



Kalervo Orantie, Jouko Ritola & Anna Kronlöf

Kalliotilojen ruiskutettavat vesitiiviit komposiittirakenteet

Kalliotilojen ruiskutettavat vesitiiviit komposiittirakenteet

Kalervo Orantie, Jouko Ritola & Anna Kronlöf

ISBN 951-38-6885-0 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2006

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 3, PL 1000, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 3, PB 1000, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 3, P.O.Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 4374

VTT, Lämpömiehenkuja 2, PL 1000, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 7060

VTT, Värmemansgränden 2, PB 1000, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 7060

VTT Technical Research Centre of Finland, Lämpömiehenkuja 2, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7060

Orantie, Kalervo, Ritola, Jouko & Kronlöf, Anna. Kalliotilojen ruiskutettavat vesitiiviit komposiittirakenteet [Sprayable watertight composite structure in rock caverns]. Espoo 2006. VTT Tiedotteita – Research Notes 2358. 61 s. + liitt. 88 s.

Avainsanat composite structures, shotcrete, additives, accelerators, water glass accelerators, structural analysis, cracking, shrinkage, waterproofing, rock caverns

Tiivistelmä

Tutkimus sisältää lyhyen kirjallisuusosan, laboratoriokokeet ja kenttäkokeet. Laboratoriokokeiden mukaan alkalivapailta kiihdyttimillä lujuudenkehitys on hieman hitaampaa kuin vesilasipohjaisilla kiihdyttimillä.

Kiihdyttimien kemialliset reaktiot lisäävät tuoreen ruiskubetonin kutistumaa. Tämän vuoksi kiihdyttimiä tulee käyttää vain tarpeellinen määrä.

Mikrorakenneanalyysin mukaan vesilasipohjaiset kiihdyttimet aiheuttavat betoniin herkästi mikrohalkeilua ja lujuuskatoa. Alkalivapailta kiihdyttimillä mikrohalkeilun määrä ja lujuuskato ovat vähäisiä.

Betonimassaan sekoitettavat teräskuidut ovat suositeltavia, sillä ne vähentävät halkeamien muodostusta ja mahdollisesti muodostuvien halkeamien levenemistä.

Betonimassan alhainen lämpötila vähentää kosteuden haihtumista heti ruiskutuksen jälkeen ja vähentää siten tuoreen ruiskubetonin halkeiluriskiä. Betonimassaan sekoitettava jälkihoitoaine ei välttämättä muodosta riittävää jälkihoitoa. Tämän vuoksi suositeltava jälkihoito on vesisumutus. Vesisumutus tulee aloittaa heti ruiskubetonoinnin etenemisen myötä.

Sulfaatinkestävä sementti todettiin laboratoriokokeissa yhteensopivaksi alkalivapaiden kiihdyttimien kanssa. Vesilasipohjainen kiihdytin ja sulfaatinkestävä sementti osoittautuivat huonosti yhteensopiviksi.

Kenttäkokeissa ruiskubetoniin muodostui pian ruiskutuksen jälkeen halkeamia. Keskeinen syy halkeamien muodostukseen oli ilmeisesti vesijälkihoidon puuttuminen. Muita ilmeisiä syitä olivat kiihdytinlisäaineen suurehko annostus ja betonimassan korkeahko lämpötila verrattuna tunnelin lämpötilaan. Betoni ei sisältänyt kuituja. Ruiskubetonin taakse kohdistettiin vedenpaine. Kokeessa ruiskubetoni sinänsä oli vedenpitävää, mutta vesi tuli halkeamien lävitse.

Kenttäkoe oli poikkeuksellisen vaativa, koska normaalisti maanalaistiloissa vedenpaine on vähäinen salaojien vuoksi. Vedenpaineen nosto aloitettiin jo muutaman viikon kuluttua ruiskubetonoinnista. Ilmeisesti tästä syystä tiivistysaineet eivät vähentäneet vesivuotoja.

Työmaakokeiden tulosten mukaan betonin halkeilemattomuus on ensiarvoisen tärkeää vesitiiveyden saavuttamiseksi. Mikäli halkeamia kuitenkin esiintyy, tulee niiden välttämiseksi kiinnittää erityistä huomiota vesijälkihoidon aloitusajankohtaan, betonin lämpötilaan ja kiihdyttimen annostukseen. Tästä huolimatta halkeamia saattaa esiintyä.

Halkeamien varalta vesitiiviiden lisävarmistukseksi suositellaan kallion esi-injektointia. Näin vuotokohdat saadaan kokemuksen mukaan vähenemään merkittävästi.

Vaativissa kohteissa vesitiivis ruiskubetonirakenne muodostetaan siten esi-injektoinnilla, salaojituksella ja vesitiiviillä kuidutetulla ruiskubetonilla. Vesitiiveys varmistetaan siten kolmella peräkkäisellä läpäisyesteellä.

Orantie, Kalervo, Ritola, Jouko & Kronlöf, Anna. Kalliotilojen ruiskutettavat vesitiiviit komposiittirakenteet [Sprayable watertight composite structure in rock caverns]. Espoo 2006. VTT Tiedotteita – Research Notes 2358. 61 p. + app. 88 p.

Keywords composite structures, shotcrete, additives, accelerators, water glass accelerators, structural analysis, cracking, shrinkage, waterproofing, rock caverns

Abstract

The research consists of a literature survey, laboratory tests and field tests. According to the laboratory tests the strength development is slightly slower when using alkali-free accelerators compared with water glass accelerators.

Chemical reactions of shotcrete accelerators increase the shrinkage of fresh shotcrete. Therefore shotcrete accelerators must not be used more than needed.

In accordance to the microstructure analysis water glass accelerators cause microcracking and loss of strength. Alkali free accelerators caused minor microcracking and loss of strength.

Steel fibres mixed in fresh concrete are recommended, because they diminish cracking and limit the crack widths.

The low temperature of fresh concrete diminishes evaporation of water immediately after shotcreting and therefore diminishes the risk of cracking. Internal curing agents do not necessarily provide adequate curing. Therefore water spraying is recommended as curing. Water spraying shall begin immediately as shotcreting proceeds.

In accordance to laboratory tests sulphate resistance cement was compatible with alkali-free shotcrete accelerators. Water glass based accelerator and sulphate resistance cement proved to be unsatisfactorily compatible.

In the field tests cracks occurred in shotcrete soon after shotcreting. Main reason for that was evidently lack of water curing. Other evident reasons were the slightly high dosage of shotcrete accelerator and the high temperature of the fresh concrete compared with the temperature of the tunnel. There were no fibres in the concrete. In the test water pressure was directed behind the shotcrete layer. In the test the shotcrete as such was watertight, but water flowed out through cracks.

The field test was exceptionally demanding, because usually water pressure in underground facilities is insignificant due to drainage. The increasing of water pressure

was started already after some weeks after shotcreting. Evidently this is the reason, why sealing compound did not decrease water leakages.

According to the results in the field tests, integrity of shotcrete is primarily important to reach watertightness. If cracks occur, attention shall be drawn to the starting time of water curing, to the temperature of fresh concrete and to the dosage of shotcrete accelerator. Even then cracks may occur.

In the case of cracking it is recommended to increase watertightness by pre-grouting of the rock. Experience has shown that pre-grouting reduces water leakages considerably. So it is possible to decrease the amount of water leakages.

In demanding building sites water tight shotcrete structure is achieved by pre-grouting, drainage and watertight fiber shotcrete. That means that watertightness is ensured with three sequential barriers.

Alkusanat

Ruiskutettavat vesitiiviit komposiittirakenteet -projektin materiaalikoeosuus toteutettiin VTT:ssä. Kenttäkoeosuus toteutettiin Vuosaaren sataman ratatunnelityömaalla sijaitsevassa ajoneuvojen kääntötunnelissa. Tutkimuksen rahoitukseen osallistuivat Tekes, Helsingin kaupungin geotekninen osasto, Helsingin Energia, Helsingin Vesi, Helsingin Pelastuslaitos, Posiva Oy, VUOLI-projekti, YIT Oy, Semtu Oy, Degussa Oy, AqvaConTec Oy, Normet Oy, Lohja Rudus Oy ja VTT.

Tutkimusta ohjaava ja valvova johtoryhmä kokoontui projektin aikana viisi kertaa. Johtoryhmään kuuluivat seuraavat henkilöt:

Pekka Holopainen, Helsingin kaupungin geotekninen osasto, puheenjohtaja

Osmo Rasimus, Tekes

Mauri Toivanen, Posiva Oy, 30.8.2005 saakka

Pertti Huovinen, Posiva Oy, 1.9.2005 alkaen

Pekka Kontiala, VUOLI-projekti

Ari Bergström, YIT Rakennus Oy

Pirjo Tepponen, Semtu Oy

Ari Laitinen, Degussa Oy, 31.8.2005 saakka

Esa Kiiski, Degussa Oy, 1.9.2005 alkaen

Riku Hassi, AqvaConTec Oy

Jouko Tenhunen, Normet Oy

Pentti Lumme, Lohja Rudus Oy

Markku Leivo, VTT.

Laboratorio- ja kenttäkokeiden suunnittelua varten perustettu työryhmä kokoontui yhdeksän kertaa. Työryhmään kuuluivat seuraavat henkilöt:

Pekka Holopainen, Helsingin kaupungin geotekninen osasto, puheenjohtaja

Ari Bergström, YIT Rakennus Oy

Simo Rapeli, Semtu Oy

Ari Laitinen, Degussa Oy, 31.8.2005 saakka

Esa Kiiski, Degussa Oy, 1.9.2005 alkaen

Riku Hassi, AqvaConTec Oy

Vesa Anttila, Lohja Rudus Oy.

VTT:n projektiryhmään kuuluivat tutkija Kalervo Orantie (projektipäällikkö) ja Jouko Ritola. Tämän julkaisun ovat laatineet Kalervo Orantie, Jouko Ritola ja Anna Kronlöf (luvut 4 ja 5). Kenttäkoejärjestelyiden rakentamisesta vastasivat Tero Hynninen ja Heini Soininen YIT Rakennus Oy:stä.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	5
Alkusanat.....	7
1. Johdanto.....	11
2. Ruiskubetonin osa-aineet.....	13
3. Vesitiivis ruiskubetoni.....	15
4. Ruiskubetonin kiihdyttimet.....	17
5. Kiihdyttimen aiheuttama laskennallinen kutistuma.....	18
5.1 Alkalivapaat kiihdyttimet.....	18
5.2 Alkalipohjaiset kiihdyttimet.....	22
6. Kokonaiskutistuma.....	23
7. Kokemuksia Norjassa tehdyistä vesieristyskokeista.....	25
7.1 Koekohteet.....	25
7.2 Kokeet sementtipohjaisilla ruiskutettavilla vedeneristeillä.....	25
7.3 Ei-sementtipohjaiset pintaruiskutusmembraanit.....	27
7.4 Ruiskubetonin tiivistävät lisäaineet.....	28
8. Ruiskutettavat kuivatus- ja routaeristeet.....	30
8.1 Norjassa kevytsoralla tehtyjä ruiskutuskokeita.....	30
8.2 Muita potentiaalisia ruiskutettavia eristemateriaaleja.....	30
9. Laboratoriokokeet.....	32
9.1 Kokeissa käytetyt tuotteet.....	32
9.2 Betonikokeet.....	36
9.3 Tulokset.....	37
10. Laboratoriokokeiden yhteenveto.....	43
11. Ruiskutukset koekohteessa.....	45
11.1 Koekohteen yleiskuvaus.....	45
11.2 Koeohjelma ja koejärjestelyt.....	46
11.3 Koerakenteiden vedenpitävyyskokeet.....	50

11.4 Vedenpainekokeen aikaiset havainnot.....	51
11.5 Ruiskutetuille laatoille tehdyt kokeet.....	52
12. Yhteenveto.....	57
Lähdeluettelo	60

Liitteet

- Liite 1: Degussa Oy. Kiviainekset
- Liite 2: Sementu Oy. Kiviainekset
- Liite 3: AqvaConTec Oy. Kiviainekset
- Liite 4: Koealueet

1. Johdanto

Suomessa kalliotilojen ja tunneleiden vesieristys tehdään pääasiassa salaojitus- ja ruiskubetonirakenteella, joka ohjaa kalliosta tulevat vedet lattiatason alle sijoittuvaan kuivatus- ja salaojitusjärjestelmään. Poikkeuksena ovat vaativat, routaeristetyt liikennetunnelit ja vaativat laitetilat, joissa käytetään erillistä ripustettua routa-vesieristysrakennetta, joka ohjaa vedet kuivatusjärjestelmään. Pääsääntöisesti käytetyssä ruiskubetoniverkko-vesieristysrakenteessa ruiskubetonin vesitiiviydelle asetetaan sen verran kovat vaatimukset, että nykyisillä menetelmillä niitä on vaikea saavuttaa.

Vuonna 2002 valmistuneessa Tekes-rahoitteisessa tutkimuksessa (Ritola & Vuopio 2002) selvitettiin kalliotilojen vuotokohdista irrotetuista poranäytteistä ruiskubetonissa todettuun puutteelliseen vesitiivyyteen. Kohteita oli 13, joista 8 oli tehty märkäseosmenetelmällä. Kohteet oli valmistettu pääasiassa 1990-luvulla. Poranäytteistä tehtiin mm. seuraavia havaintoja:

- Tiivistyshuokosten määrä vaihteli kohteittain merkittävästi. Märkämenetelmällä oli keskimäärin enemmän tiivistyshuokosia kuivamenetelmään verrattuna. 4–5 kohteessa tiivistyshuokosia oli niin runsaasti, että niiden voidaan katsoa olevan merkittävä vesivuotojen osatekijä.
- Mikrohalkeamien määrä vaihteli kohteittain merkittävästi. Märkämenetelmällä oli keskimäärin enemmän mikrohalkeamia kuivamenetelmään verrattuna. Mikrohalkeamia esiintyi 10 kohteessa. 4 kohteessa mikrohalkeamien voidaan katsoa olevan merkittävä vesivuotojen osatekijä.
- Vesi-sementtisuhde vaihteli kohteittain merkittävästi. 6 kohteessa korkean vesi-sementtisuhteen voidaan katsoa olevan merkittävä vesivuotojen osatekijä.

Tutkimuksessa (Ritola & Vuopio 2002) arvioitiin, että tehokkaimmat toimenpiteet vesitiivyyden parantamiseksi ovat esi-injektointin lisääminen, louhinnan optimointi, ruiskubetonikerroksen paksuuden lisääminen, ruiskubetonirakenteen vesitiivyyden parantaminen ja tilan kuivatusjärjestelmän kehittäminen.

Tämän ”Ruiskutettavat vesitiiviit komposiittirakenteet” -tutkimuksen tarkoituksena oli kehittää nykyistä paremmin kalliotilojen ja tunneleiden vesi- ja routaeristeenä toimiva ruiskutettava komposiittirakenne pääpainon ollessa ruiskubetonin vesitiivyydessä. Vesitiivis ruiskubetonin perustuu tällöin seuraaviin vaihtoehtoihin:

- vesitiivyyden suhteen optimoitu ruiskubetonimassa, jossa hallitaan osa-aineiden seossuhteet ja lisäaineet sekä kyetään todentamaan vesitiivyyteen liittyvät laatuvaatimukset

- ruiskutettava vesieristyskerros, joka muodostaa yhdessä ruiskubetonin kanssa vesitiiviin rakenteen
- ruiskutettava routa- ja paloeristyskerros, joka muodostaa routa- ja palosuojan vesitiiviille ruiskubetonille.

2. Ruiskubetonin osa-aineet

Ruiskubetonointia koskevia ohjeita esitetään EFNARCin (European specification for sprayed concrete) Guidelines-julkaisussa. Ruiskubetonin koostumukselle ja osa-aineille annetaan ohjeita myös julkaisussa Betoninormit (2004).

Yleensä käytetään nopeasti kovettuvia (R) sementtilaatuja. Guidelines-julkaisussa annetaan sementin määräksi kuivamenetelmällä $350\text{--}450\text{ kg/m}^3$ ja märkämenetelmällä $400\text{--}500\text{ kg/m}^3$.

Sulfaattirasituksen yhteydessä edellytetään sulfaatinkestävän sementin käyttöä. Julkaisussa mainitaan, että sulfaatinkestävä sementti saattaa hidastaa betonin sitoutumista ja kovettumista. Sulfaatinkestävyys voidaan aikaansaada myös riittävän suurella masuuni-kuonan osuudella. Ruiskubetonoinnissa tämä ei juuri tule kyseeseen, koska masuuni-kuona hidastaa suurina pitoisuuksina merkittävästi betonin kovettumista.

Kiviaineksen 8 mm läpäisyn tulisi olla ainakin 90 % (Guidelines 1999). Jos kiviaines on karkeampaa, hukkaroiske lisääntyy ja massan tunkeutuminen jo ruiskutettuun betoniin heikkenee. Myös ruiskutetun pinnan laatu heikkenee raekoon kasvaessa.

Guidelines-julkaisussa kehoitetaan tarkkaavaisuuteen käytettäessä murskattuja kiviaineksia, koska kulmikas muoto saattaa vaikeuttaa pumpattavuutta ja lisätä hukkaroisetta.

Yleensä murskattu kiviaines lisää betonimassan vedentarvetta. Lisäys on sitä suurempi, mitä litteämpää murskattua kiviainesta käytetään. Toisaalta jos betonin side- ja seosainemäärä on suuri, kuten ruiskubetonissa, rakeiden muodolla ei ole kovin suurta merkitystä (Betonikeskus 2002).

Kiviaineksen hienoaines (alle 0,063 mm) on betonin kannalta haitallista, jos sen ominaispinta-ala on suuri. Suuri ominaispinta-ala lisää betonin veden tarvetta ja kuluttaa enemmän notkistinta tai nesteytintä.

Soran hienoaineksen ominaispinta-alaa voidaan pitää pienenä, jos sen arvo on $2\ 000\text{--}4\ 000\text{ m}^2/\text{kg}$, keskimääräisenä, jos sen arvo on $4\ 000\text{--}7\ 000\text{ m}^2/\text{kg}$, ja suurena, jos sen arvo on yli $7\ 000\text{ m}^2/\text{kg}$. Kalliosta murskatun kiviaineksen hienoaineksen ominaispinta-ala vaihtelee $2\ 000\text{--}3\ 000\text{ m}^2/\text{kg}$. Kalliosta murskatun tuotteen hienoainespään vaihtelun merkitys betonin työstettävyyteen ei siten ole yhtä suuri kuin rapautuneiden soratuotteiden. Sementtien ominaispinta-ala-arvot ovat myös samaa suuruusluokkaa kuin kalliokiviainesten pinta-alat (Betonikeskus 2002).

8 mm raekoon omaavan betonin vedentarve on merkittävästi suurempi verrattuna 16 mm raekoon omaavan betonin vedentarpeeseen. Myös sementin määrä ruiskubetonissa

on suuri, mikä edelleen lisää vedentarvetta. Tästä syystä notkistavat lisäaineet ovat ruiskubetonimassassa välttämättömiä. Viime vuosina markkinoille on tullut ns. polymeerinotkistimia, jotka ovat merkittävästi tehokkaampia verrattuna vanhempiin notkistimiin.

Jotta notkistin toimisi ruiskubetonissa, sen vaikutusajan tulee olla riittävän pitkä. Käytännön ruiskutustöissä on syytä varautua kahden tunnin vaikutusaikaan. Sopiva annostus edellyttää ennakkokokeita, koska notkistimen vaikutusaika riippuu notkistintyyppin lisäksi myös notkistimen annostuksesta. Ruiskubetonissa polymeerinotkistimien annostukset ovat yleensä olleet noin 0,8–1,5 % (riippuen myös vaikuttavan aineen pitoisuudesta).

Tiivistysaineiden tarkoituksena on täyttää lähinnä ruiskubetoniin muodostuvat kapillaarihuokokset. Tiivistysaineet koostuvat hienojakoisen sementin ja kemikaalien lisäksi esimerkiksi silikasta ja hienojakoisesta kvartsista. Tiivistysaineet ovat kuivatuotteita (sisältävät sementtiä). Tuotteita on ollut markkinoilla pidempäänkin ja niitä on käytetty useassa kohteessa.

Tunnetaan myös nestemäisessä muodossa olevia pelkästään kemikaalista muodostuvia nestemäisiä tiivistysaineita, joilla betonista saadaan vettähylyvä (Rhein-Chemotechnik). Näitä kemikaaleja on käytetty lähinnä betonituotteiden valmistuksessa. Niiden käytöstä ruiskubetonissa ei ole tietoa.

Tiivistysaineiden käyttö ruiskubetonissa on lisääntynyt vesitiiviydelle asetettujen vaatimusten kasvaessa. Parhaimmillaan tiivistysaineet ovat korkean vesi-sementtisuhteen omaavassa betonissa, jossa on runsaasti kapillaarihuokosia.

Toisaalta kapillaarihuokosten määrää voidaan vähentää merkittävästi pelkällä vesi-sementtisuhteen alentamisella. Tiivistysaineet toimivat tällöin ”lisävarmistuksena” siltä varalta, että betoniin kuitenkin paikoin jää harvavalu, kapillaariverkosto tai muu säröilyverkosto. Silminnähtäviä, ruiskubetonissa mahdollisesti olevia halkeamia tiivistysaineilla ei saada tukittua.

Ruiskubetonissa käytetään tällä hetkellä sekä alkalivapaita että alkalikiihdyttimiä. Guidelines-julkaisussa annetaan nestemäisten alkalivapaiden kiihdyttimien ohjeelliseksi annostukseksi 4–10 paino-% sideaineesta. Vastaava arvo alkalikiihdyttimille on 4–12 %. Edelleen julkaisussa todetaan, että lujuuskato ei saisi 7 tai 28 vuorokauden iässä olla yli 25 %.

Ruiskubetonin vedenpitävyyttä voidaan parantaa myös erillisellä ruiskutettavalla vesieristerokkolla, joka ruiskutetaan ruiskubetonikerrosten väliin tai rakenteen pinnalle, jolloin eri kerrokset muodostavat komposiittirakenteen.

3. Vesitiivis ruiskubetoni

Betonissa olevat kapillaarihuokokset ovat vesitiiviiden kannalta haitallisia, koska ne lisäävät betonin läpäisevyyttä. Kapillaarihuokokset ovat kooltaan noin 10^{-2} – 10^{-4} mm. Vesi-sementtisuhteen pienetessä kapillaarihuokosten osuus kokonaishuokoisuudesta vähenee. Esimerkiksi vesisementtisuhteen pieneneminen arvosta 0,60 arvoon 0,40 puolittaa kapillaarihuokosten tilavuusosuuden.

Kapillaarihuokosten osuus kokonaishuokoisuudesta on betonin kovettumisen alkuvaiheessa suuri. Kapillaarihuokosten määrä pienenee hydrataation edetessä. Teoreettisesti on laskettu, että esimerkiksi vesisementtisuhteella 0,60 kestää 6 kuukautta, kunnes hydrataatio on edennyt niin pitkälle, että kapillaarihuokokset eivät enää muodosta yhtenäistä verkkoa. Vesi-sementtisuhteella 0,45 vastaava aika on 7 vuorokautta (+20 °C lämpötilassa).

Termillä ”vesitiivis betoni” tarkoitetaan, että betoni täyttää standardin ”SFS 4476. Betoni. Vedenpitävyys” vaatimukset. Nimestään huolimatta vesitiivis betoni ei tarkoita, ettei sen läpi kulkisi vettä.

Teoreettisesti tarkastellen betonissa oleva kapillaariverkosto sulkeutuu vesitiiviiksi esimerkiksi vesi-sementtisuhteen 0,50 omaavalla betonilla noin kuukauden iässä. Käytännössä näin ei kuitenkaan tapahdu, vaan vettä kulkeutuu betonin kapillaariverkostossa. Veden kapillaarista kulkeutumista (ei sisällä vedenpaineen vaikutusta) ehjän kovettuneen betonin kapillaariverkostossa voidaan arvioida kaavalla

$$t = mz^2 \tag{1}$$

jossa t on aika s
 m on vastusluku s/m^2
 z on veden kulkema matka m.

Vastusluvun arvoja ei ole kirjallisuudessa kovin paljon esitetty. Joka tapauksessa vastuslukujen vaihteluvälit ovat suuret. Halkeilemattomalle vesi-sementtisuhteen 0,50 omaavalle betonille voitaneen käyttää vastuslukua 50×10^6 s/m^2 . Sijoittamalla kaavaan betonipeitteen paksuudeksi z esimerkiksi arvot 0,05 ja 0,1 metriä saadaan veden läpimenoajaksi noin 1,5 vrk ja 6 vrk. Tällöin vesivuoto havaitaan sisäpuolella tummentumana, ellei kosteus ehdi haihtua betonin pinnalta luolatilaan.

Rakenteen läpi kapillaarisesti kulkeutuvan veden määrä voidaan arvioida kaavalla

$$q_k = \frac{k}{(2t^{0,5})} \tag{2}$$

jossa k on kapillaarisuusluku $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0,5})$.

Kaavojen (1) ja (2) mukaan rakenteen paksuuden kaksinkertaistaminen vähentää kapillaarisesti läpi kulkeutuvan veden määrän yhteen neljäsosaan. Siten rakenteen paksuudella on huomattava merkitys vesitiiviydelle.

Ruiskubetonin taakse voi muodostua paineellista vettä, mikäli salaojat eivät toimi suunnitellusti. Paineellisen veden läpivirtaus on suoraan riippuvainen paineesta ja käänteisesti riippuvainen ruiskubetonin paksuudesta. Tämä tarkoittaa sitä, että ruiskubetonikerroksen paksuuden kaksinkertaistaminen vähentää paineellisen veden läpivirtauksen puoleen.

Halkeamat ja huonosti tiivistyneet kohdat lisäävät veden läpäisevyyttä hyvin merkittävästi. Ahlgrenin julkaisussa olevan esimerkin mukaisesti (vedenpaine 1 bar eli 10 m, laatan paksuus 0,2 m) vedenläpikulkeutuminen lisääntyy runsaat 2000-kertaiseksi, kun laatasta on neliometriä kohden yksi 0,1 mm leveä ja metrin mittainen halkeama. Tämän perusteella on ensiarvoisen tärkeätä, että ruiskubetoni tiivistyy hyvin eikä siihen muodostu ruiskutuksen aikana eikä sen jälkeen jatkuvaa säröilyverkostoa eikä halkeamia, varsinkaan läpimeneviä halkeamia.

4. Ruiskubetonin kiihdyttimet

Alkalivapaat kiihdyttimet ovat nykyisin yleisin kiihdytintyyppi tavallisissa kallio-tiloissa. Alkalikiihdytintä (vesilasi) käytetään edelleen jonkin verran. Alkalialuminaattikiihdyttimiä ei tiettävästi ole enää käytössä. Alkalivapaiden kiihdyttimien etuina ovat mm. parantunut työturvallisuus (ei nosta pH-arvoa), alhainen pölynmuodostus, alhainen hukkaroiskeen määrä ja mahdollisuus ruiskuttaa aiempaa paksumpia kerroksia (Maltese et al. 2002). Zampini et al. (2004) toteavat seuraavaa:

- Alkalipohjaisen kiihdyttimen (vesilasi) reaktiossa muodostuu heti tiivis kalsiumsilikaattihydraatti (CSH) geeli. Tiivis geeli hidastaa reaktion etenemistä, jolloin hydrataatio jää vajaaksi. Vesi ei jakaudu tasaisesti, vaan muodostaa vesitäytteisiä huokosia, jotka muuttuvat ilmahuokosiksi veden haihduttua. Lujuuskatoa.
- Alkalialuminaattikiihdyttimen reaktiossa muodostuu aluksi nopeasti ettringiittiä ja hydrogarnettia. Ettringiitti ja sulfoaluminaatti ovat aluksi geelinä. Sulfaatti kuluu, jolloin ettringiitti muuttuu geelimäiseksi monosulfaatiksi, jossa CSH on myös läsnä, muttei yhtä suuressa määrin kuin alkalisilikaattien yhteydessä. Vajaa hydrataatio, jonka seurauksena on lujuuskato.
- Alkalivapaiden kiihdyttimien ettringiittireaktio kuluttaa vettä, mistä seuraa sitoutuminen. Kidemuoto riippuu huokosveden koostumuksesta. Tuote on aluksi ettringiittiä ja geelimäistä tuotetta. 3 tunnin iässä muodostuu lisää geeliä (todennäköisesti CSH:ta ja ettringiittiä). Kun sulfaatti kuluu, muodostuu monosulfaattia. Konversio rikkoo yhtenäisen geelikerroksen ja paljastaa sementin pinnat, mikä mahdollistaa hydrataation etenemisen. Kiteisiä välituotteita muodostuu enemmän kuin alkali-pohjaisissa. Ei lujuuskatoa.

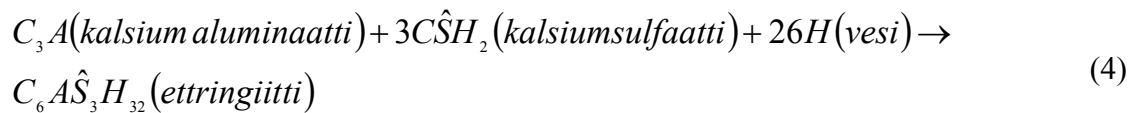
5. Kiihdyttimen aiheuttama laskennallinen kutistuma

5.1 Alkalivapaat kiihdyttimet

Alkalivapaat ruiskubetonin kiihdyttimet muodostavat runsaasti ettringiittiä kovettumisen varhaisvaiheessa. Ettringiitti muodostuu seuraavassa reaktiossa (Lea 1971):

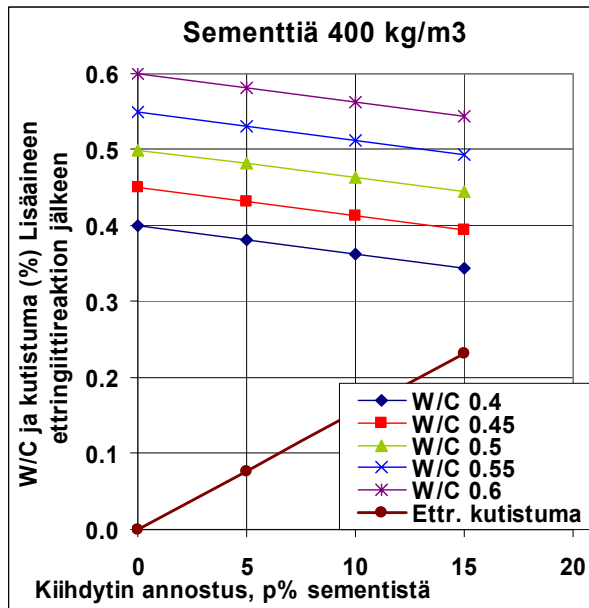


Sementin kanssa reaktio etenee seuraavasti:

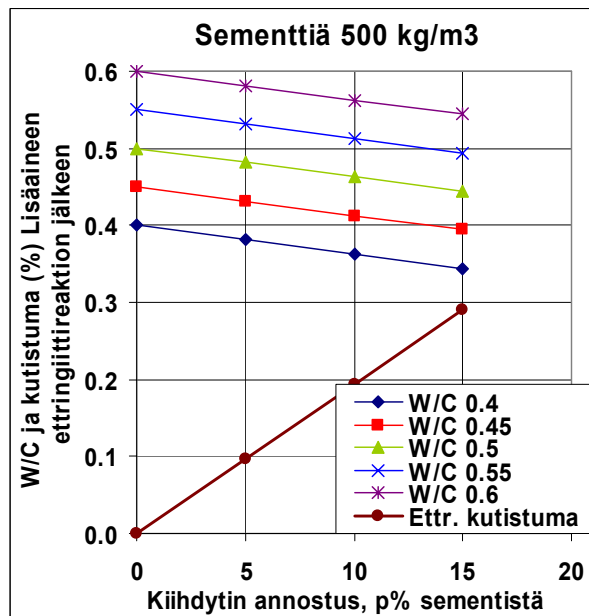


Ettringiitin lähtötuotteet vievät enemmän tilaa kuin reaktiotuotteet. Tämän seurauksena betoni kutistuu reaktion aikana. Kutistuman suuruus voidaan laskea. Siihen vaikuttavat sementissä alun perin olevien ettringiittiä muodostavien aineiden määrä ja kiihdyttimen ettringiittiä muodostavien komponenttien määrä. Ettringiitin muodostuminen kuluttaa runsaasti vettä, jolloin massa jäykistyy. Reaktion vaikutus vesi-sementtisuhteeseen voidaan laskea.

Kuvissa 1 ja 2 esitetään lisäaineen ettringiitistä johtuva vesi-sementtisuhteen pienenemä ja kutistuma, kun sementtiä on 400 tai 500 kg/m³ ja vesi-sementtisuhte on 0,4–0,6. Kiihdytin on aluminisulfaattipohjainen Al₂(SO₄)₃. Laskelmassa käytetyt muut arvot esitetään taulukossa 1.

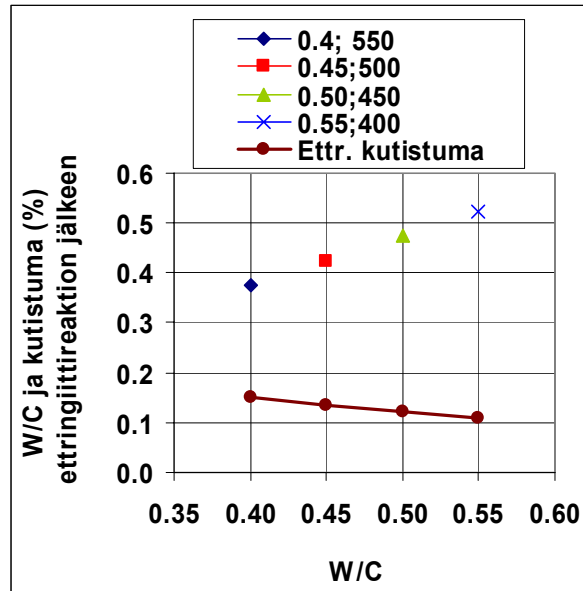


Kuva 1. Ruiskubetonin laskennallinen vesi-sementtisuhde ja kutistuma alumiinisulfaatti-pohjaisen kiihdyttimen ettringiittireaktion jälkeen. Sementtiä on 400 kg/m^3 . Sementin ettringiitin vaikutus on jätetty laskelmasta pois, joten kuvaajat ilmaisevat ainoastaan kiihdyttimen vaikutukset. Suomalaisen sementin ettringiitistä johtuva kutistuma on noin 0,13, kun sementtipitoisuus on 400 kg/m^3 .



Kuva 2. Ruiskubetonin laskennallinen vesi-sementtisuhde ja kutistuma alumiinisulfaatti-pohjaisen kiihdyttimen ettringiittireaktion jälkeen. Sementtiä on 500 kg/m^3 . Sementin ettringiitin vaikutus on jätetty laskelmasta pois, joten kuvaajat ilmaisevat ainoastaan kiihdyttimen vaikutukset. Suomalaisen sementin ettringiitistä johtuva kutistuma on noin 0,17, kun sementtipitoisuus on 500 kg/m^3 .

Kuvassa 3 esitetään alkalivapaan kiihdyttimen vaikutus vesi-sementtisuhteeseen ja kutistumaan, kun massan sementtipitoisuus on 400–550 kg/m³ ja vesi-sementtisuhdetta pienennetään, kun sementtimäärää kasvatetaan. Kiihdyttimen annostus on 7 % sementin määrästä kaikissa tapauksissa. Laskelmassa käytetyt muut arvot esitetään taulukossa 1.



Kuva 3. Ruiskubetonin vesi-sementtisuhte ja kutistuma ettringiittireaktion jälkeen, kun alkalivapaan alumiinisulfaattipohjaisen kiihdyttimen annostus on 7 % sementin määrästä. Sementin ettringiitin vaikutus on jätetty laskelmasta pois, joten kuvaajat ilmaisevat ainoastaan lisäaineen vaikutukset.

Taulukko 1. Kutistumalaskelmassa käytetyt arvot. Alkalivapaan kiihdyttimen $Al_2(SO_4)_3$ -pitoisuudeksi on oletettu 50 %. Loppu on vettä, mikä on otettu huomioon vesi-sideainesuhteen laskelmassa.

Yhdiste	Suure	Arvo
CSH ₂	Tiheys	2,32 (Justnes et al. 1999)
H ₂ O	Tiheys	0,9982 (Paulini 1992)
C ₃ A	Tiheys	3,001 (Paulini 1992) 3,03 (Justnes et al. 1999) 3.004 (Lea 1971)
Ettringiitti C ₆ A \hat{S} ₃ H ₃₂	Molekyylipaino	1245
Ettringiitti	Kemiallinen kutistuma	76,79 cm ³ /mol, kun C ₃ A:n tiheys on 3,001 (Holt 2001)
Al ₂ (SO ₄) ₃	Molekyylipaino	330,23
Al ₂ (SO ₄) ₃	Al-pitoisuus paino-%	16,3
Al ₂ (SO ₄) ₃	S-pitoisuus paino-%	25,5
Sementti	SO ₃ -pitoisuus ennen kiihdyttimen lisäystä	3 %
SO ₃	Molekyylipaino	76,09
SO ₃	S-pitoisuus	36,9

Laskennallisen tarkastelun mukaan alkalivapaa kiihdytin tuottaa massaan nopeasti ettringiittiä, mikä vaikuttaa massaan kahdella tavalla:

- Reaktio sitoo huomattavan määrän vettä, joten massa jäykistyy.
- Reaktion tuotteiden tilavuus on pienempi kuin lähtöaineiden, joten massa kutistuu.

Kiihdyttimen ettringiittireaktion aiheuttama kutistuma riippuu kiihdyttimen annostuksesta ja sementin määrästä, mutta se ei riipu vesi-sementtisuhteesta. Kuvassa 3 esitetty kutistuma pienenee vesi-sementtisuhteen kasvaessa, koska samalla sementtipitoisuus ja siitä riippuva lisäaineen pitoisuus betonikuutiossa pienenevät.

Mitä enemmän vettä kuluu ettringiittireaktioon, sitä pienemmäksi muodostuu reaktion jälkeinen vesi-sementtisuhte. Samalla massa jäykistyy ja sen kyky mukautua reaktion aiheuttamaan kutistumaan vähenee, jolloin massa saattaa halkeilla.

Riski kasvaa kiihdytinannostusta kasvatettaessa. Esimerkiksi Guidelines-julkaisussa esitettyllä alkalivapaiden kiihdyttimien annostuksen vaihteluvälin (4–10 paino-%) alarajalla kutistuma ja siten halkeiluriski ovat merkittävästi pienempiä kuin ylärajalla. Lisäksi riski kasvaa sementtimäärää lisättäessä, erityisesti jos samalla pienennetään vesi-sementtisuhdetta, kuten tapana on (kuva 3).

Alhaisen vesi-sementtisuhteen omaavilla betoneilla esiintyy ns. autogeenista kutistumaa. Autogeenisen kutistuman muodostuminen edellyttää yleensä alle 0,40 vesi-sideainesuhdetta (kokonaisvesi-sementtisuhte). Kun kiihdyttimen aiheuttama ettringiitti-reaktio alentaa vesi-sideainesuhdetta edellä olevan laskelman mukaisesti normaalisti enimmillään noin 0,05, on autogeenisen kutistuman kannalta turvallinen kokonaisvesi-sementtisuhte 0,45 tai suurempi.

5.2 Alkalipohjaiset kiihdyttimet

Alkalipohjaiset kiihdyttimet (vesilasi) kiihdyttävät sementin C_3S -reaktiota. Lisäksi sen komponentit natrium- ja silikaatti-ionit osallistuvat CSH-reaktioon. Reaktiossa muodostuu geelimäisiä tuotteita, jotka hidastavat reaktiota nopean alun jälkeen. Näin ollen kutistumavaikutuksen laskeminen ei ole yhtä suoraviivaista kuin alkalivapaiden lisäaineiden tapauksessa.

Tuotteiden morfologiassa on myös huomattava ero: Alkalipohjainen muodostaa geelimäisiä tuotteita ja alkalivapaa neulasmaisia. Jälkimmäisen kyky kestää kutistumasta johtuvia muodonmuutoksia on todennäköisesti parempi, joten massa kestää varhaisvaiheen kutistumaa todennäköisesti paremmin kuin alkalipohjaisella kiihdyttimellä valmistettu massa. Edellä mainittu johtopäätös on arvio. Se ei perustu muodonmuutosmittauksiin.

6. Kokonaiskutistuma

Betoni on kiihdytinlisäyksen jälkeen lyhyen ajanjakson plastisessa tilassa. Tällöin muodonmuutoskyky (murtovenymä) on muutamia promilleja (mm/m).

Ruiskubetonin muodonmuutoskyky pienenee kuitenkin nopeasti betonin edelleen jäykistyessä. Jonkin ajan kuluttua muodonmuutoskyky laskee 0,05–0,2 promillen (0,05–0,2 mm/m) tasolle.

Kovettuvalla betonilla ominainen pieni muodonmuutoskyky ei olisi haitallista, mikäli betoni ei kutistuisi tai kutistuminen tapahtuisi riittävän hitaasti. Ruiskubetoni kuitenkin kutistuu, ja kutistumasta tapahtuu merkittävä osa muutaman tunnin kuluessa kiihdytinlisäyksestä.

Tuoreen ruiskubetonin kutistuma aiheutuu kiihdyttimen kemiallisista reaktioista, betonin jäähtymisestä ympäristön lämpötilaan ja kosteuden haihtumisesta betonin pinnalta.

Alkalivapaan kiihdyttimen kemialliset reaktiot aiheuttavat lähes 0,1 mm/m kutistuman (kohta 5.1). Osa tästä kutistumasta ehtii tapahtua betonin ollessa vielä plastisessa tilassa (siis lyhyen ajan kuluessa ruiskutuksesta).

Betonin lämpötila on työmaalle toimitettaessa yleensä noin +20 °C. Kiihdytinlisäys nostaa betonin lämpötilaa heti ruiskutuksen jälkeen. Tämän seurauksena kalliopinnan ja ruiskutetun betonimassan välinen lämpötilaero saattaa olla enimmillään noin 20 °C. Tämän jälkeen ruiskubetonin lämpötila alkaa laskea lämmön johtuessa kallioon ja ympäröivään ilmatilaan.

Varhaisvaiheessa betonin pituuden lämpötilakerroin on noin $20 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ (Hedlund 1998). Ruiskubetonin jäähtyminen ympäröivän ilmatilan lämpötilaan (esim. +8 °C lämpötilaan) aiheuttaa siten lähes 0,4 mm/m kutistuman. Osa tästä kutistumasta ehtii tosin tapahtua betonin ollessa vielä plastisessa tilassa.

Pääsääntöisesti kaikki betonirakenteet (koskee myös muita kuin ruiskubetonia) tulee jälkihoitaa. Jälkihoidon keskeinen tarkoitus on estää kosteuden poistuminen betonista. Eri-tyisesti kiinnitetään huomiota siihen, että jälkihoito aloitetaan viimeistään silloin, kun betonin pinnalle ei enää erotu vettä. Vaalentunut betonipinta on yleensä merkki myöhästyneestä jälkihoidosta.

Veden haihtumisnopeus betonipinnalta riippuu betonin lämpötilasta sekä betonin ja ympäröivän ilman välisestä lämpötilaerosta. Myös voimakas ilmavirtaus ja alhainen ilman suhteellinen kosteus nopeuttavat haihtumista. Ruiskubetonin erityispiirteinä on ruiskubetonipinnan suuri ominaispinta-ala, joka nopeuttaa haihtumista. Veden haihtu-

misesta aiheutuva kutistuma kovettumisen alkuvaiheessa saattaa olla huomattavasti suurempi kuin muut tekijät yhteensä.

Ruiskubetonin pinnalle ei muodostu erottuneen veden kerrosta tavallisen valubetonin tavoin. Tämän vuoksi ruiskubetonin jälkihoito tulee voida aloittaa sitä mukaa kuin kerrosta ruiskutetaan. Ruiskubetonin lämpötilan tasaannuttua ympäristön lämpötilan kanssa jälkihoito saattaa olla jo myöhäistä.

Kovettuneen betonin kuivumiskutistuma riippuu ympäröivän ilman suhteellisesta kosteudesta. Kuivissa sisätiloissa kuivumiskutistuman suuruus on noin 8 mm suurimman raekoon betoneilla yleensä suurempi kuin 0,5 promillea (0,5 mm/m).

Kuivumiskutistuma tapahtuu yleensä hitaasti, jolloin betonin hiipuma vähentää halkeamien muodostusta. Toisaalta kuivumiskutistuma lisää betoniin varhaisvaiheessa syntyneiden halkeamien leveyttä ja pituutta (varsinkin kuiduttamattomassa ruiskubetonissa).

7. Kokemuksia Norjassa tehdyistä vesieristyskokeista

7.1 Koekohteet

Norjan rautatielaitoksen teettämässä tutkimuksessa testattiin ruiskubetoniin sekoitettavia tiivistysaineita ja ruiskutettavia vesieristemembraaneja. Edelleen tutkimuksessa kehitettiin ja testattiin menetelmiä, joilla olisi mahdollista toteuttaa vesitiiviin ruiskubetonin alle jäävä salaojitus- tai kuivatusrakenne. Tutkimuksen tulokset on julkaistu loppuraportissa (Jernbaneverket 2005).

Seuraavassa yhteenvedossa referoidaan kyseisessä tutkimuksessa esitettyjä ja eri tiivistysmenetelmillä käytännön kokeissa saatuja tuloksia. Tutkimusprojekti toteutettiin lähinnä kahdessa rautatietunnelissa vuosina 2002–2004.

