

Robust Air – Tutkimus betonin ilmamäärän kohoamiseen vaikuttavista tekijöistä

Jouni Punkki, Professor of Practice
Fahim Al-Neshawy, Staff Scientist
Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden korkeakoulu
Rakennustekniikan laitos

Viime vuosina on satunnaisesti havaittu selvästi normaaleja alhaisempia tiheyksiä betoninäytteissä, jotka on porattu valmiista rakenteesta.

Tiheyden aleneman pääsyyksi on arvioitu olevan betonin kohonnut ilmamäärä. Ongelmat kärjistyivät kesällä 2016, kun valmistumassa oleva rautatiesilta jouduttiin purkamaan betonin lujuuspuutteiden vuoksi. Myös kohteessa mitatut betonin tiheydet olivat alhaisia, samoin kuin rakenteesta mitatut ilmamäärät olivat selvästi tavoitearvoja korkeammat. On tunnettua, että 1 %-yksikön muutos betonin ilmamäärässä vastaa noin 5 %:n muutosta betonin puristuslujuudessa.

Betonialalla todettiin yleisesti, ettei betonin huokostus ole kaikilta osin kunnossa. Suojahuokostus ei ole riittävän stabiili ja siten betonin ilmamäärä voi kasvaa vielä varsinaisen sekoituksen jälkeenkin. On myös tiedossa, että uudentyypiset polykarboksylaattipohjaiset notkistavat lisäaineet pyrkivät luonnostaan lisäämään betonin ilmamäärää ja vaikutuksen kompensoimiseksi lisäaineisiin lisätään ns. vaahdon tappajaa. Aikaisemmillä notkistintyypeillä tilanne oli kutakuinkin päinvastainen, ilmamäärät pyrkivät laskemaan sekoituksen jälkeen. Ilmamäärän nousun lisäksi on havaittu, että ilmamäärät voivat vaihdella betonirakenteen sisällä.

Ongelmaa ratkaisemaan käynnistettiin tilaustutkimus Aalto-yliopiston rakennustekniikan laitoksella. Tutkimuksen ensisijainen tavoite oli varmistaa suojahuokostuksen stabiilisuus. Käytännössä tavoitteena oli löytää keinot betonin huokostamiseen niin, että betonin ilmamäärä ei muutu merkittävästi betonin sekoituksen jälkeen.

Tutkimus sisälsi lyhyehkön kirjallisuusselvityksen, mutta pääpaino oli laboratoriotutkimuksissa betonikokeilla. Kokeissa pyrittiin jäljittelemään paikallavaluprosessia. Varsinaisen sekoituksen jälkeen betonia sekoitettiin hieman 30 min ja 60 min kohdalla ja mitattiin betonin notkeus ja ilmamäärä. 60 min jälkeen betoniin vielä lisättiin tehonotkistinta palauttamaan alkuperäinen työstettävyyttä ja viimeiset mitaukset tehtiin 75 min kohdalla. Aivan täysin testiproseduuri ei vastaa käytäntöä: erityisesti laboratoriosekoitin poikkeaa normaalista tuotantosekoittimesta ja lisäksi 30 ja 60 min kohdalla tehtävät sekoitukset lienevät tehokkaampia kuin mitä betoniautossa tapahtuu. Tulosten voidaan arvioida edustavan ääripäätä, joka pahimmillaan voi toteutua myös käytännön olosuhteissa.

Laboratoriossa tutkittiin toisaalta betonimassan ominaisuuksien vaikutuksia ja toisaalta eri lisäaineiden vaikutuksia ilmamäärän muuttamiseen varsinaisen sekoituksen jälkeen. Betonimassan ominaisuuksista tutkittavina olivat betonin lujuusluokka, notkeus, sementtityyppi ja kiviaineksen maksimiraekoko. Lisäaineista tutkittavina oli seitsemän eri notkistin-huokostinyhdistelmää projektia rahoittavilta lisäainetoimittajilta.

