

Betonin sideaineet tulevaisuudessa

Jouni Punkki

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

Portlandsementillä on pitkä historia, mutta parhaillaan olemme selkeässä taitepisteessä. Jatkossa portlandsementin ohelle tulee yhä enemmän vaihtoehtoja. Toisaalta portlandsementti tuskin tulee häviämään käytöstä tulevaisuudessakaan. Tässä artikkelissa arvioidaan millaisia muutoksia betonin sideaineissa tulee tapahtumaan ja myös millaisella aikataululla muutokset todennäköisesti tapahtuvat.

Historiaa

Nykyaikaisen sementin kehittäminen alkoi 1700-luvun loppupuolella. Vuonna 1824 englantilainen Joseph Aspdin sai patentin sementille, jota hän kutsui portlandsementiksi. Sementin väri ja kovuus muistutti Englannissa Portlandin kreivikunnassa yleisesti käytettävää rakennuskiveä ja siten sementti nimettiin portlandsementiksi. Myöhemmin vuonna 1844 englantilainen Isaac Johnson valmisti sementtiä, joka vastasi ominaisuuksiltaan nykyisen kaltaista portlandsementtiä. Olen-naista Johnsonin sementissä oli klinkkerin poltto sintrautumiseen saakka. Aikaisemmin haluttiin välttää kovien klinkkereiden muodostumista, koska klinkkerin jauhaminen oli vaikeaa ja kallista. Johnsonin kehittämän sementin ominaisuudet olivat aikaisempia sementtejä selvästi paremmat ja sementin valmistus kasvoi nopeasti. Sementtejä valmistettiin kuilu-uuneissa. Kalsinointiin vaadittavan korkean lämpötilan saavuttaminen kuilu-uuneissa ei ollut kustannustehokasta ja lisäksi osa raaka-aineesta jäi vajaapolttoiseksi. Lopulta aivan 1800-luvun lopulla kehitetty kiertouuni ratkaisi monet klinkkerin polttoon liittyvät ongelmat ja betonista tuli nopeasti rakentamisen valtamateriaali.

Vaikka portlandsementin valmistus on periaatteessa säilynyt hyvin samankaltaisena jo yli 100 vuotta, on sementin valmistuksessa ja sitä kautta myös sen ominaisuuksissa on

tapahtunut merkittäviä muutoksia. Esimerkiksi betonin puristuslujuus oli 1800-luvun puolessa välissä vain noin 5 MPa ja 1900-luvun alussakin vain noin 20 MPa¹. Merkittävimmät syyt sementtien muutoksiin ovat polttotekniikan sekä sementin jauhatuksen kehittyminen.

Myös kuonasementtejä kehitettiin jo 1800-luvun loppupuolella, esimerkiksi saksalainen Passow kehitti vuonna 1892 kuonasementin, joka sisälsi 35% portlandsementtiä ja 65% masuunikuonaa. Erityisesti Saksassa ja Alankomaissa kuonabetoneita onkin käytetty jo pitkään. Alankomaissa kuonabetoneita on käytetty infrarakenteissa jo 1920-luvulta lähtien. Kuonan määrä on korkeimmillaan ollut 85% sideaineen määrästä, tyyppillinen osuus on ollut n. 70%. Vuosittain kuonabetonia käytetään Alankomaissa n. 10 milj.m³².

Nykytilanne ja muutostarpeet

Sideaineiden muutostarpeet aiheutuvat nimenomaan portlandklinkkerin valmistuksen CO₂-päästöistä. Portlandklinkkerin valmistus aiheuttaa noin 800 kg-CO₂/tn suuruiset päästöt. Sementtien päästöt ovat alhaisemmat, koska sementti sisältää aina muutakin kuin pelkästään klinkkeriä.

Sementtiteollisuus on EU:n päästökaupan piirissä ja siten sementtiteollisuus on reagoinut päästöihin jo aikaisemmin kuin esimerkiksi betonin valmistajat tai betonin käyttäjät. Sementin valmistajat ovat seostaneet sement-

1 Betonin korvaaminen muilla materiaaleilla on vaikeaa monissa käyttökohteissa, esimerkkinä infrarakentaminen. Kuvassa Raftsundin silta Norjassa. Sillan kokonaispituus on 711 metriä, sen pisin jänneväli on 298 metriä ja sillan alla oleva suurin vapaa merikorkeus on 45 metriä. Silta avattiin lokakussa 1998. Sillan ansiosta Lofoottien saarille pääsee valtatietä E10 pitkin.



Taulukko 1 CO₂data.fi-palvelussa olevien (9.11.2021) rakennusmateriaalien CO₂-ominaispäästöt (GWP, A1..A3, ilman 1,2-kerrointa) ⁽⁴⁾. Vertailuna on esitetty eri luokkien (Betonituotteet, Puutuotteet ja Teräs- ja metallituotteet) päästöt sekä betonin osalta myös betonivalmisosien sekä valmisbetonien päästöt.

Tuote / tuoteryhmä	n	Keskiarvo kg-CO ₂ e/kg	Minimiarvo kg-CO ₂ e/kg	Maksimiarvo kg-CO ₂ e/kg
Kaikki tuotteet	202	1,48	0,004	19
CO ₂ data-luokka: Betonituotteet	57	0,24	0,006	3,8
CO ₂ data, Betonivalmisosat	28	0,16	0,14	0,20
CO ₂ data, Valmisbetonit	10	0,10	0,06	0,16
CO ₂ data-luokka: Puutuotteet	13	0,40	0,07	1,0
CO ₂ data-luokka: Teräs- ja metallituotteet	17	3,7	0,50	12

Huom. Tuotteiden ominaispäästöt eivät ole suoraan vertailukelpoisia. Vertailut tulee tehdä rakennustasolla ja koko elinkaari huomioiden. Taulukon tarkoituksena on osoittaa, ettei betonin ominaispäästöt ole muita rakennusmateriaaleja korkeammat.

