

CO₂NCRETE SOLUTION

– Betonin varastoima hiilidioksidi Suomessa



Sisältö

Betonikannan analyysi	3
Karbonisaatiossa sitoutuva hiilidioksidi.....	8
Karbonisaatiomekanismit ja -kinetiikka.....	9
Laskentaa	10



Betonikannan analyysi

Tavoitteena oli selvittää betonirakenteiden määrä Suomen rakennuskannassa sekä jaotella betonirakenteet eri karbonatisaation kannalta olennaisiin altistumisympäristöperusteisiin luokkiin. Laskenta suoritettiin kahdella eri tavalla; arvio perustuu sementin käyttöön sekä Suomen rakennuskannan ominaisuustietoihin. Tällä tavalla laskenta saatiin kohdennettua rakennuksiin ja rakenneosiin. Huomioituna on myös rakennuskannasta poistuneiden rakennusten määrä, jolloin saadaan rakennuskannassa olevan betonin määrä kunakin vuonna sekä kunkin vuoden poistuma.

Betoni kannasta on määritelty alttiina olevan betonin pinta-ala sekä vastaava tilavuus. Pääjaottelussa rakenteet on jaettu hiilidioksidin sidonnan kannalta samankaltaisiin osakokonaisuuksiin talo- ja infrakannassa:

- Ulkoilman kanssa kosketuksissa oleva betoni (talokanta)
 - Suojattu/suojaamaton
- Sisäilman kanssa kosketuksissa oleva betoni (talokanta)
 - Pinnoitettu/pinnoittamaton
- Ulkoilman kanssa kosketuksissa oleva betoni (infrakanta)
 - Pinnoitettu/pinnoittamaton
- Betoni, joka ei ole kosketuksissa ilman kanssa

Mallintamisen vaiheita on kuvattu alla; 1) betonituotteiden käytön määrittäminen, 2) talokannan betonilaskenta, 3) infrakannan betonilaskenta, 4) laskennan yhtenäistäminen, 5) poistuvan betonin määrä, 6) tulokset.



Kuva 1: Betonikannan mallintamisen vaiheiden kuvaus



Alla on kuvattu mallinnuksessa käytettyä rakenneosajaottelua. Talokannassa eri rakennustyypit on mallinnettu kullekin ajanjaksolle tyyppillisiksi geneerisiksi rakennuksiksi.



Kuva 2: Betonikannan rakenneosajaottelun kuvaus

Talokannassa erilaisten rakennusten rakenteet oli mallinnettu kullekin vuosikymmenelle ominaiseksi ja näin ollen saatiin yhä tarkemmin analysoitua rakennusten ilmalle altistuvaa pinta-alaa.

Lasketatavojen välinen korrelaatio osoittautui erinomaiseksi, eli laskennan tarkkuus on erittäin hyvä. Alla olevassa esimerkissä on kuvattu kerrostalojen laskentaa molemmilla lasketatavoilla.



Suomen talokannassa oli betonia vuonna 2018 n. 241 miljoonaa kuutiota; kumulatiivinen betonikanta, jossa on huomioitu vuosittainen poistuma, on kuvattu alla. Betonin määrä on arvioitu myös ajalle ennen vuotta 1950. 1950-2018 valmistuneiden rakennusten betoni kattaa n. 93 % koko betonikannasta.

