

Mika Tulimaa, diplomi-insinööri,  
Leif Wirtanen, tekniikan tohtori

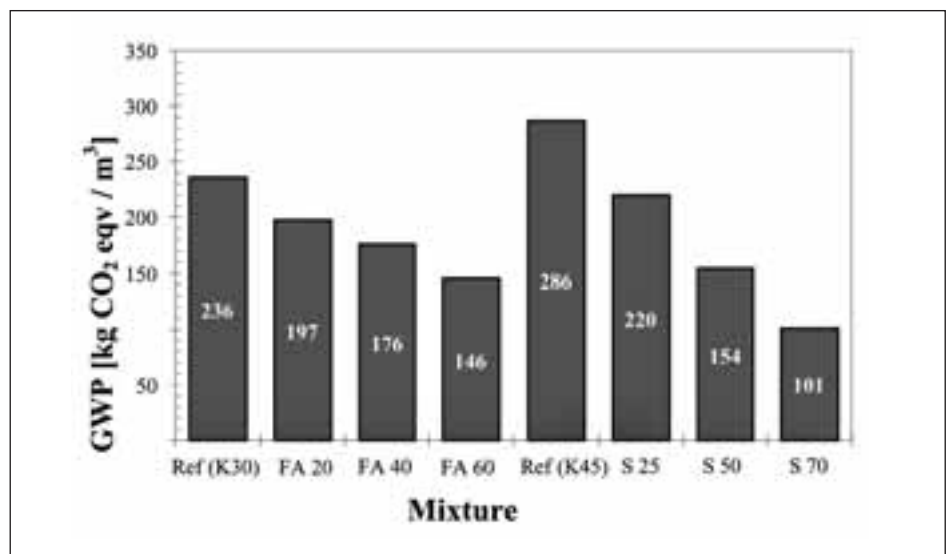
Teknillinen korkeakoulu oli kesäkuussa Espoossa järjestetyssä European Symposium on Service Life and Serviceability on Concrete Structures ESCS-2006 -symposiumissa vahvasti mukana. Mm. TKK:n rakennusmateriaalitekniikan laboratorion ja VTT:n rakennus- ja yhdyskuntatekniikan yhteistyönä tehty Ympäristöystävälliset ja hyvin säilyvät betonit -tutkimus esiteltiin tapahtumassa ja tutkimukseen liittyvä artikkeli julkaistiin symposiumin julkaisussa.

Ympäristöystävälliset ja hyvin säilyvät betonit -tutkimus tehtiin vuosina 2002 – 2004 ja sen rahoittivat TEKES sekä alan suomalainen teollisuus. Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää betoneita, jotka ovat ympäristöystävällisiä ja samalla Suomen ankarissa olosuhteissa säilyviä. Lisäksi betonien tuli olla taloudellisessa mielessä toteutettavissa eli niiden valmistuskustannusten piti olla samaa luokkaa kuin tavanomaisilla betoneilla. Käytetyt raaka-aineet olivat kotimaisia. Teollisuuden innokkuus ottaa käyttöön uusia betonimassoja riippuu luonnollisesti valmiin rakenteen tai tuotteen kokonaiskustannuksista sekä massojen käytettävyydestä.

Symposiumissa julkaistussa artikkelissa esitettiin uutena osana laskennallinen case-tutkimus masuunikuonabetonin jälkihoidon aiheuttamista kokonais-CO<sub>2</sub>-päästöistä verrattuna seosaineettomaan betoniin, josta kerrotaan tässä artikkelissa tarkemmin.

Eurooppalaisessa Conlife-rinnakkaistutkimuksessa keskityttiin mm. myös säilyvyysominaisuuksien tutkimiseen, mutta vain yleiseurooppalaisesta näkökulmasta. Suomalaisessa tutkimuksessa haluttiin huomioida nimenomaisesti Suomen vaikeat olosuhteet, jotka vaativat betonilta huomattavasti enemmän kuin esimerkiksi Keski-Euroopassa betonilta vaaditaan. Säilyvä rakenne on ympäristöystävällisyyttä parhaimmillaan. Kun vähennetään korjaustarjua, vähennetään myös luonnon kuormitusta oleellisesti.

