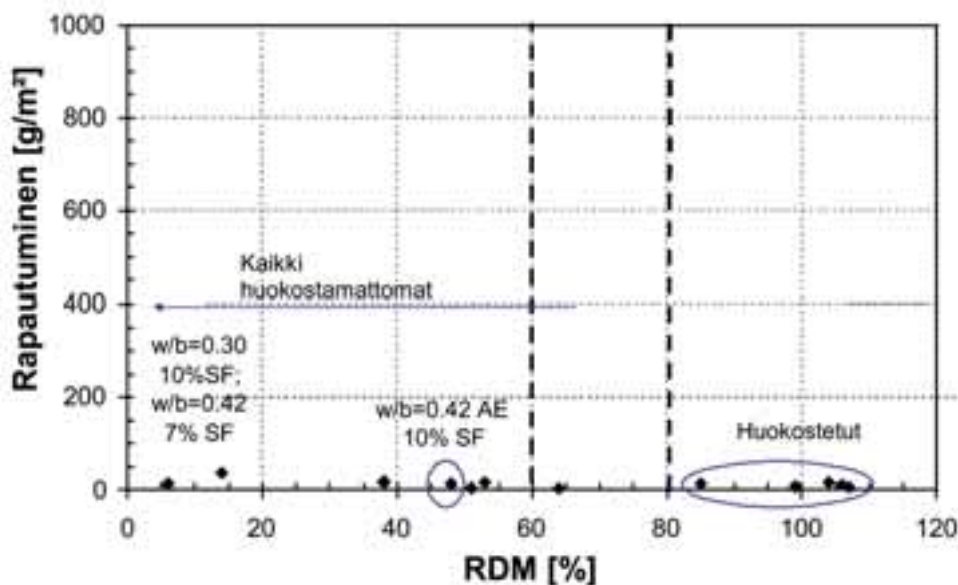


BETONIN YMPÄRISTÖYSTÄVÄLLISYYDEN PARANTAMINEN JA PITKÄN KÄYTTÖIÄN VARMISTAMINEN

Erika Holt, Ph.D., VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
 Heikki Kukko, tekn. tri, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
 Andrzej Cwirzen, tekn. tri, Teknillinen korkeakoulu
 Vesa Penttala, professori, Teknillinen korkeakoulu



1 Laattakoetulokset lämpötilassa $\pm 20^{\circ}\text{C}$ ilman suolaa. Silikamassat (SF) ja huokostus (AE), 112 jäädytys-sulatus-kierrosta.

