

POHJOIS-KARJALAN AMMATTIKORKEAKOULU  
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Ilari Parkkonen

INJEKTOINTIMASSAN KEHITTÄMINEN AA-TIIVIYSLUOKAN  
TUNNELIALUEILLE

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2012



NORTH KARELIA  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## OPINNÄYTETYÖ

Toukokuu 2012

### Rakennustekniikan koulutusohjelma

Karjalankatu 3  
80200 JOENSUU  
p. (013) 260 6800

#### Tekijä

Ilari Parkkonen

#### Nimike

Injektointimassan kehittäminen AA -tiiviyaluokan tunnelialueille

Toimeksiantaja

Kalliorakennus - Yhtiöt Oy

#### Tiivistelmä

Tutkimuksen tarkoituksena oli kehittää uusi kallioinjektointimassa AA-luokan tiiviyalueille, koska ennen käytetty injektointimassa sitoutui sekä kovettui liian hitaasti, mikä puolestaan hidasti louhintaa merkittävästi. Tutkimuksessa keskityttiin uuden injektointireseptin kehittämiseen uudella sementtivalmisteella. Kehittämisellä pyrittiin korvaamaan BB-sementti AA-sementillä, koska uusi sementti sitoutuu nopeammin kuin ennestään käytetty.

Tutkimusmenetelmänä käytettiin Kalliotilojen injektointi 2006 by 53 -julkaisun mukaista menetelmää, mikä perustuu mm. SFS-EN 12175 -standardiin. Tutkimusvälineinä olivat: mud balance vaaka tiheyden mittaamiseen, Marsh suppilo viskositeetin mittaamiseen, litran mitta-astia veden erottumisen mittaamiseen, Vattenfal VU-SC 27 -filteripumppu tunkeuman mittaamiseen ja kuppeja sitoutumisajan mittaamiseen.

Tuloksista huomattiin, että uusi AA-sementti sitoutui paljon nopeammin kuin jo käytössä ollut BB. Uusi injektointimassa sitoutuu niin nopeasti, että jo XX tunnin kuluttua injektointista voidaan reikien poraus aloittaa injektointipaikassa. Suunnittelija hyväksyi massan käytettäväksi kohteessa, joten tutkimus oli onnistunut.

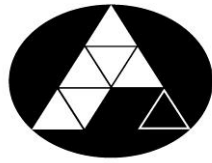
Jatkotutkimuksena voisi olla injektointimassojen tunkeutuvuuksien ja leviämisen tutkiminen kalliossa sekä vesimenekkikokeiden tutkimista todellisiin injektointimääriin.

Kieli  
Suomi

Sivuja 33  
Liitteet 1  
Liitesivumäärä 1

#### Asiasanat

injektointi, injektointimassa, kalliorakenteiden injektointi, kalliorakenteiden tiivistäminen



NORTH KARELIA  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

**THESIS**  
**May 2012**  
**Degree Programme in Civil Engineering**  
Karjalankatu 3  
FIN 80200 JOENSUU  
FINLAND  
Tel. 358-13-260 6800

Author  
Ilari Parkkonen

Title  
Developing a Grouting Recipe for AA -Tightness Adit Areas  
Commissioned by  
Kalliorakennus - Yhtiöt Oy

#### Abstract

The purpose of the study was to develop a new rock grouting recipe of AA-tightness adit areas, because the present grouting material wasn't quick-setting, which in turn slowed down the rock excavation significantly. In this study the focus was on a new grouting recipe, which is based on a new cement product. The idea of the development was to replace the BB-cement with AA-cement, because the new cement binds faster than the one previously used.

The research method was chosen according to the material Kalliotilojen injektointi 2006 by 53. The book is based on SFS-EN 12175 –standard among other things. The study aids which were used were: mud balance scale to measure the density, Marsh funnel for measurement of the viscosity, one liter measuring cup to measure water separation, Vattenfall VU-27-SC pump for a penetration test and cups for measuring binding.

The results showed that the new AA-cement binds much more rapidly than the previously used BB-cement. The new grouting mixture binds so rapidly that within a XX hours after grouting, hole drilling can start at the same place where the grouting took place. The Design Engineer approved the implementation of the new grouting recipe so the study was successful.

Further research could deal with studying the spread and penetration of the grouting material in the rock or studying water consumption tests and grouting consumptions.

Language  
Finnish

Pages 33  
Appendices 1  
Pages of Appendices 1

Keywords  
Grouting, rock grouting, rock stacking

## Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	5
2	Tutkimusmenetelmän valinta .....	7
2.1	Tiiviysluokkavaatimuksia .....	7
2.2	Menetelmän kulku.....	8
3	Ennakkokokeet .....	10
3.1	Injektointikalusto .....	11
3.2	Ennakkokokeiden raportoinnin vaatimukset.....	11
3.3	Keskihajonnan laskeminen.....	11
3.4	Mittausmenetelmien toimintaperiaate .....	12
3.4.1	Tiheyden mittaus .....	12
3.4.2	Marsh-viskositeetti .....	14
3.4.3	Veden erottuminen .....	16
3.4.4	Tunkeuma.....	18
3.4.5	Sitoutumisaika.....	19
4	Mittausten toteutus .....	20
4.1	Valmistelutyöt .....	20
4.2	Mittaukset ja laskut .....	20
4.2.1	Ennen kokeiden suorittamista tehdyt laskut.....	20
4.2.2	Ennen kokeiden suorittamista tehdyt mittaukset.....	21
4.2.3	Kokeiden alussa suoritettavat mittaukset .....	21
4.3	Kokeiden suorittaminen .....	22
5	Tulokset .....	24
6	Virheanalyysi.....	27
7	Johtopäätökset .....	29
7.1	Tulosten analysointi .....	29
7.2	Uuden injektointimassan muut vaikutukset työmaalla .....	30
8	Pohdinta.....	31
	Lähteet.....	33

### Liitteet

Liite 1 Tulokset

## 1 Johdanto

Opinnäytetyössä kehitettiin injektointireseptiä kalliotunneleiden esi-injektointiin AA- ja A-luokan alueille. Työkohteena oli Länsimetron Lauttasaaren työmaa. Työmaan pääurakoitsijana oli Kalliorakennus – Yhtiöt Oy.

Injektointi tarkoittaa kallion rakojen ja halkeamien tiivistämistä. Näin tunnelin vuotovesiä saadaan vähennettyä merkittävästi. Halkeamien tiivistäminen on tärkeää myös siksi, että pohjaveden pinta voi vaihdella ja halkeamista voi tulevaisuudessa vuotaa vettä, jos niitä ei tiivistetä. Injektointiaineen tulee olla sellaista, millä saavutetaan vaadittu tiiviyssaste. [1, s. 75.]

Opinnäytetyössä ratkaistiin ongelma, mikä liittyi injektointiajan pituuteen. Ongelmana oli se, että injektointimassan kovettuminen kesti ajallisesti liian kauan ja se hidasti itse louhintaa. Ongelmaa lähdettiin ratkaisemaan uudella injektointimassareseptillä. Reseptille piti tehdä ennakkokokeet, joiden perusteella suunnittelija tekee päätöksen reseptin käytöstä työmaalla. Uuden injektointimassan toivottiin lyhentävän sitoutumis- ja kovettumisaikoja. Uutta injektointireseptiä lähdettiin kehittämään AA-sementillä<sup>1</sup>, mikä tulisi korvaamaan BB-sementin.

Injektointivaatimus tiiviyssluokan AA-alueilla (keskusta-alueilla) on tiukka, koska mm. pohjaveden pinta ei saa laskea. Pohjaveden pinnan aleneminen voi johtaa esim. puupaaluperustuksien vaurioitumiseen. AA-luokassa sallittu pohjaveden virtaus tunneliin on noin yhdestä kahteen litraan minuutissa jokaista sataa metriä kohden. A-alueilla kyseinen virtaus on maksimissaan 5 litraa/min/100 m. [2, s.7.]

Injektointivaikutus perustuu siihen, että suurimmat sementtihiukkaset laskeutuvat kalli-ossa olevan raon pohjalle, kun injektointimassan virtausnopeus laskee riittävän paljon. Tämän seurauksena raon pinta-ala pienenee ja virtausnopeus kasvaa, mikä ottaa mu-

---

<sup>1</sup> AA-sementti tunnetaan myös suomalaisella kauppanimellä XXX

kaansa raon pohjalle laskeutuneen hiukkasen kuljettaen sen yhä kauemmas, kunnes koko rako on täyttynyt. [3, s. 417–418.]

## **2 Tutkimusmenetelmän valinta**

Injektointireseptin testausmenetelmäksi valittiin suunnittelijan ja tilaajan hyväksymät yleisesti käytössä olevat menetelmät. Ne pohjautuvat Kalliotilojen injektointi by 53 -julkaisuun, Betoninormit by 50/2004 -kirjaan ja SFS-EN 12715 -standardiin. Ennakkokokeet voidaan tehdä joko hyväksytyssä koestuslaitoksessa tai työmaalla. [2, s. 29.] Kokeet päädyttiin tekemään työmaalla, jotta saadut tulokset olisivat mahdollisimman lähellä todellisia.

### **2.1 Tiiviysluokkavaatimuksia**

Kuviosta 1 nähdään mm. AA- ja A-luokan tiiviysluokan vaatimuksia suunnitteluun, työmaalle ja toteutukseen. Vaatimuksissa on esitettyä mm. vedenerottumisen raja-arvot, esisekoittimen tyyppi ja laadunvalvontatoimenpiteet.