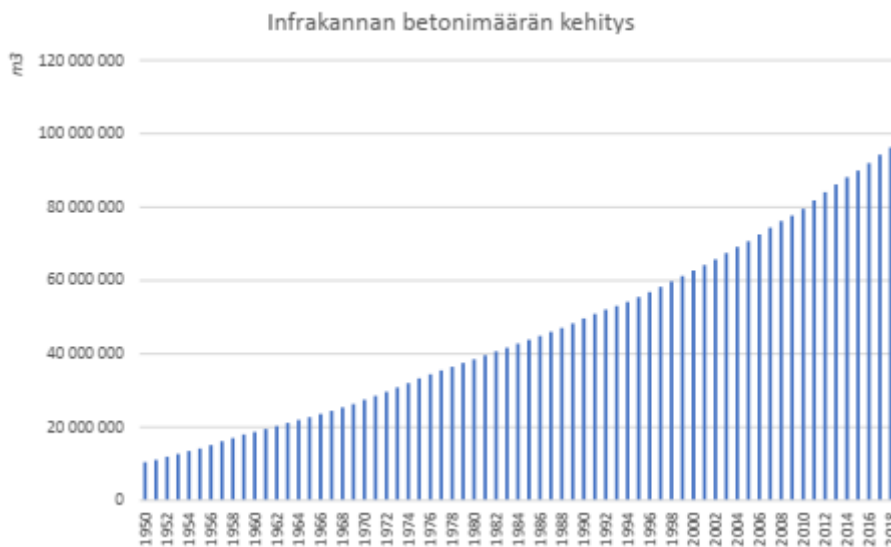
Kuva 3: esimerkki betonin käytöstä kerrostaloissa molemmilla lasketatavoilla



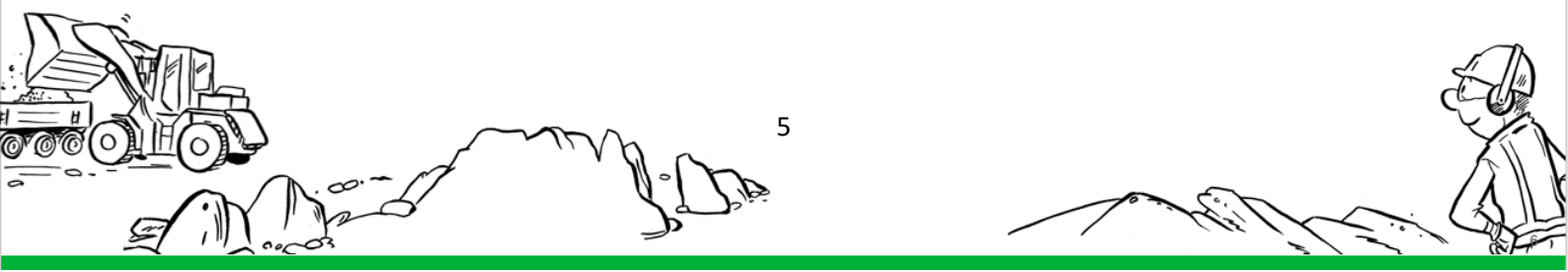


Kuva 4: Betonin määrä talokannassa vuosina 1950-2018

Infrakannassa on paljon betonituotteita, joista suuri osa on maa- ja vesirakentamisessa käytettyä valmisbetonia, jonka kohdistaminen tiettyyn rakenteeseen on hankalaa tai mahdotonta. Suomen infrakannassa on arvioitu vuonna 2018 olevan n. 96 miljoonaa kuutiota betonia. Vuosien 1950-2018 välisenä aikana infrakannassa käytetty betoni kattaa n 92 % koko infrakannan betonimäärästä. Alla olevassa kuvaajassa on infrakannan kumulatiivinen betonimäärä, jossa on huomioitu myös mallinnettu poistuma.

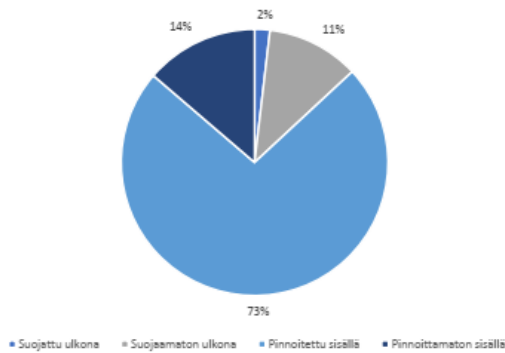


Kuva 5: Betonin määrä infrakannassa vuosina 1950-2018

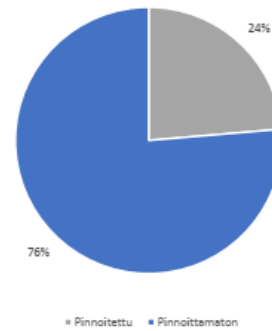


Betonikannan Altistuspinna-arat sekä vastaavat tilavuudet ovat jaoteltu edellä mainitulla tavalla. Talokannassa on suhteessa selkeästi eniten sisätiloissa olevaa pinnoitettua betonia ja infrakannassa puolestaan valtaosa pinna-ala on pinnoittamatonta.

