

Kaakkois-Suomen Ammattikorkeakoulu Oy

Betoni hiilinieluna

ratkaisuja vähähiiliseen rakentamiseen

Elli Tykkä
2.12.2024

Julkaisu on laadittu osana Betoni hiilinieluna – ratkaisuja vähähiiliseen rakentamiseen -hanketta (hankenumero A80069). Hanke toteutettiin 1.11.2023-31.10.2024. Hanketta rahoittivat Kymenlaakson liitto Euroopan aluekehitysrahastosta (EAKR), Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu Xamk, Joutsenon Elementti Oy, Rudus Oy, Lujabetoni Oy ja Consolis Parma Oy.

Tiivistelmä

Betoni hiilinieluna – ratkaisuja vähähiiliseen rakentamiseen on Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun toteuttama tutkimus- ja kehittämishanke. Rahoitus hankkeelle tuli Euroopan aluekehitysrahastosta Kymenlaakson liiton kautta.

Hankkeen päätavoitteena oli edistää betonirakentamisen hiilineutraaliustavoitteita kehittämällä prosessi, jossa betonia käsitellään hiilidioksidilla jo valmistusvaiheessa. Hanke tuotti tutkimusaiheesta uutta tietoa, joka on hyödynnettävissä betoniteollisuudessa.

Hanke toteutettiin Xamkin KymiLabs- tutkimusyksikön betonintestauslaboratoriossa. Laboratoriossa luotiin betoniresepti, jonka hiilijalanjälki on pienempi kuin tavanomaisesti valmistetun betonin. Hankkeessa suunniteltiin teolliseen ympäristöön soveltuvaa teknologiaa, jota sekä valmisbetoni- että betonielementtiteollisuus voivat hyödyntää.

Kehitetystä betonista tutkittiin sen ominaisuuksia sekä tuoreena, että kovettuneena, ja niitä verrattiin tavanomaisen betonin ominaisuuksiin. Ominaisuudet muuttuvat hiilidioksidikäsitelystä, mutta niistä saatiin tavanomaisen betonin ominaisuuksia vastaavat tai paremmat. Hiilen sitoutumisen validointiin käytettiin useita eri analyysimenetelmiä, ja sen sitoutuminen todennettiin kaikilla niistä.

Tuoreella betonimassalla on tutkimuksen mukaan kyky sitoa hiiltä 7 % sideaineen painosta. Tyypillisellä betonilla tämä tarkoittaa noin 30 kiloa sidottua hiilidioksidia yhtä valmistettua betonikuutiota kohden.

Abstract

Concrete as a carbon sink solutions for low-carbon construction is a research and development project implemented by South-Eastern Finland University of Applied Sciences. Funding for the project came from the European Regional Development Fund through the Regional council of Kymenlaakso.

The main objective of the project was to promote the carbon neutrality goals of concrete construction by developing a process in which concrete is treated with carbon dioxide already at the manufacturing stage. The project produced new information on the research topic, which can be utilized in the concrete industry.

The project was carried out in the concrete testing laboratory of Xamk's KymiLabs research unit. Concrete design with a smaller carbon footprint than conventionally made concrete was designed in the laboratory. The project envisaged technology suitable for the industrial environment, which would allow both ready-mixed concrete and precast concrete production to benefit.

The developed concrete was studied for its properties both fresh and hardened. Properties were compared with those of conventional concrete. The properties change from carbon dioxide treatment, but they yielded properties like or even better than conventional concrete. Several different analytical methods were used to validate carbon binding and its binding was verified in all of them.

According to the study, fresh concrete has the ability to bind carbon by 7% of the weight of the binder. With typical concrete, this means about 30 kilograms of bound carbon dioxide per one cubic metre of concrete manufactured.

Betoni hiilinieluna – ratkaisuja vähähiiliseen rakentamiseen

Betoni hiilinieluna – ratkaisuja vähähiiliseen rakentamiseen (BEHI)-hankkeessa tutkittiin ja kehitettiin betonin hiilidioksidikäsittelyä. Hiilidioksidi toimii kiihdyttävänä lisäaineena betonin kovettumisessa, jos hiilidioksidi annostellaan betonimassaan jo sen sekoittamisen aikana. Hiilidioksidin käytöstä betonin lisäaineena on hyötyä monella tapaa: se nopeuttaa betonin kovettumista, parantaa lujuutta, ja vähentää hiilijalanjälkeä.

BEHI-hanke on jatkoa Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun *BECO – betonin rooli hiilineutraalissa yhteiskunnassa* -tutkimus- ja kehittämishankkeelle. BECO-hankkeessa tutkittiin alustavasti hiilidioksidin vaikutusta betonin ominaisuuksiin. Hankkeen aikana saatiin lupaavia tuloksia, ja oli selvää, että tutkimusta tulee jatkaa. Kumpikin hanke on toteutettu Xamkin KymiLabs - tutkimusyksikössä.

BEHI-hanke oli jaettu viiteen työpakettiin (kuva 1), joista suuri painoarvo annettiin betonireseptin kehittämiseksi. Ilman kunnollista ja tarkoitusta palvelevaa reseptiä ovat muut hankkeen työpaketit turhia. Reseptin kehittämisen jälkeen on tärkeää varmistua siitä, että hiili todella on sitoutunut betoniin. Tätä tutkittiin työpaketissa 3.



Kuva 1. Hankkeen työpaketit.

Työpaketissa yksi oli tarkoitus kehittää teollisuuteen soveltuva laitteisto hiilidioksidikäsittelyä varten. Menetelmä laboratoriossa tapahtuvaan hiilidioksidikäsittelyyn on kehitetty jo BECO-hankkeen aikana, ja se on ollut käytössä koko hankkeen keston. Sen ominaisuuksien ja tarpeiden perusteella selvitettiin teollisuuteen sopivan laitteiston vaatimuksia ja rajoituksia. Työpaketissa tarkasteltiin myös hiilidioksidikaasun hankinnan ja käytön vaatimuksia.

Suurin työpanos hankkeessa meni työpakettiin kaksi. Betonireseptejä kehitettiin ja kokeiltiin koko hankkeen keston ajan. Tavoitteena oli kehittää betoni, jonka hiilijalanjälki olisi mahdollisimman pieni ilman, että betonin ominaisuudet heikkenevät merkittävästi. Betonin hiilijalanjälkeä saadaan tehokkaimmin pienennettyä käyttämällä vaihtoehtoisia sideaineita. Tutkimuksessa etsittiin

optimaalista osuutta, joka sementistä voidaan korvata masuunikuonalla. Suora vaikutus hiilijalanjälkeen on myös hiilen sitomisella.

Reseptin kehittäminen on melko hidasta, sillä tyypillinen betonin arvosteluikä on 28 vuorokautta. Tämä tarkoittaa sitä, että valettu koekappale koestetaan 28 päivän iässä, jolloin betoni on saavuttanut arvosteluikänsä mukaisen puristuslujuuden. Kokeellisten betonimassojen lopulliset ominaisuudet arvioidaan siis vasta lähes kuukauden kuluttua niiden valmistamisesta, jonka jälkeen reseptiin voidaan tehdä tarvittavia muutoksia. Vaikka rinnakkain kypsyviä koesarjoja tehdäänkin, tulee niissä huomioida muuttujien vaikutus. Työpakettiin kaksi kuuluikin tulosten analysointi. Koska betonissa pienikin muutos voi vaikuttaa betonin ominaisuuksiin, tulee mitattuja tuloksia tarkastella analyttisesti.

Kovettuneen betonin ominaisuuksien lisäksi tutkimuksen betoneista tarkasteltiin niiden tuoreen massan ominaisuuksia. Heti betonimassan sekoittamisen jälkeen mitattavat ominaisuudet antavat tärkeää tietoa. Betonin työstettävyyks eli sen notkeus ja koossapysyvyys on etenkin teollisesta näkökulmasta tärkeä ominaisuus. Hiilidioksidi vaikuttaa tähän ominaisuuteen heikentävästi, ja yksi tutkimuksen suurimmista haasteista olikin löytää ratkaisu, jolla hiilidioksidikäsitelystä betonimassasta saa työstettävän.

Kun kehitetty resepti alkoi tuottaa toivotunlaisia tuloksia, aloitettiin työpaketti kolmen toimenpiteen. Työpaketissa tutkittiin hiilen sitoutumista erilaisin analyysimenetelmin sekä tuoreesta, että kovettuneesta betonista. On tärkeää pystyä osoittamaan hiilidioksidin mineralisoituvan pysyvästi betoniin. Tutkimuksen näytteitä analysoitiin muun muassa isoteremisellä kalorimetrillä ja kenttäemissio-pyyhkäisyelektronimikroskoopilla.

Pilotointi kenttäolosuhteissa oli yksi hankkeen tavoitteista. Työpaketti koostui kehitettyjen reseptien ja teknologian pilotointien suunnittelusta ja pilotoinnista betoniteollisuuden eri osa-alueilla. Kun hiilidioksidi lisätään suoraan tuoreeseen betonimassaan jo sekoittamisaikana, menetelmä sopii sekä valmisbetoni-, että elementtiteollisuuteen. Näin kaikilla toimijoilla on yhtenäinen mahdollisuus hyötyä kehitettävästä teknologiasta.

Tulokset

Hankkeen tuloksena saatiin paljon uutta ja arvokasta tietoa betonirakentamisen hiilijalanjäljen pienentämisen edistämiseksi. Tutkimuksessa todettiin jo olemassa olevan tiedon paikkansapitävyys muun muassa hiilidioksidin kiihdyttävän ominaisuuden osalta.

Hiilidioksidin lisäystä betonimassaan on tutkittu jonkin verran, mutta näissä tutkimuksissa lisätyn hiilidioksidin määrä on vähäinen. Hiilidioksidi nopeuttaa sementin sitoutumista radikaalisti, ja liian suuri annostelu tekee betonimassasta käyttökelvotonta. BEHI-hankkeessa onnistuttiin lisäämään hiilidioksidia tuoreeseen betonimassaan aiempia tutkimuksia merkittävästi suurempia määriä ilman, että betonin ominaisuudet heikkenisivät. Lisätyn hiilidioksidin merkittävämpi määrä tuo kentälle aivan uusia mahdollisuuksia aiheen tutkimiseen.

BEHI-hankkeen aikana tutkituissa betoneissa havaittiin hiilidioksidin vaikuttavan betonin ominaisuuksiin sekä heikentävästi, että parantavasti. Reseptiä optimoitiin niin kauan, että vaikutus oli toivotunlainen. Sen sijaan, että koebetoni olisi päässyt vertailubetonin kanssa samalle tasolle ominaisuuksiensa osalta, sen lujuusominaisuudet olivat jopa paremmat. Tämä antaa mahdollisuuden vähentää päästöintensiivisen sementin käyttöä betonissa.

Hiilidioksidin sitoutuminen betoniin onnistuttiin osoittamaan usealla eri tavalla. On tärkeää pystyä osoittamaan reaktion tapahtuneen hiilidioksidin ja sementin välillä, mutta jopa tärkeämpää olisi osoittaa, kuinka paljon hiilidioksidia on saatu mineralisoitumaan betoniin. BEHI-hankkeen aikana tähän ei saatu vastausta aikataulullisista syistä.

On tärkeää myös tutkia, sitoutuuko hiilidioksidi aina yhtä tehokkaasti. Betonimassassa olevan kalsiumhydroksidin määrä vaikuttaa suoraan hiilidioksidin sitoutumiseen, mutta teollisuuden näkökulmasta olisi tärkeää tietää, miten hiilidioksidi käyttäytyy sekoittimessa. Jääkö sitä sekoittimen ilmatilaan, vai sitoutuuko kaikki sekoittimeen lisätty kaasu betonimassaan? Onko sitoutuneen hiilidioksidin osuus aina sama, vai vaikuttavatko siihen esimerkiksi betonin muut osa-aineet?

Vaikka hankkeen aikana saatiin paljon hyödyllistä tietoa, on useita kysymyksiä silti vielä vailla vastausta. Tutkimusaihe on tärkeä ympäristön kannalta, ja tutkimusta kannattaakin jatkaa.