7.2 Kokeet sementtipohjaisilla ruiskutettavilla vedeneristeillä

Tutkimuksessa tuotteet ruiskutettiin suoraan kallioon tai olemassa olevalle ruiskubetonipinnalle tunneleissa, joissa oli kosteutta tai tippavuotoja. Tyypillistä tuotteille oli, että ne tuote-esitteiden mukaan muodostavat kiderakennetta reagoidessaan veden kanssa, tunkeutuvat osittain betonin sisään ja niillä on kyky tiivistää pieniä (< 0,4 mm) rakoja betonissa.

Taulukossa 2 esitetään sementtipohjaiset ruiskutettavat vedeneristeet, jotka arvioitiin ja testattiin norjalaisessa tutkimuksessa (Jernbaneverket 2005).

Taulukko 2. Sementtipohjaiset pintaan ruiskutettavat vedeneristeet.

Toimittaja	Tuotenimi	Tuotetyyppi	Vaikutustapa/kommentit
Penetron	Penetron	Sementtipohjainen suspensio	Aktiivikemikaalit muodostavat kiteitä vettä lisättäessä. Kemikaalit sekoittuvat veteen ja kulkeutuvat kapillaarisesti betonissa.
Xypex	Xypex konsentraatti	Sementtipohjainen, konsentraatti, jossa aktiivikemikaaleja	Samanlainen vaikutustapa kuin Penetronilla
Vandex	Vandex super mm.	Sementtipohjainen, suspensio, jossa aktiivikemikaaleja	Samanlainen vaikutustapa kuin Penetronilla ja Xypex-konsentraatilla

Seuraavassa esitetään tutkimusraportin (Jernbeneverket 2005) mukainen lyhyt kuvaus tuotteista. Kuvaus perustuu valmistajilta ja edustajilta saatuihin tietoihin. Huomattakoon, että ilmoitetut ominaisuudet eivät välttämättä ole samat kuin kokeissa saadut.

Penetron

Penetron on kehitetty USA:ssa 1970-luvun lopussa. Tuote muodostuu standardi Portland-sementistä, kvartsihiekestä ja kemikaaleista. Penetron muodostaa kiderakennetta betonin huokosiin niin kauan kuin se saa vettä. Kuivina aikoina vaikutus voi lakata, mutta alkaa uudelleen, kun rakenteeseen tulee taas vettä. Penetron vaikuttaa tiivistävästi aina 0,4 mm:n suuruisiin rakoihin.

Penetron tulee ruiskuttaa uudelle ruiskubetonipinnalle. Jos ruiskubetonialusta on yli vuorokauden vanha, tulee se puhdistaa joko painevedellä tai hiekkapuhalluksella. Aineen ruiskutuksen jälkeen vuotokohdat tiivistyvät vähitellen, koska kiteen muodostuminen ja kasvaminen raoissa vaatii aikaa.

Norjalaisten kokeiden mukaan vuotojen korjaus Penetron-pintaruiskutusmembraanilla oli hidasta erityisesti, kun pistevuotoja tiivistettiin käsin. Osa vesivuodoista pienentyi, mutta koalueelle jäi edelleen vuotoja. Materiaalitoimittajan mukaan ruiskubetonialusta oli liian karkea täydellisen vedenpitävyyden saamiseksi.

Karkea pinta myös kasvattaa materiaalimenekin suhteellisen suureksi. Penetronia käytettiin 1,5 kg/m², joka vastaa 1–2 mm:n kerrospaksuutta. Ruiskubetonin maksimi-

raekoko oli 8 mm. Kokeiden tuloksena todettiin, ettei vesieristysmenetelmä vastannut ruiskubetonoiduille rautatietunneille asetettuja vaatimuksia (Jernbaneverket 2005).

Xypex

Xypex-konsentraatio on jauhe, joka sekoitetaan veteen ja slammataan tai ruiskutetaan betonin pinnalle. Kerroksen paksuus on tavallisesti 1–2 mm, normaali käyttömäärä on 1 kg/m².

Xypex-konsentraatilla tehdyt kokeet osoittivat, että pintamembraanilla on tiivistävä vaikutus käytettäessä sitä ruiskubetonin kanssa. Kokeissa havaittiin vähitellen vuoto pisteiden kuivumista, kun aineen vaikutus lisääntyi. Yksittäisvuodot eivät hävinneet kokonaan.

Xypex-konsentraatilla todettiin olevan osittainen vaikutus tällaisiin vuotoihin, mutta tuotteella on kuitenkin selviä rajoituksia suhteessa vuodon tai raon suuruuteen. Tulokset eivät vastanneet niitä vaatimuksia, joita on asetettu vaihtoehtoisille vesieristysratkaisuille rautatietunneleihin ottaen huomioon suuremmat vesivuodot (Jernbaneverket 2005).

Vandex

Vandex Super sisältää Portland-sementtiä, kvartsihiekkää ja erilaisia lisäaineita. Vandex Super tunkeutuu kapillaarisesti betonin tai ruiskubetonin hienoihin rakoihin. Tunkeutumissyvyys on noin 2–4 mm riippuen veden saannista. Vandex Super muodostaa lujia kiteitä reagoidessaan veden kanssa. Vandex voidaan joko slammata tai ruiskuttaa. Noin 1 mm:n kerrospaksuus on tavallisesti riittävä.

7.3 Ei-sementtipohjaiset pintaruiskutusmembraanit

Taulukossa 3 esitetään ei-sementtipohjaiset pintaruiskutusmembraanit, joita testattiin norjalaisessa tutkimuksessa (Jernbaneverket 2005).

Taulukko 3. Ei-sementtipohjaiset pintaruiskutusmembraanit.

Toimittaja	Tuotteen nimi	Tuotetyyppi
Tarco	Tapecrete	Pohjautuu akryylipolymeereihin
Degussa	Masterseal	Polyuretaanipohjainen
Rescon Mapei	Rescon	Kemikaalipohjainen
Sika	Sika	Kemikaalipohjainen

Tapecrete

Tapecrete on kehitetty Kanadassa 1970-luvulla, ja se pohjautuu akryylipolymeereihin perusmateriaalina yhdessä tavallisen Portland-sementin kanssa.

Valmistajan mukaan alusta tulee puhdistaa korkeapainepuhalluksella noin 10–12 baarin paineella. Tapecrete ruiskutetaan yhtenä kerroksena 6–7 mm:n vahvuiseksi vedeneristeeksi. Laasti kovettuu 1–2 minuutissa, jos lämpötila on yli +6 °C. Tällä tuotteella ei ole kapillaarivaikutusta. Vedeneristeellä on hyvä, noin 3 MPa:n tartunta alustaan. Tartunta on hyvä myös teräkseen, esimerkiksi tiivistettäessä pulttien ympärystöjä. Tapecretea voidaan sekoittaa myös veteen ja lisätä ruiskubetoniin, jolloin saadaan ruiskubetonia, jolla on parantunut vesitiiveys, tartunta ja sitkeys.

Master Seal

Master Seal -vedeneristeellä tehdyistä kokeista on todettu yhteenvetona tutkimuksessa (Jernbaneverket 2005), että vettä tiikuville tai vuotaville pinnoille tuotetta ei voi ruiskuttaa. Tämä on todettu myös tuoteselosteessa. Kostealle pinnalle asennettu vedeneriste voitiin irrottaa käsin vielä useiden päivien jälkeen. Kosteille alueille on asennettava salaojitusero, mikä estää taas ruiskubetonin tartunnan alustaan. Tästä syystä Master Seal -vedeneristeen käytöllä on katsottu olevan huomattavia rajoituksia.

7.4 Ruiskubetonin tiivistävät lisäaineet

Taulukossa 4 esitetään norjalaisessa tutkimuksessa käytetyt tiivistysaineet.

Taulukko 4. Norjalaisessa tutkimuksessa käytetyt tiivistysaineet.

Toimittaja	Tuotenimi	Tuotetyyppi
Xypex	Xypex Admix	Sementtipohjainen lisäaine
Penetron	Admix	Sementtipohjainen lisäaine

Xypex Admix

Laboratoriokokeiden mukaan aineen tiiviysvaikutus syntyy vähitellen ja saavuttaa täyden tiiviysvaikutuksen noin 2–3 viikon kuluessa riippuen ilman kosteudesta ja lämpötilasta.

Norjan rautatietunneleissa Xypex Admix -tiivistysaineella tehdyissä kokeissa todettiin tiivistävä vaikutus ruiskubetonin yhteydessä. Vuotopisteiden ympärillä havaittiin kuivumista sitä mukaa kuin aineen vaikutus lisääntyi. Lämpötila koetunnelissa oli suhteellisen alhainen (5–6 °C).

Yhteenvetona norjalaisista kokeista Xypex Admix -tiivistysaineen todettiin toimivan testin ajatellussa tarkoituksessa. Kokeen perusteella on kuitenkin haluttu kokeilla tuotetta isommassa mittakaavassa mahdollisuuksien ja rajoitusten selvittämiseksi (Jernbaneverket 2005).

Penetron

Penetronin on todettu olevan samanlainen tuote kuin Xypex, mutta Norjassa toteutetun projektin aikana siitä ei ole ollut saatavilla tarkempia tietoja.

8. Ruiskutettavat kuivatus- ja routaeristeet

8.1 Norjassa kevytsoralla tehtyjä ruiskutuskokeita

Kokeissa on ollut tarkoituksena kehittää ja kokeilla rakennetta, jossa ensin ruiskutetaan salaojittava ja routaeristävä läpäisevä ruiskubetonikerros ja sen päälle tiivis ruiskubetoni. Alustavasti oli arvioitu, että kuivaruiskutus kevytsoran kanssa olisi paras yhdistelmä. Alustavissa kokeissa on kuitenkin todettu, että menetelmällä saadaan liian pieni kapasiteetti, jotta siitä voisi tulla menestys. Samanaikaisesti koe oli osoittanut, että kevytsoran massavirtausta ruiskubetoniin oli vaikea kontrolloida.

Tästä syystä tavalliseen märkäruiskutusrobottiin on kehitetty erikoissuokappale, jonka kautta kevytsoravirtaus ajetaan omalla pumppauslinjalla ruiskubetonin massavirtaan samalla tavoin kuin ruiskubetoniin lisätään lisäaineet, ilma ja vesi. Koevarustuksella on onnistuttu ruiskuttamaan betonia, jossa on 30–40 % tilavuuspainosta kevytsoraa. Suurempikin kevytsoramäärä on mahdollinen, jos käytetään isompaa putkitusta ja tehokkaampaa pumppua.

Tutkimuksen (Jernbaneverket 2005) mukaan ruiskubetonissa kevytsoramäärän tulisi olla 60–80 tilavuusprosenttia, jotta läpäisevyys salaojituserroksiksi olisi riittävä. Tällaisen betonin ruiskuttamista ja alustaan lujittumista pidetään mahdollisena pienellä tuotekehityksellä. Kokeet ovat olleet niin lupaavia, että kehitystyötä on tavoitteena jatkaa.

8.2 Muita potentiaalisia ruiskutettavia eristemateriaaleja

Suomessa on kokeiltu polystyreenibetonin ruiskuttamista routaeristerakenteeksi ja mahdollisesti myös salaojituserroksiksi. Ruiskutuskokeissa polystyreeni kevyenä materiaalina pyrkii erottumaan ruiskubetonimassasta, ja kokeiden perusteella ruiskutustekniikka vaatisi tältä osin kehitystyötä. Mäntäpumppujen asemesta ruuvipumpuilla oletetaan saavan parempia ruiskutustuloksia.

Norjassa on tutkittu sekä laboratoriokokeilla että vuodesta 2001 alkaen käytännön pilottikohteissa granuloidun vaahdotetun lasin käyttöä tierakenteissa keventeenä ja routaeristemateriaalina. Granuloitu vaahtolasi valmistetaan jätelasista. Käytetyssä valmistusprosessissa vaahtolasin tiheydeksi tulee 350–400 kg/m³ ja raekooksi 10–60 mm. Kuivan, tiiviin materiaalin lämmönjohtavuudeksi on mitattu 0,10 W/mK +10 °C:n lämpötilassa (Aabøe 2005). Vaahdotettu lasi toimii tierakenteessa myös kuivatusrakenteena.

Jos granuloidusta vaahtolasista voidaan valmistaa ruiskutettavaa kevytbetonia, se voisi olla potentiaalinen routaeriste ja mahdollisesti myös kuivatusrakenne tunneliverhouksissa. Materiaalin saatavuus ja hintakilpailukyky ratkaisevat tietysti tuotteen käyttökelpoisuuden. Tunnelin sisäpinnassa rakenne todennäköisesti täyttää palovaatimukset sellaisenaan. Jos materiaalista ruiskutetaan kallion pintaan salaojituskerros, lujitusruiskubetonikerroksen tulisi kauttaaltaan toimia vesieritysrakenteena, koska sen alle jäisi vettä johtava kuivatuskerros.

9. Laboratoriokokeet

9.1 Kokeissa käytetyt tuotteet

Laboratoriokokeiden tarkoituksena oli määrittää ruiskubetonin vesitiiveyteen vaikuttavat tekijät. Kokeet tehtiin Lohja Rudus Oy:n tutkimusta varten toimittamalla murskattua kiviaineksella ja luonnonkiviaineksella.

Sementti oli lähinnä Paraisten Rapid-sementtiä. Muut sementit olivat Paraisten Yleis-sementti, Embran Rapid-sementti, Lappeenrannan SR-sementti ja Kundan MECA-sementti.

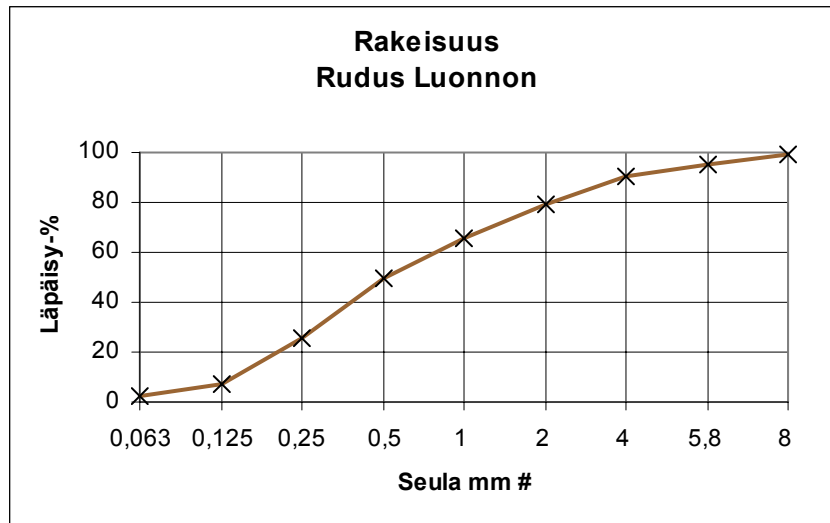
Kiihdyttiminä käytettiin alkalivapaita kiihdyttimiä Meyco 9A 170 ja Fast Set ja vesilasipohjaista kiihdytintä Pika Parmix.

Notkistimina käytettiin Glenium 51:tä ja Notkistin Structuro111 X raakaa (Reci Tard -hidastimen kanssa).

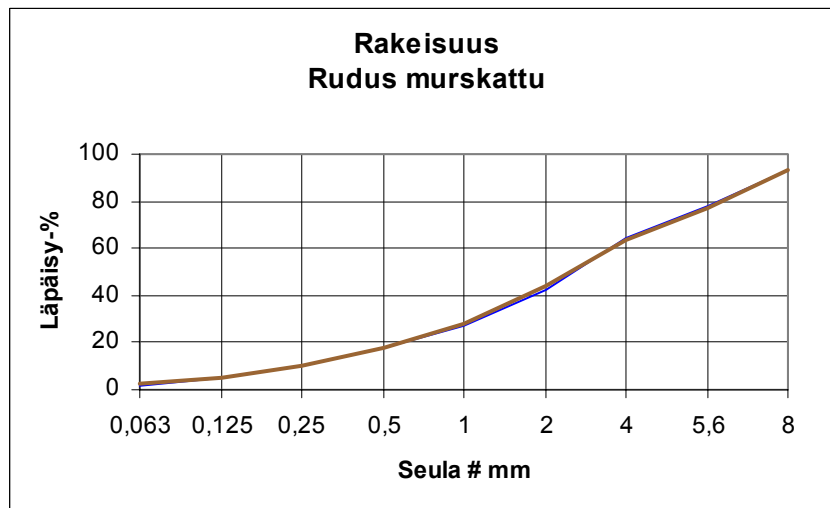
Sisäisenä jälkihoitoaineena käytettiin TCC 735:tä. Lisäksi käytettiin yksittäisessä valussa hydrataation hallintaan tarkoitettua Delvo Stabilizer 10 -lisäainetta.

Tiivistysaineena käytettiin betonimassaan sekoitettavaa Penetron Admix -tiivistysainetta.

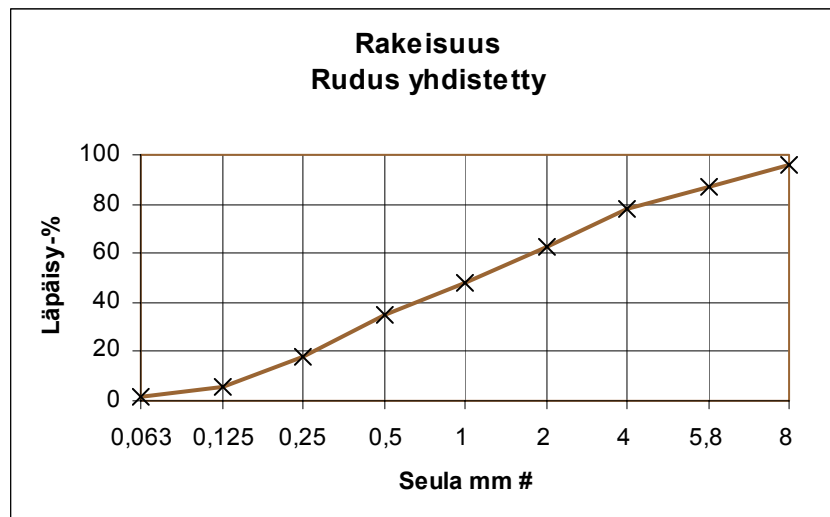
Kiviainekset kuivattiin laboratoriossa ennen käyttöä. Murskatun kiviaineksen osuus koko kiviaineksesta oli 46 % luonnonkiviaineksen osuuden ollessa 54 %. Kiviainesten raekoko oli 8 mm. Kiviainesten rakeisuuskäyrät esitetään kuvissa 4–6.



Kuva 4. Luonnonkiviaineksen rakeisuus.



Kuva 5. Murskatun kiviaineksen rakeisuus.



Kuva 6. Yhdistetyn kiviaineksen rakeisuus.

Kiviaineksista määritettiin myös tiheys, vedenimu, litteysluku ja ominaispinta-ala. Arvot esitetään taulukoissa 5–8.

Taulukko 5. Kiviaineksen tiheys. Määrittäminen standardin SFS-EN 109-6 ”Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 6: Kiintotiheyden ja vedenimeytymisen määrittäminen” kohtien 8 ja 9 mukaisesti.

Näyte	Kiintotiheys näennäinen P_a	Kiintotiheys uunikuivattu P_{rd}	Kiintotiheys kyll. ja pintak. P_{ssd}
Luonnon < 4 mm	2,71	2,68	2,69
Murske > 4 mm	2,69	2,64	2,66
Murske < 4 mm	2,72	2,68	2,69

Taulukko 6. Kiviaineksen raemuoto. Määrittäminen standardin SFS-EN 933-3 ”Kiviainesten geometrinen ominaisuuksien testaus. Osa 3: Raemuodon määrittäminen. Litteysluku” mukaisesti.

Näyte	Litteysluku Fl
Murkattu 8/10	10,2
Murskattu 6,3/8	17,5
Murskattu 5/6,3	17,3
Murskattu 4/5	18,0
Yhdistetty 4/8	16,5

Taulukko 7. Kiviaineksen vedenimu. Määrittäminen standardin SFS-EN 1097-6 mukaisesti.

Näyte	Absorptio p-%
Luonnon < 4 mm	0,4
Murske > 4 mm	0,8
Murske < 4 mm	0,5

Taulukko 8. Kiviaineksen ominaispinta-ala. Määrittäminen alle 0,063 mm:n hienoainekselle menetelmäkuvauksen PANK 2401 mukaisesti.

Näyte	Ominaispinta-ala m²/kg
Murske	2 700
Luonnon kiviaines	4 500

Betonin valmistuksessa käytettävän karkean kiviaineksen litteysluvulle asetetaan usein enimmäisarvo 15 (litteyslukuluokka Fl₁₅). Nyt kiviainekselle määritettiin litteyslukuluokka Fl₂₀. Litteysluvun suureneminen merkitsee yleensä betonimassan vedentarpeen lisääntymistä. Toisaalta betonimassoissa, joissa sideaineen määrä on suuri, kuten ruisku-betonissa, litteysluvun merkitys ei ole kovin suuri. Lisäksi litteysluvun merkitystä vähentää nyt tehdyissä betonimassoissa luonnon kiviaineksen osuus (yli 50 % kiviaineksestä).

Hienoaineksen (alle 0,063 mm) ominaispinta-alan kasvu suurentaa vedentarvetta. Keskimäärin hienoaineksen ominaispinta-ala on 4 000–7 000 m²/kg. Tämän mukaisesti käytetyt kiviainekset edustavat ominaispinta-alan osalta keskimääräistä suolaista kiviainesta.

9.2 Betonikokeet

Betonimassojen painuman haluttiin olevan 2 tunnin kohdalla suuruusluokaltaan 150 mm. Kiviaineksia käytettiin sellaisenaan, eli niitä ei seulottu eri lajitteisiin. Tämän seurauksena betonimassojen painumissa oli koko työn ajan jonkin verran vaihtelua. Näin ollen betonimassojen notkeudesta tai notkistimen annostuksesta ei voida luotettavasti päätellä betonimassojen vedentarvetta.

Glenium 51 -notkistimella haluttu kahden tunnin painuma-arvo saavutettiin pelkästään notkistimella.

Structurite 111X raaka -notkistimen vaikutusaika oli sen verran lyhyt, että sen kanssa käytettiin Reci Tard -hidastinta 0,5 % sideaineen painosta. SR-sementin kanssa hidastinta ei juuri käytetty, koska se aiheutti jostain syystä valesitoutumisen.

Penetron Admix -tiivistysaineen yhteydessä käytettiin Glenium 51 -notkistinta. Tiivistysaineen annostus oli 1 % sideaineen painosta. Tiivistysaine lisäsi notkistimen annostusta noin 0,2 % sideaineen painosta. Koska kiviaineksen vedentarpeessa oli betoniannoskohtaista vaihtelua, tiivistysaineen todettu vaikutus notkistinannostukseen on ainoastaan suuntaa antava.

Ruiskubetonin kiihdyttiminä käytettiin nestemäisiä alkalivapaita ruiskubetonin kiihdyttimiä Meyco SA 170 ja Fast Set ja natriumsilikaattipohjaista (vesilasi) kiihdytintä Pika Parmix.

Kokeissa käytettiin hieman vaihtelevia kiihdytinannostuksia. Alkalivapaiden kiihdyttimien annostus oli 5 ja 7 paino-% (annosteluohjeen yläraja 7 %). Vesilasikiihdyttimen annostus oli 5 ja 10 paino-% (annosteluohjeen yläraja 5 %). Annosteluohjeen yläraja ylitettiin tarkoituksellisesti, koska myös työmailla annosteluohje yleisesti ylitetään.

Kiihdytinlisäyksen jälkeen betoneille tehtiin valikoidusti seuraavat määritykset:

- tunkeutumisvastus ja tärytysraja
- tarttuvuus luonnonkivilaattaan
- lämpötila semiadiabaattisissa olosuhteissa
- lämpötila tiivistettäessä kylmää pintaa vasten

- lujuus
- kuivumiskutistuma
- vedenpitävyys
- säröilyindeksi.

9.3 Tulokset

Betonin tunkeutumisvastuksen kasvaminen

Betonin tunkeutumisvastuksen kasvaminen määritettiin betoneilla, joiden sideaineena oli Rapid- ja SR-sementti.

Alkalivapailla kiihdyttimillä tunkeutumisvastus kasvoi hyvin nopeasti. Tärytysraja saavutettiin 5 %:n kiihdytinannostuksella alle 10 minuutissa.

Vesilasipohjaisilla kiihdyttimillä tärytysraja ylittyi 5 %:n kiihdytinannostuksella yleensä 20–25 minuutin kuluttua. Muutamassa kokeessa tunkeutumisvastus kasvoi 3 minuuttiin asti nopeasti, mutta kasvaminen hidastui sen jälkeen.

Penetron Admix -tiivistysaineen ei havaittu vaikuttavan merkittävästi tunkeutumisvastuksen kasvamiseen.

Varhaisvaiheen tarttuvuus

Varhaisvaiheen tarttuvuus määritettiin betoneilla, joiden sideaineena oli Rapid- ja SR-sementti.

Kokeessa betoni tiivistettiin kiihdytinlisäyksen jälkeen muottiin, jonka pohjalla oli luonnonkivilaatta. Betonikerroksen paksuus oli 90 mm. Tiivistämisen jälkeen kappale (luonnonkivilaatta & betoni) poistettiin muotista, käännettiin ylösalaisin ja ripustettiin luonnonkivilaatan varaan 3 minuutin kuluttua kiihdytinlisäyksestä.

Alkalivapailla kiihdyttimillä betoni pysyi kiinni luonnonkivilaatasta.

Alkalikiihdyttimellä betoni irtosi 60–120 sekunnin kuluttua ripustamisesta käytettäessä Paraisten Rapid-sementtiä ja 0–30 sekunnin kuluttua käytettäessä SR-sementtiä.

Alkalivapailla kiihdyttimillä betonin tarttuvuus luonnonkivilaataan oli merkittävästi parempi kuin vesilasipohjaisilla kiihdyttimillä. Heikoin tarttuvuus oli yhdistelmällä SR-sementti & vesilasipohjainen kiihdytin.

Penetron Admix -tiivistysaineella ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta kiihdytetyn betonin tarttuvuuteen luonnonkivialustaan.

Tarttuvuuden havaittiin olevan jossain määrin samansuuntainen tunkeutumisvastuksen kasvamisen kanssa.

Tosin vesilasipohjaisella kiihdyttimellä betonit putosivat tarttuvuuskokeessa nopeasti huolimatta tunkeutumisvastuksen nopeasta kasvamisesta 3 ensimmäisen minuutin kuluessa.

Ilmeisesti alkalivapailla kiihdyttimillä betonin hyvä tarttuvuus perustui tunkeutumisvastuksen nopean kasvamisen ohella kemiallisten sidosten (mm. ettringiitti) muodostumiseen, jolloin betonimassasta tulee hieman kittimäistä.

Lämpötila semiadiabaattisissa olosuhteissa

Lämpötila semiadiabaattisissa olosuhteissa määritettiin Paraisten Rapid-sementillä.

Betonit tiivistettiin lämpöeristettyyn muottiin. Alkalivapailla kiihdyttimillä betonin lämpötila nousi 20 minuutin kuluessa noin +5 °C. Lämpötila pysyi likimain tällä tasolla noin 3 tuntia ja nousi sen jälkeen vain vähän.

Vesilasipohjaisella kiihdyttimellä lämpötila nousi +5 °C noin 3,5 tunnin kuluessa. Tämän jälkeen betonin lämpötila nousi edelleen selvästi. Maksimilämpötilat olivat selvästi korkeammat kuin alkalivapailla kiihdyttimillä.

Penetron Admix -tiivistysaineen yhteydessä (alkalivapaa kiihdytin) lämpötila nousi 3–12 tuntia kiihdytinlisäyksestä vielä lähes +10 °C.

Alkalivapailla kiihdyttimillä lämpötilan nousu heti kiihdytinlisäyksen jälkeen kuvaa hyvin kyseisten kiihdyttimien aikaansaamaa sementin varhaisvaiheen reaktionopeutta.

Vesilasipohjaisella kiihdyttimellä lämpötilan selvä nousu 3,5–10 tuntia kiihdytinlisäyksen jälkeen kuvaa hyvin kiihdyttimen aikaansaamaa sementin reaktionopeutta tällä hieman myöhemmällä iällä.

Penetron Admix -tiivistysaineen yhteydessä lämpötilan selvä nousu 3–12 tuntia alkali-vapaan kiihdyttimen lisäyksen jälkeen kuvaa hyvin tiivistysaineen aikaansaamaa sementin reaktionopeutta tällä hieman myöhemmällä iällä.

Lämpötila viileissä olosuhteissa

Lämpötila viileissä olosuhteissa määritettiin Rapid-sementillä.

Noin 90 mm paksu betonikerros tiivistettiin heti kiihdytinlisäyksen jälkeen noin +10 °C lämpöistä massiivista betonilaattaa vasten. Betonien lämpötilat olivat heti tiivistämisen jälkeen noin +25 °C (alkalivapaat kiihdyttimet) ja noin +20 °C (vesilasipohjainen kiihdytin).

Betonien lämpötilat laskivat kiihdytintyyppistä riippumatta samansuuntaisesti noin +10 °C tasolle hieman yli 2 tunnin kuluessa. Lämpötilan nousua ei tämän jälkeen juurikaan havaittu.

Puristuslujuuden kehittyminen

Puristuslujuuden kehittyminen +20 °C lämpötilassa määritettiin Paraisten Rapid-sementillä. Puristuslujuus määritettiin 1, 2, 7 ja 28 vrk:n iässä.

Alkalivapailla kiihdyttimillä (annostus 7 %) puristuslujuus oli 1 ja 2 vrk:n iässä keskimäärin noin 9 ja 24 MPa. Pienin lujuus oli betonilla, jossa käytettiin hidastinta (2 tunnin painuma-arvon saavuttamiseksi). Suurin lujuus oli betonilla, johon oli lisätty Penetron Admix -tiivistysaine.

Alkalivapailla kiihdyttimillä (annostus 7 %) puristuslujuus oli 7 ja 28 vrk:n iässä keskimäärin noin 45 ja 52 MPa. Suurin lujuus oli betonilla, johon oli lisätty Penetron Admix -tiivistysaine.

Vesilasipohjaisella kiihdyttimellä (annostus 5 %) puristuslujuus oli 1 ja 2 vrk:n iässä keskimäärin noin 16 ja 31 MPa. 7 ja 28 vrk:n iässä puristuslujuus oli keskimäärin noin 41 ja 48 MPa.

Puristuslujuuden kasvaminen ensimmäisen vuorokauden aikana oli samansuuntainen betonin lämpötilan kanssa (semiadiabaattisissa olosuhteissa).

Varhaisvaiheen puristuslujuus

Varhaisvaiheen puristuslujuus määritettiin +10 °C lämpötilassa Paraisen Rapid- ja SR-sementillä. Betoni tiivistettiin heti kiihdytinlisäyksen jälkeen 100 mm:n särmäisiin muotteihin. Puristuslujuus määritettiin 2, 6 ja 24 tunnin iässä. Kappaleiden yläpinta peitettiin haihtumisen estämiseksi muovilla.

Alkalivapailla kiihdyttimillä (annostus 5 %) puristuslujuudet olivat keskimäärin noin 0,3, 0,6 ja 10 MPa (Paraisten Rapid). Suurin lujuus oli betonilla, johon oli lisätty Penetron Admix -tiivistysaine.

Vesilasipohjaisella kiihdyttimellä (annostus 8 %) puristuslujuudet olivat keskimäärin noin 0,5, 2,0 ja 19 MPa.

Vesilasipohjaisella kiihdyttimellä (annostus 5 %) 2 tunnin puristuslujuus oli vain noin 0,1 MPa (SR).

Tulosten mukaan alkalivapailla kiihdyttimillä ei yleensä saavuteta 20 MPa:n lujuutta +10 °C lämpötilassa yhden vuorokauden iässä.

Vesilasipohjaisella kiihdyttimellä 20 MPa:n lujuus edellyttää 5 %:n enimmäisannostuksen merkittävää ylittämistä.

Koekappaleet peitettiin heti valmistamisen jälkeen muovilla. Muovin alapintaan tiivistyi vesihöyryä silmämääräisesti tarkastellen samalla tavalla riippumatta siitä, sisälsikö massa sisäistä jälkihoitoainetta.

Kuivumiskutistuma

Kuivumiskutistuma määritettiin 40 x 40 x 160 mm³:n prismoilla 1–56 vrk:n iässä. Notkistimet eivät lisänneet kutistumaa vertailubetoniin nähden. Myös kiihdyttimien vaikutus kuivumiskutistumaan oli vähäinen.

Vesitiiviys

Vesitiiviys määritettiin 100 mm:n särmäisillä koekappaleilla. Kiihdyttimiä sisältäneiden koekappaleiden vedentunkeumaluvut olivat 5–34 mm. Tämän mukaisesti betonit voitiin katsoa vesitiiviiksi.

Sisäinen säröily

Sisäinen säröily määritettiin betoneista, joissa sideaineena oli Paraisten Rapid-sementti, Yleissementti, Embra Rapid, silika, MECA-sementti ja SR-sementti.

Muutamaan betonimassaan lisättiin ruiskubetonin sisäinen TCC 735 -jälkihoitoaine ja ruiskubetonin hydrataation hallintaan tarkoitettu Delvo Stabilizer 10 -lisäaine. Penetron Admix -tiivistysaine lisättiin seitsemään betonikoostumukseen.

Kokonaisvesi-sementtisuhte oli 0,40–0,50.

Betonit säilytettiin kiihdytinlisäyksen ja tiivistämisen jälkeen vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa. Mikrosäröily määritettiin 1–2, 7 ja noin 28 vrk:n ikäisistä koekappaleista.

Ilman kiihdytintä valmistetuissa betoneissa ei esiintynyt säröilyä.

Alkalivapailla kiihdyttimillä (annostus 7 %) säröindeksi oli enimmillään 1 (mikrosäröilyä koko näytteen alueella). Tavallisimmin säröindeksi oli 0,5 (paikoin vähän säröilyä).

Vesilasipohjaisilla kiihdyttimillä (annostus 5 %) säröindeksi oli enimmillään 1. Säröilyä oli keskimäärin selvästi enemmän kuin alkalivapailla kiihdyttimillä.

TCC 735 -jälkihoitoaineella ja ruiskubetonin hydrataation hallintaan tarkoitettulla Delvo Stabilizer 10 -lisäaineella ei havaittu olevan vaikutusta säröilyn määrään.

Penetron Admix -tiivistysaineen yhteydessä mikrosäröilyä oli keskimääräistä vähemmän.

Sideaineella ei havaittu olevan vaikutusta mikrosäröilyn määrään. Tosin Yleisementin yhteydessä mikrosäröilyä oli keskimääräistä vähemmän.

Mikrosäröilyä esiintyi jo 1–2 vrk:n iässä. Tämän jälkeen mikrosäröily ei enää merkittävästi lisääntynyt. Vesi-sementtisuhte oli 0,40–0,50. Vesi-sementtisuhteella ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta mikrosäröilyn määrään.

Alkalivapaiden kiihdyttimien annostus 7 % sideaineen määrästä oli annostuksen ylärajalla. Todellisissa ruiskutuskohteissa annostus olisi ollut kyseisillä massoilla nyt käytettyä pienempi.

Sisäinen säröily viileissä olosuhteissa

Noin 90 mm paksu, sivuilta lämpöeristetty betonikerros tiivistettiin heti kiihdytinlisäyksen jälkeen noin +10 °C lämpöistä massiivista betonilaattaa vasten. Kappaleiden yläpintaan kohdistettiin noin 1,5 m/s tuulenoisuus. Sideaineena oli Rapid-sementti.

Alkalivapailla kiihdyttimillä (annostus 5 ja 7 %) säröindeksi oli enimmillään 0,5 (paikoin vähän mikrosäröilyä).

Vesilasipohjaisella kiihdyttimellä (annostus 5 %) säröindeksi oli 0,5–1 (paikoin vähän mikrosäröilyä tai mikrosäröilyä koko näytteen alueella).

Vesilasipohjaisella kiihdyttimellä (annostus 10 %) säröindeksi oli 2 (mikrosäröilyä koko näytteen alueella ja paikoin erityisen tiheästi). Penetron Admix -tiivistysaineen yhteydessä säröilyä oli keskimääräistä vähemmän (säröindeksi 1).

Säröilyindeksi 2 tarkoittaa säröilyn olevan sen verran runsasta, että sen voidaan katsoa heikentävän vesitiiviyttä.

TCC 735 -jälkihoitoaineella ja ruiskubetonin hydrataation hallintaan tarkoitettulla Delvo Stabilizer 10 -lisäaineella ei havaittu olevan vaikutusta säröilyn määrään.

Kaikkien kokeiden tulokset esitetään tarkemmin liitteissä 1–3.

10. Laboratoriokokeiden yhteenveto

Laboratoriokokeilla selvitettiin eri betonikoostumusten ja kiihdyttimien vaikutusta tuoreen ja kovettuneen betonin ominaisuuksiin. Tuoreesta ruiskubetonista määritettiin lähinnä sitoutumisen ja kovettumisen nopeus ja tartunnan kehittyminen. Kovettuneesta betonista määritettiin lähinnä lujuus, vedenpitävyys, kuivumiskutistuma ja sisäinen säröily.

Betonimassojen koostumukset vaihtelivat sementtiseideaineen ja vesi-sementtisuhteen osalta. Osassa betonimassoja käytettiin betonin tiivistysainetta. Muutamassa betoni-massassa käytettiin sisäistä jälkihoitoainetta tai betonin stabilaattoria.

Kokeiden mukaan alkalivapaat kiihdyttimet olivat merkittävästi nopeampia kuin vesilasipohjainen kiihdytin. Ruiskubetonin lämpötila nousi hyvin nopeasti alkalivapaan kiihdyttimen lisäyksen jälkeen. Myös betonin tunkeumavastus kasvoi nopeasti (nopea sitoutuminen). Edelleen alkalivapaata kiihdytintä sisältäneet betonimassat tarttuivat nopeasti luonnonkivialustaan.

Osa laboratoriossa valmistetuista koekappaleista peitettiin heti tiivistämisen jälkeen muovilla kuivumisen estämiseksi. Tällöin havaittiin, että muovin alapintaan tiivistyi betonista vesihöyryä silmämääräisesti tarkastellen samalla tavalla riippumatta siitä, oliko ruiskubetonissa sisäistä jälkihoitoainetta.

Alkalivapailla kiihdyttimillä betonin lujuuden kehitys oli hitaampaa kuin vesilasipohjaisilla kiihdyttimillä. Kokeissa yhden vuorokauden puristuslujuudet olivat alkalivapailla kiihdyttimillä alle 15 MPa (+10 °C kovettumislämpötila). Penetron Admix -tiivistysaine lisäsi hieman varhaisvaiheen lujuutta alkalivapaiden kiihdyttimien yhteydessä.

Suurella vesilasipohjaisen kiihdyttimen annostuksella yhden vuorokauden lujuudet olivat lähes 20 MPa (+10 °C kovettumislämpötila).

Kelpoisuuden toteutamiensä lujuudet olivat alkalivapailla kiihdyttimillä keskimäärin noin yhden lujuusluokan verran suuremmat kuin vesilasipohjaisilla kiihdyttimillä.

Vedenpitävyys määritettiin betoneilla, joiden vesi-sideainesuhde oli 0,45. Kokeessa vedentunkeuma oli keskimäärin noin 15 mm, eli betonit voitiin tämän mukaisesti katsoa vedenpitäviksi standardin mukaisessa kokeessa.

Kovettuneen betonin kuivumiskutistuma määritettiin prismoilla. Alkalivapaa kiihdytin lisäsi jonkin verran kuivumiskutistumaa. Vesilasipohjaisella kiihdyttimellä samaa ilmiötä ei havaittu.

Kovettuneista ruiskubetoneista valmistettiin ohuthieet. Ohuthieistä määritettiin sisäisen säröilyn määrä 1–2 vuorokauden ja yli 28 vuorokauden iässä ns. säröilyindeksillä.

Ohuthieiden mukaan säröily muodostui jo 1–2 vuorokauden iässä. Tämän jälkeen säröily ei juuri enää lisääntynyt.

Alkalivapailla kiihdyttimillä betonin sisäinen säröily oli melko vähäistä kohtuullisen suurellakin (5–7 % sementin painosta) kiihdytinannostuksella. Säröily oli mitä ilmeisimmin seurausta kiihdytinlisäaineen kemiallisista reaktioista sementin yhdisteiden kanssa. Säröily oli normaaleilla kiihdytinannostuksilla sen verran vähäistä, että betonit voitiin katsoa vesitiiviiksi säröilystä huolimatta.

Suurella vesilasipohjaisen kiihdyttimen annostuksella betonin sementtikiveen muodostui jatkuva vesitiiviiden vaarantava mikrosäröilyverkosto.

Alkalivapaiden kiihdyttimien todettiin sopivan hyvin myös SR-sementtiä sisältävien betonimassojen kanssa. Vesilasipohjainen kiihdytin soveltui huonosti SR-sementin kanssa käytettäväksi. Ero näkyi erityisen selvästi tunkeumavastuksen hitaana kehittymisenä ja tuoreen massan heikkona tartuntana.

Penetron Admix -tiivistysaine vähensi jonkin verran betonin mikrosäröilyä. Ero näkyi selvimmin käytettäessä vesilasipohjaista kiihdytintä suurella annostuksella.

Kovettuneelle betonille tehdyn mikrorakenneanalyysin mukaan sisäisellä jälkihoitoaineella ei havaittu olevan vaikutusta betonin mikrosäröilyn määrään.

Kokeiden mukaan ruiskubetonimassan ja kiihdyttimen yhteensopivuus voidaan tarvittaessa määrittää ennakkokokeina laboratoriossa. Kokeet käsittäisivät tällöin esimerkiksi betonin tunkeumavastuksen kehittymisen, tärytysrajan, tarttuvuuden ja puristuslujuuden kehittymisen seurannan.

11. Ruiskutukset koekohteessa

11.1 Koekohteen yleiskuvaus

Koekohde oli Korsossa Vuosaaren sataman ratatunnelityömaalla (Jokivarren ajotunnelin ja ratatunnelin liittymäkohdassa oleva ajoneuvojen kääntötunneli). Koekohteen ruiskutukset tehtiin osana kohteen tuotantoruisutuksia (koekohde ilman kuituja).

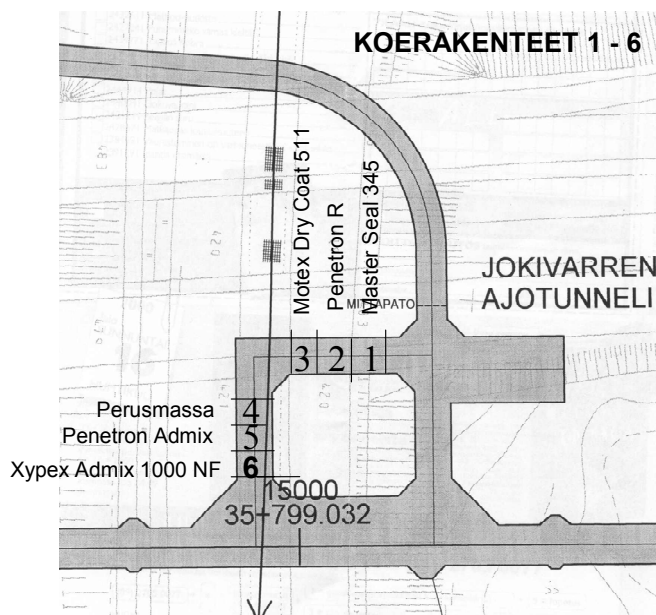
Koekohde voitiin rauhoittaa koalueiden jälkiseurannalle noin kuukauden ajaksi ruiskutuksista. Lämpötilavaatimus koekohteessa ruiskutusaikana ja kuukausi kokeiden jälkeen oli vähintään +5 °C. Koetunnelin muoto ja koerakenteiden sijainti tunnelissa esitetään kuvassa 7.

Ennen ruiskubetonointia koalueille tehtiin rakennusgeologinen kallioperäkartoitus, joka sisälsi kivilaji- ja rakokartoituksen sekä louhintajälkikartoituksen.

Koehjelmassa toteutettiin kuusi ruiskutettavaa koaluetta. Kunkin koalueen pituudeksi tunnelissa valittiin noin 4,5 m. Ruiskubetonin nimellispaksuus oli 90 mm. Ruiskubetonin teoreettinen määrä koaluetta kohden oli

$$4,5 \text{ m} \times 15 \text{ m} \times 0,09 \text{ m} \times 1,2 = 7,3 \text{ m}^3, \quad (5)$$

jossa kerroin 1,2 kattaa hukkaroiskeen ja epätasaisesta alustasta johtuvan 20 %:n ylimääräisen massamenekin. Käytännössä kuhunkin koalueeseen käytettiin 8 m³ valmisbetonia, jolloin teoreettinen ruiskubetonin rakennepaksuus oli 95 mm.



Kuva 7. Koealueiden sijainti tunnelissa.