Betonipintojen osuus talokannassa pääjaottelun mukaisesti



Betonipintojen osuus infrakannassa pääjaottelun mukaisesti

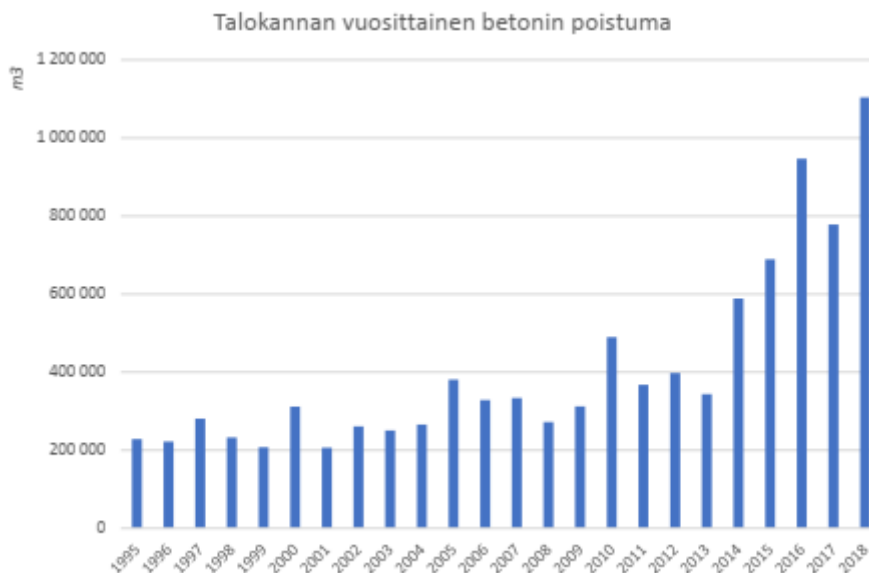


Kuva 6: Talo- ja infrakannan pinna-alojen altistumisolosuhteiden suhteelliset osuudet.

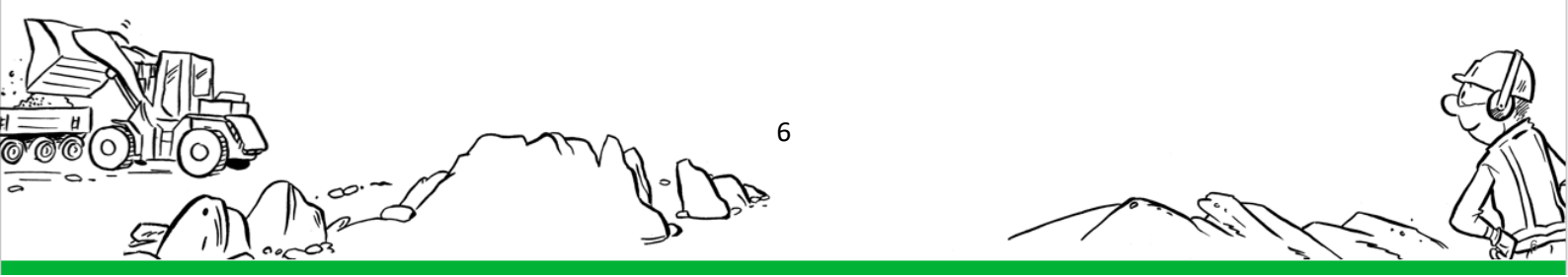
Ilman ilmakosketusta, esim. maanalainen, oleva betoni on oletettu laskennassa karbonatisoitumattomaksi, vaikka tämä on kirjallisuuden perusteella kiistanalaista.

Samalle betonitilavuudelle voi olla kaksi altistuvaa pinna-ala, esimerkiksi ylä ja alapuoli; sama pinna-ala ei kuitenkaan ole kahta kertaa.

