

Vähähiilisten betonien säilyvyysominaisuudet

Ahsan Iqbal

DI, tutkija, Betonitekniikka, Aalto-yliopisto
ahsan.iqbal@aalto.fi

Fahim Al-Neshawy

Staff Scientist, Betonitekniikka,
Aalto-yliopisto, fahim.al-neshawy@aalto.fi

Jukka Piironen

Laboratorionsinööri, Aalto-yliopisto
jukka.piironen@aalto.fi

Jouni Punkki

Professori (POP), Betonitekniikka
Aalto-yliopisto, jouni.punkki@aalto.fi

LOIKKA

LOIKKA on Aalto-yliopiston ja teollisuuden yhteishanke betonin CO₂-päästöjen vähentämiseksi. Tavoitteena hankkeessa on puolittaa betonin valmistuksesta aiheutuvat CO₂-päästöt. Teollisuudesta hankkeeseen osallistuu Betolar Oyj, Elematic Oyj, Finnsementti Oy, Joutsenon Elememtti Oy ja Lammin Betoni Oy. Hanketta rahoittaa Business Finland ja Aallon tutkimushanketta lisäksi Betonteollisuus ry, Talonrakennusteollisuus ry ja Väylävirasto. Hanke kestää 28.2.2024 saakka ja hankkeen kokonaiskustannukset ovat 3,4 milj.€.

Taustaa

LOIKKA-hanke on Aalto-yliopiston ja teollisuuden yhteishanke betonin päästöjen vähentämiseksi. Hankkeen tavoitteena on puolittaa betonin valmistuksesta aiheutuvat CO₂-päästöt. Nopein ja tehokkain tapa vähentää betonin päästöjä on sideaineen päästöjen vähentäminen, aiheuttaahan sementti valtaosan betonin valmistuksen päästöistä. LOIKKA-hankkeessa keskitytään ensisijaisesti masuunikuonan hyödyntämiseen. Masuunikuona on erittäin tehokas seosaine ja sitä voidaan käyttää betonissa suuria määriä. Siten masuunikuonalla voidaan vähentää merkittävästi betonin valmistuksen päästöjä.

Masuunikuonaa on käytetty Euroopassa jo 100 vuoden ajan ja sen vaikutukset betonin säilyvyyteen tunnetaan varsin hyvin. Masuunikuonalla on tunnetusti positiivisia vaikutuksia betonin säilyvyyteen, se muun muassa parantaa betonin kemiallista kestävyyttä ja hidastaa kloridien tunkeutumista. Masuunikuonalla on kuitenkin selkeä negatiivinen vaikutus betonin pakkasuolakestävyyteen ja myös betonin ikääntyminen (karbonatisoituminen) vaikuttaa kuonabetonin pakkasuolakestävyyteen selvästi voimakkaammin kuin portland-sementistä valmistettuun betoniin. Yleisesti 50 %:n kuonamäärää pidetään kriittisenä raja-arvona pakkasuolakestävyyden kannalta, näin myös Väyläviraston Infrabetonien valmistusohjeessa [1].

Ahsan Iqbal on tehnyt diplomityönsä aiheesta Vähähiilisten betonien säilyvyysomi-

naisuudet (Durability Properties of Low-Carbon Concretes) [2]. Työssä tutkittiin betonien lujuus- ja säilyvyysominaisuuksia käytettäessä eri sideaineita. Diplomityö on tehty Aalto-yliopiston betonitekniikan laboratoriossa ja työn ohjaajana toimi Fahim Al-Neshawy ja valvojana prof. Jouni Punkki. Diplomityö valmistui syyskuussa -22 ja työ on osa LOIKKA-hanketta.

Kokeellinen tutkimus

Tutkimuksen koeohjelma koostui yhdeksästä betonista, joissa käytettiin eri sideaineita. Sideaineiden kuonamäärät vaihtelivat alueella 0...79 %. Betonien vesi-sideainesuhde pidettiin vakiona (0,45), samoin kiviainesten määrä. Betonien tavoitepainuma oli 150 ± 25 mm ja tavoiteilmamäärä 5,0 ± 1,0 %. Sideaineiden erilainen

1 Vekaransalmen 639 metrin pituinen palkkisilta toteutettiin liittorakenteisena, teräspalkkien ja betonikannen yhdistelmänä. Silta valmistui vuonna 2019. Ympäröivä Natura alue ja vesistöluonto on huomioitu läpi hankkeen elinkaaren.

