

# CO<sub>2</sub>NCRETE SOLUTION

## Kirjallisuustutkimus (L)



## Sisältö

Sementtiteollisuuden ympäristövaikutukset.....	3
Betonikemia ja karbonatisaatio .....	4
Betonin CO <sub>2</sub> -sitomiskapasiteetti.....	6
Karbonisaatiomekanismit ja -kinetiikka.....	7
Kierrätysbetonin karbonatisaatio .....	9
Tutkimuksia betonista hiilinieluna .....	10
Lähteet.....	12



## Sementtiteollisuuden ympäristövaikutukset

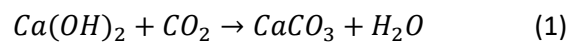
Hiilidioksidin (CO<sub>2</sub>) pitoisuus ilmakehässä on kasvanut merkittävästi teollistumisen alkamisesta saakka. Pitoisuus on kasvanut jopa 40 % esiteolliseen aikaan verrattuna; n. 280 promillesta n. 406 promilleen vuonna 2017. Nykyinen CO<sub>2</sub>-pitoisuuden kasvu on n. 2,2 promillea vuodessa, minkä odotetaan nostavan maapallon keskilämpötilaa 2-3 C°, kun pitoisuus saavuttaa 450 promillea vuoteen 2050 mennessä.

Betonia on käytetty useissa eri muodoissa yli 2000 vuoden ajan ja se on maailman käytetyin rakennusmateriaali; n. 25 miljardia tonnia betonia käytettiin vuoden 2009 aikana ja kulutus on kasvanut koko ajan. Betonin sideaineen, sementin, valmistus on kasvanut 30-kertaiseksi vuoteen 1950 ja 4-kertaiseksi vuoteen 1990 verrattuna. Vaikka betoni sisältääkin vain 10-20 % sementtiä, aiheuttaa sementti suurimman osan betonin valmistukseen liittyvistä päästöistä, kuten nähdään taulukosta 1. Sementin valmistus aiheuttaa globaalisti 5-8 % kaikista kasvihuonekaasuista, joista 50-70 % syntyy kalkkikiven kalsinoinnissa. Reaktion stoikiometriasta voidaan laskea, että valmistettaessa tonni sementtiklinkkeriä, vapautuu 510 kg hiilidioksidia; mikä tuo sementin valmistuksen CO<sub>2</sub>-kokonaispäästöt 0,7-1,0 tonniin klinkkeritonna kohti.

*Taulukko 1: Listattuna CO<sub>2</sub>-päästöt sekä energiatarve betonin tuotannon eri vaiheista betonikuutiota kohti.*

	CO <sub>2</sub> [kg]		Energy [MJ]	
<b>Cement</b>	92,3	91 %	551,2	83 %
<b>Aggregate (fine)</b>	2,5	2 %	33	5 %
<b>Aggregate (coarse)</b>	2,1	2 %	34,7	5 %
<b>Admixtures</b>	1,5	1 %	10,8	2 %
<b>Water</b>	0	0 %	0	0 %
<b>Transport</b>	2,5	2 %	34	5 %

Kalsinointireaktion tuotos ei kuitenkaan ole stabiili ja kovettunut sementti reagoi ilmakehän CO<sub>2</sub>:n kanssa käänteisessä reaktiossa, jota kutsutaan karbonatisaatioksi (kuvattuna yhtälössä 1), jossa kalsiumhydroksidi (Ca(OH)<sub>2</sub>), eli sammutettu kalkki, reagoi hiilidioksidin kanssa ja muodostaa kalsiumkarbonaattia (CaCO<sub>3</sub>). Yleisellä tasolla kyseinen reaktio on yksinkertainen, mutta todellisuudessa useat välivaiheet tekevät siitä varsin kompleksin ja se on erittäin olosuhdeherkkä; mutta selvää on, että betonin sementti absorboi ilmakehästä hiilidioksidia.



Suomessa tuotetaan n. 1,5 miljoonaa tonnia sementtiä vuosittain, mikä tarkoittaa n. 1,2 miljoonaa tonnia klinkkeriä. Tästä aiheutuvat päästöt ovat kalsinoinnin osalta n. 0,6 miljoonaa tonnia vuodessa, mikä tarkoittaa n. 0,9 miljoonan tonnin kokonaispäästöjä. Tämä on n. 1,3 % kaikista Suomen kasvihuonepäästöistä.