1 Siltarakenteissa käytettävälle betonille asetetaan tiukat vaatimukset.

Robust Air

- Tilaustutkimus Aalto-yliopiston rakennustekniikan laitoksella
- Tavoitteena varmistaa betonin suojahuokostuksen stabiilisuus
- Projektin kesto: 01/2017 – 08/2017

Projektin rahoittajat:

- Liikennevirasto
- Betoniteollisuus ry., Valmisbetonijaosto
- SBK-Säätiö
- BASF Oy
- Oy Sika Finland Ab
- Finnsementti Oy
- Semtu Oy
- GCP Applied Technologies
- Mapei Oy
- Ha-Be
- Rudus Oy
- Ruskon Betoni Oy
- Lujabetoni Oy

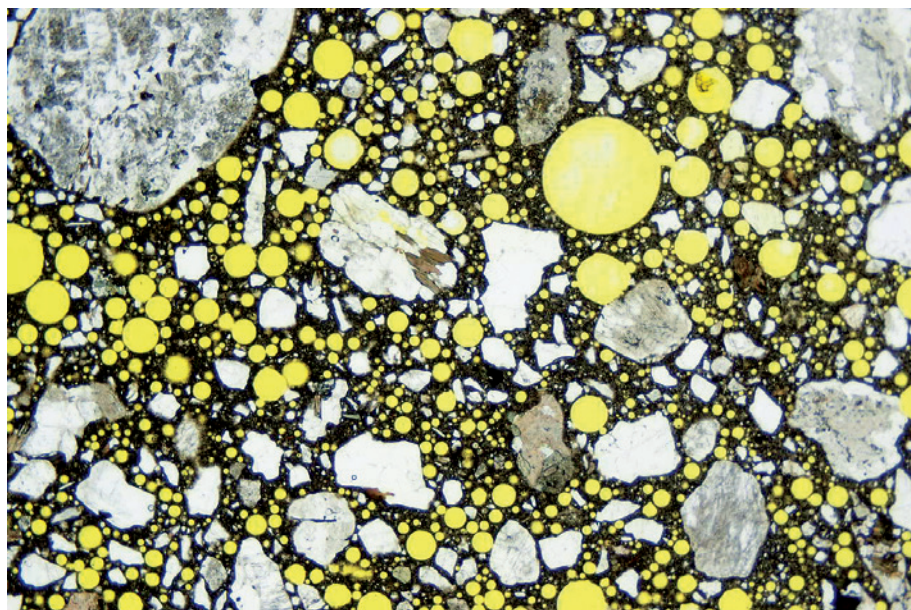
Lisätietoja:

- Jouni Punkki, jouni.punkki@aalto.fi
- Fahim Al-Neshawy, fahim.al-neshawy@aalto.fi