Ympäristöystävällisyyden ottaminen huomioon teollisuustuotannossa ei voi olla enää pelkästään hyvää tahtoa vaan se on nyt ja tulevaisuudessa yhä enemmän pakon sanelemaa. Tiedeyhteisön vertaisarvioitujen tutkimusten kanta ilmastonmuutoksesta on yksimielinen, eli ilmaston muutos on todellinen. Viime aikoina muutoksen on todettu lisäksi kiihtyneen entisestään. [1]. Kun yleinen tietämys ympäristömuutoksesta kasvaa, se vaikuttaa varmasti teollisuustuotantoon, myös sementti- ja betoniteollisuuteen. Näitä ovat erityisesti ekologiset vaatimukset, jotka suoraan vaikuttavat betonin käyttöön



1

rakentamisessa ja tuoteteollisuudessa. Muutoksia voidaan siis odottaa betonin valmistuksessa ja käytössä. Muutosta ohjaavat todennäköisesti tiukentunut normisto ja ohjeistus, jotka johtavat sementin ja betonin tekniseen kehitykseen raaka-aineina kuin myös tuotteina. Tuloksena ovat myös muuttuneet betonireseptit korvaavien raaka-aineiden muodossa, esim. kiviaines, seosaineet jne. Paljon on tuki tehty, erityisesti sementin osalta, mutta se ei varmankaan tule yksin riittämään.

## TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

Tutkimuksen tärkeimmät tavoitteet olivat:

- kehittää seosainebetoneja, jotka ovat ympäristöystävällisiä ja taloudellisesti toteuttamiskelpoisia.
- varmistaa em. betonien hyvä säilyvyys, mm. pakkaskestävyys. Arvioida eri pakkaskestävyyskokeiden vertailukelpoisuutta (ruotsalainen laatakoe, saksalainen CIF/CDF-koe ja suomalainen pakkas-suolakestävyys SFS 5449 [2-5]).
- verrata kiihdytettyjen laboratoriokokeiden ja kenttäkokeiden vastaavuutta (pakkaskestävyys ja karbonatisoituminen).
- antaa yleiskuva keinoista, joilla teollisuus pystyy vaikuttamaan tiukentuneisiin päästövaatimuksiin. [6].

Tutkimukseen sisältyi lisäksi seosainebetonien mekaanisten ominaisuuksien tutkiminen ja mikrora-

kenteen analyysit, säilyvyyden laboratorio- ja kenttäkokeet ja käyttöikäarviot ja eri betonien väliset kustannusvertailut. Yksityiskohtaiset tiedot löytyvät alkuperäisestä tutkimusraportista [7].

Tutkimuksessa keskityttiin ns. volyyimibetoneihin K45 ja K30 eli lujuusluokkiin, joita valmisbetoniteollisuus toimittaa eniten. Tämä siitä syystä, että tällöin saavutetaan ympäristönäkökohdista suurin kumulatiivinen hyöty. K45-betonin seosaineena käytettiin masuunikuonaa ja K30-betonin seosaineena lentotuhkaa. Koska käytetyt seosainemäärät olivat osassa suhteitukia määrältään suuria, oli lujuudenarvosteluilkä samoin kuin betonikokeiden aloitusikä 91 vuorokautta. Tällä haluttiin hyödyntää seosaineiden lujuudenkehityksen koko kapasiteetti. Tämä siitä huolimatta, että rakentamisen nopeuteen on viime vuosina kiinnitetty yhä enemmän huomiota. Mutta kun asiaa ajatellaan toisesta näkökulmasta, niin mikä on 60 vuorokauden ero arvos-

