

Tuomas Kynsilehto

**KVARTSIMAASÄLPÄJAUHEEN KÄYTTÖ BETONIN OSA-AINEK-
SENA**

KVARTSIMAASÄLPÄJAUHEEN KÄYTTÖ BETONIN OSA-AINEK- SENA

Tuomas Kynsilehto
Opinnäytetyö
Kevät 2017
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikka, Talonrakentaminen

Tekijä: Tuomas Kynsilehto
Opinnäytetyön nimi: Kvartsimaasälpäjauheen käyttö betonin osa-aineksena
Työn ohjaaja: Hannu Kääriäinen
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2017
Sivumäärä: 50 + 11 liitettä

Opinnäytetyössä selvitettiin Keliber Oy:n toimittaman kvartsimaasälpäjauheen soveltuvuutta betonin osa-ainekseksi. Kvartsimaasälpäjauheen soveltuvuutta ei ollut aiemmin testattu. Työssä tehtiin kiviaineksen alkututkimukset ja selvitettiin, onko kvartsimaasälpäjauheen käyttö mahdollista lujuusominaisuuksiensa vuoksi, sekä mikä on kvartsimaasälpäjauheen vaikutus tuoreen betonin työstettyysominaisuuksiin.

Kvartsimaasälpäjauheen soveltuvuus testattiin luomalla yhdeksän eri normaalin, tärytettävän betonin reseptiä, joista yksi ei sisältänyt kvartsimaasälpäjauhetta lainkaan, vaan toimi vertailukohteena. Lisäksi kvartsimaasälpäjauheen soveltuvuutta testattiin itsetiivistyvän betonin valmistukseen sekä notkeutensa että puristuslujuutensa puolesta. Koemassat luotiin ja testattiin käyttämällä yleisesti hyväksi havaittuja menetelmiä.

Koetuloksista voidaan todeta, että testattu kvartsimaasälpäjauhe lisää ilmamäärää betonissa. Korkean ilmamäärän vuoksi kvartsimaasälpäjauheen käyttö heikentää betonin lujuusominaisuuksia. Ilmamäärän muodostumisen arvioitiin johtuvan kiviaineksen sisältämistä rikastuskemikaalijäämistä. Korkean ilmamäärän vuoksi kvartsimaasälpäjauhetta tulisi testata kemikaalijäämistä puhdistettuna.

Asiasanat: Betonitekniikka, Betoni, Hienoaines, Kvartsimaasälpäjauhe

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Civil engineering, Building and Renovation

Author: Tuomas Kynsilehto

Title of thesis: Using Quartz-feldspar Sand as Concrete's Mixture

Supervisor: Hannu Kääriäinen

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2017

Pages: 50 + 11 appendices

The thesis investigated the suitability of quartz-feldspar sand as concrete's mixture. The suitability of quartz-feldspar sand had not previously been tested. How quartz-feldspar sand affected the quality of concrete was investigated in the thesis work.

The work was done to find out if using quartz-feldspar sand possibly affected the strength properties and how quartz-feldspar sand affected the workability of the fresh concrete. The suitability of quartz-feldspars sand was tested by creating nine normal, vibratable concrete prescriptions. One of them did not contain quartz-feldspar sand at all to act as a reference. In addition, quartz-feldspar sand was tested for the self-compacting concrete. The experiments were created and tested using well-proven methods.

From the test results it can be concluded that the tested quartz-feldspar sand increases the air volume in concrete. Using quartz-feldspar affects also the strength properties due to high amount of air. The reason for high air volume was estimated to be a consequence of the relict chemicals from the concentration process. Due to high air volume, quartz-feldspar sand should be tested after washing off chemicals.

Keywords: Concrete, fine aggregate, quartz-feldspar

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty osana rakennusinsinöörin tutkintoa Keliber Oy:n tilaamana. Työn ohjaajana toimi Oulun ammattikorkeakoulun lehtori Hannu Kääriäinen. Kokeiden toteutuksessa oppaana toimi laboratoriomestari Heikki Isohookana.

Keliber Oy tilasi samaan aikaan kolme opinnäytetyötä Oulun ammattikorkeakoululta. Töiden edetessä järjestettiin useampi opinnäytetyöpalaveri. Haluan kiittää tilaajaa mahdollisuudesta tehdä opinnäytetyö. Kiitän yhteistyöstä laboratorikokeissa auttaneita Hannu Kääriäistä ja Heikki Isohookanaa sekä kaikkia opinnäytetyöpalavereihin osallistuneita.

Oulussa 20.4.2017

Tuomas Kynsilehto

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	8
2 BETONI	9
2.1 Kiviaines	9
2.1.1 Raejakauma	10
2.1.2 Raemuoto	11
2.2 Sementti ja seosaineet	11
2.2.1 Masuunikuona	12
2.2.2 Silika	13
2.2.3 Lentotuhka	13
2.3 Vesi	13
2.3.1 Vesi – sementtisuhte	14
2.3.2 Kutistuminen	15
2.4 Lisäaineet	16
2.4.1 Notkistimet	16
2.4.2 Huokostimet	17
2.4.3 Hidastimet ja kiihdyttimet	17
3 KVARTSIMAASÄLPÄJAUHE	18
3.1.1 Mineraalikoostumus	24
3.1.2 Kemiallinen koostumus	26
4 ITSETIIVISTYVÄ BETONI	27
5 KVARTSIMAASÄLPÄJAUHEEN TESTAAMINEN	28
5.1 Reseptien suhteittaminen	28
5.2 Koemassojen valmistus	30
5.2.1 Ainesosat	32
5.3 Tuore betoni	33
5.3.1 Painuma	33
5.3.2 Tiheys	35
5.3.3 Painuma - leviämä	36
5.3.4 Ilmamäärä	37
5.4 Kovettunut betoni	39
5.4.1 Puristuslujuus	39
5.4.2 Tiheys	41

5.4.3 Paineellisen veden tunkeutumasyvyys	43
6 YHTEENVETO	45
7 LÄHTEET	47
LIITTEET	50

1 JOHDANTO

Kaivosteollisuudessa malmin louhinnan ja rikastuksen sivuvirtauksena syntyy jatkuvasti kiviaineksia, joille ei ole tarkoituksenmukaista käyttökohdetta. Ympäristön kannalta tilanne on kestävin, kun mahdollisimman suuri osa louhitusta kiviaineksesta saadaan hyötykäyttöön. Tehoton kiviaineksen hyödyntäminen on myös taloudellinen rasite, sillä kiviaineksen kuljetus ja varastointi aiheuttavat yritykselle ylimääräisiä kustannuksia.

Keliber Oy on Keski-Pohjanmaalla toimiva litiumrikkaiden spodumeenipegmatit-tiesiintymien etsimiseen ja jalostamiseen erikoistunut yritys. Keliber Oy:n tavoitteena on tuottaa 9 000 tonnia erikoispuhdasta litiumkarbonaattia vuodessa. Litiummalmin louhinnan ja rikastamisen yhteydessä syntyy rikastushiekkaa, eli kvartsimaasälpäjauhetta, noin 400 000 tonnia vuodessa. Kvartsimaasälpäjauheelle etsitään sopivia käyttökohteita.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää, voidaanko Keliber Oy:n toimittama kvartsimaasälpäjauhetta hyödyntää betonin valmistuksessa. Kvartsimaasälpäjauhetta ei ole aiemmin kokeiltu betonin valmistukseen. Kokeilla halutaan selvittää, miten kvartsimaasälpäjauhe vaikuttaa tuoreen betonimassan työstettävyyteen sekä kovettuneen betonin lujuusominaisuuksiin.

2 BETONI

Betoni on tällä hetkellä maailman käytetyin rakennusaine. Betonin hyviä puolia ovat muun muassa edullisuus, kestävyys sekä helppo muokattavuus. Rakentamisessa betonin käyttöalue on erittäin laaja ja sen käyttöikä parhaimmillaan lähes rajaton. Kelvollisen betonin valmistus edellyttää kuitenkin materiaalitunte-
musta. Betonin kolme pääraaka-ainetta ovat sementti, vesi ja kiviainekset. Näiden lisäksi betonin ominaisuuksia voidaan muokata haluttuun suuntaan lisä- ja seosaineita käyttämällä. Lisä- ja seosaineilla voidaan tavoitella esimerkiksi tuoreen betonin parempaa työstettävyyttä tai kovettuneelle betonille käyttötarkoitukseen parempia ominaisuuksia esimerkiksi suurempaa puristuskestävyyttä. Lähtökohtaisesti betonin lujuuksia lähdetään kuitenkin muokkaamaan sementtilaatua vaihtamalla. Sementti toimii tämän keinotekoisien kiviaineksen liima-aineksena. Betonin seossuhteiden määrittäminen on lähtökohta kaikilta ominaisuuksiltaan laadukkaasti betonin valmistamiseen.

(4, s. 31; 7, s. 34; 13)

2.1 Kiviaines

Betonin raaka-aineista kiviaines muodostaa aina kaikista suurimman tilavuusosuuden. Tavanomaisesti valmiin, tuoreen betoninmassan tilavuudesta noin 65-80 prosenttia on kiviainesta. Kiviaineena voidaan käyttää sekä kivennäismaalajeista saatavia että kalliosta tai kivennäismaalajeista murskattua kiviainesta. Yleisesti voidaan sanoa, että murskatulla kiviaineksella saavutetaan suurempi betonin lujuus kuin luonnon muokkaamilla kiviaineksilla olettaen, että vesisementtisuhde pysyy vakiona. Murskatun kiviaineksen käytön seurauksena on heikompi työstettävyys kuin luonnon kiviainesta käytettäessä. Suomessa betonin valmistukseen käytetään pääasiassa graniittipohjaista luonnonkiviainesta. Graniitin puristuslujuus on noin 160-240 MPa, eli kiviaines on reilusti lujempaa kuin tavanomainen kovettunut betoni. Kiviaineksen laatu vaihtelee paikkakunnittain. Yleensä ei ole järkevää lähteä kuljettamaan kiviainesta pitkiä matkoja, ellei betonille ole asetettu vaatimuksia, joita lähistolta saatavalla kiviaineksella ei

pystytä toteuttamaan. Suomalaiset kivet kestävät hyvin sekä pakkasta että kulu-
tusta. (4, s. 32; 7, s. 49-50)

Käytännössä kiviaineksena voidaan kuitenkin käyttää mitä tahansa riittävän lu-
jaa ja tiivistä, rakeista materiaalia. Kiviaineksen valinnassa tulee huomioida,
ettei kiviaines saa sisältää humuspitoisia aineita. Betonin kiviaines ei saa olla
koostumukseltaan sellaista, että se vaikuttaisi sementin ja veden reaktioihin. Ki-
viaineksen tulee olla puhdasta roskista, savikokkareista, öljystä ja jätteistä.

(1, s. 27-33)

2.1.1 Raejakauma

Suhteitusta tehtäessä täytyy kiviaines seuloa, jotta rakeisuuskäyrä saadaan
määritettyä. Tavanomaisesti kiviaines seulotaan sarjalla, jonka silmäkoot ovat
0,125 mm, 0,25 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm, 31,5 mm ja
63 mm. Kiviainekset nimetään niiden raekoon mukaisesti käyttämällä merkintää
 d/D , josta selviää lajitteen ylä- ja alanimellisrajat. Kiviainesta, joka läpäisee
0,063 mm:n seulan voidaan kutsua hienoainekseksi tai filleriksi. Suomalaisen
kiviaineksen ominaispaino on keskimäärin 2,67 tonnia/m³. Suhteituksessa on
tärkeää tietää käytetyn kiviaineksen tiheys, sillä se vaikuttaa suoraan käytetyn
sementin määrään, betonimassan notkeuteen sekä loppulujuuteen.

(1, s. 12, 16)

Nykyään betonin ominaisuuksia halutaan hallita yhä tarkemmin kuin aiemmin.
Optimaalisen raekojakauman saavuttamiseksi käyrän tulee olla jatkuva. Beto-
nin runkoaineita suhteitettaessa ohjekäyrä alkaa suurimmasta raekoosta ja
päättyy 0,125 millimetrin raekokoon. Nykyhetkeen saakka tehtyä suihteitusta
sekä betonitutkimusta voidaan kutsua makrobetoniikaksi. Mikrosuhteituksessa
aloitetaan 0,125 millimetrin seulakoolta ja edetään hienompaan ainekseen päin.
Betonin osa-aineiden raejakaumalla on oleellinen merkitys vesimäärälle, lujuu-
den kehitykselle, kovettuneen betonin lujuudelle, tiiveydelle ja tuoreen betonin
työstettävyydelle. Suuren hienoainespitoisuuden avulla saavutetaan lujempaa
betonia, mikä johtuu osaltaan myös kasvaneesta sementtimäärästä. (5, s. 5)

Sopivalla määrällä hienoainesta voidaan parantaa betonin ominaisuuksia merkittävästi. Ominaisuuksien parantumisen edellytyksenä on kuitenkin se, että hienoaines ei paakkuunnu eikä ole kiinni suuremmissa rakeissa heikentäen näin sementin tartuntaa suurempiin rakeisiin. Parhaaseen lopputulokseen päästään, kun valitaan raejakauma siten, että syntyy mahdollisimman vähän sementillä ja ilmalla täyttyvää tilaa eli rakeet pakkautuvat tiiviisti. Kiviaineksen raemuodolla on myös oleellinen vaikutus betonin lopullisiin ominaisuuksiin. Mikrosuhteutuksessa minimoidaan betonin rakeiden väliset etäisyydet. Etäisyyksien minimoinnilla voidaan vähentää sementtimäärää ja näin kasvattaa kovettuneen betonin lujuutta. Käytettäessä suuria määriä hienoainesta joudutaan aina käyttämään notkistimia, koska notkistin erottaa pienet rakeet toisistaan ja sitä myöten työstettävyys paranee. (5, s. 12-15)

2.1.2 Raemuoto

Optimaalinen raejakauman käyrä on riippuvainen partikkelien muodosta ja koosta. Pallomainen luonnonkiviaines vähentää hienoaineksen tarvetta ja murskattu kiviaines puolestaan lisää hienoaineksen tarvetta. Partikkeleiden rajapintojen muodolla on vaikutusta betonin ominaisuuksiin. Kun mineraalirakeet ovat muotoutuneet mahdollisimman monipuolisesti ja epäsäännöllisesti, muodostuu betoniin lujia sidoksia. Monimuotoisten rakeiden toimivuus edellyttää, että mineraalirakeet eivät saa olla rapautuneita. Rapautunut kiviaines imee itseensä enemmän vettä kuin eheärakenteinen kiviaines. Jotta saavutetaan sama työstettävyys heikompilaatuiselle kiviainekselle, joudutaan veden osuutta lisäämään. Kasvanut vesimäärä aiheuttaa luonnollisesti betonin lujuuden heikkene-
misen. (5, s. 19; 1, s. 23)

2.2 Sementti ja seosaineet

Sementti on yksi betonin pääraaka-aineista. Sementti on kalkkikivestä hienoksi poltettua ja jauhettua jauhetta. Sementin valinnalla on oleellinen merkitys sekä tuoreen että valmiin kovettuneen betonin ominaisuuksiin. Sementti on veden kanssa reagoiva sideaine. Veden ja sementin reaktion seurauksena betoni kovettuu ja saadaan aikaan erityisesti puristuslujuudeltaan kestävä lopputuote.

