

Petri Koukkula

**METAKAOLIININ SOVELTUVUUS RUIKUBETONIN
SIDEAINEEKSI**

METAKAOLIININ SOVELTUVUUS RUIKUBETONIN SIDEAINEEKSI

Petri Koukkula
Opinnäytetyö
Lukukausi: Kevät 2016
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikka, Rakennesuunnittelu

Tekijä(t): Petri Koukkula

Opinnäytetyön nimi: Metakaoliinin soveltuvuus ruiskubetonin sideaineeksi

Työn ohjaaja: Hannu Kääriäinen

Työn valmistumislukukausi- ja vuosi: 1/2016

Sivumäärä: 42+ 2

Metakaoliini on sementin kaltainen, pozzolaaninen aine, jota voidaan käyttää sidosaineena betonissa. Metakaoliinilla on mahdollista saada parempi puristuslujuus betoniin sen paremman tiivistyvyyden takia, sillä paremman tiivistyvyyden seurauksena betoniin jää vähemmän tyhjää tilaa. Koska metakaoliinia ei ole mahdollista käyttää ainoana sideaineena betonissa, opinnäytetyössä selvitettiin parasta metakaoliinin ja sementin suhdetta.

Ennen varsinaisia testauksia valittiin halutut metakaoliinin ja sementin suhteet ja näiden perusteella tehtiin varsinaiset laboratoriokokeet. Valmistusvaiheessa betonimassoista testattiin leviämä ja ilmamäärä, minkä jälkeen analysoitiin niiden työstettävyyttä. Kun kappaleet olivat saavuttaneet määrätyn iän, niiden tiheys määritettiin ja niille tehtiin puristus- ja taivutuslujuuden määrittävät kokeet.

Metakaoliinin pitoisuudet kokonaissideainemassasta vaihtelivat nollan ja kolmenkymmenen painoprosentin välillä.

Metakaoliinin valmistamiseen tarvittava energiamäärä on alle puolet sementin valmistamiseen tarvittavasta energiamäärästä. Opinnäytetyössä kävi ilmi, että kun metakaoliinia lisätään sopiva määrä korvaamaan sementtiä, saadaan betonin puristuslujuutta kasvatettua. Tutkimuksissa huomattiin myös metakaoliinipitoisuuden noususta johtuva lisääntynyt lisäaineiden tarve. Nykyaikana pyritään jatkuvasti vähentämään ympäristöön kohdistuvaa kuormitusta, mikä omalta osaltaan lisää kiinnostusta metakaoliinin käyttöä kohtaan. Lisäksi Suomessa on runsaasti kaoliinia maaperässä, jota voidaan hyödyntää metakaoliinin valmistuksessa. Sopivalla tuotekehityksellä näitä tuloksia voidaan tulevaisuudessa hyödyntää betonin valmistuksessa. Työn tilaajana toimi Kajaanin ammattikorkeakoulu.

Asiasanat: Metakaoliini, ruiskubetoni, rakentaminen

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Civil Engineering, Structural Engineering

Author(s): Petri Koukkula

Title of thesis: Suitability of Metakaolin as Adhesive of Shotcrete

Supervisor(s): Kimmo Kemppainen

Term and year when the thesis was submitted: 2016

Number of pages:
42+2

Metakaolin is a cement-like pozzolanic substance, which can be used as an adhesive in concrete mix. By using metakaolin it is possible to obtain better compression strength for concrete due better contraction of concrete mix. Because of improved compression, there is less empty space in concrete. With current manufacturing methods, it is not possible to make concrete using just metakaolin as an adhesive and this thesis studies the best metakaolin/cement -ratio.

Before the actual tests, proper ratios of cement/metakaolin were chosen and based on these selections laboratory tests were made. This subject has been studied in other thesis work before, therefore in this thesis the proportional scale of metakaolin was reasonable. The amount of metakaolin proportion of binding agent fluctuated from zero to thirty gravimetric percentage.

Nowadays reducing environmental loading has become increasingly more and more important, which on that behalf makes metakaolin a more interesting choice. The energy used in the production of metakaolin is less than half needed to produce ordinary cement. By displacing the right proportion of cement with metakaolin, the compressive strength of concrete can be increased. Also adding metakaolin in the concrete mix increased the need for additives. As the orderer for this work functioned University of applied sciences Kajaani.

Keywords: Metakaolin, shotcrete, construction

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	7
2 BETONIN OMINAISUUDET	8
2.1 Betonin koostumus	8
2.2 Kiviaines	9
2.3 Sementti	10
2.3.1 Sementin valmistaminen	10
2.3.2 Sementin ominaisuudet	11
2.3.3 Sitoutuminen	13
2.4 Seosaineet	16
2.4.1 Lentotuhka	16
2.4.2 Masuunikuonajauhe	16
2.4.3 Silika	17
2.5 Lisäaineet	17
2.5.1 Notkistimet	17
2.5.2 Huokostimet	18
2.5.3 Hidastimet ja kiihdyttimet	19
2.6 Ruiskubetonointi	19
2.6.1 Ruiskutusvaiheessa käytettävät lisäaineet	19
2.6.2 Kuivaseosmenetelmä	21
2.6.3 Märkäseosmenetelmä	21
2.7 Hukkaroiske	22
2.8 Ruiskutus	22
3 VALMISTETTAVIEN MASSOJEN TESTAUSOHJELMA	25
3.1 Ensimmäisen vaiheen resepteillä valmistettavat testit	25
3.2 Toisen vaiheen ruiskubetonimassat	26
4 TESTATTAVIEN MASSOJEN VALMISTUS	27

4.1 Ensimmäisen vaiheen massat	27
4.1.1 Leviämän määrittäminen	27
4.1.2 Ilmamäärän määrittäminen	28
4.1.3 Ruiskubetonin valaminen ja säilytys	29
4.1.4 Toinen leviämämittaus	29
4.2 Toisen vaiheen massat	29
5 PURISTUS- JA TAIVUTUSLUJUUDET SEKÄ TULOSTEN ANALYSOINTI	31
5.1 Yhden vuorokauden lujuudet	31
5.2 Seitsemän vuorokauden lujuudet	32
5.3 28. Vuorokauden lujuudet	33
5.4 Jatkotestien tulokset	34
5.4.1 Yhden vuorokauden tulokset ja niiden analysointi	34
5.4.2 Seitsemän vuorokauden puristus- ja taivutuslujuudet ja niiden analysointi	35
5.4.3 28. vuorokauden puristus- ja taivutuslujuudet ja niiden analysointi	36
6 MASSOJEN TYÖSTETTÄVYYS	37
6.1 Ensimmäisen vaiheen massat	37
6.2 Toisen vaiheen massat	38
7 YHTEENVETO	40
LÄHTEET	42
LIITTEET	
Liite 1. Laajennettu taulukointi mittauksista	

1 JOHDANTO

Metakaoliini on pozzolaaninen aine, jota voidaan käyttää sementin kanssa betonin sideaineena. Tässä opinnäytetyössä on tarkoitus selvittää metakaoliinin soveltuvuutta ruiskubetonoinnissa käytettävän massan valmistukseen. Työssä pyritään selvittämään paras sementin ja metakaoliinin suhde sideainemäärästä suhteituksen pysyessä muilta osin muuttumattomana. Työssä käytettävä metakaoliini on saatu Puolangan alueelta sijaitsevasta kaoliinista polttamalla.

Metakaoliini reagoi sementin ja veden reaktiossa syntyneen kalsiumhydroksidin kanssa. Oikealla sementin ja metakaoliinin mittasuhteella betonimassasta on mahdollista saavuttaa suurempi betonin puristuslujuus. Myös mekaanisen kemiallisen rasituksen kestävyys pitäisi olla parempi kaoliinia sisältävissä betonimassoissa, mutta sen tutkimiseen ei tässä opinnäytetyössä keskitytä. Työn tilaajana toimii Kajaanin ammattikorkeakoulu.

Ensimmäiseksi valmistetaan vertailumassa, jossa ei ole metakaoliinia ollenkaan. Tämän perusteella valitaan sopivat leviämisen ja ilmamäärän arvot tuleviin sarjoihin. Metakaoliinia sisältävät sarjat tullaan tekemään pitämällä ilmamäärä ja leviäminen mahdollisimman lähellä vertailumassaa, jotta tulokset ovat mahdollisimman vertailukelpoisia keskenään.

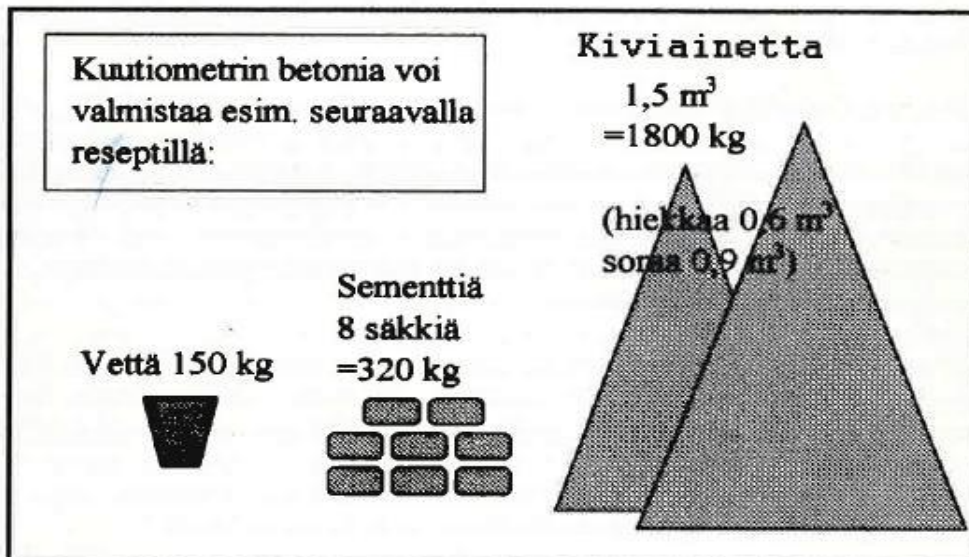
Kun ensimmäisen vaiheen massoista on tehty puristuslujuutta mittaavat testit, valitaan parhaan puristuslujuuden omaava resepti ja testataan kolmen muun notkistimen vaikutus massan ominaisuuksiin. Aiheesta on tehty Oulun ammattikorkeakoulussa aikaisemminkin tutkielmia, joten lähtökohtaisesti tutkittava skaala oli ”järkevä” (Ville Nikulan työ Metakaoliinin käyttö betonissa sementin korvaajana sekä Antti Aholan ja Mikko Puomisen työ Metakaoliinin käyttö betonissa sementin korvaajana yhdessä lentotuhkajalosteiden kanssa). Tässä opinnäytetyössä käytettävän metakaoliinin suurin sideainepitoisuus oli maltillisempi kuin aikaisemmissa tutkimuksissa.

2 BETONIN OMINAISUUDET

2.1 Betonin koostumus

Betoni on kemiallisesti sitoutunutta, hyvin mekaanista rasitusta kestävää keinotekoisia rakennusmateriaalia. Kovettuessaan sementtiliima eli sementtikivi sitoo kiviainesrakeet yhteen. Pääraaka-aineita betonissa ovat sementti, vesi ja kiviaines. Yleensä betonin valmistuksessa käytetään myös muita lisäaineita, jotka auttavat muun muassa betonin tiiveyden, lujuuden ja säilyvyysominaisuuksien parantamisessa sekä betonin työstettävyyden kohentamiseksi. (1, s. 18, 31.)

Betonissa käytettäviä lisäaineita ovat muun muassa notkistin, kiihdytin, hidastin ja huokostin. Seosaineina voidaan käyttää sementin lisäksi lentotuhkaa, masuunikuonaa, silikaa, masuunikuonajauhetta ja ferrokromikuonaa, jotka toimivat side- ja runkoaineina. Betonin suhteituksella voidaan vaikuttaa betonin ominaisuuksiin. Suhteitusta tehtäessä määritetään betonissa käytettävät osat ja niiden seossuhteet (kuva 1). (1, s. 31, 59.)