2 Betonin mineraaliset raaka-aineet: Sementti, filleri, sora ja karkea kiviaines.

3 Valettavuus on yksi ominaisuus, joka on tehnyt betonista pääasiallisen rakennusmateriaalin.

tejä ja siten klinkkerin määrää sementissä on pystytty vähentämään. Seostamisen ohella päästöä on pystytty alentamaan polttoprosessin energiatehokkuutta parantamalla sekä käyttämällä yhä enemmän kierrätyspolttoaineita. Esimerkiksi Finnsementti Oy:n sementtien keskimääräinen ominaispäästö vuonna 2020 oli 595 kg-CO₂/tn ⁽³⁾. Kokonaisuutena Suomessa on kuitenkin suhtauduttu sementtien seostamiseen verrattain maltillisesti, esimerkiksi ensimmäiset CEM III-typin sementit tulivat markkinoille vasta vuonna 2021.

Sementin ja siten myös betonin ominaispäästöt eivät ole erityisen korkeat. Taulukossa 1 on esitetty rakennusmateriaalien ominaispäästöjä. Tiedot on kerätty Suomen ympäristökeskuksen CO₂Data.fi-päästötietokannasta ⁽⁴⁾, jossa on yhteensä 202 rakennusmateriaalia tai -tuotetta. Kaikkien tietokannassa olevien rakennusmateriaalien keskimääräinen päästö on 1,48 kg-CO₂e/kg. Taulukko osoittaa selkeästi, että syy betonin merkittävään rooliin CO₂-päästöjen osalta ei ole korkeat ominaispäästöt. Betonin merkittävät CO₂-päästöt johtuvat betonin valtavista käyttömääristä.

Viimeisten parin vuoden aikana tarpeet betonin ja sementin CO₂-päästöjen vähentämiseksi ovat kasvaneet merkittävästi. Tausalla on Suomen tavoite hiilineutraalisuuteen vuonna 2035. Käytännössä paineita CO₂-päästöjen vähentämiseen aiheuttaa suunnitellut rakennuskohtaiset päästölaskelmat, erityisesti

Ympäristöministeriön valmisteleva asetus rakennuksen ilmastoeselvityksestä. Suunnitelmien mukaan jo vuonna 2025 laskettaisiin uusien rakennusten CO₂-päästöt ja päästöille asetetaan rakennustyyppikohtainen maksimitaso.

Yleisestikin CO₂-päästöjen vähentämisen nähdään betonialalla äärimmäisen tärkeänä asiana, useilla betonialan yrityksillä on yrityskohtaisia, vapaaehtoisia tavoitteita betonin päästöjen vähentämiseksi. Päästöjen vähentäminen on myös taloudellisesti olennaista. Betonin valmistuksesta aiheutuvat CO₂-kokonaispäästöt Suomessa ovat noin 1,2 milj. tn vuosittain ja tästä sementtien (kotimainen tuotanto + tuontisementti) osuus noin 1,0 milj.tn. Jos sementin päästöt voitaisiin puolittaa ja päästöoikeuden hinnaksi oletetaan 50 €/tn, niin kustannusvaikutus alalle olisi 25 milj. € vuosittain. Ja päästöoikeuden hinta voi olla tulevaisuudessa selvästi korkeampi. Vuonna 2022 tulee käyttöön myös betonin BY-Vähähiilisyysluokitus. Tämäkin osaltaan kasvattaa vähäpäästöisempien betonilaatujen kysyntää.

Kuten taulukko 1 osoittaa, betonin ominaispäästöt ovat varsin kohtuulliset ja betonin merkittävät CO₂-päästöt johtuvat nimenomaan betonin suurista käyttömääristä. Kuitenkin edelleenkin tehokkain keino betonin päästöjen vähentämiseksi on nimenomaan sideaineen päästöjen vähentäminen. Muina ratkaisuna

voisivat olla betonin käytön vähentäminen esimerkiksi tehokkaammilla rakenteilla sekä myös sementin/sideaineen määrän vähentäminen betonissa. Molemmilla edellä mainituilla keinoilla voidaan saavuttaa päästövähennyksiä, mutta kokonaisuutena säästöt jäävät verrattain pieniksi. Myöskään betonin korvaaminen muilla materiaaleilla ei anna merkittäviä päästövähennyksiä. Merkittävää päästövähennyksiä voidaan saavuttaa vain kun:

1. sideaineen ominaispäästöjä voidaan merkittävästi alentaa ja
2. vähäpäästöisiä sideaineita käytetään laajamittaisesti

Toki kaikki keinot päästöjen vähentämiseksi on hyödynnettävä.

Tulevaisuuden sideaineet

Jo lähitulevaisuudessa tarvitaan sideaineita, joiden CO₂-päästöt ovat selvästi nykytasoa alhaisemmat. Lopullisena tavoitteena on saada betonin sideaineet lähes nollapäästöisiksi. Menetelmät päästöjen vähentämiseksi voidaan jakaa kolmeen pääryhmään:

1. Seossementtien nykyistä laajamittaisempi käyttö
2. Vaihtoehtoisten sideaineiden käyttö
3. Portlandsementin valmistuksen tekeminen vähäpäästöiseksi

Teemu Ojala



2

3



Kuivituskuva



Teemu Ojala

4

4 Betonia käytetään valtavia määriä. Maailmassa vuosittain käyttö on n. 10 000 000 000 m³ ja Suomessa n. 5 000 000 m³.

Edellä mainitut vaihtoehdot eivät ole toisiaan poissulkevia, eli tulevaisuudessa käytössä voi olla kaikki esitetyt vaihtoehdot samanaikaisesti. Lisäksi tarvitsee hyödyntää kaikki käyttökelpoiset keinot betonin CO₂-päästöjen vähentämiseksi, kuten rakenteiden tehokkuuden kehittäminen ja sideaineen määrän vähentäminen betonissa.