1 Tutkittujen betonien GWP-indeksit (Global warming potential). Laskelmat on tehty DAIA-menetelmällä [8]. [7]

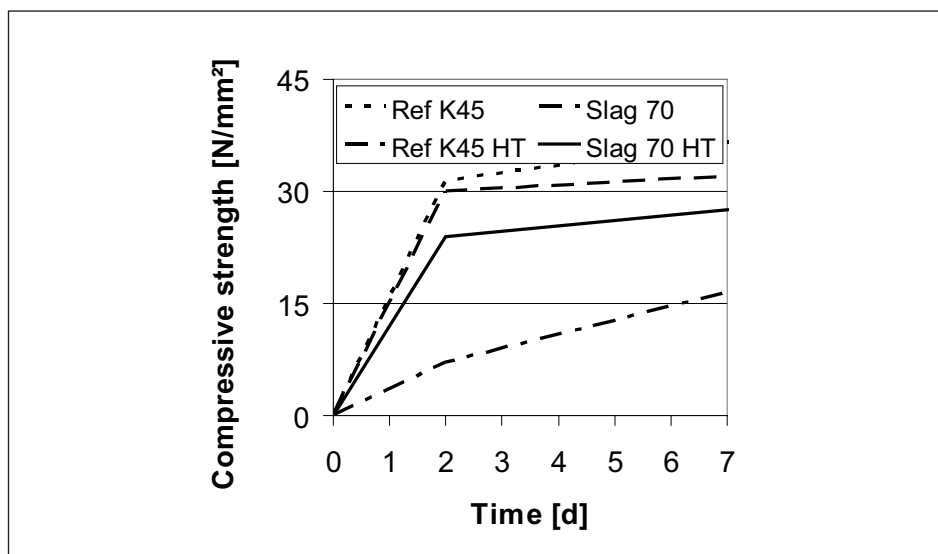
2 Vertailubetonin (K45) ja 70 % masuunikuonabetonin lujuudenkehitys. HT viittaa 2 vrk:n lämpökäsittelyyn + 50 °C:ssa. Ref K45 viittaa vertailubetoniin ja lujuusluokkaan ja slag puolestaan masuunikuonaa.

teluässä, kun rakennuksen käyttöikä on nykyisillä suunnittelunormeilla käytännössä vähintään 100 vuotta. Sementteinä käytettiin suomalaisia puhtaita portlandsementtejä. Seosainepitoisuudet olivat masuunikuona 25 – 70 % sideaineen kokonaismäärästä ja lentotuhka 20 – 60 % sideainemäärästä. Sementtiä puolestaan käytettiin referenssibetoneissa (todelliset määrät) K30: CEM II A 42.5 R 279 kg/m<sup>3</sup> (280) ja K45: CEM I 52.5 R 343 kg/m<sup>3</sup> (340). Sulkeissa olevat luvut ovat tutkimuksen lähtöarvot, jotka eivät valmiissa koebetoneissa eri muuttujien takia toteudu tarkalleen. Tutkimuksessa tarkasteltiin sekä lämpökäsittelyjen että -käsittelmättömien betonien säilyvyys- ja mekaanisia ominaisuuksia. Betoni lehden numerossa 1/2005 on käsittely tutkimusta tarkemmin mm. käyttöikä, säilyvyys ja taloudellisuutta.

### CASE-TUTKIMUS: LÄMPÖKÄSITELTY K45-LUJUUSLUOKAN MASUUNIKUONABETONI

GWP-indeksi (global warming potential) laskettiin kaikille tutkituille betoneille. Kuva 1. esittää selvästi laskennallisen CO<sub>2</sub>-ekvivalenttiarvon kasvun sementin pitoisuuden kasvun myötä. Mitä enemmän sementtiä betonissa käytetään, sen suurempi on betonin vaikutus ilmaston lämpenemiseen. Sama suunta näkyy kokonaisenergian kulutuksessa. DAIA-menetelmällä [8] tehdyt laskelmat osoittavat selvästi, että on hyödyllistä käyttää muun teollisuuden sivutuotteita silloin, kun betonilta ei vaadita erityisominaisuuksia, kuten esimerkiksi suola-pakkestävyyttä tai kun lujuudenkehityksen nopeudella ei ole merkitystä eikä näin ollen suurilla seosainepitoisuuksilla tarvita lämpökäsittelyä.