Betoni on sekä hiilikuorma, että hiilinielu

Rakentaminen on ympäristölle kuormittavaa, etenkin betonirakentaminen. Betonin pääraaka-aineen sementin valmistaminen tuottaa vuosittain noin 8 % kasvihuonekaasupäästöistä globaalisti. Se on suurin yksittäinen ihmisen aiheuttama päästö.

Sementti valmistetaan polttamalla kalkkikiveä korkeassa lämpötilassa. Kuumentamisen aikana kalkkikivestä vapautuu ilmaan hiilidioksidia, ja lisäksi prosessi vaatii paljon energiaa. Suurin osa tästä energiasta tuotetaan edelleen käyttämällä fossiilisia polttoaineita. Yhden sementtiklinkkeritonnin valmistamisesta vapautuu noin 700–800 kg hiilidioksidia. Tästä 530 kg vapautuu kalkkikiven kemiallisessa hajoamisessa ja loput energian käytöstä. (Betoni, s.a.) Kalkkikiven poltosta vapautuvan hiilidioksidin osuus vastaa noin 70:ää % kokonaispäästöistä (kuva 2).



Kuva 2. Sementtiklinkkerin valmistuksesta aiheutuvien hiilidioksidipäästöjen suhteellinen osuus.

Betonin ominaispäästöt ovat kuitenkin verrattain pienet, vaikka betonirakentaminen on valtava kuorma ilmastolle. Taulukossa 1 esitetyn mukaisesti betonin ja betonituotteiden keskimääräinen ominaispäästö co2data.fi-laskurin mukaan on vain 0,16 kgCO₂e/kg, kun esimerkiksi puurakentamisessa käytettävien tuotteiden ominaispäästö on 0,48 ja terästuotteiden 4,08 kgCO₂e/kg (co2data.fi.) Ympäristöä kuormittavan betonista tekee kuitenkin sen suuret käyttömäärät. Betonia valmistetaan vuosittain yli 10 miljardia kuutiometriä.

Taulukko 1. Eri materiaaliryhmien ominaispäästöjä laskettuna co2data-tietokannan laskurilla.

materiaali-ryhmä	n	keskiarvo [kgCO ₂ e/kg]	min. [kgCO ₂ e/kg]	max. [kgCO ₂ e/kg]
betoni-tuotteet	79	0,16	0,01	0,35
puu-tuotteet	13	0,48	0,08	1,20
teräs- ja metallituotteet	19	4,08	0,60	14,00

Betonin käyttämistä ei kuitenkaan voida eikä tarvitse välttää, sillä sen materiaaliominaisuudet ovat korvaamattomat ja hinta edullinen. Betoni tunnetaan lujana materiaalina, joka kestää hyvin puristuksen aiheuttamaa kuormitusta. Lujuuden lisäksi betonilla on monia muitakin hyviä materiaaliominaisuuksia, kuten palonkesto ja säilyvyys. Säilyvyydellä tarkoitetaan materiaalin kykyä säilyttää toiminnalliset ominaisuutensa ulkoisten rasitusten alaisena.

Hyvien ja haluttujen ominaisuuksien lisäksi betonista tekee houkuttelevan sen hinta ja saatavuus. Betonin raaka-aineita on saatavilla käytännössä ympäri maailmaa, ja betonin valmistaminen tapahtuu lähellä rakennuspaikkaa. Tämänkin suhteen betoni on pienempi paha ympäristölle kuin maapallon toiselta puolelta tuotavat materiaalit.

Sementin valmistus kuormittaa ympäristöä

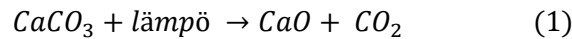
Betonirakentamisen hiili-intensiivisyyden vähentämiseksi on tehty paljon toimenpiteitä, ja uusia tapoja kehitetään jatkuvasti. Tehokkain tapa tällä hetkellä on sementin korvaaminen vaihtoehtoisilla sideaineilla, joita ovat mm. masuunikuona, lentotuhka ja silika. Sementtiä seostamalla voidaan sen osuutta sideaineesta pienentää, jolloin sementin valmistuksen tarve on pienempi.

Sementistä puhuttaessa tarkoitetaan yleisimmin portlandsementtiä. Sementti on betonin perusraaka-aine, joka liimaa yhteen betonin muut komponentit. Betonin kovettuminen alkaa sementin hydrataatioreaktioilla, jossa vesi sitoutuu kemiallisesti ja fysikaalisesti sementtiin muodostaen sementtikiveä.

Sementti valmistetaan kalkkikivestä ja pienistä määristä muita kivilajeja. Kalkkikiven lisäksi sementin valmistamiseen tarvitaan kivilajeja, joissa on piidioksidia, rautaa ja alumiinia. Nämä komponentit kuuluvat maankuoren yleisiin alkuaineisiin, joten sementin valmistaminen on materiaaliressurssien puolesta mahdollista lähes missä vaan.

Louhinnan jälkeen kiviaines murskataan ja jauhetaan. Jauhetuille raaka-aineille määritetään kemiallisen koostumuksen perusteella sopivat seossuhteet, jolla saadaan oikea koostumus sementtiklinkkerille. Raakajauhatuksella, eli jauheen homogenoinnilla, varmistetaan seoksen tasalaatuisuus.

Raakajauhatuksen jälkeen seos esikalsinoidaan, jolloin kalkkikiven kalsiumkarbonaatti hajoaa kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi (kaava 1). Esikalsinoinnin aikana sementti kuumenee nopeasti sekoittumalla poltosta aiheutuviin savukaasuihin esilämmitysjärjestelmässä.



Esikalsinoinnin jälkeen klinkkeri poltetaan kiertoilmauunissa, jonka lämpötila nostetaan noin 1450 °C:seen. Jauhe sulaa osittain polton aikana. Sementtiklinkkeri sintraantuu soramaiseksi kalsiumyhdisteistä, jotka ovat muodostuneet kalkin, piin, alumiinin ja rautayhdisteiden reaktioissa. Muodostuneet reaktiotuotteet ovat aliitti (C₃S), beliitti (C₂S), aluminaatti (C₃A) ja ferriitti (C₄AF). Näiden mineraalien osasuhteita säätämällä pystytään vaikuttamaan sementin ominaisuuksiin.

Rakeinen klinkkeri hienonnetaan kuulamyllyssä. Sementtipartikkelien koko vaikuttaa sementin reaktionopeuteen. Mitä hienompaa jauhe on, sitä suurempi ominaispinta-ala yksittäisellä partikkelilla on. Reaktiopinnan kasvu saa sementin reagoimaan veden kanssa nopeammin ja reaktio tuottaa enemmän lämpöä. Myös betonin vedentarve kasvaa, mikä lisää valmiin kovettuneen betonin taipumusta halkeiluun kutistuman myötä.

Hienonnuksen yhteydessä sementtiin lisätään kipsiä hillitsemään sitoutumisreaktioiden nopeutta ja siten betonimassalle saadaan pidempi työstöaika. C₃A reaktio veden kanssa on todella nopea, ja betonin sitoutuminen alkaa välittömästi. Vaihtoehtoisia sideaineita voidaan lisätä sementtiin joko jauhausvaiheessa, tai vasta sen jälkeen. (By s.a.) Tällä hetkellä vaihtoehtoisena sideaineena käytetään yleisesti terästeollisuuden sivuvirtana saatavaa masuunikuonaa. Muita käytössä olevia vaihtoehtoisia sideaineita ovat mm. lentotuhka ja silika.

Vaihtoehtoisia sideaineita käytetään kaikissa CEM II-tyyppin sementeissä eli portlandseossementeissä, joihin on portlandsementin lisäksi lisätty jotakin vaihtoehtoista sideainetta. Sementin merkinnät kertovat seosaineen laadun, lujuuden ja sen kehittymisnopeuden, sekä tarvittaessa muita tietoja, esimerkiksi:

CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N

jossa

CEM II	portlandseossementti
B	seosainetta 36–55 % sideaineesta
M	useita seosaineita
S	granuloitu masuunikuona
LL	kalkkikivi
42,5	28 vuorokauden lujuus megapascalina
N	normaali lujuudenkehitys

Masuunikuonaa syntyy raakaraudan valmistuksen sivutuotteena. Masuunikuonalla on piilevät hydrauliset ominaisuudet, jotka heräävät kalsiumhydroksidin vaikutuksesta. Hydraulisten ominaisuuksien aktivoituessa masuunikuona kehittää lujuutta sementin tapaan. Masuunikuonan lujuudenkehitys on tosin hitaampaa kuin sementillä. Lisäksi masuunikuonaa saa käyttää vain rajoitetusti sementin korvaamiseen Suomessa.

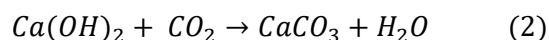
Lentotuhkaa syntyy kivihiilen poltosta voimalaitoksissa. Se on pozzolaani, joka erotetaan savukaasuista. Pozzolaani reagoi kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen kalsiumsilikaattihydraattigeeliä. Tätä muodostuu myös sementin hydrataatiotuotteena. Lentotuhka toimii siis sideaineena, mutta sitä voidaan käyttää myös korvaamaan kiviaineksen hienorakeisinta osuutta.

Silika erotetaan ferropiin ja piin valmistuksessa syntyvistä savukaasuista. Se on erittäin hienojakoinen pozzolaani, jolla saadaan lisättyä huomattavasti betonin lujuutta. Se parantaa myös betonin kemiallista kestävyyttä, koossapysyvyyttä, tiiviyttä ja vedenpitävyyttä.

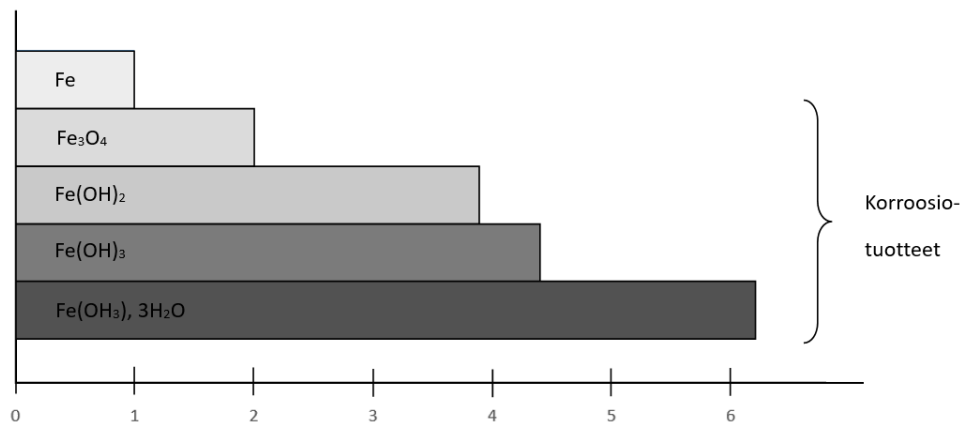
Vaihtoehtoiset sideaineet lasketaan nollapäästöisiksi betoniteollisuudessa, sillä niiden päästöt on laskettu jo alkuperäisen tuotteen tai materiaalin valmistamiseen. Etenkin masuunikuonaa käytetään paljon yleisesti käytössä olevissa portlandseossementeissä hiilijalanjäljen pienentämiseksi. Masuunikuona onkin hyvä vaihtoehtoinen sideaine, mutta sen saatavuudessa tulee olemaan tulevaisuudessa ongelmia terästeollisuuden valmistustavan muuttuessa vähähiilisemmäksi. Lisäksi masuunikuona sopii vain tiettyihin rakenteisiin ja kohteisiin käytettäväksi merkittävänä määrinä.

Karbonatisoituminen on myös hyvä ominaisuus

Uutena keinona pienentää betonirakentamisen hiilijalanjälkeä tutkitaan hiilidioksidin sitomista betoniin. Betoni toimii koko elinkaarensa ajan hiilinieluna. Yksinkertaistettuna ilmakehän hiilidioksidi reagoi betonin kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia (kaava 2). Reaktiota kutsutaan karbonatisoitumiseksi, ja se etenee betonin pinnasta lineaarisesti syvemmälle.