PROJEKTIN LÄHTÖKOHTA

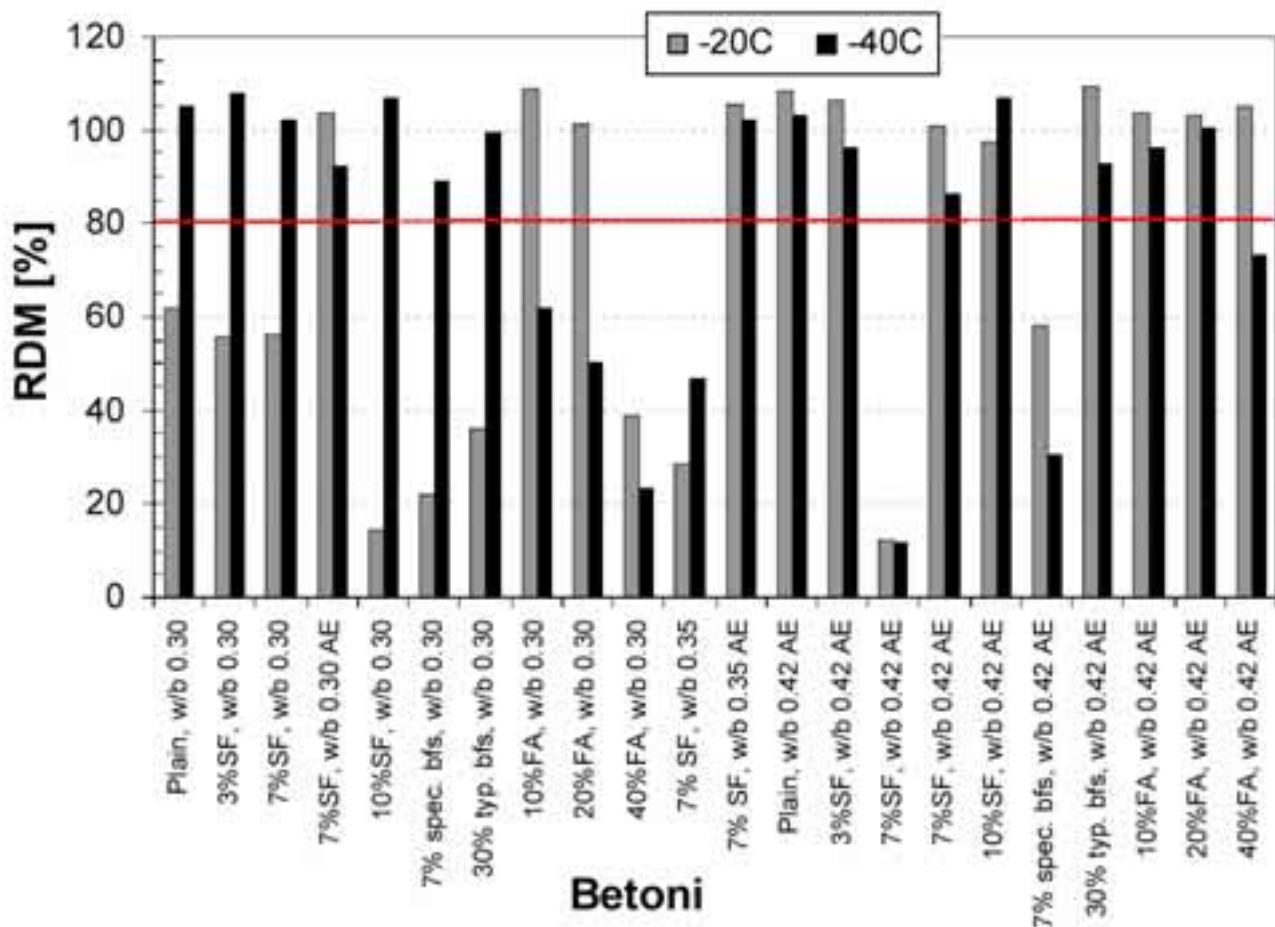
Ympäristöystävällisten betonien ja sivutuotteiden käytön edellytyksenä on varmuus betonin hyvästä säilyvyydestä ja pitkästä käyttöiästä. Syksyllä 2004 päättyi EU-projekti, jonka tavoitteena oli tutkia ja ohjeistaa sivutuotteita sisältävän korkealuokkaisen ja hyvin säilyvän betonin valmistusta ja käyttöä. Tämä kolmivuotinen projekti oli osa EU:n viidettä runko-ohjelmaa "Competitive and Sustainable Growth" ja projekti oli nimeltään "CONLIFE : Life-time prediction of high-performance concrete with respect to durability".

Projektin budjetti oli noin 2 miljoonaa euroa, josta 1,2 miljoonaa tuli EU:lta /1/. Suomesta projektiin osallistuivat sekä VTT Rakennustekniikka että TKK:n rakennusmateriaalitekniikan laboratorio. Muut osallistujat tulivat Saksasta, Italiasta, Norjasta, Tanskasta ja Islannista.

CONLIFE-projektin tavoitteena oli selvittää, miten tuotetaan hyvin säilyvää betonia sivutuotteita käyttäen. Tutkimusohjelmassa keskityttiin yli 60 MPa:n lujuisiin betoneihin. Tässä artikkelissa tutkituista betoneista käytetään nimitystä korkealujuusbetonit, vaikka tavoitteena oli korkean lujuustason lisäksi muiden käyttöominaisuuksien, kuten säilyvyyden hallinta. Projektin aiheen nosti ajankohtaiseksi tarve vähentää CO₂-päästöjä Kioton sopimuksen /2/ mukaisesti, johon voidaan päästä sementin käyttömäärä pienentämällä ja mineraalisia sivutuotteita hyödyntämällä.

KOEOHJELMA

Tutkimuksessa valmistettiin koekappaleita sekä laboratorio- että kenttäkokeita varten. Pohjoismaiset koekappaleet, myös Suomessa tehtyjä koekappaleita varten, tehtiin käyttäen Aalborg Portlandin sementtiä tyyppiltään CEM I 52.5R. Vesimäärä oli vakio 150 kg/m³, ja vesi-sideainesuhde oli 0,30, 0,35 tai 0,42. Kaikki runkoaine oli saksalaista basalttia, jonka suurin raekoko oli 16 mm. Notkistimena käytettiin yhtä valmistetta siten, että leviämätavoite oli 500 mm. Huokostusta käytettiin kaikissa vesi-sideainesuhteen 0,42 betoneissa tavoitelmamäärän ollessa 5%. Lähes kaikki alempien vesi-sideainesuhteiden (0,30 ja 0,35) betonit olivat huokostamattomia.