Jos suurilla seosainepitoisuuksilla halutaan nopeampaa lujuudenkehitystä, täytyy turvautua lämpökäsittelyyn. Betonielementtitehtaalla ei yleensä tarvita lämpökäsittelyä, kun sementti on tavallista



2

portlandsementtiä ja muottikierto on yksi vuorokausi. Lämpökäsittelyä tarvitaan, jos muottikiertoa nopeutetaan tai tuotteelle tarvitaan korkeampaa vahaisuutta kuin mitä tarvitaan tuotteen muotinpurkuun. Jos sideaineesta suuri määrä on seosainetta, lämpökäsittelyn käyttö on käytännössä välttämätöntä, koska muottikierto saattaisi olla muuten useita päiviä. Oletamme, että tehdashallin lämpötila on +20 °C ja lämpökäsittelylämpötila on +50 °C. Lämpötilaero on 30 °C, mikä luonnollisesti johtaa lämmitystarpeeseen. Kun lämpötilagradientti on suuri betonin ja ympäristön välillä, myös lämpöhukka on suuri, mikäli eristystä ei käytetä. Muita huomioon otettavia tekijöitä ovat mm. hydrataatiolämpö ja lämpökäsittelyn kesto. Kahta eri betonia, lämpökäsittely masuunikuonabetoni (sideaineesta 70 % masuunikuonaa) ja vertailubetoni (sideaineena pelkkä portlandsementti), verrataan taulukossa 1. Tulokset on ilmoitettu lämpömäärinä ja CO<sub>2</sub>-ekvivalentteina arvoina.

Kun oletetaan, että lähtötilanteen vallitseva lämpötila on 20 °C, lämpötilaero on 30 °C. Lämpökäsittelyn keskimääräinen kesto masuunikuonabetonille (sideaineesta 70 % masuunikuonaa) on yksi vuorokausi, mikäli otetaan huomioon vain muotin purkuun tarvittava ikä. Tämän voi todeta kuvasta 2, jossa on kuvattu lujuudenkehitystä +50°C lämmössä. Siitä voidaan todeta, että yksi vuorokausi riittää saavuttamaan tarvittava muotinpurkulujuus. Tämä koskee luonnollisesti rakennustuotteita, ei rakenteita, joille on määritetty muotinpurkulujuus. Mikäli tarvitaan korkeampia lujuuksia, tarvitaan myös pidempikestoinen lämpökäsittely.

Hydrataatiossa vapautunut lämpömäärä on masuunikuonabetonilla (sementti (CEM I 52.5 R) 30 % + kuona 70 %) 28 vuorokauden kuluttua noin 320 kJ/kg, kun taas portlandsementillä (CEM I 52.5 R) vapautunut lämpömäärä on samassa ajassa noin 430 kJ/kg. Arvioimalla betonin lujuudenkehityksestä noin puolet 28 vuorokauden aikana tapahtuvasta hydrataatiossa vapautuvasta lämpömäärästä vapautuu ensimmäisen vuorokauden aikana valusta. Tämä on noin 225 kJ/kg portlandsementille. Voidaan arvioida (kuva 2), että lujuuden kehitys lämpökäsittelyllä 70 % masuunikuonabetonille on 75 %

Taulukko 1. Masuunikuonabetonin (70 %) ja vertailubetonin (K45) lämpömäärät ja GWP-indeksit yhden vuorokauden ikäisinä. GWP [kg CO<sub>2</sub>-ekv./m<sup>3</sup>]. Lämpökäsittelyyn sisältyy lämpöhukka. Kokonais-GWP sisältää lämmityksen.