11.2 Koeohjelma ja koejärjestelyt

Kohteen rakentamisorganisaation ja projektiin osallistuvien materiaalitoimittajien kesken sovittiin koerakenteiden osalta seuraava työnjako:

- Koekohteen ruiskutukset tehdään osana tuotantoruiskutuksia. Siten ruiskutustyö ja -materiaalit sisältyvät pääosin kohteen tuotantoruiskutuksiin. Työmaa rakentaa koekohteen vedenpainejärjestelmän.
- Materiaalitoimittajat toimittavat ruiskubetoniin sekoitettavat tiivistysaineet suoraan valmisbetoniasemalle.
- Materiaalitoimittajat järjestävät ja valvovat tiivistemembraanien pintaruiskutukset urakoitsijan ruiskutuskalustolla.
- VTT ja urakoitsija laativat yhdessä koeruiskutusohjelman. Urakoitsija toteuttaa pääasiassa koeruiskutusten seurannan. VTT analysoi tulokset urakoitsijan kirjaamien seurantatietojen perusteella.

Koealueelle toteutettiin vedenpainejärjestelmä, jolla koerakenteiden taakse kallion rajapintaan muodostettiin hallittu vedenpaine. Vedenpaineella simuloitiin kallion ja ruiskubetonin rajapintaan mahdollisesti muodostuvaa pohjaveden hydrostaattista painetta. Paine muodostettiin vesijohtoverkon vedenpaineella.

Kuvassa 8 on vedenpaineen säätö- ja mittausjärjestelmä, jolla kullekin koealueelle erikseen voitiin säätää haluttu vedenpaine tai sulkea vedentulo.



Kuva 8. Koealueiden vedenpainejärjestelmä sisältäen sulkuventtiilin, paineen säätöventtiilin ja virtaamamittarin kytkettynä ruiskubetonin taakse kalliopintaan salaojan tavoin asennettuun injektointiputkeen.

Kullekin koealueelle erikseen säädettävä vedenpaineine toteutettiin siten, että koealueelle johdetusta vesijohdosta kytkettiin sulkuventtiilin, vesimittarin ja paineenalennusventtiilin kautta noin 10 mm:n rei'itetyt injektointiputket.

Injektointiputket asennettiin tunneliprofiiliin poikittain, kuten salaojat (kuva 9). Injektointiputket asennettiin mahdollisimman eheälle kallio-osuudelle.

Tämä järjestely mahdollisti kullekin koealueelle erillisen vedenpaineen. Jos jollakin koealueella tulisi vuoto, se ei tällöin häiritsisi muiden koealueiden testausta. Putkistolla ylläpidettiin 0,5–2,0 baarin säädettävää vedenpainetta (5–20 metrin vedenpaine).

Koealueiden ruiskubetonin (perusbetoni) koostumus oli seuraava:

- Kiihdytin alkalivapaa kiihdytin, 5 % sideaineen määrästä seinissä ja katossa.
- Notkistin Glenium 51.
- Sisäinen jälkihoitoaine Meyco TCC 735, 5 kg/betoni-m³.
- Betonimassan vesi-sementtisuhte oli koealueiden 1–3 alimmassa kerroksessa 0,45 ja muualla 0,50.
- Kiviaineksen maksimiraekoko oli 8 mm.
- Sementti Rapid -sementti 440 kg/betoni-m³.
- Teräskuituja ei käytetty (koealueilla tuotantoruisbetoniin ei vaadittu kuituja).



Kuva 9. Koealueiden kalliopintaan asennetut injektointiputket (punaiset) ennen ruiskubetonointia.

Kuhunkin koealueeseen ruiskutettiin kaksi 4 m³:n kuormaa eli 8 m³ valmisbetonia. Ruiskubetonointi tehtiin kahtena kerroksena siten, että pohjaruiskutus tapahtui ensimmäisellä kuormalla ja pintaruiskutus toisella kuormalla yleensä seuraavana päivänä.

Koealueet olivat kalliopinnasta alkaen seuraavat:

Koealue 1, Masterseal 345 F

- Noin 50 mm perusbetonia. Kerroksen päälle ruiskutettiin seuraavana päivänä kaksi kerrosta Masterseal 345 F -vesieristemembraania, yhteensä noin 10 mm. Ruiskutusten väli oli noin 4 tuntia. Membraanin päälle ruiskutettiin noin 45 mm perusbetonia seuraavana päivänä.

Koealue 2, Penetron[®]

- Noin 95 mm perusbetonia kahtena kerroksena. Pintaan ruiskutettiin Penetron[®]-vedeneristysmassa.

Koealue 3, Motex Dry Coat 511

- Noin 95 mm perusbetonia kahtena kerroksena. Pintaan ruiskutettiin Motex Dry Coat 511 -vedeneristyslaasti 7 vuorokautta kovettuneen betonin päälle.

Koealue 4, pelkkä perusbetoni

- Noin 95 mm perusbetonia kahtena kerroksena ilman pinnoitusta.

Koalue 5, Penetron Admix

- Noin 95 mm perusbetonia, johon oli betoniasemalla lisätty 1 % sementin painosta Penetron Admix -tiivistysainetta. Betonin ruiskutus kahtena kerroksena.

Koalue 6, Xypex Admix 1000 NF

- Noin 95 mm perusbetonia, johon oli betoniasemalla lisätty 1 % sementin painosta Xypex Admix 1000 NF -tiivistysainetta. Betonin ruiskutus kahtena kerroksena.

Havainnot ruiskutuksista

Osaan Penetron[®]-pinnoitetta muodostui heti ruiskutuksen jälkeen tiheä verkkohalkeilu. Pinnoite reagoi (kovettui) hyvin nopeasti astiassa, mikä vaikeutti seuraavien annosten valmistamista.

Kaikkiin alueisiin muodostui pian ruiskubetonoinnin jälkeen halkeamia.

Motex Dry Coat -pinnoitteeseen muodostui halkeamia kovettumisen jälkeen. Halkeamat tulivat mitä ilmeisimmin ruiskubetonissa olevien halkeamien kohdalle.

Hukkaroiskeen määräksi mitattiin keskimäärin hieman alle 10 %.

Kuvassa 10 on käynnissä koalueen 3 ensimmäisen kerroksen ruiskutus.



Kuva 10. Koalueen 3 pohjaruiskutus meneillään.

Koerakenteiden ruiskutus- ja paineistusaikataulu oli seuraava:

- Pe 4.11.2005 koealueiden pesu ja pultitus.
- Ma 7.11.2005 vesipaineputkitus ym. koevalmistelut.
- Ti 8.11. 2005 ruiskubetonointi alueilla 1–3, alin kerros.
- Ke 9.11.2005 ruiskubetonointi alueilla 4–6, alin kerros, Master Seal 345 kaksi ruiskutuskertaa alueella 1.
- To 10.11.2005 ruiskubetonointi alueilla 1–6, toinen kerros.
- To 10.11.2005 pintaruiskutus Penetron[®] alueella 2.
- To 17.11.2005 pintaruiskutus Motex Dry Coat alueella 3.
- Ma 21.11.2005 vesipaineistus 0,5 bar.

11.3 Koerakenteiden vedenpitävyyskokeet

Injektointiputket paineistettiin ruiskubetonin iän ollessa 7 vuorokautta. Viikonloppuisin ei pidetty vedenpainetta. Vedenpaine oli aluksi 0,5 baaria, ja se nostettiin vähitellen 2,0 baarin tasolle seuraavasti:

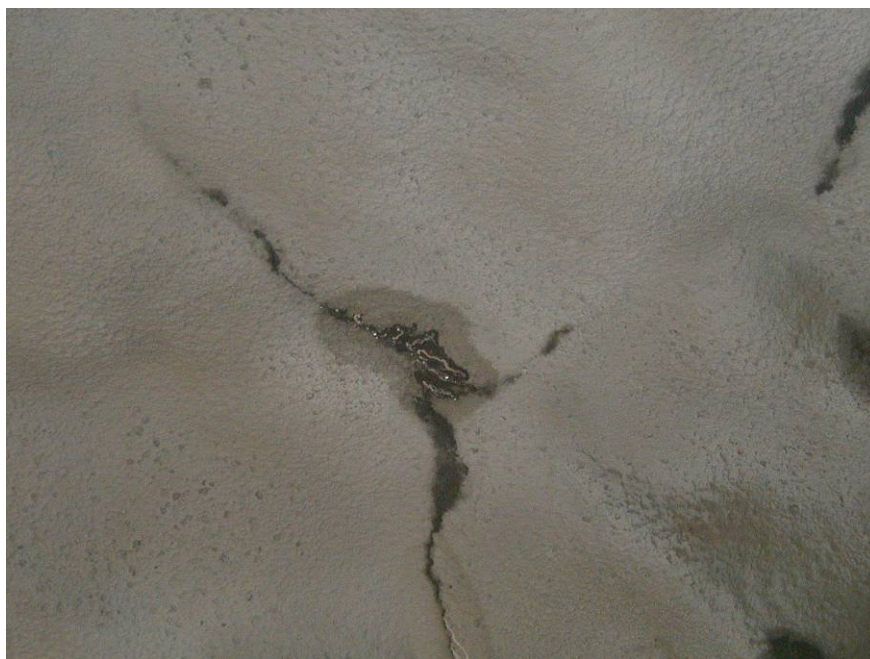
- | | |
|---------------|--|
| Ma 21.11.2005 | paine 0,5 bar, ruiskubetonissa havaittiin vuotokohtia, lähinnä pitkiä läpimeneviä halkeamia, myös huonosti tiivistyneitä kohtia. |
| Ti 22.11.2005 | vuotokohtien kartoitus ja valokuvaus. |
| Ma 28.11.2005 | paine 1,0 bar, jonkin verran uusia vuotokohtia. |
| Ke 30.11.2005 | vuotokohtien valokuvaus. |
| To 1.12.2005 | paine 1,5 bar. |
| Ma 7.12.2005 | paine 2,0 bar. |
| Pe 16.12.2006 | paine pois kuukauden ajaksi, vuotokohtien kartoitus ja valokuvaus. |
| Pe 13.1.2006 | vuotokohtien kartoitus ja valokuvaus ennen paineistusta. |
| Ma 16.1.2006 | paine 2,0 bar. |
| Pe 20.1.2006 | vuotokohtien kartoitus, valokuvaus ja kokeen lopetus. |

11.4 Vedenpainekekeen aikaiset havainnot

Vedenpaineen kytkemisen jälkeen koalueista tehtiin seuraavia yleisiä havaintoja:

- Aloituspaineella eli 0,5 baarin paineella kaikissa koerakenteissa oli useita vuotoja. Paineistuksella 1,0 ja 1,5 baaria vuotojen määrä ja laajuus hieman kasvoivat, mutta samalla myös jotkin vuotokohdat kuivuivat.
- Suurin osa vuotokohdista sijoittui ruiskubetonin halkeamiin sekä jonkin verran epätasaisesta kalliopinnasta johtuviin katvekohtiin ja katto-osalla alaspäin suuntautuviin kallioulokkeisiin.
- Paineellisten injektointiputkien kohdalle ei muodostunut missään vaiheessa vanne-
maista jatkuvaa kapillaarivuotoa, joten ruiskubetoni sinällään oli vesitiivistä.

Halkeamat olivat yleensä suuntaumattomia pitkiä halkeamia (kuva 11). Mitä ilmeisimmin halkeamat muodostuivat ruiskubetoniin jo ruiskutuspäivänä, vaikkakin ne havaittiin vasta noin viikkoa myöhemmin.



Kuva 11. Tyypillistä koalueiden halkeilua

Kun 2 baarin vedenpaine poistettiin noin kuukauden ajaksi, kaikki koalueet kuivuivat ja vuotokohdat muutamaa lukuun ottamatta hävisivät. Kun koalueet paineistettiin uudelleen kuukauden kuluttua 2 baarin vedenpaineella, samat vuotokohdat ilmestyivät uudelleen.

Kuukauden pituisen tarkastelujakson aikana ei havaittu merkittävää muutosta koalueiden vesitiivyydessä. Liitteessä 4 on yleiskuvat koalueiden vuodoista 2 baarin vesipaineella 13.12.2005 ja 20.1.2006 sekä ennen uudelleenpaineistusta 13.1.2006.

Koalueiden ruiskutus, paineistus ja vuotokartoitus esitetään tarkemmin raportissa Soininen (2005). Raportti sisältää myös vuotokohtien systemaattiset valokuvaukset eri vedenpaineilla.

Noin 3 kuukautta vedenpainekokeen jälkeen koalueet tarkastettiin uudelleen silmämääräisesti. Kosteita alueita havaittiin kaikilla koalueilla. Kullakin koalueella oli 1–2 tippavuotoa lukuun ottamatta vertailualueita (4), jossa ei havaittu tippavuotoja.

11.5 Ruiskutetuille laatoille tehdyt kokeet

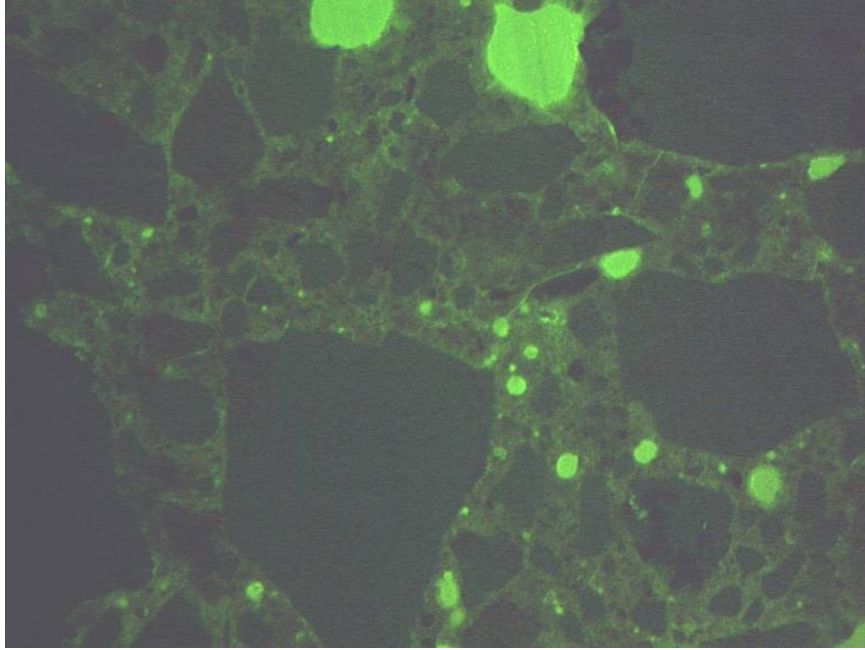
Ruiskutetuille laatoille tehtiin seuraavat kokeet:

- ruiskubetonin säröilyindeksin määrittäminen koalueen 1 kummastakin ruiskubetonista (vesi-sementtisuhteet 0,45 ja 0,50)
- ruiskubetonin pakkasenkestävyys koalueiden 1, 2 ja 3 pintakerroksesta

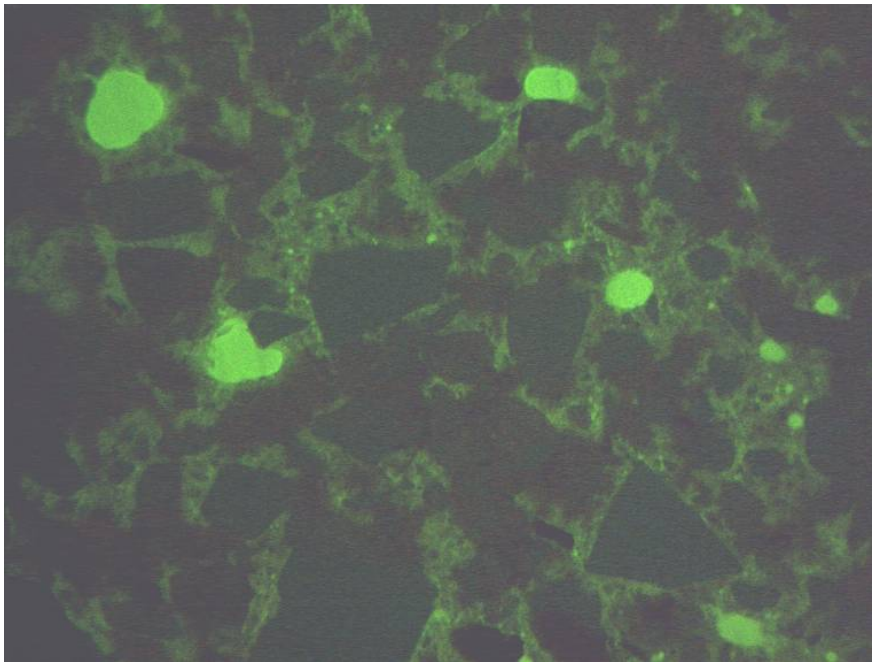
Säröilyindeksi

Koalueen 1 ruiskutetusta laatasta irrotettiin laboratoriossa poraamalla näytepalat noin 2 kuukauden iässä mikrorakennetutkimuksia varten. Näytepaloista valmistettiin mikrorakennepetrografiä varten 35 x 55 mm² x 25 µm:n kokoiset petrografiset ohuthieet betonin pintaa vasten kohtisuorassa suunnassa. Näytettä irrotettaessa havaittiin, että ruiskubetonikerrosten väliin ruiskutettu Master Seal 345 -vedeneriste ei ollut vielä kovettunut kunnolla.

Kummankin ruiskubetonikerroksen säröilyindeksiksi määritettiin 0 (mikrohalkeamia vain satunnaisesti). Kuvat betoneista esitetään kuvissa 12 ja 13.



Kuva 12. Koalueen ruiskubetoni, jonka vesi-sementtisuhte on 0,45. Mikrosäröilyä vain satunnaisesti. Säröilyindeksi 0. Betoni on tiivistynyt hyvin. Kuvan lyhyt sivu vastaa näytteessä 2,7 mm:ä.



Kuva 13. Koalueen ruiskubetoni, jonka vesi-sementtisuhte on 0,50. Mikrosäröilyä ei esiinny. Säröilyindeksi 0. Betoni on tiivistynyt hyvin. Kuvan lyhyt sivu vastaa näytteesä 2,7 mm:ä.

Pakkasenkestävyys

Koealueiden 1, 2 ja 3 ruiskutetuista laatoista irrotettiin laboratorioissa poraamalla näytepalat noin 2 kuukauden iässä pakkasenkestävyyden määrittystä varten. Tämän jälkeen näytepalat ympäröitiin tiivisteellä (kuva 14).

Pakkasenkestävyys määritettiin SS-137244:n mukaisella laattakokeella (2 näytteellä) pelkän veden läsnä ollessa ja sulatussuolan läsnä ollessa. Tulokset esitetään taulukoissa 9–14.

Testimenetelmän mukaisesti tehtynä ruiskubetonilaattojen sisältä olisi irrotettu sahaamalla sileäpintaiset näytteet. Tässä tapauksessa haluttiin kuitenkin verrata pinnoittamattoman ja pinnoitetun ruiskubetonipinnan välisiä eroja ns. laattakokeessa.

Taulukko 9. Ruiskubetonipinta. Rapauma veden/sulatussuolan läsnä ollessa g/m².

0 jaksoa	7 jaksoa	14 jaksoa	28 jaksoa	42 jaksoa	56 jaksoa
<i>Vesi</i>					
0	123	183	205	235	238
<i>Sulatussuola</i>					
0	1 185	1 578	1 931	2 175	2 387

Taulukko 10. Ruiskubetonin pinnalla Motex Dry Coat. Rapauma veden/sulatussuolan läsnä ollessa g/m².

0 jaksoa	7 jaksoa	14 jaksoa	28 jaksoa	42 jaksoa	56 jaksoa
<i>Vesi</i>					
0	4	4	4	5	7
<i>Sulatussuola</i>					
0	82	294	705	1 071	1 315

Taulukko 11. Ruiskubetonin pinnalla Penetron®. Rapauma veden/sulatussuolan läsnä ollessa g/m².

0 jaksoa	7 jaksoa	14 jaksoa	28 jaksoa	42 jaksoa	56 jaksoa
Vesi					
0	1 775	2 403	2 762	2 978	3 011
Sulatussuola					
0	2 210	2 625	2 871	3 147	3 197



Kuva 14. Ruiskutetuista laatoista irrotetut näytepalat ennen pakkasenkestävyyden määrittämistä. Lähinnä alareunaa koalueen 1 betoni (pinnoittamaton). Keskellä Motex Dry Coat ja ylinnä Penetron®.

Taulukko 12. Ruiskubetonipinta. Suhteellinen dynaaminen kimmokerroin γ (%) veden/sulatussuolan läsnä ollessa.

0 jaksoa	7 jaksoa	14 jaksoa	28 jaksoa	42 jaksoa	56 jaksoa
Vesi					
0	102	101	106	106	105
Sulatussuola					
0	104	102	104	107	107

Taulukko 13. Ruiskubetonin pinnalla Motex Dry Coat. Suhteellinen dynaaminen kimmokerroin γ (%) veden/sulatussuolan läsnä ollessa.

0 jaksoa	7 jaksoa	14 jaksoa	28 jaksoa	42 jaksoa	56 jaksoa
Vesi					
0	103	101	101	103	103
Sulatussuola					
0	98	102	104	108	104

Taulukko 14. Ruiskubetonin pinnalla Penetron[®]. Suhteellinen dynaaminen kimmokerroin γ (%) veden/sulatussuolan läsnä ollessa.

0 jaksoa	7 jaksoa	14 jaksoa	28 jaksoa	42 jaksoa	56 jaksoa
Vesi					
0	102	99	105	105	104
Sulatussuola					
0	104	102	105	104	104

Tulosten mukaan ruiskubetonipinta sellaisenaan ja Motex Dry Coat -pinnoitteella pinnoitettuna täyttää rasitusluokan XF2 vaatimuksen, rapauma $\leq 500 \text{ g/m}^2$ (suunnittelu käyttöikä 50 vuotta). Rasitusluokkaan XF2 kuuluvat sateelle ja jäätymiselle alttiit pystysuorat betonipinnat, jotka ovat alttiina jäätymiselle ja ilman kuljettamalle jäänsulatusaineelle, esimerkiksi meluseinät ja sokkelit tien vieressä (Betoninormit 2004). Suhteellisen dynaamisen kimmokertoimen mukaan näytteiden keskikorkeudella (noin 25 mm pinnasta) ei ole havaittavissa betonin pakkasrapautumista.

Penetron[®] irtosi suurelta osin jo 7 pakkasjakson jälkeen. Tämä näkyy taulukon 11 rapauma-arvoista. Irtoamisen vaikutus esimerkiksi liikennevirtaan tulee harkittavaksi erikseen.

12. Yhteenveto

Ruiskubetonin sementtikiven tulee olla niin tiivistä, ettei vesi kulkeudu sen läpi kapillaarisesti. Tämän vuoksi kokonaisvesi-sementtisuhteen tulee olla 0,45–0,50. Alle 0,45 kokonaisvesi-sementtisuhdetta ei suositella, koska betonin kutistuma saattaa lisääntyä.

Betonin suositeltava sementtimäärä on 430–450 kg/betoni-m³. Kokonaisvesi-sementtisuhteella 0,45 betonin sekoitusveden määrä on siten noin 200 vesilitraa/betoni-m³. Vesimäärä edellyttää tehokkaita notkistimia, käytännössä polymeerinotkistimia. Notkistimen vaikutusajan tulee olla kuljetusajasta riippuen yleensä 1,5–2 tuntia.

Betonin nopean lujuudenkehityksen varmistamiseksi nopeasti kovettuvat sementtilaadut ovat suositeltavia.

Betonimassaan sekoitettavat teräskuidut ovat suositeltavia, sillä ne vähentävät halkeamien muodostusta ja mahdollisesti muodostuvien halkeamien levenemistä.

Betoniin sekoitettavat tiivistysaineet soveltuvat parhaiten korkean vesi-sementtisuhteen omaaviin betonikoostumuksiin. Alhaisen vesi-sementtisuhteen omaavissa betoneissa hyödyt eivät ole yhtä ilmeisiä.

Betonimassan lämpötilan tulee olla niin alhainen, ettei sitoutumisvaiheessa olevaan ruiskubetoniin muodostu haitallisia lämpöjännityksiä. Tämän vuoksi varsinkin alkalivapailla kiihdyttimillä (jotka nostavat betonin lämpötilaa) betonimassan suositeltava lämpötila työmaalle toimitettaessa on enintään noin +15 °C.

Betonimassan alhainen lämpötila vähentää myös kosteuden haihtumista heti ruiskutuksen jälkeen ja vähentää myös siten tuoreen ruiskubetonin halkeiluerkkyyttä.

Sulfaatinkestävä sementti todettiin laboratoriokokeissa yhteensopivaksi alkalivapaiden kiihdyttimien kanssa. Vesilasipohjainen kiihdytin ja sulfaatinkestävä sementti osoittautuivat huonosti yhteensopiviksi.

Kiihdyttimien kemialliset reaktiot lisäävät ruiskubetonin kutistumaa. Tämän vuoksi kiihdyttimiä tulee käyttää vain tarpeellinen määrä. Alkalivapailla kiihdyttimillä tämä tarkoittaa seinissä noin 3 paino-% ja katossa noin 4 paino-% sementin määrästä.

Vesilasipohjaiset kiihdyttimet aiheuttavat betoniin herkästi mikrohalkeilua ja lujuuskatoa. Alkalivapailla kiihdyttimillä mikrohalkeilun määrä ja lujuuskato ovat vähäisiä. Tämän vuoksi tulisi käyttää lähinnä alkalivapaita kiihdyttimiä.

Betonin muodonmuutoskyky pienenee nopeasti kiihdytinlisäyksen jälkeen. Paksu ruiskubetonikerros lisää halkeiluriskiä jäähtyessään hitaasti. Hidas jäähtyminen lisää myös veden haihtumista ruiskubetonin pinnalta, jolloin halkeiluriski lisääntyy.

Heti ruiskutuksen jälkeen lämpöisestä betonista haihtuu nopeasti kosteutta. Tämän vuoksi ruiskubetonin jälkihoito tulee aloittaa heti ruiskubetonoinnin etenemisen myötä. Betonipinnan vaaleneminen on merkki myöhästyneestä jälkihoidosta. Betonimassaan sekoitettava jälkihoitoaine ei välttämättä muodosta riittävää jälkihoitoa. Tämän vuoksi suositeltava jälkihoito on vesisumutus. Vesisumutus olisi suositeltavaa integroida ruiskutusjärjestelmään, jolloin varmistettaisiin jälkihoidon aloittaminen riittävän ajoissa. Sumutusta runsaampaa kastelua tulee välttää betonin ollessa lämmin. Näin varmistetaan, ettei kylmä vesi aiheuta kovettuvaan betoniin ylimääräisiä lämpöjännityksiä.

Alkalivapailta kiihdyttimillä lujuudenkehitys on hieman hitaampaa kuin vesilasipohjaisilla kiihdyttimillä. Tunneliolosuhteissa 20 MPa:n lujuutta ei alkalivapailta kiihdyttimillä välttämättä saavuteta vielä yhden vuorokauden iässä.

Työmaakokeissa ruiskubetoni sinänsä oli vedenpitävää. Betonissa ei myöskään esiintynyt mikrosäröilyä. Ruiskubetoniin muodostui kuitenkin pian ruiskutuksen jälkeen läpimeneviä halkeamia. Keskeinen syy halkeamien muodostukseen oli mitä ilmeisimmin vesijälkihoidon korvaaminen betonimassaan sekoitettavalla jälkihoitoaineella. Muita ilmeisiä syitä olivat kiihdytinlisäaineen hieman suurehko annostus ja betonimassan korkeahko lämpötila verrattuna tunnelin lämpötilaan. Betonimassa ei sisältänyt kuituja.

Työmaaruiskutuksissa kokeiltiin vedenpitävyyden varmistamiseksi ruiskubetonikerrosten väliin ruiskutettavaa paksua vedeneristettä, kahta valmiin ruiskubetonin pinnalle ruiskutettavaa pinnoitetta ja kahta betonimassaan sekoitettavaa tiivistysainetta.

Työmaaruiskutuksissa kahden ruiskubetonikerroksen väliin ruiskutettu noin 10 mm paksu vedeneristekerros ei kovettunut odotetulla tavalla ilmeisesti tunnelin alhaisen lämpötilan (+5 °C – +10 °C) takia. Lisäksi vedeneristekerrokseen jäi heti ruiskuttamisen jälkeen muutamia reikiä alemman ruiskubetonikerroksen pinnan epätasaisuuden takia. 8 mm raekoon omaava ruiskubetoni muodosti tämän perusteella liian karkean alustan vedeneristeelle.

Ruiskubetonin kovettumisen jälkeen kaikki koealueet olivat suhteellisen kuivat. Kuitenkin taakse johdetun 0,5–2,0 baarin vedenpaineen vaikuttaessa kaikista koealueista tuli vettä läpi lähinnä betonin halkeamista. Tämä osoitti, että työmaakokeissa mukana olleella ruiskubetonikerrosten väliin ruiskutetulla vedeneristeellä, ruiskubetonin pin-

nalle ruiskutetuilla pinnoitteilla tai ruiskubetonimassaan sekoitettavilla tiivistysaineilla halkeamia ei saatu vedenpitäväksi ainakaan kahden kuukauden seurantajakson aikana.

Betonin vedenpitävyys edellyttää alhaisen vesi-sementtisuhteen ja alkalivapaan kiihdyttimen lisäksi ruiskutettavan kerrospaksuuden hallintaa ja kerrosten ruiskutusta eri suunnista.

Työmaakokeiden tulosten perusteella betonin halkeilemattomuus on ensiarvoisen tärkeitä vesitiiveyden saavuttamiseksi. Mikäli halkeamia kuitenkin esiintyy, tulee niiden välttämiseksi kiinnittää erityistä huomiota vesijälkihoidon aloitusajankohtaan, betonin lämpötilaan ja kiihdyttimen annostukseen. Tästä huolimatta halkeamia saattaa esiintyä.

Siltä varalta, että halkeamia tai muita läpäiseviä kohtia muodostuu, vesitiiviyden lisävarmistukseksi suositellaan kallion esi-injektointia. Näin menetellen vuotokohdat saadaan kokemuksen mukaan vähenemään merkittävästi.

Vaativissa kohteissa vesitiivis ruiskubetonirakenne muodostetaan siten esi-injektoinnilla, vedenpaineen poistavalla salaojituksella ja vesitiiviillä kuidutetulla ruiskubetonilla. Vesitiiveys varmistetaan siten kolmella peräkkäisellä läpäisyesteellä.

Lähdeluettelo

Aabøe, R., Øiseth, E. 2005. Foamed Glass – an Alternative Lightweight and Insulating Material. Nordic Road & Transport Research, Nro 1, 2005.

Ahlgren, L. et al. 1976. Fukt i betong. Stockholm: CBI kursverksamheten.

Betonikeskus r.y. 2002. Betonin kiviainesten laadun ja notkeuden hallinta. Helsinki: Betonikeskus. 45 s.

Betoninormit. 2004. by50. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys r.y. 263 s.

Guidelines for specifiers and contractors. 1999. European specification for sprayed concrete, EFNARC. United Kingdom. 31 s.

Hedlund, H. 1998. Luleå University of Technology, Sweden. Personal conversations.

Holt, E. 2001. Early age autogenous shrinkage of concrete. VTT Publications 446. Espoo: VTT. 184 s. + liitt. 9 s. <http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/publications/2001/P446.pdf>.

Jernbaneverket. 2005. Alternativ vannsikring i jernbanetunneler. Slutrapport 2005.

Justnes, H. et al. 1999. The influence of cement characteristics on chemical shrinkage. Teoksessa: Tazawa, E. (toim.) Autogenous shrinkage of concrete. Lontoo: E&FN Spon. S. 71–80.

Lea, F. M. 1971. The Chemistry of Cement and Concrete. 3rd Edition. New York: Chemical Publishing Company, Inc. 223 s.

Maltese, C. et al. 2002. Alkali Free and Alkali Rich Accelerators for Shotcrete: Effects on Cement hydration. Fourth International Symposium on Sprayed Concrete – Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support. Davis, Switzerland, 22–26 September 2002.

Paulini, P. 1992. A weighing method for cement hydration. 9th International Congress on the Chemistry of Cement. New Delhi. 1992. S. 248–254.

Ritola, J., Vuopio, J. 2002. Kalliotilojen vesitiiviyyden hallinta. VTT Tiedotteita 2147. Espoo:VTT. 124 s.

Soininen, H. 2005. Vesitiiviit komposiittirakenteet. Ruiskutuskokeet Korsossa. Lappeenranta: Etelä-Karjalan ammattikorkeakoulu, rakennustekniikan koulutusohjelma. Raportti 14.12.2005. 13 s.

Zampini, D. et al. 2004. Liquid-Based Set Accelerating Admixtures for sprayed Concrete: A Comparison between Akali-Free and Alkali-Rich Accelerators. Gallerie E Grandi Opere Sotterranee. 72 – Maggio 2004.

Taustakirjallisuutta

Berg, K. et al. 2002. Fourth International Symposium on Sprayed Concrete – Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support. Davis, Switzerland, 22–26 September 2002.

Cerulli, T. et al. 2002. Physical mechanical analysis of concrete sprayed with two different alkali free accelerators; morphological and chemical implications. Fourth International Symposium on Sprayed Concrete – Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support. Davis, Switzerland, 22–26 September 2002.

Kirpatrick, R. J. 1993. Spectroscopic investigation of alkali silica reaction product gels. *Cement and Concrete Research* (1993), 23(4), 811–823.

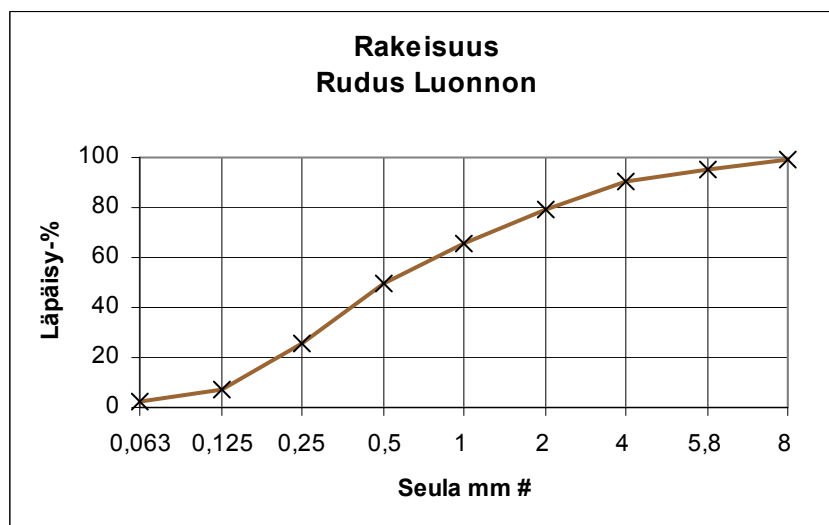
Paglia, C., Wombacher, F., Bohni, H. 2001. The influence of alkali-free and alkaline shotcrete accelerators within cement systems I. Characterization of the setting behaviour. *Cem. Conc. Res.*, 31, 2001, 913–918.

SINTEF. 1998. Report STF22F980. – Urhan, S. Alkali silica and pozzolanic reactions in concrete. *Cement and Concrete Research* (1987), 17(1), 141–152.

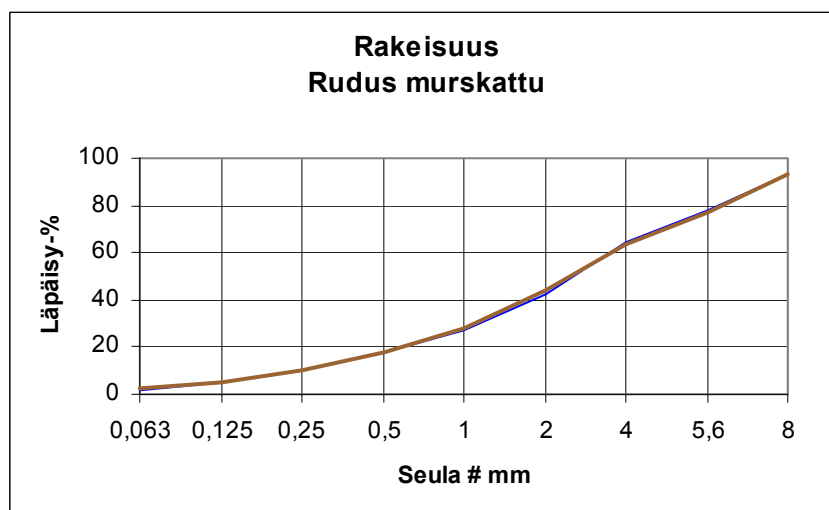
Liite 1: Degussa Oy

Kiviainekset

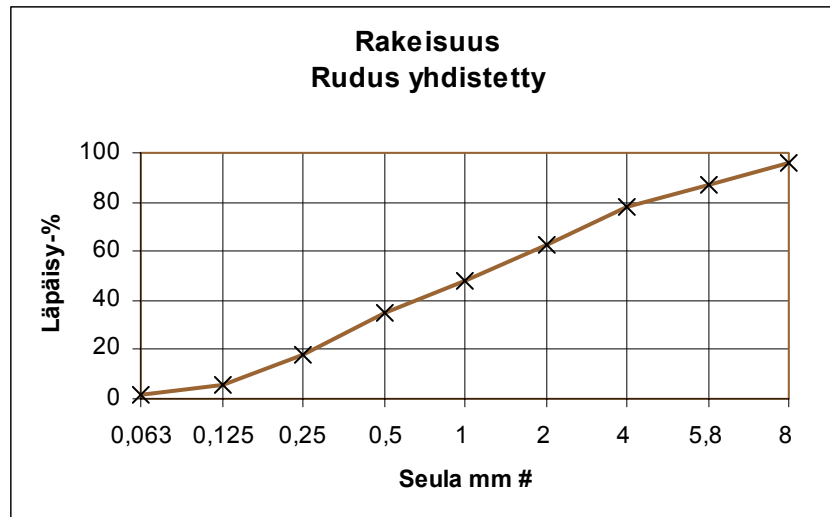
Kokeet tehtiin Lohja Rudus Oy:n tutkimusta varten toimittamalla murskatulla kiviaineksella ja luonnonkiviaineksella. Kiviainekset kuivattiin laboratoriossa ennen käyttöä. Murskatun kiviaineksen osuus koko kiviaineksesta oli 46 % luonnonkiviaineksen osuuden ollessa 54 %. Kiviainesten raekoko oli 8 mm. Kiviainesten rakeisuuskäyrät esitetään kuvissa 1–3.



Kuva 1. Luonnonkiviaineksen rakeisuus.



Kuva 2. Murskatun kiviaineksen rakeisuus.



Kuva 3. Yhdistetyn kiviaineksen rakeisuus.

Kiviaineksista määritettiin myös tiheys, vedenimu, litteysluku ja ominaispinta-ala. Arvot esitetään taulukoissa 1–4.

Taulukko 1. Kiviaineksen tiheys. Määrittäminen standardin SFS-EN 1097-6 ”Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 6: Kiintotiheyden ja vedenimeytymisen määrittäminen” kohtien 8 ja 9 mukaisesti.

Näyte	Kiintotiheys näennäinen ρ_a	Kiintotiheys uunikuivattu ρ_{rd}	Kiintotiheys kyll. ja pintak. ρ_{ssd}
Luonnon < 4 mm	2,71	2,68	2,69
Murske > 4 mm	2,69	2,64	2,66
Murske < 4 mm	2,72	2,68	2,69

Taulukko 2. Kiviaineksen raemuoto. Määritys tehtiin standardin SFS-EN 933-3 ”Kiviainesten geometristen ominaisuuksien testaus. Osa 3: Raemuodon määritys. Litteysluku” mukaisesti.

Näyte	Litteysluku Fl
Murkattu 8/10	10,2
Murskattu 6,3/8	17,5
Murskattu 5/6,3	17,3
Murskattu 4/5	18,0
Yhdistetty 4/8	16,5

Taulukko 3. Kiviaineksen vedenimu. Määritys tehtiin standardin SFS-EN 1097-6 mukaisesti.

Näyte	Absorptio p-%
Luonnon < 4 mm	0,4
Murske > 4 mm	0,8
Murske < 4 mm	0,5

Taulukko 4. Kiviaineksen ominaispinta-ala. Määritys tehtiin alle 0,063 mm:n hienoinekselle menetelmäkuvauksen PANK 2401 mukaisesti.

Näyte	Ominaispinta-ala m²/kg
Murske	2 700
Luonnon kiviaines	4 500

Notkistin oli modifioitu polykarboksyylietteripohjainen notkistin Glenium 51.

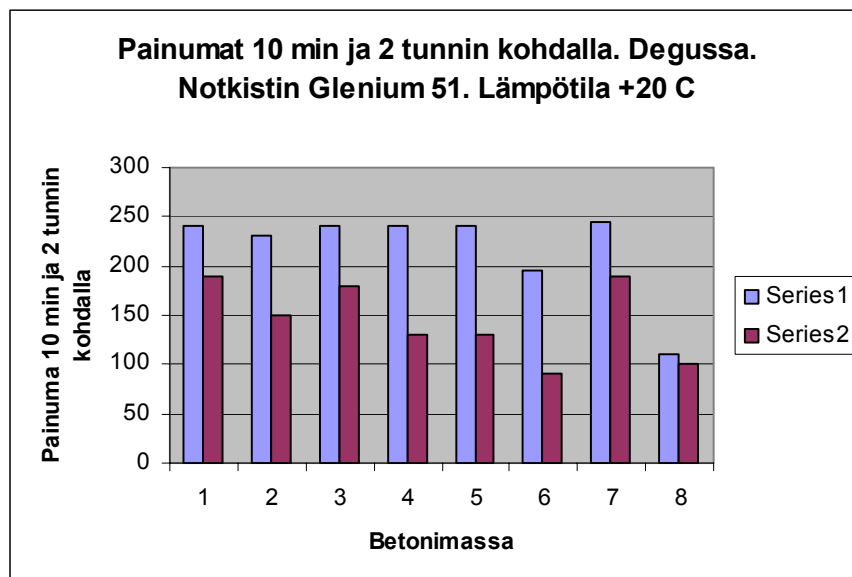
Betonimassat olivat seuraavat (vesi-sementtisuhde on kokonaisvesi-sementtisuhde):

1. Paraisten Rapid 450 kg/m³. Notkistin 0,75 %. Vesi-sementtisuhde 0,45.
2. Paraisten Rapid 505 kg/m³. Notkistin 0,7 %. Vesi-sementtisuhde 0,40.
3. Paraisten Rapid 400 kg/m³. Notkistin 0,70 %. Vesi-sementtisuhde 0,50.
4. Paraisten Yleissementti 440 kg/m³. Notkistin 0,85 %. Vesi-sementtisuhde 0,45.
5. Embra Rapid 440 kg/m³. Notkistin 0,65 %. Vesi-sementtisuhde 0,45.

6. Embra Rapid 425 kg/m³ + silika 25 kg/m³. Notkistin 0,85 %. Vesi-sideainesuhde 0,45.
7. Paraisten Rapid 440 kg/m³. Notkistin 0,75 %. Sisäinen jälkihoitoaine TCC 735, 5 l/m³. Vesi-sementtisuhde 0,45.
8. Paraisten Rapid 440 kg/m³. Notkistin 0,60 %. Delvo stabilizer 10, 0,5 %. Vesi-sementtisuhde 0,45.

Betonimassojen koostumus säädettiin siten, että painuma oli 2 tunnin kohdalla suuruusluokalleen 150 mm. Kiviaineksia käytettiin sellaisenaan, eli niitä ei seulottu eri lajitteisiin. Tämän seurauksena betonimassojen painumissa oli koko työn ajan jonkin verran vaihtelua. Näin ollen betonimassojen notkeudesta tai notkistimen annostuksesta ei voida luotettavasti päätellä betonimassojen vedentarvetta.

Betonimassojen painumat 10 minuutin ja 2 tunnin kohdalla esitetään kuvassa 4.



Kuva 4. Betonimassojen painuma 10 minuutin ja 2 tunnin kohdalla.

Koekappaleita valmistettaessa betonit tiivistettiin sivumitaltaan 100 mm:n särmäisiin teräsmuotteihin noin 1 minuutin kuluessa kiihdytinlisäyksestä iskuporakoneeseen kiinnitetyllä noin 95 x 95 mm²:n kokoisella teräslevyllä (Kanko). Kutakin koekappaletta varten tehtiin oma kiihdytinlisäys ja sekoitus.

Kiihdyttiminä käytettiin nestemäistä alkalivapaata ruiskubetonin kiihdytintä Meyco SA 170 ja natriumsilikaattipohjaista (vesilasi) kiihdytintä Pika Parmix. Degussa Oy:n kirjallisessa ohjeessa Meyco SA 170:n menekiksi annetaan 3–7 % sementtimäärästä.

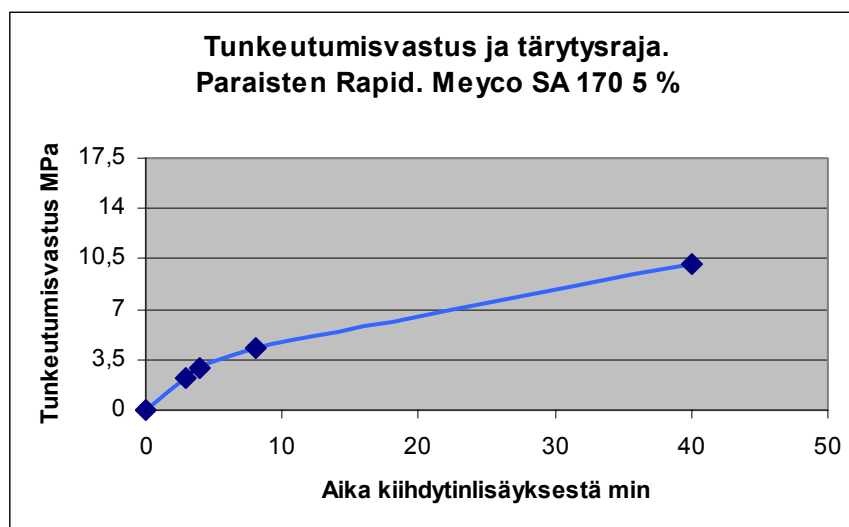
Edelleen todetaan, että yliannostus saattaa johtaa loppulujuuden alenemiseen. Pika Parmixin käyttöohjeessa annostus on rajoitettu enintään 5 %:iin sementtimäärästä.