2
Sisäisen vaurioitumisen vertailu (suhteellinen dynaaminen kimmomoduuli RDM) laattakokeessa ilman suolarasitusta ± 20 °C ja ± 40 °C pakkaskokeissa 56 jäädytys-sulatuskierroksen jälkeen.

Käytetyt 22 suhteitusta voidaan jaotella seuraavasti:

- 2 vertailusuhteitusta ilman sivutuotteita
- 6 perussuhteitusta (7% silikaa laskettuna sementin määrästä) kolmella vesi-sideainesuhteella, huokostettuna ja ilman huokostusta
- 6 lentotuhkasuhteitusta (10, 20 ja 40%), joissa myös 7% silikaa
- 4 masuunikuonasuhteitusta (30% tavallista jauhattua masuunikuonaa silikan kanssa tai 7% erikoishienoa masuunikuonaa ilman silikaa)
- 4 suhteitusta eri silikamäärillä (3 ja 10%).

LABORATORIOKOEIDEN TULOKSET

Tässä yhteydessä kuvataan joitakin pakkasenkestävyyden päätuloksia EU-projektista. Pakkaskokeiden ja muiden säilyvyyskokeiden täydelliset tulokset löytyvät projektiraporteista /1/. Seuraavat tulokset ovat, jollei muuta mainita, laatta- eli Borås- kokeista 112 jäädytys-sulatuskierroksen jälkeen 24 tunnin kierrosajalla ja ± 20 °C tai ± 40 °C lämpötilavaihtelulla. Kuvassa 1 pinnan rapautumista (y-akseli) verrataan sisäiseen vaurioitumiseen. Sisäinen vaurioituminen on mitattu suhteellisen dynaamisen kimmomoduulin avulla (RDM -akselilla). Betoni, jonka RDM-arvo on alle 80% tai rapautuminen yli 1000 g/m², katsotaan vaurioituneeksi. Tässä artikkelissa on käytetty lyhennettä RDM, kuten projektiraporteissakin. Suomen betoninormeissa /3/ suhteellisen dynaamisen kimmomoduulin lyhenne on γ .

LAATTAKOE ± 20 °C, ILMAN SUOLAA

Kaikki suolattomalla vedellä testatut korkealujuusbetonit osoittivat, että sisäinen vaurioituminen oli merkitevin vaurioitumismekanismi, koska missään betonissa ei ilmennyt vakavaa pinnan rapautumista. Useimmissa tapauksissa huokostamattomat betonit eivät täyttäneet hyväksyntärajaa. Tulos oli riippumaton silikamäärästä, joka vaihteli välillä 0...10%. Vain yksi huokostettu betoni ei täyttänyt vaatimusta. Siinä oli korkea 10% silikamäärä ja vesi-sideainesuhde 0,42. Kokeen puolivälissä 56 kierroksen kohdalla tämäkin betoni oli hyväkuntoinen suhteellisen dynaamisen kimmomoduulin ollessa 98% alkuperäisestä. Kokeen lopussa huonokuntoisimpia olivat runsaasti silikaa sisältävät huokostamattomat betonit, joiden dynaaminen kimmomoduuli oli lopuksi alle 10% lähtöarvosta.

Tulokset olivat parempia, kun massat sisälsivät 7% silikamäärän lisäksi eri määriä lentotuhkaa. Vain suurimmalla 40%:n lentotuhkamäärällä (w/b=0,30 ja ilman huokostusta) tulos ei täyttänyt hyväksyntärajaa. Muut huokostamattomat betonit vesi-sideainesuhteella ja lentotuhkamäärällä 10% tai 20% täyttivät pakkasenkestävyyden vaatimuksen samoin kuin kaikki huokostetut betonit (w/b=0,42 ja 10, 20 ja 40% lentotuhkaa).