KUVA 1. Esimerkki yksinkertaisesta betonin suhteituksesta (1, s.31)

2.2 Kiviaines

Kiviainesten ominaisuuksilla on merkittävä vaikutus betonin ominaisuuksiin. Kiviaineksen pitoisuus betonista on 65-80 tilavuusprosenttia. Kiviainekseksi soveltuu käytännössä mikä tahansa riittävän luja, tiivis ja rakeinen materiaali, joka ei osallistu sementin reaktioihin eikä huononna betonin säilyvyyttä. Kiviaineksina voidaan käyttää luonnon kiviaineksia (voivat olla tavanomaisia kiviaineksia tai raskaita malmipitoisia. Myös kevyet vulkaaniset kiviainekset soveltuvat). Tällainen kiviaines voi olla luonnon muovaamaa tai mekaanisesti murskattua. Mahdollista on myös käyttää keinotekoisia kiviaineksia, kuten kevytsoraa, masuunikuonaa sen eri muodoissa, lentotuhkaa, tiilimurskaa tai betonimurskaa. (1, s.31-32.)

Yleisin suomessa käytetty kiviaines on graniittipohjainen luonnonkiviaines, jota murskataan yhä lisääntyvässä määrin. Betonimurskeen käyttö kiviaineksena, eli betonin uusiokäyttö yleistyy koko ajan. Fillerinä käytetään lentotuhkaa eli sillä korvataan hienojakoisen lajitteen osuutta. Kevytsorabetonien valmistuksessa käytetään kevytsoraa. Kun betonilta vaaditaan erityisominaisuuksia, kuten suurta kulutuskestävyyttä tiebetoneissa, käytetään valmistuksessa ns. raskaampia kiviaineksia. Näitä raskaampia kiviaineksia ei muutoin käytetä betonin valmistuksessa. (1, s.32.)

Betonin runkoaineena käytettävän kiviaineksen tulee soveltua kyseiseen käyttötarkoitukseen, eli haitallisten aineiden määrien tulee jäädä sallittujen arvojen alapuolelle. Nämä haitalliset aineet voivat vaikuttaa tuoreen tai kovettuneen betonin ominaisuuksiin sekä heikentää raudoituksen kestävyyttä. Kiviaines ei myöskään tule olla rapautunutta. Kiviainesten täytyy olla puhtaita, eikä kiviaines saa sisältää esimerkiksi roskia, savikokkareita, öljyä tai jätteitä. Kiviaines ei saa myöskään sisältää lunta, jäätä, eikä jäätyneitä kivipaukkuja. (1, s.32.)

Betoninormeissa standardi SFS-EN 12620 määrittää käytettävälle kiviainekselle vaadittavat säädökset, jotka tulee täyttää. Kiviaineksen tulee olla tarkastettua sekä CE-merkittyä. Mikäli kiviaines ei ole CE-merkittyä, tulee betonin valmistajan varmistaa, että edellä mainitun normin mukaisiin määreisiin päästään ympäristöministeriön hyväksymän tarkastuksen suorittajan valvoessa. Kiviaineksista testataan puhtaus, rakeisuus, kosteus ja tiheys, vedenimukyky sekä muut betonin laatuun vaikuttavat seikat. (1, s.32.)

2.3 Sementti

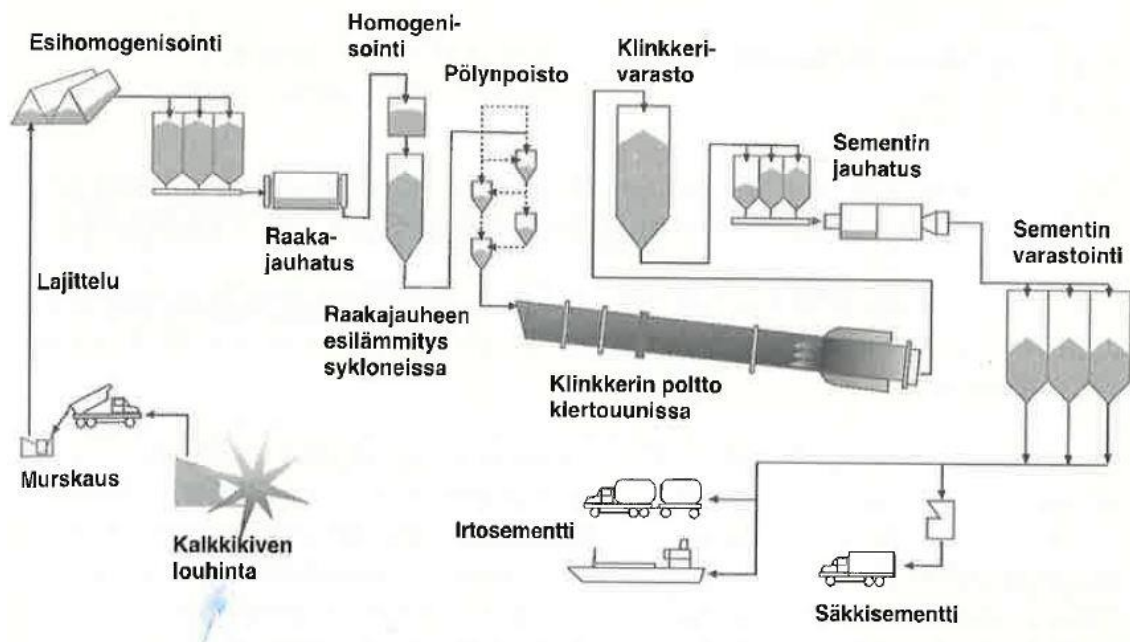
Sementti on hydraulinen sideaine ja sen pääraaka-aine kalkkikivi, jonka pääosana on kalsiumkarbonaatti CaCO_3 . Se muodostaa veden kanssa reagoidessaan kovan ja kestäväns lopputuotteen. Sementin valmistuksessa tarvittavat muut komponentit: piidioksidi SiO_2 , rautaoksidi Fe_2O_3 ja alumiinioksidia Al_2O_3 . Nämä tuotteet saadaan kalkkilouhoksen sivukivestä ja muista teollisuuden tuotteista. (1, s.39.)

2.3.1 Sementin valmistaminen

Suomalainen sementti on valmistettu jo 1970-luvulta lähtien käyttäen energiatehokasta kuivatusmenetelmää. Raaka-aineeksi louhittu kivi murskataan ja lajitellaan, jonka jälkeen se siirretään raaka-ainesiiiloihin. Koska kiviaineksilla on erilaisia kemiallisia koostumuksia, ne määritellään kulloisenkin kiviaineksen kohdalla. Näiden tietojen perusteella määritetään erilaisten kivien syöttösuhteet. Kalkkikivimurske ja muut portlandklinkkerin valmistukseen tarvittavat raaka-aineet, joiden osuus kokonaispitoisuus on alle 10 % raaka-aineista (esim. hiekka ja kuona), jauhetaan kuulamylyllä hienoksi jauheeksi. Raakajauhe syötetään esilämmitysjärjestelmän läpi kiertouuniin, jossa tapahtuu sementtiklinkkerin poltto. (1, s.39.)

Uunissa kalsiumkarbonaatti hajoaa kalsiumoksidiksi CaO ja hiilidioksidiksi noin $900\text{ }^\circ\text{C}$:ssa. Kun lämpötila tästä vielä nousee kalsiumoksidi reagoi pii-, rauta- ja alumiini- ym. yhdisteiden kanssa ja sintraantuu lopulta noin $1\ 400\text{ }^\circ\text{C}$:n

lämpötilassa sementtiklinkkeriksi. Uunin loppupäässä klinkkeri ilma jäädytetään nopeasti n. 200 °C:seen (kuva 2). (1, s.40.)



KUVA 2. Esimerkkikuva sementin valmistuksesta kuivamenetelmällä (1, s.41)

Syntyneen portlandklinkkerin päämateriaalit ovat aliitti (trikalsiumsilikaatti), beliitti (dikalsiumsilikaatti), aluminaatti (trikalsiumaluminaatti) ja ferriitti (tetrakalsiumaluminaattiferriitti). Näiden neljän mineraalin keskinäisiä suhteita säätämällä klinkkerissä voidaan vaikuttaa sementin ominaisuuksiin. (1, s.40.)

2.3.2 Sementin ominaisuudet

Sementin tärkeimpiä ominaisuuksia puristuslujuuden ohella muun muassa ovat

- kemiallinen koostumus sekä seos- ja lisäaineet
- sementin reaktiot veden kanssa
- sitoutuminen
- lujuuden kehitys

- kemiallinen kestävyys (1, s.50).

Sementissä olevat kemiallisesti reagoivat aineet vaikuttavat suuresti valmistettavan betonin ominaisuuksiin (taulukko 1). Betonin käyttötarkoitus määrittää pitkälle käytettävän klinkkerin tyypin, koska eri tyypeillä on hyvin erilaisia kestävyysominaisuuksia. Erilaisia klinkkereitä voidaan käyttää myös yhdessä, jotta saavutetaan kulloinkin tarvittavia kemiallisia/mekaanisia kestävyysominaisuuksia. Sementin lujuteen vaikuttavat eniten aliitti (trikalsiumsilikaatti $3 \text{Ca}_3\text{O} \cdot \text{SiO}_2$) ja beliitti (dikalsiumsilikaatti, $2 \text{Ca}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$). (1, s.40, 51.)

Trikalsiumsilikaatien ja veden reaktiot esitetään kaavassa 1 (2, s.12).



$C_3 = 3$ Kalsiumoksidi molekyyliä, 3CaO

$S =$ Piioksidi, SiO_2

$H =$ Vesi, H_2O

Dikalsiumsilikaattien ja veden reaktiot esitetään kaavassa 2 (2,s 12).



$C_2 = 2$ Kalsiumoksidi molekyyliä, 2CaO

$S =$ Piioksidi, SiO_2

$H =$ Vesi, H_2O

TAULUKKO 1. Tiivistelmä sementin ominaisuuksista (1, s.40)