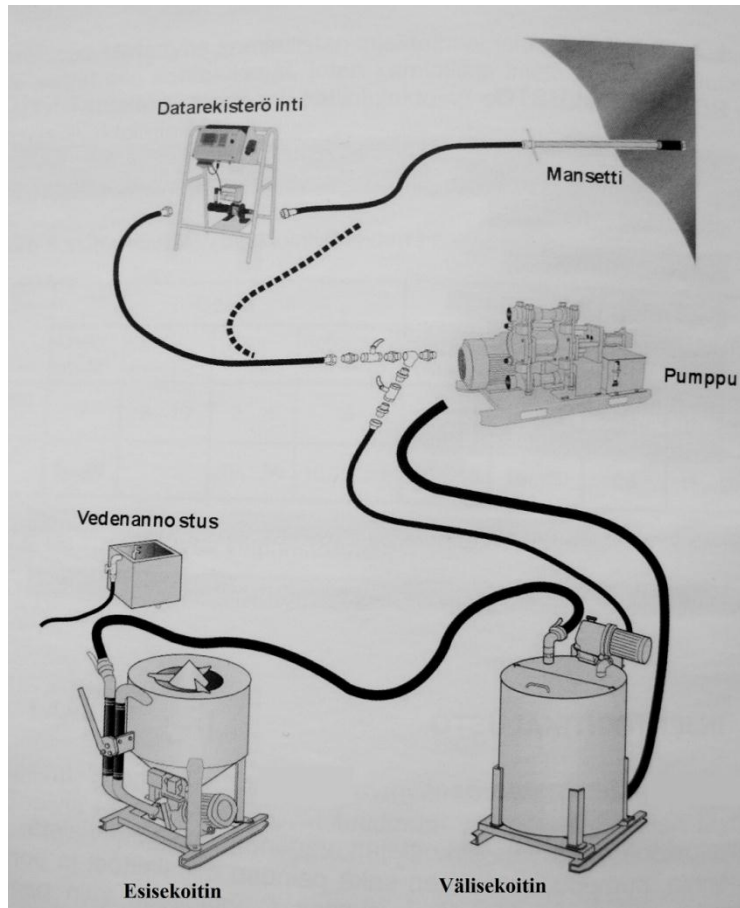
	Tiiveysluokka AA	Tiiveysluokka A	Tiiveysluokka B	Tiiveysluokka C
Henkilöstö	Suunnittelijalla kalliorakennesuunnittelijan aa pätevyys	Suunnittelijalla kalliorakennesuunnittelijan a pätevyys	Suunnittelijalla vähintään teknillisen oppilaitoksen vuoritai rakennustekniikan tekniikan tutkinto	Näyttöä kohteen injektointisuunniteluun riittäväksi katsottavasta kokemuksesta
	Työnjohtajalla kalliorakennustyönjohtajan aa pätevyys	Työnjohtajalla kalliorakennustyönjohtajan a pätevyys	Työnjohtajalla >½ vuoden kokemus injektointitöistä	Työnjohtajalla kokemusta injektointitöistä
	Työvoimalla maarakennusalan ammattitutkinto ja >1 vuoden kokemus injektointitöistä.	Työvoimalla maarakennusalan ammattitutkinto ja >½ vuoden kokemus injektointitöistä	Työvoimalla >½ vuoden kokemus injektointitöistä	Työvoimalla kokemusta injektointitöistä
	Ylimääräisen kokemattoman työntekijän käyttö sallittu			
Suunnittelu	Pohjavesiselvitys, kallion vedenjohtavuuden selvitys ja laskelmat kohteen edellyttämässä vaativuudessa sekä aikaisempi kokemus vastaavista kohteista			Aikaisempi kokemus vastaavista kohteista
Tunnustelureiät	min 2 kpl	min 1 kpl	Suunnittelija määrittää.	
Poraustarkkuus <sup>1)</sup>	5 % <sup>2)</sup>	10 % <sup>2)</sup>	10 %	15 %
Data porausjärjestelmät	Porakaavion sekä puomin suunnan näyttö ruudulla, datarekisteröinti	Porakaavion sekä puomin suunnan näyttö ruudulla	Käsiikäyttöinen puomin aseointi, puomin kaateen ja suunnan näyttö asteina	
Porareian huuhtelu	Korkeapainevesi <sup>3)</sup>	Vesi <sup>3)</sup>		Vesi tai ilma
Sekoitin	Kolloidityyppinen sekoitin			Ei vaatimuksia
Vedenerotus	< 1 %.	< 2 %.	< 5 %.	Suunnittelija määrittää
Laadunvalvonta	Kerran injektointivihkasta jokaisesta injektointireseptistä	Kerran injektointivihkasta		Ei vaatimuksia
	Tiheys, Marsh-viskositeetti, vedenerottuminen	Tiheys, Marsh-viskositeetti		
	Tunkeumakoe kun d <sub>95</sub> <20 µm	Ei vaatimuksia		
	Sitoutuminen ns. kuppikokeella			
Monitorointi	Datarekisteröinti <sup>4)</sup>		Virtauksen ja paineen mittaus	Painemittari, sementin määrän mittaus säkeittäin
Tiiveyden toteaminen	Kontrollointireiät (min. 2 kpl), mittapadot ja poistoveden määrämittaus	Mittapadot ja poistoveden määrämittaus	Ei vaatimuksia	

Kuvio 1. Tiiveysluokkavaatimuksia [2, s. 8.]

## 2.2 Menetelmän kulku

Injektointilaitteistoon kuuluu esisekoitin, välisekoitin, pumppu, dataloggeri (datarekisteröinti) ja mansetti (kuvio 2). Tässä tutkimuksessa massaansa vaikuttavat vain esisekoitin ja välisekoitin. Jokainen injektointilaitteisto sekoittaa hieman eri tavalla, joten tulokset voivat olla erilaisia eri kalustolla. Tutkimuksessa sovelletaan Kalliorakennus – Yhtiöt Oy:n laitteistoa ja mittaustulokset ovat vain kyseiselle laitteistolle.





Kuvio 2. Injektointikalusto [2, s. 16.]

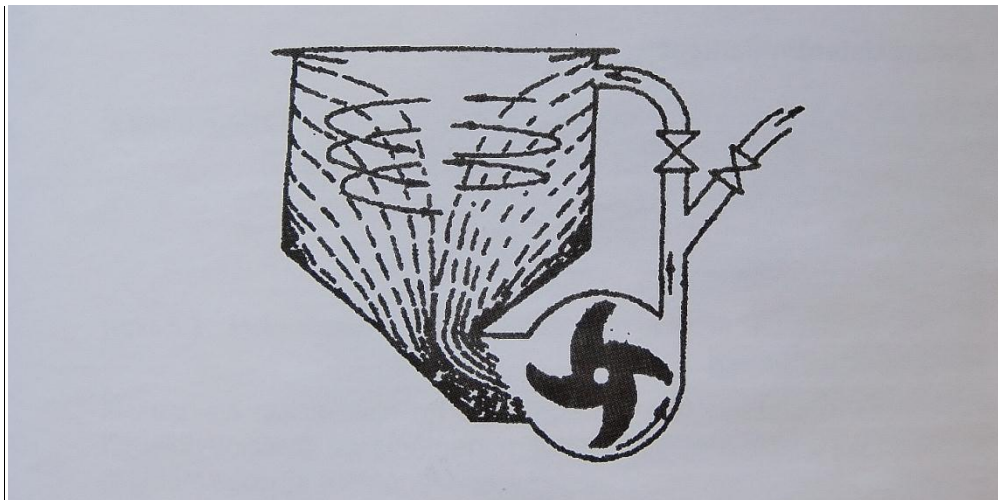
Esisekoittajaan laitetaan käsin 20 kg:n sementtiannoksia haluttu määrä ja vesi annostellaan annostelulaitteella litran tarkkuudella. Veteen laitetaan ensiksi mahdolliset lisäaineet, mikä on tässä tapauksessa tehonotkistaja CC ja sen jälkeen lisätään sementti. Sekoitusaika on vähintään 5 minuuttia viimeisen sementtiannoksen lisäyksestä, jotta massa on sekoittunut riittävästi. Tehonotkistimella saadaan alhaisten vesisementtisuhteisten injektointimassojen tunkeutuvuutta parannettua merkittävästi. [4, s. 34.]

Massa siirretään esisekoittimesta välisekoittimeen. Välisekoitin pyörii noin 60–120 kertaa minuutissa estäen massan erottumisen. Massanäyte otetaan välisekoittimesta, jotta testaus vastaa todellisuutta.

### 3 Ennakkokokeet

Injektointimassan ennakkokokeissa käytetään samoja osa-aineita kuin itse injektoinnissa. Injektointimassalle tehdään ennakkotestit joko hyväksytyssä testauslaitoksessa tai työmaalla. Tämän jälkeen suunnittelija analysoi saadut tulokset. Analysoinnin jälkeen suunnittelija ilmoittaa raja-arvot työmaalle. Näihin raja-arvoihin perustuu työnaikainen laadunvarmennus. Ennakkokokeissa käytetään mm. standardeja SFS-EN 14117 ja SFS-EN 12715.

Ennakkokokeissa injektointimassa menee samaa reittiä kuin injektointitapahtumassa. Ensiksi on esisekoitin ja seuraavaksi välisekoitin, mihin injektointimassaa voidaan varastoida hetkellisesti ennen pumppausta. Esisekoittimen on oltava tehokas kolloidityyppinen, jotta sekoitus on riittävän hyvä (kuvio 3). Sekoitusnopeuden tulisi olla ainakin 1500 kierrosta minuutissa. Jos ennakkokokeet tehdään laboratoriossa eikä kolloidityypistä sekoitinta ole, sekoitusnopeuden tulisi olla 8 000–12 000 kierrosta minuutissa. [2, s. 17, 29.] Edellä mainituilla sekoitintyypeillä injektointimassan hiukkaset eivät liimaudu toisiinsa kuten hitaissa sekoittimissa. Välisekoittimessa massa odottaa pumppausta ja sitä sekoitetaan noin 60 kierrosta minuutissa. Näin vältetään injektointimassa erottuminen. [5, s. 47.] Näytteet otetaan välisekoittimesta ja massan valmistuajaksi merkitään se aika, kun massa on esisekoitettu valmiiksi ja siirretty välisekoittimeen.



Kuvio 3. Kolloidisekoitin [2, s. 17.]