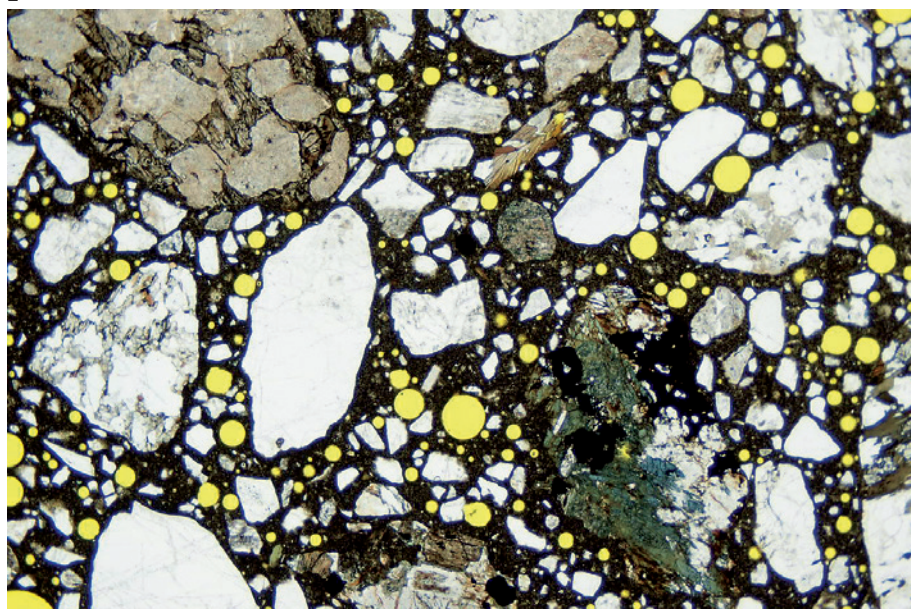
Liikennevirasto



1



2



3

2 ja 3 Kuvassa 2 on ohuthie betonista, jossa on paljon ilmaa. Kuvassa 3 on betoni, jossa on kohtuullisesti ilmaa.

siitä, että joissakin tapauksissa suojahuokokset voivat "erottua" lähelle valupintaa ja siten valupinnan läheisyydessä betonin ilmamäärä voi olla selvästi korkeampi kuin muualla rakenteessa. Ilmiötä tutkittiin yksikertaisella testillä, jossa valettiin halkaisijaltaan 150 mm lieriö ($h = 300$ mm). Lieriön tiivistäminen pyrittiin vakioimaan mahdollisimman pitkälti. Kovettuneesta lieriöstä sahattiin noin 50 mm siivut lieriön ala- ja yläpäästä. Ala- ja yläpään tiheyseroja tarkasteltiin ja lisäksi niistä määritettiin kovettuneen betonin ilmamäärä ohuthieanalyysin sekä painekyllästyskokeen avulla.

Kokeissa havaittiin yllättävän suuria tiheyseroja. Kuvassa 7 on esitetty tiheyserot heti sekoituksen jälkeen eri lisäaineyhdistelmiä käytettäessä. Tiheyserot korreloivat myös ilmamäärän muutosten kanssa. Siten onkin oletettavaa, että ilmamäärän nousu sekä myös ilman erottuminen betonin sisällä johtuvat pohjimmiltaan samasta tekijästä. Kokeet osoittivat myös että samaan aikaan kun ilma erottuu, myös kiviaines erottuu betonissa alaspäin.

Kokeet betoniteollisuudessa

Kesällä 2017 Betoniteollisuus ry pyysi jäseniään tekemään kokeita normaaleilla huokostetuilla betoneilla. Tarkoituksena oli selvittää eri tekijöiden vaikutuksia ilmamäärän kasvamiseen normaaleissa tuotanto-olosuhteissa.

Betoniaseman normaaleista huokostetuista betoneista mitattiin notkeus ja ilmamäärä normaalin valmistusprosessin jälkeen. Tämän jälkeen sekoitusta jatkettiin niin, että kokonaisekoitusajaksi muodostui 6 min. Betonin notkeus ja ilmamäärä mitattiin uudelleen.

Tuloksia saatiin kaikkiaan 35 betonista. Aineisto on kuitenkin liian pieni, jotta voitaisiin tehdä tarkempia analyyskejä ilmamäärän

Ilmamäärän kokoaminen sekoituksen jälkeen

Useimmissa testauksissa betonin ilmamäärä kohosi merkittävästi varsinaisen sekoituksen jälkeen. Ilmamäärän kohoaminen oli oletetuakin voimakkaampaa, mutta osaltaan siihen vaikutti myös koejärjestelyt. Käytännön olosuhteissa nousu on todennäköisesti selvästi maltillisempaa, mutta vaikuttavat tekijät ovat samat. Yksittäisistä tekijöistä merkittävimmäksi osoittautui betonin notkeus. Samoin eri lisäaineiden välillä havaittiin eroja. Kuvissa 4 ja 5 esitetään ilmamäärän nousu ajan funktiona eri lisäaineita käytettäessä. Kuvassa 4 on F5-notkeusluokan betoni (erittäin notkea) ja kuvassa 5 on S3-notkeusluokan betonin (tavanomainen notkeus). Kuvista havaitaan notkeuden selkeä vaikutus ilmamäärän muutokseen samoin kuin vaihtelu eri lisäaineiden välillä.