## Betonikemia ja karbonatisaatio

Betoni on sementistä, hienosta ja karkeasta täyteaineesta sekä vedestä koostuva komposiittimateriaali. Kemiallisia lisäaineita käytetään tapauskohtaisesti betonin ominaisuuksien säätelyyn sekä vaihtoehtoisia materiaaleja korvaamaan sementtiklinkkeriä. Hydrataatio on kemiallinen reaktio sementin ja veden välillä, joka aiheuttaa betonin kovettumisen.

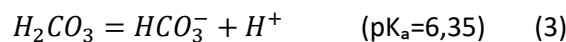
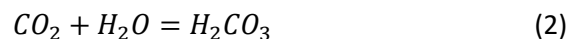
Kalkkikivi koostuu pääosin kalsiumkarbonaatista ja se on sementtiklinkkerin pääasiallinen ainesosa (n. 95 %). Valmistuksessa raakamateriaalit kuumennetaan lähelle 1000 °C:tta, jolloin kalkkikivi kalsinoituu. Tämän jälkeen raaka-aineet siirretään klinkkeriuuniin, jossa sen lämpötila nousee 1450 °C:een. Tämä vaihe valmistuksessa, kalsinointi ja poltto, on suurin hiilidioksidilähde betoniteollisuudessa.

Klinkkeri koostuu n. 65 %:sti kalsiumoksidista (CaO), josta suurin osa on peräisin kalkkikivestä, eli kalsiumkarbonaatista (CaCO<sub>3</sub>). Oletettaessa, että kaikki CaO on peräisin CaCO<sub>3</sub>:sta, yhden klinkkeritonin valmistuksen kalsinoinnissa vapautuu 510 kg hiilidioksidia. Näin ollen tämän vaiheen päästöt ovat luokkaa 670-770 kg CO<sub>2</sub>:a klinkkeritonnia kohden.

Hydratoituneen sementin altistuessa ilmalle, alkaa se reagoimaan ilmassa olevan hiilidioksidin kanssa ilmiössä, jota kutsutaan karbonatisaatioksi. Ilmiö alentaa betonin pH-arvoa, mistä syystä sitä on tutkittu hyvinkin paljon mutta raudituskorroosion kontekstissa. Hiilidioksidin absorptio betoniin on siis ollut pitkään tunnettua mutta vasta viime aikoina tämä on tunnistettu potentiaalisena hiilinieluna.

Hiilidioksidikaasu ei voi reagoida sementin hydraattien kanssa suoraan, vaan sen pitää ensin liueta veteen, jotta karbonaatti-ioneja voi muodostua. Karbonaatti-ionit reagoivat kalsiumionien kanssa huokosvedessä, mistä johtuen suhteellinen kosteus vaikuttaa hyvin paljon karbonatisaatioon. Neutraalissa vedessä CO<sub>2</sub> muodostaa bikarbonaatteja mutta koska betoni on ympäristönä hyvin emäksinen, bikarbonaatit hajoavat ja muodostavat karbonaatti-ioneja.

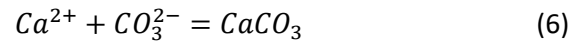
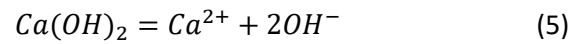
Karbonatisaatioon kuuluu kemiallisia prosesseja, kuten portlandiitin hajoaminen, kalsium-silikaatti-hydraattien (C-S-H) dekalsinointi sekä mono- ja tri-substituutti kalsiumaluminaatti-hydraattien (AFm ja AFt) liukeneminen. Nämä reaktiot tapahtuvat nesteessä, mistä syystä veden merkitys reaktiolle on oleellinen. Reaktio voidaan kuvata seuraavanlaisesti:



Normaaleissa olosuhteissa vain pieni osa liuenneesta hiilidioksidista hydratoituu karboniinihapoksi (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) mutta riippuen huokosveden pH:sta, bikarbonaatti- (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) tai karbonaatti-ioneja (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) muodostuu.



HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-ionit muodostavat enemmistön karbonatisoituneen betonin huokosvedessä (neutraali pH), kun taas CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>-ioneja on karbonatisoitumattomassa sementissä (korkea pH). Varsinainen karbonatisaatioprosessi, jonka faasimuutokset ovat kuvattuna taulukossa 2:



*Taulukko 2: Faasimuutokset karbonatisaatiossa. CH, AFm ja Aft toimivat puskurifaaseina ja hajoavat. C-S-H vapauttaa CH:a, joka karbonatisoituu, mikä johtaa matalampaan Ca/Si-suhteeseen, joka puolestaan korreloi pH:n kanssa.*

Intact concrete	1st stage	2nd stage	3rd stage	Carbonated
CH	-	-	-	-
C-S-H (1)	C-S-H (1)	C-S-H (2)	C-S-H (3)	SH (some CaO)
	CC	CC	CC	CC
Afm	Afm	Aft/Al(OH)3	Al(OH)3	Al(OH)3
Aft	Aft	Aft	Fe(OH)3	Fe(OH)4
pH>12,5	pH<12,5	pH<11,6	pH<10,5	pH<10



## Betonin CO<sub>2</sub>-sitomiskapasiteetti

Teoriassa kaikki kalsinoinnissa vapautunut hiilidioksidi voi absorboitua takaisin sementtiin ja muodostaa stabiilia kalsiumkarbonaattia ja tämä voi hyvinkin olla tilanne geologisella aikajänteellä tarkastellessa. Kuitenkin tutkimuksista voidaan todeta, että näin ei ehdi tapahtumaan normaalin betonirakenteen palveluajan puitteissa, joten on erotettava teoreettinen ja normaali sitoutumiskapasiteetti.

Karbonatisaation yksinkertaistetusta reaktioyhtälöstä, CO<sub>2</sub>+CaO=CaCO<sub>3</sub>, voidaan helposti todeta, että komponenttien stoikiometrinen suhde on 1:1; yhden CaCO<sub>3</sub> molekyylin muodostamiseen kuluu yksi CaO- ja yksi CO<sub>2</sub>-molekyyli. Näin voidaan sanoa, että hiilidioksidin sitomiskapasiteetti sementtiklinkkerissä on suoraan verrannollinen klinkkerin CaO:n määrään. OPC (Ordinary Portland Cement)) sisältää 95-100 % klinkkeriä, riippuen lisätyn kipsin määrästä. Keskimäärin klinkkerissä on 64 % CaO:a, joten karbonisaatiolle altista CaO:a on n. 60 %, johtuen lisäystä kipsistä.

Tonnissa Portlandsementtiä on 95 % klinkkeriä, josta 617 kg kalsiumoksidia voi teoriassa muuntua CaCO<sub>3</sub>:ksi reaktiossa ilman hiilidioksidin kanssa. Joten teoreettinen sitoutumiskapasiteetti voidaan laskea:

$$CO_2^{Theoretical} = 617 \text{ kg} \times \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} = 617 \text{ kg} \times \frac{44}{56} = 485 \frac{\text{kg}_{CO_2}}{\text{ton}_{cement}}$$

Määriteltäessä sementtiklinkkerin normaalia sitomiskapasiteettia, tulee huomioida eri hydraattifaasien määrä sekä kunkin faasin kemialliset ominaisuudet. CaO:a sisältävät primääriset faasit kattavat oletetusti 95 % sementtipastasta; taulukossa 3 on esitetty eri faasien ominaisuudet ja käytetyt karbonisaatioasteet.

Taulukosta 3 nähdään, että karbonisaatiolle altis CaO-pitoisuus sementissä on n. 72 % CaO:n kokonaismäärästä.

Taulukko 3: Sementtiklinkkerin eri faaseissa oleva "vapaa" CaO, josta voidaan johtaa normaali CO<sub>2</sub>-sitoutumismaksimi

Element	CH	C-S-H	AFm	AFt	Sum
Phase content	25	50	10	10	95
CaO molar ratio	0,76	0,42	0,36	0,27	-
CaO content in hydrated cement (%)	19	21	3,6	2,7	46
Assumed carbonation degree	1	0,5	0,75	0,5	-
CaO available for carbonation in hydrated cement	19	11	2,7	1,3	33
CaO available relative to total CaO (%)	41	23	5,8	2,9	72

Laskelmista ja määritelmistä johdettujen arvojen avulla, voidaan määritellä sementin normaali sitomiskapasiteetti:

$$CO_2^{Normal} = CO_2^{Theoretical} \times CaO_{\% \text{ available}} = 485 \frac{\text{kg}_{CO_2}}{\text{t}_{cement}} \times 72 \% = 349 \frac{\text{kg}_{CO_2}}{\text{t}_{cement}}$$