2 Masuunikuona on raakaraudan valmistuksen sivutuote, joka muodostuu masuunissa syntyneestä silikaattisulatteesta nopeasti jäädyttämällä. Masuunikuonajauhe on hienoksi jauhettua granuloitua masuunikuonaa, jolla on ns. piilevät hydrauliset ominaisuudet. Nämä ominaisuudet heräävät sementin ja veden reaktiossa syntyvän kalsiumhydroksidin vaikutuksesta, jolloin kuona kehittää lujuutta. Masuunikuonajauheen vedentarve on pieni, eli se notkistaa betonia. Se myös vähentää huomattavasti betonin hydrataatiolämpöä, minkä vuoksi sitä käytetään usein massiivisten rakenteiden valuissa.





Taulukko 1

Koebetonien koostumukset

Tunnus	Sideaineet	Sementti (kg/m ³)	Kuonajauhe (kg/m ³)	Kuonan osuus sideaineesta (%)	Tehonotkistin (%) sideaineen painosta
C-I-0	Pika (CEM I 52,5 R)	430	0	0	0,35
C-II-A-0	Rapid (CEM II/A-LL 42,5 R)	430	0	0	0,18
C-II-B-0	Oiva (CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N)	430	0	17	0,18
C-II-B-25	Oiva + 25 % kuona	323	107	38	0,12
C-II-B-50	Oiva + 50 % kuona	215	215	59	0,06
C-II-B-75	Oiva + 75 % kuona	107	323	79	0,00
C-III-A-0	Kolmossementti (CEM III/A 52,5 L)	430	0	42	0,10
C-III-B-0	Finnsementti CEM III/B (CEM-III/B 42,5)	430	0	69	0,00
C-III-B-L-0	Schwenk CEM III/B (CEM-III/B 32,5 N)	430	0	70	0,00

vedentarve huomioitiin säätämällä betonin notkeutta tehonotkistimen avulla. Betonien koostumukset on esitetty taulukossa 1.

Tuoreen betonin ominaisuudet on esitetty taulukossa 2.

Betonien pakkasenkestävyyttä tutkittiin laattakokeella. Pakkassuolakestävyys tutkittiin CEN/TS 12390-9 mukaisesti ja pakkasenkestävyys ilman klorideja CEN/TR 15177 mukaisesti. Molemmissa tapauksissa määritettiin sekä rapauma että suhteellinen dynaaminen kimmomoduuli. Lisäksi koekappaleita vanhennettiin CO₂-kammiossa standardin EN 12390-12 mukaisesti. Kammion CO₂-konsentraatio oli 3,0 ± 0,5 % ja koekappaleita pidettiin kammiossa 62 vuorokautta. Käsittelyn jälkeen koekappaleiden karbonatisoitumisvyvyys mitattiin ja koekappaleille tehtiin laattakokeet.

Laattakokeiden lisäksi betonien säilyvyysominaisuuksia arvioitiin kapillaarisen vedelläimu- ja painekyllästyskokeen avulla ja lisäksi betoneille teetettiin ohuthieanalyysit.

Koetulokset**Puristuslujuus**

Betonien puristuslujuudet määritettiin 7, 28 ja 91 vuorokauden ikäisinä käyttäen 100 mm:n koekuutioita. Keskimääräiset tulokset on esitetty kuvassa 3.

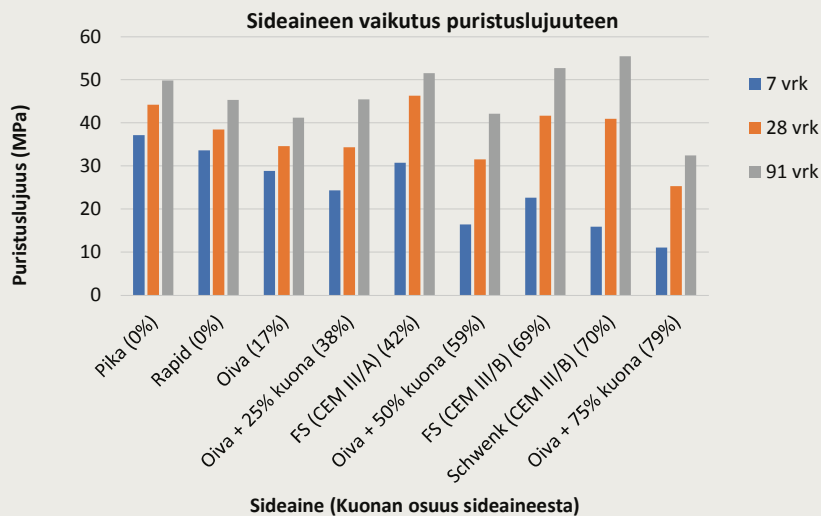
Puristuslujuus 7 vrk ikäisenä laski selvästi kuonamäärän kasvaessa. Poikkeuksena oli Kolmossementti, jolla saavutettiin jo varsin