Karbonatisoituminen on pitkälle edenneenä haitallinen teräsvahvistetuille betonirakenteille. Karbonatisoitunut betoni menettää alkalisuuttaan, joka suojaa betoniteräksiä korroosiolta. Kun karbonatisoitumisrintama on edennyt betonin teräsvahvikkeisiin asti, on teräksillä suuri potentiaali ruostua. Raudan ruostuessa muodostuu korroosiotuotteita, joiden tilavuus on kuusinkertainen verrattuna raudan tilavuuteen (kuva 3). Tilavuudenmuutos aiheuttaa betoniin sisäisiä jännitteitä, jotka hajottavat betonirakenteen.



Kuva 3. Raudan tilavuuden suhde sen korroosiotuotteisiin.

Karbonatisaatiota voidaan kuitenkin hyödyntää altistamalla betoni tietoisesti hiilidioksidille. BEHI-hankkeessa tavoiteltiin betonirakentamisen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä sitomalla tuoreeseen betonimassaan hiilidioksidia. Tavoitteena oli saada mineralisoitua teollisuuden päästöistä talteenotettua hiilidioksidia pysyvästi betoniin, jolloin se ei koskaan päätyisi ilmakehään

Karbonatisoitumisreaktio tapahtuu myös silloin, kun hiilidioksidia lisätään tuoreeseen betonimassaan. Massaan muodostuu kalsiumkarbonaatteja, mutta ilmiö ei ole betonille tai sen toiminnalle haitallinen. Tuoreen betonimassan pH laskee hetkellisesti, mutta nousee tavanomaiselle tasolle betonin mikrorakenteen kypsyessä (Fu, X. 2024). Hiilidioksidin tiedetään muuttavan betonin mikrorakennetta, sillä betoniin muodostuu nanokokoisia kalsiumkarbonaattipartikkeleita, joita ei tavanomaisesti muodostu.

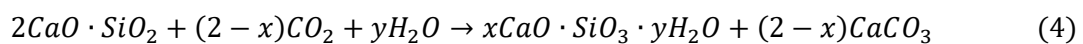
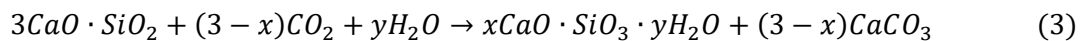
Betonin käsittely hiilidioksidilla lisää sen lujuutta (Monkman 2024). Hiilidioksidin lisäys tuoreeseen betonimassaan voi siis tuottaa etuja kahdella tapaa: lujuuden paranemisen myötä on mahdollista vähentää sementin käyttöä betonin valmistuksessa, ja käytetty hiilidioksidi mineralisoituu pysyvästi betoniin eikä näin ollen päädy koskaan ilmakehään. BEHI-hankkeen tavoitteena oli luoda teolliseen mittakaavaan sopiva tapa hyödyntää hiilidioksidia betonin valmistuksessa. Teknologia on mahdollista ottaa käyttöön kaikessa teollisessa betonin valmistuksessa.

Koska ajatus on verrattain uusi, sen kaupallistaminen vaatii paljon työtä. Hiilidioksidin vaikutusta betoniin tulee tutkia, sillä aiheesta ei ole saatavilla riittävästi aiempia tutkimustuloksia. Hiilensitoutuminen tulee validoida, ja betonin valmistajalle ja käyttäjälle tulee pystyä osoittamaan, kuinka paljon hiiltä todellisuudessa on sitoutunut betoniin. Vasta kun tähän pystytään, voi betonin ympäristökuorman pienenemistä arvioida luotettavasti.

LISÄTYN HIILIDIOKSIDIN VAIKUTUS BETONIIN

Jo BECO-hankkeen tutkimuksen aikana huomattiin, että hiilidioksidin lisäys tuoreeseen betonimassaan sekoittamisen aikana ei ole suoraviivaista. Hiilidioksidi toimii kiihdyttävänä lisäaineena betonissa, ja reaktionopeus oli hallitsematon.

Lisättäessä hiilidioksidia tuoreeseen betonimassaan sementin sitoutumisreaktiot nopeutuvat selkeästi. Hiilidioksidin tiedetään vaikuttavan sementin hydrataatioon. (Monkman, S. et al 2016). Se reagoi veden läsnä ollessa kalsiumsilikaattifaasien kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia ja kalsiumsilikaattihydraattigeeliä (kaavat 3 ja 4):



Hankkeen aikana erilaisiin laasti- ja betoniresepteihin lisättiin hiilidioksidia kaasuna eri pitoisuuksia. Tavoitteena oli löytää optimaalinen resepti, jossa on otettu huomioon valmistetun betonin hiilijalanjälki sekä betonin tavoitellut ominaisuudet.

Tutkimuksen lähtötiedot

Tutkimuksessa käytettiin puhdasta hiilidioksidikaasua ja yleisesti käytössä olevia betonin raaka-aineita. Hiilidioksidikaasun määrä on mitattu grammoina ja ilmoitettu painoprosentteina sideaineen painosta. Laastimassat valmistettiin standardin SFS-EN 196-1 mukaisella sekoittimella, johon oli liitetty syöttölaitteisto hiilidioksidikaasua varten. Betonimassat valmistettiin tasosekoittimella, jossa oli umpinainen kansi kaasun sekoittumisen varmistamiseksi (kuva 4).



Kuva 4. Hiilidioksidisyöttöä varten muokattu tasosekoitin betonimassojen valmistamiseen

Laastikokeet

Reseptin optimoiminen aloitettiin tekemällä laastimassoja sementtistandardin SFS-EN 196-1 menetelmän mukaisesti. Laastimassoissa valmistuvan massan määrä on selvästi pienempi kuin betonimassalla, ja seoksen osasuhteiden muuttujat ovat helpommin hallittavissa. Tavoitteena oli löytää sopivat seossuhteet pienessä mittakaavassa, ja sen jälkeen siirtyä betonikokeisiin. Laastimassat valmistettiin sementistä, masuunikuonasta, standardihiekasta ja vedestä. Standardihiekka on standardin SFS-EN 196-1 mukaista hiekkaa, jonka raekoko on määritelty. Sitä käytetään sementtien lujuutta testattaessa laastin valmistukseen.

Laastisekoitin oli standardin SFS-EN 196-1 mukainen (kuva 5). Sekoittimeen liitettiin letku, jolla vaa'an päällä olleesta hiilidioksidipullosta saatiin lisättyä hiilidioksidia tuoreen massan sekaan sekoittamisen aikana. Pullon painohäviön otaksuttiin olevan lisätyn kaasun massa. Sekoittimesta ei saatu kaasutiivistä, joten sekoittuneen ja sitoutuneen hiilidioksidikaasun määrä on epävarma.



Kuva 5. Tutkimuksessa käytetty laastisekoitin (Eloaho 2023)

Laastimassakokeissa oli tutkittavana 13 erilaista reseptiä. Sementtinä massoissa käytettiin tyyppin I ja II sementtejä. Tutkittavia koesarjoja oli yhteensä 82. Kontrollimassa valmistettiin täysin standardin mukaisesti, ja koemassoja verrattiin sen tuloksiin. Koemassoissa korvattiin osa sementistä masuunikuonalla ja niihin lisättiin eri määriä hiilidioksidia (taulukko 2).

Taulukko 2. Laastimassakoesarjojen keskilujuudet 28 d kuormitusiässä

1-sarja	2-sarja	3-sarja
sementistä korvattu 30 % masuunikuonalla	sementistä korvattu 60 % masuunikuonalla	sementistä korvattu 90 % masuunikuonalla
testisarja	puristuslujuus MPa	taivutuslujuus MPa
kontrolli	41,0	7,0
1_0: ei hiilidioksidia	36,7	7,1
1_1: 1 % hiilidioksidia	34,1	7,5
1_2: 3 % hiilidioksidia	38,5	7,8
1_3: max. hiilidioksidia	34,4	7,5
2_0: ei hiilidioksidia	27,7	6,3
2_1: 1 % hiilidioksidia	26,2	5,9
2_2: 3 % hiilidioksidia	26,7	5,6
2_3: max. hiilidioksidia	24,2	5,4
3_0: ei hiilidioksidia	15,3	3,9
3_1: 1 % hiilidioksidia	14,2	2,3
3_3: 3 % hiilidioksidia	14,5	3,8
3_3: max. hiilidioksidia	11,9	3,6

Koemassoja tehtiin kolmea erilaista sarjaa. Ensimmäisessä sarjassa sementistä korvattiin 30 % masuunikuonalla, toisessa 60 % ja kolmannessa 90 %. Sarjoista tehtiin neljää eri versiota eri hiilidioksidipitoisuuksilla. Versiossa 0 ei lisätty lainkaan hiilidioksidia ja kolmanteen versioon lisättiin hiilidioksidia koko sekoituksen keston ajan. Versiossa 3 sekoitetun hiilidioksidin määrät vaihtelevat keskenään koemassojen välillä. Toteutuneet hiilidioksidin massat on dokumentoitu grammoina, ja niiden arvo oli keskimäärin 28 paino-% sideaineen painosta.

Kokeissa lupaavimmat tulokset lujuudenkehityksen kannalta saatiin, kun sementistä korvattiin 30 % masuunikuonalla. Hiilidioksidin lisäyksen tulos oli onnistunein, kun massan sekaan sekoitettiin 3 % kaasua. Kontrollisarja on valmistettu käyttäen sideaineena pelkkää portlandseossementtiä CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N. Koesarjojen puristuslujuuksien keskiarvot on koottu taulukkoon 2.

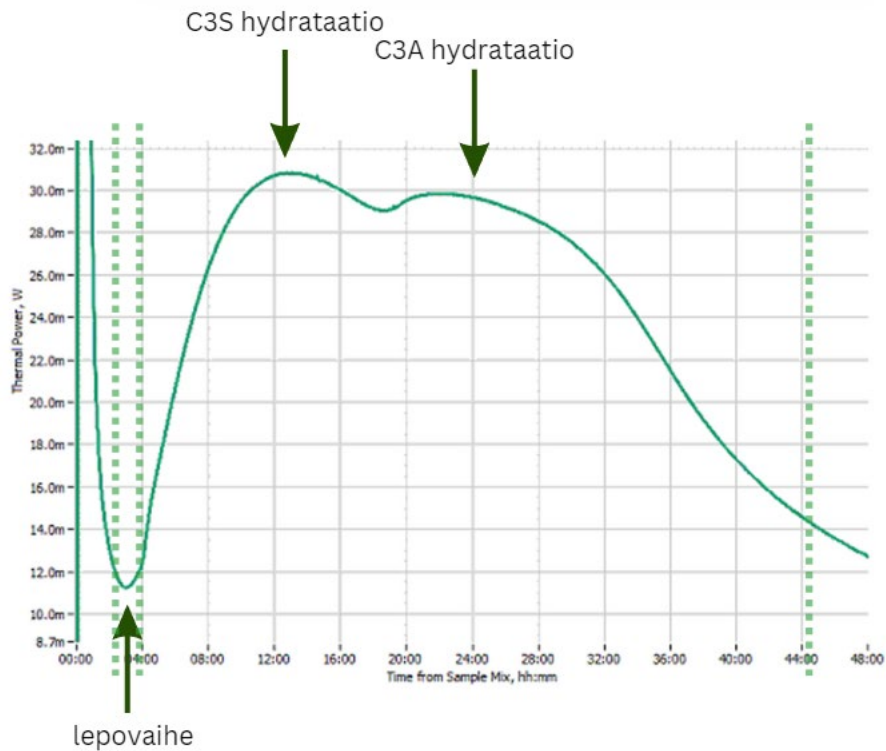
Hydrataatioprofiilista tärkeää tietoa

Lujuudenkehityksen lisäksi sarjoista tutkittiin sementin hydrataation alkuvaiheen reaktioita isotermisellä kalorimetrillä. Kalorimetriaa käytettiin reseptin optimoinnin lisäksi myös hiilensidonnan validointiin.