Betoni	Lämpömäärä Hydrataatio [MJ/m <sup>3</sup> -bet.]	Lämpömäärä Lämpökäsittely [MJ/m <sup>3</sup> -bet.]	Lämpömäärä Yhteensä [MJ/m <sup>3</sup> -bet.]	GWP Lämmitys	GWP Yhteensä
Masuunikuona 70	56.1	54.9	111.0	4	105
Vertailu (K45)	76.5	-	76.5	-	286

vertailubetonin arvosta. Näin ollen vapautunut lämpöenergia on noin 165 kJ/kg ensimmäisen vuorokauden jälkeen. Masuunikuonabetonin lämpökapasiteetin voidaan olettaa olevan sama kuin tavallisella betonilla, eli 1.05 kJ/(kg °C). Laskuesimerkin oletuksena on, että betonituotteet peitetään heti valun jälkeen, mutta erityistä lämmöneristystä ei käytetä minkä vuoksi lämpöhukka on otettava laskuissa huomioon. Laskettu kokonaislämmöntarve lämpökäsittelyineen yhden muottikierron aikana on 111 MJ/m<sup>3</sup> (30.8 kWh) ja tämä arvo sisältää myös hydrataatiolämmön. Lämmönhukaksi on arvioitu 20 W/(m<sup>2</sup>K). Kuvasta 1 voi todeta, että vertailubetonin (K45) kokonais-GWP on 286 kg CO<sub>2</sub>-eqv./m<sup>3</sup>, kun taas masuunikuonabetonin kokonais-GWP on 101 kg CO<sub>2</sub>-eqv./m<sup>3</sup>. Masuunikuonan lämpökäsittely nosti kokonaisuutena vain 4 kg CO<sub>2</sub>-eqv./m<sup>3</sup>, kts. taulukko 1.

#### YHTEENVETO

Tutkimustulokset osoittivat, että seosaineiden käyttö suurina määrinä on mahdollista ja tuotantoteknisesti toteutettavissa. Jopa suurempien seosainemäärien käyttö kuin mitä Betoninormit 2004 [9] sallivat olisi mahdollista. Jää nähtäväksi joudutaanko normien sallimia seosainemääriä jatkossa kasvatamaan. Lisäksi seosainebetoneitten käyttö rakenteissa, jotka joutuvat tekemiseen kloridittoman pakkasrasituksen kanssa, eli rasisuusluokat XF1 ja XF3, on tutkimuksen perusteella mahdollista. Seosaineiden käyttö vaativissa ympäristöolosuhteissa vaatii tosin paljon laadunvalvonnan ja saattaa sen vuoksi olla taloudellisesti kannattamatonta verrattuna seosaineettoman betonin käyttöön. Tämä johtuu siitä, että betonin valmistukseen vaikuttaa useampia muuttujia, mm. raaka-aineet, jotka vaikuttavat betonin ominaisuuksiin ja joita sen vuoksi on valvottava tarkasti. Mutta jos pakkasenkestävyys ei ole vaadittu ominaisuus, seosainebetonin käyttö on täysin mahdollista, koska haluttujen lujuustasojen saavuttaminen on suhteellisen helppoa. On vain muistettava, että jälkihoitoajat kasvavat, kun käytetään seosainebetoneja.

Case-tutkimuksessa osoitettiin, että kun käytetään masuunikuonaa betonin seosaineena ja käytettäessä sen vuoksi lämpökäsittelyä nopeuttamaan muottikiertoa, ei kuitenkaan kasvateta GWP-indeksin arvoa (global warming potential) vaan päinvastoin. Ympäristönäkökohdista katsoen voidaan siis lämpökäsittelyä käyttää lujuuden kehityksen nopeuttamiseen korkeilla seosainemäärillä. Lisäksi on

luonnollisesti tarkasteltava lämmitykseen käytettävä energian hinta, jos taloudellisuus on määräävä tekijä. Kokonaisuutena ajatellen voidaan katsoa, että jos muun teollisuuden sivutuotteiden käyttö katsotaan sinänsä tärkeäksi tai järkeväksi, ympäristöystävällisyydessä on päästy iso askel pidemmälle.