## Karbonatisaatiomekanismit ja -kinetiikka

Karbonatisaatiomekanismi on riippuvainen eri faasien välisestä suhteesta sementtipastassa, jotka puolestaan korreloivat sideaineen, kovettumisen sekä vesi/sideainesuhteen mukaan. Reaktio tapahtuu vesielementissä ja riippuu liukoisuudesta sekä diffuusionopeudesta materiaalin läpi. Konsentraatioerot kontrolloivat diffuusiota, joten diffuusioprosessit sekä karbonatisoituneen kerroksen rakenne vaikuttavat reaktion etenemiseen. Prosessissa hiilidioksidi ja karbonaatti-ionit diffundoituvat sisäänpäin betoniin; näistä kaasudiffuusio on paljon nopeampi. Näin ollen karbonatisaationopeus liittyy hyvin vahvasti huokossysteemin suhteelliseen kosteuteen. Liian kuivassa betonissa, kaasu diffundoituu nopeasti materiaaliin mutta varsinaista reaktiota ei pääse tapahtumaan, kun hiilidioksidi ei voi liueta huokosveteen. Täysin saturoituneessa betonissa kaasun diffuusio materiaaliin on hyvin hidasta ja vain karbonaatti-ionit liikkuvat, jolloin reaktio on hidasta. Karbonatisaatiolle optimaalinen kosteus riippuu betonin rakenteesta; yleisesti ottaen, matala vesi/sideainesuhde antaa tiiviimmän rakenteen, jolloin karbonatisaatio on hidasta. Suurin karbonatisaationopeus saavutetaan suhteellisen kosteuden ollessa luokkaa 60-80 % rakenteen sisällä.

Karbonatisaatiossa CH:n muutos kalsiitiksi aiheuttaa 11 %n tilavuusmuutoksen, muutos metastabiiliksi vateriitiksi puolestaan muuttaa tilavuutta 14 %. Tilavuuden muutos vaikuttaa huokosrakenteeseen karbonatisoituneessa kerroksessa ja näin ollen karbonatisaationopeuteen. Tästä voidaan päätellä, että kasvava kalsiitin tilavuus täyttää huokosten tyhjää tilaa ja näin ollen tiivistää sementin rakennetta.

Upotettu betoni karbonatisoituu myös mutta erittäin hitaasti ja eri tavalla, kun huokokset ovat täynnä vettä ja hiilidioksidi ei pääse diffundoitumaan rakenteeseen. Tämä tarkoittaa, että määrääväksi tekijäksi muodostuvat veden karbonaatti-ionit, hiilidioksidin sijaan. Karbonaatti-ionien konsentraation ollessa alhainen, reaktiota kontrolloi Ca-ionien ulospäin suuntautuva diffuusio ja karbonaatit muodostuvat lähellä betonin pintaa.

Karbonatisaatiota tapahtuu aina kun hiilidioksidia ja vettä on läsnä. Ilmiön nopeus riippuu materiaalissa kulkevasta hiilidioksidista tai karbonaatti-ioneista, jotka reagoivat sementtipastan kanssa. Tavallisesti pinnan kanssa kosketuksissa olevan CO<sub>2</sub>:n määrä voidaan pitää vakiona.

Fick:n diffuusiolakia voidaan käyttää kuvaamaan karbonatisaation reaktiokinetiikkaa. Karbonatisaatiokerroin, jota usein kutsutaan k-arvoksi, ottaa huomioon oleelliset reaktioon vaikuttavat parametrit betonin ominaisuuksista ja olosuhteista, jolloin karbonatisaation etenemistä voidaan kuvata yksinkertaisella yhtälöllä:

$$d_c = k\sqrt{t} \quad (7)$$

, jossa  $d_c$  on karbonatisaatorintaman syvyys,  $k$  on karbonatisaatiokerroin ( $k$ -arvo) ja  $t$  on aika vuosina.  $k$ -arvolla huomioidaan tärkeimmät vaikuttavat ominaisuudet betonissa ja altistusolosuhteissa ja näin ollen hyvä arvio sitoutuneen hiilidioksidin määrästä voidaan laskea.



Diffuusio tapahtuu sementtipastassa eikä betonin kiviaineksessa olettaen, että kiviaines on tiheää. Sementin määrä ei vaikuta karbonatisaationopeuteen mutta se pitää ottaa huomioon laskettaessa sitoutuneen CO<sub>2</sub>:n määrää.