Sementin valinnalla on suuri merkitys myös lämmönkehitykseen ja kemialliseen kestävyYTEEN. (4, s.39)

Maailman kaikista hiilidioksidipäästöistä noin viisi prosenttia on peräisin betonin valmistuksesta. Betonin valmistuksessa suurin hiilidioksidipäästöjen aiheuttaja on sementin valmistus noin yhdeksänkymmenen prosentin osuudellaan. Nykyään hiilijalanjäljen pienentäminen on oleellinen tavoite rakennusmateriaalien kehitysprosessissa. Betonin valmistuksesta aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä voidaan alentaa käyttämällä teollisuuden sivutuotteina saatavia seosaineita. Esimerkiksi masuunikuona on rauta- ja terästeollisuuden ylijäämätuote, jota voidaan käyttää betonin valmistuksessa. Seosaineiden käyttö on ympäristön näkökulmasta erittäin suotavaa. Seosaineiden hyödyt eivät jää pelkästään ympäristön säästämiseen. Seosaineiden käytöllä voidaan ohjata betonin ominaisuuksia tahdottuun suuntaan. Seosaineet saadaan reagoimaan veden ja sementin reaktioiden seurauksena syntyneen kalsiumhydroksidin avulla. Kun seosaineet saadaan reagoimaan, saadaan myös betonin lujuuskehitystä aikaiseksi. Seosaineiden reaktiot poikkeavat sementin reaktioista. Masuunikuonan käyttö vähentää reaktioiden seurauksena syntyviä lämpötiloja. Tästä on hyötyä esimerkiksi suurilla laattakentillä valettaessa. Hienojakoiset seosaineet edistävät rakeiden tiivistä pakkautumista ja näin edesauttavat lujemman betonin syntyä. (8; 11; 26)

2.2.1 Masuunikuona

Masuunikuona on raakaraudan valmistuksessa masuunissa muodostuneesta emäksisestä silikaattisulatteesta saatu tuote. Masuunikuona on piilevästi hydraulinen sideaine. Sementin hydratoitumisreaktiot aktivoivat masuunikuonan piilevät hydrauliset ominaisuudet. Portlandsementti saa masuunikuonan aktivoitumaan ja saadaan aikaan tavanomaista korkeampia loppulujuuksia. Masuunikuonan hidaskäyttö kuitenkin pienentää alkulujuuksia. Masuunikuonan reaktioiden poikkeavuus sementin reaktioista alentaa hydraatiolämpöä. Hydraatiolämmön vuoksi masuunikuona ei sovellu seosaineeksi talvibetonointiin. Masuunikuonan käytön etuna saadaan kemiallinen kestävyys ja edullisempi betoni. (4, s. 32; 31)

2.2.2 Silika

Silika on erittäin hienojakoinen, savukaasuista erotettava pozzolaani. Silikan kiintotiheys on noin 2200 kg/dm³ luokkaa. Silikan käytön etuina ovat parempi kemiallinen kestävyys, koossapysyvyys, tiiviys ja vedenpitävyys. Silikaa käytettäessä joudutaan aina käyttämään notkistimia, sillä silika lisää hienojakoisuutensa vuoksi betonin vedentarvetta. Silikan käytön myötä sementin hydratoitumislämpötila alenee hieman.

2.2.3 Lentotuhka

Lentotuhkaa on pozzolaaninen aine, jota syntyy kivihiilen poltossa. Lentotuhkan kiintotiheys on noin 2100-2500 kg/dm³ luokkaa. Lentotuhka parantaa erityisesti betonin kemiallista kestävyyttä, mutta myös tuoreen betonin työstettävyys helpottuu. Lentotuhka alentaa betonin hydratoitumislämpöjä, jonka seurauksena lentotuhkaa sisältävää betonimassaa ei kannata käyttää talvibetonoinnissa.

(2, s. 175)

2.3 Vesi

Veden käytön sääntönä on, että juomakelpoinen vesijohtovesi soveltuu myös betonin valmistukseen. Vesijohtoveden lisäksi betonin valmistuksessa voidaan yleensä huoletta käyttää pohjavettä tai muita luonnon vesistöjä, jotka eivät ole teollisuuden tai asutuskeskusten saastuttamia. Pohjanlahden merivesi soveltuu suolapitoisuutensa vuoksi hyvin betonin valmistukseen. Veden käyttöä ei kuitenkaan suositella, sillä se saattaa aiheuttaa betonille pysyvästi läikikkään ja ruman pinnan. Vesi ei saa olla humuspitoista tai jätteiden saastuttamaa. Humuspitoisuus estää betonin kovettumisreaktiot, eikä näin ollen esimerkiksi suovedet kelpaa betonin valmistukseen. Vesi ei saa sisältää myöskään öljyjä taikka rasvoja, sillä ne saattavat estää veden reagoimisen sementin kanssa ja aiheuttaa ylimääräistä ilmaa betoniin. Jos veden soveltuvuudesta on epävarmuutta, voidaan veden laatu arvioida likimain sitoutumiskokeella tai tarkalla kemiallisella analyysillä. (4, s.62-63)

Kiviainekseen absorboitunut vesi tulee huomioida betonin suhteitusta tehtäessä. Mikäli kiviainekseen absorboitunutta vettä ei huomioida, saattaa kovettuneessa betonissa esiintyä lujuuskatoa. Käytännössä helpointa suhteitus on suorittaa uunikuivalla ja seulotulla kiviaineksella. (4, s. 32; 7, s. 46-47)

2.3.1 Vesi – sementtisuhde

Betonin valmistuksessa tarvitaan vettä sementin sitoutumisreaktioon, mutta myös muualle betoniin. Vesi täyttää betonissa kiinteiden rakeiden väliin jäävää tyhjää tilaa. Tarvittavan veden määrä määräytyy sekä pakkautuvuudesta, että kiinteiden aineiden ominaispinta-alasta. Betonin valmistuksessa sementin tarve on suoraan verrannollinen suhteitetun seoksen tyhjään tilaan sekä runkoaineen ominaispinta-alaan. Suhteituksessa tämä huomioidaan epäsuorasti rakeisuusluvulla. Rakeisuusluku ei kuitenkaan huomioi tilannetta, jossa runkoaineessa on paljon samankokoisia rakeita. Tällöin betonimassa ei tiivisty optimaalisella tavalla, vaan rakeiden väliin jää tyhjää tilaa, johon ylimääräinen vesi imeytyy. Tästä seurauksena sementin määrän tarve kasvaa, tiiviys alenee ja kasvaneen vesimäärän johdosta lujuus alenee. (5, s. 10)

Betonin valmistuksessa keskeisessä asemassa on vesi-sementti -suhde, koska sillä on merkittävä vaikutus lujuuteen ja säänkestävyyteen. Lujuuden ja vesi-sementtisuhteen riippuvuuden edellytyksenä on tuoreen betonin riittävä tiivistys. Vesi-sementti -suhde lasketaan vesimäärän suhteensa sementin painoon. Vettä tulee olla vähintään neljäkymmentä prosenttia sementin määrästä, jotta reaktiot tapahtuvat täydellisinä. (4, s.62-63; 7, s. 87-88; 11)

Kun säädellään betonin hienoimpien osa-aineiden rakeisuutta, ei vesi-sementti -suhteen määrittäminen olekaan enää yksioikoista. Epäselvyyttä vesi-sementti -suhteen laskennalliseen määrittämiseen aiheuttaa hydraatioreaktion vaatima vesimäärä. Mikäli vettä käytetään liikaa, jää betoniin ylijäämävettä. Ylimääräinen vesi johtaa kapillaari- ja geelihuokosten muodostumiseen. Tämä saattaa johtaa jännitystiloihin kovettuneessa betonissa ja aiheuttaa mikrohalkeilua. (5, s.10)

2.3.2 Kutistuminen

Kutistuminen voidaan jakaa varhaiskutistumiseen ja pitkäaikaiskutistumiseen. Varhaiskutistuminen tapahtuu ensimmäisten 24 tunnin aikana valuhetkestä. Betonin kuivumiskutistuma on osa varhaiskutistumaa. Varhaiskutistuman suuruuteen vaikuttavat sekä ympäröivät olosuhteet että betonin koostumus. Betonin kuivumiskutistuma saadaan mahdollisimman pieneksi, kun valu tehdään olosuhteissa, joissa betonin ja ilman lämpötilaero on mahdollisimman pieni. Veden määrällä ja rakeisuusluvulla on betonin koostumuksessa suurin vaikutus kutistumaan. Mitä enemmän betonin valmistukseen käytetään vettä, sitä enemmän vettä myös haihtuu. Kiviaineksen suuri rakeisuusluku puolestaan lisää myös halkeilua. Suuri rakeisuusluku tarkoittaa käytännössä hienoa kiviainesta. (31)

Alhainen vesi-sementtisuhte ja korkea hienoainemäärä nostavat plastisen kutistumisen riskiä. Plastinen kutistuminen tarkoittaa betonin kutistumista vaakaja pystysuunnassa. Plastisessa kutistumisessa betoni pääsee kuivumaan pinnalta, eikä vesi korvautu betonin sisältä nousevalla vedellä. Sementin sitoutumisaikaa pidentävien lisä- ja seosaineiden käyttö lisää plastisen kutistuman riskiä. Hidastunut hydraatioreaktio pidentää aikaväliä, jolloin plastinen kutistuminen tapahtuu. (31)

Betonivaluille annetaan jälkihoitoa, jotta saadaan vältettyä varhaiskutistumisen aiheuttama halkeilu. Jälkihoidolla pyritään antamaan betonille lisää aikaa lujittumista varten, jotta betoni kestää kutistumisen aiheuttamat jännitykset halkeilematta. Jälkihoito voi käytännössä olla betonin kastelua, peittämistä tai vettä läpäisemättömien aineiden käyttöä betonin avoimeksi jääneillä pinnoilla. (31)

Pitkäaikaiskutistuman pienentämiseen toimivia keinoja ovat kokonaisvesimäärän vähentäminen, sementtimäärän vähentäminen ja betonin runkoaineosuuden kasvattaminen. Runkoaineeksella tulisi olla alhainen vedenimeytyminen eli käytännössä kiviaineksen tulee olla mahdollisimman vähän rapautunutta. Kutistuman hallitsemiseen voidaan käyttää jo betonin valmistusvaiheessa lisäaineita. Lisäaineiden käyttöä tulee kuitenkin välttää niin pitkään kuin betonin ominaisuu-

det ovat suhteitusta muokkaamalla hallittavissa. Useiden eri lisäaineiden yhtäaikaisesta käyttämisestä ei aina ole varmuutta, ja olisikin suotavaa käyttää kokemusperäisesti hyväksi todettuja keinoja. (31)

2.4 Lisäaineet

Betonin valmistuksessa lisäaineilla voidaan ohjalla betonin kovettumista, kovettuneen betonin ominaisuuksia sekä työstettävyyttä. Lisäaineiksi kutsutaan aineita, joilla on vaikutuksia betonin tekniisiin ominaisuuksiin. Tämän vuoksi esimerkiksi väriaineet luokitellaan apuaineiksi. Esimerkiksi notkistimen avulla voidaan alentaa vesi-sementtisuhdetta, eli voidaan saavuttaa kovettuneen betonin korkeampia lujuuksia. Lisäaineiden osuus valmiista betonimassasta on hyvin pieni, tyypillisesti vain muutamien prosenttien luokkaa sideaineen määrästä. Mikäli lisäaineen suuremman määrän vaikutusta ei tunneta, käytetään korkeintaan viisi prosenttia sementin määrästä tai valmistajan suosittelema enimmäismäärä. Mikäli käytettävä lisäaine on nestemäinen, tulee sen nestemäärä huomioida vesi-sementtisuhdetta laskettaessa aina kun lisäainetta on yli 3 l/m^3 betonia. Pieniä määriä lisäainetta käytettäessä lisäaine laimennetaan valmistuksessa käytettävään veteen. Laimennus on tarpeen, kun lisäaineen määrä jää alle 2 g/kg sementtiä. (4, s.63; 7, s. 50)

Betonin valmistuksessa käytettävien lisäaineiden tulee olla CE-merkittyjä tai vähintään hyväksyttäviin testauksiin perustuva selvitys lisäaineen ominaisuuksista, vaikutuksesta ja käyttökelpoisuudesta. CE-merkityillä lisäaineilla tulee noudattaa valmistajan ohjeita. Lisäaineiden kokonaismäärä ei saa ylittää 50 g/kg sementtiä, ellei suuremman käytön vaikutusta tunneta ennalta. (2, s. 100)

2.4.1 Notkistimet

Notkistimilla pyritään vähentämään veden määrää betonin valmistuksessa. Pienemmällä vesi-sementtisuhteella saadaan aikaiseksi lujempaa betonia. Lujuskehityksen ansiosta betonimassan sementin määrää voidaan alentaa. Notkistimen avulla hienoaineksen paakkuuntumat saadaan hajoamaan, jolloin massasta saadaan tasalaatuista. Osa notkimista kuitenkin hidastaa betonin lujuu-

den kehitystä. Notkistimien käyttö on hyvä huomioida jo kiviaineksen suhteituk- sessa, jotta kovettuneessa betonissa ei esiinny halkeamia tai erottumista. Sen vaikutus on suurimmillaan silloin kun käytetään paljon hienoainesta. Notkisti- milla voidaan hakea myös parempaa työstettävyyttä, sillä vähän vettä sisältävä betonimassa on erittäin kankeaa. (7, s. 56)

2.4.2 Huokostimet

Huokostimien käytöllä saadaan aikaiseksi pakkasenkestävää betonia. Käytön tavoitteena on saada betoniin pieniä ilmakuplia tasaisesti. Ilmakuplien tehtä- vänä on vastaanottaa veden jäätyessään aiheuttama paine. Kun vedellä on tilaa laajentua, se ei aiheuta halkeilua betoniin. Valmiissa betonissa on tavanomai- sesti ilmaa noin 1-2 prosenttia ja huokostetussa, pakkasenkestävässä beto- nissa on noin 4-8 prosenttia rasitusluokasta ja runkoaineksen koosta riippuen. Huokostusaineen teho vähenee sementin määrän kasvaessa, joten käytön edut ovat parhaimmillaan, kun sementtiä on mahdollisimman vähän. Huokostimen käyttö notkistaa työstettävää, tuoretta betonimassaa, mutta alentaa loppulujuuk- sia. Notkistavien ominaisuuksien vuoksi huokostimia käytettäessä voidaan yleensä veden määrää hieman alentaa. (4, s. 66; 7, s. 56-57)