Kiihdytinlisäyksen jälkeen betoneille tehtiin valikoidusti seuraavat määriykset:

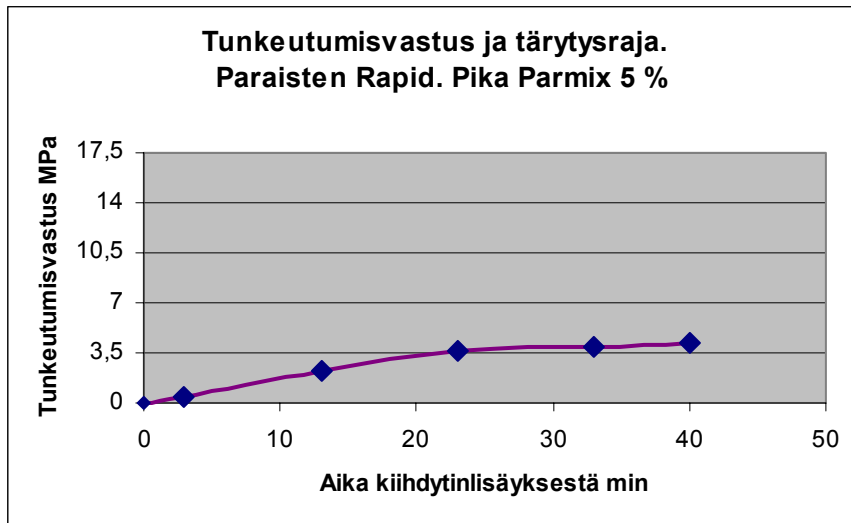
- tunkeutumisvastus ja tärytysraja
- tarttuvuus luonnonkivilaattaan
- lämpötila semiadiabaattisissa olosuhteissa
- lämpötila tiivistettäessä kylmää pintaa vasten
- lujuus
- kuivumiskutistuma
- vedenpitävyys
- säröilyindeksi.

Tunkeutumisvastus ja tärytysraja

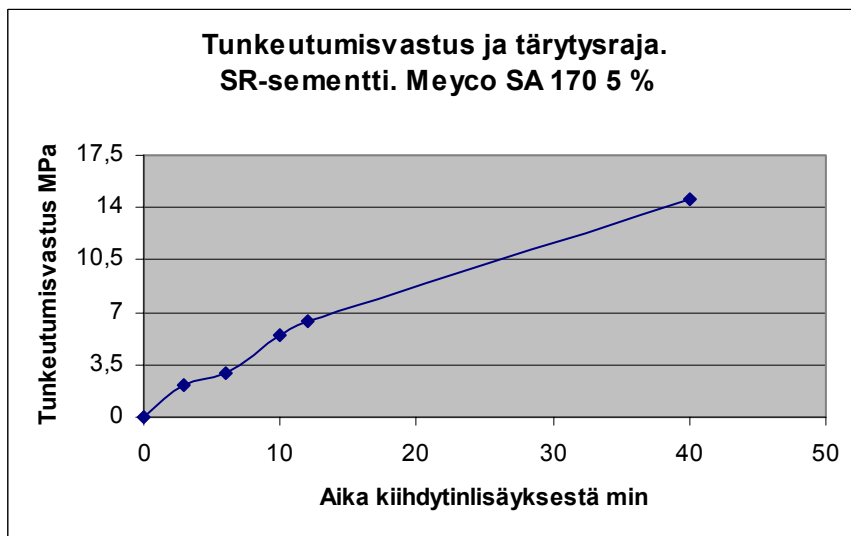
Tunkeutumisvastus ja tärytysraja määritettiin standardin SFS 5289 mukaisesti käyttäen \varnothing 9 mm:n neuloja (kuva 9). Betoni tiivistettiin noin 1 minuutin kuluessa kiihdytinlisäyksestä 150 mm:n särmäiseen teräsmuottiin. Ensimmäinen mittaus tehtiin 2–3 minuutin kuluttua kiihdytinlisäyksestä. Tunkeutumisvastuksen kehitys ja tärytysrajan saavuttaminen määritettiin Paraisten Rapid-sementillä (kuvat 5 ja 6) ja SR-sementillä (kuvat 7 ja 8).



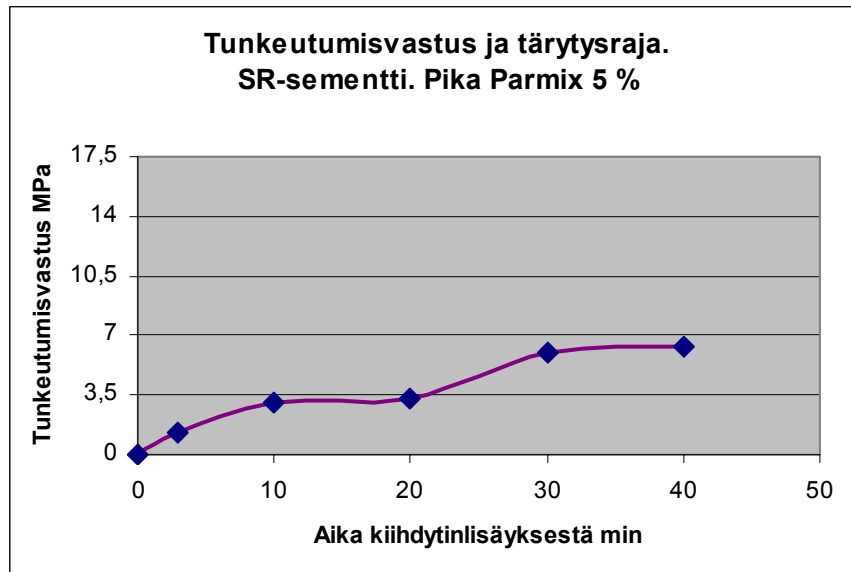
Kuva 5. Tunkeutumisvastuksen kehittyminen ja tärytysrajan (3,5 MPa) saavuttaminen. Meyco SA 170. Annostus 5 % sideaineesta. Betonimassa Degussa 7, notkistin Glenium 51 0,85 %, sisäinen jälkihoitoaine TCC-735 5 kg/m³. Koe tehtiin noin +20 °C lämpötilassa. Betonimassan painuma oli noin 150 mm.



Kuva 6. Tunkeutumisvastuksen kehittyminen ja tärytysrajan (3,5 MPa) saavuttaminen. Pika Parmix. Annostus 5 % sideaineesta. Betonimassa Degussa 7, notkistin 0,85 %, sisäinen jälkihoitoaine TCC-735 5 kg/m³. Betonimassan painuma oli ennen kiihdytinlisäystä noin 150 mm. Koe tehtiin noin +20 °C lämpötilassa.



Kuva 7. Tunkeutumisvastuksen kehittyminen ja tärytysrajan (3,5 MPa) saavuttaminen. Meyco SA 170. Annostus 5 % sideaineesta. Betonimassa Degussa 10 (SR-sementti). Notkistin Glenium 51 0,85 %. Sisäinen jälkihoitoaine TCC-735 5 kg/m³. Koe tehtiin noin +20 °C lämpötilassa. Betonimassan painuma oli ennen kiihdytinlisäystä noin 200 mm.



Kuva 8. Tunkeutumisvastuksen kehittyminen ja tärytysrajan (3,5 MPa) saavuttaminen. Pika Parmix. Annostus 5 % sideaineesta. Betonimassa Degussa 10 (SR-sementti). Notkistin 0,85 %. Sisäinen jälkihoitoaine TCC-735 5 kg/m³. Betonimassan painuma oli ennen kiihdytinisäystä noin 200 mm. Koe tehtiin noin +20 °C lämpötilassa.



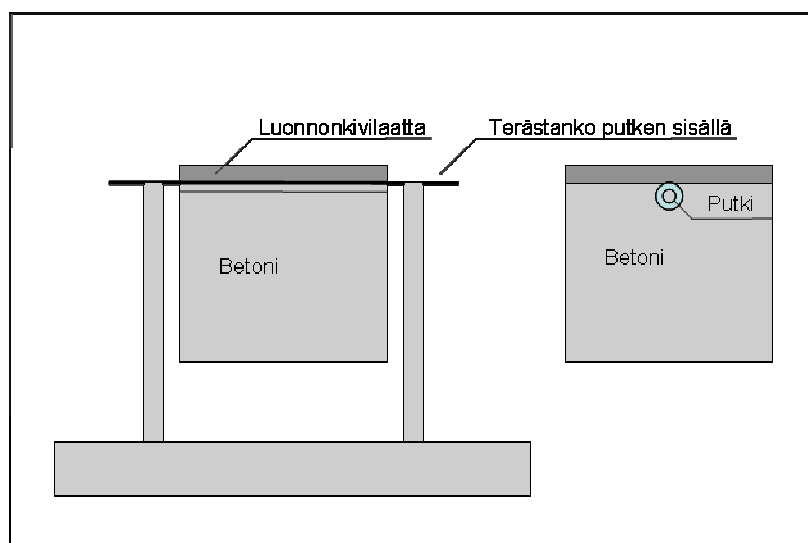
Kuva 9. Tunkeutumisvastuksen ja tärytysrajan määrittäminen.

Betonin tarttuvuus luonnonkivilaattaan

Betonin tarttuvuus luonnonkiveen kiihdyttimen lisäyksen jälkeen määritettiin seuraavasti:

- 100 mm:n särmäisen teräsmuotin pohjalle laitettiin $100 \times 100 \times 10 \text{ mm}^3$:n kokoinen raamisahattu mattakosteaa luonnonkivilaatan (Kuru Grey) palanen.
- Luonnonkiven keskelle asetettiin $\varnothing 8 \text{ mm}$:n ontto teräsputki.
- Betoni tiivistettiin muottiin luonnonkivilaatan päälle välittömästi kiihdytinlisäyksen ja sekoituksen (20 sekuntia) jälkeen.
- Välittömästi tiivistämisen jälkeen betonikappale, ml. luonnonkivilaatta, poistettiin muotista ja käännettiin ylösalaisin (luonnonkivilaatta ylimpänä).
- Onton teräsputken läpi työnnettiin noin 200 mm pitkä, $\varnothing 4 \text{ mm}$:n terästanko.
- Betonikappale ripustettiin 3 min kuluttua kiihdyttimen lisäyksestä kahden tuen väliin terästangon varaan.

Koemenettely esitetään kuvissa 10 ja 11. Koe tehtiin Paraisten Rapid- ja SR-sementillä. Tulokset esitetään taulukoissa 5 ja 6.



Kuva 10. Koejärjestely (teline) betonin tarttuvuuden määrittämiseksi kiihdytinlisäyksen jälkeen. Betonikappaleet ripustettiin 3 minuutin kuluttua kiihdytinlisäyksestä. Betonikerroksen korkeus on 90 mm.



Kuva 11. Betonikappale on ripustettu 3 minuutin kuluttua kiihdytinlisäyksestä.

Taulukko 5. Betonin tarttuvuus luonnonkivilaattaan. Betoni Degussa 7 (painuma noin 150 mm). Sisäinen jälkihoitoaine TCC-735 5 kg/m³. Lämpötila noin +20 °C.

Betoni/Kiihdytin	Kiihdytinlisäyksen ajankohta min	Ripustusajan-kohta min	Havainnot betonista
Degussa 7 Meyco SA 170, 5 %	0	3	Pysyi kiinni
Degussa 7 Pika Parmix, 5 %	0	3	Irtosi kahden minuutin kuluttua

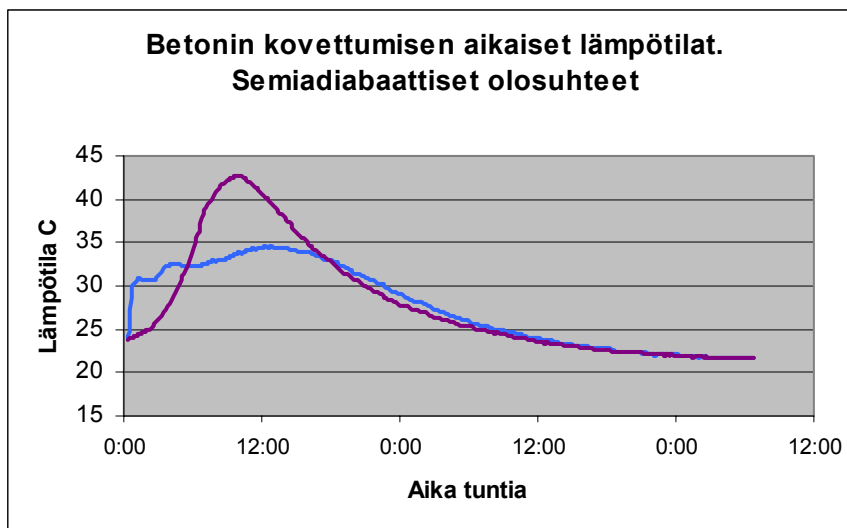
Taulukko 6. Betonin tarttuvuus luonnonkivilaattaan. Betoni Degussa 10 (SR-sementti). Sisäinen jälkihoitoaine TCC-735 5 kg/m³. Painuma ennen kiihdytinlisäystä oli noin 150 mm. Lämpötila noin +20 °C.

Betoni/Kiihdytin	Kiihdytinlisäyksen ajankohta min	Ripustusajan-kohta min	Havainnot betonista
Degussa 10 Meyco SA 170, 5 %	0	3	Pysyi kiinni
Degussa 10 Pika Parmix, 5 %	0	3	Irtosi heti

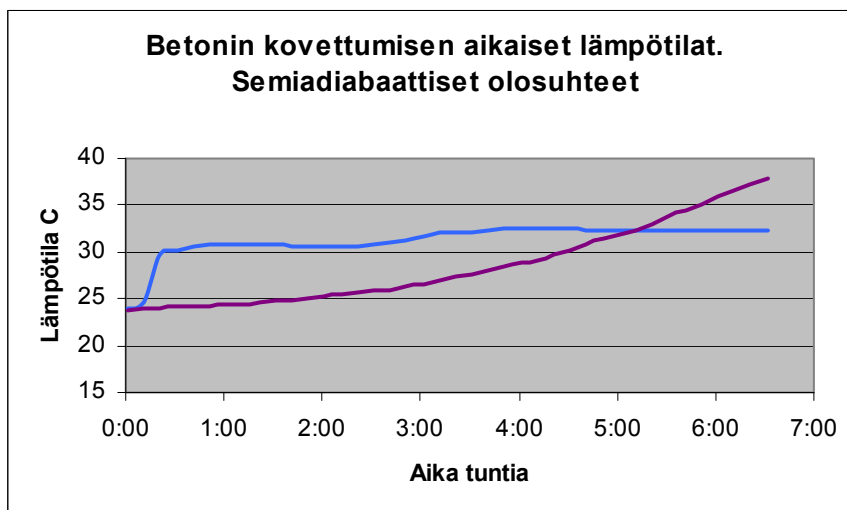
Kovettumisen aikaiset lämpötilat

Semiadiabaattiset olosuhteet

Betonimassa (Degussa 1) tiivistettiin heti kiihdytinlisäyksen jälkeen noin 100 x 100 x 50 mm³:n kokoiseen lämpöeristettyyn muottiin, joka oli ympäröity joka puolelta SPU-eristeellä. Kiihdytinlisäyksen jälkeiset lämpötilat esitetään kuvissa 12 ja 13.



Kuva 12. Betonin lämpötilan kehitys noin 60 tunnin ikään saakka. Betoni (Degussa 1) on tiivistetty lämpöeristettyyn muottiin noin 1 min kuluessa kiihdytinlisäyksestä. Säilytys noin +20 °C lämpötilassa. Kiihdytin Meyco 9 A 170, 7 % (alempi sininen käyrä). Kiihdytin Pika Parmix, 5 % (ylempi punainen käyrä).

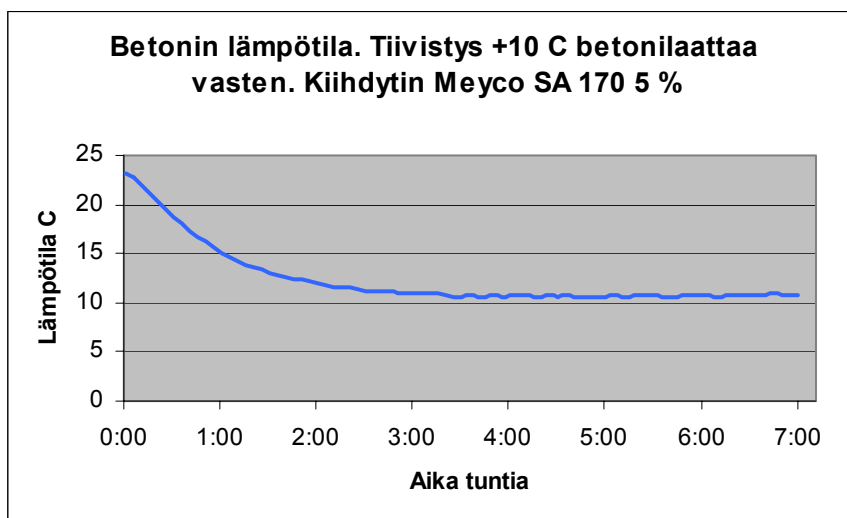


Kuva 13. Betonin lämpötilan kehitys noin 7 tunnin ikään saakka. Suurennos kuvan 1 lämpötilakäyrien alkuosasta. Kiihdytin Meyco 9 A 170, 7 % (sininen käyrä). Kiihdytin Pika Parmix, 5 % (punainen käyrä).

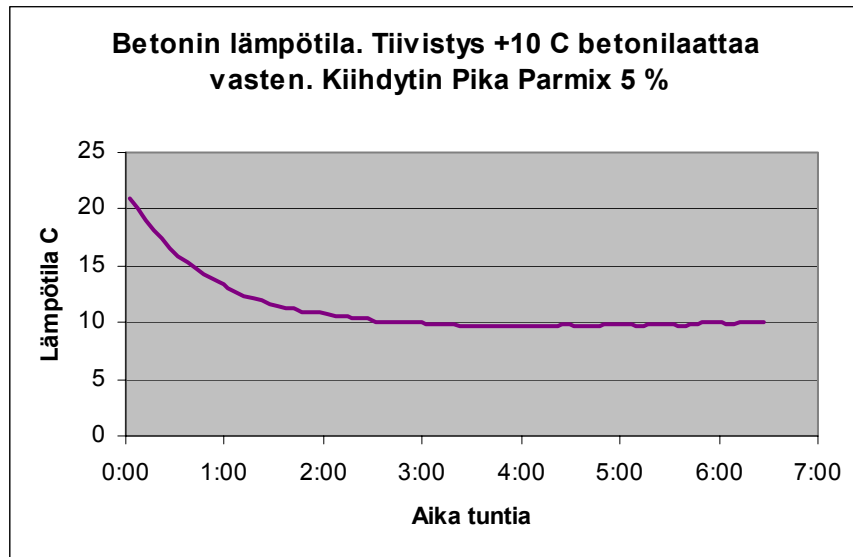
Kylmää betonilaattaa vasten tiivistetty betoni

Betonimassat tiivistettiin heti kiihdytinlisäyksen jälkeen betonilaattaa vasten pieniin sivuilta lämpöeristettyihin kehikoihin. Huoneen lämpötila oli säädetty +10 °C tasolle. Betonikappaleiden koko oli noin 100 x 100 x 100 mm³.

Lämpötila-anturit asennettiin betonikerroksen paksuuden puoliväliin. Betonikappaleiden yläpintaan kohdistettiin tuulen nopeus 1,0–1,5 m/s. Betonikappaleiden yläpuolisen ilman suhteellinen kosteus säädettiin välille 75 ja 85 % RH. Tyypilliset betonikappaleiden lämpötilat esitetään kuvissa 14 ja 15.



Kuva 14. Betonin (Degussa 7) lämpötila. Glenium 51 0,75 %. Sisäinen jälkihoitoaine TCC-735 5 kg/m³. Meyco SA 170 5 %. 100 mm:n betonikerros on tiivistetty betonilaattaa vasten. Huoneen lämpötila oli noin +10 °C.



Kuva 15. Betonin (Degussa 7) lämpötilä. Pika Parmix 5 %. 100 mm:n betonikerros on tiivistetty betonilaattaa vasten. Huoneen lämpötilä oli noin +10 °C.

Puristuslujuus

Ilman kiihdytintä valmistetut koekappaleet säilytettiin noin +20 °C lämpötilassa ja vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa. Puristuslujuus ja tiheys määritettiin 100 mm:n särmäisillä kuutioilla 1, 2, 7 ja 28 vrk:n iässä, taulukot 7 ja 8.

Taulukko 7. Puristuslujuus. Ilman notkistinta ja kiihdytintä valmistettu vertailubetoni. Paraisten Rapid. 100 mm:n särmäiset koekappaleet.

Vertailubetoni	Puristuslujuus MPa ja tiheys kg/m ³			
	1 vrk	2 vrk	7 vrk	28 vrk
Ilman notkistinta Ilman kiihdytintä	26,0 2290	37,5 2310	45,0 2310	46,5 2300

Taulukko 8. Puristuslujuus. Betonimassa Degussa 1. Paraisten Rapid. Valmistettu ilman kiihdytintä. 100 mm:n särmäiset koekappaleet.

Betoni Degussa 1	Puristuslujuus MPa ja tiheys kg/m ³			
	1 vrk	2 vrk	7 vrk	28 vrk
Notkistin Glenium 51, 0,75 %. Ilman kiihdytintä.	27,5 2320	43,0 2360	50,0 2350	59,0 2360

Kiihdytintä sisältäneet kappaleet säilytettiin noin +10 °C lämpötilassa muovipussissa. Puristuslujuus määritettiin 100 mm:n särmäisillä kuutioilla 1, 2, 7 ja 28 vrk:n iässä, taulukot 9–11.

Taulukko 9. Puristuslujuus. Betonimassa Degussa 1. Paraisten Rapid. Kiihdytin Meyco SA 170 ja Pika Parmix. 100 mm:n särmäiset koekappaleet. Säilytys noin +10 °C lämpötilassa.

Betoni Degussa 1	Puristuslujuus MPa ja tiheys kg/m³			
	1 vrk	2 vrk	7 vrk	28 vrk
Kiihdytin Meyco 9A 170 7 % sideaineesta	10,0 2310	25,0 2330	43,0 2260	50,0 2310
Kiihdytin Pika Parmix 5 % sideaineesta	17,0 2370	30,0 2330	40,5 2280	47,5 2270

Taulukko 10. Puristuslujuus nuorella iällä. Betonimassa Degussa 7. Paraisten Rapid. Kiihdytin Meyco SA 170 ja Pika Parmix. 100 mm:n särmäiset koekappaleet. Säilytys noin +10 °C lämpötilassa.

Betoni Degussa 7	Puristuslujuus MPa ja tiheys kg/m³		
	2 tuntia	6 tuntia	24 tuntia
Sisäinen jälkihoitoaine TCC 735, 5 l/m ³			
Kiihdytin Meyco 9A 170 5 % sideaineesta	0,4 2270	0,6 2180	10,0 2280
Kiihdytin Pika Parmix 8 % sideaineesta	0,4 2370	1,5 2330	17,0 2260

Taulukko 11. Puristuslujuus nuorella iällä. Betonimassa Degussa 10. SR-sementti. Kiihdytin Meyco SA 170 ja Pika Parmix. 100 mm:n särmäiset koekappaleet. Säilytys noin +10 °C lämpötilassa. Betonimassan painuma oli ennen kiihdytinlisäystä noin 180 mm.

Betoni Degussa 10	Puristuslujuus MPa ja tiheys kg/m³		
	2 tuntia	6 tuntia	24 tuntia
Sisäinen jälkihoitoaine TCC 735, 5 l/m ³			
Kiihdytin Meyco 9A 170 5 % sideaineesta	0,4 2320	1,3 2320	10,0 2240
Kiihdytin Pika Parmix 5 % sideaineesta	0,1 2330	0,4 2380	8,7 2300

Kuivumiskutistuma

Kuivumiskutistuma määritettiin 40 x 40 x 160 mm³:n prismoilla (kolmen prisman keskiarvo) 1–56 vrk:n iässä. Prismat säilytettiin 1–7 vrk muovipusseissa. Tämän jälkeen säilytysolosuhteet olivat noin +20 °C lämpötila ja noin 40 %:n suhteellinen kosteus.

Muovipussit säilytettiin vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa. Kutistumat esitetään taulukossa 12.

Taulukko 12. Betonien kuivumiskutistumat määritettynä 40 x 40 x 160 mm³:n prismoilla.

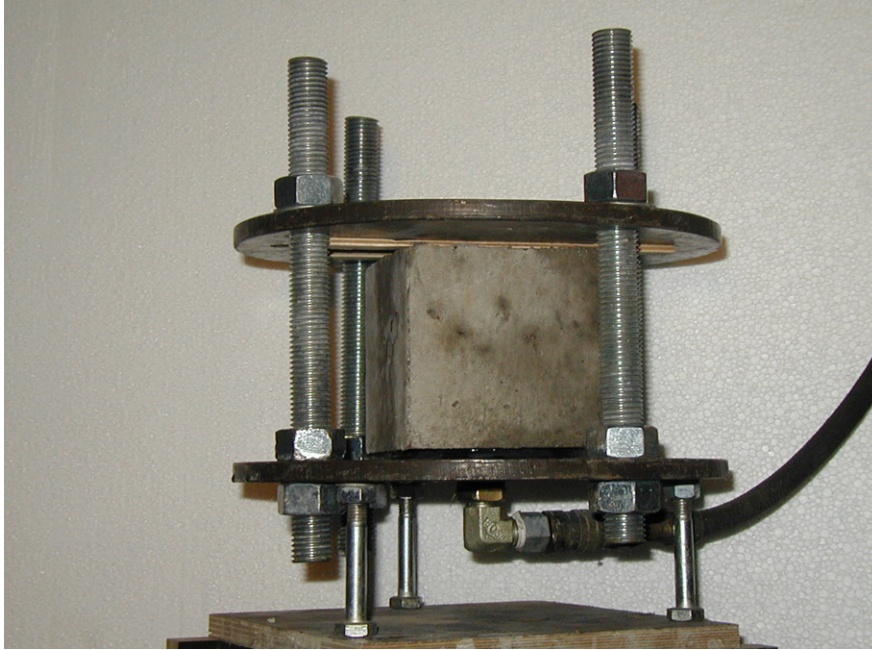
Betoni Degussa 1	Kutistuma ‰		
	1–7 vrk	7–56 vrk	1–56 vrk
Vertailu Ilman notkistinta	0,06	0,73	0,79
Notkistin Glenium 51, 0,75 % Ilman kiihdytintä	0,09	0,68	0,77
Kiihdytin Meyco 9A 170 7 % sideaineesta	0,05	0,95	1,00
Kiihdytin Pika Parmix 5 % sideaineesta	0,11	0,60	0,71

Vedenpitävyys

Vedenpitävyys määritettiin standardin SFS-EN 12390-8 mukaisesti 100 mm:n särmäisillä kuutioilla 28 vrk:n iässä (kuva 16). Vedentunkeuman maksimisyvydet esitetään taulukossa 13.

Vedenpitävyys määritettiin kohdistamalla koekappaleen alapintaan 5 baarin suuruinen paine 72 tunnin ajan. Tämän jälkeen vedenpaineen vaikutuksen alaisena ollut pinta pyyhittiin ylimääräisen veden poistamiseksi ennen koekappaleen halkaisua kohtisuoraan vedenpaineen vaikutukselle altista pintaa vastaan.

Heti, kun halkaisupinta oli kuivunut sen verran, että veden tunkeutumisarvot oli selvästi havaittavissa, merkittiin vesirintaman sijainti koekappaleeseen. Tämän jälkeen mitattiin suurin tunkeutumasyvyys koalueen alla ja merkittiin se muistiin millimetrin tarkkuudella.



Kuva 16. Vesitiiviyskoekappale kiinnitettynä testauslaitteistoon. Koekappaleen alapintaan kohdistettiin standardin mukainen 5 baarin paine 72 tunnin ajan.

Taulukko 13. Vedentunkeuman maksimisyvydet. Määritys on tehty 100 mm:n särmäisillä koekappaleilla.

Betoni Degussa 1 Paraisten Rapid	Vedentunkeutuman maksimisyvyys mm	Tiheys kg/m³
Ilman notkistinta, vertailu	24	2300
Notkistin Glenium 51, 0,75 % Ilman kiihdytintä	10	2330
Kiihdytin Meyco 9A 170 ¹⁾ , 5 % TCC 735 5 l/m ³	5	2310
Kiihdytin Meyco 9A 170, 7 %	5	2290
Kiihdytin Pika Parmix 5 %	12	2370
Kiihdytin Pika Parmix ¹⁾ 10 % TCC 735 5 l/m ³	34	2270

¹⁾ Ikä kokeen alkaessa noin 42 vrk

Vesi-sementtisuhteen ja sementtilaadun vaikutus mikrosäröilyyn

Yleiskuvan saamiseksi vesi-sideainesuhteen ja sementtityypin vaikutuksesta mikrosäröilyyn sekoitettiin betonimassoihin Meyco SA 170- ja Pika Parmix -kiihdytintä.

Betonit tiivistettiin sivumitaltaan 100 mm:n särmäisiin teräsmuotteihin noin 1 minuutin kuluessa kiihdytinlisäyksestä iskuporakoneeseen kiinnitetyllä noin 95 x 95 mm²:n kokoisella teräslevyllä (Kanko).

Meyco SA 170 -kiihdyttimen annostus oli 7 % sideaineen painosta. Pika Parmix -kiihdyttimen annostus oli 5 % sideaineen painosta riippumatta betonimassan notkeudesta.

Koekappaleet säilytettiin kuivumiselta suojattuna. Koekappaleista irrotettiin sahaamalla 7 vrk:n iässä näytepalat mikrorakennetutkimuksia varten. Näytepaloista valmistettiin mikrorakenneanalyysiä varten 35 x 55 mm² x 25 µm:n kokoiset petrografiset ohuthieet betonin pinnalta lähtien noin 55 mm:n syvyydelle.

Arvostelussa käytettiin seuraavaa säröilyindeksiä:

- 0, mikrohalkeamia on vain satunnaisesti.
- 1, mikrohalkeamia on koko näytteen alueella.
- 2, mikrohalkeamia on koko näytteen alueella ja paikoin erityisen tiheästi.
- 3, mikrohalkeamia on erityisen tiheästi ja ne ovat tavallista leveämpiä.

Mikrorakenneanalyysissä tehdyt havainnot säröilystä ja betonin homogeenisuudesta esitetään taulukoissa 14–21 ja kuvissa 17–20. Kuvissa kuvan lyhyt sivu vastaa 2,7 mm:ä näytteessä.

Taulukko 14. Säröilyindeksi betonin iän ollessa 7 vrk ja yli 28 vrk. Betoni Degussa 1. Säilytys vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa.

Degussa 1 Paraisten Rapid W/c = 0,45	Säröilyindeksi (7 vrk iässä)	Säröilyindeksi (yli 28 vrk iässä)
Ilman kiihdytintä	0	0
Meyco SA 170, 7 %	0,5	0,5
Pika Parmix 5 %	0,5	0

Taulukko 15. Säröilyindeksi betonin iän ollessa 7 vrk ja yli 28 vrk. Betoni Degussa 2. Säilytys vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa.

Degussa 2 Paraisten Rapid W/c = 0,40	Säröilyindeksi (7 vrk iässä)	Säröilyindeksi (yli 28 vrk iässä)
Ilman kiihdytintä	0	0
Meyco SA 170, 7 %	1,0	0,5
Pika Parmix 5 %	0,5	1,0

Taulukko 16. Säröilyindeksi betonin iän ollessa 7 vrk. Betoni Degussa 3. Säilytys vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa.

Degussa 3 Paraisten Rapid W/c = 0,50	Säröilyindeksi (7 vrk iässä)
Ilman kiihdytintä	0
Meyco SA 170, 7 %	0
Pika Parmix 5 %	1

Taulukko 17. Säröilyindeksi betonin iän ollessa 7 vrk. Betoni Degussa 4. Yleissementti. Säilytys vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa.

Degussa 4 Yleissementti W/c = 0,45	Säröilyindeksi (7 vrk iässä)
Ilman kiihdytintä	0
Meyco SA 170, 7 %	0
Pika Parmix 5 %	0

Taulukko 18. Säröilyindeksi betonin iän ollessa 7 vrk. Betoni Degussa 5. Säilytys vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa.

Degussa 5 Embra Rapid W/c = 0,45	Säröilyindeksi (7 vrk iässä)
Ilman kiihdytintä	0
Meyco SA 170, 7 %	0,5
Pika Parmix 5 %	0,5

Taulukko 19. Säröilyindeksi betonin iän ollessa 7 vrk. Betoni Degussa 6. Säilytys vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa.

Degussa 6 Embra Rapid+silika	Säröilyindeksi (7 vrk iässä)
Ilman kiihdytintä	0
Meyco SA 170, 7 %	0,5
Pika Parmix 5 %	1

Taulukko 20. Säröilyindeksi betonin iän ollessa 7 vrk. Betoni Degussa 7. Sisäinen jälkihoitoaine TCC 735, 5 kg/m³. Säilytys vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa.

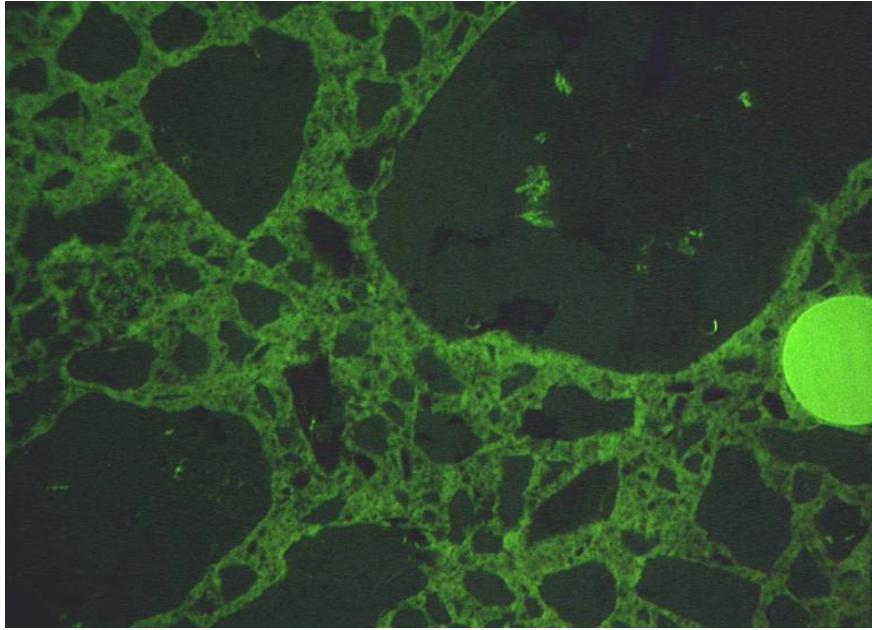
Degussa 7 Paraisten Rapid TCC 735, 5 kg/m³ W/c = 0,45	Säröilyindeksi (7 vrk iässä)
Ilman kiihdytintä	0
Meyco SA 170, 7 %	1
Pika Parmix 5 %	0,5

Taulukko 21. Säröilyindeksi betonin iän ollessa 7 vrk. Betoni Degussa 8. Stabilaattori Delvo Stabilizer 10, 0,5 % sideaineen painosta. Säilytys vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa.

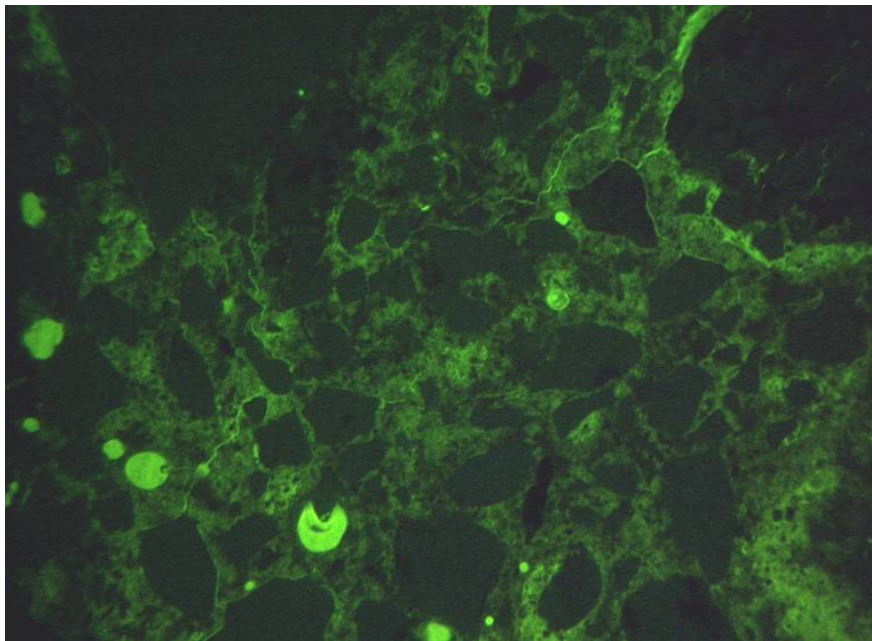
Degussa 8 Paraisten Rapid Delvo Stabilizer 10, 0,5 % W/c = 0,45	Säröilyindeksi (7 vrk iässä)
Ilman kiihdytintä	0
Meyco SA 170, 7 %	0,5
Pika Parmix 5 %	0

Taulukko 22. Ohuthieistä määritetyt säröilyindeksit. Kooste taulukoista 14–21.

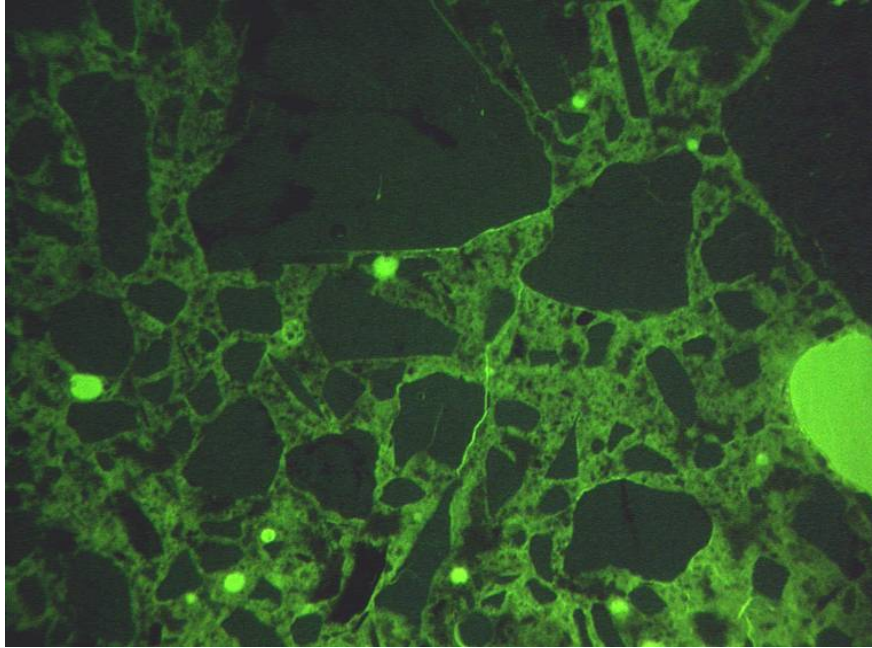
Degussa	1 Par R	2 Par R	3 Par R	4 Yleis	5 Embra	6 Embra Silika	7 Sis. jälki- hoito	8 Stabilaa tt
Ikä 7 vrk								
Ilman kiihd.	0	0	0	0	0	0	0	0
Meyco SA 170, 7 %	0,5	1	0	0	0,5	0,5	1	0,5
Pika Parmix 5 %	0	0,5	1	0	0,5	1	0,5	0
Ikä yli 28 vrk								
Ilman kiihd.	0	0						
Meyco SA 170, 7 %	0,5	0,5						
Pika Parmix 5 %	0	1						



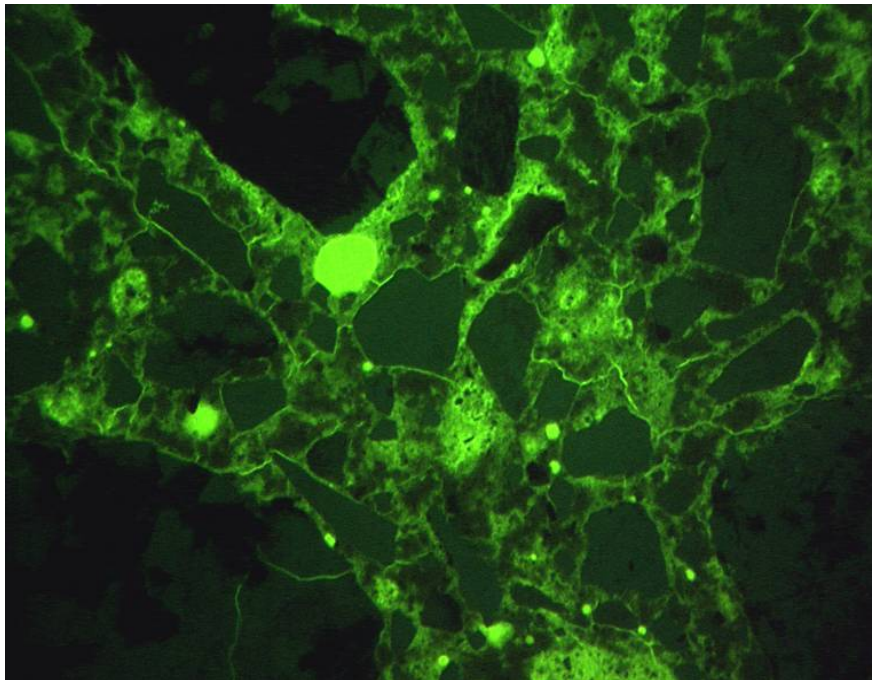
Kuva 17. Betoni Degussa 1 ilman kiihdytintä. Ikä 7 vrk. Säröjä ei ole havaittavissa. Kuivuminen on estetty koekappaleen tiivistämisen jälkeen.



Kuva 18. Betoni Degussa 1. Kiihdytin Meyco SA 170, 7 %. Ikä 7 vrk. Paikoin vähän säröilyä (säröilyindeksi 0,5). Kuivuminen on estetty koekappaleen tiivistämisen jälkeen.



Kuva 19. Kiihdytin Pika Parmix 5 %. Ikä 7 vrk. Paikoin vähän säröilyä (säröilyindeksi 0,5). Kuivuminen on estetty koekappaleen tiivistämisen jälkeen.



Kuva 20. Betoni Degussa 2. Kiihdytin MEYCO SA 170, 7 %. Ikä 7 vrk. Säröilyä on koko näytteen alueella (säröilyindeksi 1). Kuivuminen on estetty koekappaleen tiivistämisen jälkeen.

Kylmää betonilaattaa vasten tiivistetty betoni

Betoni (Degussa 1 ja 7) tiivistettiin heti kiihdytinlisäyksen jälkeen betonilaattaa vasten pieniin sivuilta lämpöeristettyihin kehikoihin. Huoneen lämpötila oli säädetty +10 °C tasolle. Betonikappaleiden koko oli noin 100 x 100 x 100 mm³.

Lämpötila-anturit asennettiin betonikerroksen paksuuden puoliväliin. Betonikappaleiden yläpintaan kohdistettiin tuulen nopeus 1,0–1,5 m/s. Betonikappaleiden yläpuolisen ilman suhteellinen kosteus säädettiin välille 75 ja 85 % RH.

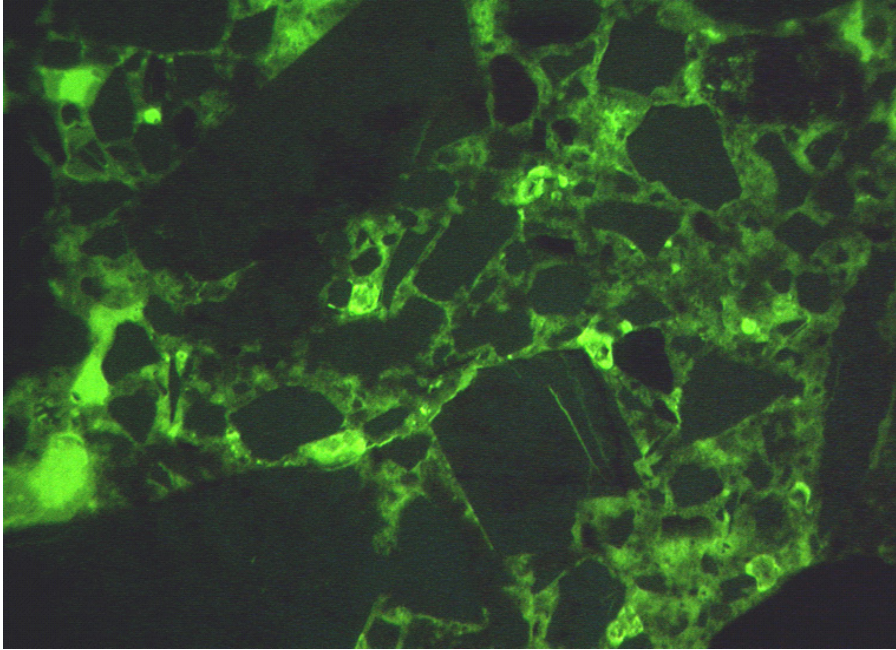
Kiihdytinannostukset olivat seuraavat:

- Meyco SA 170, 5 % sideaineesta, sisäinen jälkihoitoaine TCC 735 5 kg/m³
- Meyco SA 170, 7 % sideaineesta, ilman sisäistä jälkihoitoainetta
- Pika Parmix 5 % sideaineesta, ilman sisäistä jälkihoitoainetta
- Pika Parmix 10 % sideaineesta, sisäinen jälkihoitoaine TCC 735 5 kg/m³.