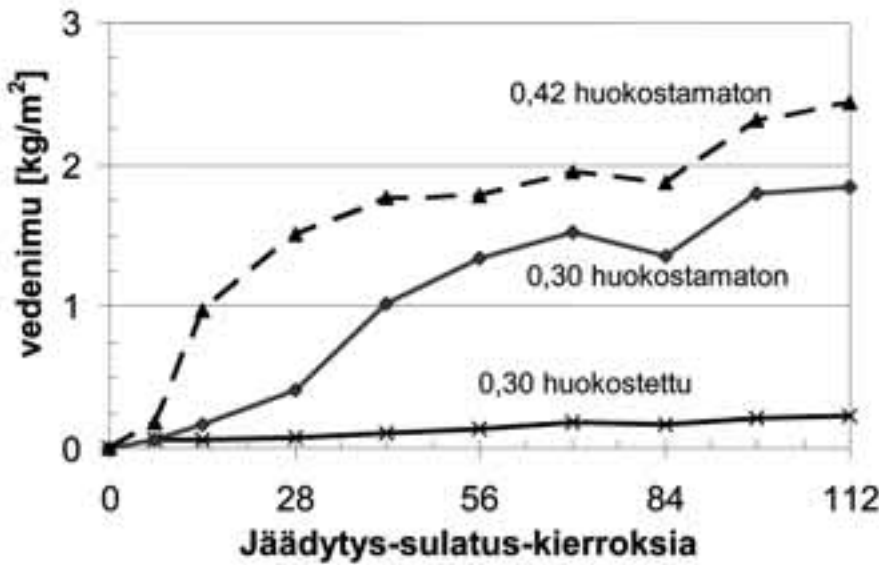
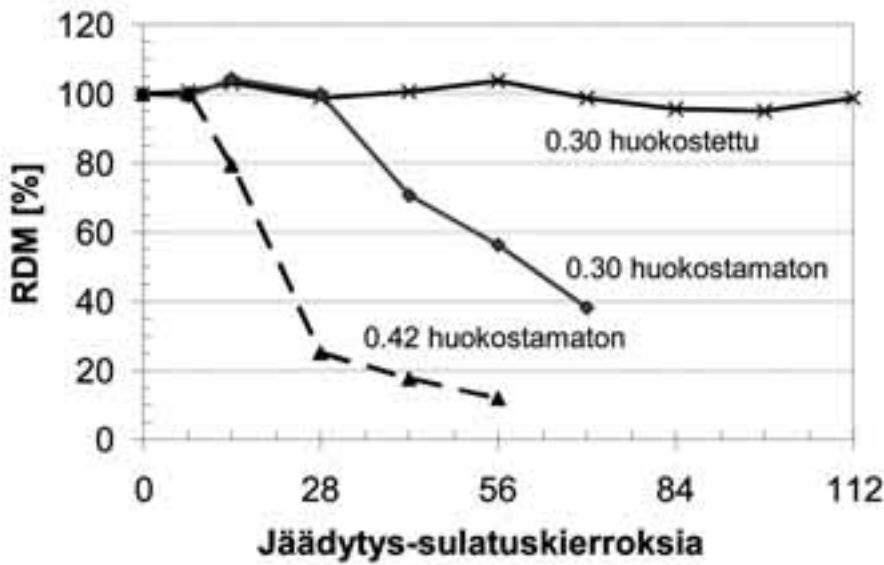
Kahta erilaista masuunikuonaa sisältäneiden betonien testaus osoitti, että vain huokostettu normaalia kuonaa sisältävä betoni (w/b=0,42, 30% kuonaa) antoi hyväksyttävän tuloksen. Mikään kolmesta huokostamattomasta betonista ei läpäissyt

testiä. Nämä olivat kaksi erikoishienoa kuonaa 7% sisältänyttä betonia ja tavallista kuonaa käyttäen tehty alhaisen vesi-sideainesuhteen betoni.

Näiden ilman suolarasitusta tehtyjen pakkaskokeiden perusteella on ilmeistä, että huokostamisen merkitys on olennainen pakkasenkestävyydelle. Kokeissa ei ollut tapausta, että huokostettu betoni rapautui, vaikka huokostuksen laatukin oli suhteellisen huono.

LAATTAKOE ± 40 °C, ILMAN SUOLAA

Edellisten lisäksi tehtiin myös ankarampia pakkaskokeita ilman suolarasitusta. Näissä lämpötila vaihteli ± 40 °C. Kuvassa 2 näkyy suurimman sisäisen vaurioitumisen vertailu 56 kierroksen jälkeen ± 20 °C ja ± 40 °C testeissä. Kuten havaitaan, korkealujuusbetonit suoriutuivat kutakuinkin yhtä hyvin molemmissa testaustavoissa. Selvin poikkeus oli, että alhaisella vesi-sideainesuhteella 0,30 ja lentotuhkamäärillä 10, 20 ja 40% (sekä 7% silikaa ja huokostus) betoni täytti pakkasenkestävyyden vaatimuksen ± 20 °C kokeessa, mutta ei läpäissyt ± 40 °C koetta. Samaa pätee myös 40% lentotuhkaa sisältäneeseen betoniin korkeammalla vesi-sideainesuhteella 0,42 (huokostettu). Päinvastainen suuntaus oli nähtävissä joissakin huokostamattomissa vesi-sideainesuhteen 0,30 betoneissa, missä eri määriä silikaa sisältäneet betonit selviytyivät paremmin ankarassa pakkaskokeessa kuin ± 20 °C kokeessa.