2.4.3 Hidastimet ja kiihdyttimet

Hidastimilla saadaan aikaiseksi betonin pitempiaikainen sitoutumisreaktio. Si- toutumisreaktion piteneminen on tarpeen esimerkiksi korkeissa lämpötiloissa. Mitä nopeampaa sementin hydratoituminen pääsee tapahtumaan, sitä alem- malle tasolle loppulujuus asettuu. Alhaisissa lämpötiloissa hidastimien käyttö ei yleensä ole tarpeen. Hidastimia käytetään myös silloin kun tuoreen betonin kul- jetusmatka on pitkä. Huomattavaa on kuitenkin, että hidastimien käyttö ei vä- hennä kokonaislämmönkehitystä. Kiihdyttimien avulla saadaan nopeutettua si- toutumisreaktioita. Kiihdyttimien avulla voidaan saavuttaa esimerkiksi rakennus- töissä varhaisempi 5 MPa muottien purkulujuus. Kiihdyttimiä voidaan käyttää siis muottikiertoajan lyhentämiseen. Kiihdyttimien käyttö on kuitenkin vähäistä, sillä sementin valinnalla ja lämpötiloilla voidaan vaikuttaa samoihin asioihin kuin kiihdyttimetkin vaikuttavat. (4, s. 67; 7, s. 58)

3 KVARTSIMAASÄLPÄJAUHE

Kvartsimaasälpärikaste on litiummalmin vaahdotusrikastuksen yhteydessä syntyvää hienojakoista, jauhemaista kiviainesta. Kvartsimaasälpäjauhe on rakenteeltaan hienojakoinen, joten se saattaisi sopia käytettäväksi fillerinä betonissa. Oulun ammattikorkeakoulun laboratorion tekemän pesuseulonnan tuloksena saatiin määritettyä kvartsimaasälpäjauheen rakeisuuskäyrä 0.063 mm:iin saakka. Laboratorion tutkimusten perusteella kvartsimaasälpäjauheen kiintotiheys on 2 975 kg/m³. Tavanomaisen suomalaisen kiviaineksen kiintotiheys on noin 2 670 kg/m³, eli kvartsimaasälpäjauhe on tiheimmin pakkautunutta. Tutkitun näytteen kosteusprosentti oli 7,0. Pesuseulonnan tulokset on esitetty taulukossa 1. (33)

TAULUKKO 1: Pesuseulonnan raejakauma (33)

Seula # [mm]	Läpäisy [%]
63,0	100
45,0	100
31,5	100
22,4	100
16,0	100
11,2	100
8,0	100
5,6	100
4,0	100
2,0	100
1,0	100
0,5	99,95
0,25	99,05
0,125	75,05
0,063	42,05

3.1.1 Mineraalikoostumus

Aiempien tutkimusten perusteella on määritelty kvartsimaasälpäjauheen sekä kemiallinen- että mineraalinen koostumus. Aiemmat tutkimustulokset osoittavat, että kvartsimaasälpäjauheen päämineraalit ovat kvartsi, plagioklaasi, mikrokliini, spodumeeni sekä muskoviitti. Mineraalikoostumus on esitetty taulukossa 2. (14)

Kvartsi hohkasilikaattimineraali, joka on kemialliselta koostumukseltaan piidioksidia (SiO_2). Sen rakenne on väljä, mutta sidokset hyvin lujia. Kvartsin kiintotiheys on $2\,650\text{ kg/m}^3$. (29)

Plagioklaasi on maasälpälaji, jonka kemiallinen kaava on $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (albiitti) tai $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (Anortiitti). Plagioklaasilla on lasimainen pinta. Sen kiintotiheys on $2600 - 2700\text{ kg/m}^3$ luokkaa. (29)

Mikrokliini on tektosilikaattimineraali, joka tunnetaan kalimaasälpänä. Kalimaasälpän kemiallinen kaava on KAlSi_3O_8 . Mikrokliinin ominaispaino on noin 2600 kg/m^3 . (29)

Spodumeeni eli litiumalumiinisilikaatti kuuluu pyrokseenimineraaleihin. Spodumeenistä erotetaan litiumia, jota voidaan käyttää akuissa. Spodumeenin kemiallinen kaava on $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$. (30)

Muskoviitti on yleinen killemineraali, jonka kemiallinen kaava on $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$. Muskoviitin ominaispaino on $2800 - 2900\text{ kg/m}^3$. (29)

TAULUKKO 2: Kvartsimaasälpä jauheen mineraalikoostumus (14)

Mineral	Wt%	Grain Count
Quartz	36.72	9085
Plagioclase	39.33	10241
Microcline	15.90	4259
Spodumene	1.22	1155
Muscovite	6.38	2499
Biotite	0.11	118
Clay	0.10	134
Garnet	0.00	0
Tourmaline	0.02	37
Titanite	0.01	34
Forsterite	0.00	1
Amphiboles	0.08	44
Epidote	0.01	6
Kyanite	0.02	13
Apatite	0.04	98
Sicklerite	0.00	1
Apa_sick_mix	0.00	1
Calcite	0.01	3
Sphalerite	0.00	2
Pyrite	0.00	1
Arsenopyrite	0.00	0
Columbite_tantalite	0.00	4
Iron	0.00	0
Unknown	0.04	186
Total	100.00	26882

3.1.2 Kemiallinen koostumus

Kvartsimaasälpä jauheen kemiallista koostumusta on aiemmin tutkittu. Suurin osa kvartsimaasälpä jauheesta on piidioksidia. Piidioksidia hyödynnetään esimerkiksi mikrosilikassa. Sillä voidaan vaikuttaa betonin lujuuteen ja tiiviyyden parantamiseen. Toiseksi eniten kvartsimaasälpä jauheessa on alumiinioksidia. Alumiinioksidi on huonelämpötilassa kiinteänä esiintyvä yhdiste, joka ei liukene veteen. Kolmanneksi eniten on natriumoksidia. Natriumoksidin vesiliuos on vahva emäs, joka reagoi veden kanssa muodostaen natriumhydroksidia. Kvartsimaasälpä jauheen kemiallinen koostumus on esitetty taulukossa 3.

(26, 27, 28)

TAULUKKO 3: Kvartsimaasälpä jauheen kemiallinen koostumus. (14)

Date:	21.09.	21.09.	21.09.	22.09.	22.09.	23.09.	23.09.
Li ₂ O	0,154	0,139	0,148	0,116	0,107	0,108	0,102
SiO ₂	77,5	77,5	77,4	77,9	77,7	77,6	77,2
TiO ₂	0.014	0.013	0.015	0.011	0.014	0.011	0.017
Al ₂ O ₃	13.6	13.5	13.6	13.3	13.4	13.4	13.6
Cr ₂ O ₃	0.0025	0.0016	0.0019	0.0013	0.0013	0.0012	0.0010
V ₂ O ₃	0.0009	0.0003	0.0009	0.0009	0.0006	0.0007	0.0001
FeO	0.20	0.18	0.19	0.17	0.18	0.16	0.20
MnO	0.005	0.006	0.006	0.004	0.005	0.003	0.005
MgO	0.05	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.05
CaO	0.262	0.260	0.263	0.247	0.260	0.212	0.307
Rb ₂ O	0.057	0.057	0.057	0.055	0.055	0.057	0.058
SrO	0.0051	0.0046	0.0047	0.0052	0.0047	0.0043	0.0054
BaO	0.006	0.005	0.004	0.004	0.005	0.002	0.003
Na ₂ O	4.70	4.86	4.78	4.83	4.84	4.77	4.81
K ₂ O	3.35	3.31	3.35	3.22	3.21	3.41	3.40
ZrO ₂	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001
P ₂ O ₅	0.137	0.135	0.135	0.131	0.131	0.133	0.139
OxS- umm	99.90	100.00	100.00	99.90	99.90	99.90	99.90

4 ITSETIIVISTYVÄ BETONI

Itsetiivistyvä betoni on tuoreena massana normaalia, tärytettävää betonia notkeampaa. Itsetiivistyvä betonointi on erikoisbetonointia, joka poikkeaa normaali-betonoinnista itsetiivistyvyytensä vuoksi. Itsetiivistyvän betonin käyttö on lisääntynyt viimeaikoine merkittävästi erityisesti elementtiteollisuudessa. Tyypillisesti IT-betonia käytetään valettaviin kohteisiin, jotka ovat ahtaita, monimuotoisia, tiheästi raudoitettuja tai ne sisältävät runsaasti varauksia. Tärytysvaiheen poisjäänti helpottaa ja nopeuttaa betonirakenteiden valua. IT-betonin positiivisia puolia ovat myös vähentynyt työvoiman tarve sekä alentuneet melutasot verrattaessa tärytystä vaativaan betonointiin. (32)

Poikkeavien ominaisuuksiensa vuoksi tuoretta IT-betonia ei voida testata samoin menetelmin kuin normaalia, tärytettävää betonia. IT-betonille onkin määritetty omat standardit laadun varmistamiseksi. IT-betonin käyttö muodostaa erityisvaatimuksia muottikalustolle. Notkea betonimassa tarvitsee tiiviin muotin. Esimerkiksi seiniä valettaessa tulee huomioida muotin alareunaan kohdistuva tavanomaista suurempi paine. (32)

IT-betonin runkoaines on yleensä maksimirakooltaan 12 tai 16 mm. IT-betonin koostumus eroaa normaali betonista myös siinä käytettävän hienoainesmäärän suhteen. Normaali betonin kiviaineksesta alle 2 mm:n raekokoiset muodostavat alle kolmanneksen. Itsetiivistyvässä betonissa alle 2 mm:n raekokoa on noin puolet. Alle 0,125 mm:n raekoon kiviaineksen osuus on noin 5-10 prosentin luokkaa. IT-betoneille tyypillistä ovat suuret sementtimäärät. IT-betoneissa voidaan käyttää samoja sementtilaatuja kuin normaalibetonissakin. IT-betonin valmistuksessa käytetään aina notkistimia, jotta vesi-sementti -suhde saadaan alhaiseksi ja rakenteet tiiviiksi. IT-betoneissa käytetään myös stabilisaattoreita, joilla aikaansaadaan parempia ominaisuuksia erottumisen välttämiseksi. (6, s. 6-12)

5 KVARTSIMAASÄLPÄJAUHEEN TESTAAMINEN

Kvartsimaasälpäjauheen soveltuvuuden testaamiseksi valmistettiin yhdeksän eri normaalin, tärytettävän betonin reseptiä sekä kolme itsetiivistyvän betonin reseptiä. Painumakoe vaatii vähintään kuuden litran annoskokoa, joten betonin testaamista varten päädyttiin valmistamaan kuuden ja puolen litran annoksia. Itsetiivistyvän betonin massat valmistettiin kymmenen litran annoksina. Lujuuskehityksen toteamiseksi jokaista massaa valettiin kolmeen eri muottiin, jotta saatiin testattua 3, 7 ja 28 vuorokauden puristuslujuus. Näiden lisäksi valettiin myös kolme 150 mm:n kuutiota, joilla testattiin paineellisen veden tunkeutumasyvyys 28 vuorokauden iässä.

5.1 Reseptien suhteittaminen

Betonimassojen valmistusresepteissä ensimmäiseksi lähdettiin miettimään keinoa, jolla kvartsimaasälpäjauheen vaikutuksesta saataisiin mahdollisimman vertailukelpoinen. Vertailtavuuden vuoksi suhteitettiin kolme erilaista betonimassaa Nykäsen menetelmää käyttäen. Vertailun vuoksi suhteitettiin yksi massa, jossa ei käytetty lainkaan kvartsimaasälpäjauhetta. Betonimassojen tavoitelujuudeksi asetettiin 30 MPa, joten suhteituslujuudeksi saatiin 20 prosenttia lisäämällä 36 MPa. Lisäys huomioi betonin epätasalaatuisuuden. Suhteituksessa hienoainespitoisuudeksi valittiin 4 prosenttia ja tavoitepainumaksi 150 mm. Koemassojen 1, 4 ja 5 reseptit suhteitettiin Nykäsen menetelmää käyttäen.

Koska kvartsimaasälpäjauheen vaikutus ei ollut ennalta tiedossa, luotiin lisää reseptejä sementin sekä kvartsimaasälpäjauheen määriä muuttamalla. Vertailtavuuden vuoksi kaikkien reseptien vesisementtisuhteeksi asetettiin 0,61. Reseptit 2 ja 3 saatiin lisäämällä kvartsimaasälpäjauheen määrää sekä vähentämällä sementin määrää. Reseptit 6, 7, 8 ja 9 saatiin vähentämällä kvartsimaasälpäjauheen määrää ja lisäämällä sementin määrää. Tärytettävien betonimassojen reseptit on esitetty taulukoissa 4-6.

TAULUKKO 4: Massojen 1, 4 ja 5 reseptit.

Ainesosa	Massa 1	Massa 4	Massa 5	Yksikkö
Sementti	354,5	347,0	354,0	kg
Kvartsimaasälpä jauhe	0,0	58,6	102,6	kg
Luonnonfilleri	274,8	0,0	0,0	kg
Kiviaines 0-8	594,9	921,2	864,2	kg
Kiviaines 6-12	869,7	784,3	785,1	kg
Vesi	216,7	212,0	216,0	litraa
Notkistin	0,0	0,0	0,0	Litraa
Ilma	2,0	2,0	2,0	%
Tilavuus	1000,0	1000,0	1000,0	Litraa

TAULUKKO 5: Massojen 2 ja 3 reseptit.

Ainesosa	Massa 2	Massa 3	Yksikkö
Sementti	324,7	329,9	kg
Kvartsimaasälpä jauhe	62,5	106,2	kg
Luonnonfilleri	0,0	0,0	kg
Kiviaines 0-8	897,0	841,5	kg
Kiviaines 6-12	867,6	868,5	kg
Vesi	195,8	199,9	litraa
Notkistin	0,0	0,0	Litraa
Ilma	2,0	2,0	%
Tilavuus	1000,0	1000,0	Litraa

TAULUKKO 6: Massojen 6, 7, 8 ja 9 reseptit.