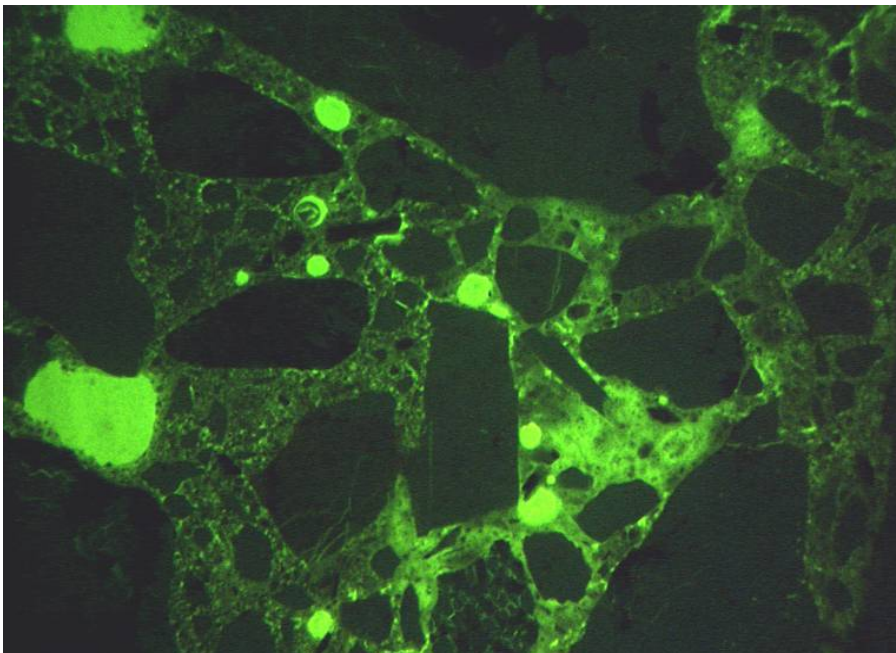
Mikrorakenneanalyysiä varten koekappaleista valmistettiin 35 x 55 mm² x 25 µm:n kokoiset petrografiset ohuthieet betonin pinnalta lähtien noin 55 mm:n syvyydelle. Mikrorakenneanalyysissä tehdyt havainnot esitetään taulukossa 23 ja kuvissa 21–24.

Taulukko 23. Säröilyindeksi. Betoni Degussa 1 ja 7. Ohuthieet on valmistettu 7 vrk:n iässä. Betonit on tiivistetty noin +10 °C lämpöistä betonilaattaa vasten sivuilta lämpöeristettyihin 100 x 100 x 100 mm³:n muotteihin. Ilman suhteellinen kosteus oli noin 75–85 % RH. Tuulen nopeus oli noin 1,5 m/s.

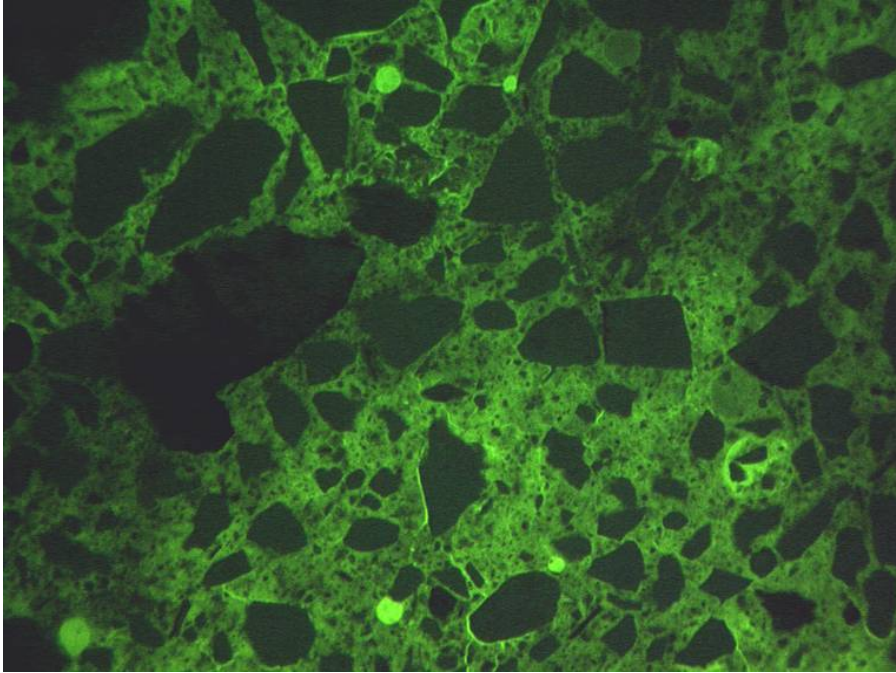
Degussa 1 Paraisten Rapid W/c = 0,45	Säröilyindeksi (1–2 vrk iässä)
Meyco SA 170, 5 % Sisäinen jälkihoitoaine TCC 735, 5 kg/m ³	0,5
Meyco SA 170, 7 %	0,5
Pika Parmix 5 %	0,5
Pika Parmix 10 %	2,0



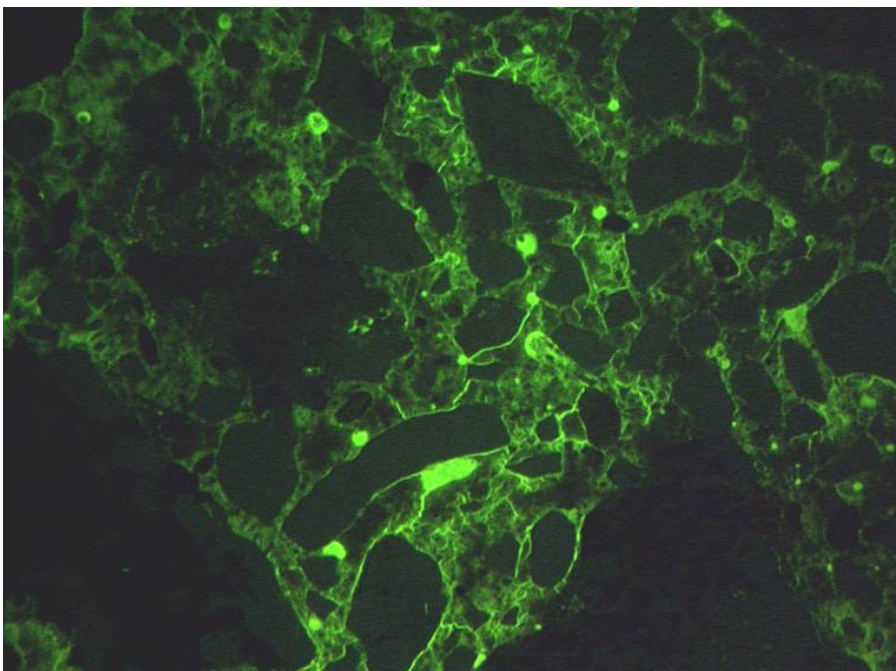
Kuva 21. Ohuthiekuva näytteestä Degussa 7. Sisäinen jälkihoitoaine TCC 735, 5 kg/m³. Kiihdytin Meyco SA 170, 5 %. Paikoin vähän säröilyä (säröilyindeksi 0,5), betoni on hieman epähomogeenista (homogeenisuusindeksi 1). Kuvan lyhemmän sivun pituus on 2,7 mm.



Kuva 22. Ohuthiekuva näytteestä Degussa 1. Kiihdytin Meyco SA 170, 7 %. Paikoin vähän säröilyä (säröilyindeksi 0,5), betoni on homogeenista (homogeenisuusindeksi 0). Kuvan lyhemmän sivun pituus on 2,7 mm.



Kuva 23. Ohuthiekuva näytteestä Degussa 1. Kiihdytin Pika Parmix 5 %. Paikoin vähän säröilyä (säröilyindeksi 0,5), betoni on homogeenista (homogeenisuusindeksi 0). Kuvan lyhemmän sivun pituus on 2,7 mm.



Kuva 24. Ohuthiekuva näytteestä Degussa 7. Sisäinen jälkihoitoaine TCC 735, 5 kg/m³. Kiihdytin Pika Parmix 10 %. Mikrohalkeamia on koko näytteen alueella ja paikoin erityisen tiheästi (säröilyindeksi 2). Betoni on hieman epähomogeenista (homogeenisuusindeksi 1). Kuvan lyhemmän sivun pituus on 2,7 mm.

Yhteenveto

Varhaisvaiheen jäykistymistä seurattiin tunkeutumisvastuksen kehittymisellä ja tärytysrajan ylittymisellä.

Meyco SA 170 -kiihdyttimellä tunkeutumisvastus kasvoi hyvin nopeasti kiihdytinlisäyksen jälkeen ja tärytysraja ylittyi 6–8 minuutin kuluttua.

Pika Parmix -kiihdyttimellä tärytysraja ylittyi hieman yli 20 minuutin kuluttua kiihdytinlisäyksestä (Paraisten Rapid ja SR).

Betonin tarttuvuutta luonnonkiveen varhaisvaiheessa selvitettiin ”ripustuskokeella”. Kokeessa betoni tiivistettiin kiihdytinlisäyksen jälkeen muottiin, jonka pohjalla oli luonnonkivilaatta. Betonikerroksen paksuus oli 90 mm.

Tiivistämisen jälkeen kappale (luonnonkivilaatta & betoni) poistettiin muotista, käännettiin ylösalaisin ja ripustettiin luonnonkivilaatan varaan 3 minuutin kuluttua kiihdytinlisäyksestä.

Alkalivapaalla Meyco SA 170 -kiihdyttimellä betoni pysyi kiinni (Paraisten Rapid ja SR).

Vesilasipohjaisella Pika Parmix -kiihdyttimellä betoni irtosi luonnonkivilaatasta noin 2 minuutin kuluttua ripustamisesta (Paraisten Rapid) ja heti ripustamisen jälkeen (SR).

Kokeessa käytettiin samaa 5 %:n kiihdytinannostusta. Meyco SA 170 -kiihdytin toimi merkittävästi paremmin kuin Pika Parmix -kiihdytin. Heikoin tulos saatiin yhdistelmällä SR-sementti & Pika Parmix -kiihdytin.

Koe osoitti, ettei tunkeutumisvastuksen kehittymisnopeudesta välttämättä voida suoraan päätellä betonin tartuntaominaisuutta (yhdistelmä SR-sementti & Pika Parmix -kiihdytin putosi ripustuskokeessa heti, vaikka tunkeutumisvastus oli hyvin lähellä tärytysrajaa 10 minuutin kohdalla).

Lämpötilan nousua seurattiin lämpöeristetyissä muoteissa. Betonit tiivistettiin kiihdytinlisäyksen jälkeen muotteihin, joissa oli semiadiabaattiset olosuhteet. Meyco SA 170 -kiihdyttimellä betonin lämpötila nousi 20 minuutin kuluessa runsaat 5 °C. Lämpötila pysyi tällä tasolla noin 3 tuntia. Tämän jälkeen lämpötila nousi vielä seuraavan 12 tunnin aikana (lämpötilan nousu oli yhteensä noin 10 °C). Sementti oli Paraisten Rapid.

Pika Parmix -kiihdyttimellä lämpötila nousi 3 ensimmäisen tunnin aikana alle +5 °C. Lämpötila jatkoi nousua noin 10 tuntiin saakka (lämpötila nousi yhteensä runsaat +15 °C).

Meyco SA 170 -kiihdyttimellä lämpötilan nopea nousu varhaisvaiheessa kuvaa hyvin kiihdyttimen aikaansaamaa sementin varhaisvaiheen reaktionopeutta.

Pika Parmix -kiihdyttimellä lämpötilan hidas nousu varhaisvaiheessa kuvaa hyvin kiihdyttimen aikaansaamaa sementin reaktionopeutta varhaisvaiheessa.

Lämpötilan kehitystä viileissä olosuhteissa seurattiin tiivistämällä 100 mm:n betonikerros heti kiihdytinlisäyksen jälkeen noin +10 °C lämpöistä betonilaattaa vasten. Betonin lämpötila oli heti tiivistämisen jälkeen noin +23 °C (Meyco SA 170 -kiihdytin) ja noin +20 °C (Pika Parmix -kiihdytin). Betonien lämpötilat laskivat noin +10 °C tasolle hieman yli 2 tunnin kuluessa.

Meyco SA 170 -kiihdyttimellä alkulämpötila oli sementin reaktionopeuden takia heti tiivistämisen jälkeen noin 5 °C korkeampi kuin Pika Parmix -kiihdyttimellä. Kummasakin tapauksessa lämpötila laski melko nopeasti ja samansuuntaisesti. Lämpötilan nousua ei juuri havaittu sen jälkeen, kun lämpötilat olivat laskeneet noin +10 °C tasolle.

Puristuslujuuden kehitystä seurattiin noin +20 °C lämpötilassa 100 mm:n särmäisillä koekappaleilla (Paraisten Rapid-sementti). Puristuslujuus määritettiin 1, 2, 7 ja 28 vrk:n iässä.

Meyco SA 170 -kiihdyttimellä (annostus 7 %) lujuus oli 1 ja 2 vrk:n iässä noin 10 ja 25 MPa. Lujuus oli 7 ja 28 vrk:n iässä noin 43 ja 50 MPa.

Pika Parmix -kiihdyttimellä (annostus 5 %) lujuus oli 1 ja 2 vrk:n iässä noin 17 ja 30 MPa. Lujuus oli 7 ja 28 vrk:n iässä noin 41 ja 48 MPa.

Puristuslujuus on 1 vrk:n iässä samansuuntainen betonien lämmön nousun kanssa (Pika Parmix -kiihdyttimellä oli voimakas lämmön nousu ensimmäisen vuorokauden aikana).

Puristuslujuuden kehitystä seurattiin noin +10 °C lämpötilassa 100 mm:n särmäisillä koekappaleilla (Paraisten Rapid ja SR). Puristuslujuus määritettiin 2, 6 ja 24 tunnin iässä.

Meyco SA 170 -kiihdyttimellä (annostus 5 %) lujuus oli 2, 6 ja 24 tunnin iässä noin 0,4, 0,6 ja 10 MPa (Paraisten Rapid).

Pika Parmix -kiihdyttimellä (annostus 8 %) lujuus oli 0,4, 1,5 ja 17 MPa.

Pika Parmix -kiihdyttimellä (annostus 5 %) 2 tunnin lujuus SR-sementin kanssa oli ainoastaan 0,1 MPa.

Tulosten mukaan edellytykset 20 MPa:n lujuuden saavuttamiseen tunneliolosuhteissa 24 tunnin iässä Meyco SA 170 -kiihdyttimellä ovat vähäiset. Pika Parmix -kiihdyttimellä kyseisen lujuuden saavuttaminen edellyttää kiihdytinannostusta, joka ylittää suositellun 5 %:n enimmäisannostuksen.

Kuivumiskutistuma määritettiin 40 x 40 x 160 mm³:n prismoilla 1–56 vrk:n iässä. Notkistin Glenium 51 ei lisännyt kutistumaa vertailubetoniin nähden. Myös kiihdyttimien vaikutus kuivumiskutistumaan oli vähäinen.

Vesitiiviyys määritettiin 100 mm:n särmäisillä koekappaleilla. Kiihdyttimiä sisältäneiden koekappaleiden vedentunkeumaluvut olivat 5–34 mm. Tämän mukaisesti betonit voidaan katsoa vesitiiviiksi.

Sisäinen säröily määritettiin 100 mm:n särmäisistä hyvin jälkihoidetuista koekappaleista lähinnä 7 vrk:n iässä. Koekappaleet säilytettiin +20 °C lämpötilassa.

Meyco SA 170 -kiihdyttimellä (annostus 7 %) säröilyindeksi oli enimmillään 1 (mikrosäröilyä oli koko näytteen alueella). Säröily oli sen verran vähäistä, että sen ei katsota heikentävän betonin vesitiiviyttä.

Pika Parmix -kiihdyttimellä (annostus 5 %) säröilyä esiintyi saman verran kuin Meyco SA 170 -kiihdyttimellä (7 %).

Ilman kiihdytintä valmistetuissa betoneissa ei esiintynyt säröilyä.

Vesi-sementtisuhde vaihteli 0,40–0,50 (kokonaisvesi-sementtisuhde). Vesi-sementtisuhteella ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta säröilyn määrään.

Säröily oli kuitenkin kaiken kaikkiaan sen verran vähäistä, että sen ei katsottu heikentävän merkittävästi vesitiiviyttä.

Sisäinen säröily määritettiin myös sivuilta lämpöeristetyistä kappaleista, jotka tiivistettiin noin +10 °C lämpöistä betonilaattaa vasten. Kappaleiden yläpintaan kohdistettiin noin 1,5 m/s tuulennopeus.

Meyco SA 170 -kiihdyttimellä (annostus 5 ja 7 %) säröilyindeksi oli enimmillään 0,5 (mikrohalkeamia oli vain satunnaisesti). Heikko tuuli ja lievästi kuivattavat olosuhteet eivät tämän mukaisesti suurentaneet säröilyindeksiä.

Myös Pika Parmix -kiihdyttimellä (annostus 5 %) säröilyindeksi oli 0,5. Heikon tuulen ja lievästi kuivattavien olosuhteiden ei havaittu vaikuttavan merkittävästi säröilyindeksiin.

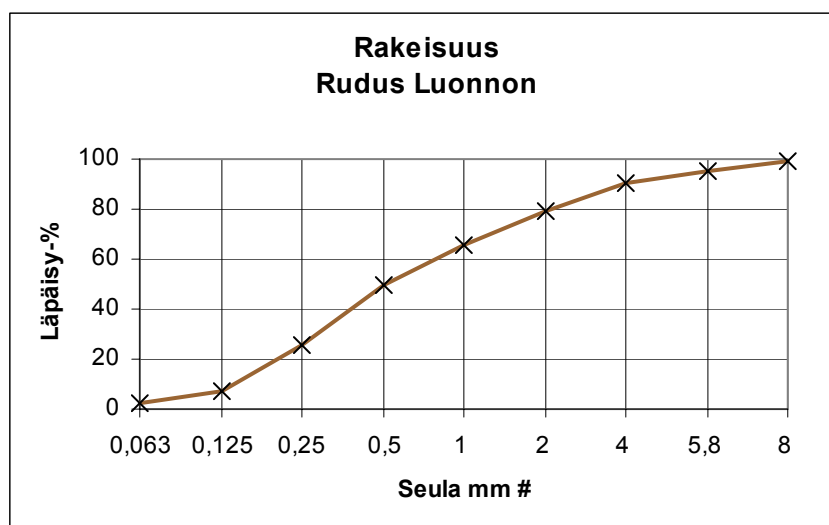
Pika Parmix -kiihdyttimen suurella annostuksella (annostus 10 %) säröilyindeksi oli 2 (mikrohalkeamia oli koko näytteen alueella ja paikoin erityisen tiheästi).

Hyvin ilmeisesti pieni tuuli ja lievästi kuivattavat olosuhteet eivät kokeissa suurentaneet säröilyindeksiä.

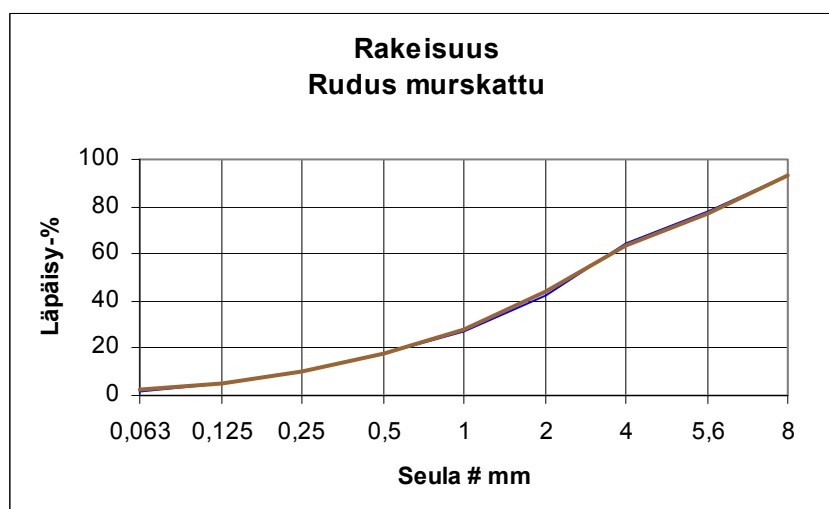
Liite 2: Semtu Oy

Kiviainekset

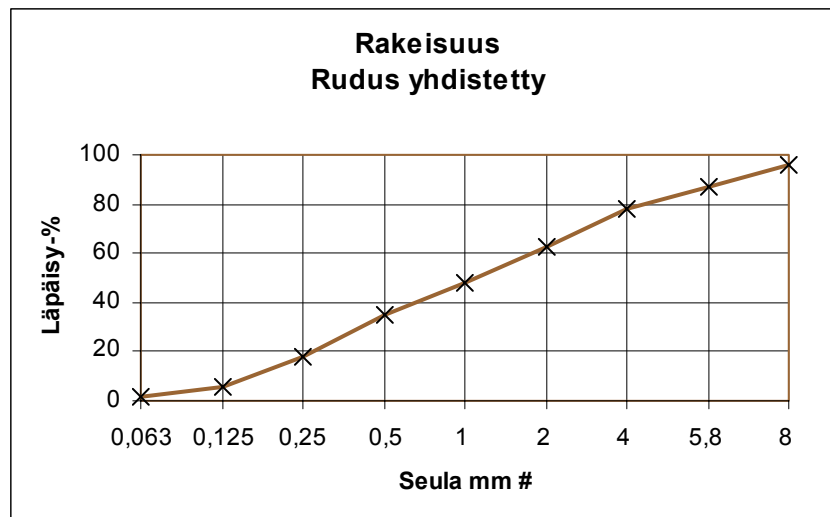
Kokeet tehtiin Lohja Rudus Oy:n tutkimusta varten toimittamalla murskatulla kiviaineksella ja luonnonkiviaineksella. Kiviainekset kuivattiin laboratoriossa ennen käyttöä. Murskatun kiviaineksen osuus koko kiviaineksesta oli 46 % luonnonkiviaineksen osuuden ollessa 54 %. Kiviainesten raekoko oli 8 mm. Kiviainesten rakeisuuskäyrät esitetään kuvissa 1–3.



Kuva 1. Luonnonkiviaineksen rakeisuus.



Kuva 2. Murskatun kiviaineksen rakeisuus.



Kuva 3. Yhdistetyn kiviaineksen rakeisuus.

Kiviaineksista määritettiin myös tiheys, vedenimu, litteysluku ja ominaispinta-ala. Arvot esitetään taulukoissa 1–4.

Taulukko 1. Kiviaineksen tiheys. Määrittäminen standardin SFS-EN 1097-6 ”Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 6: Kiintotiheyden ja vedenimeytymisen määrittäminen” kohtien 8 ja 9 mukaisesti.

Näyte	Kiintotiheys näennäinen P_a	Kiintotiheys uunikuivattu P_{rd}	Kiintotiheys kyll. ja pintak. P_{ssd}
Luonnon < 4 mm	2,71	2,68	2,69
Murske > 4 mm	2,69	2,64	2,66
Murske < 4 mm	2,72	2,68	2,69

Taulukko 2. Kiviaineksen raemuoto. Määrittäminen standardin SFS-EN 933-3 ”Kiviainesten geometrinen ominaisuuksien testaus. Osa 3: Raemuodon määrittäminen. Litteysluku” mukaisesti.

Näyte	Litteysluku Fl
Murskattu 8/10	10,2
Murskattu 6,3/8	17,5
Murskattu 5/6,3	17,3
Murskattu 4/5	18,0
Yhdistetty 4/8	16,5

Taulukko 3. Kiviaineksen vedenimu. Määrittäminen standardin SFS-EN 1097-6 mukaisesti.

Näyte	Absorptio p-%
Luonnon < 4 mm	0,4
Murske > 4 mm	0,8
Murske < 4 mm	0,5

Taulukko 4. Kiviaineksen ominaispinta-ala. Määrittäminen alle 0,063 mm:n hienoainekselle menetelmäkuvauksen PANK 2401 mukaisesti.

Näyte	Ominaispinta-ala m²/kg
Murske	2700
Luonnon kiviaines	4500

Betonimassat

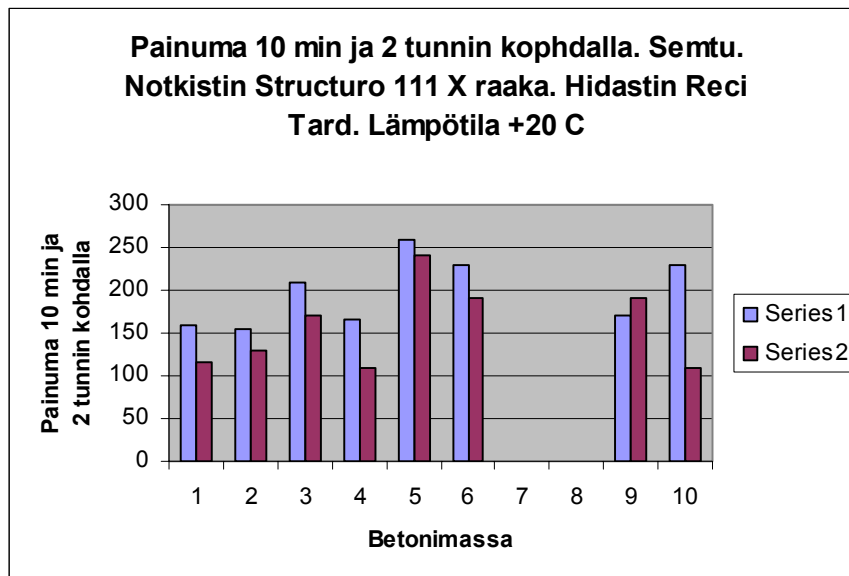
Notkistimena käytettiin polykarboksylaattipolymeeripohjaista notkistinta Structurite 111X, raaka. Lisäksi käytettiin Reci Tard -hidastinta 0,5 % sideaineen painosta. Hidas-timella betonimassan painuma saatiin halutulle 150 mm:n tasolle 2 tunnin kohdalla.

Betonimassat olivat seuraavat:

1. Paraisten Rapid 450 kg/m³. Notkistin 0,80–0,90 %. Hidastin 0,50 %.
Vesi-sementtisuhde 0,45.
2. Paraisten Rapid 505 kg/m³. Notkistin 0,80 %. Hidastin 0,50 %.
Vesi-sementtisuhde 0,40.
3. Paraisten Rapid 400 kg/m³. Notkistin 0,75 %. Hidastin 0,50 %.
Vesi-sementtisuhde 0,50.
4. Paraisten Yleissementti 440 kg/m³. Notkistin 0,75 %. Hidastin 0,50 %.
Vesi-sementtisuhde 0,45.
5. Embra Rapid 440 kg/m³. Notkistin 0,75 %. Hidastin 0,50 %.
Vesi-sementtisuhde 0,45.
6. Embra Rapid 415 kg/m³. Silika 25 kg/m³. Notkistin 0,85 %.
Hidastin 0,50 %. Vesi-sideainesuhde 0,45.
7. MEGA Kunda 440 kg/m³. Notkistin 0,75 %. Hidastin 0,50 %.
Vesi-sementtisuhde 0,45.
8. SR Lappeenranta. Notkistin 0,75 %. Hidastin 0,50 %.
Vesi-sementtisuhde 0,45.

Betonimassojen koostumus säädettiin siten, että painuma oli 2 tunnin kohdalla suuruusluokaltaan 150 mm. Kiviaineksia käytettiin sellaisenaan, eli niitä ei seulottu eri lajitteisiin. Tämän seurauksena betonimassojen painumissa oli koko työn ajan vaihtelua. Näin ollen betonimassojen notkeudesta tai notkistimen annostuksesta ei voida luotettavasti päätellä betonimassojen vedentarvetta.

Betonimassojen painumat 10 minuutin ja 2 tunnin kohdalla esitetään kuvassa 4.



Kuva 4. Betonimassojen painumat noin 10 minuutin ja 2 tunnin kohdalla.

Koekappaleita valmistettaessa betonit tiivistettiin sivumitaltaan 100 mm:n särmäisiin teräsmuotteihin noin 1 minuutin kuluessa kiihdytinlisäyksestä iskuporakoneeseen kiinnitetyllä noin 95 x 95 mm²:n kokoisella teräslevyllä (Kanko). Kutakin koekappaletta varten tehtiin oma kiihdytinlisäys ja sekoitus.

Kiihdyttimenä käytettiin nestemäistä alkalivapaata ruiskubetonin kiihdytintä Fast Set 2000 ja natriumsilikaattipohjaista (vesilasi) kiihdytintä Pika Parmix. Semtu Oy:n kirjallisessa annosteluohjeessa annostelumääräksi mainitaan 4–8 % sementtimäärästä. Edelleen todetaan, että yliannostelu alentaa loppulujuutta. Pika Parmix -kiihdyttimen käyttöohjeessa annetaan annostelumääräksi enintään 5 % sementtimäärästä.

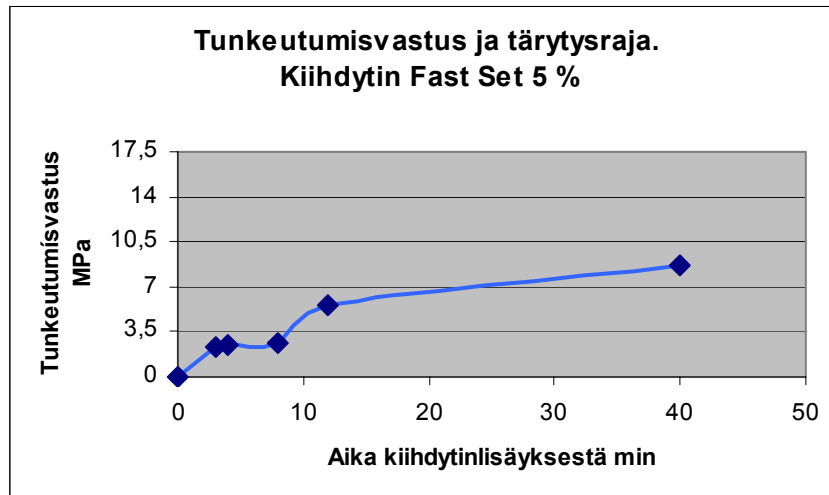
Betoneille tehtiin valikoidusti seuraavat määritykset:

- tunkeutumisvastus ja tärytysraja
- tarttuvuus luonnonkivilaattaan
- lämpötila semiadiabaattisissa olosuhteissa
- lämpötila tiivistettäessä kylmää pintaa vasten
- lujuus
- kuivumiskutistuma
- vedenpitävyys
- säröilyindeksi.

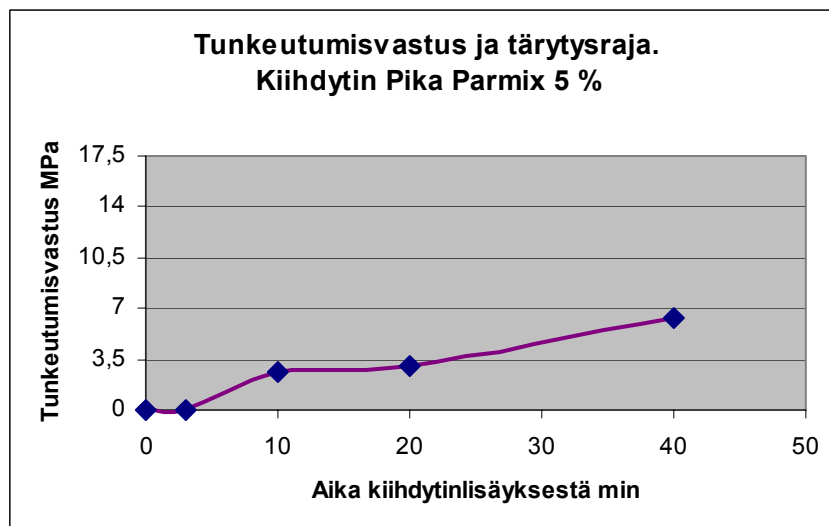
Tunkeutumisvastus ja tärytysraja

Tunkeutumisvastus ja tärytysraja määritettiin standardin SFS 5289 mukaisesti käyttäen ø 9 mm:n neuloja (kuva 9). Betoni tiivistettiin noin 1 minuutin kuluessa kiihdytinlisäyksestä 150 mm:n särmäiseen teräsmuottiin. Ensimmäinen mittausta tehtiin 2–3

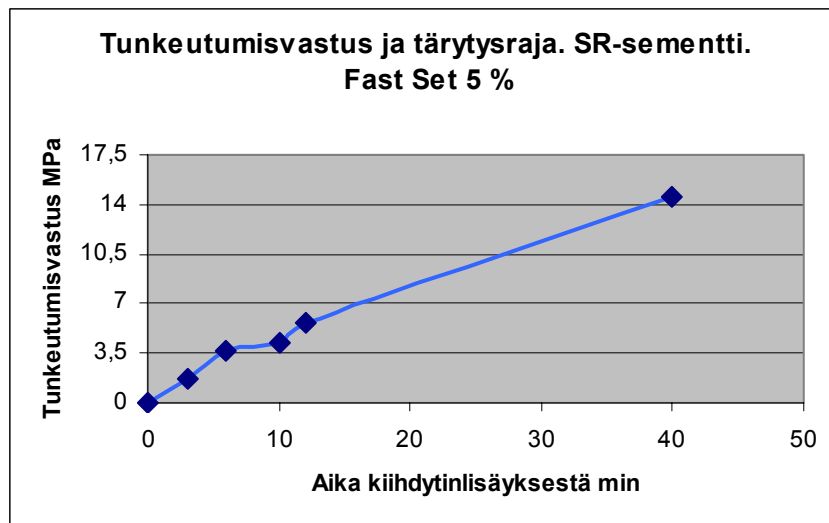
minuutin kuluttua kiihdytinlisäyksestä. Tunkeutumisvastuksen kehitys ja tärytysrajan saavuttaminen määritettiin Paraisten Rapid-sementillä (kuvat 5 ja 6) ja SR-sementillä (kuvat 7 ja 8).



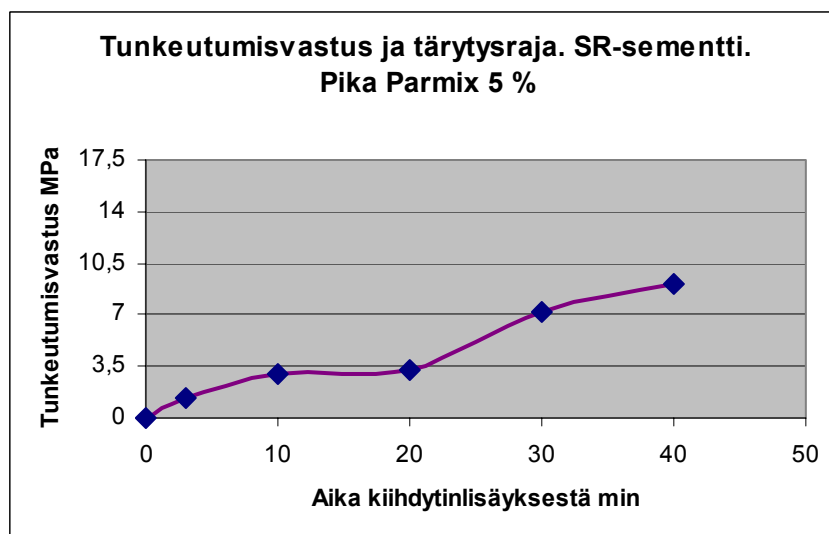
Kuva 5. Tunkeutumisvastuksen kehittyminen ja tärytysrajan (3,5 MPa) saavuttaminen. Fast Set 5 %. Betoni Semtu 1, notkistin Structuro 111 X raaka 0,95 %, hidastin Recitard 0,5 %. Betonimassan painuma ennen kiihdytinlisäystä oli noin 190 mm. Koe tehtiin noin +20 °C lämpötilassa.



Kuva 6. Tunkeutumisvastuksen kehittyminen ja tärytysrajan (3,5 MPa) saavuttaminen. Pika Parmix 5 %. Betoni Semtu 1, notkistin Structuro 111 X raaka 0,95 %, hidastin Recitard 0,5 %. Betonimassan painuma ennen kiihdytinlisäystä oli noin 190 mm. Koe tehtiin noin +20 °C lämpötilassa.



Kuva 7. Tunkeutumisvastuksen kehittyminen ja tärytysrajan (3,5 MPa) saavuttaminen. Fast Set 5 %. Betoni Sementu 10 (SR-sementti). Notkistin Structuro 111 X raaka 0,85 %. Betonimassan painuma ennen kiihdytinlisäystä oli noin 200 mm. Koe tehtiin noin +20 °C lämpötilassa. Betonimassa tehtiin ilman Recitard -hidastinta (aiheutti valesitoutumisen tai sen tapaisen ilmiön).



Kuva 8. Tunkeutumisvastuksen kehittyminen ja tärytysrajan (3,5 MPa) saavuttaminen. Pika Parmix 5 %. Betoni Sementu 10 (SR-sementti). Notkistin Structuro 111 X raaka 0,85 %. Betonimassan painuma ennen kiihdytinlisäystä oli noin 190 mm. Koe tehtiin noin +20 °C lämpötilassa. Betonimassa tehtiin ilman Recitard hidastinta (aiheutti jostain syystä valesitoutumisen).



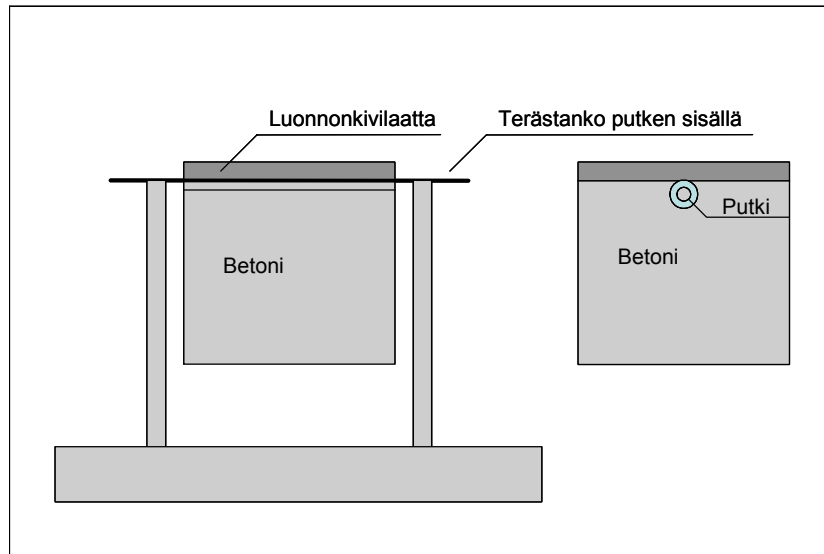
Kuva 9. Tunkeutumisvastuksen ja tärytysrajan määrittäminen.

Betonin tarttuvuus luonnonkivilaattaan

Betonin tarttuvuus luonnonkiveen kiihdyttimen lisäyksen jälkeen määritettiin seuraavasti:

- 100 mm:n särmäisen teräsmuotin pohjalle laitettiin 100 x 100 x 10 mm³:n kokoinen raamisahattu mattakosteaa luonnonkivilaatan (Kuru Grey) palanen.
- Luonnonkiven päälle asetettiin \varnothing 8 mm:n ontto teräsputki.
- Betoni tiivistettiin muottiin luonnonkivilaatan päälle välittömästi kiihdyttimen lisäyksen ja sekoituksen (20 sekuntia) jälkeen.
- Välittömästi tiivistämisen jälkeen betonikappale, ml. luonnonkivilaatta, poistettiin muotista ja käännettiin ylösalaisin (luonnonkivilaatta ylimpänä).
- Onton teräsputken läpi työnnettiin noin 200 mm pitkä, \varnothing 4 mm:n terästanko.
- Betonikappale ripustettiin 3 min kuluttua kiihdyttimen lisäyksestä kahden tuen väliin terästangon varaan.

Koemenettely esitetään kuvissa 10 ja 11. Koe tehtiin Paraisten Rapid- ja SR-sementillä. Tulokset esitetään taulukoissa 5 ja 6.



Kuva 10. Koejärjestely (teline) betonin tarttuvuuden määrittämiseksi kiihdytinlisäyksen jälkeen. Betonikappaleet ripustettiin 3 minuutin kuluttua kiihdytinlisäyksestä. Betonikerroksen korkeus on 90 mm.



Kuva 11. Betonikappale on ripustettu 3 minuutin kuluttua kiihdytinlisäyksestä.

Taulukko 5. Betonin tarttuvuus luonnonkivilaattaan. Betoni Semtu 1 (painuma ennen kiihdytinlisäystä noin 190 mm). Lämpötila noin +20 °C.

Betoni/Kiihdytin	Kiihdytinlisäyksen ajankohta min	Ripustusajankohta min	Havainnot betonista
Semtu 1 Fast Set 5 %	0	3	Pysyi kiinni
Semtu 1 Pika Parmix 5 %	0	3	Irtosi yhden minuutin kuluttua

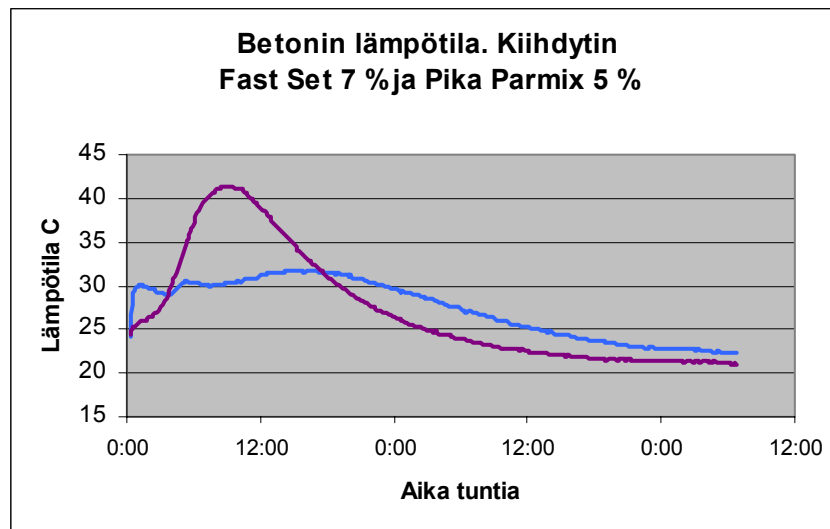
Taulukko 6. Betonin tarttuvuus luonnonkivilaattaan. Betoni Semtu 10 (painuma ennen kiihdytinlisäystä noin 200 mm). Lämpötila noin +20 °C. Betonimassa tehtiin ilman Reci Tard -hidastinta (aiheutti jostain syystä valesitoutumisen).

Betoni/Kiihdytin	Kiihdytinlisäyksen ajankohta min	Ripustusajankohta min	Havainnot betonista
Semtu 10 Fast Set 5 %	0	3	Pysyi kiinni
Semtu 10 Pika Parmix 5 %	0	3	Irtosi noin 5 sekunnin kuluttua

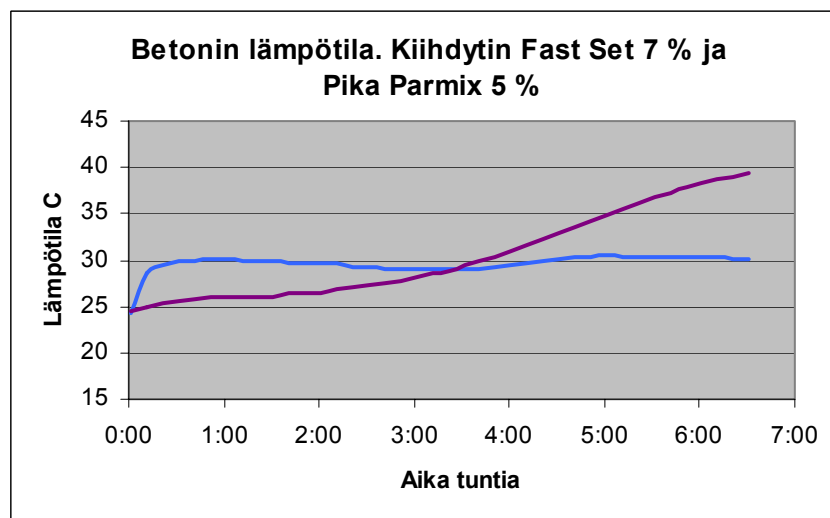
Kovettumisen aikaiset lämpötilat

Semiadiabaattiset olosuhteet

Betonimassa (Semtu 1) tiivistettiin heti kiihdytinlisäyksen jälkeen pieneen lämpöeristettyyn muottiin. Betonien lämpötilat esitetään kuvissa 12 ja 13.