Taulukko 2

Koebetonien painuma-arvot sekä ilmamäärät

Tunnus	Sideaineet	Painuma (mm)	Ilmamäärä (%)
C-I-0	Pika (CEM I 52,5 R)	150	4,8
C-II-A-0	Rapid (CEM II/A-LL 42,5 R)	160	4,9
C-II-B-0	Oiva (CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N)	170	5,0
C-II-B-25	Oiva + 25 % kuona	170	5,2
C-II-B-50	Oiva + 50 % kuona	165	5,5
C-II-B-75	Oiva + 75 % kuona	170	5,5
C-III-A-0	Kolmossementti (CEM III/A 52,5 L)	170	4,9
C-III-B-0	Finnsementti CEM III/B (CEM III/B 42,5)	170	5,2
C-III-B-L-0	Schwenk CEM III/B (CEM III/B 32,5 N)	140	4,1

3 Sideaineen vaikutus betonin puristuslujuuteen 7, 28 ja 91 vrk ikäisenä.



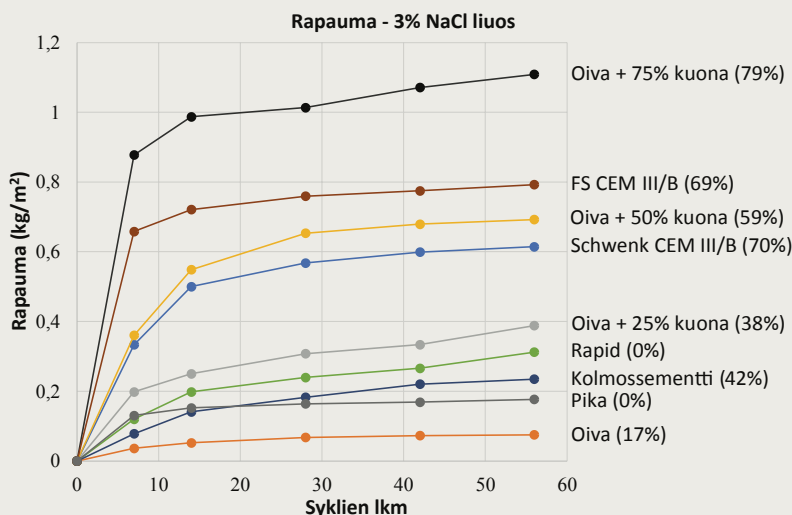
korkea lujuus 7 vrk ikäisenä. Kolmossementillä saavutettiin myös korkein 28 vrk lujuus ja muutoinkin kuonamäärän vaikutus lujuuteen 28 vrk kohdalla oli jo vähäisempi. 91 vrk ikäisenä korkeimmat puristuslujuudet saavutettiin CEM III/B-tyypin sementteillä. Lujuuksien vertailuun vaikuttaa myös sementtien erilaiset normilujuudet, jotka vaihtelivat välillä 32,5...52,5 MPa. Tulosten perusteella voidaan kuitenkin havaita, että masuunikuonan tehokkuuskerroin loppulujuuden suhteen on korkea. Samoin masuunikuonan hidastava vaikutus lujuudenkehitykseen on helppo havaita.