3 Sisäisen vaurioitumisen ja vedellä kyllästymisen eteneminen ajan funktiona ilman suolaa tehdyssä laattakokeessa.

PAKKASENKESTÄVYYDEN MALLINTAMINEN

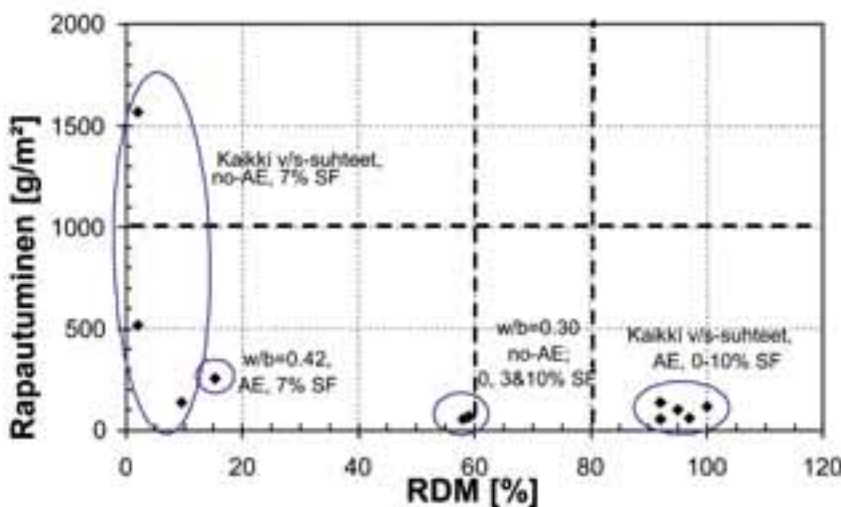
Ilman suolarasitusta tehtyjen laattakokeiden tulokset osoittivat, että vaurioitumisen alku riippuu betonin kapillaarisesta vedelläkylästysasteesta. Kokeiden aikana mitattiin koekappaleiden vedellä kylästyminen. Tulokset osoittavat, että kun kriittinen kylästysaste on saavutettu, koekappaleiden vaurioituminen sisäisesti alkaa. Tämä vahvistaa Setzerin mikro-jäälinnsiteorian /4/ ja Fagerlundin kylästysasteiteorian /5/ paikkansapitävyyttä. Esimerkki riippuvuudesta nähdään kuvassa 3, jossa sisäisen vaurioitumisen eteneminen (RDM) on käänteisesti verrannollinen vedelläkylästykseen. Nämä tulokset koskevat betoneita, joissa on 7% silikaa. Tulokset osoittavat, että kriittisen kylästysasteen saavuttamiseen kuluva aika on tärkeä tekijä ilman suolaa tapahtuvassa pakkasrasituksessa. Lisäksi betonin mikrorakenteen tiiviys pienentää sisäistä vaurioitumista. Tässä koesarjassa kriittinen imeytyneen vesimäärä oli lähellä arvoa 0,5 kg/m².

LAATTAKOKEET (±20 °C)