Kalorimetrianalyysit toteutettiin Calmetrixin i-Cal2000 -isotermisellä kalorimetrillä, joka on suunniteltu sementin ja betonin tutkimiseen. Kalorimetrianalyysillä pystytään arvioimaan samankaltaisten massojen suhteellinen sitoutumisaika käytettäessä eri seos- tai lisäaineita ja vertaamalla näytteiden hydrataatioprofiileja keskenään.

Isotermisen kalorimetri mittaa sementin sitoutumisreaktioiden tuottamaa lämpöenergiaa jouleina ja laskee hydrataatiotehon watteina ajan funktiona piirtäen hydrataatioprofiilin tutkittavalle näytteelle. Näytteet asetetaan kalorimetrin sisään, jossa lämpötila on vakioitu. Kalorimetriin asetetaan tuoreesta massasta otettu näyte heti sekoittamisen päätyttyä. Kalorimetri mittaa näytteestä vapautuvaa lämpöä ja piirtää vapautuneeseen energiaan perustuvan hydrataatioprofiilin näytteelle. Profiileja vertaamalla nähdään, kuinka paljon nopeammin tai hitaammin toisen massan sitoutuminen tapahtuu.

Sitoutuvalla betonilla on tyypillinen hydrataatioprofiili, josta on tunnistettavissa sitoutumisen aikana tapahtuvia reaktioita (kuva 6). Pääasialliset hydratoituvat komponentit ovat trikalsiumsilikaatti eli aliitti (C_3S), trikalsiumaluminaatti (C_3A) ja dikalsiumsilikaatti eli beliitti (C_2S).



Kuva 6. Tyypillinen portlandsementin hydrataatioprofiili.

Trikalسيومsilikaatin hydrataatituotteet saavat aikaan nopean lujuudenkehityksen ja korkean loppulujuuden. Sen hydrataatiolämpö on korkea, 500 J/g. Trikalسيومaluminaatin hydrataatiolämpö on erittäin korkea (870 J/g) ja reaktio nopea. Reaktiota tulee hidastaa lisäämällä kipsiä sideaineeseen. Lisäys estää liian nopean sitoutumisen ja johtaa ettringiitin muodostumiseen. Dikalسيومsilikaatti reagoi hitaammin ja antaa betonille sen korkean loppulujuuden. Beliitin hydrataatiolämpö on vain 250 J/g. (Taulukko 3.)

Taulukko 3. Hydrataatioyhdisteiden hydrataatiolämmöt ja vaikutus lujuudenkehitykseen.

yhdiste	lyhenne	hydrataatio- lämpö [J / kg]	vaikutus betonin lujuudenkehitykseen
trikalسيومsilikaatti	C3S, aliitti	500	nopea lujuudenkehitys ja korkea loppulujuus
trikalسيومaluminaatti	C3A	870	nopea lujuudenkehitys ja korkea loppulujuus
sikalسيومsilikaatti	C2S, beliitti	250	hidas reaktio ja korkea loppulujuus

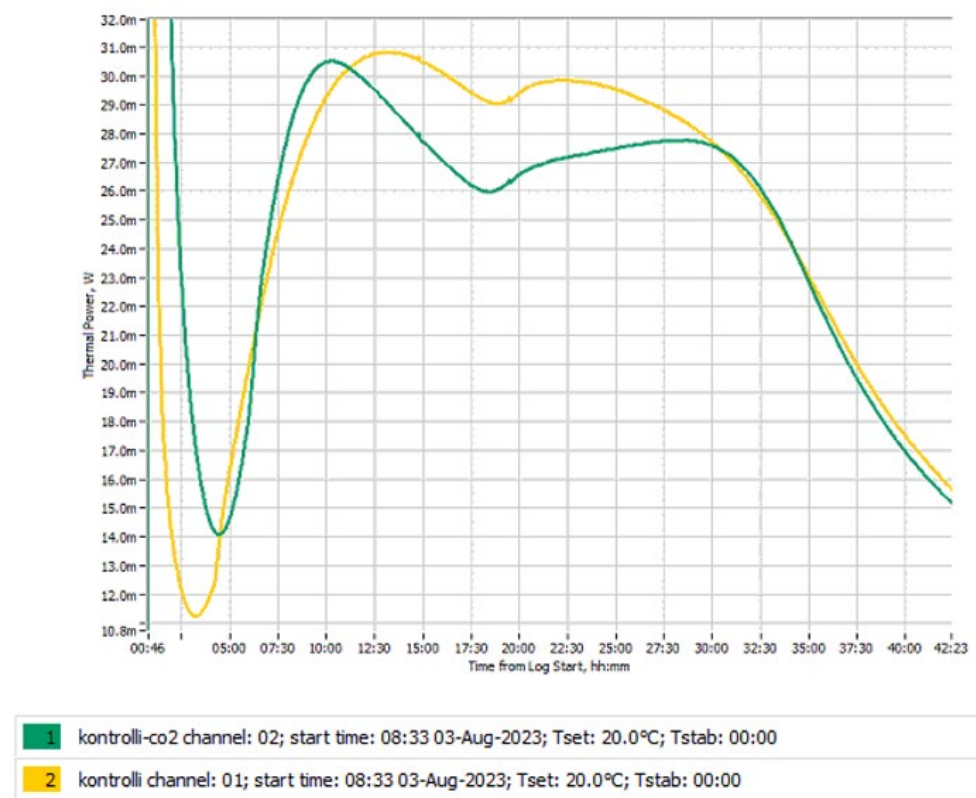
Hydrataatioprofiilin ensimmäisessä vaiheessa näytteen lämpöteho laskee, sillä näyte on asetettu kalorimetriin mitattavaksi vasta ensimmäisen reaktiopiikin aikana. Tämän vaiheen lämpöenergia vapautuu alun hydrolyysireaktiosta, jossa vesi reagoi C_3A :n ja C_3S :n kanssa. Huipusta näkyy profiilissa vain sen laskeva osuus.

Vaihe 2 on lepovaihe, joka seuraa alkuvaiheen sitoutumista. Vaiheen nimen mukaisesti hydrataatiota ei tapahdu, jolloin myöskään lämpöenergiaa ei vapaudu.

Kolmas vaihe on kiihtyvä vaihe, jossa C_3S hydratoituu ja profili saavuttaa hydrataatiohuippunsa. Huippu saavutetaan tyypillisesti noin 6–12 tunnin kohdalla reaktioiden alkamisesta. Tämän jälkeen hydrataatioteho alkaa hiljalleen laskea, kunnes tulee viimeinen piikki, jossa muodostuu ettringiittiä C_3A :n hydratoituessa. Trikalsiumaluminaattiinkin teho ja ajankohta riippuu sideaineen sisältämän C_3A :n ja sulfaattien määrästä. Piikki voi esiintyä 12:n ja 90:n tunnin välillä.

Hydrataation viimeisessä vaiheessa teho laskee, ja hydrataatiotuotteita muodostuu tasaisesti luoden perustan myöhemmälle lujuudenkehitykselle belitiin hydratoituessa.

Kalorimetrianalyysit osoittavat, että useimmissa tapauksissa kaasun lisääminen tuoreeseen massaan nopeuttaa reaktioita ja nostaa sementin hydrataatiotehoa. Lepovaihe on nopeampi ja tehokkaampi kuin kontrollimassoilla. Kiihtyvässä vaiheessa reaktiokäyrä nousee jyrkemmin, eli reaktiot tuottavat enemmän energiaa. C_3A :n reaktiopiikki on laajempi, joka voi selittää korkeamman loppulujuuden. Nämä havainnot nähdään selkeästi laastimassasta tehdyssä kalorimetrianalyysissä (kuva 7). Massassa on käytetty sideaineena tyyppin II portlandseossementtiä CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N. Keltainen kuvaaja on standardinmukaisesti valmistetun kontrollimassan hydrataatioprofili ja vihreä kuvaaja massan, johon on lisätty hiilidioksidia.



Kuva 7. Hydrataatioprofilit näyttöistä, joissa ei ole korvattu sementtiä vaihtoehtoisilla sideaineilla. Vihreän kuvaajan näyttöeseen on lisätty hiilidioksidia.

Kun hiilidioksidi syötetään betonin joukkoon massan vielä ollessa plastisessa tilassa, reagoi hiilidioksidin nopeasti läsnä olevan kalsiumhydroksidin kanssa. Hiilidioksidin lisäyksellä on kuitenkin selvä vaikutus myös myöhempiin reaktioihin ensimmäisen vuorokauden aikana. Tällöin kyseessä on hiilidioksidin synnyttämien reaktiotuotteiden ja sementin sisältämien mineraalien välinen reaktio.

Tuloksilla pystytään luotettavasti osoittamaan, että hiilidioksidi reagoi betonin muiden komponenttien kanssa. Sitoutuneen hiilen määrää ei kuitenkaan kalorimetrianalyysien perusteella voida osoittaa, joten laastimassakoeppaleille tehtiin myös termogravimetrisen analyysi (Thermogravimetric Analysis, TGA).

Kovettuneen laastin koostumusanalyysit

Termogravimetri mittaa näytteen massahäviötä. Näytettä lämmitetään yli 1000 °C lämpötilaan ja sen massaa mitataan tarkasti koko analyysin ajan. On tiedossa, missä lämpötilassa eri aineet hajoavat, jolloin niiden häviäminen näytteestä voidaan päätellä. Hiilidioksidin muodostama kalsiumkarbonaatti hajoaa 600–700 asteessa.

TGA:n perusteella todettiin hiilen sitoutumisen olevan vähäistä, alle prosentin luokkaa sekoittimeen lisätyn hiilidioksidin määrästä. Hiilidioksidin lisääminen laastisekoittimeen oli tutkimuksen aikana haasteellinen toistoa ja varmentaa, joten tarkkoja määriä sekoitetusta kaasusta on mahdoton osoittaa.

Röntgenfluoresenssia (X-Ray Fluorescence, XRF) käytetään perinteisesti alkuainepitoisuuksien mittaamiseen näytteestä. Menetelmässä atomeja viritetään röntgensäteilyllä. Kun atomit palaavat viritetystä tilasta, ne emittoivat fluoresenssisäteilyä. Tämän säteilyn avulla saadaan tietoa näytteen alkuaineista ja niiden pitoisuuksista.

Puolikvantitatiivinen röntgenfluoresenssianalyysi tehtiin laastikoeppaleesta valmistetulle näytteelle näytteen alkuainekoostumus määrittämiseksi. Menetelmällä voidaan määrittää fluoria raskaammat alkuaineet, joten hiilen pitoisuutta ei ole määritetty. XRF:llä ei voida varmentaa hiilen sitoutumista, mutta siitä saa tärkeitä lähtötietoja XRD:n tulosten analysointia varten.

XRF:n tuloksen perusteella koeppaleista valmistetuille näytteille tehtiin röntgendiffraktioanalyysi (X-Ray Diffraction, XRD). Analyysillä voidaan tunnistaa kiteiset yhdisteet, kuten kalsiumkarbonaatti. Kaikista analysoiduista näytteistä löytyi kalsiumkarbonaattia. Analysoiduissa näytteissä käytetty sementti sisältää itsessään kalsiumkarbonaattia, joten löydös on looginen.

Huomionarvoista on kuitenkin se, että osasta näytteitä löydettiin myös kalsiumhydroksidia. Hiilidioksidi reagoi kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia. Näytteet, joista kalsiumhydroksidia ei löydetty, oli valmistettu laastimassoista, joissa masuunikuonan osuus oli suurempi ja sementin osuus pienempi. Koska sementtiä on ollut näissä massoissa vähemmän, on oletettavaa, että sementin kalsiumhydroksidi on reagoinut kokonaan hiilidioksidin kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia. Toisaalta taas näytteissä, joissa on ollut enemmän sementtiä, on kalsiumhydroksidia jäänyt reagoimatta ja se näkyi XRD:ssä. Tämä antaa varmistuksen sille, että hiilidioksidia on sitoutunut massoihin.