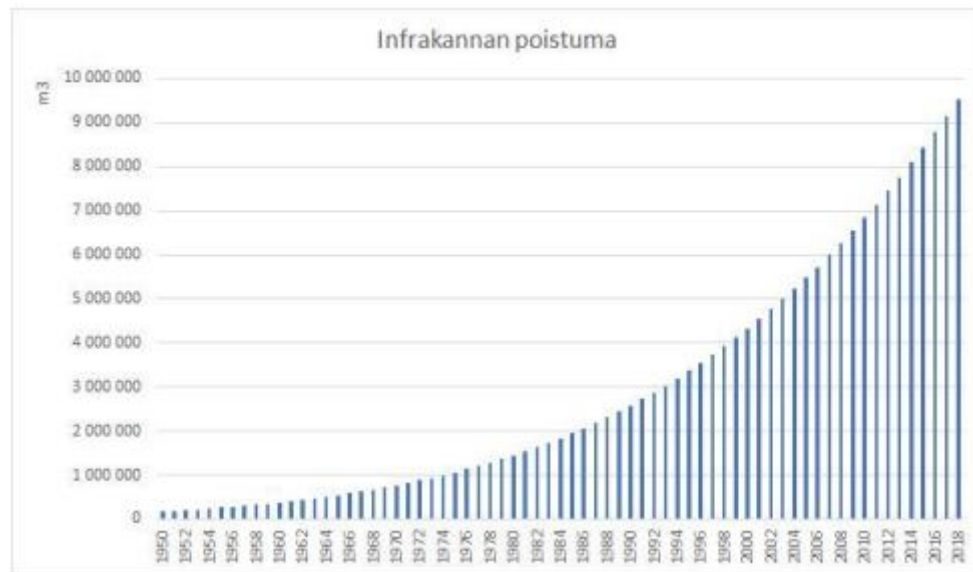
Talokannan poistuma on kasvanut viime vuosien aikana voimakkaasti, johtuen mm. purkavasta uudisrakentamisesta kasvukeskuksissa. Kaupungistumisen ja keskusta-alueiden tiivistymisen seurauksena poistuman korkean tason voidaan olettaa pysyvän tulevaisuudessa. Vuonna 2018 talokannasta purettiin n. 1,1 miljoonaa kuutiota, mikä on selkeästi pitkän ajan keskiarvoa enemmän. Talokannan vuosittainen poistuma vuodesta 1995 on esitetty alla.



Kuva 7: Talokannan vuosittainen poistuma vuodesta 1995



Infrakannalle ei ole saatavissa poistuneiden rakenteiden määrää, joten se on mallinnettu poistuma-arvion mukaan. Infrakannan poistuman on arvioitu olevan vuonna 2018 370000 kuutiota. Alla on kuvattu mallinnettu infrakannan poistuma vuodesta 1950.



Kuva 8: Infrakannan poistuma vuodesta 1950

Betoni saavutti 1900-luvun alussa vain 15 MPa puristuslujuuden ja tällaista betonia käytettiin aina 1960-luvulle asti. 1960-luvulla betoni alkoi saavuttamaan 30-35 MPa puristuslujuuksia, vaikka tällaista betonia ei laajasti käytettykään, vaan pääasiassa lujuusluokkia K15 ja K20. Vielä 1976 valmistettiin K15 betonia, joka on nyttemmin jo poistunut markkinoilta. Vuoteen 1998 tultaessa K20 betonin markkinaosuus oli enää n. 3 %. 1970-luvulla K25 ja K30 betonit olivat laajasti käytössä ja niiden markkinaosuus saavutti 50 %; 2000-luvulle tultaessa näiden markkinaosuus olikin jo 70 %.

Yhteenveto:

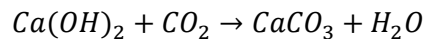
- Betonin määrä vuonna 2018: 339 milj. m³
 - Talokannassa: 241 milj. m³
 - Infrakannassa: 98 milj. m³
- Betonin vuosipoistuma 2018: 1,5 milj. m³
 - Talokannassa: 1,1 milj. m³
 - Infrakannassa: 0,4 milj. m³



Karbonatisaatioissa sitoutuva hiilidioksidi

Betonissa käytettävää sideainetta, sementtiä, valmistetaan polttamalla kalkkikiveä korkeassa lämpötilassa, jolloin kalsiumkarbonaatista vapautuu hiilidioksidia ja syntyy kalsiumoksidia, joka on sementtiklinkkerin primäärinen osa.