Matala vesi/sementtisuhde tai vesi/sideainesuhde ja korkea hydrataatioaste tuottavat tiiviimpää betonia, koska rakenteeseen tulee vähemmän huokoisuutta. Nämä aiheuttavat myös tiiviimmän karbonatisaatiokerroksen, jolloin hiilidioksidin diffuusio hidastuu, joten karbonatisaatiokin hidastuu kaikissa ympäristöissä. Matalampi hydrataatioaste antaa huokoisemman rakenteen sementtipastaan. Tämä näkyy esimerkiksi sisätiloissa, jossa karbonatisaatio on suhteellisen nopeaa, matalasta suhteellisesta kosteudesta huolimatta. Ulkosovelluksissa pidennetty hydrataatio tuottaa tiheämpää sementtiä ja näin ollen syntyvä karbonatisaatiokerroskin on tiiviimpi ja puolestaan itse karbonatisaatio hitaampaa.

Onkin hyvin perusteltua todeta, että betonin puristuslujuus korreloi hyvin huokoisuuden kanssa ja tätä tietoa voidaan käyttää karbonatisaation laskennassa erilaisille sementtityypeille.

Altistuvan betonin pinta-ala on laskennan kannalta oleellista, koska karbonatisaatio on pinnasta materiaaliin päin tapahtuva reaktio. Kaasu diffundoituu sementin huokoisen rakenteen läpi mutta epäjatkuvuuskohdat, kuten halkeamat sekä kiviaineksen ja sementin välinen rajapinta tulee ottaa huomioon. Tällaiset rajapinnat ovat huokoisempia kuin itse pasta ja nopeampi karbonatisaatio on havaittavissa näissä kohdissa. Halkeamat myös auttavat kaasun pääsemisessä syvemmälle rakenteeseen ja näin ollen altistaa suuremman pinta-alan karbonatisoitumiselle.

Diffuusio nopeus kasvaa korkeammassa lämpötiloissa, mikä tarkoittaa, että karbonatisaatio nopeutuu mm. sisätiloissa sekä lämpimimmässä sääolosuhteissa.

Korkeampi ilman hiilidioksidipitoisuus nopeuttaa karbonatisaatiota. Tämä tarkoittaa, että karbonatisoituminen on nopeampaa kaupunkialueilla, missä on enemmän CO<sub>2</sub>-päästöjä, sekä sisätiloissa. Korkeampi CO<sub>2</sub>-pitoisuus tulisi ottaa huomioon myös betonin hiilinielulaskelmissa.

Koska karbonatisoitumisnopeus riippuu kaasun diffundoitumisesta pinnan läpi materiaaliin, vaikuttavat siihen pinnalla mahdollisesti olevat päällysteet, kuten maalit tai tapetit. Ulkopintaa suojaavat sovellukset kontrolloivat betonin sisäistä suhteellista kosteutta, joten ne voivat jopa nopeuttaa karbonatisoitumista tapauskohtaisesti. Sisätiloissa pinnoitteet useimmiten puolestaan haittaavat kaasun diffuusiota ja näin hidastavat karbonatisoitumista.

Karbonatisaatio on pintailmiö, joten ilmalle altistuva pinta-ala on tiedettävä, jotta rakenteeseen absorboitunut hiili voidaan laskea. Betonin ominaisuudet sekä sen altistusympäristö pitää olla tiedossa. Mainitut tekijät, kuten lisäaineet, sideaineet, pinnoitteet sekä ilman CO<sub>2</sub>-pitoisuus antavat k-arvolle korjauskertoimia. Taulukossa 4 on esitetty k-arvomatriisi erilaisille altistusolosuhteille ja erilaisille betonityypeille.

Taulukko 4: k-arvoja eri puristuslujuisille betoneille eri olosuhteissa.

Strength	<15 Mpa	15-20 Mpa	25-35 Mpa	>35 Mpa	
Exposed	5	2,5	1,5	1	[mm/a <sup>0,5</sup> ]
Sheltered	10	6	4	2,5	[mm/a <sup>0,5</sup> ]
Indoors	15	9	6	3,5	[mm/a <sup>0,5</sup> ]
Wet	2	1	0,75	0,5	[mm/a <sup>0,5</sup> ]
Buried	3	1,5	1	0,75	[mm/a <sup>0,5</sup> ]





## Kierrätysbetonin karbonatisaatio

Noin miljoona tonnia betonia kierrätetään Suomessa vuosittain. Käytännössä kaikki tästä määrästä myydään maanrakennuksen ja tiepohjien rakennustarpeeksi. Kierrätysbetonin myynti on täysin markkinoiden ohjaamaa, eikä sitä tueta viranomaistaholta. Kierrätysbetonin käyttö tarvitsee käytännössä aina MARA- tai ympäristöluvan.