Betonikokeet

Kun laastikokeista oli saatu riittävästi indikaatiota, siirryttiin tutkimuksessa seuraavaan vaiheeseen. Betonikokeilla oli tarkoitus testata hiilidioksidin toimintaa, kun valmistettavat massat ovat suurempia

ja muuttujia on enemmän. Kaikista tutkimuksen aikana valmistetuista betonimassoista tehtiin vertailubetoni ilman hiilidioksidia ja koebetoni hiilidioksidikäsittelyllä.

Hankkeen aikana valmistettiin useita betonimassoja erilaisilla variaatioilla. Muuttujina tutkimuksessa olivat seoksen osasuhteet, side- ja seosaineet sekä lisäaineet. Tutkimuksen betonit valmistettiin side- ja seosaineesta, runkoaineesta, vedestä ja lisäaineista. Sementtinä käytettiin tyyppien I ja II sementtejä, joista korvattiin osuuksia masuunikuonalla. Runkoaineena käytettiin seulottua soraa ja kalliomursketta. Lisäaineina tutkimuksessa käytettiin tehonotkistinta ja huokostinta. Hiilidioksidin vaikutusta hidastavana lisäaineena kokeiltiin pienimuotoisesti hidastinta.

Tutkimus toteutettiin valmistamalla betonimassoja, joista pääsääntöisesti valettiin kuusi koekappaletta kustakin puristuslujuuden testausta varten. Jokaisesta valmistetusta massasta testattiin tuoreen betonimassan ominaisuuksia. Testatut ominaisuudet olivat lämpötila (°C), ilmamäärä (%), pH, märkätiheys (kg/m³) ja betonin työstettävyyden joko painuma- tai leviämämittauksella.

Olenneisin tuoreen massan ominaisuus teollisuuden näkökulmasta on työstettävyyden. Työstettävyyttä arvioidaan painuma- ja leviämämittauksella. Mittauksissa periaate on samankaltainen: tuore betonimassa tiivistetään kartiomuottiin, jonka jälkeen muotti poistetaan ja betonin annetaan vapaasti asettua sen notkeusluokan mukaiseen muotoon (kuva 8). Testaukset tehtiin standardisarjan SFS-EN 12350, *Tuoreen betonin testaus*, mukaisesti. Betonin painumaluokat ovat S1...S5, S1:n ollessa jäykin ja S5:n notkein. Tutkimuksessa tavoiteltu notkeusluokka painuman osalta oli S3...S4, jonka toteutuakseen painuman tulee olla välillä 100...210 mm. Leviämäluokat ovat vastaavasti F1...F6, tutkimuksen tavoitteen ollessa F4.



Kuva 8. Painuman mittaus tuoreesta betonista.

Sideaineen optimointi

Tutkimuksen ensimmäiset kokeet tehtiin kakkostyyppin pikasementillä CEM II/A-LL 42,5 R, joka sisältää portlandklinkkerin lisäksi jauhattua kalkkikiveä. Sementistä korvattiin 30 % masuunikuonalla. Hiilidioksidia lisättiin koesarjoihin 1,5...3,0 %. Betonimassa sitoutui nopeasti, ja betonin työstettävyyttä heikkeni oleellisesti (taulukko 4). Koesarjoja tehtiin vertailusarjan lisäksi 5.

Taulukko 4. Hiilidioksidin vaikutus työstettävyyteen

CO ₂ [%]	0,0	1,5	2,7	2,8	3,0
Painuma [mm]	120	60	30	30	20
notkistin [%]	0,6	0,6	0,6	1,3	1,3

Painuma oli kontrollimassallakin lähellä tavoitteen alarajaa. Hiilidioksidikäsitellyn jälkeen painuma ei täyttänyt tavoitetta, vaikka betonimassan sekaan annosteltiin lisää tehonotkistinta.

Hiilidioksidikäsitellyt massat eivät painuneet painovoimaisesti juuri ollenkaan.

Puristuslujuus parani tällä reseptillä hiilidioksidia lisäämällä 4 %. Tulos on kuitenkin vain suuntaa-antava, sillä vertailusarjoja valmistettiin vain yksi. Koesarjojen tutkimista ei jatkettu, sillä betoni ei ollut työstettävyytensä puolesta käyttökelpoista.

Koska pikasementin reaktio oli liian nopea hiilidioksidin kanssa, vaihdettiin sementti normaalisti kovettuvaksi. Sementiksi valittiin tässä vaiheessa CEM I 42,5 N – SR3. Sementti ei sisällä portlandklinkkerin lisäksi muita side- tai seosaineita. Sementti on sulfaatinkestävä ja sen trikalsiumaluminaattipitoisuus on korkeintaan 3 %. Tällä valinnalla pystyttiin pitämään sideainekoostumus helpommin hallittavana, sillä masuunikuona lisättiin seokseen itse. Sementistä korvattiin joko 50 % tai 30 % kuonalla. Hiilidioksidia lisättiin 1,2 % ja 3,0 % sideaineen painosta.

Yhden vuorokauden koestusiässä puristuslujuus hiilidioksidikäsitellyllä betonilla oli keskimäärin 3,6 MPa ja vertailubetonilla 6,2 MPa. Hiilidioksidilla käsitellyn betonin varhaislujuus oli vain 58 % vertailubetonin lujuudesta. Tämän takia kyseisiä koesarjoja ei tutkittu enempää, sillä etenkin betonielementtiteollisuuden näkökulmasta alkulujuuden kehitys on olennaista.

Mielenkiintoista koemassoissa oli kuitenkin myöhäinen lujuudenkehitys. 28 vuorokauden arvosteluiässä hiilidioksidin vaikutus näyttäytyy positiivisena. Kun masuunikuonan määrää nostettiin 30 %:sta 50 %:iin, betoni ilman hiilidioksidikäsitelyä on hieman heikompaa. Kun taas betonimassoihin oli lisätty 3 % hiilidioksidia, masuunikuonan osuuden kasvattaminen aiheutti myös puristuslujuuden nousun. Nousu on 28 vuorokauden iässä vielä varsin maltillinen sen ollessa noin 1,5 prosenttia (taulukko 5). Masuunikuonan tiedetään kehittävän lujuutta hitaasti, joten tutkimisen arvoista olisi testata puristuslujuutta pitkään kypsyneistä betoneista samoilla koejärjestelyillä.

Taulukko 5. Hiilidioksidin vaikutus 28 d puristuslujuuteen masuunikuonapitoisissa betoneissa

CO ₂ kuona	30 %	50 %
0 %	57,7 MPa	57,7 MPa
1,2 %	56,7 MPa	-
3,0 %	52,0 MPa	52,8 MPa

Lisätutkimusta tarvitaan masuunikuonan käytön osalta. Masuunikuonan käytöllä betonin hiilijalanjälkeä saisi pienennettyä tehokkaasti. Markkinoille on tullut runsaasti masuunikuonaa sisältäviä seossementtejä, joten tarve aktivoinnin onnistumiselle on ilmeinen tulevaisuudessa. Tutkimuksessa ei tutkittu huokostimen vaikutusta korkean masuunikuonapitoisuuden betonimassaan. Mielenkiintoinen tutkimusaihe on myös, saako hiilidioksidikäsittelyllä masuunikuonalla seostetusta betonista pitkäaikaissäilyvämpää tavanomaiseen verrattuna.

Korkea masuunikuonapitoisuus karbonatisoituneessa betonissa aiheuttaa betoniin karkeamman huokosrakenteen (Liu 2022). Betonin karkeammat kapillaarihuokokset vaikuttavat betonin lujuusominaisuuksiin heikentävästi. Huokosrakenteella on vaikutusta myös betonin läpäisevyyteen, jolloin betonirakenteet raudoitukset ovat alttiimpia korroosiolle. Huokosrakenne muuttuu masuunikuonan takia karkeammaksi, kun betonin C-S-H-geeli alkaa hiilidioksidin reaktioiden vuoksi hajoamaan. (Song 2007.) Tämä heikentää betonin pitkäaikaissäilyvyyttä huomattavasti.

Lisäaineella ratkaisu työstettävyyteen

Tutkimuksen tarpeen ja tavoitteet huomioiden käytettävä sideaine vaihdettiin yleisesti teollisuudessa käytössä olevaan portlandseossementtiin CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N. Sideainevalinta pidettiin samana tutkimuksen loppuun asti. Koe- ja vertailumassoja valmistettiin 72 kpl käyttäen pelkästään kyseistä sideainetta. Sarjoissa vaihtelivat lisäaineiden ja hiilidioksidin määrä sekä muut seossuhteet, tärkeimpänä vesi-sideainesuhde. Hiilidioksidin enimmäismääränä oli 3,5 %.

Tutkintalinjan alkuvaiheessa koemassojen työstettävyyttä oli huomattavasti heikompaa kuin vertailubetonin. Haastetta pyrittiin ratkaisemaan tehonotkistimen määrää lisäämällä. Kaikkiin tutkimuksen betonimassoihin käytettiin tehonotkistinta, mutta lisäaineen määrä vaihteli.

Koska muuttujien määrä pyrittiin minimoimaan, ei käytössä ollut muita lisäaineita kuin tehonotkistin koemassojen nopean sitoutumisen vuoksi. Kun tuoreen massan ominaisuuksia ei saatu toivotunlaisiksi, päätettiin ottaa lisäksi käyttöön huokostin. Tehonotkistin lisää nimensä mukaisesti tehokkaasti betonimassan notkeutta ilman veden lisäämistä ja huokostin luo betoniin ilmahuokosia. Huokokset lisäävät tuoreen massan työstettävyyttä ja luovat edellytyksen kovettuneen betonin pakkasenkestävyydelle.

Koska huokostimen käyttö lisäsi huomattavasti tuoreen massan työstettävyyttä, päätettiin seoksen hiilidioksidipitoisuutta lisätä. Työstettävyyttä mitattiin leviämämittauksella, jossa suurempi tulos tarkoittaa notkeampaa betonimassaa. Tavoitteena tutkimuksen massoille pidettiin leviämäluokkaa F4, jonka leviämä sijoittuu välille 490...550 mm.

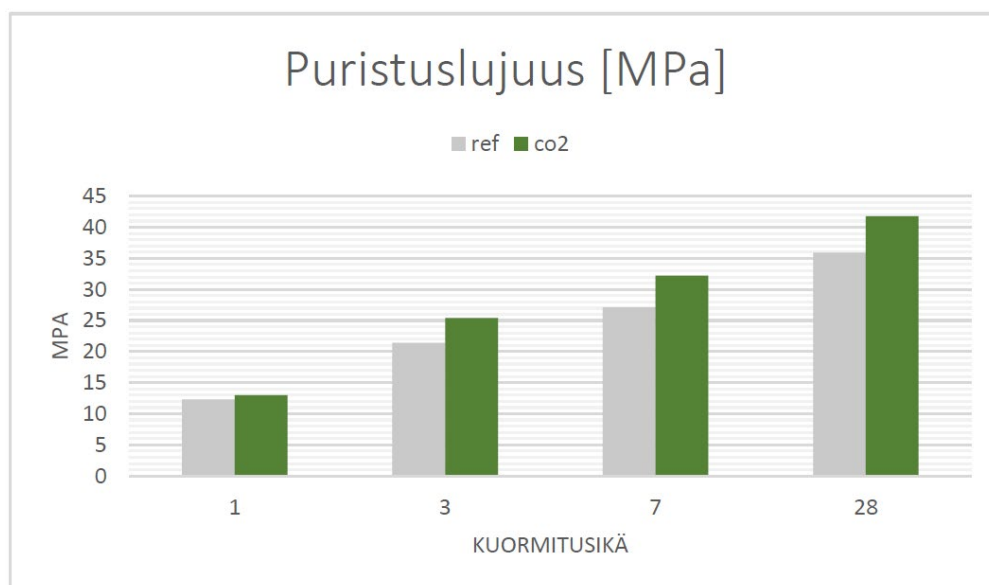
Taulukossa 6 on esitettyä yksittäisten koe- ja kontrollimassojen tuoreen massan ominaisuuksia. Siitä on nähtävissä, että hiilidioksidi vaikuttaa työstettävyyteen heikentävästi, mikäli betonimassaa ei ole notkistettu. Huokostuksen avulla työstettävyyttä pysyy samalla tasolla kuin ilman hiilidioksidikäsittelyä.