### 3.1 Injektointikalusto

Injektointikalustoa käytettiin massatestauksessa. Esisekoitin oli Atlas Copco Cemix 203 E, minkä tilavuus oli 200 litraa ja sekoitusnopeus 1500 kierrosta minuutissa. Välisekoitin oli Atlas Copco Cemag 401 E / 403 E, minkä tilavuus oli 400 litraa ja sekoitusnopeus 60 kierrosta minuutissa. Pumppukalustoa ei testauksessa tarvita. Lämpötilat mitattiin Amprobe IR608A infrapunamittarilla ja vesi mitattiin vesimittarilla.

### 3.2 Ennakkokokeiden raportoinnin vaatimukset

Koetulokset tulee raportoida kirjallisesti, jotta niitä voidaan käyttää myöhemmin. Raportissa tulee olla vähintään seuraavat asiat: koelaitoksen nimi, koelaitoksen osoite, raportin tunnus, viittaus käytettyihin standardeihin sekä mahdolliset poikkeukset niihin, injektointimateriaalien kauppanimi sekä valmistaja, injektointimateriaalien valmistuserä sekä päivämäärä, massaresepti, materiaalien sekoitusjärjestys, materiaalien sekoitusaika, kokeiden suorittaja, laboratorion lämpötila, massan lämpötila, tulokset, kokeen päivämäärä, raportin päivämäärä ja allekirjoitukset. [2, s. 30.]

### 3.3 Keskihajonnan laskeminen

Keskihajonta täytyy laskea, jotta voidaan arvioida saatuja tuloksia ja niiden poikkeamia. Keskihajonta lasketaan matematiikan perussääntöjä noudattaen luokittelemattomalle aineistolle kaavalla 1, koska hajonta lasketaan koko aineistolle. Kaava 1:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (1)$$

*missä*

$s$  = kokonaiskeskihajonta

$n$  =mittausten lukumäärä

$x_i$  = mitattu arvo

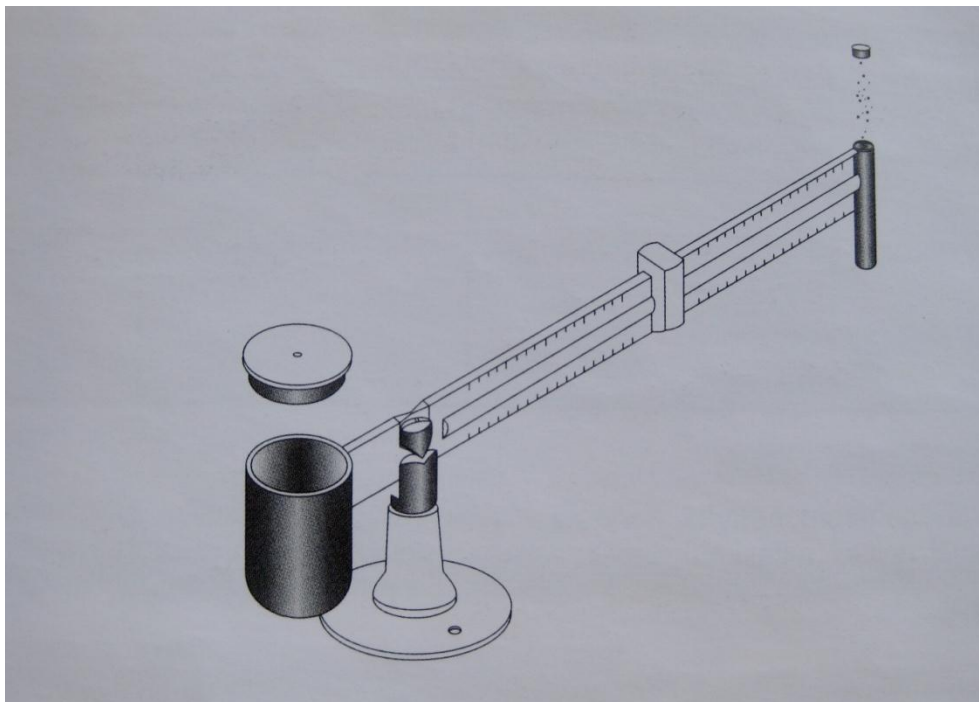
$\bar{x}$  = keskiarvo

### 3.4 Mittausmenetelmien toimintaperiaate

Sementtipohjaisille injektointiaineille tulee tehdä seuraavat viisi ennakkokoe: tiheyden mittaaminen, Marsh-viskositeetti, veden erottuminen, tunkeuma ja kuppikoe. Kaikki ennakkokokeet tulee tehdä kolmeen kertaan käyttäen joka kerta uutta sekoitusta. Tuloksista laskettiin keskiarvo ja keskihajonta. [2, s. 29.] Tunkeuma täytyy mitata vain kun sementin raekoko  $d_{95} < 20$  mikrometriä. [6, s. 172–173.] Tämä johtuu siitä, että normaali sementti tai rapid-sementti ei mene 100 mikrometrin seulan läpi. Seuraavissa kappaleissa käsitellään mittausmenetelmät teoriassa.

#### 3.4.1 Tiheyden mittaaminen

Sementtipohjaisilla injektointiaineilla tiheyden mittaamisella varmistetaan, että veden ja sementin suhde on oikea ja vaatimukset täyttyvät. Työmaalla tiheys mitataan ns. mud balance vaa'alla. Ennen kokeen suorittamista on laite kalibroitava esim. vedellä. Näin varmistetaan, että mittalaite on puhdas ja se antaa oikean tuloksen. Laitteen voi kalibroida täyttämällä toisessa päässä olevaa säiliötä esim. hiekalla. Mud balance vaaka on esitetty kuvioissa 4 ja kuvassa 5. [2, s. 31.]



Kuvio 4. Mud balance mittalaite [2, s. 32.]



Kuva 5. Tutkimuksissa käytetty mud balance mittalaite

Kokeessa mittakuppi täytetään välisekoittimesta otettavalla injektointimassalla. Kupin päälle laitetaan kuppiin kuuluva kansi, jotta ylimääräinen massa pääsee pursuamaan pois. Tiheys voidaan lukea tasapainotilassa mittarin kyljessä olevasta asteikosta. Tasapainotilaan päästään liikuttamalla siirrettävää painoa varresta. [2, s. 31–32.]

Suunnittelija päättää sopivat raja-arvot massalle, minkä perustana ovat tiheyden mittaus-tulokset. Tiheyden tulisi ohjeellisesti olla  $\pm 0,05 \text{ kg/dm}^3$ :n tarkkuudella oikea verrattuna ennakkokokeisiin, kun tehdään injektointityön aikaisia testauksia. [2, s. 29, 32.] Raja-arvo voi poiketa ohjeesta suunnittelijan niin määrätessä.

Vesi-sementtisuhde ( $v/s$ ) voidaan laskea riittävällä tarkkuudella kaavan 2 avulla:

$$v/s = \frac{1}{\frac{6510}{3100 - \rho} - 3,1} \quad (2)$$

*missä*

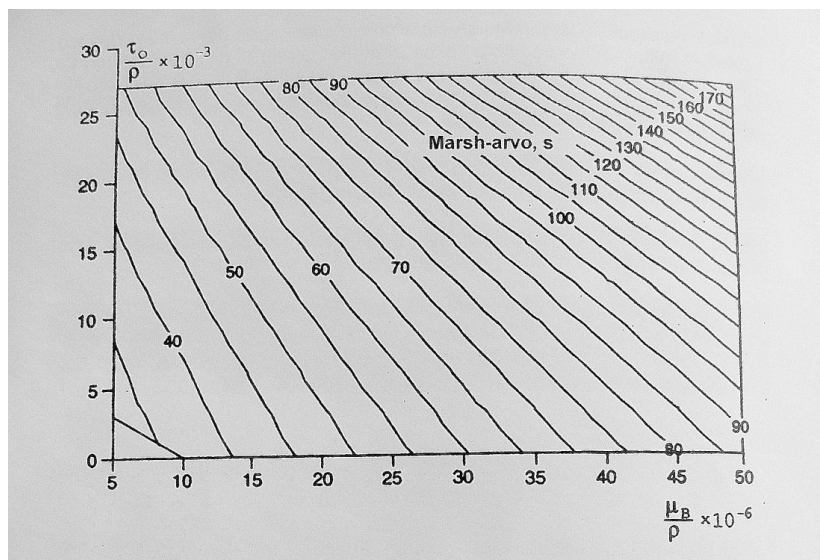
$v/s$  = vesi-sementtisuhde

$\rho$  = mitattu tiheys,  $[\rho] = \text{kg/m}^3$ .

[2, s. 32.]

### 3.4.2 Marsh-viskositeetti

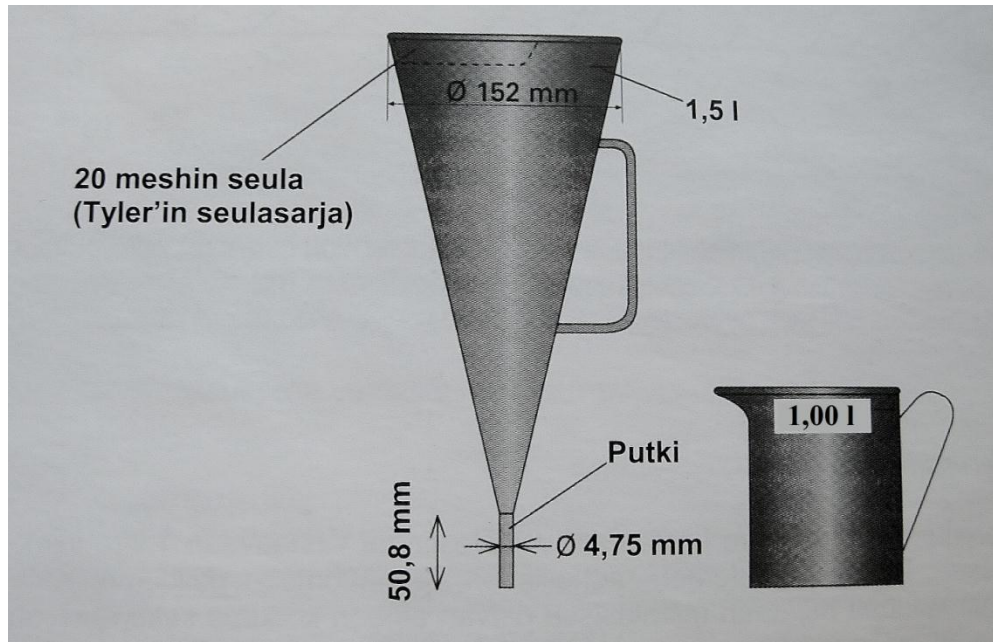
Marsh-mittaus perustuu SFS-EN 14117 -standardiin. Mittaus tehdään tunnelin lämpötilassa standardista SFS-EN 14117 poiketen. Poikkeuksen mahdollistaa standardin SFS-EN 12715 kohta 6.4.4. [7, s. 15]. Marsh-arvo kuvastaa massan myötörajaa ja viskositeettia. Heti sekoituksen jälkeen mitatulla viskositeetillä tarkistetaan, että notkistimen määrä on oikea ja se on sekoittunut hyvin. Myötöraja saadaan katsottua kuviosta 6, kun tiedetään Marsh-arvo ja tiheys. Marsh-mittaus on tehtävä heti esisekoituksen jälkeen, koska notkistimen teho alkaa heiketä nopeasti sekoituksen jälkeen. [2, s. 29, 32.]