Pakkassuolakestävyys

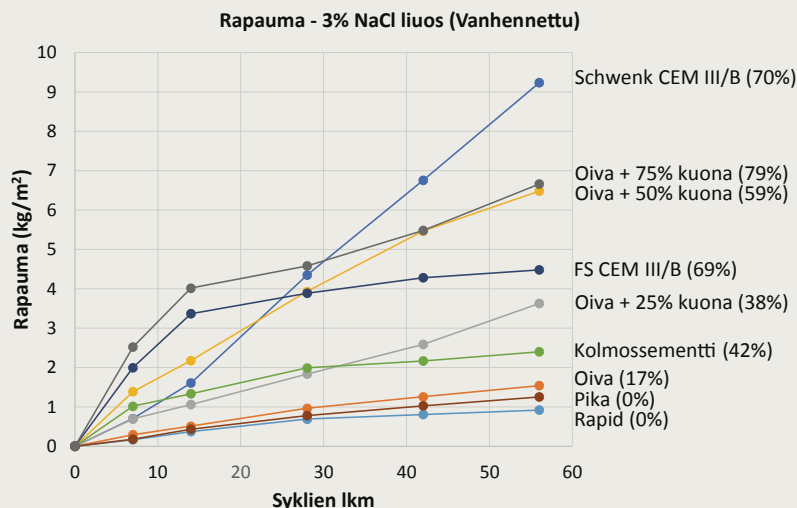
Pakkassuolakestävyyttä arvioitiin laattakokeen avulla. Kokeessa lämpötila vaihtelee alueella +20...-20 °C. Kokeet tehtiin 150×150×50 mm³ koekappaleille ja koekappaleista määritettiin rapauma sekä sisäinen vaurio eri ajankohtina. Sisäistä vauriota arvioitiin suhteellisen dynaamisen kimmomoduulin avulla. Kokeessa käytettiin väliaineena 3 % NaCl liuosta. Koetulokset on esitetty kuvassa 4.

Koetulosten perusteella pakkassuolakestävyyden voidaan arvioida heikentyvän kuonamäärän kasvaessa. Betoninormien BY65 [3] vaatimustasot rasitusluokissa XF2 ja XF4 vaihtelevat välillä 0,25...0,65 kg/m², P-lukubetonien vaatimustasot ovat osin vielä tiukemmat. Koetulokset tukevat vallitsevaa käsitystä, jonka mukaan 50 % kuonamäärä kriittinen määrä pakkassuolakestävyyden kannalta. Sideai-

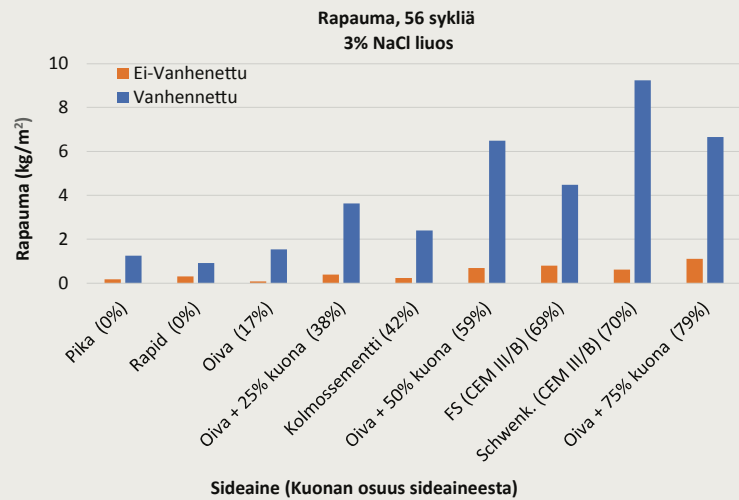
4 Pakkassuolakokeiden rapaumatulokset, väliaineena 3% NaCl liuos.



5 Vanhennettujen koekappaleiden pakkassuolakokeiden rapaumatulokset, väliaineena 3% NaCl liuos.



6 Vanhentamattomien ja vanhennettujen koekappaleiden rapauma-arvot, väliaineena 3 % NaCl liuos.



neilla joiden kuonamäärä oli > 50 % antoivat selvästi suuremmat rapauma-arvot kuin sideaineet joilla kuonamäärä oli < 50 %.