Seossementtien nykyistä laajamittaisempi käyttö

Seossementit, erityisesti kuonasementit ovat tunnettuja tuotteita, niiden mahdollisuudet ja myös rajoitteet tunnetaan hyvin. Eurooppalainen sementtistandardi (SFS-EN 197-1) sallii seosaineiden runsaan käytön sementeissä. Sallitaan muun muassa sementti, joka sisältää 95% masuunikuonaa ja 5% sementtiklinkkeriä (CEM III/C). Suomessa tosin tällaista sementtiä voi käyttää vain sisä rakenteissa. Myös muita seosaineita, kuten lentotuhkaa, silikaa, pozzolaaneja voidaan lisätä sementteihin varsin suuria määriä, ei kuitenkaan siinä määrin kuin masuunikuonaa.

Seossementtien käytön lisääminen nähdäänkin tehokkaimpana lyhyen aikavälin keinona betonin päästöjen vähentämiseksi. Seossementtien käytöllä voidaan betonin päästöt puolittaa tai jopa enemmänkin. Alimmillaan seossementtien ominaispäästöt voivat olla tasolla 100...200 kg-CO₂e/tn (CEM III/C). Vertailuna voidaan esittää Finnsementin, Paraisen Oiva-sementin päästöarvo: 626 kg-CO₂e/tn.

Oiva-sementti on sekin keskimääräistä vähäpäästöisempi sementti.

Seossementtien käyttöön liittyy myös ongelmia, kuonabetonien lujuudenkehitys on vääjäämättä hitaampaa kuin CEM I tai CEM II tyyppisten sementtien. Tämä tarkoittaa myöhempää muottien purkuajankohtaa tai vaihtoehtoisesti lämpökäsittelyn tai kiihdyttimien hyödyntämistä. Lämpökäsittelyn ja erityisesti kiihdyttimien osalta tarvitaan tutkimus- ja kehitystyötä.

Lujuudenkehityksen lisäksi kuonabetonien säilyvyysominaisuudet voivat poiketa perinteisten betonin ominaisuuksista. Hollantilaiset ovat tiivistäneet kuonabetonien säilyvyysominaisuudet seuraavasti, kun masuunikuonan osuus on noin 70% sideaineen määrästä (2):

- Kloridien tunkeutuminen kuonabetoniin on hitaampaa
- Hitaammasta lujuudenkehityksestä johtuen kuonabetoni vaatii pidemmän jälkihoidon
- Kuonabetonin karbonatisoituminen on nopeampaa
- Kuonabetonin pakkassuolakestävyys on huonompi, tosin Alankomaiden sääolosuhteissa sillä ei katsota olevan merkittävää vaikutusta
- Mahdollinen huono jälkihoito voi johtaa huonoon pakkassuolakestävyyteen jo lyhyellä aikajaksolla
- Alkalikiviainesreaktiota ei esiinny, kun kuonapitoisuus on yli 50%

Seppo Matala tutki väitöskirjatutkimuksessaan karbonatisoitumisen vaikutuksia kuonabetonien huokosrakenteeseen (3). Hän havaitsi, että karbonatisoituminen muuttaa kuonabetonien huokosrakennetta selvästi enemmän verrattuna tavanomaiseen betoniin. Myös betonin ikääntymisen vaikutus oli kuonabetonilla voimakkaampaa. Ikääntymisellä on merkittävä vaikutus kuonabetonien pakkassuolakestävyyteen.

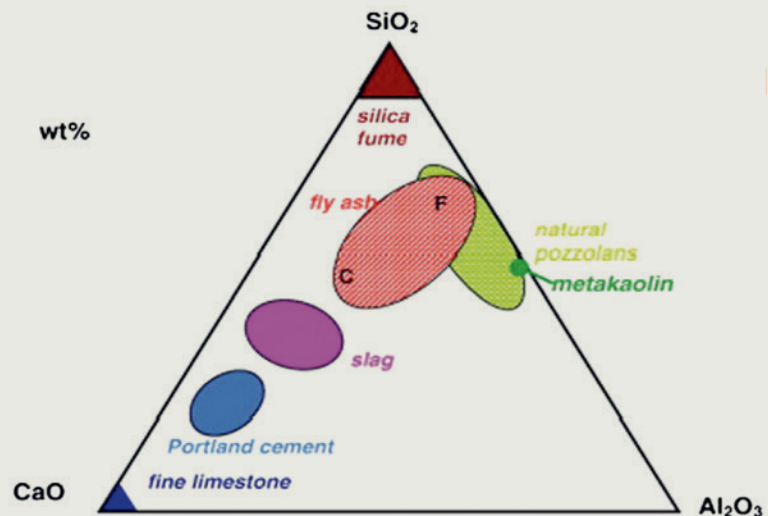
Suomen olosuhteissa runsaasti kuonaa sisältäviä sideaineita ei ole järkevää käyttää rakenteissa, joihin kohdistuu pakkassuolarasituksia. Juuri tästä syystä Väylävirasto rajoittaa P-lukubetoneissa masuunikuonan maksimimääräksi 50%. Poikkeuksena Po-betonit.