Kuvio 6. Marsh-taulukko [2, s. 34.]

Viskositeetin määrittämissä tuloksista saadaan myös työmaan laadunvalvonnan raja-arvot Marsh-viskositeetin mittauksille. Kun perusmassalla Marsh-arvo on noin 5 sekuntia hitaampi kuin sekoituksen jälkeen mitattu, saadaan suurin sallittu käyttöaika sekoituksen jälkeen [7, s. 15]. Perusmassan raja-arvo tulisi olla Kalliotilojen injektointi 2006 by 53 -kirjan ohjeen mukaan 32...35 s. [2, s. 29]

Marsh-viskositeettia mitataan Marsh-suppilolla ja mittakupilla (kuvio 7). Mittakuppeja on kahta eri kokoa. Amerikkalainen on yksi neljäsosa gallona (946 ml) ja eurooppalainen on 1 000 ml. SFS-standardin mukaan tehtäessä käytetään 1 000 ml suppiloa. Ennen kokeen suorittamista on suppilon kunto tarkastettava puhtaalla vedellä laskemalla sen läpi 1 000 ml vettä. Ajaksi tulisi tulla 28 sekuntia. [2, s. 33.]



Kuvio 7. Marsh-suppilo ja mitta-astia [2, s. 33.]

Koe suoritetaan kaatamalla suppiloon  $1\,500\text{ ml} \pm 15\text{ ml}$  injektointimassaa. Massa kaadetaan suppiloon siinä olevan siivilän läpi. Seula on 20 meshin seula ja kuuluu Tylerin seulasarjaan. Näin varmistetaan, että mahdolliset isommat objektit eivät pääse tukkiemaan suppilon päätä ja vääristämään mittaustulosta. Kaadon jälkeen mitataan aikaa kunnes suppilon läpi on mennyt  $1\,000\text{ ml} \pm 10\text{ ml}$ . Injektointiaikana tehtäville kokeille tuloksen tulisi olla  $\pm 2$  sekuntia ennakkokokeiden perusteella määritetyistä arvoista. [2, s. 33.]

Suppilon puhtaus vaikuttaa tulokseen huomattavasti. Jo pienikin sementtikalvo hidastaa tulosta useilla sekunneilla. Marsh-kokeen tulos ei ole suoraan viskositeetin arvo. Marsh-arvo riippuu myötörajasta, viskositeetistä ja tiheydestä. [2, s. 33.]

Kuviosta 8 huomataan vesi-sementtisuhteen vaikutus Marsh-arvoon. Injektointimassan jäyketessä eli vesi-sementtisuhteen laskiessa Marsh-viskositeetti kasvaa jyrkästi. Viskositeetin muutos korostuu myötörajassa, mikä kasvaa hyvin voimakkaasti.



Vesi-sementtisuhte (v/s)	2,0	1,0	0,8
Marsh viskositeetti <sup>1)</sup>	32 s	35 s	40 s
Myötöraja	0,15 Pa	3 Pa	8 Pa
Viskositeetti	8 mPas	27 mPas	50 mPas
Vedenerottuminen	15 % <sup>2)</sup>	2 % <sup>2)</sup>	1 % <sup>2)</sup>

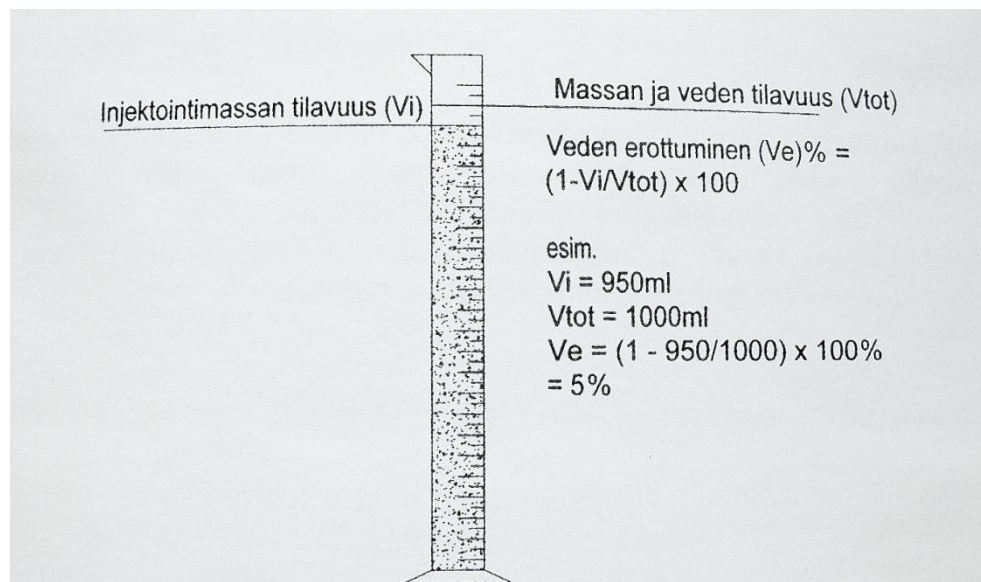
1) 1 litran mittausmäärä

2) riippuu sementistä, taulukossa sementti Ultrafine 12.

Kuvio 8. Vesi-sementti suhteen vaikutus Marsh-arvoon [2, s. 52.]

### 3.4.3 Veden erottuminen

Injektointimassaa kaadetaan 1 litran mittalasiin (kuvio 9). Massa otetaan välisekoittimesta, jossa se on ollut 5 minuuttia. Mittalasin on oltava tärinättömässä, rauhallisessa ja tasaisessa paikassa, koska tärinä voi vääristää tulosta merkittävästi. Mittaustulos tehdään kahden tunnin kuluttua näytteen laittamisesta mittalasiin. Mittalasista mitataan injektointiaineen korkeus sekä sen pinnalle erottuneen veden paksuus. [2, s. 34.]



Kuvio 9. Vedenerottumisen mitta-astia ja laskuperiaate [2, s. 35.]

Jos käytössä on korkea 1 000 ml mittalasi 10ml asteikolla, saadaan veden erottuminen suoraan asteikolta ilman laskutoimitusta mittaamalla erottuneen veden korkeus. Tulos on yksi prosentti (%) / 10 ml. Veden erottuminen  $V_e$  voidaan laskea kaavalla 3:



$$(V_e)\% = (1 - V_i/V_{tot}) \times 100 \quad (3)$$

missä

$V_e$  = Veden erottuminen prosentteina,  $[V_e] = ml$

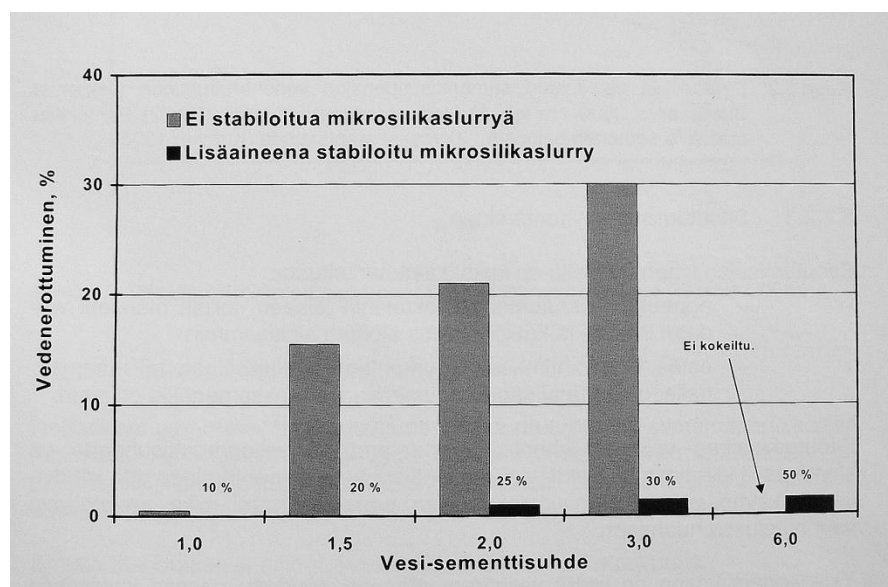
$V_i$  = Injektointimassan tilavuus,  $[V_i] = ml$

$V_{tot}$  = Näytteen koko tilavuus = 1 000 ml

[2, s.34.]

Vedenerottumiskokeella varmistetaan, että massa täyttää asetetut vaatimukset kyseiselle tiivysluokalle. Sillä voidaan mitata esimerkiksi se, ettei injektointimassa vesisementtisuhte ole liian suuri. [2, s. 30, 34–35.]

