm<sup>-1</sup>.



Kuva 19. Muotti kolmessa kerroksessa täytetty, alitiivistetty. Huokosjako 0,08 mm, suojahuokosten ilmamäärä 8,8 % ja ominaispinta-ala  $41 \text{ mm}^{-1}$ .



Kuva 20. Muotti kolmessa kerroksessa täytetty, yltiivistetty. Huokosjako 0,13 mm, suojahuokosten ilmamäärä 2,7 % ja ominaispinta-ala  $54 \text{ mm}^{-1}$ .



Kuva 21. Referenssikappale. Muotti kahdessa kerroksessa täytetty, hyvin tiivistetty. Huokosjako 0,10 mm, suojahuokosten ilmamäärä 3,7 % ja ominaispinta-ala  $60 \text{ mm}^{-1}$ .