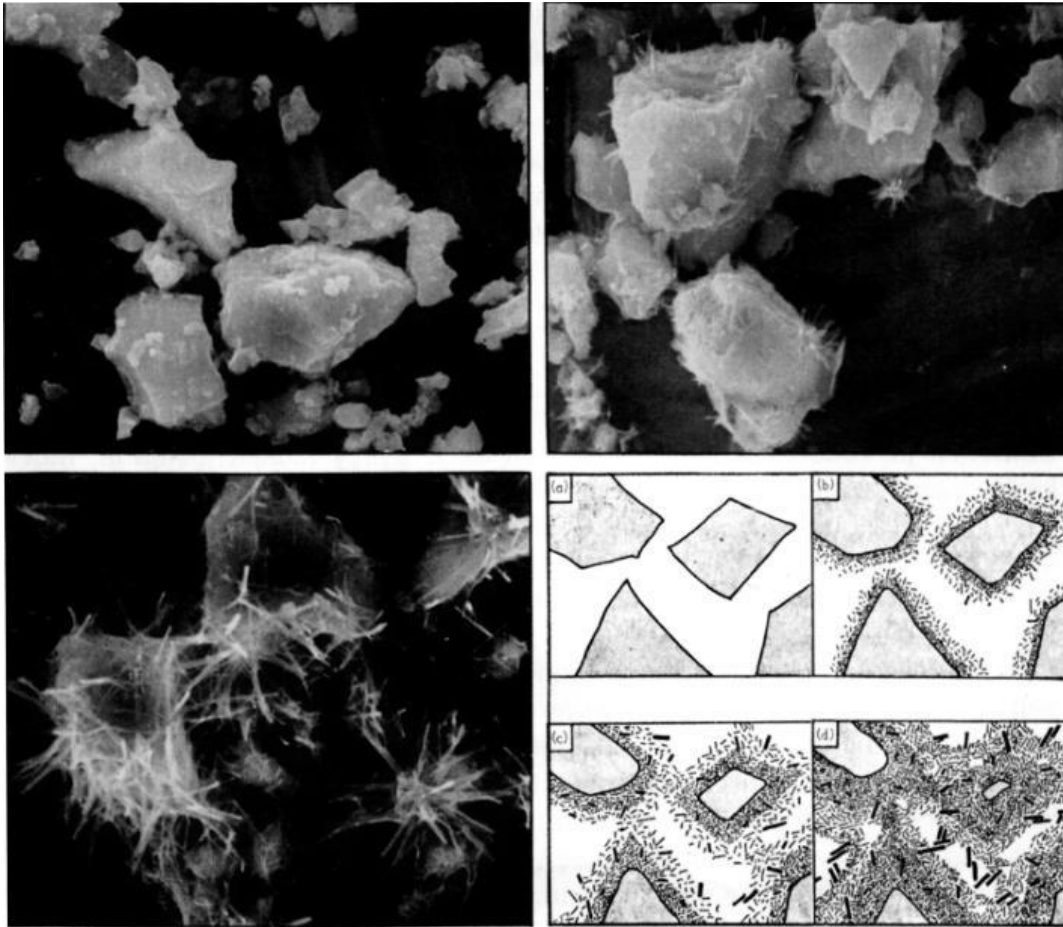
Klinkkeri		
Trikalsiumsilikaatti $3 CaO * SiO_2$	(C_3S)	Nopea lujuudenkehitys, suuri loppulujuus, korkea hydrataatiolämpö (500 kJ/kg), sulfaatinkestävä
Dikalsiumsilikaatti $2 CaO * SiO_2$	(C_2S)	Hidas lujuudenkehitys, suuri loppulujuus, alhainen hydrataatiolämpö. (250 kJ/kg), sulfaatinkestävä
Trikalsiumalumiinaatti $3 CaO * Al_2O_3$	(C_3A)	Suuri reagointinopeus ja vedentarve, pieni loppulujuus ja erittäin korkea hydrataatiolämpö (1340 kJ/kg), ei sulfaatinkestävä
Tetrakalsiumalumiinaattiferriitti (C_4AF) $4 CaO * Al_2O_3 * Fe_2O_3$		Hidas lujuudenkehitys, pieni loppulujuus, korkea hydrataatiolämpö (420 kJ/kg), sulfaatinkestävä
Vapaa kalkki	CaO_{vap}	Reagoi nopeasti veden kanssa kalsiumhydroksidiksi, $Ca(OH)_2$. Korkea pitoisuus voi aiheuttaa nopeamman sitomisen ja tuotteen paisumisen
Magnesiumoksidi	MgO	Reagoi hitaasti veden kanssa magnesiumhydroksidiksi, $Mg(OH)_2$. Korkea pitoisuus voi tällöin ajan mittaan aiheuttaa lopputuotteessa paisumista ja halkeamista
Alkaliyhdisteitä		Alkaliyhdisteet nopeuttavat hydrataatioreaktioita, nostavat hieman alkulujuustasoa ja laskevat vastaavasti loppulujuustasoa
Lisätään jauhatuksessa		
Kipsi $CaSO_4 * 2 H_2O$		Kipsi hidastaa C_3A :n reaktioita antaen sementille sopivan sitomisajan
Seosaineet: kalkkikivi, granuloitu masuunikuona		Seosaineiden suhteilla ja jauhatushienoudella säädellään sementin lujuustasoa ym. ominaisuuksia
Rautasulfaatti $FeSO_4 * 7H_2O$		Pelkistää vesiliukoisen kromaatin

2.3.3 Sitoutuminen

Tärkein sementin ominaisuus on sen kyky reagoida veden kanssa, jolloin siitä tulee liimaa, joka muodostuu veteen liukenemattomaksi materiaaliksi. Tätä kovettunutta sementtiliiman osaa betonissa kutsutaan sementtikiveksi. Sementin kovettuessa reagoivat klinkkerimineraalien alumiinaattiyhdisteet ensin. Reaktion estymiseksi välittömästi vedenlisäyksen jälkeen on sementtiin lisätty kipsiä. Tämä hidastaa reaktiota, jolloin massalle saadaan sopiva työstöaika. Lujuuteen näillä alumiinaattiyhdisteillä ei ole juurikaan merkitystä, mutta ne ovat välttämättömiä sementin varhaisreaktioiden ja klinkkerin polton kannalta.

Sementin lujuus sen sijaan kehittyy C_3S - ja C_2S -yhdisteiden muodostaessa veden kanssa kalsiumsilikaattihydraatteja. (1, s.50-51.)

Sementtihiukkasista syntyy sementin ja veden reagoidessa ensin sauvamaisista ja levymäisistä kiteistä syntynyttä massaa. Tätä kutsutaan sementtigeliksi. Aluksi veden ja sementin sekoituttua massa on notkeaa, mutta pasta alkaa hyytelöitymään jonkun ajan kuluttua ja se menettää plastisuuttaan, eli sementti sitoutuu. Sementin sitoutumisaikaan vaikuttavat sementin hienojakoisuus ja sen kemiallinen koostumus. Sitoutumisaikaan vaikuttaa vahvasti myös lämpötila. Lämpötilan noustessa $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ lyhenee sitoutumisaika karkeasti arvioiden noin puoleen. Sementin sitoutumista hidastaa oleellisesti kylmä ilma ja siksi talvella riittävän lujuudenkehityksen takaamiseksi tulee käyttää nopeita sementtejä tai esim. lämmintä massaa ja tai lämmityslaitteita (kuva 3). (1, s.51.)



KUVA 3. Valo- ja kaavakuvoin esitettyä sementin sitoutumista ja kovettumista eri asteissa (1, s.52)

Kuvan 3 vasemmassa ylälaatikossa näkyy veden ympäröimiä reagoimattomia sementtihiukkasia. Oikeassa ylälaatikossa nähdään tilanne muutaman minuutin kuluttua vedenlisäyksestä. Alhaalla vasemmalla sijaitsevassa laatikossa hydrataatiotuotteet laajenevat joka rakeen pinnasta vesitilaan. Reaktiotuotteet ovat muutaman tunnin kuluttua jo toisissaan kiinni ja sitoutuminen on alkanut. Alhaalla oikeanpuoleisessa kuvassa hydrataatio on edennyt muutaman päivän kuluttua pitkälle ja lujuutta syntyy lisää niin kauan kuin reagoimatonta ja siihen tarvittavaa vapaata vettä riittää. (1, s.52.)

2.4 Seosaineet

Mineraalisia seosaineita voidaan käyttää betonin side- ja runkoaineina. Näitä ovat lentotuhka, masuunikuonajauhe, granuloitu, pelletoitu tai ilmajähdytetty masuunikuona, ilmajähdytetty ferrokromikuona ja silika. Ohjeita näiden aineiden käytöstä löytyy Betoninormeista by 50. (1, s.59.)

2.4.1 Lentotuhka

Lentotuhka on hienoksi jauhetun kivihiilen poltosta syntyvä pozzolaani, joka erotetaan savukaasuista. Sen kiintotiheys vaihtelee välillä 2 100 - 2 500 kg/m³. Lentotuhka voi toimia betonissa kivi- tai sideaineena. Sen pozzolaaninen reaktio tapahtuu hitaammin kuin sementillä ja reaktion edellytyksenä on riittävä vesi ja kalsiumhydroksidi. (1, s.59.)

Lentotuhkan sisältämän hiilen vaikutuksesta betonin huokostaminen vaikeutuu. Tuhkamassa saattaa vaikuttaa myös muiden lisäaineiden toimintaan. Sen takia lisäaineita tulee ennakkotestata. (1, s.59.)

2.4.2 Masuunikuonajauhe

Masuunikuonaa saadaan raakaraudan valmistuksessa muodostuneesta emäksisestä silikaattisulatuotteesta nopeasti jähdyttämällä.

Masuunikuonajauhe on hienoksijauhettua granuloitua masuunikuonaa. Sen kiintotiheys on 2900 - 3100 kg/m³. Raekooltaan se on sementtihiukkasen luokkaa tai hiukan karkeampi. (1, s.60.)

Masuunikuonajauheen vedentarve on pieni ja se notkeuttaa betonimassaa. Sen käyttö yleensä alentaa varhaislujuutta, mutta lisää myöhäislujuutta. Se myös lisää betonin sulfiitinkestävyyttä. Mikäli kuonajauheen osuus sideaineesta on yli 70 %, luokitellaan sideaineyhdistelmä sulfiitinkestäväksi. Kuitenkin sen käyttö lisää hiukan betonin virumaa ja karbonatisoitumisnopeutta. (1, s.60.)

2.4.3 Silika

Silika on erittäin hienojakoinen pozzolaaninen aine, joka syntyy piiraudan ja alkuaine piin valmistuksessa syntyvästä savukaasuista erottamalla. Se on hienojakoisempaa kuin tupakan savu, sen raekoon ollessa alle 1 µm. Sen kiintotiheys on noin 2200 kg/m³ ja se lisää aina betonin vedentarvetta, joten sen yhteydessä on käytettävä vedentarvetta vähentäviä lisäaineita. (1, s.60.)

Silika lisää betonin lujuutta sekä parantaa betonin kemiallista kestävyyttä, koossapysyvyyttä, tiiviyttä ja vedenpitävyyttä. Silikaa käytettäessä tulee lisäaineiden annostustarpeet tarkastaa. (1, s.60.)

2.5 Lisäaineet

Suhteituksella voidaan säädellä betonin ominaisuuksia, eli seossuhteita säätämällä ja eri osa-aineiden valinnalla. Lisäaineet vaikuttavat myös betonimassan ominaisuuksiin, betonin sitoutumiseen ja kovettumiseen sekä kovettuneen betonin ominaisuuksiin. Niiden vaikutustapa betonissa on joko kemiallinen tai fysikaalinen ja niiden määrät pysyvät alhaisina verrattuna betonin muihin osa-aineisiin. (1, s.63.)

Lisäaineita käytettäessä tulee muistaa, että niiden käyttö vaatii aina esikokeita ja huolellisuutta. Lisäaineet yleensä aiheuttavat päävaikutuksensa lisäksi sivuvaikutuksia. Esimerkiksi monien notkistimien ja huokostimien yhteistoiminta on epävarmaa ja erityisesti kylmissä lämpötiloissa jotkin notkistimet hidastavat betonin sidosreaktioita. Lisäaineiden toimintaan betonissa vaikuttavat lisäainelajin ja -määrän lisäksi mm. muut lisäaineet, runkoaineen rakeisuus, lämpötila, annostusjärjestys ja betonisekoittimen teho. (1, s.63.)

2.5.1 Notkistimet

Notkistavat lisäaineet ovat pinta-aktiivisia aineita, jotka mahdollistavat pienempien vesi- ja sementtimäärien käytön. Ilman näitä aineita esimerkiksi korkealujuusbetonin valmistaminen ei olisi mahdollista. Notkistimien tarkoitus on

parantaa betonin työstettävyyttä esim. pumpattavuutta ja koossapysyvyyttä. (1, s.65.)

Notkistimet jaetaan ryhmiin niiden tehokkuuden perusteella. Nesteyttimillä ei saada aikaan vedenvähennystä, vaan niillä vaikutetaan ainoastaan betonin työstettävyyteen. Notkistimilla saadaan aikaan 5 - 15 %:n ja tehonotkistimilla 12 - 30 %:n vedenvähennys kuitenkin huonontamatta betonin muokattavuutta. (1, s.65.)

Annosteltavan määrän ja notkistinlaadun lisäksi notkistavien lisäaineiden toimintaan vaikuttavat mm. sementti ja sen määrä, hienoainesmäärä, seosaineet sekä lämpötila ja sekoitusteho. Yleensä notkistavia lisäaineita annostellaan 1 - 1,5 % sideaineen kokonaismäärästä, mutta suurempienkin määrien käyttö on sallittua tavoitteesta ja notkistimesta riippuen. (1, s.65.)

2.5.2 Huokostimet

Huokostimen tarkoitus on lisätä ilmamäärää betonissa, jotta sen pakkasenkestävyys paranee. Huokostimella ilmapitoisuus nostetaan 2,5 - 5%:iin, jolloin betoniin syntyy pieniä ilmakuplia, ns. suojahuokosia. Nämä kuplat leviävät tasaisesti betoniin ja niiden tehtävänä on vastaanottaa betonissa olevan jäätyvän veden aiheuttama paine niin, että betoni ei rikkoudu jäätyksen seurauksena. (1, s.66; 14, s.142.)

Tyypillinen huokostimen annostusmäärä on vain 0,01 - 0,03 % sideaineen kokonaismäärästä. Huokostimet lisäävät betonin notkeutta ja koossapysyvyyttä, parantavat betonimassan muokattavuutta sekä vähentävät osa-aineiden erottumista toisistaan. Kuitenkin huokostus heikentää betonin loppulujuutta. Karkeasti arvioiden betonin lujuus heikkenee noin 5 %, kun ilmamäärä lisääntyy yhdellä prosentilla. (1, s.67.)