Betonin ilmamäärää mitattiin myös CiDRA AIRtrac -laitteistolla, joka on betonisekoittimeen sijoitettava jatkuvatoiminen ilmamäärän mittaustilaite. Laite mahdollistaa reaaliaikaisen ilmamäärän mittaamisen ja se soveltuu hyvin myös ilmamäärän kehittymisen analysointiin betonin sekoituksen aikana. Kuvassa 6 on esitetty koesarja, jossa varioitiin sekoitusaikaa (2 min ja 5 min) ja toisaalta huokostinannostusta (normaaliannostus ja 50 % normaalisti). Kuvasta havaitaan, että ilmamäärä nousi koko 5 min sekoituksen ajan. Samoin havaitaan että 5 min sekoitusaika antoi saman ilmamäärän 50 % huokostinannostuksella verrattuna 2 min sekoitusaikaan ja normaaliin huokostinannostukseen.

Betonin erottumisherkkyys

Projektissa tutkittiin myös huokostettujen betonien erottumisherkkyttä. On saatu viitteitä

4 Ilmamäärä, Notkeusluokka F5.

Betonin ilmamäärän muuttuminen betonin sekoituksen jälkeen. Betonin lisäaineet: A...G. Betonin notkeusluokka F5. 45 = C35/45, PL = Plus-sementti, 16 = 16 mm maksimiraekoko.

5 Ilmamäärä, Notkeusluokka S3.

Betonin ilmamäärän muuttuminen betonin sekoituksen jälkeen. Betonin lisäaineet: A...G. Betonin notkeusluokka F5. 45 = C35/45, PL = Plus-sementti, 16 = 16 mm maksimiraekoko.

6 Betonin ilmamäärä sekoittimessa CiDRA AIRt-rac-laitteella mitattuna. Sekoitusaika 2 tai 5 min (@2 tai @5) ja huokostinannostus normaali (100 %) tai 50 % normaalista.