Myös masuunikuonan saatavuuteen liittyy kysymysmerkkejä. Masuunikuonaa syntyy teräksen valmistuksen yhteydessä, mutta syntyvän kuonan määrä on kaukana sementin käyttömäärästä. Siten tulevaisuudessa seossementtien käytön lisääntyessä masuunikuonasta voi tulla pula. Lisäksi terästeollisuuden siirtyminen vetypelkistykseen vaikuttaa merkittävästi masuunikuonan määrään ja laatuun. Myös muiden seosaineiden saatavuuden kanssa on haasteita, esimerkiksi lentotuhka loppuu Suomen lähialueilta hyvin pian. Kalkkikiven ja savipohjaisten materiaalien, kuten metakaoliinin, saatavuuden kanssa ei ole vastaavia ongelmia kuin masuunikuonan ja lentotuhkan kanssa.

Masuunikuonan osalta lisähaasteena on mahdollinen ominaispäästöarvon kasvaminen.

Kuva 5

Portlandsementin ja seosaineiden koostumus $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ -kuvaajassa ⁴



Nykyisellään masuunikuonan päästöön lasketaan vain jauhatuksen ja kuljetusten aiheuttamat päästöt, mutta ei päästöjä teräksen valmistuksesta. Ympäristövaikutusten arvioinnin nykyisenä periaatteena on, että myös mahdollisiin sivutuotteisiin allokoidaan osa päätuotteiden valmistuksen aiheuttamista päästöistä. Masuunikuonan osalta tästä keskustellaan parhaillaan EU-tasolla ja on todennäköistä, että masuunikuonan CO_2 -päästöarvo tulee kasvamaan jossain määrin. Tämä söisi jonkin verran masuunikuonan tehokkuutta päästöjen vähentäjänä, mutta jatkossakin masuunikuonan päästötaso olisi selvästi portlandsementin päästötasoa alhaisempi.

Vaihtoehtoiset sideaineet

Vaihtoehtoisilla sideaineilla tarkoitetaan sideaineita, jotka eivät sisällä portlandsementtiä. Tunnetumpia vaihtoehtoisia sideaineita ovat alkaliaktivoitunut kuonat sekä geopolymeerit. Geopolymeeriä käytetään usein yleisterminä, vaikka tarkkaan ottaen sillä tarkoitetaan Joseph Davidovitsin kehittämää aktivoitua metakaoliiniin perustuvaa sideainetta.

Alkaliaktivoitujen kuonien lisäksi vaihtoehtoisia sideaineita on erityyppisiä. Portlandsementin pääasiallinen raaka-aine on kalkkikivi (CaCO_3) ja kalkkikiven kalsinoinnista ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) aiheutuu valtaosa portlandsementin CO_2 -päästöistä. Vaihtoehtoiset sideaineet tulisi mieluummin perustua pii- tai alumiinipohjaisiin raaka-aineisiin (Kuva 5). Näin CO_2 -päästöjä voitaisiin alentaa verrattuna

portlandsementtiin. Vaihtoehtoisten sideaineiden raaka-aineena on usein muun teollisuuden sivuvirta tai jokin jättemateriaali.

Tunnettuja vaihtoehtoisia sideaineita on muun muassa:

- Kalsium-aluminaattisementit, esim. Ciment Fondu
- Kalsium-silikaattisementit, esim. Solidia cement
- Kalsium-hydrosilikaattisementit, esim. Celitement
- Kalsium-sulfoaluminaattisementit, esim. LaFarge Aether ja ALI CEM
- Alkaliaktivoitunut sideaineet, esim. Cemfree
- Geopolymeerit, esim. BanahCEM ja E-crete

Myös suomalainen Betolar Oy kehittää vähähiilisiä ratkaisuja betoniteollisuuteen. Betolar Oy:n tavoitteena on vaihtoehtoisten sideaineiden käyttöönotto.

Osa edellä mainituista vaihtoehtoisista sideaineista vähentää sideaineen CO_2 -päästöjä, mutta osalla niistä tavoitellaan ensisijaisesti muutoksia sementin ja betonin ominaisuuksiin ja päästöt voivat olla portlandsementin tasolla. Esimerkiksi kalsium-aluminaattisementit parantavat betonin tulenkestoa olennaisesti, mutta eivät ole vähäpäästöisiä sideaineita.

Vaihtoehtoiset sideaineet eivät ole nollapäästöisiä. Esimerkiksi alkaliaktivoitujen kuonien osalta päästöjä aiheutuu kuonasta sekä aktivaattorista. Myös jättemateriaalitkin vaati-



6 Tulevaisuuden betonirakenteissa voidaan käyttää apuna robotiikkaa ja 3D printtausta.

Josephs Sarafian & Ron Culver

vat jonkin verran prosessointia, mistä aiheutuu päästöjä. Parhaimmillaan vaihtoehtoisilla sideaineilla päästään CO₂-päästöissä samalle tasolle kuin runsaasti seostetuilla sementeillä (esim. CEM III/C).

Vaihtoehtoiset sideaineet eivät ole mikään uusi keksintö. Alkaliaktivoitu kuona on patentoitu jo 1895. Laajemmalti alkaliaktivoituja sideaineita kehitettiin Ukrainassa 1960-luvulla ja siellä sitä on käytetty vesirakenteiden ja kerrostalojen valmistuksessa hyvällä menestyksellä. 1980-luvulla suomalainen Bengt Forss kehitti F-sementin, joka oli muunnos ukrainalaisesta sideaineesta. F-sementtiä tutkittiin kattavasti Suomessa, mutta varsinaiseen käyttöön se ei ikinä yltänyt. Partekin sementiteollisuus kehitti samoihin aikoihin alkaliaktivoitua kuonaan perustuvan sideaineen, mutta sideaineessa oli mukana myös hieman portlandklinkkeriä. Siten se ei tarkkaan ottaen ollut vaihtoehtoinen sideaine, vaan normien mukainen sementti. Partekin sideainetta käytettiin mm. erilaisten betonituotteiden valmistuksessa. Käyttö loppui 1990-luvun lamaan.