Notkistimen ja huokostimen yhteiskäyttö on erittäin ongelmasta. Monet notkistimet eivät sovellu huokostimen kanssa käytettäväksi yhdessä niiden

ajassa huokokset ulos betonista tai niiden estäessä huokosten synnyn betoniin.
(1, s.67.)

2.5.3 Hidastimet ja kiihdyttimet

Hidastimien tehtävänä on siirtää sitoutumista myöhemmäksi. Yleensä hidastimia käytetään siirrettäessä betonimassaa pitkiä matkoja sekä kohteissa, joissa työsaumat eivät ole haluttuja. Myös lämpötilan noustessa korkeaksi on hidastimien käytöstä hyötyä, jolloin massalle saadaan pidempi muokkaus aika. Hidastimien pitoisuus on yleensä 1 - 3 % sideaineen kokonaismäärästä. Annostukseen vaikuttavat mm. lämpötila, seosaineet, sementti ja haluttu hidastusaika. (1, s.67.)

Kiihdyttimien tehtävänä on kiihdyttää betonin sitoutumista tai kovettumista. Tällä voidaan nopeuttaa muottien purkamisajankohtaa tai betonin jäätymlujittumista.
(1, s.67-68.)

2.6 Ruiskubetonointi

Ruiskubetonoinnissa on kaksi vallitsevaa työskentelymenetelmää, kuivaseosmenetelmä ja märkäseosmenetelmä. Ne asettavat omat vaatimuksensa sekä tuoreelle että kovettuneelle betonimassalle. Tästä huolimatta ruiskubetonoinnissa käytetään samoja raaka-aineita kuin tavallisessa valubetonissa. Ruiskubetonissa käytettävien sideaineiden tulee olla CE-merkittyjä. (3, s.8,13.)

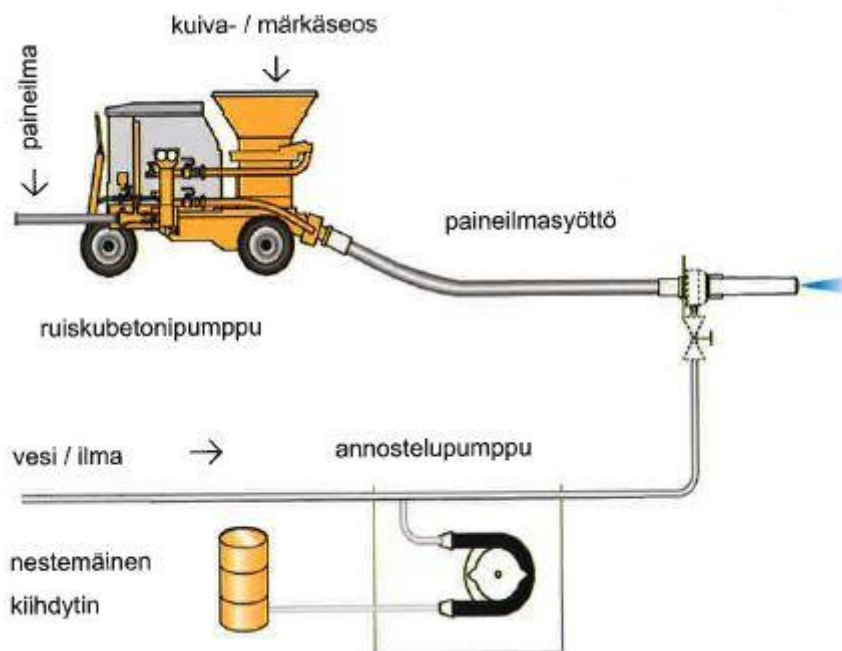
2.6.1 Ruiskutusvaiheessa käytettävät lisäaineet

Jos kuivaseosmenetelmässä käytetään kiihdytintä, se tulee lisätä ruiskusuuttimessa lisättävän veden sekaan. Ruiskun syöttöaukossa sijaitseva synkronoitu annostelulaite lisää jauhemaisen kiihdyttimen betonimassaan. Märkäseosmenetelmässä betonimassaan lisätään yleensä kovettumista ja sitoutumista aktivoivaa kiihdytintä ruiskusuuttimessa. Tämä mahdollistaa nopeuttamalla betonin kovettumista paksumpien betonikerroksien valamisen yhdellä kertaa. Näin ollen ruiskutusaikataulua saadaan nopeutettua.

Lisäaineiden annostuksen tulee olla synkronoitu ruiskutussuuttimessa betonimassan syöttöön. (3, s.17.)

Kiihdyttimiä käytettäessä sitoutumisreaktiot saadaan alkamaan jopa kymmenien sekuntien kuluttua aineen lisäyksestä. Ne myös lisäävät alkulujuuden kehitystä. Kuitenkin niiden vaikutus loppulujuuteen on negatiivinen, sillä ne heikentävät loppulujuutta ja se tulee ottaa huomioon suhteitusta tehtäessä. Joissakin tapauksissa on hyvä tehdä ennakkokokeita perusseoksen koostumuksen määrittämiseksi. (3, s.18.)

Saavutettavan sitoutumisnopeuteen ja varhaislujuuttumisen kehitykseen betonimassan ja kiihdyttimen lämpötilalla on merkittävä vaikutus. Toinen merkittävästi vaikuttava seikka on sementin määrä ja sen laatu. Märkäseosmenetelmää käytettäessä voidaan betonimassan notkeuteen vaikuttavien lisäaineiden vaikutus pysäyttää (kuva 4). (3, s.18.)



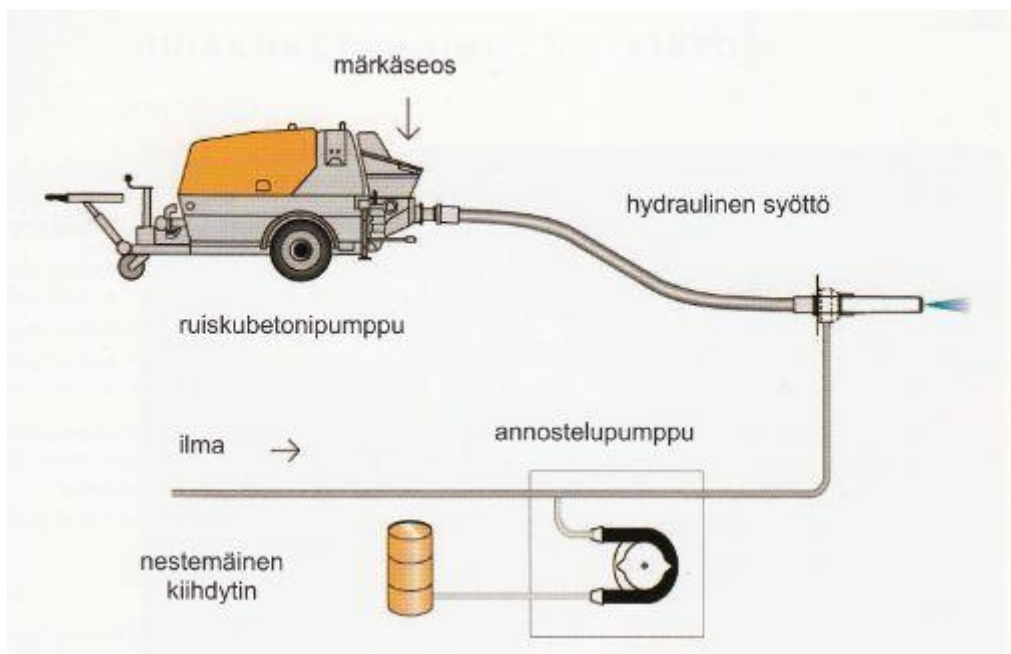
KUVA 4. Esimerkkikuva ruiskutuskalustosta (3, s.24)

2.6.2 Kuivaseosmenetelmä

Kuivaseosmenetelmää voidaan periaatteessa käyttää kaikissa kohteissa, mutta taloudellisesti sen käyttö on järkevämpää pienemmissä kohteissa tai silloin, kun valettava tila on ahdas. Yleisiä käyttökohteita ovat rakenteiden korjaus ja vahvistustyöt. Kuivaseosmenetelmällä betonin siirtoetäisyydet voivat olla jopa satoja metrejä ja parhaimmillaan päästään kymmenen kuution betonin siirtotehoon tunnissa. Useimmiten suuttimen ohjaus sekä ruiskuttaminen tapahtuvat käsin suutinmiehen ohjaamana. (3, s.9, 24.)

2.6.3 Märkäseosmenetelmä

Märkäseosmenetelmä soveltuu yleisesti ottaen laaja-alaisille ruiskutustöille ja laitteistot kulkevat pyörien päällä. Ruiskutustöissä käytetään yleisesti kauko-ohjattavia hydraulisia puomeja, joilla voidaan parantaa työturvallisuutta sekä työskentelyolosuhteita. Betonin laatua saadaan parannettua, kun veden annostelua voidaan säädellä. Tällä menetelmällä on mahdollista päästä erittäin pieneen hukkaroiskeen määrään (kuva 5). (3, s.25.)



KUVA 5. Märkäseosmenetelmässä käytettävä ruiskutuskalusto (3, s.26)

2.7 Hukkaroiske

Hukkaroiske syntyy aina ruiskubetonoinnin yhteydessä ja sen syntymiseen on monta erinäistä syytä. Erityisesti hukkaroiskeen määrän vaikuttaa suutinmiehen kokemus ja käytettävä menetelmä. Hukkaroiske ei voida käyttää uudestaan betonin ruiskutuksessa, mikä on merkittävä kustannustekijä ruiskubetonoinnissa. Hukkaroiskeen määrä pystypintoja ruiskuttaessa ylöspäin on 20-30 % kuivaseosmenetelmällä ja 5-15 % märkäseosmenetelmällä. Hukkaroiskeen määrä voi kasvaa jopa 50 %:iin, kun vaakapintoja ruiskutetaan alhaalta ylöspäin. (3, s.34.)

Hukkaroiskeen määrään vaikuttavia tekijöitä ovat

- ruiskubetonointimenetelmä (kuivaseos, märkäseos)
- suutinmiehen ammattitaito
- suuttimen etäisyys ruiskutuskohteesta
- ruiskutuksen parametrit (suutin, paineilman paine, paineilman määrä, ruiskutuksen teho)
- ruiskutuksen suunta
- suuttimesta lähtevän massavirran nopeus
- ruiskubetonin suhteitus
- alustan kunto (tasaisuus, tartunta)
- ruiskubetonin toiminta (alkulujuus, tartuntalujuus, kerrospaksuus) (3, s.34).

2.8 Ruiskutus

Ruiskubetonoinnissa ruiskutus täytyy tehdä ennen massan sitoutumisen alkamista. Aika riippuu lämpötilasta, sementtityypistä ja mahdollisten hidastimien käytöstä. Lämpötilan ollessa noin 20 °C työskentelyaika kuivaseosmenetelmällä on noin yhden tunnin verran massan sekoituksesta. Hidastimia on mahdollista käyttää myös kuivaseosmenetelmällä, mutta niiden

vaikutusta täytyy selvittää erikseen. Lämpötilan ollessa noin 10 °C kuivaseos on käyttökelpoista noin 2-3 tuntia sekoittamisesta. Mikäli lämpötila on todella korkea, voi massan työstöaika olla vain noin 15 minuuttia sekoituksesta. (3, s.49.)

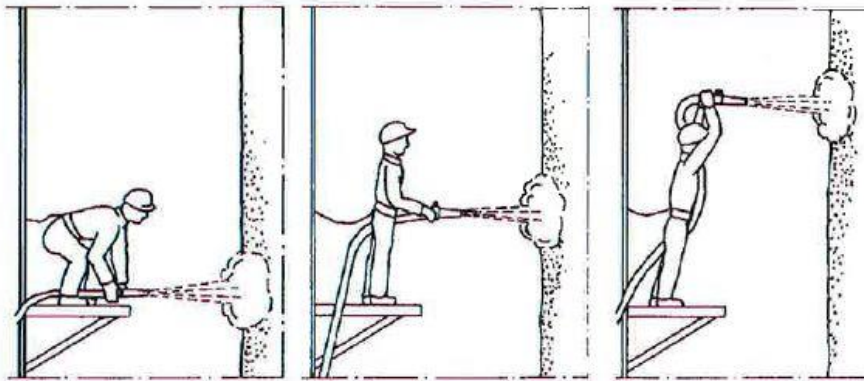
Käsin ruiskuttaessa tulee suutinmiehen nojata hiukan eteenpäin, kohti betonisuihkun suuntaa. Käsin ruiskutus sopii hyvin ahtaisiin paikkoihin ja silloin, kun ruiskutusteho on pieni. Ruiskutettaessa laajoja alueita on ruiskutuspuomin käyttö tehokkain menetelmä. (3, s.50.)