Pakkassuolakestävyys, vanhennetut koekappaleet

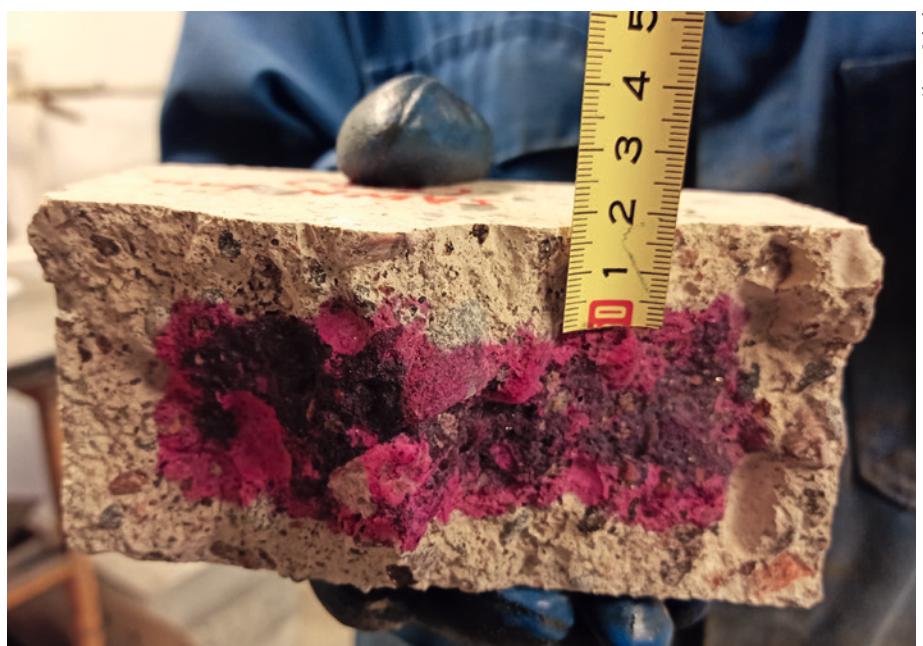
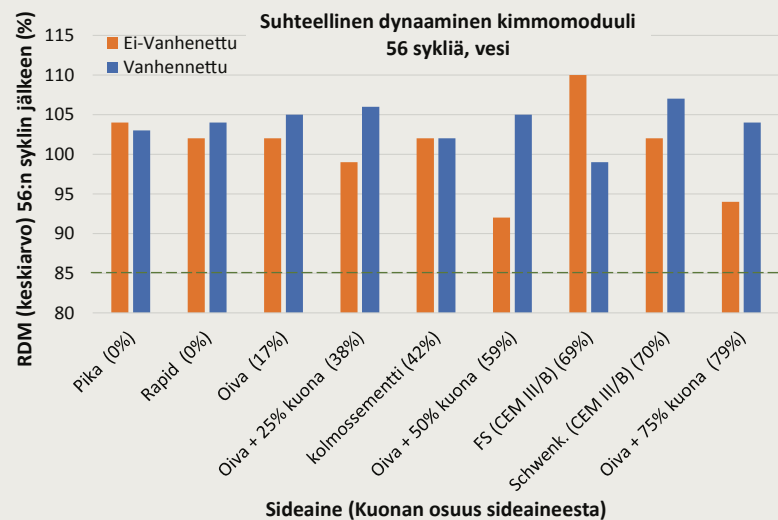
Erillisessä koesarjassa koekappaleita vanhennettiin CO₂-kammiossa ($3,0 \pm 0,5$ %) 62 vuorokauden ajan ennen pakkaskokeiden aloittamista. Kuten kuvasta 5 voidaan havaita vanhentaminen kasvatti merkittävästi rapauma-arvoja.

Kuvassa 6 esitetään sekä vanhentamattomien että vanhennettujen koekappaleiden rapauma-arvot. Pienin rapauma-arvo vanhennetuilla koekappaleilla oli 0,9 kg/m², kun vanhentamattomilla koekappaleilla se oli < 0,1 kg/m². Suurin rapauma-arvo vanhennetuilla koekappaleilla oli > 9 kg/m². Kokeessa käytetty vanhennuskäsittely ($3,0 \pm 0,5$ % – 62 vrk) moninkertaisti rapauma-arvot. Toisaalta voidaan arvioida, että käytetty vanhennuskäsittely oli varsin rajua.

Pakkasenkestävyys ilman klorideja (Rasitusluokat XF1 ja XF3)

Pakkassuolakestävyys lisäksi myös betonien pakkasenkestävyys (ilman kloridivaikutusta) määritettiin. Rasitusluokissa XF1 ja XF3 sisäinen vaurio on olennaisempi kuin rapauma. Kuvassa 7 on esitetty vanhentamattomien ja vanhennettujen koekappaleiden suhteelliset dynaamiset kimmokertoimet. Betoninormeissa BY65 [3] tiukin vaatimustaso suhteelliseen dynaamiselle kimmokertoimelle on 85 % (XF3 – 100 v). Siten kaikki betonit täyttävät vaatimukset pakkasenkestävälle betonille ja myös vanhentamisen vaikutus pakkasenkestävyyteen on koetulosten perusteella vähäinen. Useammalla betonilla vanhentaminen paransi RDM-arvoa.