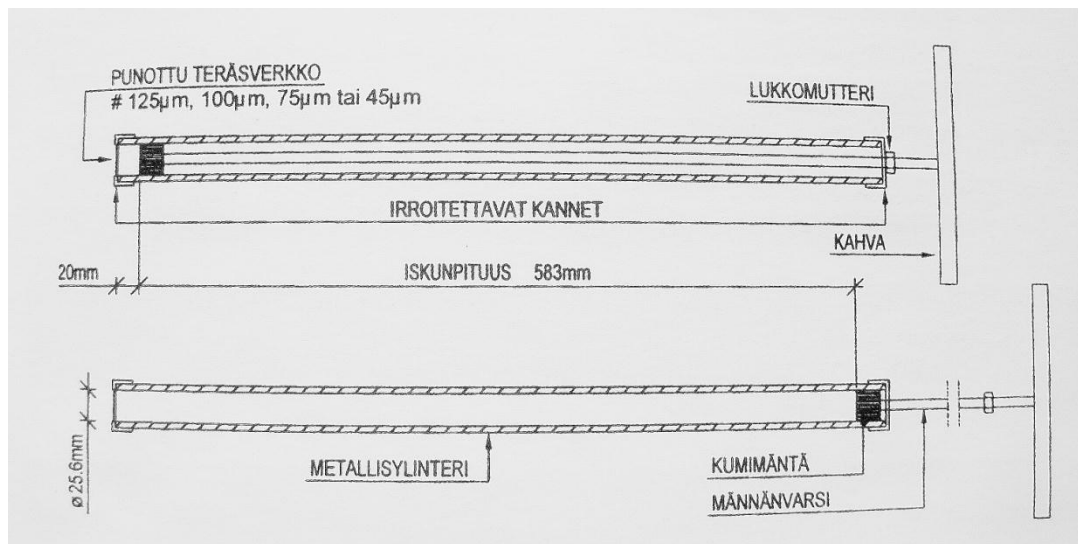
Sementin ja veden suspension erottumiseen vaikuttaa voimakkaasti vesi-sementtisuhte, mikä huomataan alla olevasta kuvioista 10. AA- ja A-luokan tiivysalueilla vesisementtisuhteen täytyy olla alle yksi, jotta saavutettaisiin riittävän pieni vedenerottuminen ilman lisäaineita (veden erottumista vähentäviä lisäaineita).



Kuvio 10. Veden erottuminen 2 tuntia esisekoituksen jälkeen. Lisäaineen annostukset ovat merkitty kuvioon % sideaineen painosta. [2, s. 11.]

### 3.4.4 Tunkeuma

Kokeen tarkoitus on tarkistaa riittävä tunkeuma sekä määrittää raja-arvot työmaan laadunvalvontaan. Mittaustulos kertoo onko massa sekoittunut riittävästi ja toimiiko sekoitaja oikein kyseiselle massalle. Tunkeuma mitataan, jos sementin raekoko  $d_{95} < 20$  mikrometriä. Tämä johtuu siitä, että normaali sementti tai rapid-sementti ei mene 100 mikrometrin seulan läpi. Tunkeumakokeeseen käytetään Vattenfall VU-SC: 27 - filtteripumppua (kuvio 11 ja kuva 12). [2, s. 29, 35]



Kuvio 11. Vattenfall VU-SC: 27-filtteripumppu [2, s.35.]



Kuva 12. Tunkeuman mittauspumppu ja mittalasi

Massa otetaan välisekoittimesta, jossa massan on oltava sekoittunut 5 minuuttia. Tunkeumakokeessa imetään injektointimassaa 100 mikrometrin metalliverkon läpi pumppuun varovasti. Pumpun tilavuus on 300 ml. Tämän jälkeen odotetaan 30 sekuntia pitäen pumpun alapää massa-astiassa. Kun aikaa on kulunut 30 sekuntia, tyhjennetään injektointipumppu mitta-astiaan ja mitataan kuinka paljon massaa astiaan tulee. Pumpun tyhjentämisen jälkeen on katsottava onko siivilässä kokkareita tai muita partikkeleita, mitkä voisivat vaikuttaa tulokseen. Havainnot kirjataan ylös. [2, s. 35.]

### **3.4.5 Sitoutumisaika**

”Työmaaolosuhteissa sitoutumisaika voidaan riittävän tarkasti määrittää ns. kuppikokeella” [2, s.36]. Sitoutumisaikakoe tunnetaan yleisesti kuppikokeena. Kyseisessä testissä injektointimassaa otetaan välisekoittimesta (5 min sekoitus) ja näyte laitetaan esim. pahvikuppiin. Kokeella saatiin selville sitoutumisaika. Sitoutumisaika on hyödyllinen tieto poraus- ja räjäytystöihin. By 53 -julkaisun mukaan poraus voidaan aloittaa, kun massaa ei valu kupista pois kupin ollessa vaakatasossa. Räjäytys voidaan suorittaa, kun kynä ei tunkeudu omalla painollaan massaan, By 53 -kirjan mukaan. [2, s. 30, 36.]

Sitoutuminen katsotaan alkaneeksi, kun kuppi kestää 90-asteen kallistuksen. Tästä saadaan sitoutumisen alkamisaika. Sitoutumisaika katsotaan loppuneeksi kun mustekynä kestää kupin pinnalla omalla painollaan. Mustekynä saa painua vain pienen kärjen verran eli kolmisen millimetriä. Kun massa kestää kynän painon saadaan sitoutumisen loppumisaika.

Omassa lisättestissäni kokeilin missä ajassa kuppi kestää painoni sen päällä (n. 70kg). Lisättestini kuvastaa helposti kovettumisen eli hydrataation nopeutta.

## **4 Mittausten toteutus**

Ennen testauksen toteutusta oli laitteisto valmistettava, testauspaikka varmistettava ja ilmoitettava työnjohtajalle testauksesta. Testaus pystyttiin tekemään rauhassa, ilman että ulkopuoliset tekijät pääsisivät vaikuttamaan kokeiden suorittamiseen. Testaus on tehtävä huolellisesti, koska pienetkin määrävirheet vaikuttavat prosentuaalisesti paljon.

### **4.1 Valmistelutyöt**

Massatestauksessa materiaalien täytyi olla saman lämpöisiä kuin injektioinnissa, joten massatestaus tehtiin tunnelissa. Kalusto oli ollut noin kahdeksan tuntia tunnelissa, joten lämpötila oli lähes vakio. Näin kaikki materiaalit ja kalusto olivat samassa lämpötilassa.

Kaluston toiminta oli tarkistettava ennen massatestauksen aloittamista. Testaukseen tarvittiin 63A kolmivaihevirtaa ja vettä. Sementti ja tehonotkistin olivat injektointiauton lavalla valmiina, joten niiden lämpötila oli sama kuin sementin lämpötila. Laitteiston läpi laskettiin vettä, jotta sekoittajien yms. osien pinta kasteltiin. Näin varmistettiin laitteiston parempi puhdistettavuus.

### **4.2 Mittaukset ja laskut**

Kokeen suorittamisen kannalta mittaustulokset jaotellaan kahteen eri ryhmään: ennen kokeita ja kokeiden jälkeen suoritettavat mittaukset. Ennen kokeita oli laskettava myös kaikkien eri osa-aineiden tarkat määrät. Nämä oli syytä tehdä, jotta kokeiden suorittamiseen jäisi riittävästi aikaa. Tämä nopeutti ja helpotti itse kokeiden suorittamista. Massatestauksessa tehtiin testaukset neljään eri kertaan. Testaukset olivat nimeltään 1A-4A.

#### **4.2.1 Ennen kokeiden suorittamista tehdyt laskut**

Ennen kokeiden suorittamista oli laskettava jokainen osa-aine tarkalleen. Testauksen lähtötiedoiksi sain vesi-sementtisuhteen (v/s) XX. Tämä tarkoittaa, että XX kilogramman sementtiannoksella vettä laitetaan XX litraa.

Valmistaja suosittelee käyttämään kyseisen sementin kanssa tehonotkistinta CC. Tehonotkistinta annosteltiin XX massaprosenttia (massa-%). Tehonotkistimen määrä lasketaan sementin painosta. Tämä tarkoittaa XX kg:aa tehonotkistinta. Tehonotkistimen tiheys on XX kg/dm<sup>3</sup> ( $\pm 0,02$  kg/dm<sup>3</sup> tarkkuudella). Tästä laskettiin tehonotkistimen tilavuus, koska työmaalla tapahtuva mittaus tapahtuu millilitroissa. XX (kg) : XX (kg/dm<sup>3</sup>) = XX dm<sup>3</sup> = XX ml. Taulukosta 1 nähdään laskettuja arvoja.

Taulukko 1. Notkistimen annostus

Testit	Sementti	Vesi	V/S	Notkistin (%)	Notkistin (kg)	Tiheys (kg/1 l)	Notkistin (ml)
1A-4A	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX

#### 4.2.2 Ennen kokeiden suorittamista tehdyt mittaukset

Materiaaleista otettiin ylös seuraavat tiedot: sementin kaupan nimi XX, valmistuserä XX ja sementin tyyppi AA. tehonotkistimen valmistaja XX, tyyppi CC sekä valmistuserä XX. Alla olevasta taulukosta 2 nähdään edellä mainitut tiedot selkeämmin.