Ruiskuttaessa pystypintoja tulee työ tehdä alhaalta ylöspäin, jotta betonointia ei tehdä hukkaroiskeen päälle ja voidaan varmistua betonin kunnollisesta tarttumisesta alustaan. Mikäli ruiskutettavassa seinässä on työsauma, aloitetaan ruiskubetonointi vanhan ruiskubetonoinnin rajalta edeten siitä pois päin. Ruiskubetonointia tehtäessä on suihku pyrittävä pitämään jo betonoidun ja betonoimattoman alueen rajapinnassa. Mikäli ruisku osoittaa liian kauaksi tästä rajapinnasta ruiskuttamattomalle alueelle, on hukkaroiskeen kertyminen rajapintaan mahdollista. Tällöin ei voida varmistua betonin riittävästä tartunnasta pintaan (kuva 6). (3, s.50.)

Sopiva ruiskutusetäisyys on riippuvainen käytettävästä ruiskutustehosta ja ruiskusuuttimen halkaisijasta. Etäisyyden ollessa liian suuri tai pieni suhteessa massavirtaan ja nopeuteen, lisääntyy hukkaroiskeen määrä. Lisäksi ruiskutettaessa liian etäältä voi massan tiiveys ja lujuus heikentyä. Yleensä etäisyydet ovat väliltä 0,6-1,8 metriä. Raudoitettuja rakenteita ruiskutettaessa etäisyydet ovat yleensä pienempiä kuin raudoittamattomia rakenteita ruiskutettaessa. (3, s.50.)

Ruiskusuuttimen tulee olla mahdollisimman suorassa ruiskutettavaa pintaa kohti hukkaroiskeen minimoimisen takia. Betonin lujuus voi heikentyä ja hukkaroiskeen määrä kasvaa, mikäli pintoja ruiskutetaan vinosti. Betoniin tulee myös helposti aaltoja paksuja betonikerroksia ruiskutettaessa kulman ollessa vino. (3, s.50-51.)

Ruiskutettavat kerrospaksuudet ovat yleensä paksuudeltaan 25-50 mm. Ruiskutettaessa yli 25 mm:n kerrospaksuuksia tulee massassa käyttää kiihdyttimiä. Käytettäessä oikeaa suhteitusta kiihdytintä ja ammattitaitoista ruiskuttajaa voidaan ruiskuttaa hyvinkin paksuja kerroksia, yleensä 100-500 mm. (3, s.51.)



KUVA 6. Esimerkkikuva oikeaoppisesta ruiskutuksesta (3, s.50)

3 VALMISTETTAVIEN MASSOJEN TESTAUSOHJELMA

Laboratoriossa voidaan mitata betonin ominaisuuksia erilaisilla kokeilla. Betonin testauksesta on olemassa erilaisia standardeja, jotka on täytettävä ja joita voidaan käyttää hyödyksi betonia valmistettaessa. Tässä luvussa on esitelty massojen valmistuksessa käytettäviä ainesosia ja niiden suhteita sekä massojen yhteneväsyydeltä vaadittavia määreitä.

3.1 Ensimmäisen vaiheen resepteillä valmistettavat testit

Tässä opinnäytetyössä käsiteltävät ruiskubetonimassat tehtiin talven/kevään 2014 aikana. Ensimmäisen vaiheen testeihin valmistettavat massat pyrittiin tekemään leviämän ja ilmamäärän osalta mahdollisimman samankaltaisiksi. Kun leviämä ja ilmamäärä ovat samat, saadaan massoista vertailukelpoiset keskenään myöhemmin suoritettaviin puristus- ja taivutuslujuustesteihin. Massoja valmistettiin kaksi prismamuotillista (6 prismaa) jokaista reseptiä kohden.

Massojen metakaoliinipitoisuudet vaihtelivat nollan ja 30 painoprosentin välillä sideainemäärästä. Betonimassat valmistetaan numerojärjestyksessä 0 - 30, massan numero 0 ollessa vertailumassa, joka sisälsi ainoastaan sementtiä sideaineena. Vertailumassa valmistettiin käyttäen Finnsementin Rapid – sementtiä sideaineena. Tällä massalla haettiin sopivat leviämän ja ilmamäärän arvot, joita käytettiin vertailuarvoina muita testattavia massoja valmistettaessa. Muut massat pyritään tekemään leviämän osalta +-10 millimetrin tarkkuudella ja ilmamäärän osalta yhden tilavuusprosentin tarkkuudella. Muiden massojen metakaoliinipitoisuudet vaihtelivat välillä 6 – 30 % sideainemäärästä. Massat on nimetty MK06/xx-MK30/xx ja numero kirjainyhdistelmän jäljessä ilmoittaa aina kulloinkin kyseessä olevassa massassa käytettävän metakaoliinipitoisuuden. Jälkimmäiset x:t korvataan kappaleen numerolla, joita on kuusi aina näytettä kohtaan. Järjestysnumerot kasvavat järjestelmällisesti aina metakaoliinipitoisuuden noustessa.

Sideaineena työssä käytettiin Finnsementin Rapid -sementtiä ja Argical-M 1200S –metakaoliinia. Notkistimena toimi Sikament RSX, runkoaineena standardihiekka ja huokostimena Ilma-Parmix 11-21. (7; 11; 12.)

Kaikilla resepteillä valmistetuille betonikappaleille tehdään taivutus- ja puristuslujuutta mittaavat testit yhden päivän, seitsemän päivän ja 28 päivän ikäisenä. Testissä käytetään Dartec merkistä yleisaineenkoestuslaitetta, joka soveltuu 0-400 kN:n kuormitukselle. Lujuudet määritellään SFS-EN 196-1 -standardin mukaisesti. (4, s.14.)

3.2 Toisen vaiheen ruiskubetonimassat

Toisessa vaiheessa testataan eri notkistimien vaikutusta massan työstettävyyteen ja lujuuteen. Näihin testeihin valitaan ensimmäisessä vaiheessa tehdyistä massoista parhaan puristuslujuuden saaneen massan resepti. Resepti pidetään muutoin samana, mutta notkistinta vaihdetaan toisiin notkistimiin, jolloin niiden vaikutusta ruiskubetonimassaan voidaan verrata.

Koska toisessa vaiheessa testataan eri notkistimia, testattavaksi tulevat tässä vaiheessa seuraavat kolme uutta notkistinta: VB-Parmix, Habe Pantarhit T100, Elementti Parmix, sekä aikaisemmin käytetty Sikament RSX. Tarkoituksena on toistaa ensimmäisessä vaiheessa parhaimman puristuslujuuden saavuttanut resepti, jonka notkistinta kuitenkin vaihdellaan. Toisessa vaiheessa tehtävät massat nimetään MK01/xx – MK04/xx, jossa MK:n jälkeinen ensimmäinen järjestysnumero tarkoittaa käytetyn notkistimen tyyppiä ja x:t kappaleen numerointia.

4 TESTATTAVIEN MASSOJEN VALMISTUS

Laboratoriossa valmistetussa betonista voidaan tarkkaan määrittää betonin laatu ja koostumus. Näillä seikoilla on suuri merkitys betonin lopulliseen laatuun ja siksi ne on tärkeä tehdä huolellisesti. Tässä luvussa käydään läpi betonin valmistus sekä valmistuksessa käytetyt mittalaitteet ja standardit.

4.1 Ensimmäisen vaiheen massat

Ensimmäistä betonimassaa valmistettaessa pyritään selvittämään tarvittava notkistimen ja huokostimen tarve. Tarkoituksena oli tehdä normaalia ruiskubetonoinnissa käytettävää betonimassaa vastaavaa materiaalia. Tämä massa oli ns. testimassa, johon ei lisätty ollenkaan metakaoliinia, vaan sideaineena käytettiin pelkkää Finnsementin Rapid -sementtiä. Muita aineita olivat kiviaineena standardihiekka, vesi ja notkistimena Sikament RSX. Testeissä käytettiin pientä standardin SFS-EN 196-1 mukaista sekoitusmyllyä. Myllyyn lisättiin runkoainesta, sideainetta ja vettä pieniä määriä kerrallaan, jotta voitiin varmistua aineiden kunnollisesta sekoittumisesta. (4, s.6-8.)

4.1.1 Leviämän määrittäminen

Kun betonimassa oli saatu sekoitettua myllyssä, irrotettiin kulho myllystä ja kulho siirrettiin betonin leviämää mittaavalle toimipisteelle. Iskupöydällä standardin SFS-EN 1015-3 mukaisesti suoritettu leviämätesti suoritettiin seuraavalla tavalla. Kulhoa täytettiin asteittain kahdessa osassa ja kunkin täytön jälkeen pintaa paineltiin ”tapulalla” noin 15 kertaa, jotta massa saatiin tiivistettyä kunnolla. Kun kulho oli täynnä, sen pinta tasoitettiin liipalla ja kulho poistettiin. Mittalaitteessa oleva kampi nostaa yläosassa olevaa kantta, joka tipahtaa jokaisen kierroksen päätteeksi. Sen seurauksena betonimassa leviää. Mittalaitteessa olevaa kampea väännettiin 15 kertaa noin sekuntin kierrostahdilla. Seuraavaksi voitiin mitata leviämä ottamalla ristimita näytteestä. (5, s.5.)

Koska testimassaa seuraavien betonimassojen leviämää ei tarkalleen tiedetty, täytyi aina kulloista massaa sekoittaa useita kertoja, jolloin siihen lisättiin notkistinta aina pieniä määriä kerrallaan. Notkistimen lisäyksen jälkeen massasta mitattiin leviämä. Mikäli se ei ollut riittävä, piti massaa laittaa uudestaan myllyyn ja siihen lisättiin notkistinta. Toimenpidettä suoritettiin niin kauan, että massalle saatiin haluttu leviämä. Rapidsementti itsessään sisältää jonkin verran kiihdytintä, joka lyhentää työstöaikaa. Koska työstöaika oli rajallinen, ei massaa saatu sopivaksi vielä ensimmäisellä yrityksellä, vaan massoja jouduttiin tekemään useampi. Notkistinmäärän kannalta tiedossa oli kuitenkin suuntaa antavaa informaatiota edellisistä kokeista, jota voitiin hyödyntää. Näin leviämä saatiin sopivaksi kohtuullisilla testikerroilla.

4.1.2 Ilmamäärän määrittäminen

Kun leviämä oli saatu sopivaksi, siirrettiin massa ilmamäärää mittaavaan laitteeseen. Laitteessa oleva kulho täytettiin testattavalla betonilla noin puoleenväliin, minkä jälkeen kulhoa tärytettiin, jotta betonille saatiin riittävä tiiveys. Seuraavaksi astia täytettiin kokonaan ja tärytys uusittiin. Ilman tärytystä betonimassaan jää ilmarakoja ja mittaustulokset jäisivät liian korkeiksi, eivätkä edustaisi todellista ilmamäärää. Seuraavaksi astian kansi asetettiin paikalleen ja kannen kaksi venttiiliä aukaistiin. Venttiileihin syötettiin vuorotellen kummaltakin puolelta vettä, kunnes toiselta puolelta olevasta venttiilistä tuli vettä. Tällä toimenpiteellä varmistutaan ilmatilan täydellisestä täyttymisestä. (6, s.8-11.)

Tämän jälkeen venttiilit suljettiin ja kannessa olevaa pumppua paineltiin niin kauan, että kannessa oleva mittaristo osoitti mittaviivaan. Peukalonapista painettiin, minkä jälkeen mittaristo näytti massan ilmamäärän. Testeissä kävi ilmi, että ilmamäärä oli riittävän korkea ilman huokoistimen käyttöä, joten sen käytölle ei ollut tarvetta. Notkistimen käyttö lisää ilmamäärää betonimassoissa, minkä seurauksena ilmamäärästä tuli riittävä. Joissakin testeissä ilmamäärä nousi hiukan korkeahkoksikin, joten huokostimella olisi ollut ainoastaan negatiivisia seurauksia betonin koostumukseen ja eritoten puristuslujuuteen.