Taulukko 6. Hiilidioksidin vaikutus tuoreen betonin ominaisuuksiin huokostamattomassa ja huokostetussa massassa

betonin huokostus	CO ₂ [%]	tuoreen massan testit				
		leviämä [mm]	ilmamäärä [%]	lämpötila [C]	pH	märkätiheys [kg/m ³]
huokostamaton	0,0	500	0,7	20,5	11,95	2360
	7,1	360	1,2	22,5	11,86	2370
huokostettu	0,0	490	6,1	21,5	12,26	2220
	7,0	490	3,4	21,5	11,87	2280

Kaasun lisäys tapahtui massan sekoittamisen aikana. Sekoitusaikaa ei haluttu pidentää, joten kaasun lisäys tuli tapahtua ennalta määritetyssä ajassa. Tässä ajassa hiilidioksidia saatiin lisättyä noin 7 %. Tutkimuksen parhaat tulokset lujuudenkehityksen osalta saatiin tällä määrällä hiilidioksidia.

7 %:n hiilidioksidilisäys tehtiin seitsemään koesarjaan. Jokaiselle sarjalle tehtiin vertailusarja ilman hiilidioksidia. Koesarjoissa hiilidioksidikäsitelty betoni kehitti keskimäärin nopeammin ja enemmän lujuutta kuin vertailubetoni (kuva 9). 28 vuorokauden arvosteluiässä koebetoni oli kehittänyt keskimäärin 16 % enemmän lujuutta vertailubetoniin verrattaessa.



Kuva 9. Pylväsdiagrammi vertailubetonin ja koebetoniin puristuslujuuksista eri kuormitusikäissä.

Hiilidioksidi vaikuttaa betonin tiheyteen. Kovettuneen vertailubetonin tiheys tutkituissa sarjoissa oli keskimäärin 2220 kg/m³, kun taas koebetoneissa se oli 2280 kg/m³ (taulukko 7). Betonin tiheyden tiedetään olevan suoraan yhteydessä sen puristuslujuuteen, joten puristuslujuustulokset ovat loogisia. Hiilidioksidi muodostaa sementin sitoutumisvaiheesta lähtien kalsiumkarbonaattipartikkeleita, joiden voidaan arvioida vaikuttavan betonin tiheyteen. Suurempi vaikutus on kuitenkin ilmamäärän pienenemisellä: hiilidioksidi vähentää betonissa olevaa ilmaa jopa puolella.

Taulukko 7. Hiilidioksidin vaikutus puristuslujuuteen ja tiheyteen.

CO ₂ [%]	ilmamäärä (tuore) [%]	notkeus- luokka	puristuslujuus [MPa]		tiheys [kg/m ³]
			1 d	28 d	
0,0	6,1	F4	7,7	35,5	2220
7,0	3,4	F4	6,7	40,9	2270
CO ₂ [%]	ilmamäärä (tuore) [%]	notkeus- luokka	puristuslujuus [MPa]		tiheys [kg/m ³]
			1 d	28 d	
0,0	6	F3	12,9	38,6	2230
7,3	3,4	F3	11,9	43,9	2280
CO ₂ [%]	ilmamäärä (tuore) [%]	notkeus- luokka	puristuslujuus [MPa]		tiheys [kg/m ³]
			1 d	28 d	
0,0	5,9	F4	11,9	35	2220
7,3	3,4	F3	12,8	42,8	2280
CO ₂ [%]	ilmamäärä (tuore) [%]	notkeus- luokka	puristuslujuus [MPa]		tiheys [kg/m ³]
			1 d	28 d	
0,0	5,8	F5	11,8	35,5	2220
7,1	3,2	F2	15,1	44,1	2300
CO ₂ [%]	ilmamäärä (tuore) [%]	notkeus- luokka	puristuslujuus [MPa]		tiheys [kg/m ³]
			1 d	28 d	
0,0	7	F4	13,7	32,7	2190
7,0	3,6	F3	14,2	39,4	2270

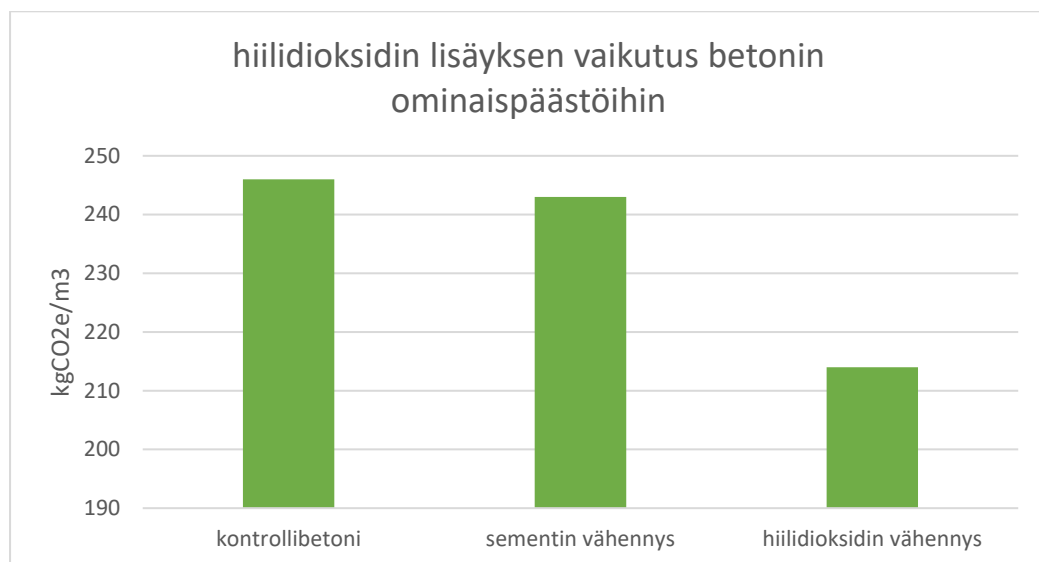
Ilmamäärän pieneneminen ei kuitenkaan yksin selitä lujuudenkasvua. Havaittu tiheyden muutos selittää 7 ja 28 vuorokauden puristuslujuuksien kasvusta noin puolet. Tämän tiedon perusteella voidaan todeta hiilidioksidin hydrataatioreaktioihin aiheuttamien muutosten kasvattavan betonin lujuutta.

Lujuuden suurempaa kehittymistä voidaan hyödyntää vähentämällä käytetyn sementin määrää. Näin ollen betonin hiilijalanjälkeä saadaan pienennettyä. Laskennallisesti sementtiä voisi vähentää 4 %, mutta tätä ei tutkimuksen aikana todennettu käytännön kokeilla.

Jos sementin vähentäminen hyödynnettäisiin hiilijalanjäljen pienentämisessä ja huomioitaisiin myös sitoutuneen hiilidioksidin vaikutus, pienenis betonin ominaispäästöt selkeästi. Betoniyhdistys on

julkaissut vähähiilisyyslaskurin, josta tuloksena saa valmistettavan betonin GWP-luokan. GWP (global warming potential) kertoo tarkasteltavan materiaalin potentiaalin lämmittää ilmakehää. Eri betonilaaduille on asetettu referenssiluokan raja-arvot hiilidioksidiekvivalentteina kuutiometriä valmistettua betonia kohden. Mikäli betonin ominaispäästöt alittavat raja-arvon, se kuuluu pienempään GWP-luokkaan. Betoniyhdistyksen tekemällä vähähiilisyyslaskurilla voidaan laskea BY-Vähähiilisyysluokitus®. Referenssitaso on tuotemerkistä riippumaton keskiarvo, joka on laskettu 18:lle eri valmisbetonilaadulle. (By s.a.)

Taulukossa 7 esitetyjä betoneita verrattaessa vähähiilisyyslaskurilla, saadaan kontrollibetonin GWP-luokaksi GWP.REF ja ominaispäästöiksi $246 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^3$. Hiilidioksidikäsitellyn betonin luokka on teoreettisen sementin vähentämisen jälkeen GWP.85 ja ominaispäästöt $243 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^3$. Vähähiilisyyslaskuriin ei pysty lisäämään hiilidioksidia laskentaan, sillä se ei ole yleisesti käytössä oleva betonin lisäaine. Kun laskurin antamasta tuloksesta poistetaan manuaalisesti sidottu hiilidioksidi, saadaan ominaispäästöiksi $214 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^3$ luokan ollessa edelleen GWP.85. (Kuva 10.)



Kuva 10. Hiilidioksidin lisäyksen vaikutus betonin ominaispäästöihin

Huokostetussa C30/37-luokan betonissa GWP.70 raja-arvo on $205 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^3$ (taulukko 8), joten pienellä muutoksella hiilidioksidikäsitelyllä olisi mahdollisuus päästä alempaan luokkaan. Luku GWP-luokan perässä tarkoittaa, että betonin hiilidioksidipäästöt ovat korkeintaan luvun osoittaman prosenttiosuuden verran verrattuna referenssitasoon.

Taulukko 8. Huokostetun C30/37-luokan betonin GWP-luokkien raja-arvot

CO ₂ -luokka	raja [$\text{kgCO}_2\text{e/m}^3$]
GWP.REF	<290
GWP.85	<245
GWP.70	<205
GWP.55	<160
GWP.40	<115

Hiilidioksidin sitoutumisen voi todentaa mikroskoopilla

Hiilensitoutumisen ja mineralisoitumisen todentaminen on tärkeää, jotta voidaan luotettavasti osoittaa betonin ominaisuuksien muutoksen johtuvan juuri hiilidioksidikäsittelystä. BEHI-hankkeessa hiilensitoutumista todennettiin erilaisin analyysimenetelmin, ja niiden tulokset todistavat hiilidioksidin reagoineen sementin kalsiumhydroksidin kanssa.

Kovettuneesta betonista tutkittiin hiilensitoutumista mikroskooppitutkimuksilla. Hiilidioksidin sitoutumisen vaikutus pystyttiin todentamaan optisella valomikroskoopilla satakertaisella suurennoksella. Tämän menetelmän tulos on vain viitteellinen, sillä kalsiumkarbonaattia ei voi nähdä valomikroskoopilla. Mikroskoopilla analysoitiin betonin huokosrakennetta ja huomattiin, että betonin suojahuokosten ominaispinta-ala ja jakauma muuttuvat radikaalisti, mikäli tuoreeseen betonimassaan on lisätty hiilidioksidia. Myös kovettuneen betonin laskennallinen ilmamäärä muuttuu hiilidioksidin vaikutuksesta.

Mikroskopiämääritysten tuloksena saatiin betonin huokosparametrit, suojahuokosten huokosjako, ominaispinta-ala ja ilmamäärä. Huokosjaolla määritetään betonin suojahuokosten etäisyys toisistaan. Suojahuokokset ovat betonin pakkasenkeston kannalta oleellisia. Betonissa on aina kosteutta, joka jäätyessään aiheuttaa painetta. Paine on niin suuri, että se aiheuttaa betonissa sisäisiä vaurioita, mikäli huokosjako on liian suuri. Suojahuokosia on oltava riittävän lähellä toisiaan, jotta jäätyvän veden laajentumisen aiheuttama paine voi tasaantua niissä vaurioittamatta betonia. Toinen teoria suojahuokosten toiminnasta on se, että veden jäätyessä jääkiteet pääsevät muodostumaan huokosiin, jolloin painetta ei muodostu.

Suojahuokosten ominaispinta-ala kertoo huokosen koosta. Mitä suurempi ominaispinta-ala on, sitä pienempi on huokosen tilavuus. Vain huokokset, joiden halkaisija on 0,25...0,8 mm määritellään suojahuokosiksi. Tästä syystä on tärkeää määrittää huokosen koko.

Huokosparametrien määrittämisessä betonista määritetään kokonaisilmamäärä prosentteina. Kokonaisilmamäärä muodostuu suojahuokosten ja tiivistyksen aikana jääneiden, suurempien tiivistyshuokosten yhteenlaskettuna ilmamääränä.