Myös vaihtoehtoisien sideaineiden haasteena on raaka-aineiden riittävä saatavuus. Kuitenkin vaihtoehtoisien sideaineiden lisämahdollisuutena on hyödyntää erilaisia teollisuuden sivuvirtoja ja myös jättemateriaaleja. Masuunikuona ja lentotuhka pystytään helposti hyödyntämään normaalissa betonin valmistuksessa, mutta teollisuudessa syntyy runsaasti muitakin kuonia, tuhkia sekä jättemateriaaleja.

Näitä materiaaleja voidaan hyödyntää vaihtoehtoisien sideaineiden valmistuksessa ja muutoin tällaiset materiaalit jäisivät hyödyntämättä. Siten vaihtoehtoisien sideaineiden tutkiminen nähdään ensisijaisen tärkeänä.

Toinen, ehkä vieläkin merkittävämpi haaste vaihtoehtoisien sideaineiden käytölle on rajoitukset kantavissa rakenteissa. Eurooppalainen standardointi säätelee varsin tarkkaan mitä sementti voi sisältää (SFS-EN 197-1) ja toisaalta mitä raaka-aineita betonissa voidaan käyttää (SFS-EN 206). Alaa voidaan pitää tässä suhteessa konservatiivisena, mutta toisaalta rakentamisessa turvallisuus on tärkein kriteeri. Ei haluta ottaa pienintäkään riskiä uusien, osin tuntemattomien sideaineiden kanssa. Myös taloudelliset riskit voivat olla suuria, esimerkkinä tilanne, jossa kantavat rakenteet menettävät lujuuttaan 20 vuoden ikäisenä. On mahdollista saada hyväksyntä vaihtoehtoisille sideaineille, vaikka ne eivät täytäkään sementti- ja betonistandardien vaatimuksia, mutta tällaiset prosessit ovat usein raskaita. Yhtenä vaihtoehtona ETA-hyväksyntä (European Technical Approval). Keski-Euroopassa tehdään jonkin verran erilaisia betonituotteita käyttäen vaihtoehtoisia sideaineita.

Juuri standardien rajoituksista sekä myös raaka-aineiden rajallisuudesta johtuen vaihtoehtoisien sideaineiden potentiaalisimmat käyttökohteet löytyvät ei-kantavista rakenteista, esimerkiksi erilaisista betonituotteista. Tällaisissa tuotteissa rajoitukset sideaineen

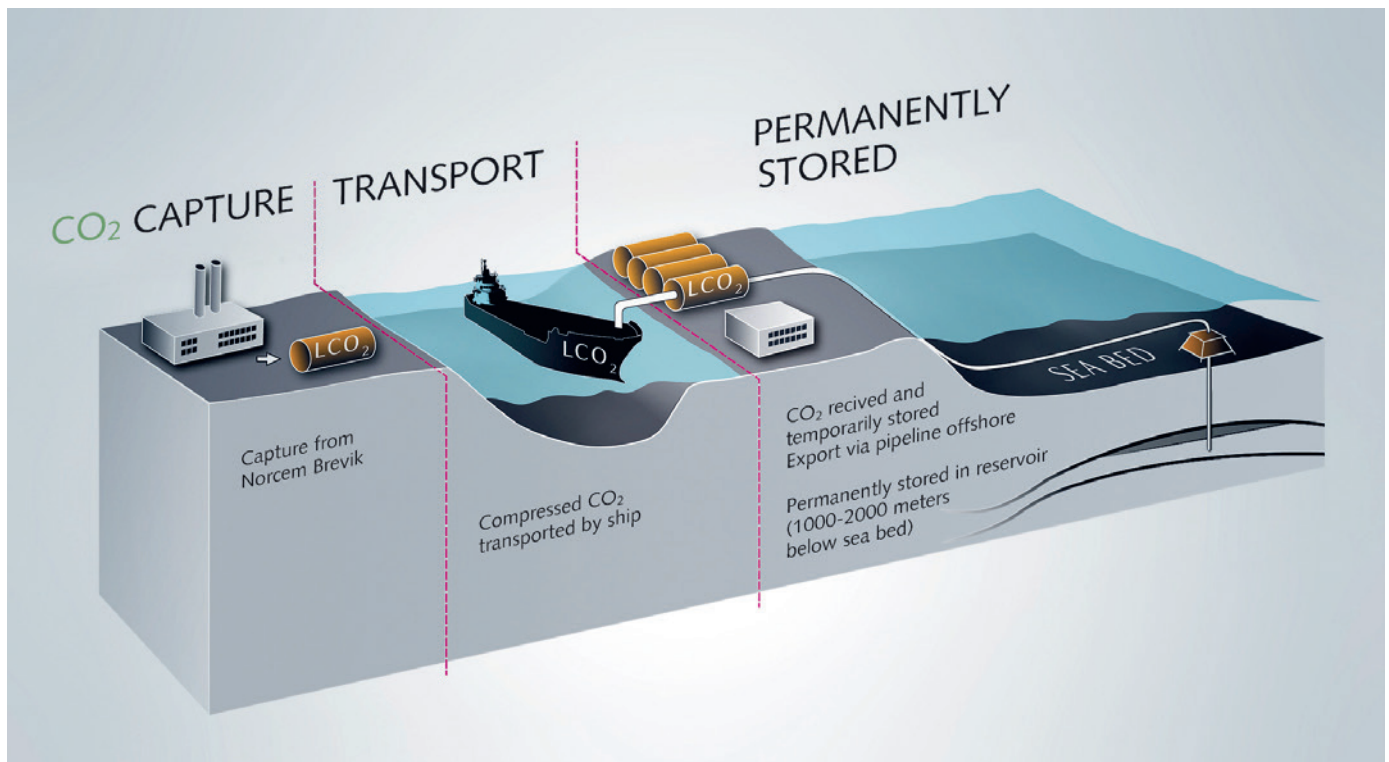
laadulle ovat yleensä kantavia rakenteita lievemmat. Vaihtoehtoisilla sideaineilla voidaan näin saavuttaa merkittäviä päästövähennyksiä yksittäisten tuotteiden osalta. Kuitenkin vaikutukset betonirakentamisen kokonaispäästöihin tulevat todennäköisemmin jäämään vähäisiksi.