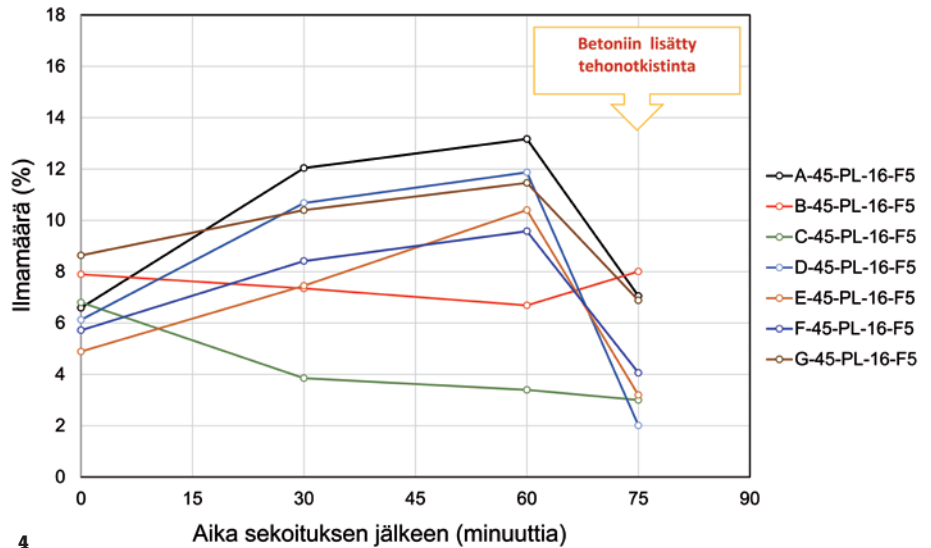
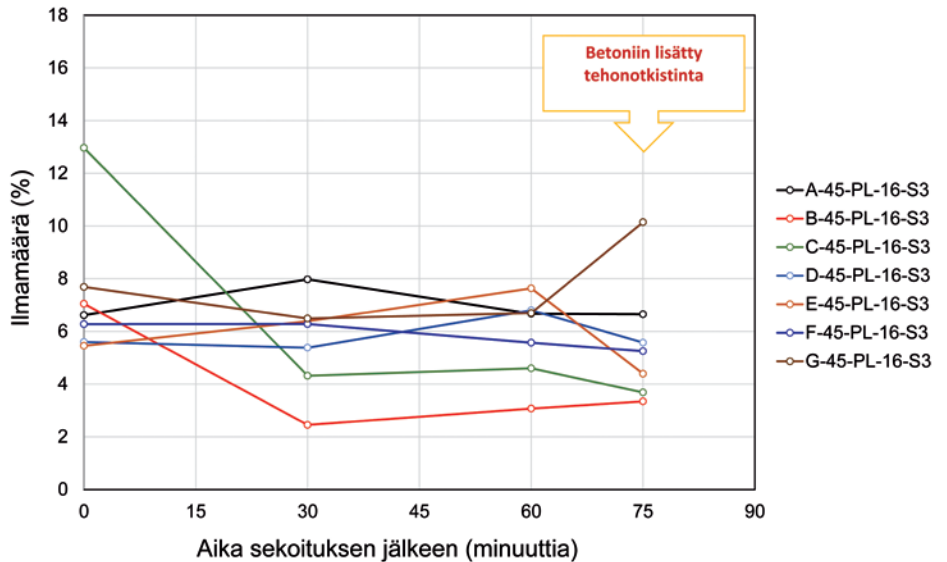
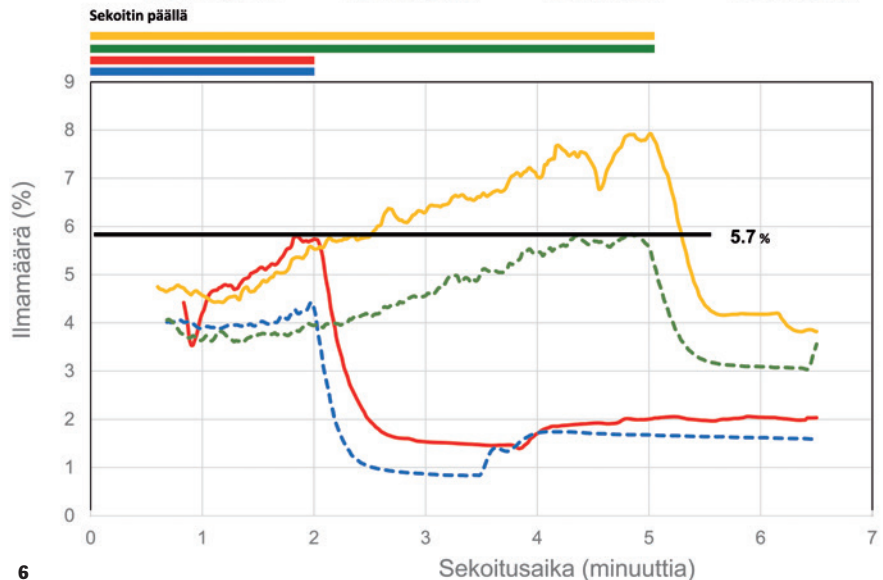
nousuun vaikuttavista tekijöistä. Keskimäärin ilmamäärä kasvoi 1,7 %-yksikköä ja suurimmillaan 7,5 %-yksikköä. Kuvassa 8 on esitetty jakauma ilmamäärän muutoksista normaalin ja 6 min sekoitusajan välillä.

Syyt ilmamäärän kohoamiseen

Suoritettujen kokeiden perusteella voidaan todeta, että nykyiset polykarboksylaattipohjaiset tehonotkistimet vaativat tehokkaan sekoitusprosessin. Sekoituksen tehokkuus riippuu sekä sekoittimen tehosta että sekoitusajasta. Mikäli sekoitusprosessi ei ole riittävän tehokas, riskinä on ilmamäärän kohoaminen myöhemmin esimerkiksi, kun betonia pyöritetään betoniautossa.

Ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 9. Kulakin betonilla on oma "Ilmamääräpotentiaali", joka riippuu käytetyistä lisäaineista, betonin koostumuksesta sekä betonin notkeudesta. Ilmamääräpotentiaali on tavallaan maksimi-ilmamäärä, jonka kyseinen betoni voi saavuttaa. Mikäli huokostinannostus on korkea, vaadittava ilmamäärä voidaan saavuttaa kohtuullisen lyhyellä sekoitusajalla. Tällöin ei kuitenkaan saavuteta Ilmamääräpotentiaalia ja siten riskinä on ilmamäärän kasvaminen myöhemmin esimerkiksi työmaalla. Ilmamääräpotentiaalia voidaan arvioida sekoittamalla betonia 6 min ja mittaamalla ilmamäärä.

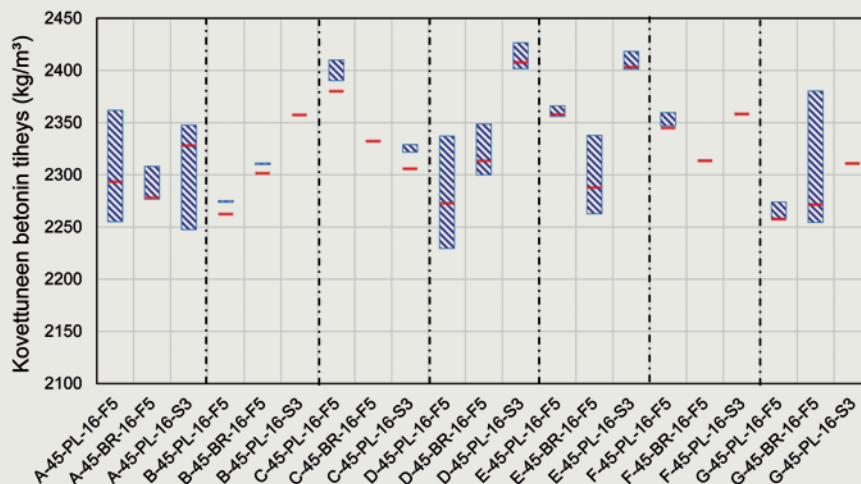
Tulosten perusteella voidaan arvioida, että Ilmamääräpotentiaalin saavuttaminen edellyttää varsin tehokasta sekoitusprosessia ja normaalisti käytetty 90 sekunnin sekoitusajaksi ei välttämättä riitä. Pitkät, esimerkiksi 6 minuutin sekoitusajat eivät ole käytännössä mahdollisia tuotantoteknisistä syistä, betonin valmistajan onkin itse testattava ja määriteltävä tarvittava sekoitusajaksi.