Taulukko 2. Sementin ja supertehonotkistajan tiedot

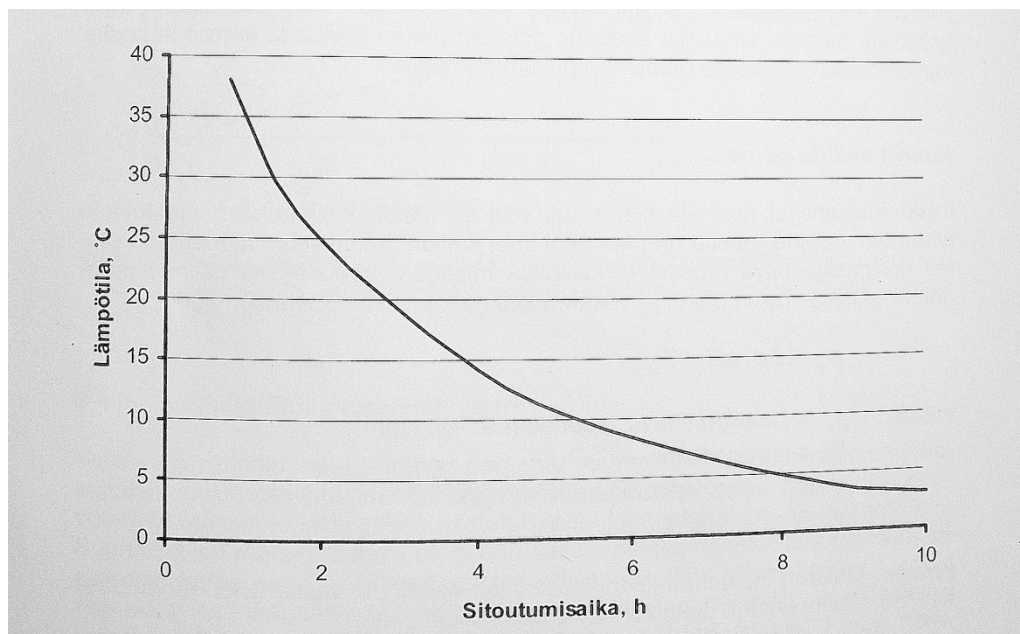
Testit	Sementin kaupan nimi	Tyyppi	Valmistsuerä	Suorituspäivämäärä
1A-4A	XX	AA	XX	1.9.2011
Testi	Tehonotkistinvalmistaja	Tyyppi	Valmistuserä	Suorituspäivämäärä
1A-4A	XX	CC	XX	1.9.2011

#### 4.2.3 Kokeiden alussa suoritettavat mittaukset

Testauksessa mitattiin ilman lämpötila  $T_{ilma}$  (celsiusastetta), sementin lämpötila  $T_{sementti}$  (celsiusastetta) ja veden lämpötila  $T_{vesi}$  (celsiusastetta) testaushetkellä. Nämä tiedot tarvittiin, koska lämpötila vaikuttaa paljon injektointimassan sitoutumiseen. Tämä johtuu siitä, että injektointimassa käyttäytyy osin samalla tavalla kuin betonimassa. Jos lämpötila laskee, niin sitoutuminen ja kovettuminen hidastuvat merkittävästi. Tämä on myös yksi syy siihen, miksi testaukset tehdään injektointiolosuhteissa. Marsh-suppilokokeen

aikamittaukset tehtiin kymmenen minuutin välein yhteen tuntiin asti esisekoitushetkestä. Näin saatiin määritettyä massan viskositeetti ja käyttäytyminen riittävän tarkasti.

Kuviosta 13 huomataan lämpötilan vaikutus sitoutumisaikaan. Jos ennakkokokeet tehtiisiin laboratoriossa 20 c-asteen lämpötilassa, sitoutumisaika olisi noin kolme tuntia. Todellisuudessa kun kallion lämpötila on yli 16 metrin syvyydessä noin 5 c-astetta, mihin injektointimassa lämpötila nopeasti tasoittuu, sitoutumisaika olisi noin kahdeksan tuntia eli yli kaksinkertainen ajallisesti.



Kuvio 13. Periaatekuvaaja lämpötilan vaikutuksesta sitoutumisaikaan [2, s.53.]

### 4.3 Kokeiden suorittaminen

Kokeiden suorittaminen alkoi injektointimassan A valmistamisella esisekoittajassa. Esisekoittajaan laitettiin vettä XX litraa vesimittarin läpi. Veteen lisättiin XX ml CC tehonotkistajaa valmistajan ohjeen mukaan. Heti tämän jälkeen esisekoittajaan laitettiin X säkkiä AA-sementtiä eli yhteensä XX kg. Tämän seoksen annettiin sekoittua viisi minuuttia. Viiden minuutin jälkeen massa siirrettiin esisekoittajasta välisekoitimeen.

Heti esisekoituksen jälkeen massasta testattiin ensimmäiseksi Marsh-suppilokoe. Marsh-koe kesti noin 2 minuuttia. Seuraavaksi mitattiin massan tiheys mud balance -

vaa'alla, mikä kesti noin 2 minuuttia. Kolmanneksi mitattiin tunkeuma pumpulla, mikä kesti myös noin 2 minuuttia. Viimeiseksi valmisteltiin vedenerottumiskoe ja kuppikoe. Näihin meni aikaa vain minuutti. Kaikkien näiden testaus kesti yhteensä noin 10 minuuttia, joten 10 minuutin Marsh-suppilokoe voitiin tehdä heti perään. Tämän jälkeen oli tehtävä vain Marsh-suppilokokeet 20, 30, 40, 50 ja 60 minuutin kohdalta esisekoituksesta.

2A massan valmistus aloitettiin, kun massalle 1A oltiin tekemässä 10 minuutin Marsh-koetta. Näin testausaika saatiin supistettua minimiin. 2A massa valmistui, kun 1A:lle oltiin tekemässä 20 minuutin Marsh-koetta. 2A massalle tehtiin samat kokeet samassa järjestyksessä kuin massalle 1A.

2A massan sekoituksen jälkeen injektointikalusto puhdistettiin. Näin varmistettiin riittävän pitkä aika vielä jäljellä oleville 1A ja 2A massojen Marsh-kokeille. 3A massaa alettiin valmistaa, kun 2A massan 50 minuutin Marsh-testi oli tehtynä. Näin 3A massan testaus voitiin aloittaa heti, kun 2A testit oli tehtynä. Testausperiaate massoilla 3A ja 4A oli sama. Ajallisesti testaus ei poikennut 1A ja 2A massojen testauksesta.

## 5 Tulokset

Tulokset koottiin taulukkomuotoon, jotta niiden tulkitseminen olisi helpompaa ja selkeämpää. Liitteeseen 1 on koottuna kaikki tulokset taulukkomuotoon. Taulukosta 3 huomataan lämpötiloja: ilmasta, sementistä, vedestä ja heti sekoituksen jälkeen. Yksiköt ovat celsiusastetta.

Tunnelialueilla lämpötila on melko vakio. Tämä huomataan myös taulukon 3 tuloksista. Kalusto ja osa-aineet olivat tunnelissa yli 8 tuntia, joten niiden lämpötilaerot olivat ehtineet tasaantua. Ilman lämpötila mitattiin juuri ennen kokeiden suorittamista ja se oli 14,2 c-astetta. Sementin lämpötila mitattiin ennen jokaista massareseptin valmistusta ja keskiarvo oli 14,0 c-astetta. Veden lämpötila vaihteli reilulla asteella ja keskiarvo oli 13,4 c-astetta. Massan lämpötila kohosi sekoituksen aikana ja se mitattiin kun esisekoitus oli suoritettuna. Massojen keskiarvolämpötila oli 15,8 c-astetta.

Taulukko 3. Mitatut lämpötilat, c-astetta

Testi	T <sub>ilma</sub>	T <sub>sementti</sub>	T <sub>vesi</sub>	T <sub>sekoituksen jälkeen</sub>
1A	14,2	14,2	12,4	15,2
2A	14,2	14,2	13,2	16,0
3A	14,2	13,6	14,0	16,0
4A	14,2	14,0	13,8	16,0
<b>Keskiarvo</b>	14,2	14,0	13,35	15,8

Tiheys- ja tunkeumakokeiden sekä vedenerottumiskokeiden tulokset on esitetty seuraavassa taulukossa 4. Tiheyden mittaustulokset vaihtelevat hieman ja se selitetään kappalessa 7.1. Keskiarvo tiheydessä oli XXXX g/l. Tunkeumakokeissa ei esiintynyt sakkaa sihdissä, joten tulokset ovat hyviä ja keskiarvotulos oli XXX ml (300 ml:sta). Vedenerottumiskokeissa vettä erottui vain vähän ja keskiarvoksi tuli XX ml (raja 10 ml) tai prosentteina ilmoitettuna XX % (raja 1%).



Taulukko 4. Tiheys- ja tunkeumamittausten sekä vedenerottumisen mittaustulokset

Testi	Tiheys, g/l	Tunkeuma # 100 µm, ml	Veden erottuminen, ml	Veden erottuminen, %
1A	XX	XX	XX	XX
2A	XX	XX	XX	XX
3A	XX	XX	XX	XX
4A	XX	XX	XX	XX
<b>Keskiarvo</b>	XX	XX	XX	XX
<b>Keskihajonta</b>	XX	XX	XX	XX

Marsh-suppilokokeen tulokset ovat koottuina taulukko 5:een. Taulukossa 5 olevat huomautukset koskevat kyseisessä ajassa läpi mennyttä määrää. Ajallisesti testi olisi kestänyt hyvin kauan, joten testausta nopeutettiin mittaamalla läpi mennyt massamäärä kyseisessä ajassa. Toimenpiteellä ei ole merkitystä, koska haluttu raja arvo saavutettiin jo aikaisemmin.

Taulukko 5. Marsh-kokeiden mittaustulokset

Marsh-testi	0 min	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
1A	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX
2A	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX
3A	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX
4A	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX
<b>Keskiarvo</b>	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX
<b>Keskihajonta</b>	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX

Sitoutumisaikatulokset löytyvät taulukosta 6. Kaksi ensimmäistä saraketta ovat yleisesti mitattuja suureita ja viimeisessä sarakkeessa oli oma testi, mikä havainnollisti hydrataation nopeutta. Tämä kuvastaa mielestäni hyvin injektointimassan kovettumista kallion raoissa.