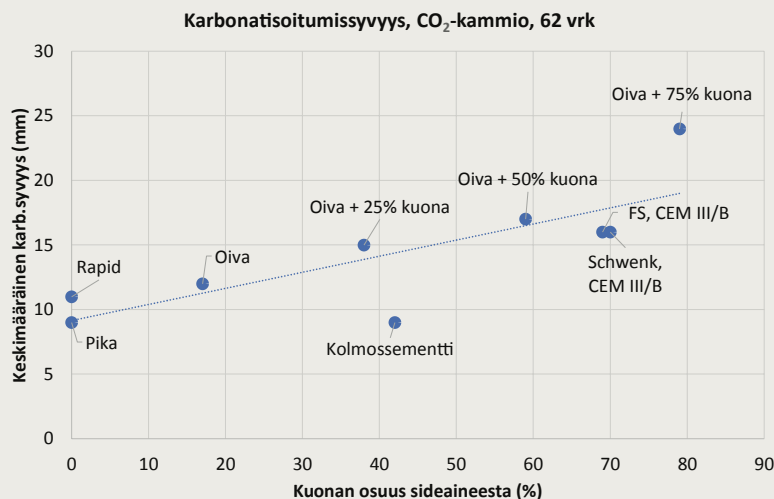
7 Vanhentamattomien ja vanhennettujen koekappaleiden suhteelliset dynaamiset kimmokertoimet, väliaineena de-oinisoitu vesi.



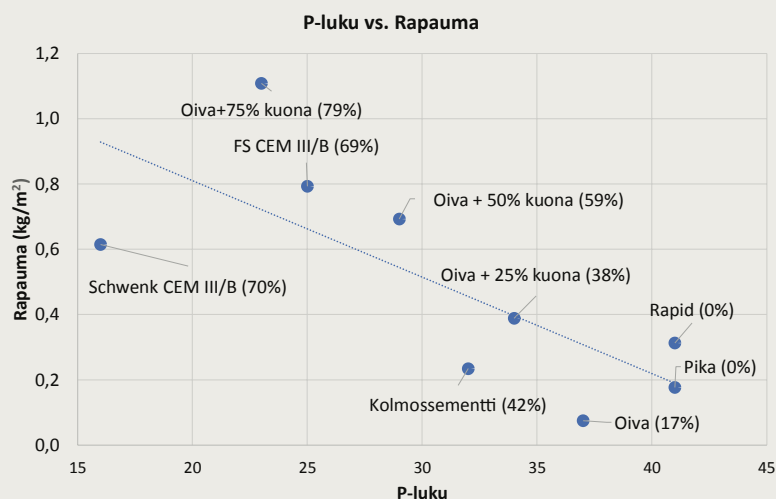
Ahsan Iqbal

8 Karbonatisoitumissyvyyden mittaaminen vanhentamiskäsittelyn jälkeen.

9 Betonien karbonatisoitumissyvytykset kuonamäärän funktiona. Koekappaleet säilytettiin CO₂-kammiossa (3% CO₂) 62 vuorokauden ajan.



10 Koebetonien rapauma-arvo laskennallisen P-luvun funktiona.



Karbonatisoituminen

Koekappaleiden karbonatisoitumissyvyys mitattiin vanhentamiskokeen yhteydessä (CO₂ kammio, 62 vrk). Keskimääräiset karbonatisoitumissyvytykset on esitetty kuvassa 9. Tulosten perusteella voidaan todeta, että kuona kasvattaa selvästi betonin karbonatisoitumista. Suurimmilla kuonamäärillä saavutettiin lähes kaksinkertainen karbonatisoitumissyvyys verrattuna sideaineisiin, jotka eivät sisältäneet kuonaa.