Yksinkertaistettu reaktioyhtälö on muotoa $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$. Valettaessa sementti kovettuu reaktiossa veden kanssa betonin sideaineeksi. Tämä ei kuitenkaan ole termodynaamisesti stabiili tuote, vaan kalsiumhydroksidista hydratoituessa muodostunut kalsiumhydroksidi reagoi ilman hiilidioksidin kanssa ja muodostaa jälleen kalsiumkarbonaattia. Tätä ilmiötä kutsutaan karbonatisaatioksi:



Myytavässä sementissä on tavallisesti n. 95 m-% klinkkeriä, lopun massan ollessa jauhettua kalkkikiveä sekä mahdollisia lisäaineita. Klinkkeri koostuu n. 65 m-%:sesti kalsiumoksidista (CaO), joka on peräisin kalsiumkarbonaatista, CaCO₃ (kalkkikivestä).

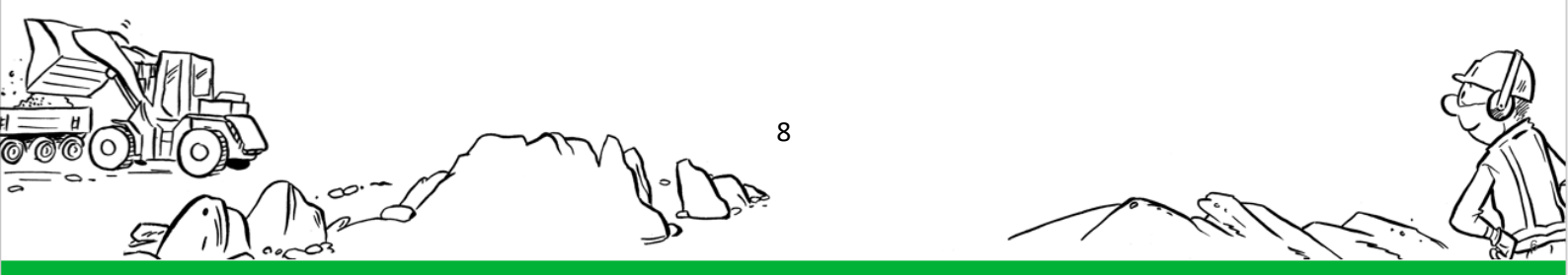
Näillä saadaan reaktion stoikiometriasta CO₂:n ja CaO:n moolimassojen suhteella tonnin klinkkeriä kalsinoinnissa aiheuttamaksi hiilidioksidipäästöksi 510 kg/tonni klinkkeriä. Tämä on myös betonin karbonatisaation teoreettinen hiilinielumaksimi. Arvioimalla sementtifaasien karbonatisaatioasteita karbonisoituneessa sementissä (kts. taulukko 1), saadaan betonin kokonaiskarbonatisaatioasteeksi 72 %; mikä tarkoittaa, että kaikesta kalsiumoksidista sementistä, 72 % voi reagoida hiilidioksidin kanssa ja muuttua kalsiumkarbonaattiksi.

Taulukko 1: Sementtiklinkkerin eri faaseissa oleva "vapaa" CaO, josta voidaan johtaa normaali CO₂-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

Tästä voidaan laskea klinkkerin normaali hiilidioksidin sitomiskapasiteetti $72\% \cdot 510 \text{ kg/tonni} = 367 \text{ kg/tonni}$ (hiilidioksidia/sementtiä).

Näin ollen voidaan todeta, että betonin hiilinielu voidaan johtaa karbonisoituneen betonin tilavuudesta sekä siinä olevan sementin määrästä.



Karbonatisaatiomekanismit ja -kinetiikka

Karbonatisaatiota tapahtuu aina kun hiilidioksidia ja vettä on läsnä betonin huokosissa. Ilmiön nopeus riippuu materiaalissa kulkevasta hiilidioksidista tai karbonaatti-ioneista, jotka reagoivat sementtipastan kanssa. Tavallisesti pinnan kanssa kosketuksissa olevan CO₂:n määrä voidaan pitää vakiona.