Luonnollinen karbonatisaatio tapahtuu betonin pinnasta lähtöisin. Koska prosessi hidastuu ajan myötä ja lopulta lähestyy nollaa, betonin murskaaminen ja kierrätys paljastaa runsaasti reagoimatonta betonipintaa alttiiksi CO<sub>2</sub>:lle. Suuri osa sementtipastasta pulveroituu murskauksessa, joten karbonisaatiolle altis pinta-ala on suurempi kuin varsinaisten sorapartikkeleiden pinta-ala. Tämä mahdollistaa yhä suuremman hiilidioksidimäärän sitoutumisen betonimurskaan. Betonimurskassa pätevät samat lainalaisuudet kuin muutenkin karbonisaatiossa, joten jo mainitut parametrit alkuperäisen betonin ominaisuuksien ja altistusympäristön suhteen tulee ottaa huomioon. Useat tutkimukset todentavat, että oletus pienempien partikkeleiden nopeammasta karbonisoinnista pitää paikkaansa.

Murskatun betonin määrä ja laatu, partikkelikoko, altistusolosuhteet sekä ennen kaikkea altistumisaika ovat oleellisia parametreja tämän vaiheen hiilinielun kannalta. Useat tutkimukset korostavat tämän vaiheen tärkeyttä, kun tarkastellaan betonin elinkaaren hiilikädenjälkeä. Piqueras & Gonzales laskivat tutkimuksessaan, että sitoutuneen CO<sub>2</sub>:n määrä elinkaaren aikana nousisi 22 %:sta kalsinointivaiheen päästöistä 47 %:iin, kun huomioidaan betonin murskaus- ja kierrätysvaihe. Huomionarvoinen Engelsen & al.:n tutkimus osoitti kokeellisesti, että karbonisoinnista betonimurskassa on välillä 60-90 %, mikä indikoi maksimaalisen hiilinielun olevan jopa 60-80 % kalsinoinnin päästöistä betonin elinkaaren aikana.

Hiilinielumuinaisuuden lisäksi on huomioitavaa, että karbonisaatio mahdollistaa betonimurskeen laadun parantamisen. Vahviketerästen poistaminen murskeesta on pakollista, mikä puolestaan pakottaa valmistettavan partikkelikoon suhteellisen pieneksi, jotta teräksen poisto on mahdollista. Tämä tarkoittaa jo CO<sub>2</sub>:n sitoutumisesta poikkeavien syiden mahdollistavan betonin hiilinielun parantamista.

Betonimurskeen toimimista ja käyttöä hiilinieluna ei ole juuri tutkittu mutta kuten yllä kuvattu, tämä vaihe betonin elinkaareissa tarjoaa suuren, potentiaalisen hiilinielun. Betonin kierrätykseen liittyvien metodien ja tapojen muutoksilla olisikin mahdollista vaikuttaa hiilinielujen määrään merkittävästi.



Kuva 1: Meluvallina toimiva kivihäkki valmistettuna kierrätysbetonimurskeesta Ruduksen kierrätyspisteellä.



## Tutkimuksia betonista hiilinieluna

Betonin hiilidioksidin sitouttamista käsittelevissä tutkimuksissa on suurtakin vaihtelua tuloksissa, mikä juontaa juurensa karbonatisaation kompleksisuuteen ilmiönä. Itse reaktio on hyvin herkkä karbonatsoituvan betonin ominaisuuksille sekä sen altistusolosuhteille.

Jotain eroavaisuuksia löytyy siitä, kuinka paljon sementissä olevasta CaO:sta on mahdollista karbonatsoitua; suhde, jota kutsutaan karbonatsoitumisasteeksi. Esimerkiksi Felix & Possan sanovat tutkimuksessaan (2018), että 100 % sementin CaO:sta voi karbonatsoitua, kun taas Galan & al.:n mukaan vain 20 % rakenteen CaO:sta karbonatsoituu. Kuitenkin suurin osa tutkimuksista on linjassa, että eri faaseihin sitoutuneesta CaO:sta sementissä 70-75 % karbonatsoituu.