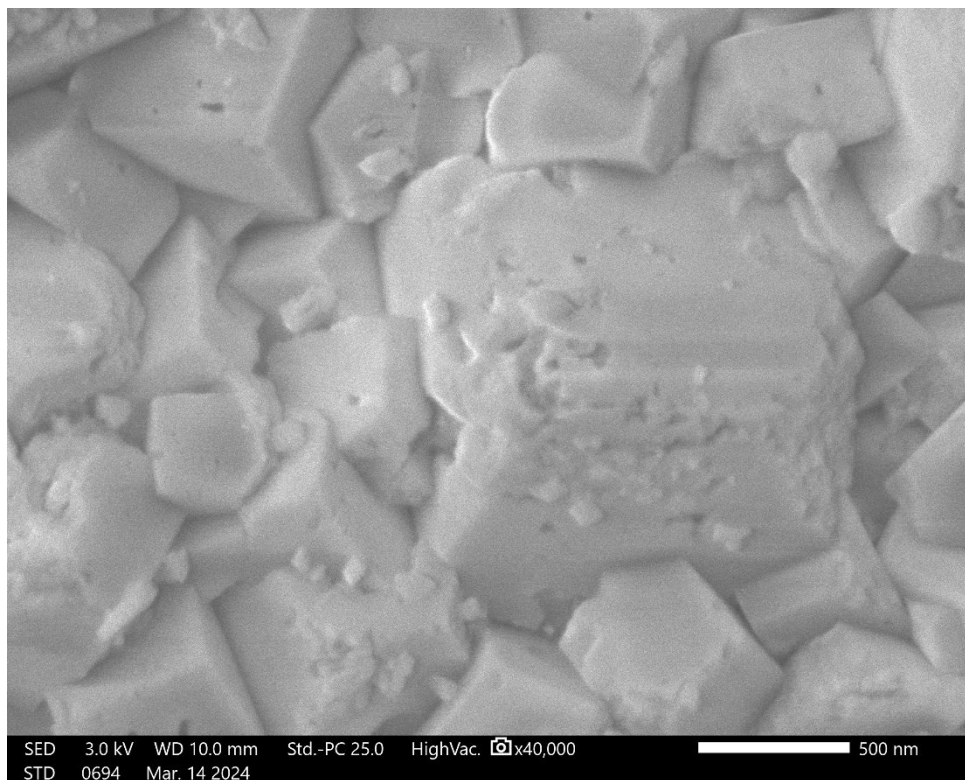
Hiilidioksidi vaikuttaa tutkimuksen perusteella kaikkiin määritettyihin huokosparametreihin (taulukko 8). Kokonaisilmamäärä pienenee hiilidioksidikäsittelyn yhteydessä, mikä heijastuu myös lujuuteen. Kokonaisilmamäärän pieneneminen aiheutuu suojahuokosten määrän vähenemisestä. Toisaalta taas suojahuokosten tilavuus kasvaa. Tämän voi olettaa johtuvan siitä, että pienemmät suojahuokokset yhdistyvät muodostaen tilavuudeltaan suurempia ja ominaispinta-alaltaan pienempiä huokosia. Toinen oletamus voi olla, että kalsiumkarbonaattikiteitä muodostuu suojahuokosiin, jolloin pienimmät huokokset täyttyvät. Näin ollen vain tilavuudeltaan suuremmat huokokset analysoidaan, ja ominaispinta-ala pienenee.

Ajatusta tukee myös se, että huokosten välinen etäisyys lähes kaksinkertaistuu. Mikäli pienimmät huokokset täyttyvät kalsiumkarbonaattilla, analyysissä huomioidaan vähemmän huokosia. Tämä voi olla ongelmallista, mikäli huokosjako kasvaa liian suureksi. Silloin suojahuokokset eivät enää toimi jäätyminen aiheuttaman vaurion suojaamiselta. Tutkitun näytteen huokosjako on kuitenkin vielä hyväksyttävä niiden rasitusluokkien betoneissa, joissa huokosjakoa voidaan käyttää jäädytys-sulatusrasituksen kestävyuden määrittämiseen.

Taulukko 8. By72 ohjeen mukaisesti määritetyt huokosparametrit kontrolli- ja koebetonista

betoni	huokosjako [mm]	suojahuokosten määrä [%]	tiivistyshuokoste määrä [%]	suojahuokosten ominaispinta-ala [mm ⁻¹]
kontrollibetoni	0,14	5,4	0,3	37
CO ₂ 7 %	0,22	3,7	0,3	27

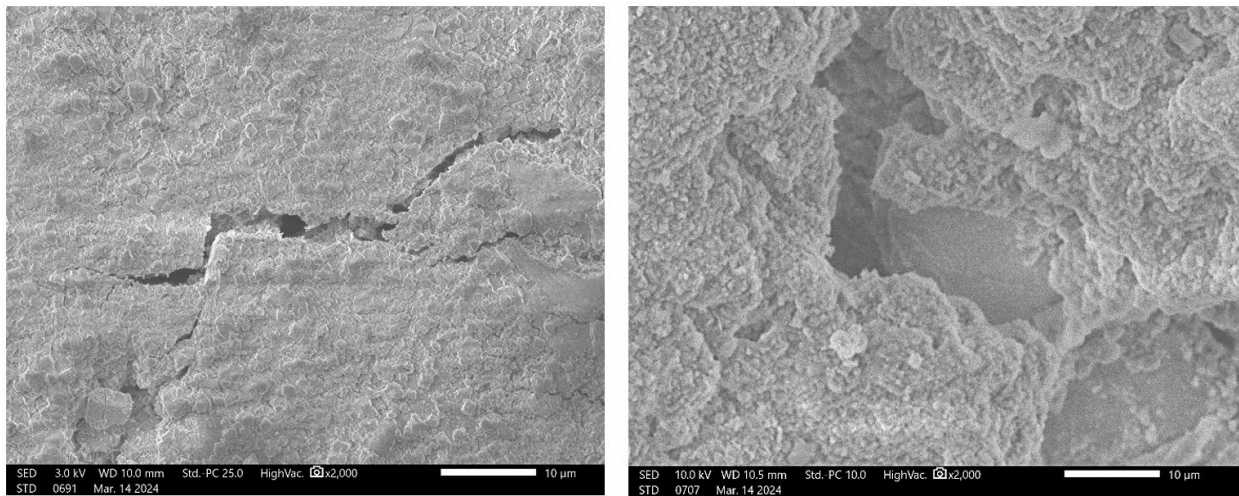
Parempi käsitys hiilidioksidin todellisesta mineralisoitumisesta saatiin Jeolin JSM-IT700HR kenttäemissio-pyyhkäiselektronimikroskoopilla (Field Emission-Scanning Electron Microscope, FE-SEM). Tutkituista laasti- ja betoninäytteistä löytyi selkeitä kiteitä niistä näytteistä, joihin oli lisätty hiilidioksidia tuoreen massan sekoittamisen aikana. (kuva 11). Havaituista kiteistä määritettiin niiden alkuainekoostumus röntgenanalysaattorin (Energy Dispersive Spectrometry, EDS) avulla.



Kuva 11. FE-SEM -kuva kalsiumkarbonaattikiteistä.

FE-SEM poikkeaa valomikroskoopista toimintaperiaatteeltaan. Siinä näkyvän valon sijaan käytetään elektronisuihkua. Valon aallonpituus ei riitä isoihin suurennoksiin, jolloin tulee korvata valo elektroneilla (Kauppi 2011). Hankkeen tutkimukseen käytetyllä mikroskoopilla päästään jopa 600 000 kertaisiin suurennoksiin. Kalsiumkarbonaatin erotti hiotusta betonin poikkileikkauspinnasta jo noin

tuhatkertaisesta suurennoksesta verrattaessa betoninäytteeseen, jota ei ole käsitelty hiilidioksidilla (kuva 12).



Kuva 12. Betonin erilainen pintarakenne poikkileikkauspinnalla kuvattuna pyyhkäiselektronimikroskoopilla. Vasemmalla on kuva hiilidioksidilla käsitellystä betonista ja oikealla tavanomaisesta betonista.

SEM-kuvauksessa elektroneja pommitettaessa irtoaa röntgensäteilyä, jota EDS käyttää hyödykseen. Spektrometrin detektori muuntaa säteilyn fotonin energian jännitepulsiksi. Pulsit menevät analysaattorille, joka käsittelee signaaleja prosessorilla. Prosessori muodostaa signaaleista erilaisia visuaalisia profileja, joista voidaan määrittää alkuainejakauma. (Kauppi 2011). EDS antoi useiden tutkittujen kiteiden alkuaineiksi kalsiumin Ca, hiilen C ja hapen O osasuhteilla 1:1:3. Tästä tuloksesta on pääteltävissä, että kiteet olivat kalsiumkarbonaattia CaCO_3 .

Toteutus teollisessa ympäristössä

Reseptin suunnittelun lisäksi toinen merkittävä ja suuren painoarvon saanut teema hankkeessa oli pilotointi. Teema koostui teolliseen mittakaavaan sopivan laitteen suunnittelusta, pilotointikohteen kartoittamisesta ja hiilidioksidikaasun hankinnan selvittämisestä.

Betoni hiilinieluna -hankkeen tavoitteena oli tarkastella kehitettävää hiilidioksidikäsitelyprosessia betoniteollisuuden näkökulmasta. Koska ilmastonlämpeneminen on paljon puhuttava aihe, myös rakennusteollisuus haluaa ottaa vastuuta omasta toiminnastaan. Hiilidioksidin hyötykäyttöä betonin valmistamisessa on tutkittu eri puolilla maailmaa, ja joitain kaupallisia sovellutuksia on aiheen ympärille rakennettu.

Hankkeessa suunniteltiin teolliseen mittakaavaan sopivaa laitteistoa, joka olisi helppo integroida betonitehtaan tai -aseman olemassa olevaan kalustoon. Hiilidioksidi syötetään tuoreeseen betonimassaan jo sekoittamisen aikana kaasuna. Olomuotona kaasu on edullisin tapa hyötykäyttää hiilidioksidia, koska sitä ei tarvitse jäähdyttää tai paineistaa olomuodon muuttamiseksi. Näin ollen investoinnit jäivät käyttäjälle mahdollisimman pieniksi.

Teollisen mittakaavan laitteiston suunnittelussa sidosryhmäyhteistyökumppaneina toimivat Joutsenon Elementti Oy ja Mecmetal Oy. Yritysten arvomaailmassa painotetaan vihreää rakentamista ja vastuullisuutta.

Joutsenon Elementti valmistaa betonielementtejä talonrakennukseen. Elementtituotanto on aloitettu jo 1950-luvulla Joutsenossa, ja myöhemmin toimintaa on laajennettu myös Kaakkois-Suomeen. Joutsenon Elementti on aktiivisesti mukana projekteissa, joissa vähennetään hiilidioksidipäästöjä ja hyödynnetään teollisuuden sivuvirtoja.

Mecmetal on suomalainen tuotantolinjateknologian kehittäjä ja valmistaja. Yritys toimii edelläkävijänä ja suunnannäyttäjänä monilla eri tavoilla, jotka auttavat saavuttamaan jatkuvasti kehittyvät ympäristövaatimukset. Koska BEHI-hankkeessa ei ollut tarkoituksenmukaista rakentaa kokonaan uutta tuotantolinjastoa, hankkeessa hyödynnettiin Mecmetalın osaamista sähkö-, automaatio- ja ohjelmistosuunnittelun osalta teknologian ohjausjärjestelmän suunnitteluun.

Mahdollisuuksien kartoitus

Hankkeen puitteissa tutustuttiin Joutsenon elementtitehtaan tuotantotiloihin, ja tarkasteltiin mahdollisuutta integroida kaasunsyöttölaitteisto olemassa oleviin tuotantolaitteisiin. Tutkimuslaboratoriossa laitteisto oli toteutettu yksinkertaisesti, ja systeemi olisi mahdollista toteuttaa vastaavasti myös teollisessa mittakaavassa. Hiilidioksidikäsittelyn kaupallinen hyödyntäminen on kuitenkin tarkkaan selvitettävä asia, sillä vastaavalle teknologialle on tiedettävästi myönnetty patenteja globaalisti (Patenttihakuei, sa.).