Ainesosa	Massa 6	Massa 7	Massa 8	Massa 9	Yksikkö
Sementti	356,3	361,6	363,4	368,7	kg
Kvartsimaasälpä jauhe	54,4	99,1	49,1	93,4	kg
Luonnonfilleri	0,0	0,0	0,0	0,0	kg
Kiviaines 0-8	911,5	856,2	904,7	849,7	kg
Kiviaines 6-12	776,1	777,8	770,2	772,0	kg
Vesi	217,3	220,6	221,7	224,9	litraa
Notkistin	0,0	0,0	0,0	0,0	Litraa
Ilma	2,0	2,0	2,0	2,0	%
Tilavuus	1000,2	1000,2	1000,4	1000,3	Litraa

Koemassojen 10, 11 ja 12 reseptit on luotu tavoitteena valmistaa itsetiivistyvää betonia. Massa numero 10 on vertailumassa, joka ei sisällä lainkaan kvartsimaasälpäjauhetta. Massa numero 11 valmistetaan reseptillä, joka sisältää sekä luonnon hienoainesta, että kvartsimaasälpäjauhetta. Koemassan 12 reseptin luonnonkiviaineksesta on seulottu 0,125 mm:n alittava osuus pois. Seulomalla on kasvatettu kvartsimaasälpäjauheen osuutta betonimassassa. Itsetiivistyvien massojen vesi- ja sementtimäärät vakioitiin. Notkistinta käyttämällä betonimassat valmistettiin mahdollisimman lähelle toisiaan notkeutensa puolesta. Taulukossa notkistimen määrä on ilmoitettu prosentteina sideaineen määrästä. Itsetiivistyvien betonimassojen reseptit on esitetty taulukossa 7.

TAULUKKO 7: Massojen 10, 11 ja 12 reseptit.

Ainesosa	Massa 10	Massa 11	Massa 12	Yksikkö
Sementti	375,0	375,0	375,0	kg
Kvartsimaasälpäjauhe	0,0	135,4	216,5	kg
Luonnonfilleri	157,5	35,5	0,0	kg
Kiviaines 0-8	1195,0	1195,1	1159,3	kg
Kiviaines 6-12	454,0	454,0	452,3	kg
Vesi	180,0	180,0	180,0	litraa
Notkistin	5,0	5,0	5,0	Litraa
Ilma	2,0	2,0	2,0	%
Tilavuus	1000,0	1000,0	1000,0	Litraa

5.2 Koemassojen valmistus

Betonimassan valmistus aloitettiin kiviaineksen kuivatuksella. Kiviaines asetettiin uuniin kuivumaan kahdeksaksi tunniksi 105 °C:n päivää ennen massojen valmistamista. Uunikuivatuksella päästiin eroon absorboituneen veden vaikutuksesta ja saatiin näin laskettua tarkka vesimäärä. Uunit ajastettiin niin, että kiviaines ei ollut kuumaa valupäivänä. Kuivatuksen jälkeen osa 0-8 mm raekoon kiviaineksesta kuivaseulottiin koneellisesti. Karkea 6-12 mm raekoon kiviaines seulottiin käsin. Seulonnan avulla kiviaineksesta poistettiin 0,125 mm:n seulan läpäisevä osuus. Koemassoissa 3, 5, 7, 9 ja 12 kvartsimaasälpäjauheen osuus haluttiin mahdollisimman suureksi, joten näissä koemassoissa käytettiin seulotua kiviainesta.



KUVAT 1 ja 2: Kuivaseulontaan käytetty laite ja 0,125 mm:n seulan läpäissyt kiviaines.

Vesi lisättiin, kun kuiva-ainekset oli kaadettu betonimyllyyn. Ensimmäistä koemassaa varten betonimylly kostutettiin seinämiltä kostealla pyyhkeellä, jotta tulokset eivät vääristyisi. Tärytettäviä betonimassoja sekoitettiin kolmen minuutin ajan ja itsetiivistyviä massoja kymmenen minuutin ajan. Betonimylly pysäytettiin puolen välin kohdalla ja seinämille painautunut hienoaines kaavittiin lastalla, jotta massat olisivat mahdollisimman vertailukelpoisia.

Sekoituksen jälkeen betonimassoille suoritettiin tuoreen betonin testit. Testien jälkeen koemassat valettiin 100 mm:n kuutiomuotteihin. Koemassat 1-9 tärytettiin kahdessa kerroksessa noin neljän sekunnin ajan. Valun jälkeen koemassat tasoitettiin muotteihinsa ja asetettiin muovin alle kovettumaan. Kolmen vuorokauden jälkeen muotit purettiin ja koekappaleet asetettiin vesialtaaseen tasapuolisten olosuhteiden takaamiseksi.

5.2.1 Ainesosat

Testeissä käytettiin Keliber Oy:n toimittamaa kvartsimaasälpäjauhetta. Kokeissa hyödynnettiin Oulun ammattikorkeakoulun laboratorion kvartsimaasälpäjauheelle määrittämää rakeisuuskäyrää ja kiintotiheyttä.



KUVA 3: Keliber Oy toimitti kvartsimaasälpäjauheen laboratoriolle suursäkissä.

Koemassojen sementiksi valittiin Rapidsementti. Rapidsementti on CE hyväksytty pikasementti. Nopeasti kovettuvaa Rapid -sementtiä päädyttiin käyttämään, jotta kovettuneen betonin tuloksia saataisiin mahdollisimman aikaisin. Rapidsementti on portlandseossementti, joka sisältää seosaineta 6-15 prosenttia, joka muodostuu kalkkikiven määrästä.

Testeissä käytettiin standardin mukaan CE -merkittyjä, Rudus Oy:n toimittamia 0-1, 0-8 sekä 6-12 mm:n raekoon omaavia kiviaineksia.

Testeissä käytettiin Oulun vesijohtoverkoston juomakelpoista vettä.

5.3 Tuore betoni

Massan työstettävyyden arvioinnin vuoksi betonimassoille tehdään tuoreen betonin testauskokeet. Kokeiden perusteella voidaan arvioida kvartsimaasälpäjauheen vaikutusta betonimassan työstettävyyteen valuvaiheessa. Tuoreille betonimassoille suoritettiin painuma-, tiheys-, painuma – leviämä-, ja ilmamääräkokeet.

5.3.1 Painuma

Painumakoe soveltuu käytettäväksi, kun painuman vaihteluväli on 10 - 210 mm:n välillä. Painuman muutoksen jatkuessa yli minuutin ajan muotin poistamisen jälkeen, ei voida painumakoetta käyttää notkeuden määrittämiseen. Painumakoe ei myöskään ole käyttökelpoinen, mikäli suurin raekoko on yli 40 mm. Suhteituksessa tavoitepainumaksi asetettiin 150 mm, jotta painumakoe soveltuisi käytettäväksi työstettävyyden arvioimiseksi. Myöskään suurimman raekoon rajoitus ei ylity yhdessäkään reseptissä. Betonimassaa luokiteltaessa painumakoella S1 luokka on kaikkein jäykintä massaa ja S5 luokka kaikkein notkeinta. Taulukossa 8 on määriteltynä painumaluokkien rajat.

TAULUKKO 8: Painumaluokat (3, s. 34)

Luokka	Painuma [mm]
S1	10...40
S2	50...90
S3	100...150
S4	160...210
S5	≥220

Painumakoe suoritettiin standardin SFS-EN 12350-2 mukaan. Kokeessa kuuden litran tilavuuden omaava kartio täytettiin betonimassalla kolmessa eri kerroksessa. Jokainen kerros tiivistettiin sulloinsauvalla sullomalla 25 kertaa. Kartion täyttämisen jälkeen kartio nostettiin sivuun ja vatupassia sekä mittanauhaa hyödyntäen mitattiin painuma-arvo. Kuvassa 4 näkyy testitilanteen painuman mittaaminen.



KUVA 4: Painuman mittaaminen

Koemassat 1A, 4 ja 5A ovat reseptiltään lähinnä toisiaan. Kvartsimaasälpä jauhetta sisältäneet 4 ja 5A koemassat saavuttivat pienemmän painuman kuin vertailumassa. Painumakokeen tuloksista voidaan todeta, että kvartsimaasälpä jauhe heikentää hieman betonin työstettävyyttä. Työstettävyyden heikentyminen on osittain seurausta kvartsimaasälpä jauheen hienojakoisuudesta. Nykäsen suhteitusmenetelmässä raekoko huomioidaan vain 0,125 mm saakka. Suurin osa kvartsimaasälpä jauheesta läpäisee 0,125 mm:n seulan. Työstettävyyttä voidaan kuitenkin parantaa notkistimia käyttämällä.

TAULUKKO 9: Painumakokeen tulokset.

Tunnus	Painuma	Painuma- luokka	Kvart- simaasälpä jau- heen määrä [%]	Kvart- simaasälpä jau- heen määrä [kg/m ³]
Massa 1A	130	S3	-	-
Massa 2	175	S4	2,7	62,5
Massa 3	75	S2	4,5	106,2
Massa 4	90	S2	2,5	58,6
Massa 5A	130	S3	4,4	102,6
Massa 6A	120	S3	2,4	54,4
Massa 7	160	S4	4,3	99,1
Massa 8	150	S3	2,1	49,1
Massa 9	175	S4	4,0	93,4

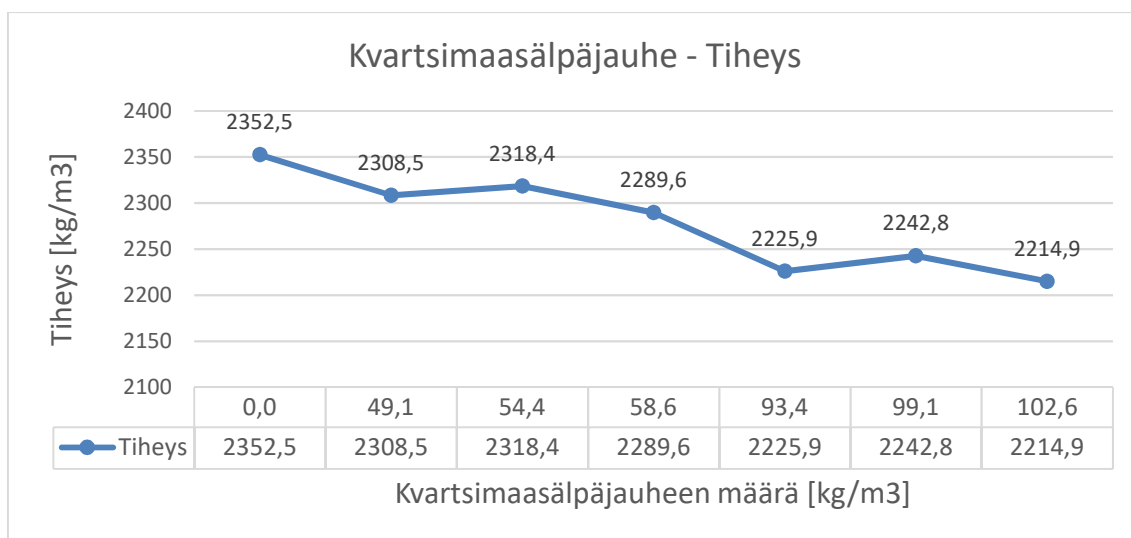
5.3.2 Tiheys

Betonimassojen testausten koeohjelmassa massoille määriteltiin tiheys standardin SFS-EN 12390-7 mukaan. Tiheyden mittauksessa tuore betonimassa tiivistettiin jäykkään ja vesitiiviiseen astiaan, jonka tilavuus ja paino ennalta tunnettiin. Astia täytettiin kahdessa kerroksessa normaalibetonia testattaessa ja yhdessä kerroksessa, kun testattiin itsetiivistyvää betonia. Itsetiivistyvää betonia ei luonnollisesti tärytetty. Sopivalla tiivistämisellä varmistettiin, että huokostusilma ei poistu betonimassasta. Lopullinen tiheyden arvo saatiin, kun tiivistynyt betonimassa punnittiin ja vähennettiin muotin paino. Kun saatiin selville betonimassan paino, jaettiin se muotin tilavuudella. Massat joiden tunnuksessa on kirjain ”B” tiivistettiin noin kahdeksan litran tilavuuden omaavaan astiaan tärysausvalla täryttämällä. Loput massat tiivistettiin noin litran tilavuuden omaavaan astiaan. Pienempään astiaan massat tiivistettiin sulloinsauvalla sullomalla. Testitulosten perusteella voidaan todeta, että kvartsimaasälpäjauheen määrän lisääntyessä betonin tiheys laskee tasaisesti.

TAULUKKO 10: Tiheyskokeen tulokset.

Tunnus	Märkätiheys [kg/m ³]	Kvart-simaasälpäjauheen määrä [%]	Kvart-simaasälpäjauheen määrä [kg/m ³]
Massa 1B	2352,5	0,0	0,0
Massa 4	2289,6	2,5	58,6
Massa 5A	2214,9	4,4	102,6
Massa 5B	2153,4	4,4	102,6
Massa 6A	2318,4	2,4	54,4
Massa 6B	2216,1	2,4	54,4
Massa 7	2242,8	4,3	99,1
Massa 8	2308,5	2,1	49,1
Massa 9	2225,9	4,0	93,4
Massa 10	2381,6	0,0	0,0
Massa 11	2149,6	5,7	135,4
Massa 12	2001,1	9,1	216,5

KUVA 5: Tiheys laskee kvartsimaasälpäjauheen määrän lisääntyessä.



5.3.3 Painuma-leviämä

Itsetiivistyvän betonin testausmenetelmät poikkeavat normaaleista betonin testausmenetelmistä itsetiivistyvän betoniin notkeuden vuoksi. Massat 10, 11 ja 12 valmistettiin itsetiivistyviksi. Näille kolmelle massalle suoritettiin standardin SFS-EN 12350-8 mukainen painuma-leviämä koe. Painuma-leviämä kokeessa kuu- den litran kartio täytettiin betonimassalla. Koe suoritettiin tasaisella, kostutetulla alustalevyllä, jossa oli metallinen pinta. Painuma-leviämä kokeessa mitattavia arvoja ovat leviämä, t500 -aika ja suurimpaan leviämään kulunut aika. Ensimmäisenä mitattiin aika kartion nostosta 500 mm:n leviämään viskositeetin mit- taamiseksi. Tämän jälkeen mitattiin suurin leviämä ja leviämän saavuttamiseen kulunut aika notkeuden toteamiseksi.

Jotta itsetiivistyvät betonimassat saatiin valmistettua samaan notkeusluokkaan, jouduttiin kvartsimaasälpäjauhetta sisältäneisiin betonimassoihin lisäämään enemmän notkistinta. Mitattavien arvojen lisäksi painuma – leviämä -kokeessa arvioitiin erottumista. Koemassoista kvartsimaasälpää sisältämätön, 10 koebe- tonimassa pääsi erottumaan leviämä kokeessa. Massoissa 11 ja 12 ei havaittu erottumista. Kaikkien itsetiivistyvien betonimassojen notkeus asettui painuma –

leviämäluokkaan SF2. Painuma – leviämäluokkien rajat näkyvät taulukossa 11 ja kokeen tulokset taulukossa 12.