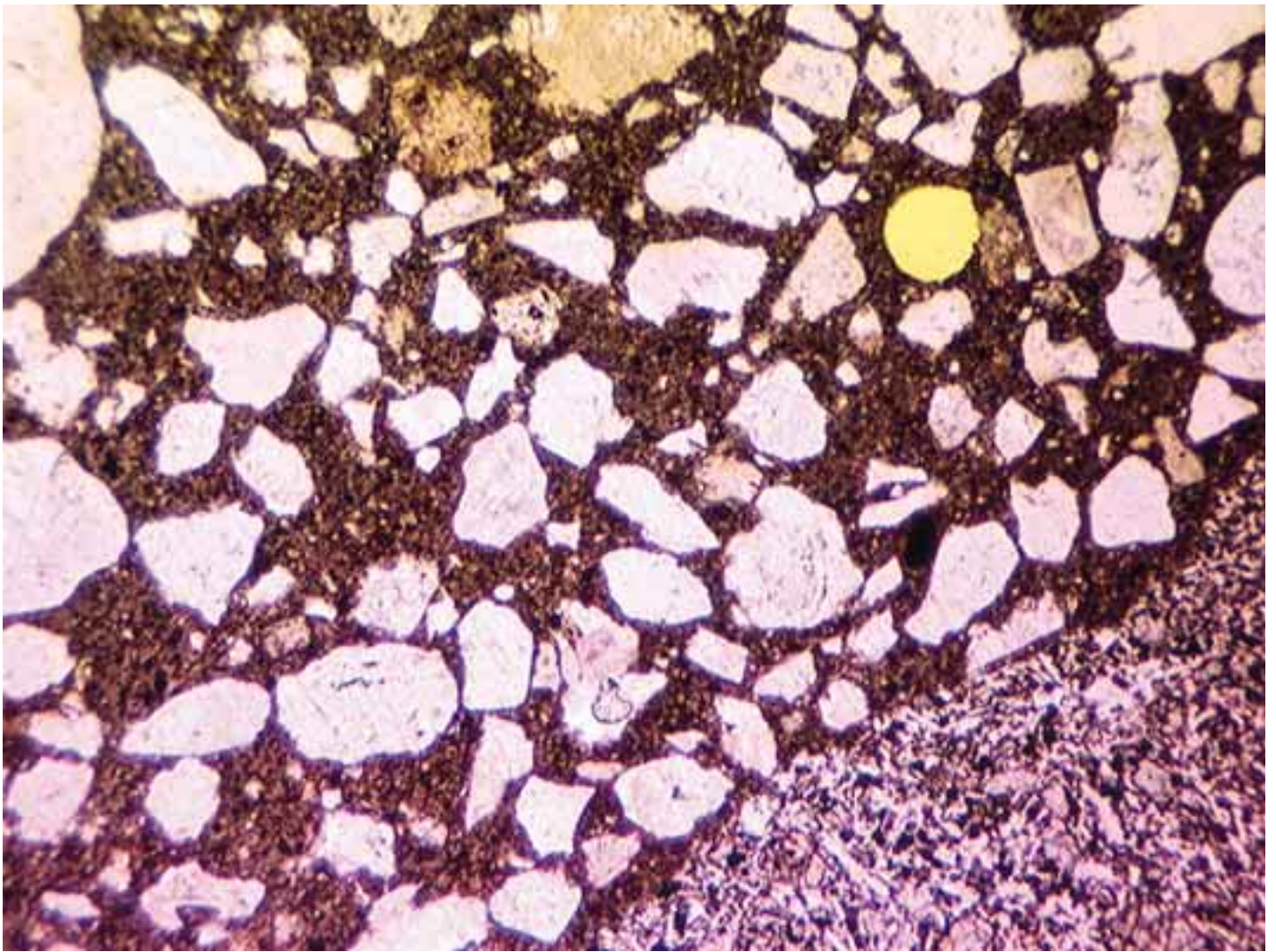
Pakkaskokeet 3% NaCl-liuoksella osoittivat, että pinnan rapautuminen oli kriittisempi vaurioitumistapa kuin vasta myöhemmin tapahtuva sisäinen vaurioituminen. Seuraavassa koetuloksia on käsitelty 56 jäädytys-sulatus-kierroksen jälkeen, koska joissain kokeissa koekappaleet rapautuivat ennen 112 kierrosta niin paljon, että koe keskeytettiin.

Tehdyissä laattakokeissa tulokset vaihtelivat vaurioitumattomista betoneista (kuten huokostetut) totaaliseen kimmomoduulin häviämiseen ja kohtalaisesta suureen pinnan rapautumiseen (kuten huokostamattomissa betoneissa). Betonin hyväksymiskriteerit suola-pakkasympäristössä on yleensä asetettu vain pinnan rapautumiselle. Nyt saadut tulokset osoittivat, että korkealujuusbetoneille myös sisäisen vaurioitumisen mitta (RDM) on tärkeä, koska joissain betoneissa sisäinen vaurioituminen oli vakavaa pinnan rapautumisen lisäksi.

Kuvassa 4 on esitetty joukko tuloksia vertailubetonien ja silikabetonien kokeista. Useimmiten huokostettuina



4 Laattakokeen (± 20 °C) tulokset silikabetoneilla ja huokostettuina 56 kierroksen jälkeen.



5

kostettu betoni ei vaurioitunut riippumatta vesi-sideainesuhteesta ja silikan käyttömäärästä. Ainoa poikkeus oli suhteitus, jossa vesi-sideainesuhde oli 0,42 ja silikamäärä 7%. Tässä betonissa oli havaittavissa sisäistä vaurioitumista (RDM=15%), mutta ei pinnan rapautumista. Huokostamattomat betonit eivät olleet suola-pakkaskestäviä. Huokostamattomat perusbetonit 7% silikamäärällä ja eri vesi-sideainesuhteilla osoittivat vaihtelevaa pinnan rapautumista, mutta rapautuivat täysin sisäisestä halkeilusta. Muilla silikamäärillä (0,3 ja 10%, v/s=0,30, huokostamaton) vaurioituminen ei ollut yhtä suurta, mutta nekään eivät täyttäneet pakkaskestävyysvaatimusta.