Portlandsementin vähäpäästöinen valmistus

Teknisesti on mahdollista valmistaa portlandsementtiä hyvinkin vähäpäästöisesti. Tämä edellyttää merkittäviä muutoksia sementin valmistusprosessiin:

- Sementin valmistuksessa syntyvän CO₂:n talteenotto
- Fossiilisesta polttoaineesta luopuminen polttoprosessissa

Syntyvän hiilidioksidin talteenotto on tärkeässä roolissa, sillä noin 60% sementin CO₂-päästöistä syntyy nimenomaan kalsinoinnissa, CaCO₃ hajoaa CO₂:ksi ja CaO:ksi. Hiilidioksidin talteenotto (CCS = Carbon Capture and Storage) on olemassa olevaa teknologiaa, mutta tekniikka on kallista. Toisaalta päästökaupan kautta CO₂-päästöjen hinta nousee koko ajan ja siten myös talteenoton kilpailukyky paranee. Norjalainen sementin valmistaja Norcem rakentaa maailman ensimmäistä sementtitehtaan mittakaavassa toteutettavaa hiilidioksidin talteenottolaitteistoa. Talteen-



7 Periaate hiilidioksidin talteenotosta ja varastoinnista Norcem:in tehtaalla Norjan Brevikissä ⁽⁵⁾.

otettu CO₂ varastoidaan tyhjennettyyn öljynporauskenttään Pohjanmerellä. Investoinnin kokonaiskustannukset ovat yli miljardi euroa. Tämä sisältää laitteiston rakentamisen ja ope-
roinnin 10 vuoden ajan.

Mielenkiintoista on myös mahdollisuus hyödyntää talteenotettua hiilidioksidia (CCU = Carbon Capture and Utilization). Maksaahan CO₂ materiaalina lähes 100 €/tn. Talteen otettua CO₂:ta voitaisiin käyttää mm. synteettisen polttoaineen valmistamiseen. Suomessa tutkitaan mahdollisuuksia valmistaa Finnsementin sementtitehtaalla talteenotettavasta hiilidioksidista ja Kemiran tehtaalla syntyvästä vedystä synteettistä metanolia, josta edelleen voitaisiin jalostaa hiilineutraaleja liikennepolttoaineita.

Kalsinoinnissa syntyvän päästön lisäksi itse sementtiklinkkerin polttoprosessi synnyttää CO₂-päästöjä. Tätä osuutta on pystytty tehokkaasti vähentämään polttoprosessin energiatehokkuutta parantamalla sekä käyttämällä kierrätyspolttoaineita. Teoreettisesti on mahdollista tehdä polttoprosessi hyvin vähäpäästöiseksi. Sementtiklinkkeri poltetaan kuitenkin niin korkeassa lämpötilassa (1450 °C), ettei sitä ei voida sähkötoimisella kiertouunilla kustannustehokkaasti saavuttaa. Kuitenkin nykyisissä sementtiuuneissa käytetään ennen kiertouunia kalsinaattoria tai nousuputkea, missä raakajauheessa olevan kalkkikiven kalsinoituminen tapahtuu. Tämä kalsinoitumisosuus voitaisiin tehdä sähkön avulla, ja sen jälkeen materiaali syötettäisiin

kiertouuniin klinkkerin polttovaiheeseen ⁽⁶⁾. Sähköinen kalsinaattori alentaisi sementin valmistuksen hiilidioksidipäästöjä merkittävästi. Näin voitaisiin myös pitää erillään poltosta syntyvät savukaasut ja kalkkikivestä kalsinoinnissa vapautuva hiilidioksidi, mikä puolestaan helpottaisi hiilidioksidin talteenottoa. Hiilidioksidin talteenotto ei kuitenkaan edellytä kalsinoinnissa ja poltossa syntyvien päästöjen erottelua, esimerkiksi Brevikissä hiilidioksidi tullaan ottamaan talteen tehtaasta savukaasuista, jotka sisältävät sekä kalsinoinnista että poltosta syntyvät kaasut.

Sähköisen kalsinaattorin ja hiilidioksidin talteenoton avulla sementin päästöt voitaisiin saada alhaisiksi, arviolta lähelle tasolle 100 kg-CO₂e/tn. Sementin valmistuksen tekeminen vähäpäästöiseksi tulee vaatimaan suuria investointeja ja globaalisti se tulee kestämään kauan. Mutta paikallisesti, esimerkiksi Suomessa se olisi mahdollista. Investoinnit edellyttäisivät kuitenkin merkittävää yhteiskunnan tukea. Norjan valtiolla on merkittävä rooli sementtitehtaan hiilidioksidin talteenottolaitoksen ja varastointi-infrastruktuurin investoinnissa.