P-luku

Koebetonien P-luvut on laskettu Väyläviraston Infrabetonien valmistusohjeen mukaisesti [1]. CEM III-typin sementtien P-luvut on laskettu ilman sementtien erillishyväksyntää. Erillishyväksyntä kasvattaisi P-lukuja, mutta erillishyväksyntä ei ole toistaiseksi CEM III-typin sementeille. Kuvassa 10 on esitetty

rapauma-arvot laskennallisen P-luvun funktiona. Kuvasta voidaan havaita, että P-luku korreloi varsin hyvin rapauma-arvon kanssa. Samoin kuvasta voidaan havaita, että korkeampien P-lukujen saavuttaminen kuonabetoneilla tulee olemaan haastavaa.

Ohuthieanalyysit

Ohuthieanalyysin avulla voidaan arvioida huokosrakenteen laatua ja siten välillisesti betonin pakkasenkestävyyttä. Tosin infrabetonien (P-lukubetonien) osalta ohuthieanalyysia ei voida käyttää pakkassuolakestävyyden arviointiin. Tässä projektissa haluttiin kuitenkin varmistaa betonien huokosrakenteen laatu ohuthieanalyysin avulla. Koetulokset on esitetty taulukossa 3.

Huokosjakoa pidetään yleisesti toimivana parametrinä arvioitaessa betonin pakkasenkestävyyttä. Tässä tutkimuksessa kaikilla

tutkituilla betoneilla saavutettiin alhainen huokosjako ($\leq 0,16$ mm), mutta toisaalta ominaispinta-alat olivat korkeita. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että suojahuokokset olivat hyvin pieniä ja vaarana on, että ne täyttyvät vedellä, erityisesti kloridirasituksessa.

Koetulokset osoittavat, että pakkassuolarasitetuilla betoneilla huokosjako korreloi huonosti rapauman kanssa. Korkeilla kuonamäärillä rapauma oli suuri, vaikka huokosjako oli alhainen. Sen sijaan pakkasrasitetuilla betoneilla (rasitusluokat XF1 ja XF3) huokosjako näyttäisi korreloituvan hyvin sisäisen vaurion (RDM) kanssa.

Betonien CO₂-päästöt

Betonien CO₂-päästöt laskettiin Betoniyhdistyksen Vähähiilisyyslaskurin avulla [4]. Raaka-aineiden kuljetusmatkoina käytettiin tyypillisiä kuljetusmatkoja. Betonien päästöarvot on esitetty taulukossa 4. Kuten havaitaan, että masuunikuona on erittäin tehokas keino vähentää betonin CO₂-päästöjä. Korkeimmilla kuonamäärillä päästään alle kolmasosaan CEM I tai CEM II/A-sementillä valmistettujen betonien päästöistä.

Johtopäätökset

Diplomityössä tutkittiin kuonan vaikutuksia betonin lujuus- ja säilyvyyssominaisuuksiin. Kuona hidasti selkeästi betonin lujuudenkehitystä, mutta toisaalta korkeimmat puristuslujuudet 91 vuorokauden ikäisinä saavutettiin CEM III/B-typin sementeillä, joissa kuonan osuus oli noin 70 % sideaineen määrästä.

Kuona heikensi selkeästi betonin pakkassuolakestävyyttä. Kriittisenä pidetty 50 %:n kuonamäärä vaikuttaisi olevan kohdallaan. Mikäli kuonamäärä oli > 50 %, pakkassuolakestävyys aleni selvästi. Koekappaleiden vanhentaminen CO₂-kammiossa kasvatti rapauma-arvon moninkertaiseksi. Onkin tärkeää tutkia tarkemmin karbonatisoitumisen vaikutuksia kuonabetonien pakkassuolakestävyyteen. Myös betonien karbonatisoituminen kasvoi merkittävästi kuonamäärän kasvaessa,

Taulukko 3

Ohuthieanalyysien tulokset

Tunnus	Sideaine	Suoja-huokokset (%)	Tiivistys-huokokset (%)	Huokosjako (mm)	Ominais-pinta-ala (mm ² /mm ³)
C I-o	Pika (CEM I 52,5 R)	4,6	1,3	0,14	40
C II-A-o	Rapid (CEM II/A-LL 42,5 R)	5,0	0,7	0,11	47
C II-B-o	Oiva (CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N)	5,0	0,7	0,10	50
C II-B-25	Oiva + 25 % kuona	5,1	0,2	0,12	42
C III-A-F-o	Kolmossementti (CEM III/A 52,5 L)	3,9	1,0	0,10	55
C II-B-50	Oiva + 50 % kuona	5,7	1,4	0,11	47
C III-B-o	Finnssementti CEM III/B (CEM III/B 42,5)	3,1	0,4	0,16	38
C III-B-L-o	Schwenk CEM III/B (CEM III/B 32,5 N)	3,4	1,9	0,13	47
C II-B-75	Oiva + 75 % kuona	5,8	1,3	0,13	40