4.1.3 Ruiskubetonin valaminen ja säilytys

Kun ilmamäärä oli saatu mitattua ja todettiin riittäväksi, poistettiin massa ilmamääräkulhosta. Osa massan yläkerroksesta poistettiin, koska mittalaitteiston yläosa täyttyy vedellä ja ylhäällä olevan massan vesipitoisuus kasvaa. Tämän seurauksena kulhon yläosassa sijaitseva betonimassa ei täytä testeiltä vaadittavaa laatua. Kun ilmamäärä oli todettu sopivaksi, täytettiin kaksi kappaletta huolellisesti SFS-EN 196-1 -standardin mukaisesti kasattuja ja öljytyjä prismamuotteja korkeussuunnassa puoleenväliin. Muotit asetettiin prismatäryyttimeen ja kone käynnistettiin. Täryytysaika säädettiin 30 sekuntiin. Tärytyksen loputtua irrotettiin muotit ja ne täytettiin kokonaan. Pinta tasattiin ja muotit asetettiin takaisin täryyttimeen. Täryytys suoritettiin uudestaan ja aika pidettiin samana. (4, s.8-12.)

Näin muotit saatiin valmiiksi säilytystä varten ja ne siirrettiin kosteaan laatikkoon kuivumaan. Laatikossa oli sisäpuolella kostutettu vaahtomuovi, jonka tarkoituksena oli varmistaa riittävä ilmankosteus. Tämä ehkäisee massoista liiallisen veden haihtumisen, joka aiheuttaa betonille kutistumista ja sitä kautta kuivumiskutistumaa.

4.1.4 Toinen leviämämittaus

Betonia tehtiin riittävä määrä, jotta sitä jäi valamisen jälkeen riittävästi kulhossa säilytettäväksi toista leviämämittausta varten. Massa oli samaa kuin se, jolla prismamuotit täytettiin. Tämä testi suoritettiin kahden tunnin kuluttua vedenlisäyksestä sekoitusvaiheesta. Mittaaminen suoritettiin samalla tavalla kuin aikaisemmin. Testin avulla saadaan tietoa, kuinka nopeasti betonimassa alkaa sitoutumaan. Sitoutumisen seurauksena menetetään työstettävyys ja massan alkulujittuminen alkaa.

4.2 Toisen vaiheen massat

Eri notkistimia testattaessa valmistus sujui pääpiirteittäin samana kuin aiemmin. Massat sekoitettiin betonimyllyssä huolellisesti. Kun sopivaa leviämää haettiin,

jouduttiin jokaista massaa testaamaan iskupöydällä useita kertoja, koska notkistimen tarvittavasta määrästä ei ollut tietoa. Yhdellä massalla pystyi ripeästi toimien tekemään kolme leviämämittausta. Syynä tähän on massojen lyhyt työstöaika ja se, että jokaisen mittauksen jälkeen iskupöytä työkaluineen joudutaan pesemään sekä notkistinmäärät huolellisesti mittaamaan. Jos kolmella mittauskerralla ei saatu sopivaa leviämää, jouduttiin massa hävittämään ja massan valmistus aloittamaan alusta sekä koe suorittamaan uudestaan. Kuitenkin uudella massalla suuntaa antava lähtökohta notkistinmäärälle oli tiedossa aikaisemmista mittauksista, joten massoja ei yleensä tarvinnut valmistaa kahta erää enempää.

Ilmamäärä mitattiin aikaisemmin kuvattuja työskentelymenetelmiä noudattaen ja se onnistui jokaisen massan kohdalla ongelmitta. Myös tärytys ja säilytys sujuivat ongelmitta. Viimeisenä vaiheena betoneille suoritettiin tunnin päästä vedenlisäyksestä vielä toinen leviämämittaus.

5 PURISTUS- JA TAIVUTUSLUJUUDET SEKÄ TULOSTEN ANALYSOINTI

Puristus- ja taivutuslujuudet mitattiin yhden, seitsemän ja 28. päivän ikäisillä testikappaleilla. Testit suoritettiin SFS-EN 196-1 -standardin mukaisesti.

Liitteessä 1 esitetään laajemmat tiedot testatuista kappaleista.

Testikappaleet nimettiin järjestyksessä prismamuotti kerrallaan, jotta saatiin käytännön osuus mahdollisimman selkeäksi. Jokaisesta prismamuotillisesta tuli kolme prismaa, jotka testattiin eri ajankohtina (1., 7. ja 28. päivänä). Näin ollen saatiin kuusi näytettä aina yhdestä massasta ja esimerkiksi vertailumassasta näytteet numero 1-6. Näin ollen yhden päivän testit mitattiin kappaleilla yksi ja neljä (ensimmäisen muotin ensimmäinen prisma ja toisen muotin ensimmäinen prisma). Taulukoiden numeroinnissa on aina saman massan ja testaus iän kohdalla kolmen numeron hyppäys. (4, s.8.)

Taulukoissa 2-7 suluissa esitettyjen numeroiden merkitys on seuraava:

- 1) lujuus ilmoitettu 40 x 40 mm:n prismalujuutena (MPa)
- 2) lujuus mitattu 40 x 40 x 160 mm:n kuutioprismalla.

5.1 Yhden vuorokauden lujuudet

Kuten taulukosta 2 näkyy, nousee alkulujuus aina 15 % metakaoliinipitoisuuteen runkoainesmäärästä. 18 %:n pitoisuudella puristuslujuus on samaa luokkaa kuin perinteisellä sementillä. Taulukon loppupäässä tulokset heikkenevät jonkun verran, joten näiden massojen tulokset jäävät vertailumassasta.

Taivutuslujuuden osalta yksikään metakaoliinia sisältävä betonikuutio ei saavuttanut vertailumassan arvoja. Puristuslujuuden suurus on kuitenkin huomattavasti merkitsevämmässä roolissa betonimassojen vertailussa kuin taivutuslujuus (taulukko 2).

TAULUKKO 2. Yhden vuorokauden ikäisten kappaleiden lujuudet

Kappaleen nimi/numero	1 vrk Puristuslujuus (1)	1 vrk Taivutuslujuus (2)
MK00/01 (Vertailu)	15,69	1,6
MK00/04	16,22	1,93
MK06/07	15,03	1,41
MK06/10	14,86	1,48
MK09/13	17,58	1,62
MK09/16	17,54	1,51
MK12/19	16,81	1,44
MK12/22	17,58	1,61
MK15/25	17,48	1,47
MK15/28	17,43	1,68
MK18/31	15,09	1,38
MK18/34	15,85	1,41
MK21/37	15,40	1,52
MK21/40	14,65	1,48
MK24/43	15,12	1,37
MK24/46	14,90	1,44
MK27/49	13,03	1,27
MK27/52	13,20	1,27
MK30/55	13,89	1,24
MK30/58	14,58	1,34

5.2 Seitsemän vuorokauden lujuudet

7. vuorokauden ikäisissä tuloksissa puristuslujuus oli jo huomattavasti korkeampi kaikilla metakaoliinia sisältävillä näytteillä kuin pelkällä sementillä valmistetulla betonilla. Suurin puristuslujuus saatiin eniten kaoliinia sisältävällä reseptillä ja lujuus nousee suhteellisen selkeästi metakaoliinipitoisuuden noustessa. Parhaimman taivutuslujuus saavutettiin 18 %:n metakaoliini runkoainespitoisuuden omaavalla reseptillä ja heikoin vertailumassalla. Kyseenomaisella ajanjaksolla kaoliinin edut ovat selkeät (taulukko 3).

TAULUKKO 3. Viikon ikäisten testikappaleiden lujuudet

Kappaleen nimi/numero	7 vrk Puristuslujuus (1)	7 vrk Taivutuslujuus(2)
MK00/02	40,93	3,17
MK00/05	41,38	2,83
MK06/08	43,47	3,55
MK06/11	42,49	3,38
MK09/14	45,74	3,68
MK09/17	44,38	3,64
MK12/20	48,89	4,18
MK12/23	48,77	3,86
MK15/26	49,08	3,26
MK15/29	50,49	3,34
MK18/32	47,99	3,83
MK18/35	51,75	4,31
MK21/38	50,64	3,74
MK21/41	47,35	3,84
MK24/44	50,40	3,85
MK24/47	51,62	3,95
MK27/50	49,88	3,53
MK27/53	49,88	3,68
MK30/56	52,82	3,97
MK30/59	50,58	3,37

5.3 28. Vuorokauden lujuudet

Myös 28 päivän ikäisissä näytteissä metakaoliinia sisältävät näytteet olivat huomattavasti kyvykkäämpiä sietämään puristusta kuin pelkällä sementillä valmistetut näytteet. MK18 saatiin ensimmäisen vaiheen paras puristuslujuus ja sen valmistuksessa käytetty resepti valittiin jatkotesteihin. Vertailun paras taivutuslujuus saavutettiin reseptillä MK21 ja puristuslujuuskaan ei jäänyt kauaksi parhaimmasta. Vaikka taulukon loppupäässä sijaitsevilla runsaasti metakaoliinia sisältävillä betoneilla saavutettiin hyviä tuloksia, on niiden käyttö käytännön tilanteissa hyvin hankalaa niiden huonon työstettävyyden takia (taulukko 4).

TAULUKKO 4. Kuukauden ikäisten kappaleiden lujuudet

Kappaleen nimi/numero	28 vrk Puristuslujuus (1)	28 vrk Taivutuslujuus (2)
MK00/03	47,06	3,62
MK00/06	47,43	3,28
MK06/09	51,07	3,64
MK06/12	52,13	3,53
MK09/15	52,17	4,1
MK09/18	54,22	3,89
MK12/21	54,36	3,95
MK12/24	53,90	4,33
MK15/27	54,92	3,58
MK15/30	56,77	4,34
MK18/33	55,36	3,59
MK18/36	57,83	3,54
MK21/39	56,68	4,2
MK21/42	55,44	3,69
MK24/45	56,88	3,51
MK24/48	55,82	3,88
MK27/51	54,61	2,95
MK27/54	55,69	3,29
MK30/57	55,15	4,18
MK30/60	53,04	4,07

5.4 Jatkotestien tulokset

5.4.1 Yhden vuorokauden tulokset ja niiden analysointi

Puristuslujuuden osalta Sikament RSX:llä tehtyjen kokeiden osalta on syytä epäillä testikappaleen olleen hiukan yli vuorokauden säilytyksessä, koska testitulokset on poikkeuksellisen suuri eikä aikaisemmin samalla reseptillä tehdyillä kokeilla päästy samankaltaisiin tuloksiin. Tätä mittausta tehtäessä puristuslujuus tulisi tehdä kohtuullisen tarkasti 24. tunnin päästä valamisesta, koska alussa lujuuden kehitys on kaikista suurinta. Muita tuloksia sen sijaan ei ole syytä epäillä ja ne ovat kaikkien kohdalla vähintäänkin hyvät. Elementti

Parmixin kohdalla puristuslujuus on erinomainen, eikä taivutuslujuudessakaan ole moittimista (taulukko 5).

TAULUKKO 5. Jatkotestien lujuudet yhden vuorokauden ikäisinä

Testikappaleen nimi/numero	1 vrk Puristuslujuus (1)	1 vrk Taivutuslujuus (2)
MK01/01 Sikament RSX	27,34	1,55
MK01/04	27,89	1,65
MK02/07 VB-Parmix	15,30	1,31
MK02/10	15,88	1,54
MK03/13 Elementti	20,53	2,02
MK03/16	20,99	1,84
MK04/19 Ha-Be Pantarhit	15,81	1,4
MK04/22	15,79	1,37

5.4.2 Seitsemän vuorokauden puristus- ja taivutuslujuudet ja niiden analysointi

Sikamentillä ja VB-Parmixilla valmistettujen massojen puristuslujuus oli kohtuullinen, mutta ei täysin odotusten mukainen. Reseptillä, jossa käytettiin VB-Parmixia, valmistetuilla koekappaleilla jäätin tuloksissa alle vertailumassan keskiarvon. Myöskään taivutuslujuudet eivät olleet erityisen hyviä ko. notkistimella valmistetuissa betoniprismoissa.