Kuva 12. Betonin lämpötilän kehitys noin 60 tunnin ikään saakka. Betoni (Semtu 1) on tiivistetty pieneen lämpöeristettyyn muottiin noin 1 min kuluessa kiihdytinlisäyksestä. Kiihdytin Fast Set 7 % (alempi sininen käyrä). Kiihdytin Pika Parmix 5 % (ylempi punainen käyrä).

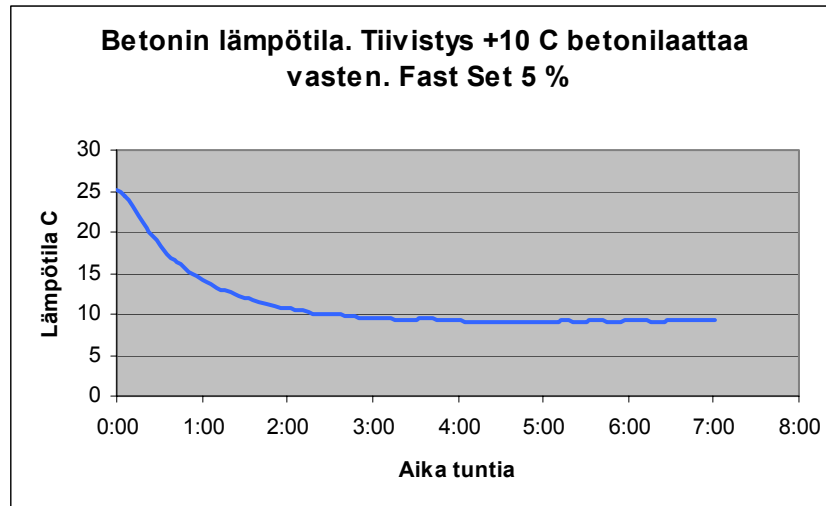


Kuva 13. Betonin lämpötilän kehitys noin 7 tunnin ikään saakka. Suurennos kuvan 12 lämpötilakäyrien alkuosasta. Kiihdytin Fast Set 7 % (sininen käyrä). Kiihdytin Pika Parmix 5 % (punainen käyrä).

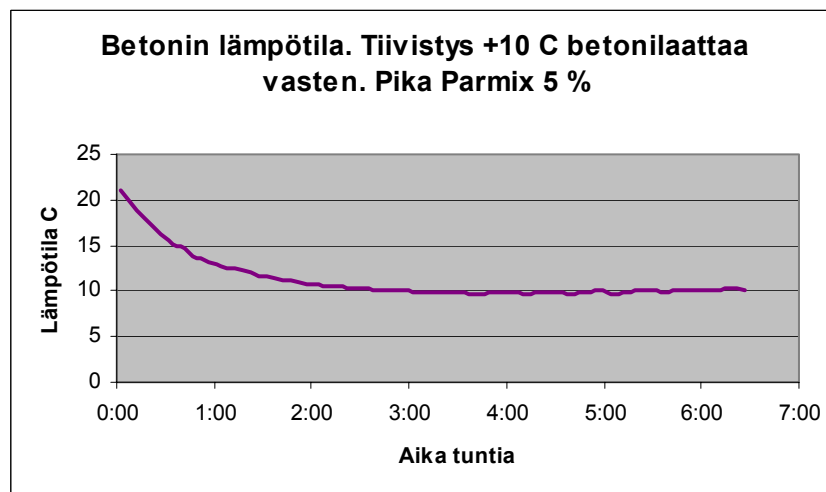
Kylmää betonilaattaa vasten tiivistetty betoni

Betonimassa (Semtu 1) tiivistettiin heti kiihdytinlisäyksen jälkeen betonilaattaa vasten pieniin sivuilta lämpöeristettyihin kehikoihin. Huoneen lämpötila oli säädetty +10 °C tasolle. Betonikappaleiden koko oli noin 100 x 100 x 100 mm³.

Lämpötila-anturit asennettiin betonikerroksen paksuuden puoliväliin. Betonikappaleiden yläpintaan kohdistettiin tuulen nopeus 1,0–1,5 m/s. Betonikappaleiden yläpuolisen ilman suhteellinen kosteus säädettiin välille 75–85 % RH. Tyypilliset betonikappaleiden lämpötilat esitetään kuvissa 14 ja 15.



Kuva 14. Betonin (Semtu 1) lämpötila. Kiihdytin Fast Set 5 % sideaineesta. 100 mm:n betonikerros on tiivistetty betonilaattaa vasten. Huoneen lämpötila oli noin +10 °C.



Kuva 15. Betonin (Semtu 1) lämpötila. Kiihdytin Pika Parmix 5 %. 100 mm:n betonikerros on tiivistetty betonilaattaa vasten. Huoneen lämpötila oli noin +10 °C.

Puristuslujuus

Ilman kiihdytintä valmistetut koekappaleet säilytettiin noin +20 °C lämpötilassa ja vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa. Puristuslujuus ja tiheys määritettiin 100 mm:n särmäisillä kuutioilla 1, 2, 7 ja 28 vrk:n iässä, taulukot 7 ja 8.

Taulukko 7. Puristuslujuus. Ilman notkistinta ja kiihdytintä valmistettu vertailubetoni. Paraisten Rapid. 100 mm:n särmäiset koekappaleet.

Betoni massa Sementti 1	Puristuslujuus MPa ja tiheys kg/m ³			
	1 vrk	2 vrk	7 vrk	28 vrk
Ilman notkistinta, hidastinta ja kiihdytintä	26,0 2290	37,5 2310	45,0 2310	46,5 2300

Taulukko 8. Puristuslujuus. Betonimassa Sementti 1. Paraisten Rapid. Valmistettu ilman kiihdytintä. 100 mm:n särmäiset koekappaleet.

Betoni massa Sementti 1	Puristuslujuus MPa ja tiheys kg/m ³			
	1 vrk	2 vrk	7 vrk	28 vrk
Notkistin Structuro 111x 0,80 %. Hidastin Reci Tard 0,5 %. Ilman kiihdytintä	3,00 2290	33,5 2330	44,5 2280	56,5 2300

Kiihdytintä sisältäneet koekappaleet säilytettiin noin +10 °C lämpötilassa muovipussissa. Puristuslujuus määritettiin 100 mm:n särmäisillä kuutioilla 1, 2, 7 ja 28 vrk:n iässä, taulukot 9–11.

Taulukko 9. Puristuslujuus. Betonimassa Sementti 1. Paraisten Rapid. Kiihdytin Fast Set ja Pika Parmix. 100 mm:n särmäiset koekappaleet. Säilytys noin +10 °C lämpötilassa.

Betoni massa Sementti 1 (sis. notkistin ja hidastin)	Puristuslujuus MPa ja tiheys kg/m ³			
	1 vrk	2 vrk	7 vrk	28 vrk
Kiihdytin Fast Set 7 % sideaineesta	7,0 2270	20,0 2290	39,5 2220	53,0 2310
Kiihdytin Pika Parmix 5 % sideaineesta	17,5 2330	33,0 2330	45,1 2320	48,0 2210

Taulukko 10. Puristuslujuus nuorella iällä. Betonimassa Semtu 1. Paraisten Rapid. Kiihdytin Fast Set ja Pika Parmix. 100 mm:n särmäiset koekappaleet. Säilytys noin +10 °C lämpötilassa.

Betonimassa Semtu 1 (sis. notkistin ja hidastin)	Puristuslujuus MPa ja tiheys kg/m³		
	2 tuntia	6 tuntia	24 tuntia
Kiihdytin Fast Set 5 % sideaineesta	0,3 2280	0,4 2350	7,0 2270
Kiihdytin Pika Parmix 8 % sideaineesta	0,6 2380	2,7 2340	20,0 2300

Taulukko 11. Puristuslujuus nuorella iällä. Betonimassa Semtu 10. SR-sementti. Kiihdytin Fast Set ja Pika Parmix. 100 mm:n särmäiset koekappaleet. Säilytys noin +10 °C lämpötilassa. Painuma ennen kiihdytinlisäystä 190 mm. Betonimassa tehtiin ilman Reci Tard -hidastinta (aiheutti valesitoutumisen).

Betonimassa Semtu 10 (sis. notkistin ja hidastin)	Puristuslujuus MPa ja tiheys kg/m³		
	2 tuntia	6 tuntia	24 tuntia
Kiihdytin Fast Set 5 % sideaineesta	0,5 2280	1,3 2350	14,8 2270
Kiihdytin Pika Parmix 5 % sideaineesta	0,1 2380	0,8 2340	13,2 2300

Kuivumiskutistuma

Kuivumiskutistuma määritettiin 40 x 40 x 160 mm³:n prismoilla (kolmen prisman keskiarvo) 1–56 vrk:n iässä. Prismat säilytettiin 1–7 vrk muovipusseissa. Tämän jälkeen säilytysolosuhteet olivat noin +20 °C lämpötila ja noin 40 %:n suhteellinen kosteus.

Muovipussit säilytettiin vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa. Kutistumat esitetään taulukossa 12.

Taulukko 12. Betonien kutistumat määritettynä 40 x 40 x 160 mm³:n prismoilla.

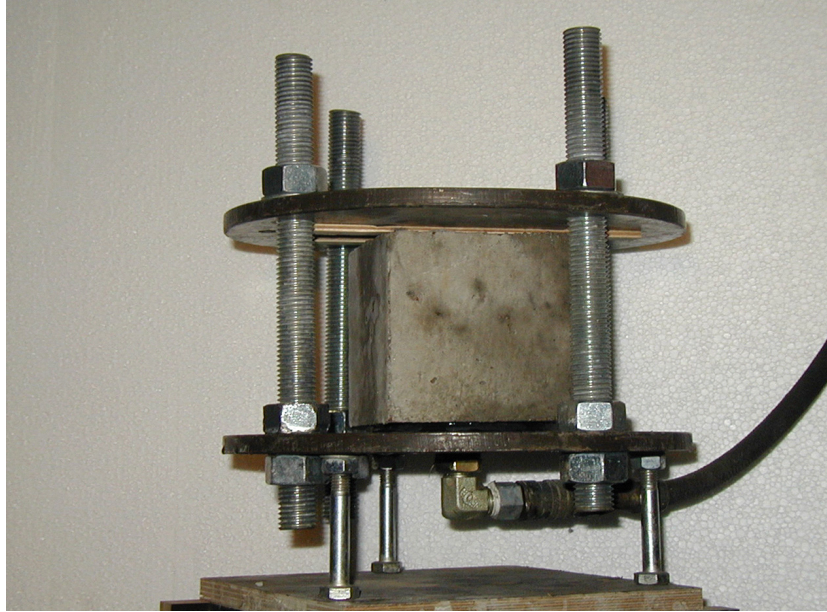
Betonimassa Semtu 1	Kutistuma %		
	1–7 vrk	7–56 vrk	1–56 vrk
Vertailu Ilman notkistinta	0,06	0,73	0,79
Notkistin Structuro 111x, 0,80 % Hidastin Recitard 0,5 % Ilman kiihdytintä	0,23	0,80	1,03
Kiihdytin Fast Set 7 % sideaineesta	0,04	0,92	0,96
Kiihdytin Pika Parmix 5 % sideaineesta	0,10	0,83	0,93

Vedenpitävyys

Vedenpitävyys määritettiin standardin SFS-EN 12390-8 mukaisesti 100 mm:n särmäisillä kuutioilla 28 vrk:n iässä (kuva 16). Vedentunkeuman maksimisyvydet esitetään taulukossa 7.

Vedenpitävyys määritettiin kohdistamalla koekappaleen alapintaan 5 baarin suuruinen paine 72 tunnin ajan. Tämän jälkeen vedenpaineen vaikutuksen alaisena ollut pinta pyyhittiin ylimääräisen veden poistamiseksi ennen koekappaleen halkaisua kohtisuoraan vedenpaineen vaikutukselle altista pintaa vastaan.

Heti, kun halkaisupinta oli kuivunut sen verran, että veden tunkeutumisrintama oli selvästi havaittavissa, merkittiin vesirintaman sijainti koekappaleeseen. Tämän jälkeen mitattiin suurin tunkeutumasyvyys koalueen alla ja merkittiin se muistiin millimetrin tarkkuudella.



Kuva 16. Vesitiiviyskoekappale kiinnitettynä testauslaitteistoon. Koekappaleen alapintaan kohdistettiin standardin mukainen 5 baarin paine 72 tunnin ajan.

Taulukko 13. Vedentunkeuman maksimisyvydet.

Betoni Semtu 1	Vedentunkeutuman maksimisyvyys mm	Tiheys kg/m ³
Ilman notkistinta ja kiihdytintä, vertailu	24	2300
Notkistin Structuro 111x, 0,80 % Hidastin Reci Tard 0,5 % Ilman kiihdytintä	16	2330
Kiihdytin Fast Set ¹⁾ , 5 %	14	2260
Kiihdytin Fast Set, 7 %	24	2320
Kiihdytin Pika Parmix, 5 %	25	2290
Kiihdytin Pika Parmix ¹⁾ , 10 %	9	2250

¹⁾Ikä kokeen alkaessa noin 42 vrk

Vesi-sementtisuhteen ja sementtilaadun vaikutus mikrosäröilyyn

Yleiskuvan saamiseksi vesi-sideainesuhteen ja sementtityypin vaikutuksesta mikrosäröilyyn sekoitettiin betonimassoihin Fast Set- ja Pika Parmix -kiihdytintä.

Betonit tiivistettiin sivumitaltaan 100 mm:n särmäisiin teräsmuotteihin noin 1 minuutin kuluessa kiihdytinlisäyksestä iskuporakoneeseen kiinnitetyllä noin 95 x 95 mm²:n kokoisella teräslevyllä (Kanko).

Fast Set -kiihdyttimen annostus oli 7 % sideaineen painosta. Pika Parmix -kiihdyttimen annostus oli 5 % sideaineen painosta riippumatta betonimassan notkeudesta.

Koekappaleet säilytettiin kuivumiselta suojattuna. Koekappaleista irrotettiin sahaamalla 1–2 vrk:n ja noin 28 vrk:n iässä näytepalat mikrorakennetutkimuksia varten. Näytepaloista valmistettiin mikrorakenneanalyysiä varten 35 x 55 mm² x 25 µm:n kokoiset petrografiset ohuthieet betonin pinnalta lähtien noin 55 mm:n syvyydelle.

Arvostelussa käytettiin seuraavaa säröilyindeksiä:

- 0, mikrohalkeamia on vain satunnaisesti.
- 1, mikrohalkeamia on koko näytteen alueella.
- 2, mikrohalkeamia on koko näytteen alueella ja paikoin erityisen tiheästi.
- 3, mikrohalkeamia on erityisen tiheästi ja ne ovat tavallista leveämpiä.

Mikrorakenneanalyysissä tehdyt havainnot säröilystä ja betonin homogeenisuudesta esitetään taulukoissa 14–22 ja kuvissa 17–21. Kuvissa kuvan lyhyt sivu vastaa 2,7 mm:ä näytteessä.

Taulukko 14. Säröilyindeksi. Betoni Semtu 1. Säilytys vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa.

Semtu 1 Paraisten Rapid W/c = 0,45	Säröilyindeksi (1–2 vrk iässä)	Säröilyindeksi (yli 28 vrk iässä)
Ilman kiihdytintä	0	0
Fast Set 7 %	0,5	0,5
Pika Parmix 5 %	0,5	1

Taulukko 15. Säröilyindeksi. Betoni Semtu 2. Säilytys vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa.

Semtu 2 Paraisten Rapid W/c = 0,40	Säröilyindeksi (1–2 vrk iässä)	Säröilyindeksi (yli 28 vrk iässä)
Ilman kiihdytintä	0	0
Fast Set 7 %	0,5	0,5
Pika Parmix 5 %	1,0	1,0

Taulukko 16. Säröilyindeksi. Betoni Semtu 3. Säilytys vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa.

Semtu 3 Paraisten Rapid W/c = 0,50	Säröilyindeksi (1–2 vrk iässä)	Säröilyindeksi (yli 28 vrk iässä)
Ilman kiihdytintä	0	
Fast Set 7 %	0	0
Pika Parmix 5 %	1	

Taulukko 17. Säröilyindeksi. Betoni Semtu 4. Säilytys vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa.

Semtu 4 Yleisementti W/c = 0,45	Säröilyindeksi (1–2 vrk iässä)	Säröilyindeksi (yli 28 vrk iässä)
Ilman kiihdytintä	0	
Fast Set 7 %	0	0
Pika Parmix 5 %	0	

Taulukko 18. Säröilyindeksi. Betoni Semtu 5. Säilytys vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa.

Semtu 5 Embra Rapid W/c = 0,45	Säröilyindeksi (1–2 vrk iässä)	Säröilyindeksi (yli 28 vrk iässä)
Ilman kiihdytintä	0	
Fast Set 7 %	0	0,5
Pika Parmix 5 %	0,5	

Taulukko 19. Säröilyindeksi. Betoni Semtu 6. Säilytys vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa.

Semtu 6 Embra Rapid +silika W/c = 0,45	Säröilyindeksi (1–2 vrk iässä)	Säröilyindeksi (yli 28 vrk iässä)
Ilman kiihdytintä	0	
Fast Set 7 %	0	0,5
Pika Parmix 5 %	1	

Taulukko 20. Säröilyindeksi. Betoni Semtu 9. Säilytys vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa.

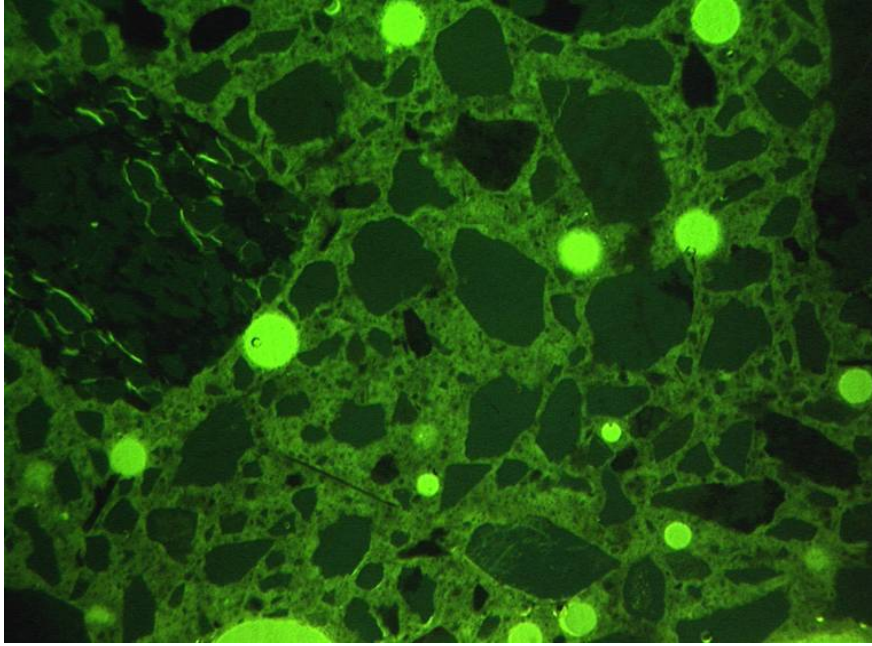
Semtu 9 MEGA sementti W/c = 0,45	Säröilyindeksi (1–2 vrk iässä)	Säröilyindeksi (yli 28 vrk iässä)
Ilman kiihdytintä	0	
Fast Set 7 %	0	0,5
Pika Parmix 5 %	0,5	

Taulukko 21. Säröilyindeksi. Betoni Semtu 10. Säilytys vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa.

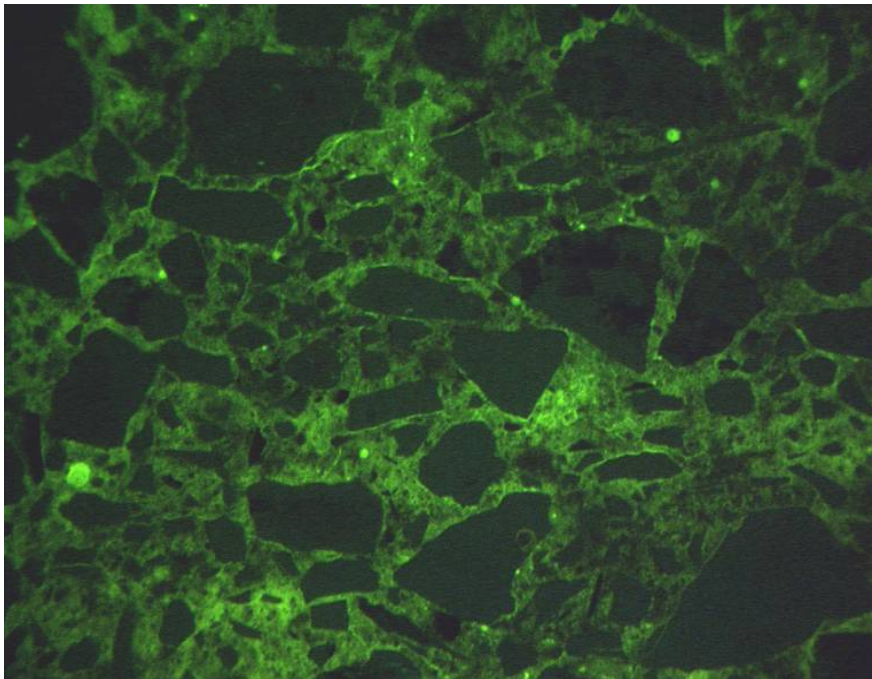
Semtu 10 SR-sementti W/c = 0,45	Säröilyindeksi (1–2 vrk iässä)	Säröilyindeksi (yli 28 vrk iässä)
Ilman kiihdytintä	0	
Fast Set 7 %	0	0
Pika Parmix 5 %	1	

Taulukko 22. Ohuthieistä määritetyt säröilyindeksit. Kooste taulukoista 14–21.

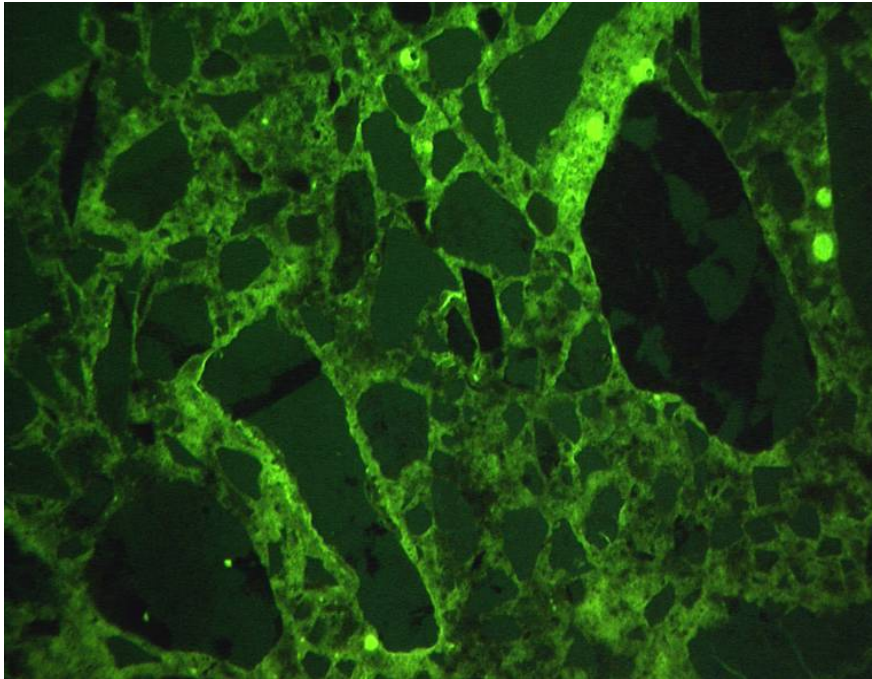
	1 Par R	2 Par R	3 Par R	4 Yleis	5 Embra	6 Embra Silika	9 MEGA	10 SR
Ikä 1–2 vrk								
Ilman kiihd.	0	0	0	0	0	0	0	0
Fast Set 7 %	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0
Pika Parmix 5 %	0,5	1	1	0	0,5	1	0,5	1
Ikä yli 28 vrk								
Ilman kiihd.	0	0						
Fast Set 7 %	0,5	0,5	0	0	0,5	0,5	0,5	0
Pika Parmix 5 %	1	1						



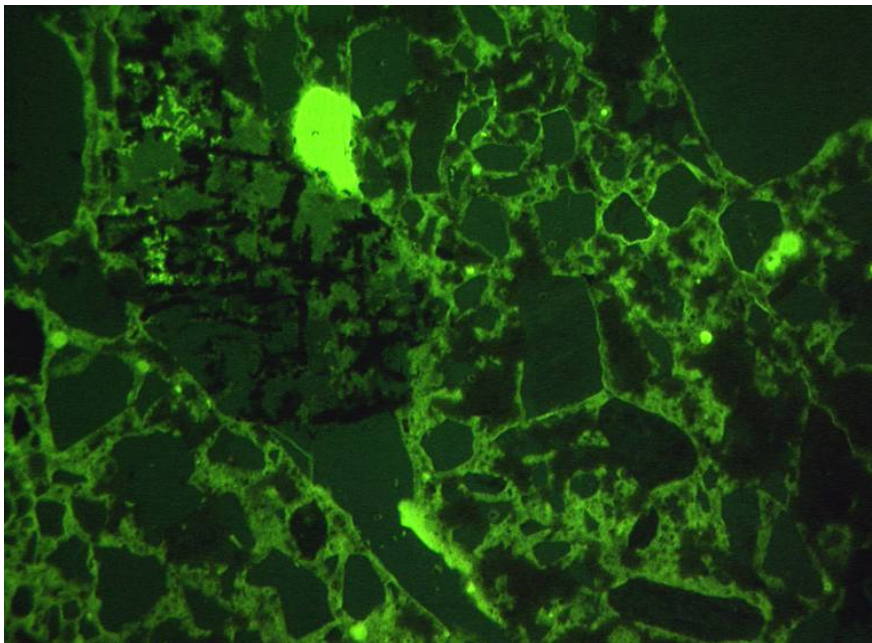
Kuva 17. Betoni Semtu 1 ilman kiihdytintä. Ikä 1–2 vrk. Säröjä ei ole havaittavissa. Kuivuminen on estetty koekappaleen tiivistämisen jälkeen.



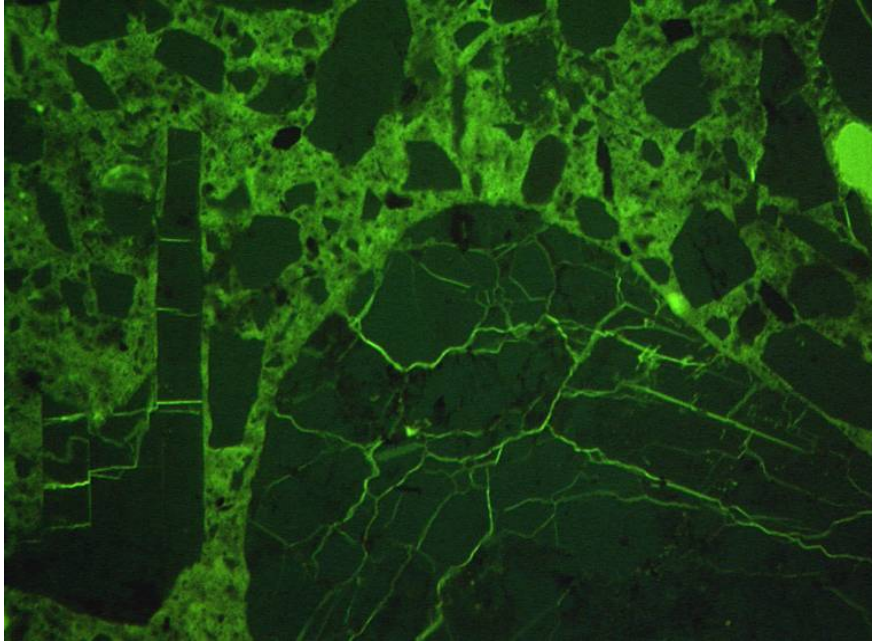
Kuva 18. Betoni Semtu 1. Kiihdytin Fast Set 7 %. Ikä 1–2 vrk. Paikoin vähän säröilyä (säröilyindeksi 0,5). Kuivuminen on estetty koekappaleen tiivistämisen jälkeen.



Kuva 19. Betoni Semtu 1. Kiihdytin Pika Parmix 5 %. Ikä 1–2 vrk. Paikoin vähän säröilyä (säröilyindeksi 0,5). Kuivuminen on estetty koekappaleen tiivistämisen jälkeen.



Kuva 20. Betoni Semtu 2. Kiihdytin Pika Parmix 5 %. Ikä 1–2 vrk. Säröilyä on koko näytteen alueella (säröilyindeksi 1). Kuivuminen on estetty koekappaleen tiivistämisen jälkeen.



Kuva 21. Betoni Semtu 4. Kiihdytin Fast Set 7 %. Ikä 1–2 vrk. Säröilyä ei ole havaittavissa (säröilyindeksi 0). Kuivuminen on estetty koekappaleen tiivistämisen jälkeen.

Kylmää betonilaattaa vasten tiivistetyt betonit

Betoni (Semtu 1) tiivistettiin heti kiihdytinlisäyksen jälkeen betonilaattaa vasten pieniin sivuilta lämpöeristettyihin kehikoihin. Huoneen lämpötila oli säädetty +10 °C tasolle. Betonikappaleiden koko oli noin 100 x 100 x 100 mm³.

Lämpötila anturit asennettiin betonikerroksen paksuuden puoliväliin. Betonikappaleiden yläpintaan kohdistettiin tuulen nopeus 1,0–1,5 m/s. Betonikappaleiden yläpuolisen ilman suhteellinen kosteus säädettiin välille 75 ja 85 % RH.

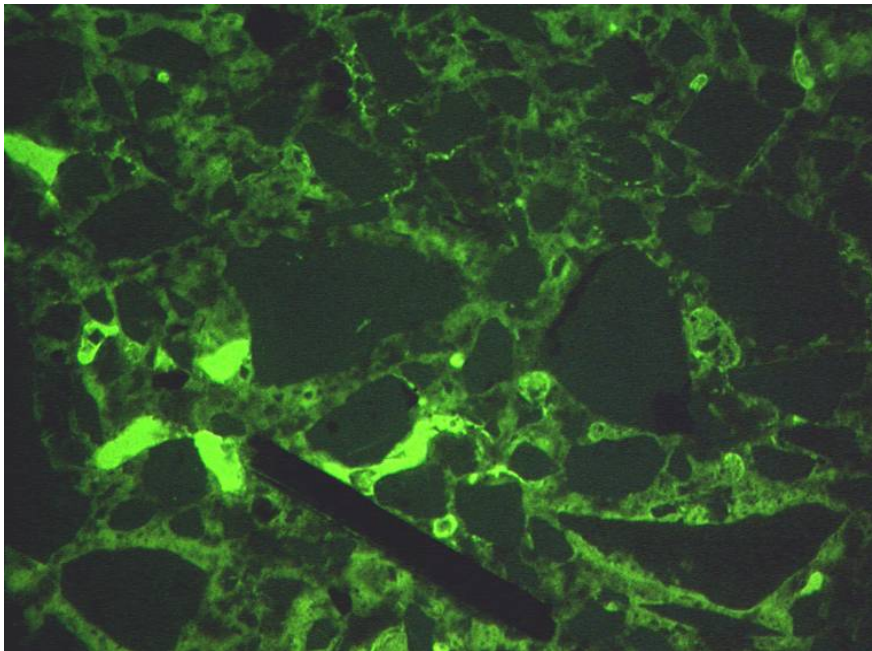
Kiihdytinannostukset olivat seuraavat:

- Fast Set, 5 % sideaineesta
- Fast Set, 7 % sideaineesta
- Pika Parmix 5 % sideaineesta
- Pika Parmix 10 % sideaineesta.

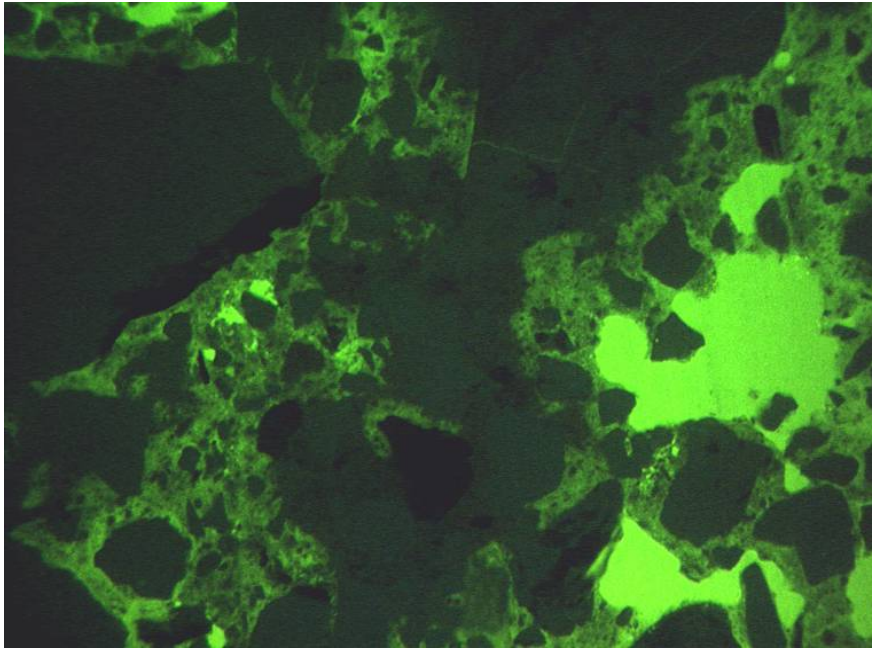
Mikrorakenneanalyysiä varten koekappaleista valmistettiin 35 x 55 mm² x 25 µm:n kokoiset petrografiset ohuthieet betonin pinnalta lähtien noin 55 mm:n syvyydelle. Mikrorakenneanalyysissä tehdyt havainnot esitetään taulukossa 23 sekä kuvissa 22–25.

Taulukko 23. Säröilyindeksi. Betoni Semtu 1. Ohuthieet on valmistettu 7 vrk:n iässä. Betonit on tiivistetty noin +10 °C lämpöistä betonilaattaa vasten sivuilta lämpöeristettyihin 100 x 100 x 100 mm³:n muotteihin. Ilman suhteellinen kosteus oli noin 75–85 % RH. Tuulen nopeus oli noin 1,5 m/s.

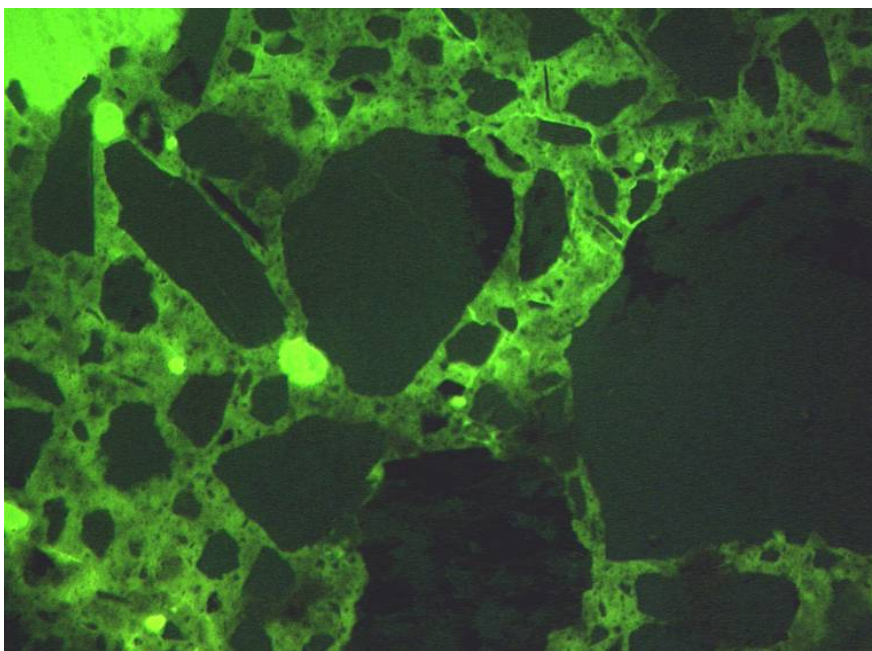
Semtu 1 Paraisten Rapid W/c = 0,45	Säröilyindeksi (1–2 vrk iässä)
Fast Set 5 %	0,5
Fast Set 7 %	0
Pika Parmix 5 %	0,5
Pika Parmix 10 %	2,0



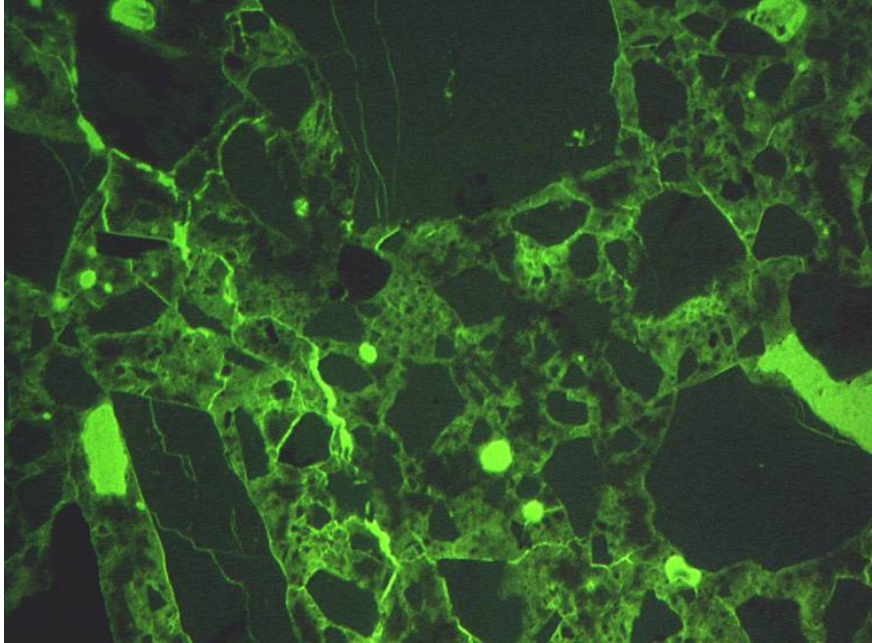
Kuva 22. Ohuthiekuva näytteestä Semtu 1. Kiihdytin Fast Set 5 %. Paikoin vähän säröilyä (säröilyindeksi 0,5), betoni on epähomogeenista (homogeenisuusindeksi 1,5). Kuvan lyhemmän sivun pituus on 2,7 mm.



Kuva 23. Ohuthiekuva näytteestä Semtu 1. Kiihdytin Fast Set 7 %. Säröilyä ei esiinny (säröilyindeksi 0), betoni on hieman epähomogeenista (homogeenisuusindeksi 1). Kuvan lyhemmän sivun pituus on 2,7 mm.



Kuva 24. Ohuthiekuva näytteestä Semtu 1. Kiihdytin Pika Parmix 5 %. Paikoin vähän säröilyä (säröilyindeksi 0,5), betoni on verraten homogeenista (homogeenisuusindeksi 0,5). Kuvan lyhemmän sivun pituus on 2,7 mm.



Kuva 25. Ohuthiekuva näytteestä Semtu 1. Kiihdytin Pika Parmix 10 %. Mikrohalkeamia on koko ohuthieen alueella ja paikoin erityisen tiheästi (säröilyindeksi 2). Betoni on hieman epähomogeenista (homogeenisuusindeksi 0,5). Kuvan lyhemmän sivun pituus on 2,7 mm.

Yhteenveto

Betonimassojen painumaksi 2 tunnin kohdalla asetettiin arvo noin 150 mm. Structurite 111x (raaka) -notkistimen vaikutusaika oli sen verran rajallinen, että sen ohella käytettiin Reci Tard -hidastinta 0,5 % sideaineen painosta. Hidastinta ei käytetty kaikissa SR-sementtiä sisältäneissä betonimassoissa valesitoutumisen vuoksi.

Varhaisvaiheen jäykistymistä seurattiin tunkeutumismassan kehittymisellä ja tärytysrajan saavuttamisella.

Fast Set -kiihdyttimellä tunkeutumismassan kasvoi nopeasti heti kiihdyttimisen jälkeen, ja tärytysraja ylittyi 6–9 minuutin kuluttua (Paraisten Rapid ja SR).

Pika Parmix -kiihdyttimellä tärytysraja ylittyi hieman yli 20 minuutin kuluttua (Paraisten Rapid ja SR).

Betonin tarttuvuutta luonnonkiveen varhaisvaiheessa selvitettiin ”ripustuskokeella”. Kokeessa betoni tiivistettiin kiihdyttimisen jälkeen muottiin, jonka pohjalla oli luonnonkivilaatta. Betonikerroksen paksuus oli 90 mm. Tiivistämisen jälkeen kappale (luonnonkivilaatta & betoni) poistettiin muotista, käännettiin ylösalaisin ja ripustettiin luonnonkivilaatan varaan 3 minuutin kuluttua kiihdyttimisen jälkeen.

Alkalivapaalla Fast Set -kiihdyttimellä betonikerros pysyi kiinni (Paraisten Rapid ja SR).

Vesilasipohjaisella Pika Parmix -kiihdyttimellä betoni irtosi luonnonkivilaatasta noin 60 sekunnin kuluttua ripustamisesta (Paraisten Rapid) ja noin 5 sekunnin kuluttua ripustamisesta (SR).

Kokeessa käytettiin samaa 5 %:n kiihdytinannostusta. Ripustuskokeessa Fast Set -kiihdytin oli merkittävästi parempi kuin Pika Parmix -kiihdytin. Heikoin tulos saatiin yhdistelmällä Pika Parmix -kiihdytin ja SR-sementti.

Koe osoitti, ettei tunkeutumisvastuksen kehittymisnopeudesta välttämättä voida suoraan päätellä betonin tarttuvuusominaisuutta (yhdistelmä Pika Parmix -kiihdytin & SR-sementti putosi ripustuskokeessa varsin nopeasti, vaikka tunkeumavastus oli jo 10 minuutin kohdalla hyvin lähellä tärytysrajaa).

Lämpötilan nousua seurattiin lämpöeristetyissä muoteissa. Betonit tiivistettiin kiihdyttinisäyksen jälkeen muotteihin, joissa oli semiadiabaattiset olosuhteet. Fast Set -kiihdyttimellä betonin lämpötila nousi 20 minuutin kuluessa noin 5 °C. Lämpötila pysyi tällä tasolla noin 10 tunnin kohdalle. Tämän jälkeen lämpötila nousi lievästi 10 ja 20 tunnin välillä (lämpötilan nousu oli yhteensä vajaat +10 °C). Sementti oli Paraisten Rapid -sementti.

Pika Parmix -kiihdyttimellä lämpötila nousi tasaisesti 3,5 tunnin aikana noin +5 °C. Lämpötila jatkoi nousua noin 10 tuntiin saakka (lämpötila nousi yhteensä vajaat +20 °C).

Fast Set -kiihdyttimellä lämpötilan nopea nousu varhaisvaiheessa kuvaa hyvin kiihdyttimen aikaansaamaa sementin varhaisvaiheen suurta reaktionopeutta.

Pika Parmix -kiihdyttimellä lämpötilan hidas nousu varhaisvaiheessa kuvaa hyvin kiihdyttimen aikaansaamaa pientä reaktionopeutta varhaisvaiheessa.

Lämpötilan kehitystä viileissä olosuhteissa seurattiin tiivistämällä 100 mm:n betonikerros heti kiihdyttinisäyksen jälkeen noin +10 °C lämpöistä betonilaattaa vasten. Betonien lämpötila oli heti tiivistämisen jälkeen noin +25 °C (Fast Set -kiihdytin) ja noin +20 °C (Pika Parmix -kiihdytin). Betonien lämpötilat laskivat noin +10 °C tasolle hieman yli 2 tunnin kuluessa.

Fast Set -kiihdyttimellä alkulämpötila oli sementin reaktionopeuden takia heti tiivistämisen jälkeen noin 5 °C korkeampi kuin Pika Parmix -kiihdyttimellä. Kummassakin

tapauksessa lämpötila laski melko nopeasti ja samansuuntaisesti. Lämpötilan nousua ei juuri havaittu sen jälkeen, kun lämpötilat olivat laskeneet noin +10 °C tasolle.

Puristuslujuuden kehitystä seurattiin noin +20 °C lämpötilassa 100 mm:n särmäisillä koekappaleilla (Paraisten Rapid). Puristuslujuus määritettiin 1, 2, 7 ja 28 vrk:n iässä.

Fast Set -kiihdyttimellä (annostus 7 %) lujuus oli 1 ja 2 vrk:n iässä noin 7 ja 20 MPa. Lujuus oli 7 ja 28 vrk:n iässä noin 40 ja 53 MPa.

Pika Parmix -kiihdyttimellä (annostus 5 %) lujuus oli 1 ja 2 vrk:n iässä noin 17 ja 33 MPa. Lujuus oli 7 ja 28 vrk:n iässä noin 45 ja 48 MPa.

Puristuslujuudet ovat 1 vrk:n iässä samansuuntaiset betonien lämmön nousun kanssa (Pika Parmix -kiihdyttimellä voimakas lämmön nousu ensimmäisen vuorokauden aikana).