TAULUKKO 11: Painuma – leviämä luokat. (3, s. 35)

Luokka	Painuma - leviämä [mm]
SF1	550...650
SF2	660...750
SF3	760...850

TAULUKKO 12: Painuma – leviämäkokeen tulokset.

Tunnus	Painuma - leviämä [mm]	Leviämä aika [s]	T500-aika [s]	Kvart-simaasälpäjauheen määrä [%]	Kvartsimaasälpäjauheen määrä [kg/m ³]	Notkistimen määrä [%]
Massa 10	680	65	9,0	0,0 %	0,0	3,5
Massa 11	720	85	6,0	5,7 %	135,4	4,5
Massa 12	670	95	8,0	9,1 %	216,5	5,1

5.3.4 Ilmamäärä

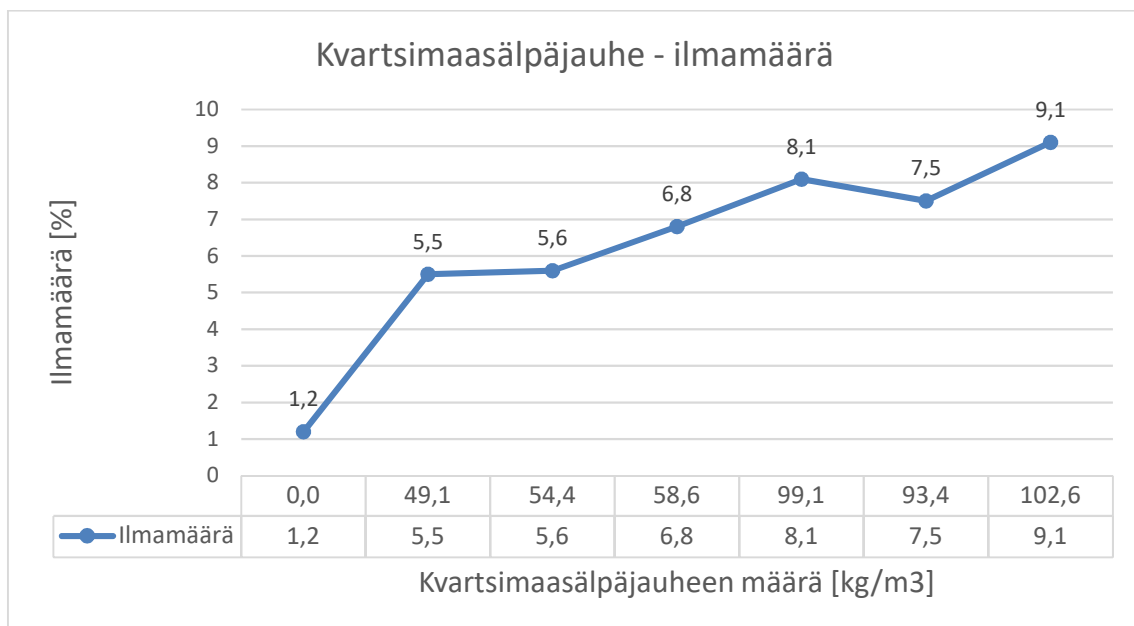
Ilmamäärällä tarkoitetaan tiivistetyn betonin sisältämää ilmapitoisuutta, joka ilmaistaan tyypillisesti yksiköllä dm³/m³. Koeohjelman betonimassoille suoritettiin ilmamääräkoelä painemittarimenetelmällä. Painemittarimenetelmässä mittarin astia täytettiin kahdessa kerroksessa betonimassalla ja kumpikin kerros tiivistettiin. Tiivistyksen jälkeen astian reunat puhdistettiin ja kansi asennettiin paikalleen. Kannen ja betonimassan väliin jäävä tyhjätila täytettiin vedellä kannen venttiilien kautta. Täytön jälkeen venttiilit suljettiin ja mittaus suoritettiin. Massat joiden tunnuksessa on kirjain "B" mitattiin noin kahdeksan litran tilavuuden omaavalla mittarilla. Loput massat mitattiin laastin ilmamäärän painemittarilla pienemmän tilavuuden vuoksi. Isompaan astiaan betonimassa tiivistettiin tärysauvalla. Pienempään astiaan massat tiivistettiin sulloinsauvalla sullomalla.

Ilmamääräkokeen testitulokset osoittavat, että kvartsimaasälpäjauheen määrän kasvaessa myös ilmamäärä lisääntyy. Hyvin tiivistetty betoni sisältää tavanomaisesti noin 1-3 prosenttia ilmaa, mikäli huokostimia ei ole käytetty. On huomattavaa, että betonin ilmamäärä on pienempi kuin betonin kokonaishuokosmäärä betonin kovettumisreaktioista johtuen. Kvartsimaasälpäjauhetta sisältäneiden koemassojen ilmapitoisuudet kohosivat huomattavan korkealle.

TAULUKKO 13: Ilmamääräko.

Tunnus	Ilmamäärä [%]	Kvartsimaasälpäjauhe [%]	Kvartsimaasälpäjauhe [kg/m ³]
Massa 1B	1,2	0,0	0,0
Massa 4	6,8	2,5	58,6
Massa 5A	9,1	4,4	102,6
Massa 5B	9,1	4,4	102,6
Massa 6A	5,6	2,4	54,4
Massa 6B	6,6	2,4	54,4
Massa 7	8,1	4,3	99,1
Massa 8	5,5	2,1	49,1
Massa 9	7,5	4,0	93,4

KUVA 6: Kvartsimaasälpäjauheen määrän vaikutus ilmamäärään.



5.4 Kovettunut betoni

Kovettuneille betonikoekappaleille suoritettiin standardien mukaiset puristuslujuus-, tiheys- ja paineellisen veden tunkeutumasyvyyskokeet. Kovettuneen betonin kokeilla pyrittiin vertailemaan kvartsimaasälpäjauheen vaikutusta kovettuneen betonin ominaisuuksiin

5.4.1 Puristuslujuus

Puristuslujuuskokeella selvitettiin miten kvartsimaasälpäjauheen käyttö vaikuttaa betonin lujuusominaisuuksiin. Koekappaleille suoritettiin 3, 7 ja 28 vuorokauden puristuslujuuskokeet standardin SFS-EN 12390-3 mukaisesti. Puristuskokeet suoritettiin puristuslaitteilla, jotka täyttävät standardin SFS-EN 12390-3 asettamat vaatimukset. Betonin lujuusluokka määritellään puristuslujuuskokeen perusteella.

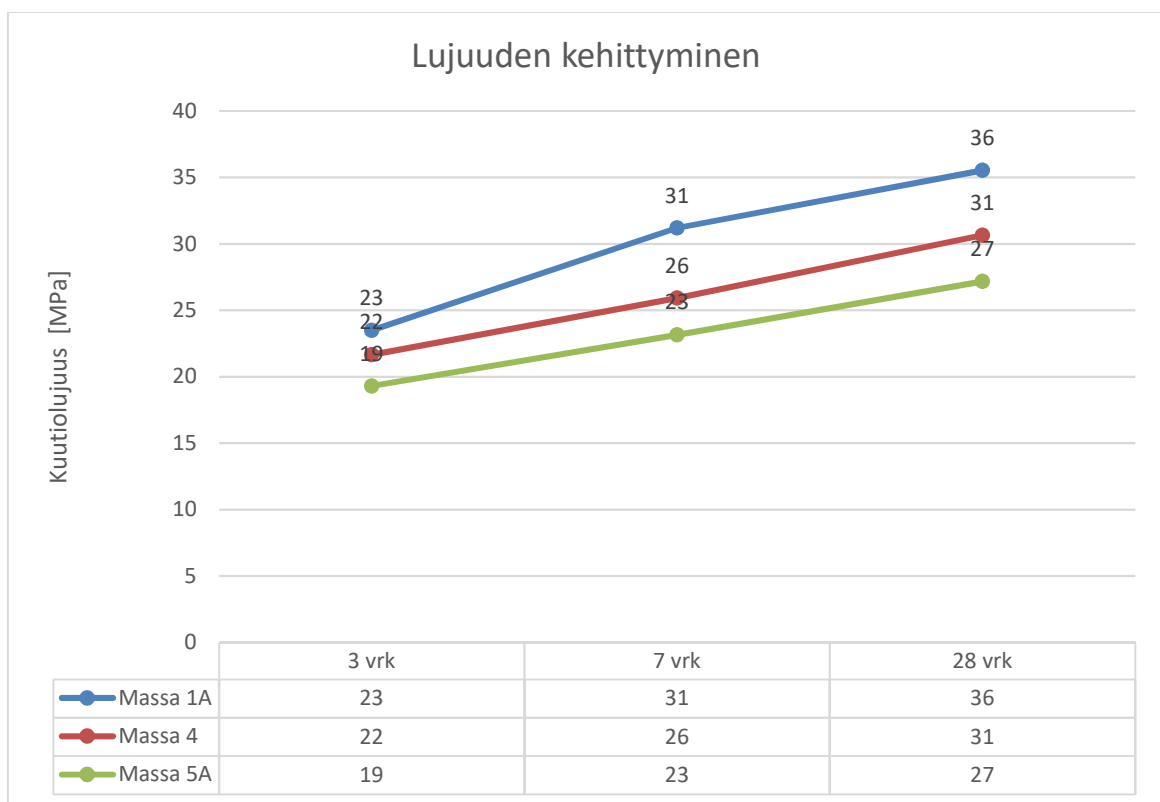
Tutkitun kvartsimaasälpäjauheen käyttäminen betonin valmistuksessa heikentää betonin lujuusominaisuuksia. Puristuskokeissa yksikään kvartsimaasälpäjauhetta sisältäneistä betonimassoista ei yltänyt vertailubetonin tasolle. Kvartsimaasälpäjauhetta sisältäneistä massoista korkeimpaan, 28 vuorokauden puristuslujuuden arvoon ylsi koemassan 4 koekappale. Massa numero 4 suhteitettiin Nykäsen menetelmää käyttäen.

Itsetiivistyneet betonikoekappaleet saavuttivat normaaleja, tärytettyjä betonikoekappaleita korkeammat puristuslujuuden arvot. Korkeammat lujuudet ovat seurausta pienemmästä vesi-sementtisuhteesta sekä runsaasta notkistimien käytöstä. Korkeimman puristuslujuuden arvon saavutti vertailumassa, joka ei sisältänyt lainkaan kvartsimaasälpäjauhetta. Taulukossa 14 näkyy betonikoekappaleiden puristuslujuudet ja kuvassa 7 suhteitettujen betonien lujuudenkehitys.

TAULUKKO 14: Koekappaleiden puristuslujuudet 100 mm:n kuutiolla mitattuna.

Tunnus	PURISTUSLUJUUS [MPa]			Kvartsimaasälpä- jauhe [%]	Kvartsimaasälpä- jauhe [kg/m ³]
	3 vrk	7 vrk	28 vrk		
Massa 1A	23	31	36	0,0 %	0,0
Massa 1B	-	37	-	0,0 %	0,0
Massa 2	17	22	26	2,7 %	62,5
Massa 3	12	14	20	4,5 %	106,2
Massa 4	22	26	31	2,5 %	58,6
Massa 5A	19	23	27	4,4 %	102,6
Massa 5B	-	20	-	4,4 %	102,6
Massa 6A	23	26	30	2,4 %	54,4
Massa 6B	-	24	-	2,4 %	54,4
Massa 7	18	21	25	4,3 %	99,1
Massa 8	22	25	29	2,1 %	49,1
Massa 9	18	21	24	4,0 %	93,4
Massa 10	34	41	47	0,0 %	0,0
Massa 11	32	38	43	5,7 %	135,4
Massa 12	29	32	36	9,1 %	216,5

KUVA 7: Nykäsen menetelmällä suhteitettujen koekappaleiden lujuudenkehitys.



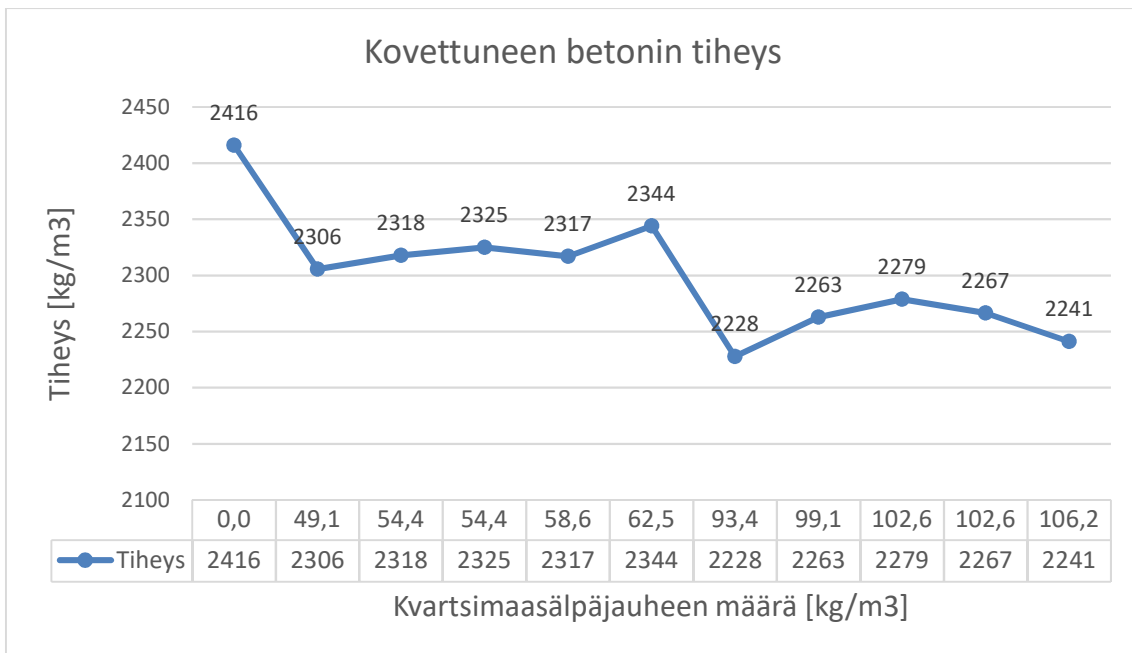
5.4.2 Tiheys

Puristuslujuuskokeiden yhteydessä kappaleet mitattiin ja punnittiin, jotta kappaleille saatiin määritettyä tiheys. Tiheyskoe suoritettiin standardin SFS-EN 12390-7 mukaisesti. Vertailukoekappaleiden tiheydet osoittautuivat suuremmiksi kuin kvartsimaasälpäjauhetta sisältäneiden koekappaleiden tiheydet. Tiheyden laskeminen kvartsimaasälpäjauheen määrän kasvamisen myötä on oletettavasti seurausta kasvaneesta ilmamäärästä.