Artikkelin tutkimusosuus perustuu ESCS-2006 symposiumissa julkaistuun artikkeliin:  
Tulimaa M., et al. 2006. *Environmentally-Friendly and Durable Concretes, a Finnish Study*.

#### Viitteet

1. Gore A., "Global climate change", *Suullinen esitys, Helsingin yliopisto, 2006*.
2. prEN 12390-9, "Testing hardened concrete – Part 9: Freeze-thaw resistance - Scaling", *Draft European Standard, Brussels, 2002*.
3. RILEM TC 176-IDC, "Slab Test – Freeze/Thaw Resistance of Concrete – Internal Deterioration", *Materials and Structures, 2001, Vol. 34, pp. 526-531*.
4. RILEM TC 176-IDC, "CIF-Test – Capillary suction, Internal damage and Freeze thaw test", *Materials and Structures, 2001, Vol. 34, pp. 515-525*.
5. SFS 5449 "Betoni. Säilyvyys, Pakkas-suolakestävyys," *SFS, 1988*.
6. *The Convention and Kyoto Protocol, web page of the United Nations Framework Convention on Climate Change, [http://unfccc.int/essential\\_background/convention/items/2627.php](http://unfccc.int/essential_background/convention/items/2627.php), 2006*.
7. Tulimaa M., et al., "Ympäristöystävälliset ja hyvin säilyvät betonit (Environmentally-friendly and durable concretes)", *Espoo, Helsinki University of Technology, Building Materials Technology, Report 18, 2005, 135 p.*
8. Seppälä J., "Vaikutusten laskenta elinkaariarvioinnissa - vertailtavana DAIA- ja Ekoindikaattori 95 -menetelmät", *Suomen ympäristökeskuksen moniste nro. 172, 1999, 30 p. + appendices. (Free translation: "Life cycle impact assessment based on decision analysis - comparison of DAIA and Eco-indicator 95 methods", Finnish Environment Institute).*
9. Suomen betoniyhdistys r.y., "Betoninormit 2004", *BY 50, Suomen betoniyhdistys r.y., 2004, 263 p.*

#### ENVIRONMENTALLY BENIGN CONCRETE GRADES

The Helsinki University of Technology (TKK) was actively involved in the ESCS-2006 Symposium – European Symposium on Service Life and Serviceability on Concrete Structures – arranged in Espoo in June 2006. The study on environmentally benign and high-durability concrete grades, implemented by the TKK Laboratory of Building Materials Technology in collaboration with the VTT Department of Building and Built Environment was one of the projects presented in the Symposium. The study was conducted in 2002 – 2004, and it was funded by the National Technology Agency and the Finnish concrete industry.

The results of the study showed that the use of large amounts of additives is possible, and also feasible in terms of production technology. Even amounts in excess of those allowed by Concrete Norms 2004 would be possible. It remains to be seen whether the allowable amounts of additives need to be increased in the norms. In addition, the study proves that the use of admixed concrete in structures under chloride-free frost exposure, i.e. exposure classes XF1 ja XF3, is possible. It should be noted, though, that using additives in demanding exposure conditions requires stringent quality control and may therefore be economically unviable in comparison with concrete without any additives. This is due to the fact that the number of variables involved in the fabrication of concrete is higher, including e.g. raw materials that influence the properties of concrete, and more control is needed. But if frost resistance is not required of the concrete, the use of an admixed concrete grade is perfectly possible, as the desired strength levels can be achieved fairly easily. It needs to be borne in mind, however, that the curing times are longer for admixed concrete grades.

The Case study showed that if blast furnace slag is used as an additive in concrete, whereby heat treatment is needed to speed up formwork circulation, the GWP index (global warming potential) does not increase, but rather decreases. In other words, environmental aspects support the utilisation of heat treatment for development of strength when large amounts of additives are used. The price of the heating energy naturally needs to be considered, as well, if economy is a crucial factor.