Reci Tard -hidastin hidasti merkittävästi lujuuden kehitystä ilman kiihdytintä (lujuus oli noin 3 MPa 1 vrk:n iässä).

Puristuslujuuden kehitystä seurattiin noin +10 °C lämpötilassa 100 mm:n särmäisillä koekappaleilla (Paraisten Rapid ja SR). Puristuslujuus määritettiin 2, 6 ja 24 tunnin iässä.

Fast Set -kiihdyttimellä (annostus 5 %) lujuus oli 2, 6 ja 24 tunnin iässä noin 0,3, 0,4 ja 7 MPa (Paraisten Rapid).

Pika Parmix -kiihdyttimellä (annostus 8 %) lujuus oli 0,6, 2,7 ja 20 MPa.

Pika Parmix -kiihdyttimellä (annostus 5 %) 2 tunnin lujuus SR-sementin kanssa oli ainoastaan 0,1 MPa.

Tulosten mukaan edellytykset 20 MPa:n lujuuden saavuttamiseen tunneliolosuhteissa yhden vuorokauden iässä Fast Set -kiihdyttimellä ovat vähäiset. Pika Parmix -kiihdyttimellä kyseisen lujuuden saavuttaminen edellyttää kiihdytinannostusta, joka ylittää suositellun 5 %:n enimmäisannostuksen.

Kuivumiskutistuma määritettiin 40 x 40 x 160 mm³:n prismoilla 1–56 vrk:n iässä. Kiihdyttimien vaikutus kuivumiskutistumaan oli vähäinen.

Vesitiiviys määritettiin 100 mm:n särmäisillä koekappaleilla. Kiihdyttimiä sisältäneiden koekappaleiden vedentunkeumaluvut olivat 9–25 mm. Tämän mukaisesti betonit voidaan katsoa vesitiiviiksi.

Sisäinen säröily määritettiin 100 mm:n särmäisistä hyvin jälkihoidetuista koekappaleista 1–2 vrk:n ja noin 28 vrk:n iässä. Koekappaleet säilytettiin +20 °C lämpötilassa.

Fast Set -kiihdyttimellä (annostus 7 %) säröilyindeksi oli enimmillään 0,5 (paikoin mikrohalkeamia). Säröily oli sen verran vähäistä, että sen ei katsota heikentävän betonin vesitiiviyttä.

Pika Parmix -kiihdytintä (annostus 5 %) käytettäessä säröilyindeksi oli usean betoni-koostumuksen kohdalla 1 (mikrohalkeamia koko näytteen alueella). Säröily oli sen verran vähäistä, että sen ei katsottu heikentävän merkittävästi vesitiiviyttä.

Säröilyä esiintyi 28 vrk:n iässä jonkin verran enemmän kuin 1–2 vrk:n iässä (kiihdytintä käytettäessä).

Ilman kiihdytintä valmistetuissa betoneissa ei esiintynyt säröilyä.

Vesi-sementtisuhde vaihteli 0,40–0,50 (kokonaisvesi-sementtisuhde). Vesi-sementti-suhteella ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta säröilyn määrään.

Pika Parmix -kiihdyttimen annostus oli 3 %-yksikköä pienempi kuin Fast Set -kiihdyttimen annostus. Tästä huolimatta Pika Parmix -kiihdyttimellä säröilyä esiintyi enemmän kuin Fast Set -kiihdyttimellä.

Sisäinen säröily määritettiin myös sivuilta lämpöeristetyistä kappaleista, jotka tiivistettiin noin +10 °C lämpöistä betonilaattaa vasten. Kappaleiden yläpintaan kohdistettiin noin 1,5 m/s tuulenoisuus.

Fast Set -kiihdyttimellä (annostus 5 ja 7 %) säröilyindeksi oli enimmillään 0,5. Heikko tuuli ja lievästi kuivattavat olosuhteet eivät tämän mukaisesti suurentaneet säröilyindeksiä.

Pika Parmix -kiihdyttimellä (annostus 5 %) säröilyindeksi oli 0,5. Heikon tuulen ja lievästi kuivattavien olosuhteiden ei havaittu vaikuttavan säröilyindeksiin.

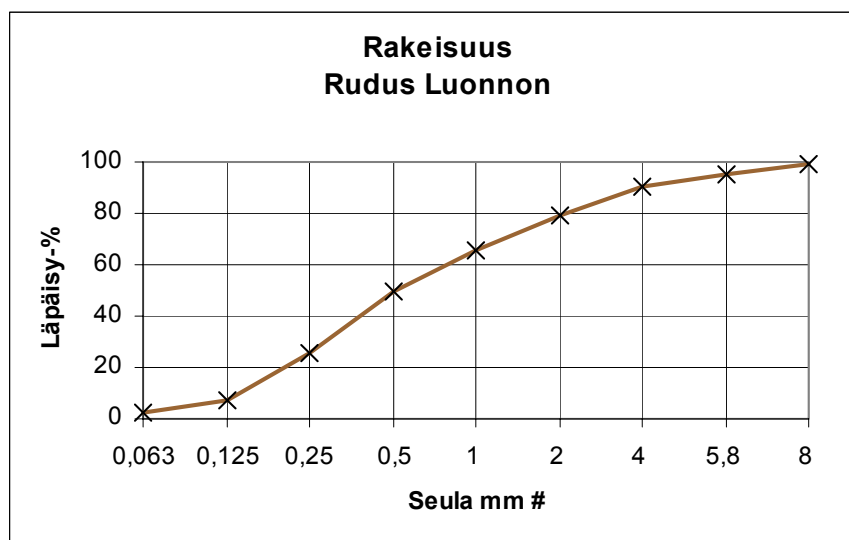
Pika Parmix -kiihdyttimen suurella annostuksella (annostus 10 %) säröilyindeksi oli 2 (mikrohalkeamia koko näytteen alueella ja paikoin erityisen tiheästi). Säröily oli sen verran runsasta, että sen voidaan katsoa heikentävän vesitiiviyttä.

Hyvin ilmeisesti pieni tuuli ja lievästi kuivattavat olosuhteet eivät kokeissa suurentaneet säröindeksiä. Kokeen mukaan merkittävä säröilyindeksiä suurentava tekijä on Pika Parmix -kiihdytin suurilla annostuksilla.

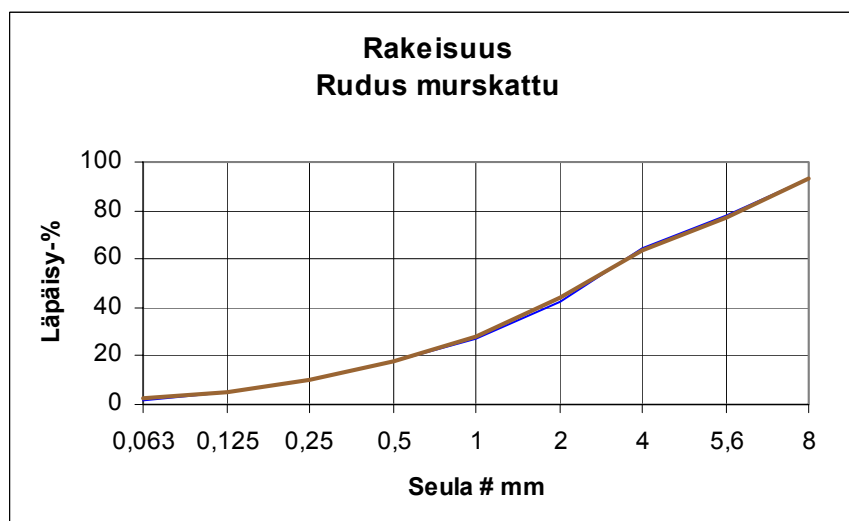
Liite 3: AqvaConTec Oy

Kiviainekset

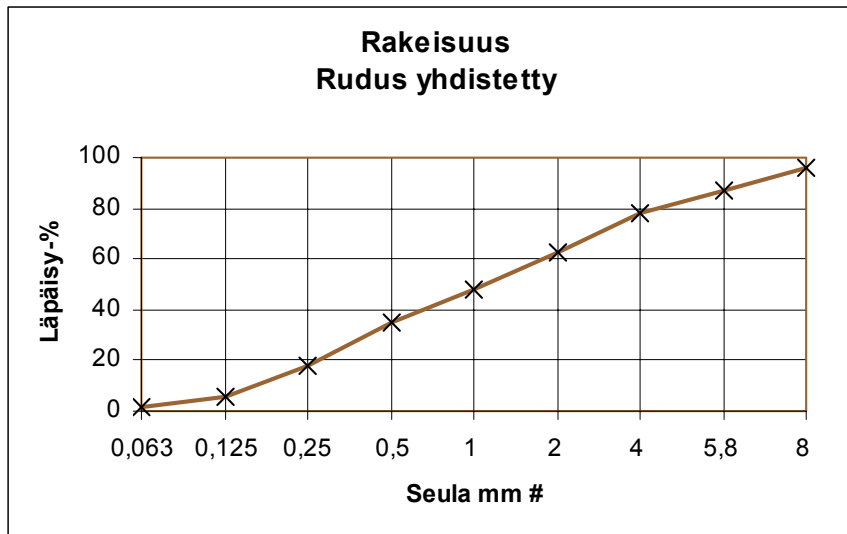
Kokeet tehtiin Lohja Rudus Oy:n tutkimusta varten toimittamalla murskatulla kiviaineksella ja luonnonkiviaineksella. Kiviainekset kuivattiin laboratoriossa ennen käyttöä. Murskatun kiviaineksen osuus koko kiviaineksesta oli 46 % luonnonkiviaineksen osuuden ollessa 54 %. Kiviainesten raekoko oli 8 mm. Kiviainesten rakeisuuskäyrät esitetään kuvissa 1–3.



Kuva 1. Luonnonkiviaineksen rakeisuus.



Kuva 2. Murskatun kiviaineksen rakeisuus.



Kuva 3. Yhdistetyn kiviaineksen rakeisuus.

Kiviaineksista määritettiin myös tiheys, vedenimu, litteysluku ja ominaispinta-ala. Arvot esitetään taulukoissa 1–4.

Taulukko 1. Kiviaineksen tiheys. Määrittäminen tehtiin standardin SFS-EN 1097-6 ”Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 6: Kiintotiheyden ja vedenimeytymisen määrittäminen” kohtien 8 ja 9 mukaisesti.

Näyte	Kiintotiheys näennäinen ρ_a	Kiintotiheys uunikuivattu ρ_{rd}	Kiintotiheys kyll. ja pintak. ρ_{ssd}
Luonnon < 4 mm	2,71	2,68	2,69
Murske > 4 mm	2,69	2,64	2,66
Murske < 4 mm	2,72	2,68	2,69

Taulukko 2. Kiviaineksen raemuoto. Määrittäminen standardin SFS EN 933-3 ”Kiviainesten geometrinen ominaisuuksien testaus. Osa 3: Raemuodon määrittäminen. Litteysluku” mukaisesti.

Näyte	Litteysluku Fl
Murskattu 8/10	10,2
Murskattu 6,3/8	17,5
Murskattu 5/6,3	17,3
Murskattu 4/5	18,0
Yhdistetty 4/8	16,5

Taulukko 3. Kiviaineksen vedenimu. Määrittäminen standardin SFS-EN 1097-6 mukaisesti.

Näyte	Absorptio p-%
Luonnon < 4 mm	0,4
Murske > 4 mm	0,8
Murske < 4 mm	0,5

Taulukko 4. Kiviaineksen ominaispinta-ala. Määrittäminen alle 0,063 mm:n hienoainekselle menetelmäkuvauksen PANK 2401 mukaisesti.

Näyte	Ominaispinta-ala m²/kg
Murske	2700
Luonnon kiviaines	4500

Betonimassat

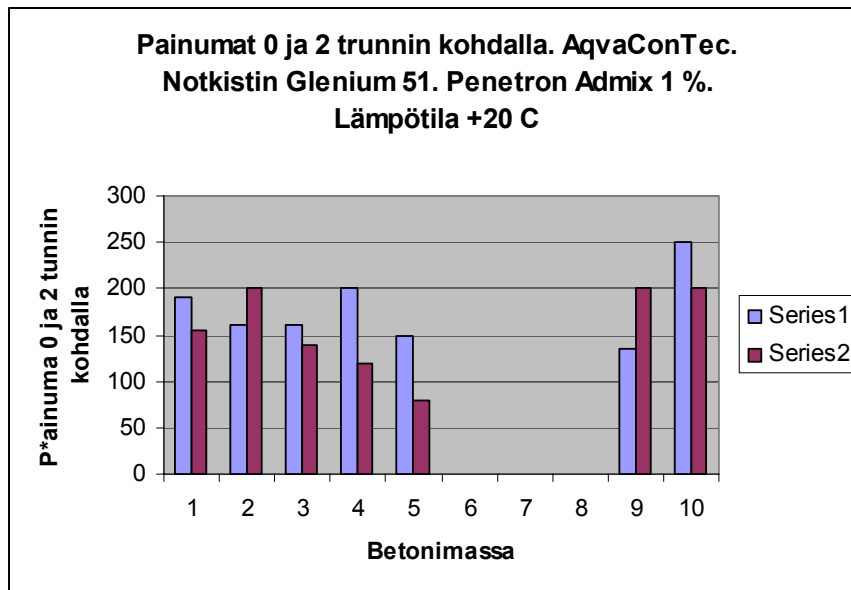
Notkistimena käytettiin modifioitua polykarboksyylietteripohjaista notkistinta Glenium 51. Betonimassoihin lisättiin 1,0 % Penetron Admix -tiivistysainetta. Tiivistysaine oli kuivatuote, joka koostui aineoimittajan mukaan erikoissementistä, silikasta ja kemikaaleista.

Betonimassat olivat seuraavat:

1. Paraisten Rapid 450 kg/m³. Notkistin 0,95 %. Penetron Admix 1 %.
Vesi-sementtisuhde 0,45.
2. Paraisten Rapid 505 kg/m³. Notkistin 1,1 %. Penetron Admix 1 %.
Vesi-sementtisuhde 0,40.
3. Paraisten Rapid 400 kg/m³. Notkistin 0,90 %. Penetron Admix 1 %.
Vesi-sementtisuhde 0,50.
4. Paraisten Yleissementti 440 kg/m³. Notkistin 0,90 %. Penetron Admix 1 %.
Vesi-sementtisuhde 0,45.
5. Embra Rapid 440 kg/m³. Notkistin 0,90 %. Penetron Admix 1 %.
Vesi-sementtisuhde 0,45.
6. MEGA Kunda 440 kg/m³. Notkistin 1,1 %. Penetron Admix 1 %.
Vesi-sementtisuhde 0,45.
7. SR Lappeenranta. Notkistin 0,90 %. Penetron Admix 1 %.
Vesi-sementtisuhde 0,45.

Betonimassojen koostumus säädettiin siten, että painuma oli 2 tunnin kohdalla suuruusluokaltaan 150 mm. Kiviaineksia käytettiin sellaisenaan, eli niitä ei seulottu eri lajitteisiin. Tämän seurauksena betonimassojen painumissa oli koko työn ajan vaihtelua. Tämän takia betonimassojen notkeudesta tai notkistimen annostuksesta ei voida luotettavasti päätellä betonimassojen vedentarvetta.

Betonimassojen painumat 10 minuutin ja 2 tunnin kohdalla esitetään kuvassa 4.



Kuva 4. Betonimassojen painumat noin 10 minuutin ja 2 tunnin kohdalla.

Koekappaleita valmistettaessa betonit tiivistettiin sivumitaltaan 100 mm:n särmäisiin teräsmuotteihin noin 1 minuutin kuluessa kiihdytinlisäyksestä iskuporakoneeseen kiinnitetyllä noin 95 x 95 mm²:n kokoisella teräslevyllä (Kanko). Kutakin koekappaletta varten tehtiin oma kiihdytinlisäys ja sekoitus.

Kiihdyttiminä käytettiin nestemäistä alkalivapaata ruiskubetonin kiihdytintä Fast Set 2000 ja natriumsilikaattipohjaista (vesilasi) kiihdytintä Pika Parmix. Semtu Oy:n annosteluohjeessa Fast Set -kiihdyttimen annostelumääräksi mainitaan 4–8 % sementtimäärästä. Edelleen todetaan, että yliannostelu alentaa loppulujuutta. Pika Parmix -kiihdyttimen annostelumääräksi mainitaan enintään 5 % sementtimäärästä.

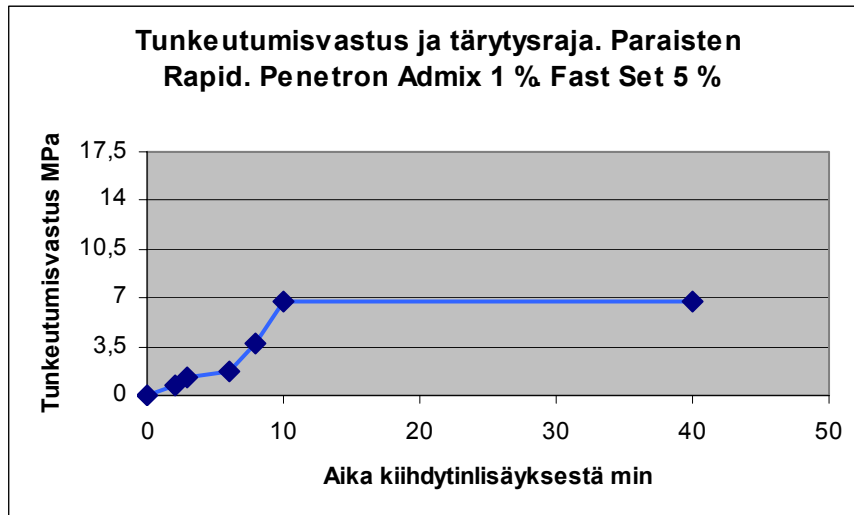
Betoneille tehtiin valikoidusti seuraavat määritykset:

- tunkeutumisvastus ja tärytysraja
- tarttuvuus luonnonkivilaattaan
- lämpötila semiadiabaattisissa olosuhteissa
- lämpötila tiivistettäessä kylmää pintaa vasten
- lujuus
- kuivumiskutistuma
- vedenpitävyys
- säröilyindeksi.

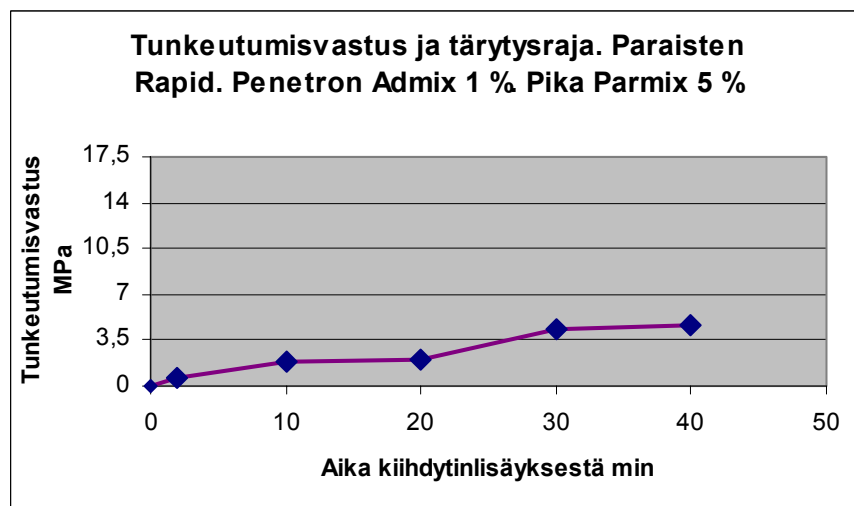
Tunkeutumisvastus ja tärytysraja

Tunkeutumisvastus ja tärytysraja määritettiin standardin SFS 5289 mukaisesti käyttäen ø 9 mm:n neuloja (kuva 9). Betoni tiivistettiin noin 1 minuutin kuluessa kiihdytin-

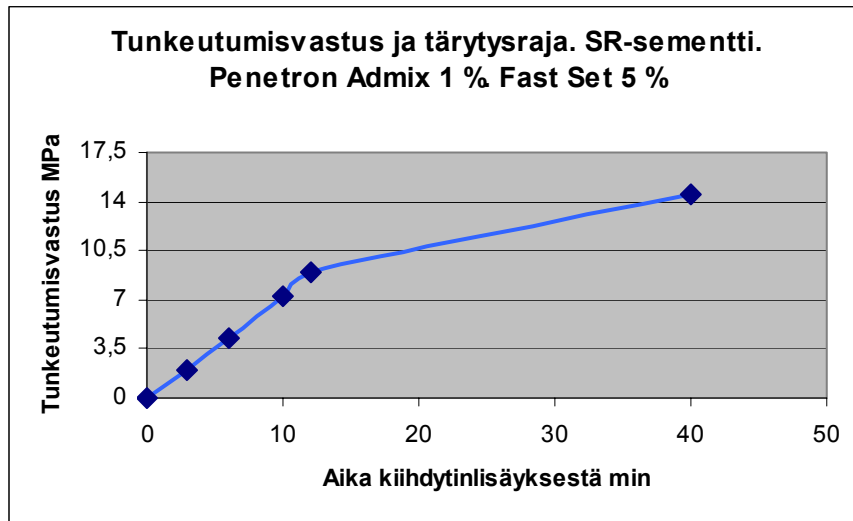
lisäyksestä 150 mm:n särmäiseen teräsmuottiin. Ensimmäinen mittaus tehtiin 2–3 minuutin kuluttua kiihdytinlisäyksestä. Tunkeutumisvastuksen kehitys ja tärytysrajan saavuttaminen määritettiin Paraisten Rapid-sementillä (kuvat 5 ja 6) ja SR-sementillä (kuvat 7 ja 8).



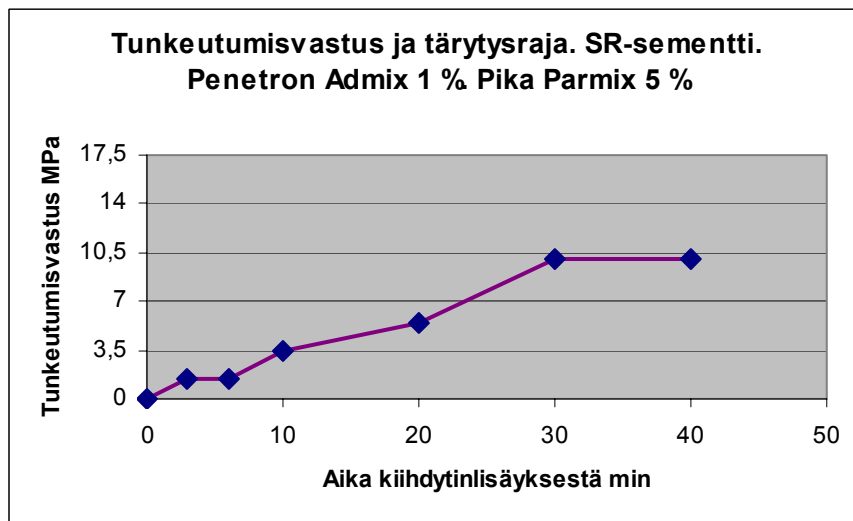
Kuva 5. Tunkeutumisvastuksen kehittyminen ja tärytysrajan (3,5 MPa) saavuttaminen. Penetron Admix 1 %. Fast Set 5 %. Betonimassa AqvaContec 1, notkistin Glenium 51 1,0 %. Betonimassan painuma ennen kiihdytinlisäystä oli noin 180 mm. Koe tehtiin noin +20 °C lämpötilassa.



Kuva 6. Tunkeutumisvastuksen kehittyminen ja tärytysrajan (3,5 MPa) saavuttaminen. Penetron Admix 1 %. Pika Parmix 5 %. Betonimassa AqvaConTec 1, notkistin Glenium 51 1,0 %. Betonimassan painuma ennen kiihdytinlisäystä oli noin 180 mm. Koe tehtiin noin +20 °C lämpötilassa.



Kuva 7. Tunkeutumisvastuksen kehittyminen ja tärytysrajan (3,5 MPa) saavuttaminen. Penetron Admix 1 %. Fast Set 5 %. Betonimassa AqvaContec 10 (SR-sementti). Notkistin Glenium 51, 1,0 %. Betonimassan painuma ennen kiihdytinlisäystä oli noin 160 mm. Koe tehtiin noin +20 °C lämpötilassa.



Kuva 8. Tunkeutumisvastuksen kehittyminen ja tärytysrajan (3,5 MPa) saavuttaminen. Penetron Admix 1 %. Pika Parmix 5 %. Betonimassa AqvaConTec 10 (SR-sementti). Notkistin Glenium 51, 1,0 %. Betonimassan painuma ennen kiihdytinlisäystä oli noin 160 mm. Koe tehtiin noin +20 °C lämpötilassa.



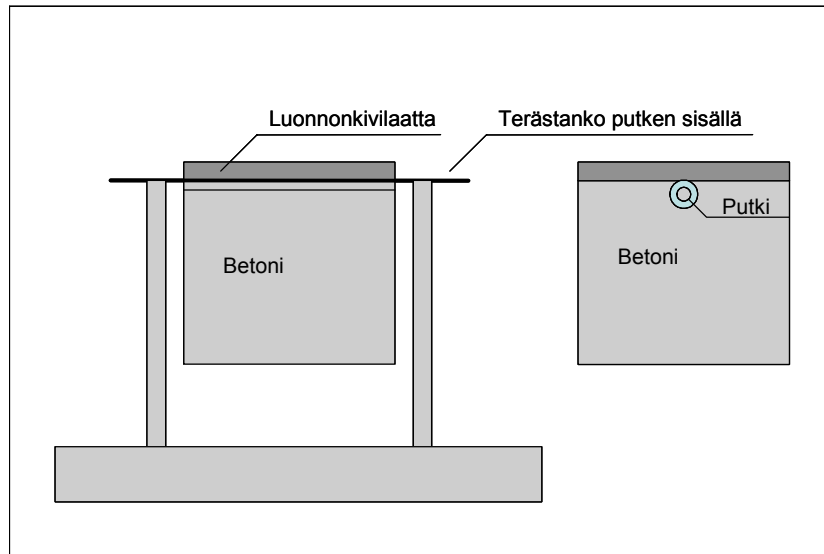
Kuva 9. Tunkeutumisvastuksen ja tärytysrajan määrittäminen.

Betonin tarttuvuus luonnonkivilaattaan

Betonin tarttuvuus luonnonkiveen kiihdyttimen lisäyksen jälkeen määritettiin seuraavasti:

- 100 mm:n särmäisen teräsmuotin pohjalle laitettiin 100 x 100 x 10 mm³:n kokoinen raamisahattu mattakosteaa luonnonkivilaatan (Kuru Grey) palanen.
- Luonnonkiven päälle asetettiin ø 8 mm:n ontto teräsputki.
- Betoni tiivistettiin muottiin luonnonkivilaattaa vasten välittömästi kiihdyttimäyksen ja sekoituksen (20 sekuntia) jälkeen.
- Välittömästi tiivistämisen jälkeen betoni, ml. luonnonkivilaatta, poistettiin muotista ja käännettiin ylösalaisin (luonnonkivilaatta ylimpänä).
- Onton teräsputken läpi työnnettiin noin 200 mm pitkä, ø 4 mm:n terästanko.
- Betoni ripustettiin 3 min kuluttua kiihdyttimäyksestä kahden tuen väliin terästangon varaan.

Koemenettely esitetään kuvissa 10 ja 11. Koe tehtiin Paraisten Rapid- ja SR-sementillä. Tulokset esitetään taulukoissa 5 ja 6.



Kuva 10. Koejärjestely (teline) betonin tarttuvuuden määrittämiseksi kiihdytinlisäyksen jälkeen. Betonikappaleet ripustettiin 3 minuutin kuluttua kiihdytinlisäyksestä. Betonikerroksen korkeus on 90 mm.



Kuva 11. Betonikappale on ripustettu 3 minuutin kuluttua kiihdytinlisäyksestä.

Taulukko 5. Betonin tarttuvuus luonnonkivilaattaan. Betoni AqvaConTec 1 (painuma oli ennen kiihdytinlisäystä noin 180 mm). Sementti SR-sementti. Lämpötila noin +20 °C.

Betoni/Kiihdytin	Kiihdytinlisäyksen ajankohta min	Ripustusajan-kohta min	Havainnot ruiskubetonista
AqvaConTec 1 Fast Set 5 %	0	3	Pysyi kiinni
AqcaConTec 1 Pika Parmix 5 %	0	3	Irtosi kahden minuutin kuluttua

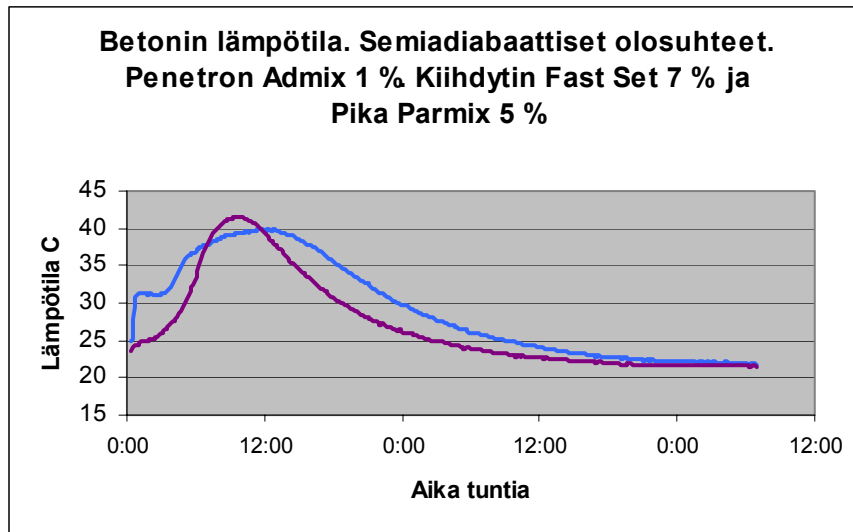
Taulukko 6. Betonin tarttuvuus luonnonkivilaattaan. Betoni AqvaConTec 10 (SR-sementti). Painuma oli ennen kiihdytinlisäystä noin 160 mm. Lämpötila noin +20 °C.

Betoni/Kiihdytin	Kiihdytinlisäyksen ajankohta min	Ripustusajan-kohta min	Havainnot ruiskubetonista
AqvaConTec 10 Fast Set 5 %	0	3	Pysyi kiinni
AqcaConTec 10 Pika Parmix 5 %	0	3	Irtosi noin 30 sekunnin kuluttua

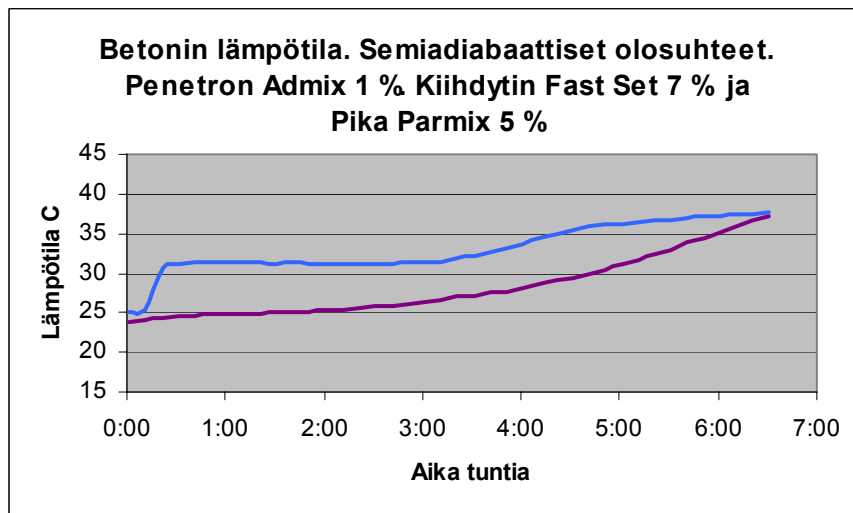
Kovettumisen aikaiset lämpötilat

Semiadiabaattiset olosuhteet

Betonimassa (AqvaConTec 1) tiivistettiin heti kiihdytinlisäyksen jälkeen pieneen noin 100 x 100 x 50 mm³:n kokoiseen muottiin, joka oli ympäröity joka puolelta SPU-eristeellä. Kiihdytinlisäyksen jälkeiset lämpötilat esitetään kuvissa 12 ja 13.



Kuva 12. Betonin lämpötilan kehitys noin 60 tunnin ikään saakka. Betoni (AqvaConTec 1) on tiivistetty pieneen lämpöeristettyyn muottiin noin 1 min kuluessa kiihdytinlisäyksestä. Penetron Admix 1 %. Kiihdytin Fast Set 7 % (sininen käyrä). Kiihdytin Pika Parmix 5 % (punainen käyrä).

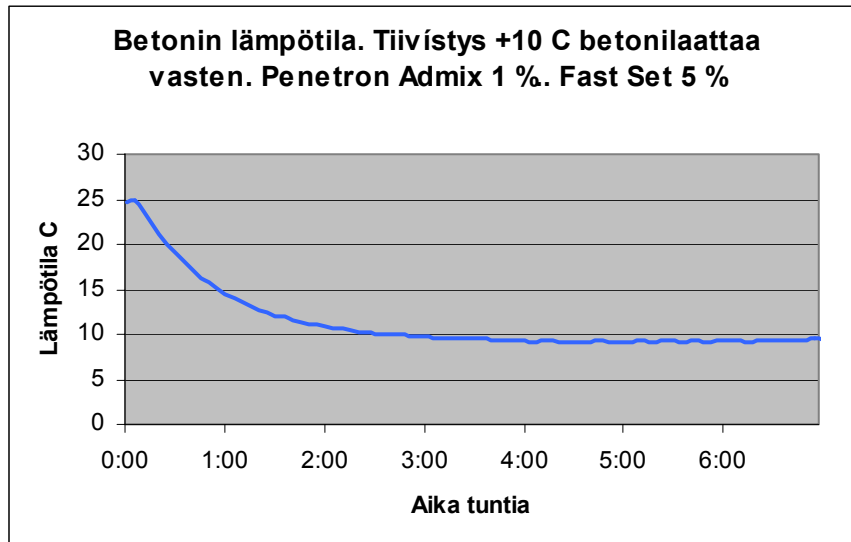


Kuva 13. Betonin lämpötilan kehitys noin 7 tunnin ikään saakka. Suurennos kuvan 1 lämpötilakäyrien alkuosasta. Kiihdytin Fast Set, 7 % (sininen käyrä). Kiihdytin Pika Parmix, 5 % (punainen käyrä). Penetron Admix 1 %.

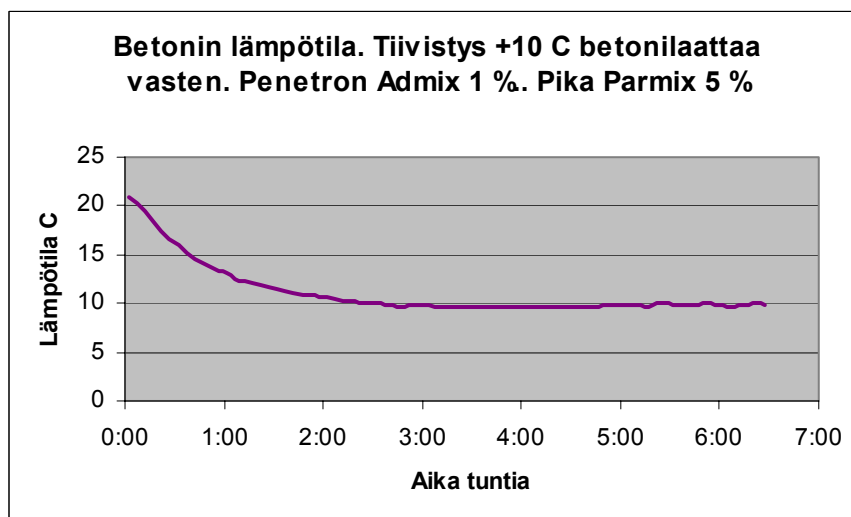
Kylmää betonilaattaa vasten tiivistetty betoni

Betoni (AqvaConTec 1) tiivistettiin heti kiihdytinlisäyksen jälkeen betonilaattaa vasten pieniin sivuilta lämpöeristettyihin kehikoihin. Huoneen lämpötila oli säädetty +10 °C tasolle. Betonikappaleiden koko oli noin 100 x 100 x 100 mm³.

Lämpötila-anturit asennettiin betonikerroksen paksuuden puoliväliin. Betonikappaleiden yläpintaan kohdistettiin tuulen nopeus 1,0–1,5 m/s. Betonikappaleiden yläpuolisen ilman suhteellinen kosteus säädettiin välille 75–85 % RH. Tyypilliset betonikappaleiden lämpötilat esitetään kuvissa 14 ja 15.



Kuva 14. Betonin (AqvaConTec 1) lämpötila. Kiihdytin Fast Set 5 %. Penetron Admix 1 %. 100 mm:n betonikerros on tiivistetty betonilaattaa vasten. Huoneen lämpötila oli noin +10 °C.



Kuva 15. Betonin (AqvaConTec 1) lämpötila. Kiihdytin Pika Parmix 5 %. Penetron Admix 1 %. 100 mm:n betonikerros on tiivistetty betonilaattaa vasten. Huoneen lämpötila oli noin +10 °C.

Puristuslujuus

Ilman kiihdytintä valmistetut koekappaleet säilytettiin noin +20 °C lämpötilassa ja vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa. Puristuslujuus ja tiheys määritettiin 100 mm:n särmäisillä kuutioilla 1, 2, 7 ja 28 vrk:n iässä, taulukot 7 ja 8.

Taulukko 7. Puristuslujuus. Ilman notkistinta ja kiihdytintä valmistettu vertailubetoni. Paraisten Rapid. 100 mm:n särmäiset koekappaleet.

Vertailubetoni	Puristuslujuus MPa ja tiheys kg/m ³			
	1 vrk	2 vrk	7 vrk	28 vrk
Ilman notkistinta	26,0 2290	37,5 2310	45,0 2310	46,5 2300
Ilman kiihdytintä				

Taulukko 8. Puristuslujuus. Betonimassa AqvaConTec 1. Paraisten Rapid. Valmistettu ilman kiihdytintä. 100 mm:n särmäiset koekappaleet.

Betoni AqvaConTec 1	Puristuslujuus MPa ja tiheys kg/m ³			
	1 vrk	2 vrk	7 vrk	28 vrk
Glenium 51, 0,95 % Penetron Admix 1,0 % Ilman kiihdytintä	24,5 2360	40,0 2300	43,0 2340	51,5 2340

Kiihdytintä sisältäneet koekappaleet säilytettiin noin +10 °C lämpötilassa muovipussissa. Puristuslujuus määritettiin 100 mm:n särmäisillä kuutioilla 1, 2, 7 ja 28 vrk:n iässä, taulukot 9–11.

Taulukko 9. Puristuslujuus. Betonimassa AqvaConTec 1. Paraisten Rapid. Kiihdytin Fast Set ja Pika Parmix. 100 mm:n särmäiset koekappaleet. Säilytys noin +10 °C lämpötilassa.

Betoni AqvaConTec 1	Puristuslujuus MPa ja tiheys kg/m ³			
	1 vrk	2 vrk	7 vrk	28 vrk
Glenium 51, 0,95 %				
Kiihdytin Fast Set, 7 % sideaineesta	12,0 2310	27,5 2320	46,0 2310	54,0 2240
Kiihdytin Pika Parmix, 5 % sideaineesta	15,0 2370	30,0 2340	38,5 2290	48,0 2270

Taulukko 10. Puristuslujuus nuorella iällä. Betonimassa AqvaConTec 1. Paraisten Rapid. Kiihdytin Fast Set ja Pika Parmix. 100 mm:n särmäiset koekappaleet. Säilytys noin +10 °C lämpötilassa.

Betoni AqvaConTec 1	Puristuslujuus MPa ja tiheys kg/m³		
	2 tuntia	6 tuntia	24 tuntia
Glenium 51, 0,95 %			
Kiihdytin Fast Set, 5 % sideaineesta	0,3 2370	0,7 2350	11,5 2270
Kiihdytin Pika Parmix, 8 % sideaineesta	0,5 2270	1,7 2320	19,0 2280

Taulukko 11. Puristuslujuus nuorella iällä. Betonimassa AqvaConTec 10. SR-sementti. Kiihdytin Fast Set ja Pika Parmix. 100 mm:n särmäiset koekappaleet. Säilytys noin +10 °C lämpötilassa. Betonimassan painuma oli ennen kiihdytinlisäystä noin 130 mm.

Betoni AqvaConTec 1	Puristuslujuus MPa ja tiheys kg/m³		
	2 tuntia	6 tuntia	24 tuntia
Glenium 51, 0,90 %			
Kiihdytin Fast Set, 5 % sideaineesta	0,5 2370	1,7 2350	13,0 2270
Kiihdytin Pika Parmix, 5 % sideaineesta	0,2 2270	0,5 2320	13,0 2280

Kuivumiskutistuma

Kuivumiskutistuma määritettiin 40 x 40 x 160 mm³:n prismoilla (kolmen prisman keskiarvo) 1–56 vrk:n iässä. Prismat säilytettiin 1–7 vrk muovipusseissa. Tämän jälkeen säilytysolosuhteet olivat noin +20 °C lämpötila ja noin 40 %:n suhteellinen kosteus.

Muovipussit säilytettiin vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa. Kutistumat esitetään taulukossa 12.

Taulukko 12. Betonien kuivumiskutistumat määritettynä 40 x 40 x 160 mm³:n prismoilla.

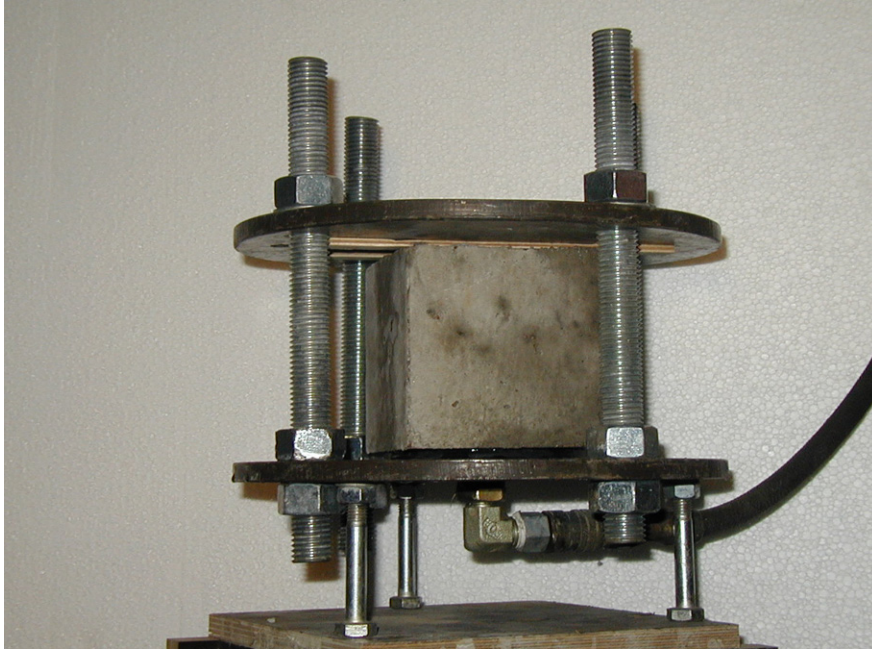
Betoni AqvaConTec 1	Kutistuma ‰		
	1–7 vrk	7–56 vrk	1–56 vrk
Vertailu Ilman notkistinta Ilman Penetron Admix	0,06	0,73	0,79
Glenium 51, 0,95 % Ilman kiihdytintä	0,13	0,71	0,84
Kiihdytin Fast Set 7 % sideaineesta	0,05	1,03	1,08
Kiihdytin Pika Parmix 5 % sideaineesta	0,08	0,77	0,85

Vedenpitävyys

Vedenpitävyys määritettiin standardin SFS-EN 12390-8 mukaisesti 100 mm:n särmäisillä kuutioilla 28 vrk:n iässä (kuva 16). Vedentunkeuman maksimisyyvydet esitetään taulukossa 13.

Vedenpitävyys määritettiin kohdistamalla koekappaleen alapintaan 5 baarin suuruinen paine 72 tunnin ajan. Tämän jälkeen vedenpaineen vaikutuksen alaisena ollut pinta pyyhittiin ylimääräisen veden poistamiseksi ennen koekappaleen halkaisua kohtisuoraan vedenpaineen vaikutukselle altista pintaa vastaan.

Heti, kun halkaisupinta oli kuivunut sen verran, että veden tunkeutumisrintama oli selvästi havaittavissa, merkittiin vesirintaman sijainti koekappaleeseen. Tämän jälkeen mitattiin suurin tunkeutumasyvyys koealueen alla ja merkittiin se muistiin millimetrin tarkkuudella.



Kuva 16. Vesitiiviyskoekappale kiinnitettynä testauslaitteistoon. Koekappaleen alapintaan kohdistettiin standardin mukainen 5 baarin paine 72 tunnin ajan.

Taulukko 13. Vedentunkeuman maksimisyvyudet. Määrittäminen on tehty 100 mm:n särmäisillä koekappaleilla. Betonimassa AqvaConTec 1 (Penetron Admix 1 %).