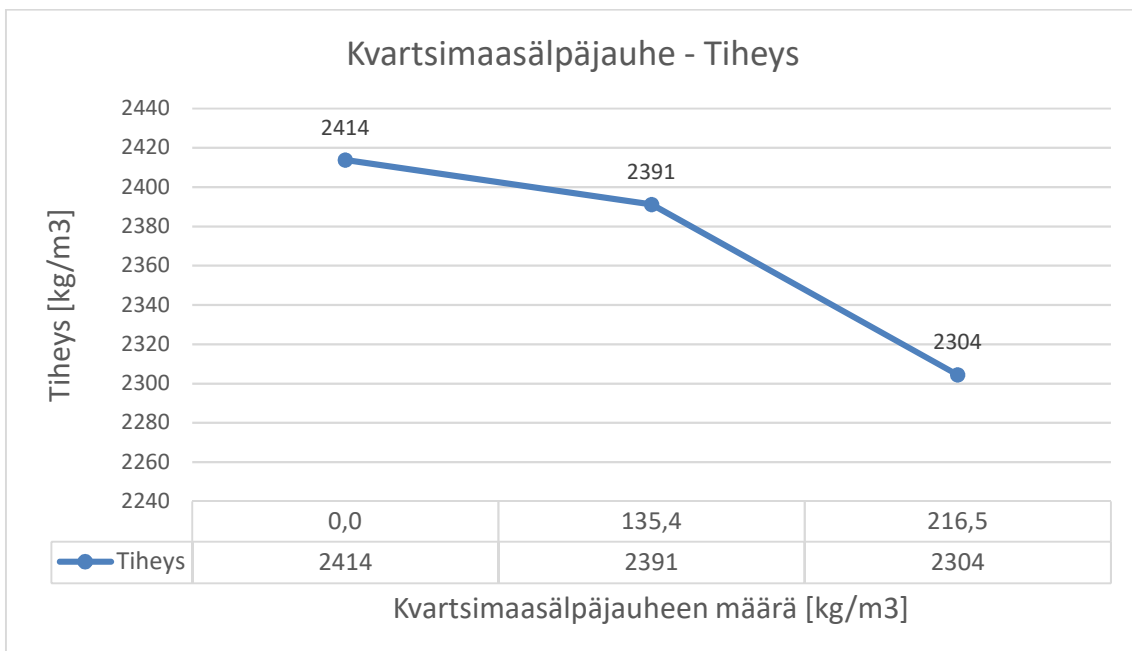
TAULUKKO 15: Koekappaleiden tiheys seitsemän vuorokauden iässä.

Tunnus	Tiheys [kg/m ³]	Kvart- simaasälpäjau- heen määrä [%]	Kvart- simaasälpäjau- heen määrä [Kg]
Massa 1A	2410	-	-
Massa 1B	2416	0,0	0,0
Massa 2	2344	2,7	62,5
Massa 3	2241	4,5	106,2
Massa 4	2317	2,5	58,6
Massa 5A	2279	4,4	102,6
Massa 5B	2267	4,4	102,6
Massa 6A	2318	2,4	54,4
Massa 6B	2325	2,4	54,4
Massa 7	2263	4,3	99,1
Massa 8	2306	2,1	49,1
Massa 9	2228	4,0	93,4
Massa 10	2414	0,0	0,0
Massa 11	2391	5,7	135,4
Massa 12	2304	9,1	216,5

KUVA 8: Kvartsimaasälpä jauheen vaikutus kovettuneen betonin tiheyteen.



KUVA 9: Kvartsimaasälpä jauheen vaikutus kovettuneen itsetiivistyneen betonin tiheyteen.



5.4.3 Paineellisen veden tunkeutumasyvyys

Paineellisen veden tunkeutumasyvyyskoe suoritettiin standardin SFS-EN 12390-8 mukaisesti. Kokeessa betonimassat valettiin kahdessa kerroksessa 150 mm:n kuutiomuottiin. Kumpikin kerros tärytettiin sauvatäryttimellä. Betonimassojen pinnat tasoitettiin muotin yläpinnan tasalle ja valut asetettiin kovettumaan muovin alle. Kolmen vuorokauden lujittumisen jälkeen muotit purettiin ja betonikoekappaleet asetettiin altaaseen jatkamaan kovettumista. Kunnes betonikoekappaleet saavuttivat 28 vuorokauden iän, suoritettiin paineellisen veden tunkeutumasyvyyskoe.

Kokeessa betonikoekappaleet altistettiin 72 tunnin ajaksi 500 kPa vedenpainelle. Paineistuksen jälkeen koekappaleet halkaistiin ja mitattiin paineellisen veden tunkeutumasyvyys millimetrin tarkkuudella. Pienimmän tunkeutumasyvyuden saavutti vertailumassa, joka ei sisällä lainkaan kvartsimaasälpäjäuhetta. Kvartsimaasälpäjäuhetta sisältäneiden massojen veden tunkeutumat olivat suurempia, mutta silti selvästi sallituissa rajoissa. Betoninormin mukaan betoni katsotaan veden pitäväksi, kun tunkeutuma on standardin mukaan määrättyä alle 100 mm.

TAULUKKO 16: Paineellisen veden tunkeutumasyvyys.

Tunnus	Tunkeutuma [mm]	Kvartsimaasälpäjäuheen määrä [%]	Kvartsimaasälpäjäuheen määrä [kg/m ³]
Massa 1B	31	0,0	0,0
Massa 5B	37	4,4	102,6
Massa 6B	60	2,4	54,4



KUVA 10: Paineellisen veden tunkeutumasyvyiden testilaite.



KUVA 11: Paineellisen veden tunkeutumat ja mittalaite.

6 YHTEENVETO

Litiumkarbonaatin tuottamisen yhteydessä syntyy kvartsimaasälpäjauhetta. Opinnäytetyössä selvitettiin mahdollisuutta käyttää malmin rikastuksen yhteydessä syntyvää kvartsimaasälpäjauhetta betonin valmistuksessa hienoaineksenä. Hyväksi todetuilla ja standardeihin perustuvilla menetelmillä selvitettiin Keliber Oy:n toimittaman kvartsimaasälpäjauheen soveltuvuus betonin hienoainekseksi.

Kokeissa kvartsimaasälpäjauheen havaittiin heikentävän hieman betonin työstettävyyttä. Betonimassojen kangistuminen saattaa osittain johtua kvartsimaasälpäjauheen hienojakoisuudesta verrattuna luonnonfilleriin. Suhteituk- sessa raejakauma huomioitiin vain 0,125 mm:n raekokoon saakka. Menetettyä työstettävyyttä voidaan kuitenkin paikata käyttämällä notkistimia. Itsetiivistyvien betonimassojen kokeissa havaittiin, että kvartsimaasälpäjauhetta sisältäneet re- septit toimivat hyvin notkistimien kanssa, sillä veden erottumista ei päässyt ta- pahtumaan.

Kokeet osoittivat, että tutkittu kvartsimaasälpäjauhe lisää voimakkaasti ilma- määrää betonissa. Jo pienemmällä kvartsimaasälpäjauheen määrillä saavutettiin samoja ilmamääriä kuin huokostinta käytettäessä. Kasvanut ilmamäärä heiken- tää betonin lujuusominaisuuksia. Puristuslujuuden kokeet suoritettiin yksittäisillä betonikoekappaleilla, joten ensimmäiset kokeet ovat suuntaa antavia. Tiedetään kuitenkin, että kvartsimaasälpäjauhe lisää ilmamäärää, joten lujuudet myös heikkenevät. Kvartsimaasälpäjauheen käyttö hienoaineksenä betonissa ei lisän- nyt merkittävästi veden tunkeutumasyvyvyyttä. Veden tunkeutuma pysyi alle 100 mm:n, eli myös kvartsimaasälpäjauhetta käyttämällä voidaan valmistaa veden- pitävää betonia. Kvartsimaasälpäjauheen vaikutusta pakkasenkestävyyteen ei testattu tässä opinnäytetyössä.

Tutkimusten edetessä huomattiin, että Keliber Oy:n toimittamalla kvart- simaasälpäjauheella on taipumusta aiheuttaa veden voimakasta vaahtoutu-

mista. Vaahtoutumisen syyksi epäiltiin rikastusprosessista peräisin olevia kemikaalijäämiä. Kiviainekseen jääneiden kemikaalien takia kvartsimaasälpäjauheen käytöllä betonin valmistuksessa saattaa olla arvaamattomia vaikutuksia etenkin käytettäessä lisäaineita. Kvartsimaasälpäjauheen sisältämien kemikaalijäämien määrät saattavat vaihdella, joten kvartsimaasälpäjauheen käyttö tällaisenaan ei ole suositeltavaa.

Kvartsimaasälpäjauheen puhdistaminen kemikaalijäämistä voisi mahdollistaa kiviaineksen hallitun käytön betonin valmistuksessa. Suosittelemme Keliber Oy:n kvartsimaasälpäjauheen tutkimista kemikaalijäämistä puhdistettuna. Mikäli ilmämäärät saadaan hallintaan, voidaan kvartsimaasälpäjauhetta todennäköisesti käyttää sekä itsetiivistyvän että normaalin, tärytettävän betonin valmistuksessa. Hienojakoisuuden vuoksi kvartsimaasälpäjauhetta voitaisiin käyttää suurempia määriä itsetiivistyvässä betonissa.



KUVAT 12 ja 13: Vettä suihkutettaessa kvartsimaasälpäjauhe vaahtosi voimakkaasti.

7 LÄHTEET

1. BY 43: Betonin kiviainekset 2008. 2009. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.
2. BY 50: Betoninormit 2012. 2013. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.
3. BY 65: Betoninormit 2016. 2016. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.
4. BY 201: Betonitekniikan oppikirja 2004. 2004. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.
5. BY301: Betonin mikrosuhteitus 1992. Jyväskylä: Fescon Oy.
6. ITB Itsetiivistyvä betoni 2004. 2004. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.
7. RIL 119-1979. 1979. Betonitekniikka. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.
8. Pisto, Ville 2016. Betoni vaihtuu Suomessa vihreäksi – voi muuttaa koko rakentavan maailman. 2016. Saatavissa: <http://yle.fi/uutiset/3-8991704>. Hakupäivä 20.11.2016.
9. Juutilainen, Jouko 2014. Sementin korvike on ekokeksintö. Savon Sanomat. Saatavissa: <http://www.savonsanomat.fi/talous/Sementin-korvike-on-ekokeksint%C3%B6/497265>. Hakupäivä 18.11.2016.
10. Keliber Oy. Saatavissa: <http://www.keliber.fi>. Hakupäivä 18.11.2016.
11. Finnsementti Oy. Saatavissa: <http://www.finnsementti.fi>. Hakupäivä 18.11.2016.
12. Betoniteollisuus ry. Saatavissa: <http://www.betoni.com>. Hakupäivä 19.11.2016.

13. Sirén, Olle 2017. Keliber Oy.
14. Tanskanen, Pekka 2017. Minscime oy.
15. SFS-EN 12350-1 Tuoreen betonin testaus. Osa 1: Näytteenotto. 2009. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
16. SFS-EN 12350-2 Tuoreen betonin testaus. Osa 2: Painuma. 2009. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
17. SFS-EN 12350-6 Tuoreen betonin testaus. Osa 6: Tiheys. 2009. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
18. SFS-EN 12350-7 Tuoreen betonin testaus. Osa 7: Ilmamäärä. 2009. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
19. SFS-EN 12350-8 Tuoreen betonin testaus. Osa 8: Itsetiivistyvä betoni. Painuma-leviämä. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
20. SFS-EN 12390-1 Kovettuneen betonin testaus. Osa 1: Muoto, mitat ja muut koekappaleiden ja muottien vaatimukset. 2013. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
21. SFS-EN 12390-2 Kovettuneen betonin testaus. Osa 2: Koekappaleiden valmistus ja säilytys lujuustestejä varten. 2009. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
22. SFS-EN 12390-3 Kovettuneen betonin testaus. Osa 3: Koekappaleiden puristuslujuus. 2002. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
23. SFS-EN 12390-4 Kovettuneen betonin testaus. Osa 4: Vaatimukset testauskoneille. 2000. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
24. SFS-EN 12390-7 Kovettuneen betonin testaus. Osa 7: Kovettuneen betonin tiheys. 2009. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

25. SFS-EN 12390-9 Kovettuneen betonin testaus. Osa 9: Paineellisen veden tunkeutumasyvyys. 2009. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
26. Semtu Oy. Saatavissa: <https://www.semtu.com/files/5813/3413/3392/Elkem-microsilica-920D-esite.pdf>. Hakupäivä 1.3.2017
27. Alumiinioksidin kansainvälinen kemikaalikortti. Saatavissa: <http://kappa.ttl.fi/kemikaalikortit/khtml/nfin0351.htm>. Hakupäivä 1.3.2017
28. Natriumoksidin kansainvälinen kemikaalikortti, <http://kappa.ttl.fi/kemikaalikortit/khtml/nfin1653.htm>. Hakupäivä 1.3.2017
29. Suomen Kansallinen Geologian komitea. Saatavissa: <http://www.geologia.fi>. Hakupäivä 12.3.2017
30. Geologian tutkimuskeskus. Saatavissa: <http://spinelli.gtk.fi/>
31. Kääriäinen, Hannu 2015. T510103 Betonitekniikka 1, 3op. Luentomateriaalit keväällä 2015. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
32. Kääriäinen, Hannu 2017. T512605 Betonitekniikka 2, 5op. Luentomateriaalit keväällä 2017. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
33. Perälä, Esa 2017. Oulun ammattikorkeakoulun laboratorio.

LIITTEET

Liite 1: Koemassan 1 suhteitus.

Liite 2: Koemassan 4 suhteitus.

Liite 3: Koemassan 5 suhteitus.

Liite 4: Betonimassojen reseptit.

Liite 5: Tuoreen betonin testitulokset.

Liite 6: Kovettuneen betonin testitulokset.