Vertailtaessa eri tutkimusten tuloksia CO<sub>2</sub>:n sitoutumisesta, pitää huomiota kiinnittää käytettyyn laskentatapaan. Tuloksia voidaan ilmaista nykyisen rakennuskannan tapahtuneena absorptiona käytetyn sementin päästöjen suhteen tai vaikka kuluvana vuonna käytetyn sementin päästöihin verrattuna. Xi & al. tutkivat globaalisti olemassa olevan rakennuskannan sitomaa hiilidioksidin määrää suhteessa käytetyn sementin kalsinoinnin päästöihin ja totesivat 43 %:a hiilidioksidista sitoutuneen. Andersson & al. tutkivat puolestaan vuonna 2013 tuotetun sementin päästöjä suhteessa sinä vuonna olemassa olevan rakennuskannan karbonatisaatioon ja totesivat, että 27 % kalsinoinnin ja 17 % kokonaispäästöistä sitoutuu.

Betonin elinkaari voidaan myös ottaa tarkasteluun, jolloin tiettyä sementtimäärää seurataan synnystä hautaan ja CO<sub>2</sub>-tasapainoa analysoidaan. Nämä laskelmat antavat hyvän kuvan betonin pitkän aikavälin ympäristökuormituksesta ja niiden avulla voidaan myös ymmärtää optimoidun kierrätysvaiheen vaikutus hiilitasapainoon. Kjellsen & al. totesivat tutkimuksessaan, että 57 % kalsinoinnissa vapautuneesta CO<sub>2</sub>:sta voi sitoutua takaisin sementtiin, kun rakenteen käyttöikä on 70 vuotta ja murskauksen jälkeinen vaihe 30 vuotta. Possan & al.:n mukaan 40-90 % kalkin polton päästöistä absorboituisi rakenteeseen 100 vuoden elinkaarella, riippuen käytetystä betonityypistä.

Betoni kierrätysvaihe onkin oleellinen betonin hiilinielun kannalta. Murskattaessa paljastuu merkittävästi karbonatsoitumatonta pinta-alaa ja riittävän pienillä partikkeleilla ja riittävällä altistusajalla voidaan saada kalsinointivaiheen päästöistä talteen jopa 80 %. Elinkaarilaskelmissa, riippuen murskauksen ja toisen käyttövaiheen muuttujista, saadaan betonin hiilinielua kasvatettua jopa yli kaksinkertaiseksi.

Taulukossa 5 on kerätty eri tutkimusten tuloksia hiilidioksidin sitoutumisesta betoniin. Suora vertailu on haastavaa, koska laskentatavat poikkeavat jonkin verran toisistaan. Kuitenkin selkeästi on havaittavissa, että betoni muodostaa suuren potentiaalisen hiilinielun, jota voidaan entisestään vahvistaa oikeanlaisilla kierrätys- ja käyttömenetelmillä.



Reference	Absorption		Time		Point of View	Details
	Calcination	Total	Service life	Post demo		
Andersson & al., 2013	27 %	17 %	x	-	Life Cycle	70 % carbonation degree
Byrne & Nolan, 2016	15 %	9 %	8 weeks	-	-	
Collins, 2013	55-65 %	34-41 %	x	x	Life Cycle	75 % carbonation degree
Engelsen & al., 2005	60-80 %	38-50 %	x	x	Life Cycle	carbonation degree in RCA 60-90 %
Engelsen & al., 2016	24 %	15 %	100 a	100 a	Uptake by existing concrete	70 % carbonation degree
Engelsen & Justnes, 2014	24 %	15 %	100 a	100 a	Life Cycle	
Felix & Possan, 2018	74 %	46 %	70 a	30 a	Life Cycle	100 % carbonation degree
Fitzpatrick & al., 2015	16 %	10 %	100 a	-	Life Cycle	
Jacobsen, 2001	11 %	7 %	x	x	Uptake by existing concrete	60 % carbonation degree
Kaliyavaradhan & Ling, 2017	53 %	33 %	x	x	Life Cycle	11 kg CO <sub>2</sub> / 1 ton RCA ; 270 kg CO <sub>2</sub> / 1 ton cement uptake
Kikuchi & Kuroda, 2010	38 %	24 %	x	3 months	Life Cycle	11 kg CO <sub>2</sub> / 1 ton RCA uptake
Kim & Chae, 2016	16,5 %	11,2 %	40 a	-	Life Cycle	
Kjellsen & al., 2005	57 %	30 %	70 a	30 a	Life Cycle	75 % carbonation degree
Leemann & Hunkeler, 2016	8-21 %	8-21 %	x	x	Life Cycle	50 % carbonation degree
Piqueras & Gonzales, 2014	35 / 75 %	22 / 47 %	x	x	Life Cycle	
Possan & al., 2016	40-90 %	40-90 %	70 a	30 a	Life Cycle	
Xi & al., 2016	43 %	27 %	35-70 a	x	Uptake by existing concrete	75 % carbonation degree
Zhang & Wang, 2014	27-50 %	17-31 %	85-115 a	-	Life Cycle	