Karbonatisaatioreaktioon tarvitaan betonin sisällä huokosvettä ja sisäinen kosteus onkin merkittävä parametri ilmiölle. Suurin karbonatisaationopeus saavutetaan suhteellisen kosteuden ollessa luokkaa 60-80 % rakenteen sisällä. Myös mm. lämpötila ja hiilidioksidipitoisuus ovat olosuhteparametreja, jotka vaikuttavat karbonatisaationopeuteen.

Diffuusionopeuteen vaikuttaa betonin huokosrakenne, joka korreloi hyvin betonin puristuslujuuden kanssa. Betonissa mahdollisesti käytetyt lisäaineet vaikuttavat myös rakenteeseen. Eri sovelluksissa käytettävät pinnoitteet, kuten maalit tai matot, hidastavat hiilidioksidin pääsemistä betonin sisälle ja näin vaikuttavat karbonatisaationopeuteen.

Upotettu sekä maanalainen betoni ovat laskettu ei-karbonisoituviksi pinnoiksi, koska reaktio on hyvin hidaskäyttöön betonin huokosten ollessa tukittuja.

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:

$$d_c = k\sqrt{t}$$

, 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.

Taulukko 1: 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 ^{0,5}]
Sheltered	10	6	4	2,5	[mm/a ^{0,5}]
Indoors	15	9	6	3,5	[mm/a ^{0,5}]
Wet	2	1	0,75	0,5	[mm/a ^{0,5}]
Buried	3	1,5	1	0,75	[mm/a ^{0,5}]

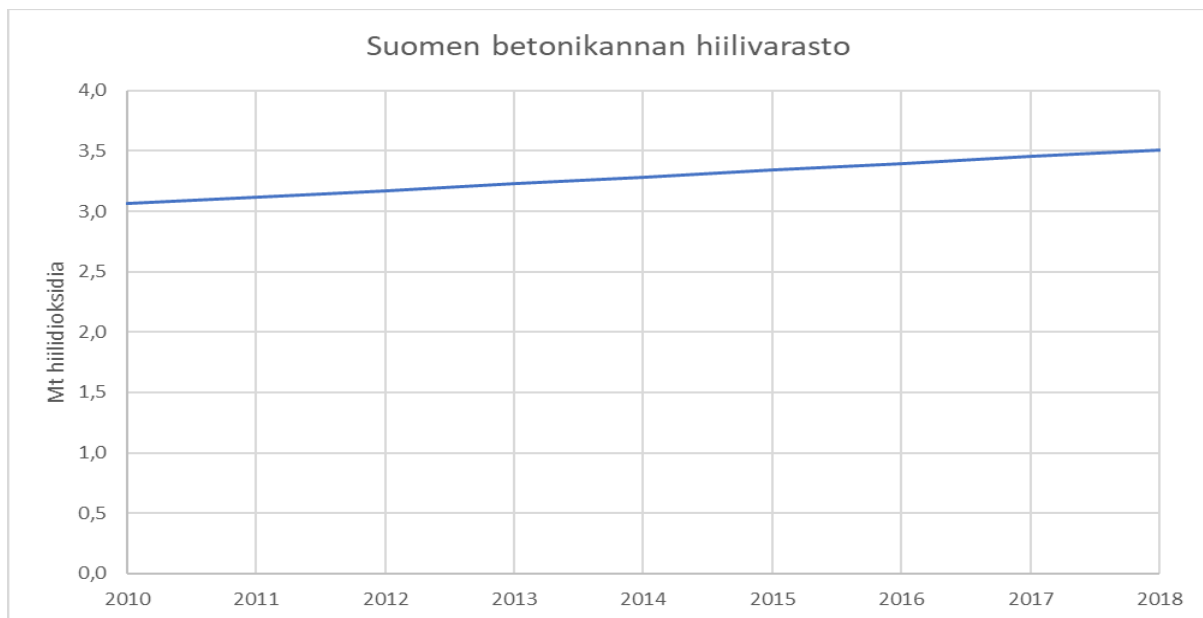


Laskentaa

Betonin sitoma hiilidioksidi saadaan laskettua karbonatisoituneen betonin tilavuudesta. Tätä varten on tutkittu Suomen betonikantaa ja jäsenelty se iän sekä altistusolosuhteiden mukaisesti tilavuuksiin ja pinta-aloihin.