Taulukko 6. Sitoutumiskokeiden tulokset, tuntia

<b>Sitoutumisaika</b>	<b>Sitoutuminen alkaa (kaatokoe)</b>	<b>Sitoutuminen loppuu (kynäkoe)</b>	<b>Kuppi kesti päällä seisomisen</b>
<b>1A</b>	XX	XX	XX
<b>2A</b>	XX	XX	XX
<b>3A</b>	XX	XX	XX
<b>4A</b>	XX	XX	XX
<b>Keskiarvo</b>	XX	XX	XX
<b>Keskihajonta</b>	XX	XX	XX

Sitoutuminen alkoi kaikilla massaerillä samalla tavalla. Keskihajonnasta huomattiin, että vain XX minuutin ero löytyi massojen sitoutumisajankohdilla. Sitoutumisen loppuajoista huomattiin jo XX minuutin keskihajonta, mikä ei ole vielä kovin suuri. Omassa kovettumistestissäni keskihajonta kasvoi jo XX minuutiksi. Kovettumisen nopeus oli huima, mikä huomattiin omasta kovettumistestistäni. Noin XX tunnin päästä sitoutumisen loppumisesta kuppi kesti suuren painon sen päällä ja yksi näytteistä oli jo aivan kivikova.

## 6 Virheanalyysi

Absoluuttisten virherajojen laskeminen on vaikeaa ja hyvin teoreettista. Tutkimuksen virheanalyysiksi otetaan käytännönläheinen lähestymistapa. Ensimmäkin virhettä vesimäärässä aiheuttaa mm. se, että laitteisto kastellaan ennen ensimmäisen massan tekoa, jotta injektointiaine ei tarttuisi niin tiukasti kiinni injektointilaitteeseen. Tämä vaikuttaa vain ensimmäiseen massareseptiin. Lisäksi pesun yhteydessä esisekoittajaan jää vettä pohjalle muutamia litroja, mitä itse sekoitin ei jaksanut nostaa purkuputkea pitkin pois. Tämä aiheuttaa jo suuremman virheen, mikä tarkoittaa useiden prosenttien veden lisäämistä.

Jos vettä esimerkiksi jää kaksi litraa esisekoittimen pohjalle, se tarkoittaa XX % lisäämistä vesimäärään. Se muuttaa vesi-sementti-suhteen XX:sta XX:een, mikä on jo merkittävä ero. Lisää virhettä aiheuttaa itse vesimittarin tarkkuus, mitä ei ollut ilmoitettu. Sen oletetaan olevan noin  $\pm 100$  ml, millä ei ole juurikaan merkitystä.

Laskuista aiheutuvat virheet johtuvat vain pyöristyksistä, ja ne ovat luokkaa prosentin kymmenyksiä. Näillä ei ole käytännössä merkitystä lopputuloksiin. Lämpötila mitattiin infrapunälämpömittarilla, missä ei ollut ilmoitettu virherajoja. Mitattujen lämpötilojen ero oli hyvin pieni, joten mittarin tarkkuus oli arviolta  $\pm 0,2$  c-astetta, mikä on täysin riittävä tarkkuus.

Tehonotkistimen annostelu tapahtui puolen litran mitta-astialla, missä mitta-asteikko oli 10 millilitran tarkkuudella. Mitattavaksi määräksi laskelmissa saatiin XX ml ja oletetaan, että mittatarkkuus oli  $\pm 10$  ml. Näin virheellinen mittamäärä oli  $\pm XX$  prosenttiosuutta. Tällä virheellä notkistimen suhde sementin painoon on välillä XX–XX prosenttia. Mahdollisella annosteluvirheellä ei ole suurta merkitystä lopputulokseen, koska virhe on hyvin pieni.

Itse mittauksessa oli lukuisia virhemahdollisuuksia. Tiheyden mittauksessa ei voinut tulla isoa virhettä, koska laite tarkistettiin vedellä ennen mittausta. Marsh-viskositeettiä mitattaessa massassa olevat kokkareet voivat aiheuttaa virheellisen tuloksen, mutta tämä pitäisi pystyä huomamaan mitattaessa. Kokkareita ei esiintynyt kokeita tehdessä. Enemmän virhettä Marsh-mittauksessa aiheutti käsiajanotolla suoritettu ajanotto. Tähän tulee helposti virhettä lähes sekunti, koska ensiksi täytyy katsoa mitta-asteikkoa ja painaa

samalla kellon pysäytystä. Näin virhettä on mahdollista syntyä aloitushetkellä ja lopetushetkellä yhteensä noin 0,5–1 sekuntia. Aloitus- ja lopetusajan virheet voivat myös kumota toisensa. Suoritin itse mittauksen ja arvioin ajanoton luotettavuuden hyväksi tässä mittauksessa. Arvioimani kokonaisvirhe mittauksissa oli noin 0,3–0,5 sekuntia, millä ei ole merkitystä lopputulokseen.

Vedenerottumisessa mittatarkkuus on varsin hyvä, jos astia on tärisemättömällä alustalla. Tärinä lisää veden erottumista massasta. Mitta-asteikossa asteikko on 10 ml välein, mutta tästä pystyy interpoloimaan helposti 5ml tarkkuuden. Tämän tarkemmaksikin asteikon pystyy arvioimaan. Aika ei vaikuta mittaustulokseen paljoakaan, koska mittausaika on 2 tuntia ja muutama minuutti puoleen tai toiseen ei vaikuta tulokseen merkittävästi. Pystyin lukemaan asteikkoa hyvin ja mitta-astia oli tasaisella tärisemättömällä alustalla, joten mahdollinen mittausrvirhe on  $n. \pm 1$  ml. Aikavirhe oli suuruusluokkaa  $\pm$  kaksi minuuttia.

Tunkeumassa virhettä voivat aiheuttaa mm. sakat sihdissä. Myös liian nopea pumpun vetäminen ja työntäminen eivät anna oikeaa tulosta, koska sihti ei välttämättä läpäise massaa kovin nopeasti. Tutkimuksessa pumppu toimi hyvin. Sakkaa ei muodostunut häiritsevästi, joten pumppu antoi luotettavia tulosta ilman virheitä.

Sitoutumisaikakokeessa ainoa virhe, mikä voi tulla, on se että ei muista katsoa kuppien massaa. Kuppien seuraaminen esim. 10 minuutin välein antaa mahdollisuuden interpoloida tuloksen tarkastelujaksojen välille, jos massa sitoutuu hyvin nopeasti tuolla tarkastelujaksolla. Virhettä kuppikokeessa ei ollut. Testissä, missä katsoin milloin kuppi kesti painoni (noin 70kg) virhettä tuli kuppikokeissa 3A ja 4A. Virhe on noin  $\pm 15$  minuuttia. Tämä aiheutui siitä, että olin puhdistamassa injektointikalustoa ja en ehtinyt seuraamaan kuppeja 10 minuutin välein. Virhe ei ole kovinkaan merkittävä, koska testi oli vain havainnollistava, mikä kuvasti injektointimassa hydrataation (kovettumisen) nopeutta.

Mikään mittausta ei ole absoluuttisen tarkka, joten pientä virhettä tulee aina mittausta suorittaessa. Tilastollisesti niiden tulisi kumota toistensa vaikutusta ainakin osittain. Nämä pienet virheet antavat kenttätestaukselle edun, koska niitä voi tapahtua myös itse injektointitapahtumassa ja näin eri virheiden vaikutusta voidaan analysoida.

## 7 Johtopäätökset

Tulosten vertailu muihin tutkimus tuloksiin oli vaikeaa, koska niitä ei löytynyt. Eräässä ulkomaalaisessa tutkimuksessa löytyi käytettävän DD-sementtiä, mutta se oli sulfaatin kestävä. Tarkemmin tutkittua huomasi, että se ei ollut läheskään niin hienoa kuin AA. DD sementin raekoko  $d_{95}$  oli noin XX mikrometriä, kun AA sementissä se on noin XX  $\mu\text{m}$  [8]. Tästä syystä tutkimuksien tulokset poikkesivat hyvin paljon toisistaan, joten niitä ei voinut verrata keskenään. Vertailun tutkimus keskittyi sementtien käyttäytymiseen ja se julkaistiin XX yliopistossa. [8]

Saatuja tuloksia vertaillessa ennen käytössä olleeseen massaan huomattiin selkeitä eroja. Uuden massan sitoutuminen alkoi noin XX minuutin kohdalla, kun entisellä massalla se alkoi noin XX minuutin kohdalla. Uusi massa sitoutui siis noin XX nopeammin kuin ennen käytössä ollut massa. Kovettumisajoissa oli ajallisesti vielä suurempi ero. Uusi massa kovettui alle XX tunnissa vanhan massan kovettuessa yli XX tuntia. Kovettumisaikojen ero oli siis XX tuntia.

### 7.1 Tulosten analysointi

Injektointimassan esisekoitusvaiheessa massa sekoittui kovalla nopeudella. Tuloksista huomattiin, että massa lämpeni 1,5–2,5 C-astetta 5 minuutin sekoituksen aikana. Tämä johtui veden kitkasta. Tällä on merkitystä massan sitoutumiseen, koska injektointimassa reagoi nopeasti lämpötilan muutoksiin. Muutaman asteen lämpötilan muutos voi tarkoittaa arviolta jopa 5–10 % muutosta sitoutumis- ja kovettumisajoissa. Kuvioista 13 huomataan kuinka paljon lämpötila vaikuttaa sitoutumisaikaan.

Laitteiden pesu tapahtui ennen ensimmäistä koetta ja kokeen 2A jälkeen. Tämän huomaa helposti tuloksista, kun katsotaan mud balance -kokeiden, Marsh-kokeiden ja sitoutumiskokeiden tuloksia. Näistä huomattiin, että testauksien 1A ja 3A jälkeiset injektointimassat olivat jäykempiä kuin laitteiden pesun jälkeiset massat. Tämä johtui siitä, että esisekoittajaan jäi muutamia litroja vettä, kuten aikaisemmin jo mainittiin.

Massat 2A ja 4A olivat tiheämpiä kuin 1A ja 3A. Tiheämpi eli jäykempi massa oli luonnollisesti hitaampi Marsh-suppilotestissä (viskositeetti) ja jäykempi massa alkoi myös sitoutua nopeammin. Nämä kaikki lukuarvot ovat luettavissa taulukosta 5. Taulu-

kosta 6 huomataan, että sitoutuminen alkoi XX minuutteja aikaisemmin tiheämmissä massoissa. Sitoutuminen loppuajankohta oli jo noin XX minuuttia aikaisempi. Oma kovettumistestini paljasti, että tiheämpi massa kovettui huomattavasti nopeammin kuin massat 1A ja 3A. Kovettumisessa erot kasvoivat ajallisesti jo noin XX minuutiksi.