## Lähteet

Andersson & al., 2013	Calculating CO2 Uptake for Existing Concrete Structures during and after service life	Environmental science & technology 2013, 47, 11625-11633
Betonitekniiikan oppikirja, 2018		
Byrne & Nolan, 2016	Preliminary investigation into the rate of carbonation of concrete blocks under normal production yard conditions	
Collins, 2013	2nd generation concrete construction: carbon footprint accounting	Engineering, construction and architectural management, vol. 20, no. 4, pp. 330-344.
Engelsen & al., 2005	Carbon Dioxide uptake in demolished and crushed concrete	Nordic Innovation Centre Project 03018, ISSN: 0801-6461, ISBN: 82-536-0900-0
Engelsen & al., 2016	The quantity of CO2 bound by concrete carbonation in norway	Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Las Vegas, USA, August 7-11, 2016
Engelsen & Justnes, 2014	CO2-binding by concrete (summary of the state of the art and an assesment of the total binding of CO2 by carbonation in the norwegian concrete stock)	Rapport 'CO2 binding by Concrete', Rapport nr. SBF2014A0019, SINTEF Building and Infrastructure, 2014
Felix & Possan, 2018	Balance Emissions and CO2 uptake in concrete structures: simulation based on the cement content and type	Ibracon structures and materials journal, Volume 11, Number 7 (February 2018) p. 135 – 162 • ISSN 1983-4195
Fitzpatrick & al., 2015	Sequestration of carbon dioxide by concrete infrastructure: a preliminary investigation in ireland	
Galan & al, 2010	CO2 sink effect of concrete carbonation	Coventry university and the univeristy of wisconsin milwaukee centre for by-products utilization, 2nd international conference on sustainable construction materials and technologies, june 28-june 30, 2010, ISBN: 978-1-4507-1488-4
Jacobsen, 2001	Binding of CO2 by carbonation of Norwegian Concrete	CANMET/ACI three day symposium on sustainable development and concrete technology, San Francisco, USA, September 16 – 19 2001, ver. Nov-7-2000
Kaliyavaradhan & Ling, 2017	Potential of CO2 Sequestration Through Construction and Demolition (C&D) waste - An Overview	
Kikuchi & Kuroda, 2010	Carbon Dioxide uptake in demolished and crushed concrete	Journal of advanced concrete technology vol. 9, No. 1, 115-124, February 2011
Kim & Chae, 2016	Evaluation analysis of the CO2 emissions and absorption life cycle for precast concrete in korea	
Kjellsen & al., 2005	The CO2 balance of concrete in a life cycle perspective	Nordic Innovation Center project no. 03018, 2006. ISBN: 87-7756-758-7
Lagerblad, 2006	Carbon Dioxide Uptake During Concrete Life Cycle - State of the Art	Nordic Innovation Center project no. 03018, 2006. ISBN 91-976070-0-2 / ISSN 0346-8240
Leemann & Hunkeler, 2016	Carbonation of concrete: assessing the CO2 uptake	cemsuisse-project 201602, 2016
Piqueras & Gonzales, 2014	Life-cycle greenhouse gas emissions of blended cement concrete including carbonation and durability	International Journal of Life Cycle Assessment. 19(1):3-12. doi:10.1007/s11367-013-0614-0.
Possan & al., 2016	CO2 uptake by carbonation of concrete during life cycle of building structures	J Build Rehabil (2016) 1:7, DOI 10.1007/s41024-016-0010-9
<a href="http://www.betoni.com">www.betoni.com</a>		
Xi & al., 2016	Substantial Global carbon uptake by cement carbonation	Nature Geoscience, published 21 novemver 2016
Zhang & Wang, 2014	Life cycle Assessment of CO2 Emission of Concrete Considering Carbonation and Structural Element Types	The 2016 Structures Congress (Structures16) Jeju island, Korea, August 28-September 1, 2016