Vähäpäästöinen sementin valmistusprosessi tukeutuisi perinteisiin portlandsementin raaka-aineisiin ja siten raaka-aineiden saatavuusongelmat olisivat vähäisiä verrattuna esimerkiksi seossementteihin tai vaihtoehtoihin sideaineisiin. Samoin itse sementti olisi tuttu ja turvallinen. Portlandsementistä on kokemusta

ja tutkimustietoa jo yli sadan vuoden ajalta. Materiaalin ominaisuudet ja myös rajoitukset tunnetaan hyvin. Myös huoltovarmuuden kannalta sementin valmistaminen Suomessa tulevaisuudessakin on tärkeää.

Sideaineiden käyttö tulevaisuudessa

Kuten edellä on esitetty, betonissa käytettävät sideaineet tulevat muuttumaan jo lähitulevaisuudessa. Artikkelissa on jaoteltu kolme erilaista suuntausta sideaineiden kehityksessä. Kuvassa 8 esitetään erityyppisten sideaineiden arvioitu kehitys vuoteen 2035 saakka. Neljäntenä tyyppinä kuvaajassa on perinteinen sementti, jolla tarkoitetaan portlandsementtiä tai vähäisessä määrin seostettuja sementtejä (CEM I ja CEM II tyyppin sementit).

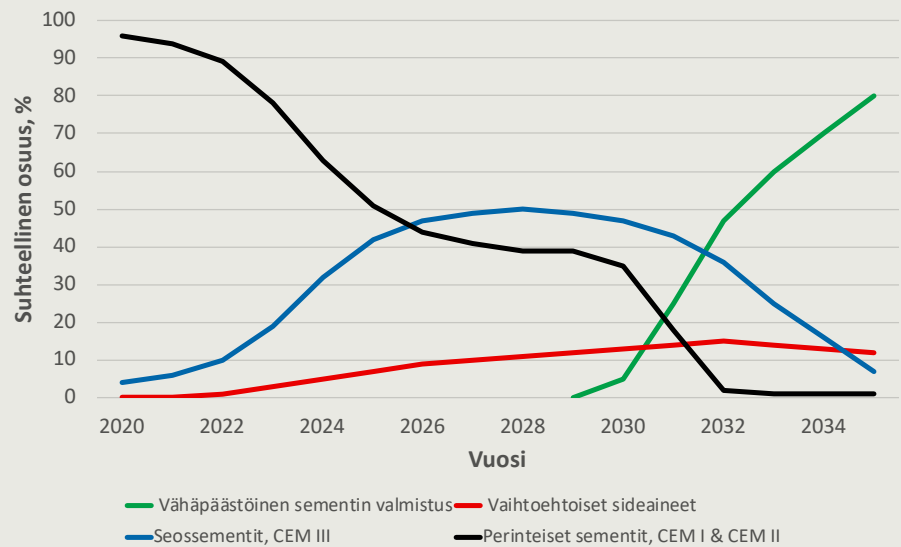
Olettamuksena on, että seossementtien määrä kasvaa ensimmäisenä ja vähentää siten CEM I ja CEM II tyyppisten sementtien osuutta. Seossementtien käytön ei kuitenkaan oleteta ylittävän 60%:n osuutta, koska seossementit eivät sovellu kaikkiin käyttökohteisiin ja myös masuunikuonan saatavuus tulee rajoittamaan seossementtien käyttöä.

Myös vaihtoehtoisten sideaineiden käyttö tulee lisääntymään, mutta oletettavasti kasvu tulee olemaan verrattain hidasta ja vaihtoehtoisten sideaineiden markkinaosuus tarkastelujaksolla tulee jäämään kohtuullisen pieneksi. Oletukset pohjautuvat siihen, että käyttö rajoittuu pääosin vain pienivolumisiin erikoistuotteisiin, koska rakentamisen standar-

Kuva 8

Arvioitu sideaineiden käytön kehittyminen tulevaisuudessa.

Seossementit sisältävät CEM III-tyyppin sementit sekä sideaineet, joissa on käytetty kuonajauhetta. Arviot perustuvat kirjoittajan näkemyksiin tulevaisuuden kehityksestä.



dit rajoittavat vaihtoehtoisten sideaineiden käyttöä kantavissa rakenteissa. Standardien osalta näköpiirissä ei ole olennaisia muutoksia. Myös raaka-aineiden saatavuus rajoittaa vaihtoehtoisten sideaineiden laajamittaista käyttöä. Esimerkiksi masuunikuonaa tuskin kannattaa merkittävässä määrin käyttää alkaaliaktivoituissa sideaineissa, koska kaikki syntynyt masuunikuona voidaan käyttää astetta helpommin seossementeissä. Vaihtoehtoisten sideaineiden osalta tehdään paljon tutkimusta ja siten on kyllä mahdollista, että tulevaisuudessa saavutetaan merkittäviä läpimurtoja. Tällöin vaihtoehtoisten sideaineiden markkinaosuus voi nousta esitettyä korkeammaksi.

Merkittävä muutos on arvioitu tapahtuvan noin 10 vuoden kuluttua. Tällöin voisi alkaa sementin valmistuksen muuntuminen vähäpäästöiseksi. Samoihin aikoihin myös masuunikuonan saatavuus alkaisi todennäköisesti ehtymään. On toki äärimmäisen vaikea ennustaa missä vaiheessa nämä tulevat lopulta tapahtumaan. Jos halutaan hyödyntää sementin päästövähennykset Suomen hiilineutraalisuustavoitteessa, investoinnit vähähiilisen sementin tuotantotekniikkaan tulisi tehdä viimeistään 2030-luvun alussa.

Kun betonin hiilikädenjälkipuolella vielä huomioidaan karbonatisoitumisen CO₂:ta sitova vaikutus, betoni olisi vähäpäästöisen sementin valmistustekniikan myötä vuonna 2035 hiilineutraali tai jopa hiilinegatiivinen materiaali.