Huokostuksen vaikutus oli selvin lentotuhkabeteoneissa. Huokostamattomina ne kaikki vaurioituivat vesi-sideainesuhteella 0,30 halkeilemalla. Lentotuhkamäärän lisääminen 10, 20 ja 40% lisäsi pinnan rapautumista. Korkeammalla vesi-sideainesuhteella 0,42 kaikki betonit täyttivät kummatkin säilyvyysvaatimukset, mikä voidaan selittää niiden huokostuksella.

Masuunikuonabetoni korkeammalla vesi-sideainesuhteella 0,42 ja 7% annostuksella erittäin hienoksi jauhettua masuunikuonaa rapautui sekä halkeilemalla että pinnan rapautumisella. Tämä betoni oli huokostamaton. Huokostettu betoni, v/s 0,42 ja 30% tavallista jauhettua masuunikuonaa ei vaurioitunut, samoin kuin eivät alhaisen vesi-sideainesuhteen 0,30 kummatkaan kuonabetonit.

MUUT KOKEET

CONLIFE-projektissa tehtiin useita muita kokeita, kuten lämpötilan vaihtelun kestävyys testaus, haponkestävyys, meriveden kestävyys (kloridien imeytyminen) ja kutistuminen. Tarkemmat selostukset ja johtopäätökset näistä löytyvät CONLIFE-projektin raporteista /1/.

Mikroskooppitutkimukset osoittivat, että korkealujuusbetoneissa on yleensä tiiviimpi ja homogeenisempi mikrorakenne kuin tavallisessa betonissa (kuva 5). Kuitenkin joskus todettiin seosainesten tai ilmahuokosten epätasaista jakautumista. Nämä ongelmat olivat yleisempiä alhaisella vesisementtisuhteella.

5

Optisella mikroskoopilla otettu kuva korkealujuusbetonista vesi-sideainesuhteella 0,42. Silikaa 7%, huokostamaton. Kuvan lyhyen sivun pituus on 2,7 mm.



6

KENTTÄKOKEET

Nopeutettujen laboratoriokokeiden lisäksi laboratorioissa valettuja koekappaleita sijoitettiin koekentälle niiden säilyvyyden tutkimiseksi. Neljä koekappaletta jokaisesta 22 betonista sijoitettiin suomalaiselle koekentälle, joka sijaitsee Sodankylässä (kuva 6), missä alin lämpötila laskee -40°C :een. Jäätymis-sulamiskierroksia oli noin 50 vuodessa. Jokaisen talven alussa ja lopussa koekappaleet tutkittiin silmämääräisesti ja niiden ominaisuudet mitattiin halkeamien ja rapautumisen toteamiseksi. Kolmen vuoden kenttäkokeen jälkeen jotkut betonit hajosivat sisäisen halkeilun vuoksi. Nämä betonit olivat huokostamattomia ja niiden vesi-sideainesuhde oli koebetonien korkein. Tulokset korreloivat usein samojen betonien laboratoriotulosten kanssa. Samanlaiset koekappaleet sijoitettiin myös kahdeksalle muulle koekentälle Saksassa, Italiassa, Islannissa ja Ruotsissa. Muissa maissa vaurioituminen oli vähäisempää kuin Suomen kylmässä ilmastossa. Kenttäkokeet jatkuvat toivottavasti tulevina vuosina, jotta laboratorio- ja kenttätulosten korrelaatiota voidaan varmentaa ja samalla parantaa käyttöikämitoituksen menetelmiä.

Projektin yhtenä osana oli myös olemassaolevien rakenteiden tutkimus, jossa otettiin eri puolilla Eurooppaa olevista rakenteista betoninäytteet ja arvioitiin niiden perusteella korkealujuusbetonin säilyvyyttä käytännössä. Suomessa tutkittiin kolme korkealujuusbetonikohdetta, moottoritiebetoni Tampereen lähellä (suunnittelulujuus K80, rakennusvuosi 1984, ks. kuva 7), silta Porvoon lähellä (K70, 2000) ja ratapölkky (K80, 2001). Kaikkiaan projektissa tutkittiin lisäksi 50 rakennetta muualla Euroopassa. Niiden tulokset on raportoitu julkaisuissa /1/ ja /6/. Kaikkiaan suomalaisten rakenteiden tulokset olivat hyväksyttäviä ja kaikki rakenteet olivat hyväkuntoisia. Kiihdytetyissä laboratorioissa tehdyissä pakkaskokeissa jotkut koekappaleet rapautuivat odottamattoman nopeasti. Näin erityisesti moottoritiebetoni, jonka pinnan rapautuminen laboratorioissa oli suolapakkaskokeessa nopeaa. Vaurioitumisen arveltiin liittyvän erittäin tiiviiseen mikrorakenteeseen.