CEM I-typin sementillä karbonatisoituminen CO₂-kammiossa oli noin 10 mm, mutta CEM III/B-typin sementillä vastaava arvo oli noin 25 mm. Kuonamäärällä on myös voimakas vaikutus betonin P-lukuun. Koetulokset vahvistavat kuonan vaikutuksen, rapauma-arvon korrelaatio laskennallisen P-luvun kanssa oli voimakas. Samalla kuitenkin havaittiin, että korkeampien P-lukujen saavuttaminen kuonabetoneilla tulee olemaan haastavaa. Kun seossementeille saadaan Väyläviraston erillishyväksynät, tilanne tulee hieman helpotumaan, mutta edelleenkin korkeampien P-lukujen saavuttaminen tulee olemaan haastavaa.

Betoneille tehty CO₂-päästölaskelmat osoittavat kuonan tehokkuuden päästöjen vähentämisessä. Päästövähennyksiä ei kuitenkaan tule tehdä säilyvyydestä tinkimällä. Erityisesti pakkasuolarasitetuissa rakenteissa masuunikuonaa tulee käyttää harkiten.

Kirjallisuus

1. Infrabetonien valmistus. Väyläviraston ohjeita 41/2020. Väylävirasto. Verkkojulkaisu, saatavilla: <https://vayla.fi/palveluntuottajat/ohjeluetelo>
2. A. Iqbal, "Durability Properties of Low-carbon Concrete," Diplomityö. Aalto-yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Espoo, 2022. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-202210165939>
3. Betoninormit 2021, BY65. Suomen Betoniyhdistys ry.
4. BY-vähähiilisyysluokitus, Suomen Betoniyhdistys ry. Saatavissa: <https://vahahiilinenbetoni.fi>

Taulukko 4Koebetonien laskennalliset CO₂-päästöt

Tunnus	Sideaine	Kuonan osuus (%)	CO ₂ -päästöt (kg-CO ₂ -ekv/m ³)
C-I-o	Pika (CEM I 52,5 R)	0	383
C-II-A-o	Rapid (CEM II/A-LL 42,5 R)	0	369
C-II-B-o	Oiva (CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N)	17	291
C-II-B-25	Oiva + 25 % kuona	38	231
C-III-A-F-o	Kolmossementti (CEM III/A 52,5 L)	42	248
C-II-B-50	Oiva + 50 % kuona	59	171
C-III-B-o	Finnssementti CEM III/B (CEM III/B 42,5)	69	145
C-III-B-L-o	Schwenk CEM III/B (CEM III/B 32,5 N)	70	145
C-II-B-75	Oiva + 75 % kuona	79	111



11 Laattakoe alkamassa.



Ahsan Iqbal

Ahsan Iqbal on kotoisin Peshawarista, Pakistanista. Ahsan suoritti maisteriopintonsa Aalto-yliopistossa, Rakennustekniikan laitoksessa. Hän valmistui diplomi-insinööriksi syyskuussa 2022.

Abstract

LOIKKA-project aims at reducing CO₂-emissions of concrete manufacturing by 50%. The project consists of research project at Aalto University and five industrial projects. As a part of LOIKKA-project Ahsan Iqbal made his master's thesis on the topic: Durability Properties of Low-Carbon Concretes

In the experimental program the strength development as well as durability properties of concrete containing different binders was investigated. The slag content of the binders varied between 0% - 80%. The experimental program included compressive strength, freeze-thaw resistance of non-carbonated and carbonated specimens, carbonation depth measurements as well as thin section analyses. Test specimens were prepared and tested according to respective test standards.

Results concluded that slag content had clear effect on different properties of concrete.

Concretes with high slag content had lower compressive strength at the age of 7 days, but at 91 days the highest compressive strength was recorded for test concretes with app. 70 % slag content. Moreover, slag had a dominant effect on salt freeze-thaw resistance. 50% slag replacement with cement was considered critical. In addition, carbonation had clear effect on the scaling of concrete. The resistance of carbonated samples was quite low and surpassed the maximum scaled material limits. Frost resistance without chlorides was acceptable even with highest slag contents.