Taulukon loppupäässä sijaitsevilla Elementti Parmixilla ja Ha-Be Pantarhitillä valmistetut koekappaleet suoriutuivat puristustesteistä sen sijaan kiitettävästi. Pantarhit suoriutui kaikista testatuista koekappaleista parhaiten seitsemän vuorokauden mittauksissa ja toiseksi tuli Elementti Parmix. Taivutuslujuudet olivat myös kauttaaltaan hyvät, pois lukien VB-Parmixia sisältävät massat (taulukko 6).

TAULUKKO 6. Jatkotestien lujuudet viikon ikäisinä

Testikappaleen nimi/numero	7 vrk Puristuslujuus (1)	7 vrk Taivutuslujuus (2)
MK01/02 Sikament RSX	40,81	3,73
MK01/05	45,08	3,61
MK02/08 VB-Parmix	40,52	2,88
MK02/11	39,96	2,82
MK03/14 Elementti	51,86	3,48
MK03/17	52,59	4,03
MK04/20 Ha-Be Pantarhit	53,36	3,71
MK04/23	51,39	3,57

5.4.3 28. vuorokauden puristus- ja taivutuslujuudet ja niiden analysointi

Sikament RSX:n avulla valmistetussa massassa ei päästy yhtä korkeisiin puristuslujuuksiin kuin ensimmäisessä vaiheessa. Myös tästä syystä on hyvä epäillä jatkotestien yhden vuorokauden testeissä saavutettua korkeaa lujuutta ko. notkistimella valmistetussa betonissa. Muiden osalta puristuslujuudet ovat selkeästi parempia kuin vertailumassalla saavutetut. Myös näissä mittauksissa Ha-Ben Pantarhit T100:lla ja Elementti Parmiksilla saavutetut puristuslujuudet ovat todella hyvät. Taivutuslujuuden osalta kaikki tuotteet pärjäsivät hyvin Elementti Parmixin ollessa selkeästi paras (taulukko 7).

TAULUKKO 7. Jatkotestien lujuudet kuukauden ikäisinä

Testikappaleen nimi/numero	28 vrk Puristuslujuus (1)	28 vrk Taivutuslujuus (2)
MK01/03 Sikament RSX	43,49	4,27
MK01/06	48,31	3,88
MK02/09 VB-Parmix	52,50	3,5
MK02/12	51,78	3,55
MK03/15 Elementti Parmix	57,56	4,42
MK03/18	56,02	4,73
MK04/21 Ha-Be Pantarhit	56,44	4,145
MK04/24	55,17	3,43

6 MASSOJEN TYÖSTETTÄVYYS

Massojen työstettävyys on suurin yksittäinen tekijä, joka vaikuttaa betonin käytettävyyteen työstöaikana. Ruiskubetonimassoilta vaaditaan riittävää notkeutta ruiskutusvaiheessa, mutta työstöajan tulisi olla kohtuullisen lyhyt riittävän tarttuvuuden takaamiseksi. Tämän osion sisällössä käydään läpi erilaisten massojen työstettävyys sekä tutkitaan, miten eri notkistimet vaikuttavat ruiskubetonimassojen työstettävyyteen.

6.1 Ensimmäisen vaiheen massat

Massojen käsiteltävyys oli pääosin hyvää. Massojen 1-3 käsiteltävyys oli lähes identtistä ja metakaoliinin vaikutusta käsiteltävyydessä ei vielä juurikaan huomannut (massoilla 2-3). Massat olivat kohtuullisen kuohkeita ja lievästi jäykkiä. Työstöajassa ei myöskään ollut suurta heittoa.

Massojen 4-6 käsiteltävyys tuntui jopa paremmalta kuin vähemmän tai ei ollenkaan metakaoliinia sisältävillä massoilla. Massat olivat kuohkeita sekä tuntuivat käsiteltäessä vähemmän jäykiltä, kuin aikaisemmin tehdyt massat. Tämä selittyy suuremmalla notkistinmäärällä, joka tarvittiin saman leviämisen saavuttamiseen. Kuitenkin työstöajassa alkoi näkymään entistä suurempi metakaoliinin määrä, joka lyhensi työstöaikaa.

Massoilla 7-10 (metakaoliinipitoisuus 24-30 % sideainemäärästä) metakaoliinin suuri määrä näkyi massojen koostumuksessa selkeästi. Massojen työstettävyys oli selkeästi huonompaa kuin aikaisemmin ja järjestysnumeron kasvaessa jokainen massa oli edellistä heikompi työstettävyydeltään. Massat olivat jäykkiä ja kuohkeutta ei ollut samalla tavalla kuin aikaisemmilla massoilla oli ollut. Edes kasvava notkistinmäärä ei auttanut asiaa. Samoin oli työstöajan kanssa, joka lyheni metakaoliinipitoisuuden kasvaessa.

6.2 Toisen vaiheen massat

Kaikki ensimmäisessä vaiheessa tehdyt massat sisälsivät Sikament RSX -notkistinta ja toiseen vaiheeseen päätettiin toistaa ensimmäisessä vaiheessa parhaaseen tulokseen päässyt resepti. Tarkoituksena oli saada kaikista massoista mahdollisimman samankaltaisia, jolloin ne ovat vertailukelpoisia keskenään. Kuitenkaan mittaustuloksista ei saatu useista yrityksistä huolimatta yhtä hyviä kuin ensimmäisessä vaiheessa. Puristuslujuus jäi huomattavasti aikaisemmasta. Tämä johtunee 0,4 tilavuusprosenttia suuremmasta ilmamäärästä testattavassa betonissa. Testattavan koostumuksen työstettävyys oli hyvä ja koostumus oli kuohkeahko. (7.)

VB-Parmixilla massan työstettävyudessa oli hyvin samankaltaisia elementtejä kuin testinotkistimella samalla metakaoliinipitoisuudella tehdyissä kokeissa. Kuitenkin pientä eroavaisuutta oli ja massa tuntui hiukan jäykemmältä käsiteltäessä. (8.)

Elementti Parmix-notkistin oli saman valmistajan kuin VB-Parmix. Näiden kahden notkistimen avulla tehtyjen ruiskubetonien koostumus oli hyvinkin saman tyyppinen. Koostumus tuntui hiukan kehnommalta kuin toisella Parmix-notkistimella tehdyllä ruiskubetonimassalla. Koostumukseltaan se oli kuitenkin kohtuullisen hyvää ja notkistin soveltuu metakaoliinipohjaisen ruiskubetonin valmistukseen. Tällä notkistimella valmistetussa ruiskubetonissa oli jatkotestien paras puristuslujuus. (9.)

Ha-be Pantarhit T100:lla tehdyn ruiskubetonin koostumus erosi muilla notkistimilla valmistetuista betoneista suhteellisen paljon. Koska testeissä massoja joudutaan massoja sekoittamaan käsin suhteellisen paljon, tulee tekijälle selvä tuntuma betonin koostumuksesta. Pantarfit-notkistimella valmistettuja massoja käsiteltäessä huomasi selkeästi massalla olevan muista massoista poikkeavan koostumuksen, kun taas muilla notkistimilla valmistettaessa betonia oli tuntuma betoniin hyvin samankaltainen. Käsitteleminen tuntui huomattavasti helpommalta ja mielekkäämmältä. Massa

tuntui työstettävyydeltään paljon paremmalta ja koostumus oli kuohkeampi.
(10.)

7 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön aiheena oli tutkia metakaoliinin soveltuvuutta ruiskubetonoinnissa käytettävän massan sideaineena. Metakaoliini asettaa omia rajoitteita ja lisää tarvetta lisäaineiden käytölle, eritoten notkistimelle. Kuitenkin sen käytöllä voidaan vaikuttaa positiivisesti ympäristöön kohdistuvaan rasitukseen verrattuna perinteiseen sementtiin.

Laboratio-olosuhteissa saatiin puristuslujuutta kasvatettua selkeästi verrattaessa pelkästään sementtiä sisältävään ruiskubetoniin. Samasta aiheesta on aiemmin tehty opinnäytetyö, jossa varsinkin varhaislujuudessa metakaoliinia sisältävät reseptit jäivät selkeästi pelkällä sementillä tehdyille resepteille. Ilmeistä on, että jatkotutkimuksilla on saatu kehitettyä paremmin ruiskubetonointiin soveltuvaa metakaoliinia sekä reseptiä viilattua.

Tässä opinnäytetyössä lopullinen puristuslujuus kasvoi kaikilla massoilla, joissa oli metakaoliinia. Kuitenkaan yli 21 % metakaoliinin sideainespitoisuutta sisältäviä massoja ei voida näiden tutkimusten perusteella suositella käytettäväksi. Näillä resepteillä valmistetuissa massoissa alkulujuus oli heikompi kuin vastaavasti pelkällä sementillä tehdyissä massoissa. Lisäksi työstettävyyys heikkeni merkittävästi metakaoliinipitoisuuden ylittäessä 21 % sideainemäärästä.

Työssä suoritetuista kokeissa saatujen tulosten perusteella lähtökohdat kenttäkokeille ovat erinomaiset ruiskubetonimassoille, joiden metakaoliinin määrä sideaineesta on 6-21 %. Jatkokokeissa paras tulos saatiin käyttämällä 18 %:n metakaoliinipitoisuutta ja notkistimena Elementti Parmixia. Tämän massan alkulujuuden kehitys oli loistavaa, kuten myös loppulujuus, jotka olivat tällä massalla jatkotestien parhaat.

Koska testit on tehty laboratoriossa käyttäen ruiskubetonoinnin valmistukseen epätavallisia valmistusmenetelmiä, olisi testattavia notkistimia ensiarvoisen tärkeä päästä kokeilemaan kenttäolosuhteissa. Olosuhteiden tulisi olla

työelämän tilanteita vastaavia. Hyviä esimerkkejä tällaisista tilanteista olisi kaivos tai tunneli. Tällöin saataisiin arvokasta tietoa, miten ne soveltuvat käytettäväksi oikeissa työelämän olosuhteissa.

LÄHTEET

1. Betonitekniiikan oppikirja 2004, by 201. 2005. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys.
2. Viirola, Heli – Raivio, Paula 2000. Portlandsementin hydrataatio. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuslaitos. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2041.pdf>. Hakupäivä 10.3.2016.
3. Ruiskubetoniohjeet 2015, by 63. 2015. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys.
4. SFS-EN 196-1. 2005. Sementin testausmenetelmät. Osa 1: Lujuuden määrittäminen. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
5. SFS-EN 1015-3 +A1 +A2. 2007. Muurauslaastien testausmenetelmiä. Osa 3: Tuoreen laastin notkeuden määrittäminen iskupöydällä. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
6. SFS-EN 12350-7. 2009. Tuoreen betonin testaus. Osa 7: Ilmamäärä. Painemenetelmät. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
7. Tehonotkistin Sikament-RSX. 2010. Oy Sika Finland Ab. Saatavissa: <http://fin.sika.com/dms/getdocument.get/0457cf97-541d-345e-89de-e41fa73ace37/TEK10-Sikament-RSX.pdf>. Hakupäivä 25.2.2016.
8. Tehonotkistin VB-Parmix. 2008. Finnsementti Oy. Saatavissa: http://www.finnsementti.fi/fsproductdb/files/vb-parmix_1_09062015_120712.pdf. Hakupäivä 25.2.2016.
9. Tehonotkistin Elementti-Parmix. 2008. Finnsementti Oy. Saatavissa: http://www.finnsementti.fi/fsproductdb/files/elementti-parmix_1_09062015_121206.pdf. Hakupäivä 25.2.2016.

10. Tehonotkistin Ha-Be Pantarhit T100. 2014. Ha-Be Betonchemie GmbH & Co. KG. Saatavissa: <http://www.ha-be-hameln.de/mediafiles/3958.pdf>. Hakupäivä 25.2.2016.
11. Tehonotkistin Elementti-Parmix. 2008. Finnsementti Oy. Saatavissa: http://www.finnsementti.fi/fsproductdb/files/elementti-parmix_1_09062015_121206.pdf. Hakupäivä 25.2.2016.
12. Rabidsementti. 2009. Finnsementti Oy. Saatavissa: <http://www.finnsementti.fi/tuotteet/semetit/rapidsementti>. Hakupäivä 25.2.2016.
13. Metakaoliini Argical-M 1200S. 2008. AGS Mineraux Oy. Saatavissa: <http://www.imerys-perfmins.com/uploadfiles/91/ARGICAL%20M%201200%20S.pdf>. Hakupäivä 25.2.2016.
14. Betoninormit 2016, by 65. 2016. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys.