Ilmamäärä, Notkeusluokka F5**Ilmamäärä, Notkeusluokka S3****Sekoitin päällä**

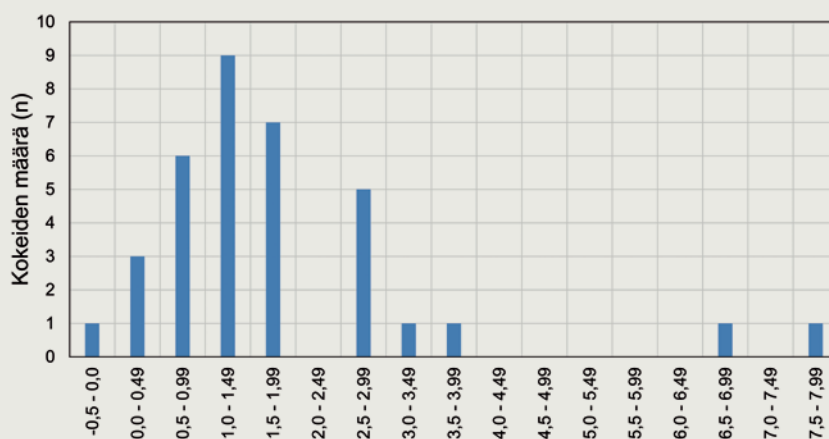
Korjaavat toimenpiteet

Robust Air-projektin tulosten pohjalta voidaan esittää korjaavia toimenpiteitä, joiden avulla voidaan välttää ilmamäärän liittyvät ongelmat. Korjaavia toimenpiteitä vaaditaan valmistusketjun kaikilta toimijoilta, mukaan lukien lisäaineiden valmistajat, betonin valmistajat, työmaa, tilaajaorganisaatiot ja viranomaiset. On myös huomattava, että osa toimenpiteistä vaikuttaa vasta pidemmällä aikavälillä.

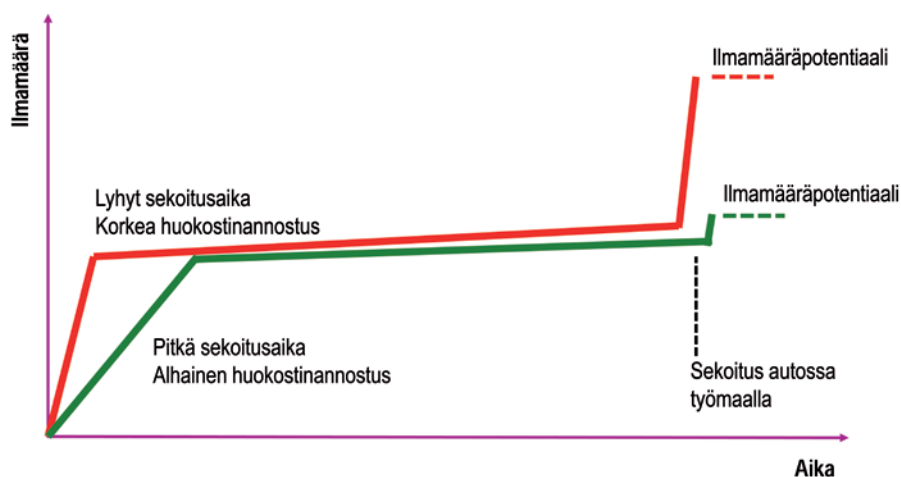
- **Lisäaineet.** Betonin lisäaineita on kehitettävä niin, että riski ilmamäärän kasvamiseen jää minimaaliseksi.
- **Betonin sekoitin.** Betonisekoittimia tulee kehittää niin, että tarvittava huokostus saadaan aikaiseksi kohtuullisessa sekoitusajassa.
- **Betonin ennakkokokeet.** Betonin valmistajan tulee tietää betonin huokostuksen toiminta myös varsinaisen sekoituksen jälkeen. Tätä varten valmistajan on tehtävä tarvittavat ennakkokokeet ja lisäksi seurattava ilmamääriä myös rakennuspaikalla.
- **Betonin notkeus.** Erittäin notkeita huokostettuja betoneita kannattaa välttää, mikäli se vain on mahdollista. Mikäli erittäin notkeita huokostettuja betoneita tarvitaan, tulee ilmamäärän stabiilisuuteen kiinnittää erityistä huomiota.
- **Betonin ilmamäärät.** Suuria ilmamääriä (> 6 %) tulee välttää. Hyvä pakkas-suola-kestävyys (korkea P-luku) saavutetaan luottettavimmin kohtuullisella ilmamäärällä ja alhaisella vesi-sementtisuhteella.
- **Pakkasenkestävän betonin vaatimukset.** Pakkaskestävyyden vaatimukset tulee arvioida kriittisesti ja tarvittaessa päivittää. Nykyiset vaatimukset osin kannustavat liikaa betonin korkeisiin ilmamääriin.
- **Betonin laadunvalvonta.** On pidettävä huolta, että betonin ennakkokokeet sekä laadunvalvonta hoidetaan asianmukaisesti. Pidemmällä aikavälillä laadunvalvontamenetelmiä tulee päivittää vastaamaan nykyteknologiaa. Manuaaliset mittaukset tulee jatkossa korvata automaattisilla, jatkuvatoimisilla järjestelmillä.