Marsh-suppilokokeessa (taulukko 5) huomattiin, että massan läpimeno hidastui noin XX–XX sekuntia jokaista kymmentä minuuttia kohden puoleen tuntiin asti. Tämän jälkeen erot kasvoivat huomattavasti. Tässäkin testissä huomattiin, että jäykemmät massat, etenkin 2A, poikkesivat muista tuloksista huomattavasti. Massaa ei mennyt läpi riittävästi enää 30 minuutin kohdalla, joten nopeutin testausta ottamalla läpimenneen massan ylös. Tässä huomattiin miten radikaalisti muutama litra vettä vaikuttaa viskositeettiin.

Tunkeumat olivat hyviä (taulukko 4) noin XX ml. Vain noin XX ml ei mennyt pumpun läpi, mikä on mielestäni hyvä tulos, koska vesi-sementti-suhde XX on jäykintä mitä pystytään sekoittamaan injektointikalustolla. Massan jäykkyys lisää riskiä, että injektointimassa ei sekoitu hyvin esisekoittimessa.

Vedenerottuminen kahden tunnin kuluttua esisekoituksesta oli vain X–X prosenttia tilavuudesta (taulukko 4). Tämä on hyvin vähän, koska raja-arvo on 1 % kuvion 1 mukaan. Voidaan todeta, että uusi AA-sementti sekoittuu esisekoittimessa hyvin eikä se erotu esisekoittimessakaan, tulosten ollessa näin hyviä.

## **7.2 Uuden injektointimassan muut vaikutukset työmaalla**

Uudella AA-sementillä on muitakin hyviä puolia kuin injektoinnin ja porausajan välisen ajan lyheneminen. AA toimitetaan paremmin pakattuna kuin BB, minkä takia käsittely on helpompaa ja työmaahävikki pienempää.

Huonona puolena on se, että AA toimitetaan huonommalla lavalla, eivätkä lavat kestä pinoamista niin hyvin kuin edeltävät. Lisäksi kuljettaminen kurottajalla on vaikeampaa huonon lavan takia. Uusi AA otettiin kuitenkin työmaalla hyvin vastaan, koska se toimii paremmin työmaolosuhteissa, etenkin sen ”helppohoitoisuuden” takia.

## 8 Pohdinta

Tulokset olivat sen suuntaisia, mitä odotimme. Sitoutumisaika oli hyvin nopea, minkä takia massan käyttöaika melko lyhyt. Nopeasta sitoutumisesta työmaa saa kuitenkin suuren hyödyn, koska poraus voidaan aloittaa nopeasti injektoinnin päätyttyä. Sitoutuminen kesti ennen ainakin kaksi kertaa kauemmin, joten pahimmassa tapauksessa porareille tulisi useiden tuntien odotus ennen työn aloitusta.

Mittauksista Marsh-suppilo koe osoitti, että pienikin veden lisäys vaikuttaa tuloksiin huomattavasti (pesun takia jäävä vesi). Tästä syystä vesi on mitattava tarkasti, kuten myös tehonotkistaja.

Tutkimusten ja tuloksien luotettavuus ovat hyviä, koska mainittavaa virheitä mittauksissa ei tullut. Lisäksi tutkimuksessa käytettiin yleisesti käytössä olleita menetelmiä, mitkä perustuvat osittain tieteelliseen mittaukseen. Käytettävä laitteisto oli sama kuin injektoinnissa. Tästä syystä tulokset ovat todellisia juuri kyseiselle laitteistolle, koska jokainen laite voi toimia hieman eri tavalla. Tuloksia voidaan soveltaa riittävällä tarkkuudella myös muihin Atlas Copco Cemix 203E (1500 1/min) esisekoittajan ja Atlas Copco Cemaq 401 E / 403 E (60 1/min) välisekoittajan yhdistelmiin.

Injektointimassa osoittautui kaikin puolin hyväksi työmaalle. Tutkimuksella oli merkitystä ammatillisesti, koska se oli työelämälähtöinen ja tehtiin onnistuneesti. Tutkimus kehitti ja paransi työmaan tehokkuutta injektointiosa-alueella.

Tutkimus oli hyödyllinen, onnistunut ja työelämälähtöinen. Suunnittelija hyväksyi uuden injektointireseptin käytettäväksi työmaalla. Tämä tarkoitti käytännössä sitä, että louhinta nopeutui, koska poraaminen voitiin aloittaa nopeasti injektoinnin päätyttyä. Kustannussäästöjä tulee aikataulussa sekä massahävikin pienenemisen myötä työmaalla.

Tutkimuksen vertailu vastaaviin tutkimuksiin ei ole mahdollista, kuten aikaisemmin todettiin, koska kyseisellä sementin ja tehonotkistimen yhdistelmällä ei ole tehty julkisia tutkimuksia. Jokainen sementti koostuu omista lisäaineistaan ja voi reagoida hyvinkin eritavalla, joten suoraan muihin sementteihin vertailua ei voitu tehdä.

Jatkotutkimuksena voisi olla injektointimassojen tunkeutuvuuksien ja leviämisen tutkiminen kalliossa sekä vesimenekikokeiden tutkimista todellisiin injektointimääriin.

Näiden tutkiminen on kuitenkin hyvin vaikeaa ja luotettavien menetelmien löytäminen haasteellista. Silmämääräisesti injektointiaineiden leviämistä voitaisiin arvioida louhintojen edetessä ja vertailla sitä geologin antamaan raporttiin, injektointipöytäkirjoihin ja vesimenekikokeisiin.

Lähdemateriaalia oli rajallisesti käytettävissä, koska kaikki injektoinnissa tarvittava tieto on koottuna Kalliotilojen injektointi 2006 by 53 -julkaisuun. Kaikissa injektointiin pohjautuvissa lähdeeteoksissa oli runsaasti ulkomaalaisia lähteitä (yleensä yli puolet). Maa- ja kallioinjektointi esitutkimus -kirjassa todetaankin, että lähes kaikki tutkimukset ovat tehty ulkomailla. Suomessa on sovellettu etenkin Ruotsissa tehtyjä kokeita, missä tutkimusta on tehty paljon. [9, s.11–13.]

Useat lähteet perustuivat tutkimuksiin työmailla, tutkimusprojekteihin, lehtileikkeisiin ja luentomateriaaleihin. Lähteissä on usein vain muutamia sivuja injektointia koskevaa asiaa. Toisaalta lähdemateriaali on suoraa tutkimustietoa ja yleensä puolueetonta monen osapuolen tekemää, mikä lisää lähdemateriaalin luotettavuutta.



## Lähteet

1. RIL 169–1987 Kalliotilojen rakennusohjeet. Suomen Rakennusinsinöörinen Liitto RIL ry. Helsinki. 1987. ISBN 951-758-125-4.
2. Kalliotilojen injektointi 2006 by 53. Suomen betoniyhdistys r.y. Helsinki. 2006. ISBN 952-5075-73-7.
3. RIL 98–1976 Maa- ja kalliorakennus. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki. 1976. ISBN 951-758-007-X.
4. Pöllä, Jukka & Ritola, Jouko. Suuret kalliotilat, kalliotilojen kuivanapito ja tiivistys. Valtion tekninen tutkimuskeskus VTT. Espoo. 1989. ISBN 951-38-3474-3.
5. RIL 154-2 Tunneli- ja kalliorakennus 2. Suomen Rakennusinsinöörinen Liitto RIL ry Helsinki. 1987. ISBN 951-758-116-5.
6. InfraRYL 2010 Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset osa 1 väylät ja alueet. Rakennustietosäätiö RTS, Rakennustieto Oy. Helsinki. 2010. ISBN 978-951-682-958-9.
7. SFS-EN 12715. Suomen standardisoimisliitto SFS RY. Helsinki. 2001.
8. XXX.
9. Pöllä, Jukka. Maa- ja kallioinjektointi, esitutkimus. Valtion tekninen tutkimuskeskus VTT. Espoo. 1989. ISBN 951-38-3599-5.

## Tulokset

Testit	Sementin kaupan nimi	Tyyppi	Valmistsuerä	Suorituspäivämäärä
1A-4A	XX	AA	XX	1.9.2011
Testi	Tehonotkistinvalmistaja	Tyyppi	Valmistuserä	Suorituspäivämäärä
1A-4A	XX	CC	XX	1.9.2011

Testit	Sementti	Vesi	V/S	Notkistin (%)	Notkistin (kg)	Tiheys (kg/1 l)	Notkistin (ml)
1A-4A	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX

Testi	T <sub>ilma</sub>	T <sub>sementti</sub>	T <sub>vesi</sub>	T <sub>sekoituksen jälkeen</sub>
1A	14,2	14,2	12,4	15,2
2A	14,2	14,2	13,2	16,0
3A	14,2	13,6	14,0	16,0
4A	14,2	14,0	13,8	16,0
<b>Keskiarvo</b>	14,2	14,0	13,35	15,8

Testi	Tiheys, g/l	Tunkeuma # 100 µm, ml	Veden erottuminen, ml	Veden erottuminen, %
1A	XX	XX	XX	XX
2A	XX	XX	XX	XX
3A	XX	XX	XX	XX
4A	XX	XX	XX	XX
<b>Keskiarvo</b>	XX	XX	XX	XX
<b>Keskihajonta</b>	XX	XX	XX	XX

Marsh-testi	0 min	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
1A	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX
2A	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX
3A	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX
4A	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX
<b>Keskiarvo</b>	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX
<b>Keskihajonta</b>	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX

Sitoutumisaika	Sitoutuminen alkaa (kaatokoe)	Sitoutuminen loppuu (kynäkoe)	Kuppi kesti päällä seisomisen
1A	XX	XX	XX
2A	XX	XX	XX
3A	XX	XX	XX
4A	XX	XX	XX
<b>Keskiarvo</b>	XX	XX	XX
<b>Keskihajonta</b>	XX	XX	XX