	Vedentunkeutuman maksimisyvyys mm	Tiheys kg/m ³
Ilman notkistinta, vertailu	24	2300
Notkistin Glenium 51, 0,95 % Ilman kiihdytintä	0	2320
Kiihdytin Fast Set ¹⁾ , 5 %	6	2250
Kiihdytin Fast Set, 7 %	17	2250
Kiihdytin Pika Parmix, 5 %	13	2300
Kiihdytin Pika Parmix ¹⁾ , 10 %	10	2230

¹⁾Ikä kokeen alkaessa noin 42 vrk

Vesi-sementtisuhteen ja sementtilaadun vaikutus mikrosäröilyyn

Yleiskuvan saamiseksi vesi-sideainesuhteen ja sementtityypin vaikutuksesta mikrosäröilyyn sekoitettiin betonimassoihin Fast Set- ja Pika Parmix -kiihdytintä.

Betonit tiivistettiin sivumitaltaan 100 mm:n särmäisiin teräsmuotteihin noin 1 minuutin kuluessa kiihdytinlisäyksestä iskuporakoneeseen kiinnitetyllä noin 95 x 95 mm²:n kokoisella teräslevyllä (Kanko).

Kokeissa Fast Set -kiihdyttimen annostus oli 7 % sideaineen painosta. Pika Parmix -kiihdyttimen annostus oli 5 % sideaineen painosta riippumatta betonimassan notkeudesta.

Koekappaleet säilytettiin kuivumiselta suojattuna. Koekappaleista irrotettiin sahaamalla 1–2 vrk:n ja noin 28 vrk:n iässä näytepalat mikrorakennetutkimuksia varten. Näytepaloista valmistettiin mikrorakenneanalyysiä varten 35 x 55 mm² x 25 µm:n kokoiset petrografiset ohuthieet betonin pinnalta lähtien noin 55 mm:n syvyydelle.

Arvostelussa käytettiin seuraavaa säröilyindeksiä:

- 0, mikrohalkeamia on vain satunnaisesti.
- 1, mikrohalkeamia on koko näytteen alueella.
- 2, mikrohalkeamia on koko näytteen alueella ja paikoin erityisen tiheästi.
- 3, mikrohalkeamia on erityisen tiheästi ja ne ovat tavallista leveämpiä.

Mikrorakenneanalyysissä tehdyt havainnot säröilystä ja betonin homogeenisuudesta esitetään taulukoissa 14–21 ja kuvissa 17–20. Kuvissa kuvan lyhyt sivu vastaa 2,7 mm:ä näytteessä.

Taulukko 14. Säröilyindeksi. Betoni AqvaConTec 1. Säröilyindeksi on määritetty betonin iän ollessa 1–2 vrk ja yli 28 vrk. Säilytys vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa.

AqvaConTec 1 Paraisten Rapid W/c = 0,45	Säröilyindeksi (1–2 vrk iässä)	Säröilyindeksi (yli 28 vrk iässä)
Ilman kiihdytintä	0	0
Fast Set 7 %	0	0
Pika Parmix 5 %	0	0

Taulukko 15. Säröilyindeksi. Betoni AqvaConTec 2. Säröilyindeksi on määritetty betonin iän ollessa 1–2 vrk ja yli 28 vrk. Säilytys vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa.

AqvaConTec 2 Paraisten Rapid W/c = 0,40	Säröilyindeksi (1–2 vrk iässä)	Säröilyindeksi (yli 28 vrk iässä)
Ilman kiihdytintä	0	0
Fast Set 7 %	0	0,5
Pika Parmix 5 %	0,5	0

Taulukko 16. Säröilyindeksi. Betoni AqvaConTec 3. Säröilyindeksi on määritetty betonin iän ollessa 1–2 vrk ja yli 28 vrk. Säilytysolosuhteet vähintään 95 %:n suhteellinen kosteus ja noin +20 °C lämpötila.

AqvaConTec 3 Paraisten Rapid W/c = 0,50	Säröilyindeksi (1–2 vrk iässä)	Säröilyindeksi (yli 28 vrk iässä)
Ilman kiihdytintä	0	
Fast Set 7 %	0,5	0
Pika Parmix 5 %	0,5	

Taulukko 17. Säröilyindeksi. Betoni AqvaConTec 4. Säröilyindeksi on määritetty betonin iän ollessa 1–2 vrk ja yli 28 vrk. Säilytys vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa.

AqvaConTec 4 Paraisten Yleisem. W/c = 0,45	Säröilyindeksi (1–2 vrk iässä)	Säröilyindeksi (yli 28 vrk iässä)
Ilman kiihdytintä	0	
Fast Set 7 %	0	0
Pika Parmix 5 %	0,5	

Taulukko 18. Säröilyindeksi. Betoni AqvaConTec 5. Säröilyindeksi on määritetty betonin iän ollessa 1–2 vrk ja yli 28 vrk. Säilytys vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa.

AqvaConTec 5 Embra Rapid W/c = 0,45	Säröilyindeksi (1–2 vrk iässä)	Säröilyindeksi (yli 28 vrk iässä)
Ilman kiihdytintä	0	
Fast Set 7 %	0,5	0
Pika Parmix 5 %	0,5	

Taulukko 19. Säröilyindeksi. Betoni AqvaConTec 9. Säröilyindeksi on määritetty betonin iän ollessa 1–2 vrk ja yli 28 vrk. Säilytys vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa.

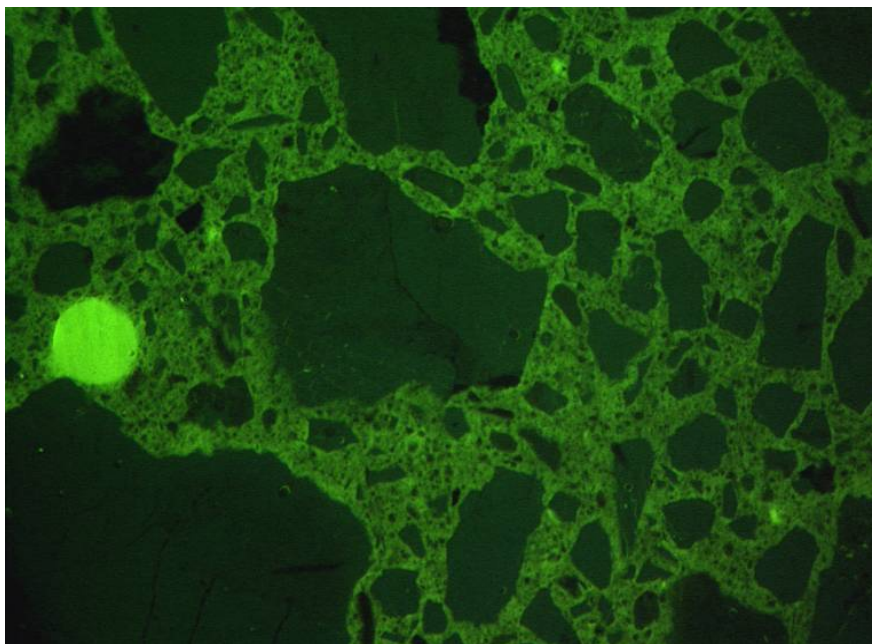
AqvaConTec 9 MEGA-sementti W/c = 0,45	Säröilyindeksi (1–2 vrk iässä)	Säröilyindeksi (yli 28 vrk iässä)
Ilman kiihdytintä	0	
Fast Set 7 %	0	0
Pika Parmix 5 %	0	

Taulukko 20. Säröilyindeksi. Betoni AqvaConTec 10. Säröilyindeksi on määritetty betonin iän ollessa 1–2 vrk ja yli 28 vrk. Säilytys vähintään 95 %:n suhteellisessa kosteudessa ja noin +20 °C lämpötilassa.

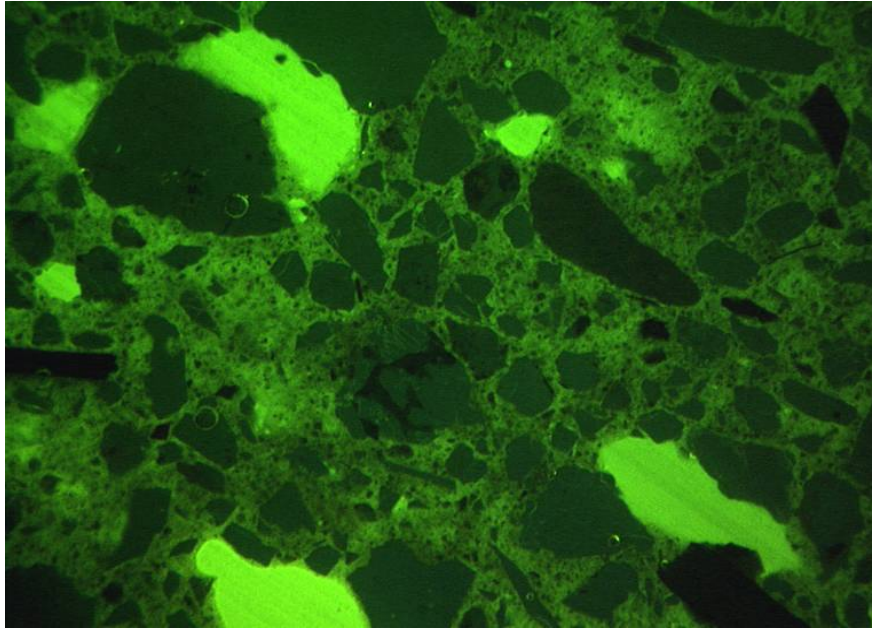
AqvaConTec 10 SR-sementti W/c = 0,45	Säröilyindeksi (1–2 vrk iässä)	Säröilyindeksi (yli 28 vrk iässä)
Ilman kiihdytintä	0	
Fast Set 7 %	0	0
Pika Parmix 5 %	0,5	

Taulukko 21. Ohuthieistä määritetyt säröilyindeksit. Kooste taulukoista 14–20.

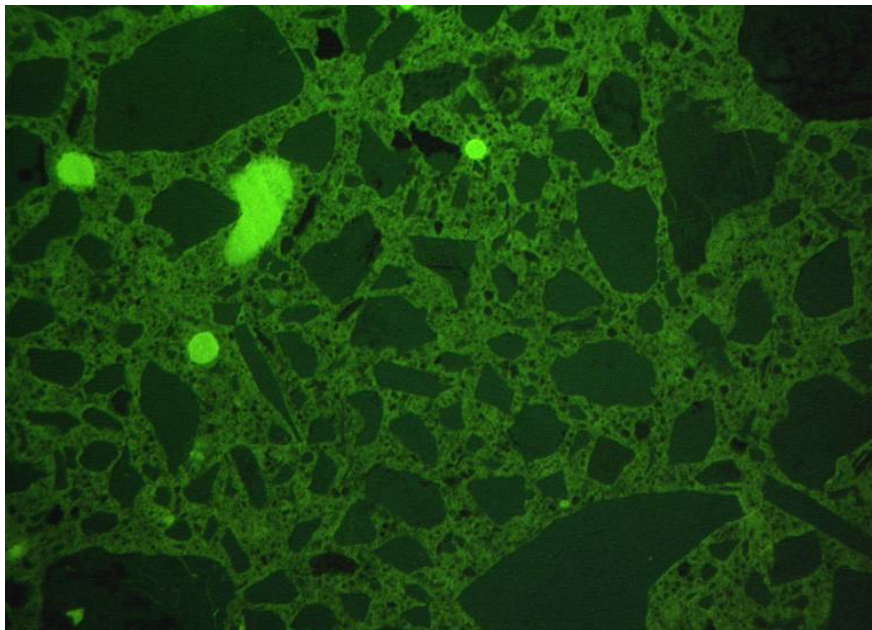
AqvaConTec	1	2	3	4	5	9	10
	Par R	Par R	Par R	Yleis	Embra	MECA	SR
Ikä 1–2 vrk							
Ilman kiihd.	0	0	0	0	0	0	0
Fast Set 7 %	0	0	0,5	0	0,5	0	0
Pika Parmix 5 %	0	0,5	0,5	0,5	0,5		0,5
Ikä yli 28 vrk							
Ilman kiihd.	0	0					
Fast Set 7 %	0	0,5	0	0	0	0	0
Pika Parmix 5 %	0	0					



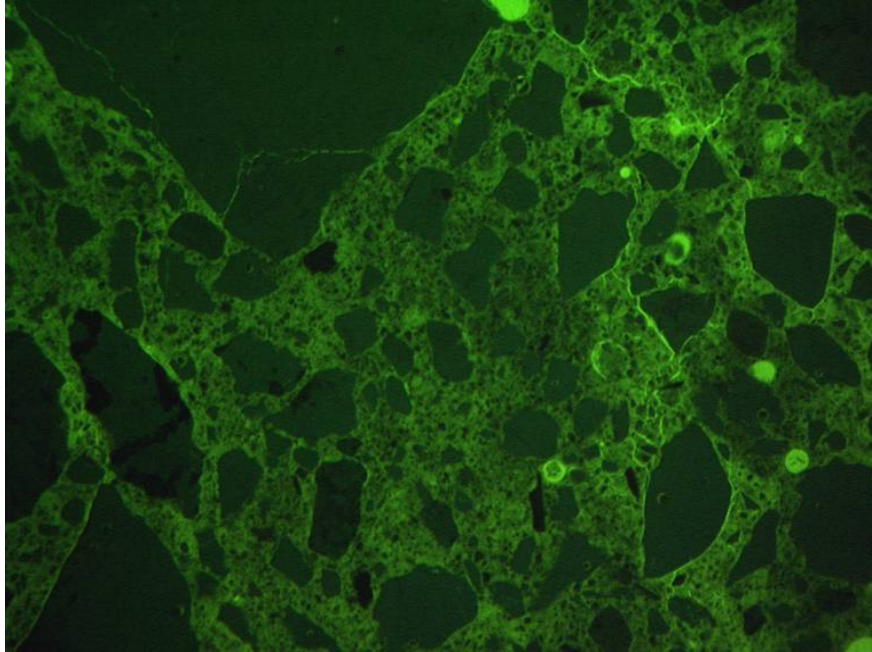
Kuva 17. Betoni AqvaConTec 1 ilman kiihdytintä. Ikä 1–2 vrk. Säröjä ei ole havaittavissa (säröilyindeksi 0). Kuivuminen on estetty koekappaleen tiivistämisen jälkeen.



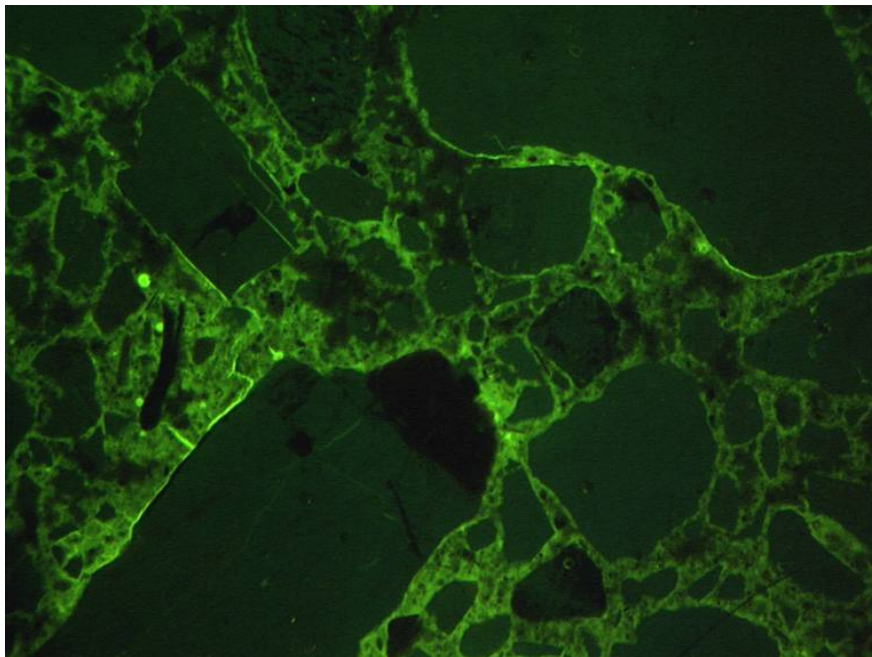
Kuva 18. Betoni AqvaConTec 1. Kiihdytin Fast Set 7 %. Ikä 1–2 vrk. Säröjä ei ole havaittavissa (säröilyindeksi 0). Kuivuminen on estetty koekappaleen tiivistämisen jälkeen.



Kuva 19. Betoni AqvaConTec 1. Kiihdytin Pika Parmix 5 %. Ikä 1–2 vrk. Säröjä ei ole havaittavissa (säröilyindeksi 0). Kuivuminen on estetty koekappaleen tiivistämisen jälkeen.



Kuva 20. Betoni AqvaConTec 2. Kiihdytin Pika Parmix 5 %. Ikä 1–2 vrk. Paikoin vähän säröilyä (säröilyindeksi 0,5). Kuivuminen on estetty koekappaleen tiivistämisen jälkeen.



Kuva 21. Betoni AqvaConTec 5. Kiihdytin Fast Set 5 %. Ikä 1–2 vrk. Paikoin vähän säröilyä (säröilyindeksi 0,5). Kuivuminen on estetty koekappaleen tiivistämisen jälkeen.

Kylmää betonilaattaa vasten tiivistetty betoni

Betoni AqvaConTec 1 tiivistettiin heti kiihdytinlisäyksen jälkeen betonilaattaa vasten pieniin sivuilta lämpöeristettyihin kehikoihin. Huoneen lämpötila oli säädetty +10 °C tasolle. Betonikappaleiden koko oli noin 100 x 100 x 100 mm³.

Lämpötila-anturit asennettiin betonikerroksen paksuuden puoliväliin. Betonikappaleiden yläpintaan kohdistettiin tuulen nopeus 1,0–1,5 m/s. Betonikappaleiden yläpuolisen ilman suhteellinen kosteus säädettiin välille 75–85 % RH.

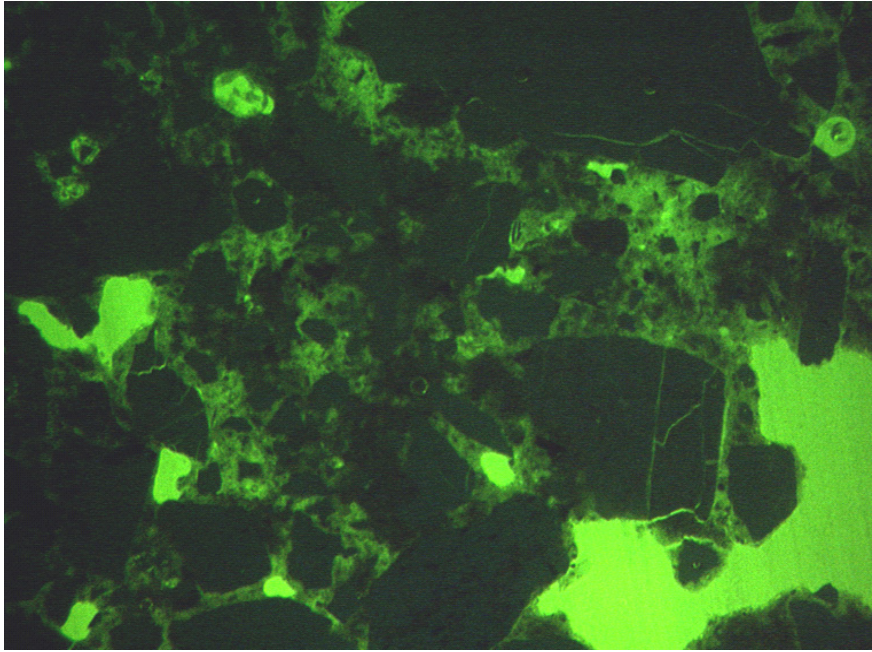
Kiihdytinannostukset olivat seuraavat:

- Fast Set, 5 % sideaineesta
- Fast Set, 7 % sideaineesta
- Pika Parmix 5 % sideaineesta
- Pika Parmix 10 % sideaineesta.

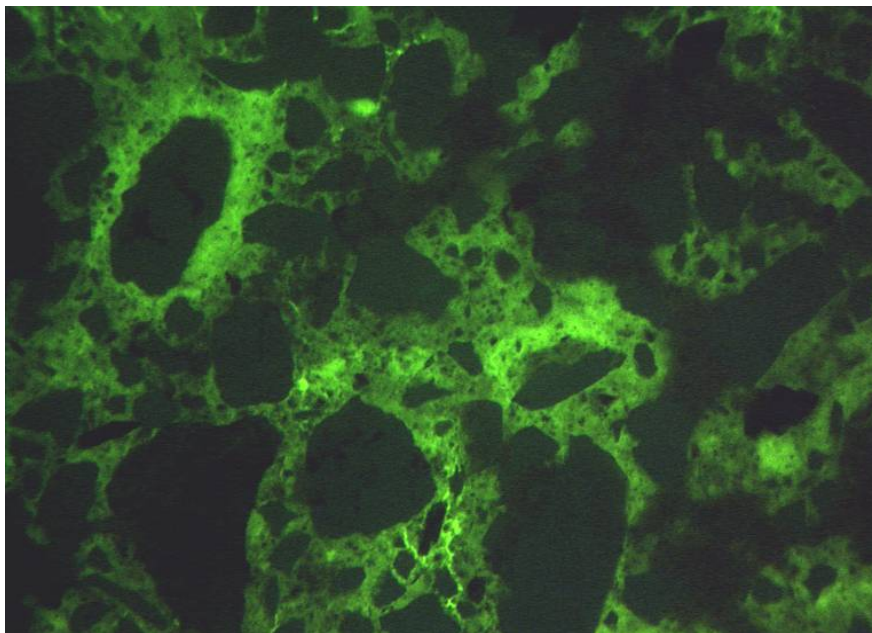
Mikrorakenneanalyysiä varten koekappaleista valmistettiin 35 x 55 mm² x 25 µm:n kokoiset petrografiset ohuthieet betonin pinnalta lähtien noin 55 mm:n syvyydelle. Mikrorakenneanalyysissä tehdyt havainnot esitetään taulukossa 22 sekä kuvissa 21–24.

Taulukko 22. Säröilyindeksi. Betoni AqvaConTec 1. Ohuthieet on valmistettu 7 vrk:n iässä. Betonit on tiivistetty noin +10 °C lämpöistä betonilaattaa vasten sivuilta lämpöeristettyihin 100 x 100 x 100 mm³:n muotteihin. Ilman suhteellinen kosteus oli noin 75–85 % RH. Tuulen nopeus oli noin 1,5 m/s.

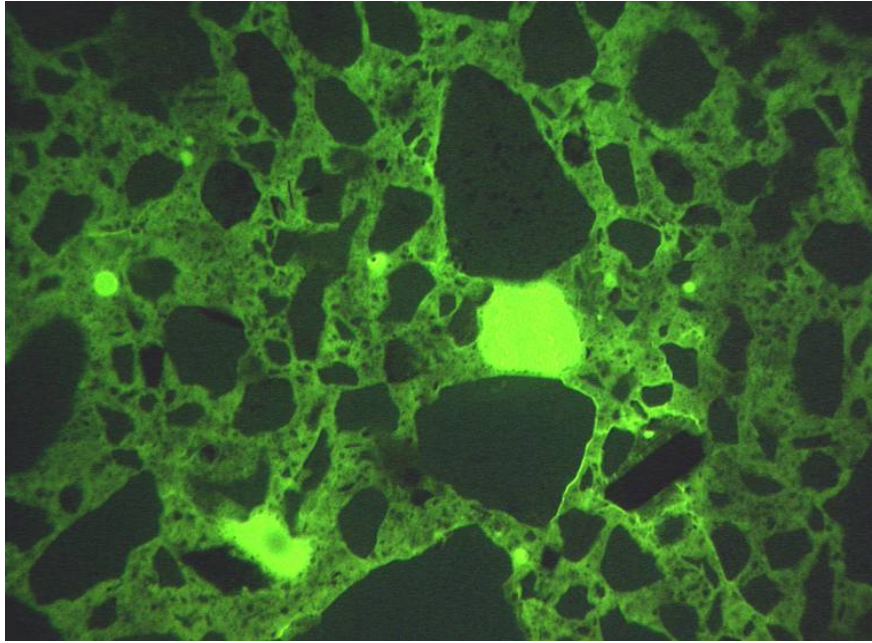
AqvaConTec 1 Paraisten Rapid W/c = 0,45	Säröilyindeksi (1–2 vrk iässä)
Fast Set 5 %	0
Fast Set 7 %	0,5
Pika Parmix 5 %	1
Pika Parmix 10 %	1



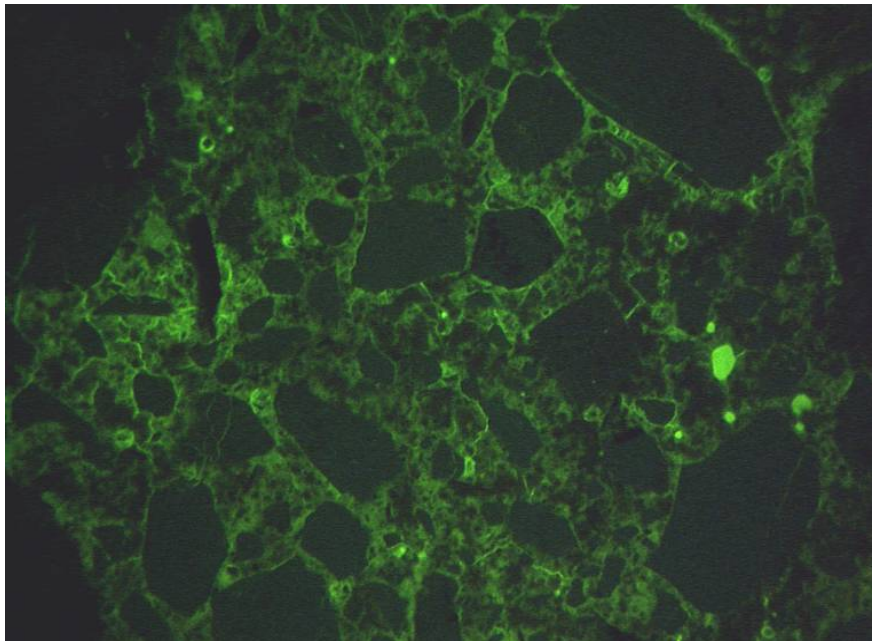
Kuva 22. Ohuthiekuva näytteestä AqvaConTec 1. Kiihdytin Fast Set, 5 %. Säröilyä ei esiinny (säröilyindeksi 0), betoni on hieman epähomogeenista (homogeenisuusindeksi 1). Kuvan lyhyt sivu vastaa 2,7 mm:ä.



Kuva 23. Ohuthiekuva näytteestä AqvaConTec 1. Kiihdytin Fast Set, 7 %. Paikoin vähän säröilyä (säröilyindeksi 0,5), betoni on hieman epähomogeenista (homogeenisuusindeksi 1). Kuvan lyhyt sivu vastaa 2,7 mm:ä.



Kuva 24. Ohuthiekuva näytteestä AqvaConTec 1. Kiihdytin Pika Parmix 5 %. Mikrohalkeamia on koko ohuthieen alueella (säröilyindeksi 1), betoni on paikoin hieman epähomogeenista (homogeenisuusindeksi 0,5). Kuvan lyhyt sivu vastaa 2,7 mm:ä näytteessä.



Kuva 25. Ohuthiekuva näytteestä AqvaConTec 1. Kiihdytin Pika Parmix 10 %. Mikrohalkeamia on koko ohuthieen alueella (säröilyindeksi 1), betoni on homogeenista (homogeenisuusindeksi 0). Kuvan lyhyt sivu vastaa 2,7 mm:ä näytteessä.

Yhteenveto

Varhaisvaiheen jäykistymistä seurattiin tunkeutumismaston kehittymisellä ja tärytysrajan ylittymisellä.

Fast Set -kiihdyttimellä tunkeutumismasto kasvoi nopeasti heti kiihdytinlisäyksen jälkeen ja tärytysraja ylittyi 6–8 minuutin kuluttua (Paraisten Rapid ja SR).

Pika Parmix -kiihdyttimellä tärytysraja ylittyi noin 25 minuutin kuluttua (Paraisten Rapid) ja noin 10 minuutin kuluttua (SR).

Betonin tarttuvuutta luonnonkiveen varhaisvaiheessa selvitettiin ”ripustuskokeella”. Kokeessa betoni tiivistettiin kiihdytinlisäyksen jälkeen muottiin, jonka pohjalla oli luonnonkivilaatta. Betonikerroksen paksuus oli 90 mm.

Tiivistämisen jälkeen kappale (luonnonkivilaatta & betoni) poistettiin muotista, käännettiin ylösalaisin ja ripustettiin luonnonkivilaatan varaan 3 minuutin kuluttua kiihdytinlisäyksestä.

Alkalivapaalla Fast Set -kiihdyttimellä betoni pysyi kiinni luonnonkivilaatasta (Paraisten Rapid ja SR).

Vesilasipohjaisella Pika Parmix -kiihdyttimellä betoni irtosi luonnonkivilaatasta noin 2 minuutin kuluttua ripustamisesta (Paraisten Rapid) ja noin 30 sekunnin kuluttua ripustamisesta (SR).

Kokeessa käytettiin samaa 5 %:n kiihdytinannostusta. Fast Set -kiihdytin toimi merkittävästi paremmin kuin Pika Parmix -kiihdytin. Heikoin tulos saatiin yhdistelmällä Pika Parmix & SR-sementti.

Koe osoitti, ettei tunkeutumismaston kehittymisnopeudesta välttämättä voida suoraan päätellä betonin tarttuvuusominaisuutta (yhdistelmä Pika Parmix & SR-sementti putosi ripustuskokeessa varsin nopeasti, vaikka saavutti tärytysrajan noin 10 minuutissa).

Lämpötilan nousua seurattiin lämpöeristetyissä muoteissa. Betonit tiivistettiin kiihdytinlisäyksen jälkeen muotteihin, joissa oli semiadiabaattiset olosuhteet. Fast Set -kiihdyttimellä betonin lämpötila nousi 20 minuutin kuluessa runsaat 5 °C. Lämpötila pysyi tällä tasolla noin 3 tuntia. Tämän jälkeen lämpötila nousi vielä seuraavan 12 tunnin aikana (lämpötilan nousu oli yhteensä noin 15 °C). Sementti oli Paraisten Rapid.

Pika Parmix -kiihdyttimellä lämpötila nousi tasaisesti 3,5 tunnin aikana alle +5 °C. Lämpötila jatkoi nousua noin 10 tuntiin saakka (lämpötila nousi yhteensä runsaat +15 °C).

Fast Set -kiihdyttimellä lämpötilan nopea nousu varhaisvaiheessa kuvaa hyvin kiihdyttimen aikaansaamaa sementin varhaisvaiheen suurta reaktionopeutta.

Pika Parmix -kiihdyttimellä lämpötilan hidaskas nousu varhaisvaiheessa kuvaa hyvin kiihdyttimen aikaansaamaa sementin pientä reaktionopeutta varhaisvaiheessa.

Lämpötilan kehitystä viileissä olosuhteissa seurattiin tiivistämällä 100 mm:n betonikerros heti kiihdyttimisen jälkeen noin +10 °C lämpöistä betonilaattaa vasten. Betonien lämpötila oli heti tiivistämisen jälkeen noin +25 °C (Fast Set -kiihdytin) ja noin +20 °C (Pika Parmix -kiihdytin). Betonien lämpötilat laskivat noin +10 °C tasolle hieman yli 2 tunnin kuluessa.

Fast Set -kiihdyttimellä alkulämpötila oli sementin suuren reaktionopeuden takia heti tiivistämisen jälkeen noin 5 °C korkeampi kuin Pika Parmix -kiihdyttimellä. Kummassakin tapauksessa lämpötila laski melko nopeasti ja samansuuntaisesti. Lämpötilan nousua ei juuri havaittu sen jälkeen, kun lämpötilat olivat laskeneet noin +10 °C tasolle.

Puristuslujuuden kehitystä seurattiin noin +20 °C lämpötilassa 100 mm:n särmäisillä koekappaleilla (Paraisten Rapid). Puristuslujuus määritettiin 1, 2, 7 ja 28 vrk:n iässä.

Fast Set -kiihdyttimellä (annostus 7 %) lujuus oli 1 ja 2 vrk:n iässä noin 12 ja 27 MPa. Lujuus oli 7 ja 28 vrk:n iässä noin 46 ja 54 MPa.

Pika Parmix -kiihdyttimellä (annostus 5 %) lujuus oli 1 ja 2 vrk:n iässä noin 15 ja 30 MPa. Lujuus oli 7 ja 28 vrk:n iässä noin 38 ja 48 MPa.

Puristuslujuuden kehitystä seurattiin noin +10 °C lämpötilassa 100 mm:n särmäisillä koekappaleilla (Paraisten Rapid ja SR). Puristuslujuus määritettiin 2, 6 ja 24 tunnin iässä.

Fast Set -kiihdyttimellä (annostus 5 %) lujuus oli 2, 6 ja 24 tunnin iässä noin 0,3, 0,7 ja 12 MPa (Paraisten Rapid).

Pika Parmix -kiihdyttimellä (annostus 8 %) lujuus oli 0,5, 1,7 ja 19 MPa.

Pika Parmix -kiihdyttimellä (annostus 5 %) 2 tunnin lujuus SR-sementin kanssa oli ainoastaan 0,2 MPa.

Edellytykset 20 MPa:n lujuuden saavuttamiseen tunneliolosuhteissa yhden vuorokauden iässä Fast Set- kiihdyttimellä ovat vähäiset. Pika Parmix -kiihdyttimellä kyseisen lujuu-

den saavuttaminen edellyttää kiihdytinannostusta, joka ylittää suositellun 5 %:n enimmäisannostuksen.

Kuivumiskutistuma määritettiin 40 x 40 x 160 mm³:n prismoilla 1–56 vrk:n iässä. Notkistin Glenium 51 ei lisännyt kutistumaa vertailubetoniin nähden. Myös kiihdyttimien vaikutus kuivumiskutistumaan oli vähäinen.

Vesitiiviys määritettiin 100 mm:n särmäisillä koekappaleilla. Kiihdyttimiä sisältäneiden koekappaleiden vedentunkeumaluvut olivat 6–17 mm. Tämän mukaisesti betonit voidaan katsoa vesitiiviiksi.

Sisäinen säröily määritettiin 100 mm:n särmäisistä hyvän jälkihoidon saaneista koekappaleista 1–2 vrk:n ja noin 28 vrk:n iässä. Koekappaleet säilytettiin +20 °C lämpötilassa.

Fast Set -kiihdyttimellä (annostus 7 %) säröilyindeksi oli enimmillään 0,5 (paikoin mikrohalkeamia). Säröily oli sen verran vähäistä, että sen ei katsota heikentävän betonin vesitiiviyttä.

Pika Parmix -kiihdyttimellä (annostus 5 %) säröilyä esiintyi hieman enemmän kuin Fast Set -kiihdyttimellä. Säröily oli kuitenkin kaiken kaikkiaan sen verran vähäistä, että sen ei katsota heikentävän merkittävästi vesitiiviyttä.

Ilman kiihdytintä valmistetuissa betoneissa ei esiintynyt säröilyä.

Vesi-sementtisuhde vaihteli 0,40–0,50 (kokonaisvesi-sementtisuhde). Vesi-sementtisuhteella ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta säröilyn määrään.

Pika Parmix -kiihdyttimen annostus oli 3 %-yksikköä pienempi kuin Fast Set -kiihdyttimen annostus. Tästä huolimatta Pika Parmix -kiihdyttimellä säröilyä esiintyi hieman enemmän kuin Fast Set -kiihdyttimellä.

Sisäinen säröily määritettiin myös sivuilta lämpöeristetyistä kappaleista, jotka tiivistettiin noin +10 °C lämpöistä betonilaattaa vasten. Kappaleiden yläpintaan kohdistettiin noin 1,5 m/s tuulennopeus.

Fast Set-kiihdyttimellä (annostus 5 ja 7 %) säröilyindeksi oli enimmillään 0,5. Heikko tuuli ja lievästi kuivattavat olosuhteet eivät näin ollen suurentaneet säröilyindeksiä.

Pika Parmix -kiihdyttimellä (annostus 5 %) säröilyindeksi oli 1,0 (mikrosäröilyä oli koko näytteen alueella). Heikon tuulen ja lievästi kuivattavien olosuhteiden ei havaittu vaikuttavan merkittävästi säröilyindeksiin.

Pika Parmix -kiihdyttimen suurella annostuksella (annostus 10 %) säröilyindeksi oli myös 1.

Hyvin ilmeisesti pieni tuuli ja lievästi kuivattavat olosuhteet eivät kokeissa vaikuttaneet säröilyindeksiin.

Liite 4: Koealueet

Koealueet 1, 2 ja 3



Koealueet 4, 5 ja 6



Vesipaine 2,0 baaria, 13.12.2005

Koealueet 1, 2 ja 3



Koealueet 4, 5 ja 6



Kartoitus ennen paineistusta, 13.1.2006

Koalueet 1, 2 ja 3



Koalueet 4, 5 ja 6



Vesipaine 2 baaria, 20.1.2006

Tekijä(t) Orantie, Kalervo, Ritola, Jouko & Kronlöf, Anna			
Nimeke Kalliotilojen ruiskutettavat vesitiiviit komposiittirakenteet			
Tiivistelmä Tutkimus sisältää lyhyen kirjallisuusosan, laboratoriokokeet ja kenttäkokeet. Laboratoriokokeiden mukaan alkalivapailla kiihdyttimillä lujuudenkehitys on hieman hitaampaa kuin vesilasipohjaisilla kiihdyttimillä. Kiihdyttimien kemialliset reaktiot lisäävät tuoreen ruiskubetonin kutistumaa. Tämän vuoksi kiihdyttimiä tulee käyttää vain tarpeellinen määrä. Mikrorakenneanalyysin mukaan vesilasipohjaiset kiihdyttimet aiheuttavat betoniin herkästi mikrohalkeilua ja lujuuskatoa. Alkalivapailla kiihdyttimillä mikrohalkeilun määrä ja lujuuskato ovat vähäisiä. Betonimassaan sekoitettavat teräskuidut ovat suositeltavia, sillä ne vähentävät halkeamien muodostusta ja mahdollisesti muodostuvien halkeamien levenemistä. Betonimassan alhainen lämpötila vähentää kosteuden haihtumista heti ruiskutuksen jälkeen ja vähentää siten tuoreen ruiskubetonin halkeiluriskiä. Betonimassaan sekoitettava jälkihoitoaine ei välttämättä muodosta riittävää jälkihoitoa. Tämän vuoksi suositeltava jälkihoito on vesisumutus. Vesisumutus tulee aloittaa heti ruiskubetonoinnin etenemisen myötä.			
Avainsanat composite structures, shotcrete, additives, accelerators, water glass accelerators, structural analysis, cracking, shrinkage, waterproofing, rock caverns			
ISBN 951-38-6885-0 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)			
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)			Projektinumero 1020
Julkaisuaika Joulukuu 2006	Kieli Suomi, engl. abstr.	Sivuja 61 s. + liitt. 88 s.	Hinta
Projektin nimi RUISBET		Toimeksiantaja(t) Tekes, Helsingin kaupungin geotekninen osasto, Helsingin Energia, Helsingin Vesi, Helsingin Pelastuslaitos, Posiva Oy, VUOLI-projekti, YIT Oy, Semtu Oy, Degussa Oy, AqvaConTec Oy, Normet Oy, Lohja Rudus Oy ja VTT	
Yhteystiedot VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. vaihde 020 722 111 Faksi 020 722 7060		Myynti VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374	

Author(s) Orantie, Kalervo, Ritola, Jouko & Kronlöf, Anna			
Title Sprayable watertight composite structures in rock caverns			
Abstract The research consists of a literature survey, laboratory tests and field tests. According to the laboratory tests the strength development is slightly slower when using alkali-free accelerators compared with water glass accelerators. Chemical reactions of shotcrete accelerators increase the shrinkage of fresh shotcrete. Therefore shotcrete accelerators must not be used more than needed. In accordance to the microstructure analysis water glass accelerators cause microcracking and loss of strength. Alkali free accelerators caused minor microcracking and loss of strength. Steel fibres mixed in fresh concrete are recommended, because they diminish cracking and limit the crack widths. The low temperature of fresh concrete diminishes evaporation of water immediately after shotcreting and therefore diminishes the risk of cracking. Internal curing agents do not necessarily provide adequate curing. Therefore water spraying is recommended as curing. Water spraying shall begin immediately as shotcreting proceeds.			
Keywords composite structures, shotcrete, additives, accelerators, water glass accelerators, structural analysis, cracking, shrinkage, waterproofing, rock caverns			
ISBN 951-38-6885-0 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)			
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)			Project number 1020
Date December 2006	Language Finnish, English abstr.	Pages 61 p. + app. 88 p.	Price
Name of project RUISBET		Commissioned by Tekes, City of Helsinki Geotechnical Division, Helsinki Energy, Helsinki Water, City of Helsinki Rescue Department, Posiva Oy, VUOLI-project, YIT Oy, Semtu Oy, Degussa Oy, AqvaConTec Oy, Normet Oy, Lohja Rudus Oy and VTT Technical Research Centre of Finland	
Contact VTT Technical Research Centre of Finland P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 111 Fax +358 20 722 7060		Sold by VTT Technical Research Centre of Finland P.O.Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4404 Fax +358 20 722 4374	

VTT Tiedotteita – Research Notes

- 2349 Simulation-based design process of smart machines. Lehtonen, Mikko (ed.). 2006. 184 p.
- 2350 Hekkanen, Martti & Heljo, Juhani. 2006. Rakennusten käyttö- ja huolto-ohjeiden kelpoisuus ja kehittämistarve. 47 s. + liitt. 8 s.
- 2351 Itävaara, Merja, Vikman, Minna, Kapanen, Anu, Venelampi, Olli & Vuorinen, Arja. Kompostin kypsyystestit. Menetelmäohjeet. 2006. 38 s.
- 2352 Fagernäs, Leena, Johansson, Allan, Wilén, Carl, Sipilä, Kai, Mäkinen, Tuula, Helynen, Satu, Daugherty, Erik, den Uil, Herman, Vehlow, Jürgen, Kåberger, Tomas & Rogulska, Magdalena. Bioenergy in Europe. Opportunities and Barriers. 2006. 118 p.
- 2353 Liukko, Timo, Airola, Merja, Ilomäki, Sanna-Kaisa, Mikkola, Markku, Simons, Magnus & Pohto, Petteri. Kasvukompassi. 50+ -yritysten menestyksellisen kasvun ja kehittämisen mallit. 2006. 63 s.
- 2354 Hekkanen, Martti, Hienonen, Markku, Ilmarinen, Juhani, Kilpeläinen, Mikko, Klemettilä, Tapio, Mäkikyrö, Tapani, Riippa, Tommi, Seppälä, Pekka & Tulla, Kauko. Pientalon ekomittarit. 2006. 43 s. + liitt. 9 s.
- 2355 Poikkimäki, Jyrki & Koivisto, Tapio. Uusien liiketoimintamahdollisuuksien strateginen innovointi. 2006. 72 s.
- 2356 Hemmilä, Kari & Heimonen, Ismo. Ikkunoiden energialuokituksen pilotointi. 2006. 55 s. + liitt. 15 s.
- 2357 Mäkinen, Tuula, Soimakallio, Sampo, Paappanen, Teuvo, Pahkala, Katri & Mikkola, Hannu. Liikenteen biopolttoaineiden ja peltoenergian kasvihuonekaasutaseet ja uudet liiketoimintakonseptit. 2006. 134 s. + liitt. 19 s.
- 2358 Orantie, Kalervo, Ritola, Jouko & Kronlöf, Anna. Kalliotilojen ruiskutettavat vesitiiviit komposiittirakenteet. 2006. 62 s. + liitt. 89 s.
- 2359 Malm, Timo & Hämäläinen, Vesa. Turvallisuustietoinen koneiden ja tuotantolinjojen modernisointiprosessi. 2006. 36 s. + liitt. 15 s.
- 2360 Kovanen, Keijo, Heimonen, Ismo, Laamanen, Jarmo, Riala, Riitta, Harju, Riitta, Tuovila, Hanna, Kämppi, Reima, Säntti, Jaakko, Tuomi, Timo, Salo, Suvi-Päivikki, Voutilainen, Risto & Tossavainen, Antti. Ilmanvaihtolaitteiden hiukkaspäästöt. Altistuminen, mittaaminen ja tuotetestaus. 2006. 57 s. + liitt. 6 s.
- 2361 Kumpulainen, Lauri, Laaksonen, Hannu, Komulainen, Risto, Martikainen, Antti, Lehtonen, Matti, Heine, Pirjo, Silvast, Antti, Imris, Peter, Partanen, Jarmo, Lassila, Jukka, Kaipia, Tero, Viljainen, Satu, Verho, Pekka, Järventausta, Pertti, Kivikko, Kimmo, Kauhaniemi, Kimmo, Lågland, Henry & Saaristo, Hannu. Verkkovisio 2030. Jakelu- ja alueverkkojen teknologiavisio. 2006. 89 s.
- 2362 Koponen, Pekka, Kärkkäinen, Seppo, Farin, Juho & Pihala, Hannu. Markkinahintasignaaleihin perustuva pienkuluttajien sähkönkäytön ohjaus. Loppuraportti. 2006. 66 p. + app. 8 p.

Tätä julkaisua myy

VTT
PL 1000
02044 VTT
Puh. 020 722 4404
Faksi 020 722 4374

Denna publikation säljs av

VTT
PB 1000
02044 VTT
Tel. 020 722 4404
Fax 020 722 4374

This publication is available from

VTT
P.O. Box 1000
FI-02044 VTT, Finland
Phone internat. +358 20 722 4404
Fax +358 20 722 4374