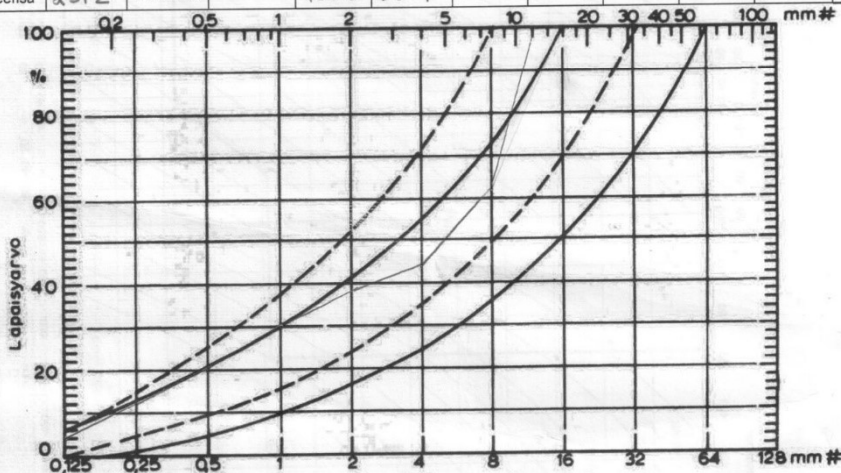
BETONIN KOOSTUMUS

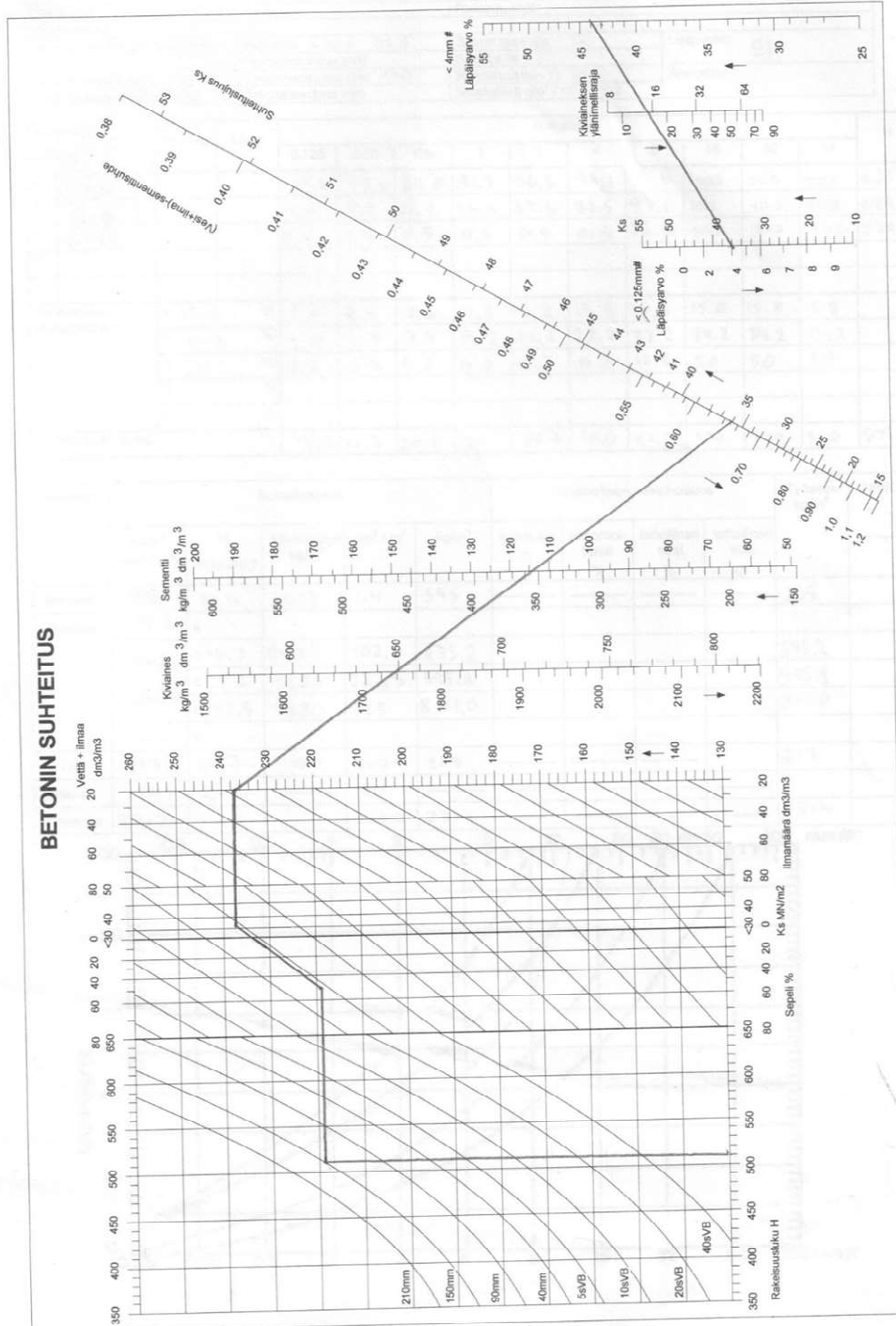
MASSA 11

Rakentaja				Rakennustyö			
Rakenneosat							
Betonin luokka ja nimellislujuus		Sementti Rapid 42,5		Suurin raekoko 12		Lisäaineet EI	
Tavoitelujuus MN/m ² 36		Tavoitepainuma mm 150		Sepelliä %		Annostus	
Suhteituslujuus MN/m ² 36		Tavoiteviäjä mm		Rakeisuusluku H 510		Ilmäärä dm ³ /m ³ 20	

Kiviainekset	Humus	Liete	Rakeisuus										H
			0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64	
a	Filleri		17,6	53,0	80,0	91,7	96,5	98,1	99,6	100	100	100	836,5
b	0-8		3,0	7,9	21,7	44,4	67,6	82,5	93,1	100	100	100	624,2
c	6-12		0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	25,6	100	100	100	328,5
d													
e													
Kiviainesten yhdistäminen	a	15,8 %	2,8	8,4	12,6	14,5	15,2	15,5	15,7	15,8	15,8	15,8	
	b	34,2 %	1,0	2,7	7,4	15,2	23,1	28,2	33,2	34,2	34,2	34,2	
	c	50 %	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	12,8	50	50	50	
	d	%											
	e	%											
Yhdistetty kiviaines			4,0	11,3	20,3	30	38,6	44,0	61,7	100	100	100	509,9

Aineosat	Suhteitusseos					Kiviaineksen vesipitoisuus				Työseos kg/m ³	ANNOS m ³
	kg/m ³ (dm ³ /m ³)	% tilavuus	kiintotiheys kg/m ³	dm ³ /m ³	kg/m ³	kokonais %	absorboitunut %	tehollinen vesi %	tehollinen vesi kg		
Sementti	355	11,4	3100	114	355	-----	-----	-----	-----	355	
Kiviaines	a										
	b	1740	10,3	2680	102,7	275,2				275,2	
	c	(650)	22,2	2680	222,3	595,8				595,8	
	d		32,5	2680	325	871,0				871,0	
	e										
Vesi	217	21,7	1000	217	217	-----	-----	-----	-----	217	
Ilma	(20)	2	-----	20	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
Yhteensä	2312	-----	-----	1000	2314	-----	-----	-----	-----	2314	





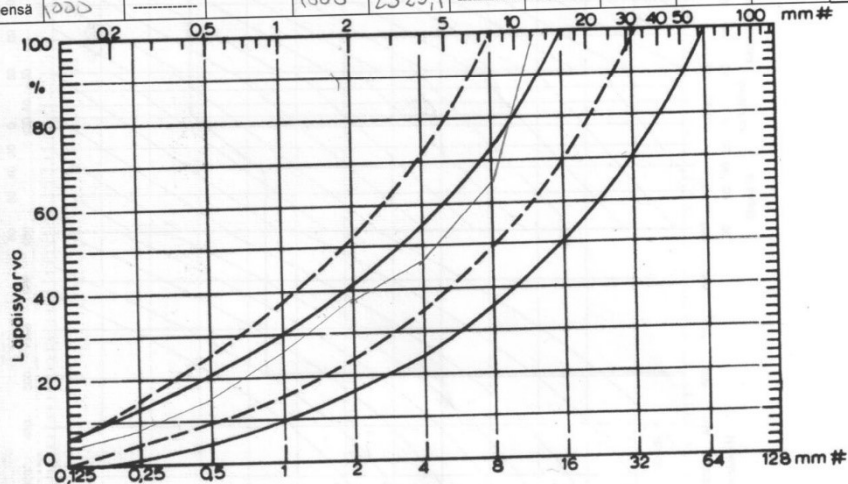
BETONIN KOOSTUMUS

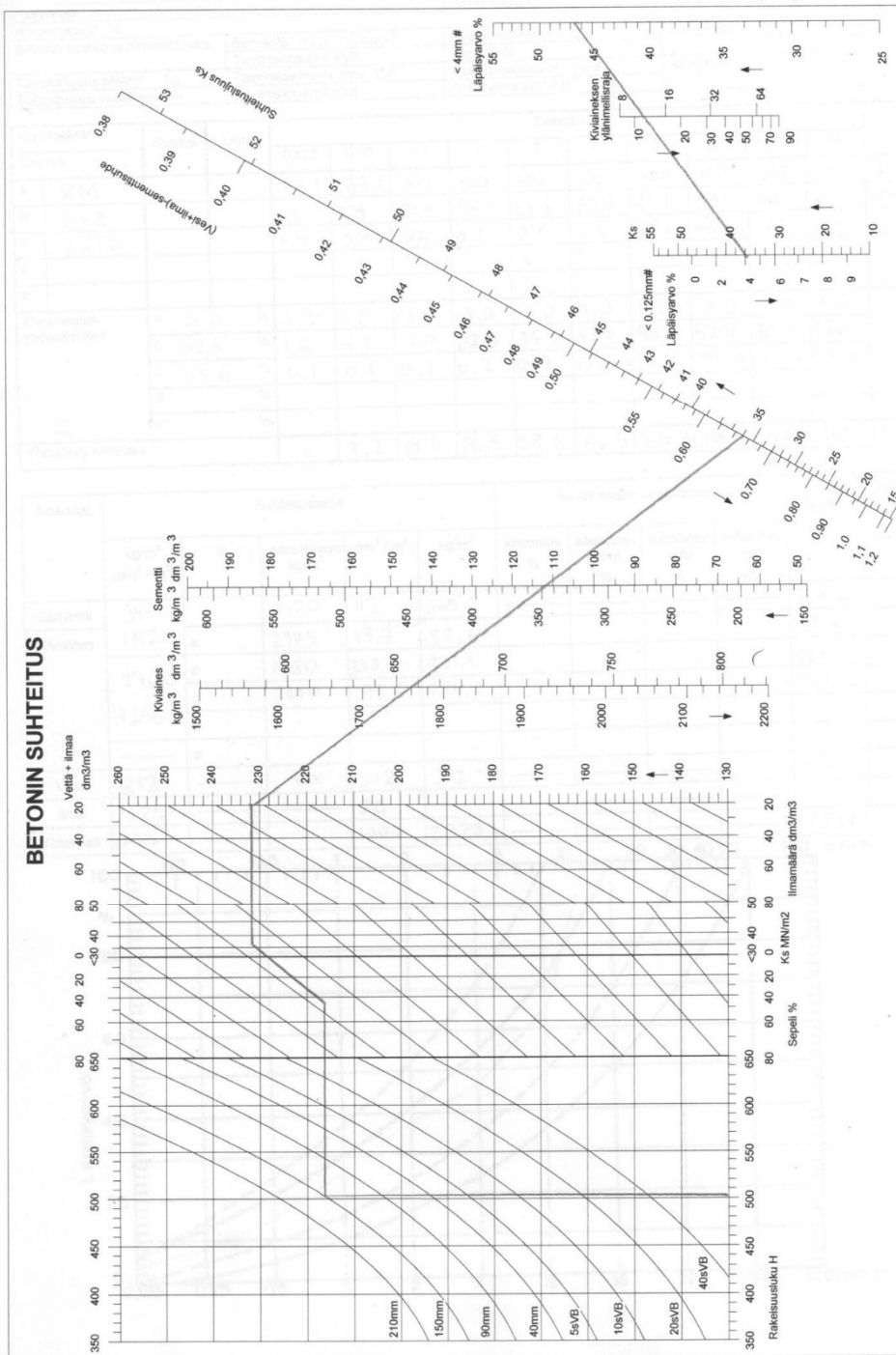
MASSA 4

Rakentaja		Rakennustyö	
Rakenneosat			
Betonin luokka ja nimellislujuus	Sementti 42,5 Rapid	Suurin raekoko 12	Lisäaineet EI
	Tavoitenoikeus sVB	Sepeliä %	
Tavoitelujuus MN/m ² 36	Tavoitepainuma mm 150	Rakeisuusluku H 503	Annostus
Suhteituslujuus MN/m ² 36	Tavoiteleviämä mm	Ilmamäärä dm ³ /m ³ 2,0	

Kivialineket	Humus	Liete	Rakeisuus										H	
			0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64		
Tunnus														
a KM			75,1	99,1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	974,2
b 0-8			3	7,9	21,9	44,4	67,6	82,6	97,1	100	100	100	100	624,2
c 6-12			0,4	0,4	0,6	0,5	0,5	0,6	25,6	100	100	100	100	328,5
d														
e														
Kivialineesten yhdistäminen	a 3,0 %		2,3	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	
	b 52,4 %		1,6	4,1	11,4	23,3	35,4	43,2	50,4	52,4	52,4	52,4	52,4	
	c 44,6 %		0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	11,4	44,6	44,6	44,6	44,6	
	d %													
	e %													
Yhdistetty kivialine			4	7,2	14,6	26,5	38,6	46,5	65,3	100	100	100	503	

Aineosat	Suhteitusseos				Kivialineksen vesipitoisuus				Työseos kg/m ³	ANNOS m ³	
	kg/m ³ (dm ³ /m ³)	%	kiintotiheys kg/m ³	dm ³ /m ³	kg/m ³	kokonais %	absorboitunut %	tehollinen vesi %			tehollinen vesi kg
Sementti	347		3100	112	349,2					347,2	
Kivialine	(112)	a	2975	19,7	58,6					58,6	
	1760	b	2680	343,7	921,1					921,1	
	(656)	c	2680	292,6	784,2					784,2	
		d									
		e									
Vesi	212		1000	212	212					212	
Ilma	(20)			20							
Yhteensä	2000			1000	2323,1					2323,1	