7 Betonin tiheyseroja erottumisherkkyysskoissa. 150 mm lieriön ylä- ja alapäästä on sahattu noin 50 mm sivuut. Kuvassa esitetty ylä- ja alapään tiheys sekä koko lieriön tiheys (punainen viiva). Betonin lisäaineet: A...G, 45 = C35/45, PL = Plus-sementti, BR = CEM I, Broceni, 16 = 16 mm maksimiräekoko. Betonin notkeusluokka F5 tai S3.



8 Betonin ilmamäärän muutos (6 min sekoitusaika – normaali sekoitusaika) betoniteollisuuden kokeissa.



9 Betonin Ilmamääräpotentiaali havainnollistettuna.



10

Robust Air – research project

Robust Air is a contract research project carried out at Aalto University, Department of Civil Engineering. The project was established due to elevated air content observed in some Finnish concrete structures. The aim of the Robust Air project was to secure the stability of the protective pore system in normal conditions. The stable protective pore system means that the air content or pore size distribution are not significantly changing after mixing of concrete.

The main part of the research was made in the laboratory tests which were divided into two parts. In the first part the concrete properties were altered and the same admixtures were used. In the admixture tests the concrete properties were kept constant and the admixtures were altered. The main interest of the laboratory tests was to analyze the air content of concrete as function of time. The measurements were carried out immediately after mixing, 30 min and 60 min and finally 75 min after mixing. In addition to the air content, also sensitivity for segregation was analyzed.

In addition to the laboratory tests, factory tests the Finnish concrete industry made tests in which the air content of concrete was measured after normal mixing time but also after 6 min mixing time.

Based on the experiments, it was observed that the mixing process of the air-entrained concrete is not necessarily effective enough. It is possible that only part of the entrained air is formed during the mixing process and there is a risk for elevated air content when the concrete is mixing in the concrete truck. The phenomenon was explained by Air content potential. Each concrete has an Air content potential (maximum air content) which depends on the admixture combination, concrete composition and the consistency of concrete. A relative effective mixing process is needed to achieve the Air content potential during the mixing process. And if the potential is not reached during the mixing process, there is a risk that the air content may increase later when the concrete is mixed in the truck.

Recommendations were given to minimize the risk for elevated air contents. The recommendations include development actions related to admixtures, concrete mixers, quality control systems and to requirements of frost resistance concrete. The concrete producers need to take the phenomenon better into account in the concrete manufacturing process.

Robust Air – opit valmisbetonitoimittajille:

- Säänkestävien betonien riittävään sekoittamiseen tulee kiinnittää erityistä huomiota.
- Betonien ilmanmuodostuspotentiaali on selvitettävä ennakkokokein, kuten esimerkiksi pitkitetillä sekoittamisella myllyssä erityisesti, jos huokostettua massaa on kuljetettava pitkään. Ennakkokokeet kannattaa kohdistaa P-lukumassojen lisäksi erityisesti hienorakeisiin ja notkeisiin resepteihin.
- Hienorakeisten ja hyvin notkeiden massojen käyttöä tulee välttää säänkestävyyttä vaativissa rakenteissa. Niiden sijasta tulisi suositella itsestään tiivistyvää betonia.
- Betonin turhaa pyörittämistä kuljetuksen aikana kannattaa välttää.
- Lisäaineiden varastointi ja käytönaikainen sekoittaminen on tehtävä tarkasti valmistajan ohjeiden mukaan.
- Betonin ilmamäärää kannattaa seurata tehostetusti sekä tehtaalla että työmaalla erityisesti vaativissa rakenteissa.

Jussi Mattila
Betoniteollisuus ry

10 Ilmamäärän kasvu näkyy myös koekappaleissa, lieriöt on valmistettu samasta betonista eri ajankohdina. Kaikissa on käytetty 11,00 kg betonia.