Jotta kehitettävällä menetelmällä ja teknologialla ei loukata muiden oikeuksia, tuli ennen yksityiskohtaisempaa suunnittelua kartoittaa patentti- ja muut immateriaalioikeudet toimintakentällä. Tätä varten hankkeessa teetettiin tutkimuksen ja tuotekehityksen Innovation on Demand – ohjauspalvelu patenttitietokannasta (kuva 13).



Kuva 13. Prosessikaavio Innovation on Demand -palvelusta (Leitzinger 2024)

Palvelun aikana selvisi, että varhaisimmat patenttihakemukset ovat jo vuosikymmenien takaa. Patentit ovat voimassa rajoitetun ajan, yleensä 20 vuotta hakemuksen jättöpäivästä. Tämä takaa vapauden lisätä hiilidioksidia tuoreeseen betonimassaan. Kartoituksen perusteella näyttää siltä, että lisäaineistuksen ja validointimenetelmien osalta kentällä on tilaa operoida.

Eniten patenttihakemukseen johtaneita tutkimuksia on tehty Aasiassa ja Yhdysvalloissa. Muissa maissa hakemuksia on jätetty kaikista hakemuksista vain kuudennes. Hakemuksen jättäneiden keskuudessa on niin kaupallisia toimijoita, kuin yliopistojakin.

Vaikka aihepiirin ympärille on myönnetty patenteja, täysin vastaavaa teknologiaa ei kartoituksessa löydetty. Kartoituksen perusteella ei ole syytä epäillä, että toteutustapa loukkaisi kenenkään oikeuksia. TeknologiaTRENDI on kuitenkin kasvava, joten aihe on selvästi kiinnostava alalla (kuva 14).

SUMMARY AND CONCLUSIONS				
Technology	Number of identified solutions of interest	Technology trend	Actors	Conclusions / Remarks
CO2 to uncured concrete	49		45	- recently increasing trend. Earliest publications are filed over 20 ago. - Most actors are in Asia and USA. - Patents are distributed between a many actors.

Kuva 14 Yhteenveto Innovation on Demand -ohjauspalvelun tuloksista (Leitzinger 2024).

Hiilidioksidin lisäys betonitehtaalla

BEHI-hankkeessa teknologia suunniteltiin toteutettavaksi mahdollisimman yksinkertaisesti. Betonitehtaalle tulisi hiilidioksidisäiliö muiden lisäainesäiliöiden rinnalle, ja siitä syötetään kaasua sekoittimelle. Syöttökanavassa on mittausanturit, joilla kaasun määrää monitoroidaan. Syöttö tapahtuu automaattisesti, ja lisätyn kaasun määrä hallitaan sopivien venttiilien avulla. Hiilidioksidin lisäys voisi tapahtua aikaperusteisesti, jolloin on tärkeää tunnistaa paineen vaikutus virtausnopeuteen.

Bernoullin lain mukaan paineen laskiessa virtausnopeus kasvaa ja päinvastoin. Kaasujen yleisen tilanyhtälön mukaan paineen ja tilavuuden tulo jaettuna lämpötilalla on vakio. Tästä johdettuna tiedetään, että jos lämpötila nousee, myös paine kasvaa tilavuuden pysyessä putkistossa samana. Paineen kasvaminen aiheuttaa virtausnopeuden pienenemistä. Joku muuttujista tulisi saada pysyväksi, jotta menetelmä olisi luotettava.

Laboratoriokokeissa hiilidioksidin lisäys tapahtui massaperusteisesti. Tämä on helpoin tapa hallita lisätyn kaasun määrää, kun tavoitteena on lisätä kaasua painoprosentteina. Menetelmä olisi siirrettävissä teolliseen mittakaavaan automatisaation avulla.

Teknologian suunnittelun yhteydessä tunnistettiin tarve huomioida työturvallisuus. Hiilidioksidi on väritön ja hajuton kaasu, joten sitä ei pysty havaitsemaan aistinvaraisesti. Puhtaana kaasuna se syrjäyttää hapen, ja aiheuttaa sitä hengittävälle oireita. (NIOSH s.a). Teknologiaa toteutettaessa on tärkeää varmistaa käyttäjän terveys ja turvallisuus, joten laitteiston suunnittelussa on otettava myös tämä näkökulma huomioon. Koko kaasunsyöttöprosessin tulee olla tiivis sekoittimeen saakka.

BEHI-hankkeen puitteissa ei aikataulullisista syistä saatu teknologiaa pilotoitua. Koska tutkimusaihe on erittäin laaja betonin materiaaliominaisuuksien vuoksi, kului reseptin optimointiin oletettua kauemmin aikaa. Teknologian suunnittelu on kuitenkin vahvalla pohjalla sidosryhmäyritysten kanssa.

Aikatauluhaasteiden lisäksi tunnistettiin toinen merkittävä haaste: hiilidioksidia ei tällä hetkellä ole saatavilla Suomesta teolliseen hyötykäyttötarkoitukseen. Suomessa talteenotettu hiilidioksidi käytetään pääasiassa sähköpolttoaineiden valmistamiseen. Jos hiilidioksidia ei voida hyödyntää paikallisesti, se kuljetetaan varastoitavaksi muualla, esimerkiksi Norjaan tai Tanskaan. Hiilidioksidi varastoidaan geologisesti mereen tai maanalaiseen kallioperään. Kun hiilidioksidille kehitetään uusia käyttökohteita, tulee sen saatavuuskin todennäköisesti parantumaan.

Yhteenveto

Betoni hiilinieluna – ratkaisuja vähähiiliseen rakentamiseen oli merkittävä hanke. Hankkeen aikana tuotettiin paljon uutta tietoa, kasvatettiin tietoisuutta ja luotiin uusia, tärkeitä sidosryhmiä. Hankkeen toteutusaika oli kuitenkin verrattain lyhyt, sillä tutkimusaihe on laaja ja monisyinen.

Betonin hiilidioksidikäsittely on kiinnostava aihe, jolla on paljon potentiaalia edistää hiilineutraaliutta rakennetussa yhteiskunnassa. Valmiit betonirakennukset toimivat hiilinieluna koko elinkaarensa, mutta vaikutusta voidaan tehostaa uudistuotannossa käsittelemällä betoni hiilidioksidilla jo tehtaalla. Tutkimustulokset osoittavat, että teknologian käyttöönotolla olisi todellista merkitystä.

Yhden betonikuution kasvihuonekaasupäästöt on noin 200-300 kg CO₂e. Jos betoniin saadaan sidottua hiilidioksidia 7 painoprosenttia käytetystä sideaineesta, se voi tarkoittaa parhaimmillaan jopa lähes 30 kg:n päästövähennystä. Kun otetaan huomioon hiilidioksidin lujittava vaikutus, on käytetyn sementin määrää mahdollista pienentää. Tästä seuraa merkittävä päästövähennys betonille, sillä sementti vastaa noin 60-80 %:n osuudesta betoninvalmistamisen päästöistä.

BEHI-hankkeessa tutkittiin hiilidioksidin vaikutusta betonin ominaisuuksiin. Hiilidioksidi vaikuttaa sekä tuoreeseen, että kovettuneeseen betoniin. Vaikutus ei aina ole positiivinen, mutta hankkeen aikana tunnistettujen ratkaisujen ansiosta hiilidioksidin negatiiviset vaikutukset saatiin mitätöityä. Tuloksena saatiin betonia, jonka tuoreen massan ominaisuudet eivät ole heikentyneet ja tavanomaisessa arvosteluiässä puristuslujuus on jopa 16 % tavanomaista betonia korkeampi.

Hankkeen aikana kartoitettiin vaatimuksia ja rajoituksia hiilidioksidikäsittelyn toteuttamiselle teollisessa ympäristössä. Varsinaista pilotointia ei suoritettu, mutta valmiudet sille on olemassa. Investointi ei arvion mukaan ole betoninvalmistajalle kohtuuton, etenköön sen hyötyyn nähden. Mikäli teknologia olisi teollisuuden käytössä, hyötyisi betoninvalmistaja siitä pitkällä tähtäimellä myös taloudellisesti. Kun sementin määrää voidaan vähentää, on säästö huomattava. Lisäksi valmistetun betonin hiilijalanjälki on pienempi, mikä luo osaltaan markkinaetua. Yhä useampi betonin käyttäjä on ympäristötietoinen, ja haluaa ostamansa materiaalin olevan mahdollisimman vähän ympäristöä kuormittavaa.

Jotta teknologia saataisiin teolliseen käyttöön, on lisätutkimuksen tarve suuri. Erityisesti hiilensidonnan validointia tulee tutkia. Hankkeessa saatiin erittäin lupaavia tuloksia hiilen mineralisoinnista, mutta tutkimusta tulee jatkaa. Myös masuunikuonan käyttöaste ja aktivoituminen on selvitetävä perusteellisesti, sillä vaihtoehtoisilla sideaineilla on mahdollista tehokkaasti pienentää betonin hiilijalanjälkeä. *Betoni hiilinieluna* -hanke loi loistavan pohjan jatkotutkimuksille.

lähteet:

Betoni s.a. Hiilidioksidipäästöjä vähennetään. Betoniteollisuus ry. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://betoni.com/tietoa-betonista/betoni-rakennusmateriaalina/sementti-seosaineiden-kaytto/> [viitattu 7.10.2024].

By s.a. Sementti. Betoniteollisuus ry. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-valmistus/betonin-osa-aineet/sementti.html> [viitattu 7.10.2024].

By s.a. By-vähähiilisyysluokitus. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://vahahiilinenbetoni.fi/> [viitattu 2.12.2024]

Fu, X. et al. 2024. Storing CO₂ while strengthening concrete by carbonating its cement in suspension. *Communications material* 109. Verkkolehti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1038/s43246-024-00546-9> [viitattu 31.10.2024].

Liu, Z. 2022. Carbonation rate, mineralogy and microstructure of blast furnace slag concrete at different CO₂ concentrations and mechanical loading. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/1854/LU-01GMAZB7XJM8BM9YF4KNQQQXW2> [viitattu 7.10.2024].

Meesereganda, L. & Kazmi, M. 2024. Performance Enhancement of Concrete Produced with two-step CO₂ Mineralization. *Iranian Journal of Science and Technology*. Verkkolehti. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/381022806_Performance_Enhancement_of_Concrete_Produced_with_two-step_CO2_Mineralization [viitattu 20.9.2024].

Monkman, S., MacDonald, M., Hooton, R & Sandberg, P. 2016. Properties and durability of concrete produced using CO₂ as an accelerating admixture. *ScienceDirect* 74, s 218-224. WWW-julkaisu. Saatavissa: [Properties and durability of concrete produced using CO2 as an accelerating admixture - ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950268816300011) [viitattu 20.9.2024].

NIOSH s.a. Pocket Guide to Chemical Hazards. The National Institute for Occupational Safety and Health. Sähköinen tietoaineisto. Päivitetty 30.10.2019. Saatavissa: <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0103.html> [viitattu 31.10.2024].

Patenttihakuei s.a. Patentti- ja rekisterihallitus. Versio 6.3.12.00.5 (2016-06-22). Sähköinen tietoaineisto. Saatavissa: <https://fi.espacenet.com/> [viitattu 31.10.2024].

Rakentamisen päästötietokanta s.a. Suomen Ympäristökeskus. Versio 1.01.003 (2024-09-17). Sähköinen tietoaineisto. Saatavissa: <https://co2data.fi/rakentaminen/> [viitattu 7.10.2024].

SFS-EN 196-1:2016:en. Methods of testing cement. Part 1: Determination of strength.

SFS-EN 12350-2:2019. 2021. Tuoreen betonin testaus. Osa 2: painuma.

SFS-EN 12350-5:2019:en. Testing fresh concrete. Part 5: Flow table test.

Song, H. Kwon, S. 2007. Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure. *ScienceDirect* 37, s 909-915. WWW-julkaisu. Saatavissa: [Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure - ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950268807000011) [viitattu 17.9.2024].