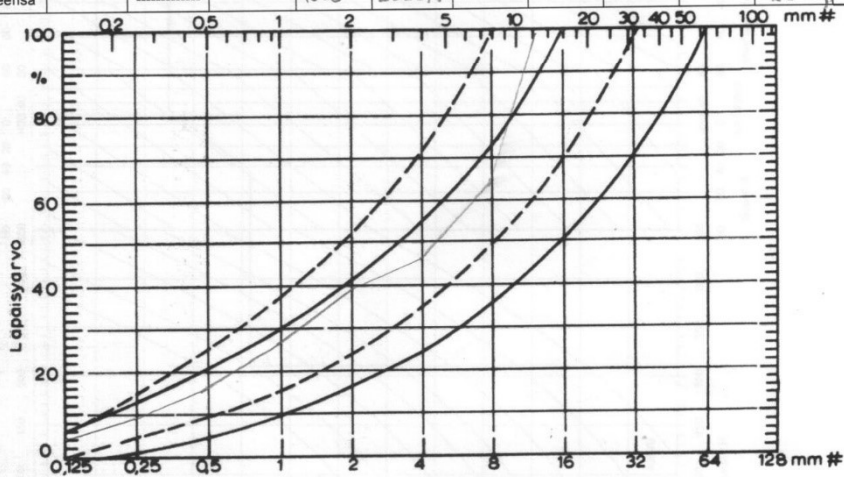
BETONIN KOOSTUMUS

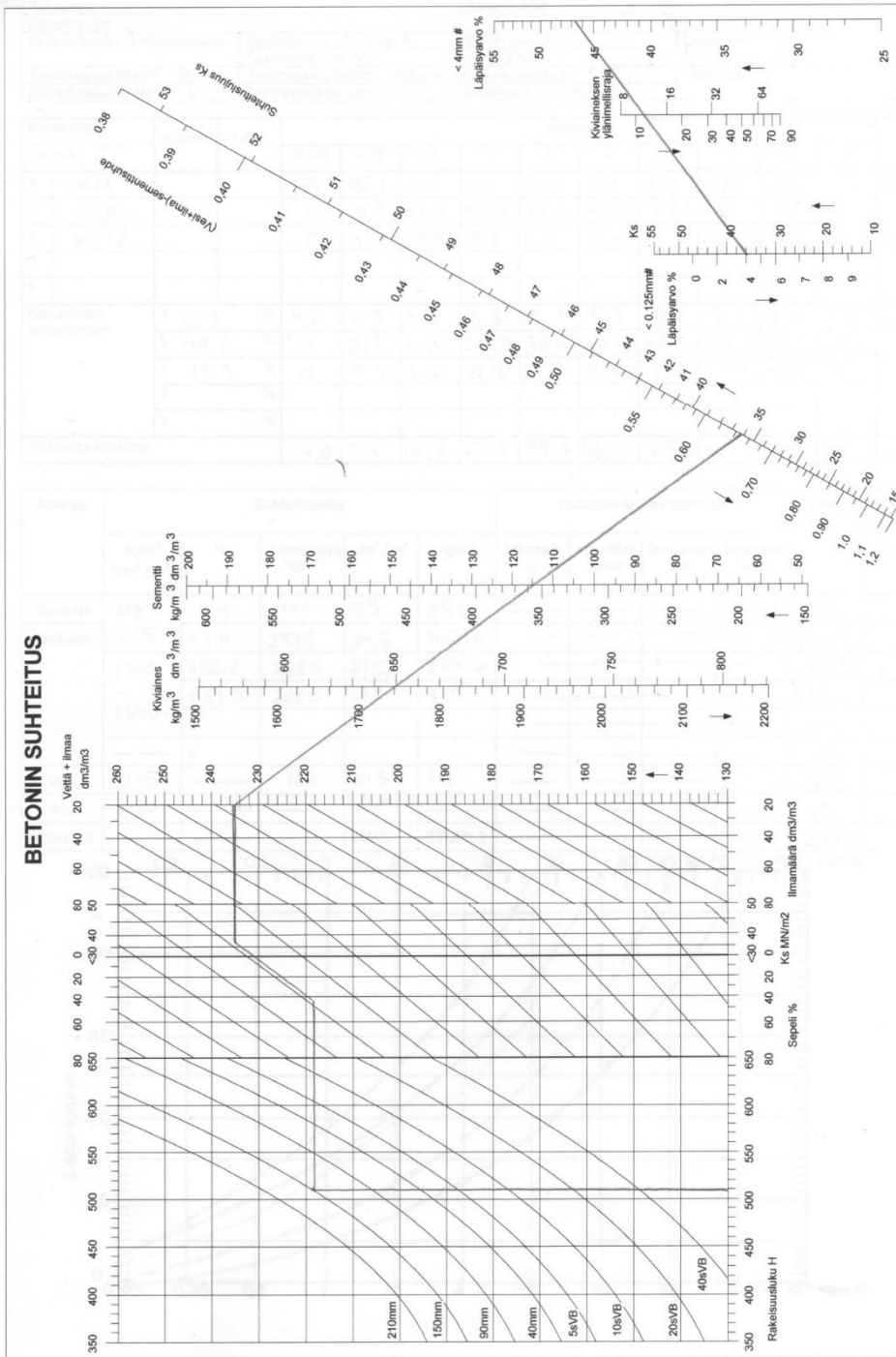
MASSA 5

Rakentaja		Rakennustyö	
Rakenneosat			
Betonin luokka ja nimellislujuus	Sementti 42,5 R _{np} A	Suurin raekoko 12	Lisäaineet E1
	Tavoitenotkeus sVB	Sepeliä %	
Tavoitelujuus MN/m ² 36	Tavoitepainuma mm 150 mm	Rakeisuusluku H 508	Annostus
Suhteituslujuus MN/m ² 36	Tavoiteleviämä mm	Ilmamaara dm ³ /m ³ 20	

Kiviainekset	Humus	Liete	Rakeisuus										H	
			0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64		
a KM			75,1	99,1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	974,2
b 0-8			0	7,9	21,7	44,4	67,6	82,5	97,1	100	100	100	100	624,2
c 6-12			0	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	25,6	100	100	100	100	328,5
d														
e														
Kiviainesten yhdistäminen	a	5,3 %	4,0	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	
	b	49,6 %	0	3,9	10,8	22,0	33,5	40,9	48,2	49,6	49,6	49,6	49,6	
	c	45,1 %	0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	11,5	45,1	45,1	45,1	45,1	
	d	%												
	e	%												
Yhdistetty kiviaines			4,0	9,4	16,3	27,5	39,0	46,5	65,0	100	100	100	100	508

Aineosat	Suhteitusseos					Kiviaineksen vesipitoisuus				Työseos kg/m ³	ANNOS m ³	
	kg/m ³ (dm ³ /m ³)	%	kiintoteheys kg/m ³	dm ³ /m ³	kg/m ³	kokonais %	absorboitunut %	tehollinen vesi %	tehollinen vesi kg			
Sementti	355 (115)	11,5	3100	115	355	-----	-----	-----	-----	355		
Kiviaines	a	3,4	2975	34,5	102,6	-----	-----	-----	-----	102,6		
	b	32,2	2680	322,5	864,3	-----	-----	-----	-----	864,3		
	c	29,3	2680	293	785,2	-----	-----	-----	-----	785,2		
	d	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
	e	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
Vesi	215	-----	1000	215	215	-----	-----	-----	-----	215		
Ilma	(20)	-----	-----	20	-----	-----	-----	-----	-----	0		
Yhteensä	-----	-----	-----	1000	2322,1	-----	-----	-----	-----	2322		





BETONIMASSOJEN RESEPTIT

LIITE 4

Ainesosa	Massa 1	Massa 2	Massa 3	Massa 4	Massa 5	Massa 6	Massa 7	Massa 8	Massa 9	Massa 10	Massa 11	Massa 12	Yksikkö
Sementti	354,5	324,7	329,9	347,0	354,0	356,3	361,6	363,4	368,7	375,0	375,0	375,0	kg
Kvartsimaasälpä- jauhe	0,0	62,5	106,2	58,6	102,6	54,4	99,1	49,1	93,4	0,0	135,4	216,5	kg
Luonnonfilleri	274,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	157,5	35,5	0,0	kg
Kiviaines 0-8	594,9	897,0	841,5	921,2	864,2	911,5	856,2	904,7	849,7	1195,0	1195,1	1159,3	kg
Kiviaines 6-12	869,7	867,6	868,5	784,3	785,1	776,1	777,8	770,2	772,0	454,0	454,0	452,3	kg
Vesi	216,7	195,8	199,9	212,0	216,0	217,3	220,6	221,7	224,9	180,0	180,0	180,0	litraa
Notkistin	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	5,0	5,0	Litraa
Ilma	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	%
Tilavuus	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,2	1000,2	1000,4	1000,3	1000,0	1000,0	1000,0	Litraa

Kiintotiheys	2310,5	2347,7	2345,9	2323,1	2321,8	2315,6	2315,2	2309,1	2308,7	2366,4	2380,0	2388,2	kg/m ³
Vesi/sementti	61	60	61	61	61	61	61	61	61	48	48	48	%
Kvart- simaasälpäjau- heen osuus ko- konaismassasta	0,0	2,7	4,5	2,5	4,4	2,4	4,3	2,1	4,0	0,0	5,7	9,1	%
Kvart- simaasälpäjau- heen osuus kuu- tiossa betonia	0,0	62,5	106,2	58,6	102,6	54,4	99,1	49,1	93,4	0,0	135,4	216,5	kg

Tunnus	Painuma [mm]	Painuma - leviämä [mm]	Leviämä aika [s]	T500-aika [s]	Ilmamäärä [%]	Märkä tiheys [kg/m3]
Massa 1A	130	-	-	-	-	-
Massa 1B	-	-	-	-	1,2	2352,5
Massa 2	175	-	-	-	-	-
Massa 3	75	-	-	-	-	-
Massa 4	90	-	-	-	6,8	2289,6
Massa 5A	130	-	-	-	9,1	2214,9
Massa 5B	-	-	-	-	9,1	2153,4
Massa 6A	120	-	-	-	5,6	2318,4
Massa 6B	-	-	-	-	6,6	2216,1
Massa 7	160	-	-	-	8,1	2242,8
Massa 8	150	-	-	-	5,5	2308,5
Massa 9	175	-	-	-	7,5	2225,9
Massa 10	-	680	65	9	-	2381,6
Massa 11	-	720	85	6	-	2149,6
Massa 12	-	670	95	8	-	2001,1

KOVETTUNEEN BETONIN TESTITULOKSET, 3 VRK

LIITE 6 (1/3)

Tunnus	Ikä [vrk]	d [mm]	a x b [mm]	h [mm]	Voima [kN]	Koekappaleen paino [g]	Tiheys [kg/m ³]	100 mm:n kuutiolujuus [MPa]	150 mm:n kuutiolujuus [MPa]	150 mm:n lieriölujuus [MPa]
Massa 1A	3	102,0	99,9	100,0	241,5	2398	2403	24,2	23,5	18,8
Massa 2	3	102,5	100,2	100,4	174,6	2370	2351	17,4	16,9	13,5
Massa 3	3	102,5	100,2	100,1	122,2	2257	2246	12,2	11,8	9,4
Massa 4	3	100,8	100,2	100,1	224	2317	2305	22,3	21,7	17,4
Massa 5A	3	101,4	100,3	100,2	200	2278	2260	19,9	19,3	15,4
Massa 6A	3	101,1	100,1	100,2	240	2311	2302	24,0	23,3	18,6
Massa 7	3	100,5	99,9	100,6	185	2233	2224	18,5	18,0	14,4
Massa 8	3	100,7	100,1	99,9	224	2293	2291	22,4	21,7	17,4
Massa 9	3	100,3	100,2	100,1	191	2219	2208	19,0	18,5	14,8
Massa 10	3	101,8	100,2	100,1	353,0	2412	2400	35,2	34,1	27,9
Massa 11	3	101,7	100,0	99,9	333,0	2382	2384	33,3	32,3	26,6
Massa 12	3	100,5	100,2	100,1	295,0	2302	2291	29,4	28,5	23,5

KOVETTUNEEN BETONIN TESTITULOKSET, 7 VRK

LIITE 6 (2/3)

Tunnus	Ikä [vrk]	d [mm]	a x b [mm]	h [mm]	Voima [kN]	Koekappaleen paino [g]	Tiheys [kg/m ³]	100 mm:n kuutiolujuus [MPa]	150 mm:n kuutiolujuus [MPa]	150 mm:n lieriölujuus [MPa]
Massa 1A	7	101,9	99,8	100,3	320	2408	2410	32,1	31,2	25,9
Massa 1B	7	101,4	99,9	99,7	384	2404	2416	38,5	37,4	30,3
Massa 2	7	102,4	100,0	100,3	226	2351	2344	22,6	21,9	17,5
Massa 3	7	102,8	100,4	100,4	148	2268	2241	14,7	14,3	11,4
Massa 4	3	101,2	100,2	100,2	268	2331	2317	26,7	25,9	20,9
Massa 5A	3	101,4	100,1	99,9	239	2281	2279	23,9	23,2	18,6
Massa 5B	7	101,0	99,7	99,6	204	2244	2267	20,5	19,9	15,9
Massa 6A	3	101,6	100,1	100,2	273	2327	2318	27,2	26,5	21,5
Massa 6B	7	101,5	99,8	99,8	251	2311	2325	25,2	24,5	19,6
Massa 7	3	101	100,3	100,2	222	2281	2263	22,1	21,4	17,1
Massa 8	3	101,3	100,2	100,4	259	2324	2306	25,8	25,0	20,0
Massa 9	3	100,5	100,4	99,8	220	2241	2228	21,8	21,2	17,0
Massa 10	7	101,4	100,0	99,8	424	2409	2414	42,4	41,2	32,6
Massa 11	7	101,2	100,0	100,2	391	2396	2391	39,1	38,0	30,6
Massa 12	7	100,5	100,2	100,1	326	2316	2304	32,5	31,5	26,1

Tunnus	Ikä [vrk]	d [mm]	a x b [mm]	h [mm]	Voima [kN]	Koekappa- leen paino [g]	Tiheys [kg/m ³]	100 mm:n kuutiolujuus [MPa]	150 mm:n kuutiolujuus [MPa]	150 mm:n lieriölujuus [MPa]	Paineellisen veden tunkeutumasyvyys [mm]
Massa 1A	28	102	100	100	366	2415	2415,0	36,6	35,5	28,9	-
Massa 1B	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31
Massa 2	28	102	100	100	263	2319	2319,0	26,3	25,5	20,5	-
Massa 3	28	102	100	100	209	2269	2269,0	20,9	20,3	16,2	-
Massa 4	28	101,4	100,2	100,3	317	2360	2343,6	31,6	30,7	25,5	-
Massa 5A	28	100,9	100,2	100,3	281	2309	2292,9	28,0	27,2	22,2	-
Massa 5B	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37
Massa 6A	28	101,2	100,2	100,2	308	2344	2330,0	30,7	29,8	24,8	-
Massa 6B	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	60
Massa 7	28	101,2	99,9	99,8	261	2271	2280,1	26,2	25,4	21,7	-
Massa 8	28	101	100,1	100,2	300	2337	2327,7	29,9	29,1	24,4	-
Massa 9	28	101	99,9	99,8	248	2241	2250,0	24,8	24,1	19,3	-
Massa 10	28	101,2	100,1	100,2	483,0	2415,0	2405,4	48,2	46,8	36,8	-
Massa 11	28	101,8	100,0	100,4	444,0	2423,0	2413,3	44,4	43,1	33,8	-
Massa 12	28	101,0	99,9	99,9	373,0	2303,0	2309,9	37,4	36,3	29,5	-