6

TKK:n tutkija Sodankylän koekentällä, jossa on CONLIFE-koekappaleita.

JOHTOPÄÄTÖKSET



7

Yleensä tulokset osoittivat, että korkealujuusbetoneilla, joiden vesi-sideainesuhde on alhainen, alle 0,42, oli parempi säilyvyys ympäristörasituksia vastaan kuin tavallisella vertailubetonilla. Tämän katsotaan liittyvän korkealujuusbetonin mikrorakenteen tiivyyteen. Joissakin tapauksissa kuitenkin myös alhaisen v/s -suhteen betoneilla tapahtui odottamaton ja äkillinen korkealujuusbetonin vaurioituminen. On otettava huomioon, että kokeet tehtiin vain yhdellä notkistimella, silikalla ja lentotuhkalla ja ne eivät siten edusta eri maissa käytettävissä olevien materiaalien valikoimaa eivätkä kuvaa niiden yhteensopivuuksia. Tämä on tärkeää turvallisen ja kestäväen korkealujuusbetonin käytön kannalta.

CONLIFE-projektin tulosten perusteella voidaan tehdä johtopäätös, että seosaineiden ja erityisesti lisäaineiden vaikutukset ovat suuremmat kuin alunperin odotettiin. Pienet lisäaineen tyyppiä tai seosaineiden määrää koskevat muutokset suhteutuksessa saattoivat aiheuttaa odottamattomia muutoksia säilyvyyteen ulko-olosuhteissa. Tulokset osoittivat, että korkealujuusbetonin säilyvyyden ennustaminen saattaa olla vaikeaa, jos kokemus perustuu tavalliseen betoniin ja yleiseen betonitekniiseen tietämykseen. Voidaan myös todeta, että korkealujuusbetonin säilyvyyskäyttäytyminen ei riipu sen lujuudesta ja on vaikeammin ennakoitavissa kuin tavallisen betonin. Koska korkealujuusbetonin koostumus vaihtelee paljon, säilyvyyden varmistaminen nopeutetuilla kokeilla on tarpeen ennen käyttöä, jotta turvallisuus ja hyvä säilyvyys varmistetaan. Ohjeistusta korkealujuusbetoneille ei voida suoraan siirtää tavallisesta betonista ja tämän vuoksi standardisoinnin kehittäminen on tarpeen.

Yksityiskohtaista tietoa CONLIFE-projektista ja sen tuloksista on saatavilla projektiraporteista /1/, projektin workshopin julkaisusta /7/ ja projektin nettisivuilta osoitteesta <http://fasae.ibpmw.uni-essen.de/euproject/>

- 1 Deliverable Reports D1 to D10, CONLIFE: Lifetime prediction of high-performance concrete with respect to durability, EU 5th Framework Project G5D1-2000-25795, <http://fasae.ibpmw.uni-essen.de/euproject/>, 2004.
- 2 Convention and Kyoto Protocol, www-sivu United Nations Framework Convention on Climate Change, <http://unfccc.int/resource/convkp.html>, 2004.
- 3 BY50 Betoninormit 2004, Suomen Betoniyhdistys ry, Helsinki, 2004. 263 s.
- 4 Setzer, M.J., "The micro ice lens pump – a new sight of frost attack and frost action," CONSEC 2001 Conference proceedings, 2001, ss. 428-438.
- 5 Fagerlund, G., Critical degrees of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete, CBI, Raportti 6:77, 1977.
- 6 Nordic Concrete Federation: "Durability of Exposed Concrete Containing Secondary Cementitious Materials," Proceedings of workshop in Hirtshals, Denmark, 21-23.10.2001.
- 7 Proceedings of international conference on durability of high-performance concrete, M.J. Setzer and S. Palecki, toim., 23-24.9.2004, Essen, Germany, AEDIFICATIO Publishers, 2004, 481 s.

KIRJALLISUUTTA

7

Tampereen tiebetonin näytteenotto CONLIFE-projektia varten.