LÄHTÖTIETOMUISTIO

Tekijä Petri Koukkula _____

Tilaaaja Kajaanin ammattikorkeakoulu _____

Tilaaajan yhdyshenkilö ja yhteystiedot Hannu Kääriäinen _____

Työn nimi _____

Työn kuvaus _____

Työn tavoitteet _____

Tavoiteaikataulu _____

Päiväys ja allekirjoitukset _____

Ensimmäisen vaiheen testit

Kappaleen nimi/numero	1 vrk Puristuslujuus (1)	1 vrk Taivutuslujuus (2)	TIHEYS (kg/m ³)	LEVIÄMÄ (cm)	LEVIÄMÄ 2h (cm)	NOTKISTINMÄÄRÄ	ILMAMÄÄRÄ
MK00/01 (Vertailu)	15,69	1,6	2270	15,9*15,9	13,35*13,25	0	4,80%
MK00/04	16,22	1,93	2220	15,9*15,9	13,35*13,25	0	4,80%
MK06/07	15,03	1,41	2210	15,9*15,65	12,65*12,95	4,7	4,80%
MK06/10	14,86	1,48	2210	15,9*15,65	12,65*12,95	4,7	4,80%
MK09/13	17,58	1,62	2210	15,75*16,05	12,55*12,65	5,5	5,15%
MK09/16	17,54	1,51	2200	15,75*16,05	12,55*12,65	5,5	5,15%
MK12/19	16,81	1,44	2200	15,55*15,65	11,55*11,45	7,2	5%
MK12/22	17,58	1,61	2200	15,55*15,65	11,55*11,45	7,2	5%
MK15/25	17,48	1,47	2200	15,55*15,55	11,65*12,15	7,8	5,15%
MK15/28	17,43	1,68	2190	15,55*15,55	11,65*12,15	7,8	5,15%
MK18/31	15,09	1,38	2200	16,05*16,1	11,5*11,7	8,3	5,40%
MK18/34	15,85	1,41	2210	16,05*16,1	11,5*11,7	8,3	5,40%
MK21/37	15,40	1,52	2210	16,2*16,3	11,45*11,45	9,8	5,80%
MK21/40	14,65	1,48	2200	16,2*16,3	11,45*11,45	9,8	5,80%
MK24/43	15,12	1,37	2200	16,6*16,75	10,95*10,95	10	5,60%
MK24/46	14,90	1,44	2200	16,6*16,75	10,95*10,95	10	5,60%
MK27/49	13,03	1,27	2210	15,75*15,85	10,55*10,55	10,3	5,20%
MK27/52	13,20	1,27	2200	15,75*15,85	10,55*10,55	10,3	5,20%
MK30/55	13,89	1,24	2200	16*15,95	10,15*10,15	13,8	5,45%
MK30/58	14,58	1,34	2200	16*15,95	10,15*10,15	13,8	5,45%

Kappaleen nimi/numero	7 vrk Puristuslujuus (1)	7 vrk Taivutuslujuus (2)	TIHEYS (kg/m ³)	LEVIÄMÄ (cm)	LEVIÄMÄ 2h (cm)	NOTKISTINMÄÄRÄ	ILMAMÄÄRÄ
MK00/02	40,93	3,17	2240	15,9*15,9	13,35*13,25	0	4,80%
MK00/05	41,38	2,83	2240	15,9*15,9	13,35*13,25	0	4,80%
MK06/08	43,47	3,55	2210	15,9*15,65	12,65*12,95	4,7	4,80%
MK06/11	42,49	3,38	2200	15,9*15,65	12,65*12,95	4,7	4,80%
MK09/14	45,74	3,68	2200	15,75*16,05	12,55*12,65	5,5	5,15%
MK09/17	44,38	3,64	2210	15,75*16,05	12,55*12,65	5,5	5,15%
MK12/20	48,89	4,18	2200	15,55*15,65	11,55*11,45	7,2	5%
MK12/23	48,77	3,86	2190	15,55*15,65	11,55*11,45	7,2	5%
MK15/26	49,08	3,26	2190	15,55*15,55	11,65*12,15	7,8	5,15%
MK15/29	50,49	3,34	2190	15,55*15,55	11,65*12,15	7,8	5,15%
MK18/32	47,99	3,83	2200	16,05*16,1	11,5*11,7	8,3	5,40%
MK18/35	51,75	4,31	2220	16,05*16,1	11,5*11,7	8,3	5,40%
MK21/38	50,64	3,74	2220	16,2*16,3	11,45*11,45	9,8	5,80%
MK21/41	47,35	3,84	2220	16,2*16,3	11,45*11,45	9,8	5,80%
MK24/44	50,40	3,85	2200	16,6*16,75	10,95*10,95	10	5,60%
MK24/47	51,62	3,95	2200	16,6*16,75	10,95*10,95	10	5,60%
MK27/50	49,88	3,53	2210	15,75*15,85	10,55*10,55	10,3	5,20%
MK27/53	49,88	3,68	2210	15,75*15,85	10,55*10,55	10,3	5,20%
MK30/56	52,82	3,97	2210	16*15,95	10,15*10,15	13,8	5,45%
MK30/59	50,58	3,37	2200	16*15,95	10,15*10,15	13,8	5,45%

Kappaleen nimi/numero	28 vrk Puristuslujuus (1)	28 vrk Taivutuslujuus (2)	TIHEYS (kg/m ³)	LEVIÄMÄ (cm)	LEVIÄMÄ 2h (cm)	NOTKISTINMÄÄRÄ	ILMAMÄÄRÄ
MK00/03	47,06	3,62	2240	15,9*15,9	13,35*13,25	0	4,80%
MK00/06	47,43	3,28	2240	15,9*15,9	13,35*13,25	0	4,80%
MK06/09	51,07	3,64	2210	15,9*15,65	12,65*12,95	4,7	4,80%
MK06/12	52,13	3,53	2210	15,9*15,65	12,65*12,95	4,7	4,80%
MK09/15	52,17	4,1	2200	15,75*16,05	12,55*12,65	5,5	5,15%
MK09/18	54,22	3,89	2200	15,75*16,05	12,55*12,65	5,5	5,15%
MK12/21	54,36	3,95	2190	15,55*15,65	11,55*11,45	7,2	5%
MK12/24	53,90	4,33	2190	15,55*15,65	11,55*11,45	7,2	5%
MK15/27	54,92	3,58	2180	15,55*15,55	11,65*12,15	7,8	5,15%
MK15/30	56,77	4,34	2190	15,55*15,55	11,65*12,15	7,8	5,15%
MK18/33	55,36	3,59	2180	16,05*16,1	11,5*11,7	8,3	5,40%
MK18/36	57,83	3,54	2190	16,05*16,1	11,5*11,7	8,3	5,40%
MK21/39	56,68	4,2	2190	16,2*16,3	11,45*11,45	9,8	5,80%
MK21/42	55,44	3,69	2200	16,2*16,3	11,45*11,45	9,8	5,80%
MK24/45	56,88	3,51	2180	16,6*16,75	10,95*10,95	10	5,60%
MK24/48	55,82	3,88	2180	16,6*16,75	10,95*10,95	10	5,60%
MK27/51	54,61	2,95	2180	15,75*15,85	10,55*10,55	10,3	5,20%
MK27/54	55,69	3,29	2190	15,75*15,85	10,55*10,55	10,3	5,20%
MK30/57	55,15	4,18	2170	16*15,95	10,15*10,15	13,8	5,45%
MK30/60	53,04	4,07	2170	16*15,95	10,15*10,15	13,8	5,45%

Jokaisesta massasta on kuusi näytettä

1) Lujuus ilmoitettu 40 x 40 mm prisma- ja kuutiota (Mpa)

2) Lujuus mitattu 40 x 40 x 160 mm prismalla

3) Määrä on kolminkertaiseen annokseen ja luku kuvastaa koko "satsin" notkistimen määrä

4) Massat noudattavat ohjeissa annettuja OPC -runkoainemääriä: MK01/XX = 100%; MK02/XX = 94%; MK03/XX = 91%; MK04/XX = 88%; MK05/XX = 85%; MK06/XX = 82%; MK07/XX = 79%; MK08/XX = 76%; MK09/XX = 73%; MK10/XX = 70%

Jatkotestit

Testikappaleen nimi/numero	1 vrk Puristuslujuus (1)	1 vrk Taivutuslujuus (2)	TIHEYS (kg/m ³)	LEVIÄMÄ (cm)	LEVIÄMÄ 2h (cm)	NOTKISTINMÄÄRÄ	ILMAMÄÄRÄ
MK01/01 Sikament RSX	27,34	1,55	2177	15,4*15,55	9,65*9,8	8,4g	5,80%
MK01/04	27,89	1,65	2185	15,4*15,55	9,65*9,8	8,4g	5,80%
MK02/07 VB-Parmix	15,30	1,31	2136	16,2*16,1	12,05*12,1	4,3g	6,50%
MK02/10	15,88	1,54	2178	16,2*16,1	12,05*12,1	4,3g	6,50%
MK03/13 Elementti parmix	20,53	2,02	2161	15,4*15,4	10,2*10,2	10g	6,60%
MK03/16	20,99	1,84	2171	15,4*15,4	10,2*10,2	10g	6,60%
MK04/19 Ha-Be pantarhit T100	15,81	1,4	2163	15,8*15,6	12,4*12,6	6,9g	6,50%
MK04/22	15,79	1,37	2163	15,8*15,6	12,4*12,6	6,9g	6,50%
Testikappaleen nimi/numero	7 vrk Puristuslujuus (1)	7 vrk Taivutuslujuus (2)	TIHEYS (kg/m ³)	LEVIÄMÄ (cm)	LEVIÄMÄ 2h (cm)	NOTKISTINMÄÄRÄ	ILMAMÄÄRÄ
MK01/02 Sikament RSX	40,81	3,73	2211	15,4*15,55	9,65*9,8	8,4g	5,80%
MK01/05	45,08	3,61	2297	15,4*15,55	9,65*9,8	8,4g	5,80%
MK02/08 VB-Parmix	40,52	2,88	2206	16,2*16,1	12,05*12,1	4,3g	6,50%
MK02/11	39,96	2,82	2193	16,2*16,1	12,05*12,1	4,3g	6,50%
MK03/14 Elementti parmix	51,86	3,48	2187	15,4*15,4	10,2*10,2	10g	6,60%
MK03/17	52,59	4,03	2183	15,4*15,4	10,2*10,2	10g	6,60%
MK04/20 Ha-Be pantarhit T100	53,36	3,71	2184	15,8*15,6	12,4*12,6	6,9g	6,50%
MK04/23	51,39	3,57	2180	15,8*15,6	12,4*12,6	6,9g	6,50%
Testikappaleen nimi/numero	28 vrk Puristuslujuus (1)	28 vrk Taivutuslujuus (2)	TIHEYS (kg/m ³)	LEVIÄMÄ (cm)	LEVIÄMÄ 2h (cm)	NOTKISTINMÄÄRÄ	ILMAMÄÄRÄ
MK01/03 Sikament RSX	43,49	4,27	2213	15,4*15,55	9,65*9,8	8,4g	5,80%
MK01/06	48,31	3,88	2208	15,4*15,55	9,65*9,8	8,4g	5,80%
MK02/09 VB-Parmix	52,50	3,5	2068	16,2*16,1	12,05*12,1	4,3g	6,50%
MK02/12	51,78	3,55	2202	16,2*16,1	12,05*12,1	4,3g	6,50%
MK03/15 Elementti parmix	57,56	4,42	2195	15,4*15,4	10,2*10,2	10g	6,60%
MK03/18	56,02	4,73	2195	15,4*15,4	10,2*10,2	10g	6,60%
MK04/21 Ha-Be pantarhit T100	56,44	4,145	2199	15,8*15,6	12,4*12,6	6,9g	6,50%
MK04/24	55,17	3,43	2196	15,8*15,6	12,4*12,6	6,9g	6,50%

Näytteet MK01/01-MK01/06 valmistettu Sikament Rxs:llä (25%)

Näytteet MK02/07-MK02/12 valmistettu VB-Parmixilla

Näytteet MK03/13-MK03/18 valmistettu Elementti Parmixilla

Näytteet MK04/19-MK04/24 valmistettu Ha-Be Pantarhit T100:lla

Kaikki jatkotestien massat valmistettu käyttäen 82% OPC -runkoainemääriä