Yhteenveto

Betonin sideaineissa tulee tapahtumaan muutoksia lähivuosina johtuen tarpeista vähentää betonin CO₂-päästöjä. Tähän ei löydy yhtä yksittäistä ratkaisua, vaan vähennykset saadaan aikaiseksi yhdistelemällä eri menetelmiä. Lyhyellä aikavälillä päästöjä saadaan tehokkaimmin vähennettyä seossementtien käyttöä lisäämällä. Haasteena tulee olemaan erityisesti masuunikuonan saatavuus.

Myös vaihtoehtoisten sideaineiden käyttö tulee lisääntymään, mutta oletettavasti vähäisemmässä määrin kuin seossementtien. Vaihtoehtoisten sideaineiden käyttöä rajoittaa niiden käytön rajoitukset kantavissa rakenteissa. Myös raaka-aineiden saatavuuteen liittyy vastaavia ongelmia kuin seossementeillä.

Lopullisena ratkaisuna betonin CO₂-päästöjen vähentämiseksi nähdään portlandsementin valmistuksen tekeminen vähäpäästöiseksi. Tämä edellyttää hiilidioksidin talteenottoa sekä kalkkikiven sähköistä kalsinointia ja siten todella suuria investointeja. Vähäpäästöisen valmistustekniikan avulla vältettäisiin ongelmat liittyen raaka-aineiden saatavuuteen ja myös materiaali (portlandsementti) tunnetaan erinomaisesti. Vähäpäästöistä sementin valmistustekniikkaa hyödyntämällä hiilineutraalisuus voitaisiin saavuttaa betonin osalta vuoteen 2035 mennessä.

Kirjallisuuslähteet

1. Hellebois, A., Launoy, A., Pierre, C., De Lanève, M., & Espion, B. 2013. 100-year-old Hennebique concrete, from composition to performance. *Construction and Building Materials* 44, 149–160.
2. Rob B. Polder, Timo G. Nijland, Mario R. de Rooij. 2014. Blast furnace slag cement concrete with high slag content (CEM III/B). Experiences with the durability in the Netherlands since the 1920's. *Staten vegvesens rapporten*. Nr. 270
3. Finnsementti. Ympäristöraportti 2020. Verkkojulkaisu: https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Finnsementti_ymparistoraportti_2020.pdf. Luettu 14.11.2021.
4. Rakentamisen päästötietokanta. Suomen ympäristökeskus SYKE. Verkkojulkaisu: <https://co2data.fi>. Luettu 9.11.2021.
5. Matala, S. 1995. Effects of carbonation on the pore structure of granulated blast furnace slag concrete. Espoo. Helsinki University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Surveying, Concrete Technology. Report 6. 161 p. + app. 49 p.
6. Scrivener, K., Nonat, A. 2011. Hydration of cementitious materials, present and future, *Cem. Concr. Res.* 41 (2011) 651.
7. Carbon capture and storage (CCS). Norcem. Verkkojulkaisu: <https://www.norcem.no/en/CCS>. Luettu 9.11.2021
8. Rantanen, H. 2021. Hiili-intensiivisten teollisuusprosessien sähköistämismahdollisuudet. Diplomityö. Lappeenranta-Lahden teknillinen yliopisto LUT, Energiatekniikan koulutusohjelma. 63 s.



9

Future binders for concrete

Changes in concrete binders will take place already in near future. Changes are boosted by the climate change. CO₂-emissions of concrete are needed to reduce and thereby also the cements/binders need modifications. Portland cement has a long and successful history, but new alternatives are inevitably coming to Portland cement. In this article the probable future changes of concrete binders are estimated. Also timetable for the changes is forecast.

There is not a single solution for reduction CO₂-emissions of concrete, but different approaches will be needed. The possibilities to reduce CO₂-emissions of binders can be grouped into three methods:

1. Large-scale use of blended cements
2. Use of alternative binders
3. Low carbon manufacturing process of Portland cement

More intensive use of blended cements, for example CEM III type cements, is considered as the fastest and easiest method for reduce CO₂-emissions of concrete. The European standards allow high amount of secondary cementitious materials in concrete. Also, blended cements have been used for a long time in concrete manufacturing with good experiences. However, blended cements with high slag content will change the properties of concrete, especially the strength development is delayed and also the durability properties may change. In future,

the availability of blast furnace slag can be a challenge.

Alternative binders are developed actively. Alternative binders do not contain Portland cement and therefore enable rather low CO₂-emissions. There are several different types of alternative binders and the most common are alkali-activated binders and geopolymers. Alternative binders can be manufactured from different side materials of industry and also from some waste materials. However, the availability of raw materials is rather limited and therefore also the use of alternative binders will probably stay on rather low level. In addition, alternative binders are not fulfilling the requirements of the European standards, and this will restrict the use in the load-bearing structures.

The final solution for reducing CO₂-emission of cement/concrete will be the low carbon production of Portland cement. Large investments are needed for capturing the CO₂ from the clinker production process. Also, the calcination process can be carried out using electricity instead of fossil energy. CO₂-emissions of cement production can be radically reduced, and availability of raw materials will not cause such problems as with other methods.

Based on the estimations, the use of blended cements will increase significantly in near future. Also, alternative binders will be used more, but their share will remain on low level because of the limited availability of the raw materials and restrictions to use them in the load-bearing structures. It is estimated that the

CO₂-emissions of Portland cement production can be significantly reduced in 10 years. This will make concrete as carbon neutral material and even carbon negative material when the carbonation of concrete is taken into account.

9 Rakeinen masuunikuona (GBFS) on terästeollisuuden jätetuote, joka voidaan kierrättää sementissä betonin lujuuden ja kestävyuden lisäämiseksi.

10 Mikrokuva rakeistetusta masuunikuonasta.



10