Betonin tilavuudesta voidaan johtaa sen sisältämän sementin sekä klinkkerin määrä. Klinkkerin valmistuksen hiilidioksidipäästöt, eli kalkinpolton kemia, ovat tuttua ja reaktioyhtälöstä saadaan näiden suuruus. Tehdyn, laajan kirjallisuustutkimukseen pohjautuen saadaan laskettua betoniin sitoutuvan hiilidioksidin määrä.

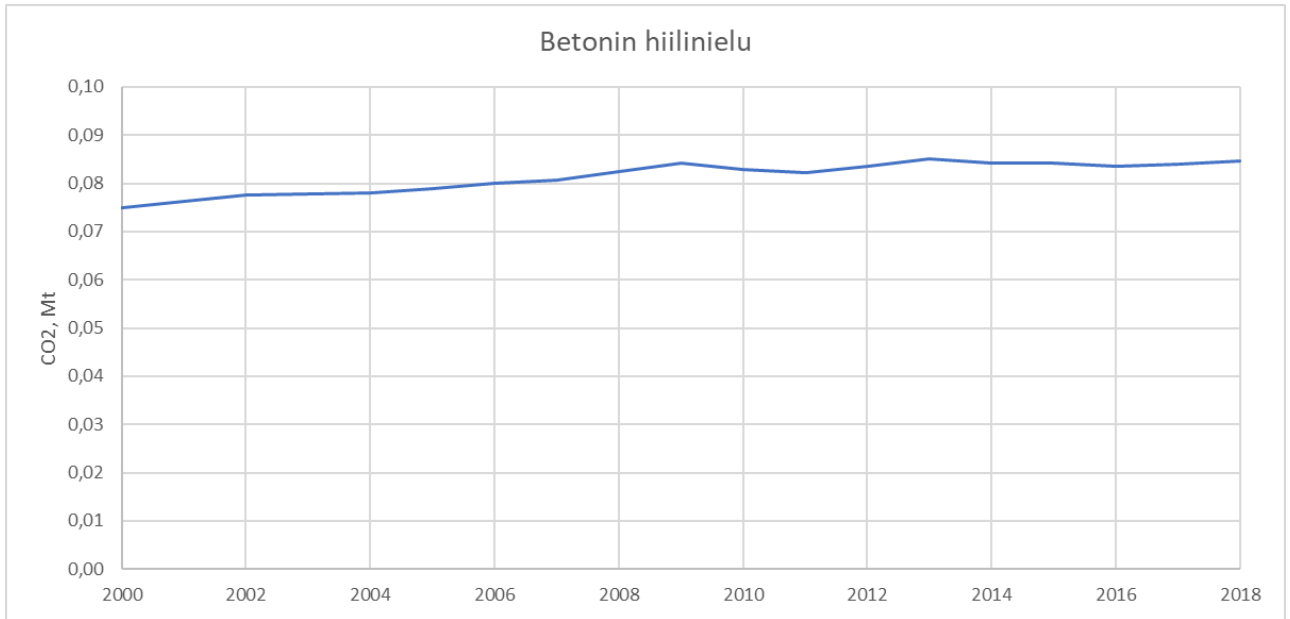
Vuonna 2018 Suomen betonikannan hiilivarasto oli 3,8 miljoonaa tonnia hiilidioksidia; tämä on kasvanut suhteellisen tasaisesti n. 2 %:n vuosivauhtia viimeisten 20 vuoden aikana. Tässä laskennassa ei ole vielä huomioitu kierrätysbetonin osuutta.



Kuva 9: Suomen betonikannan hiilivaraston kehitys vuosien 2010 ja 2018 välillä

Vuonna 2018 Suomen betonikannan hiilinielu on n. 56 000 tonnia hiilidioksidia ko. vuoden aikana. Tässäkään lukemassa ei ole huomioitu kierrätysbetonin osuutta, joka on luokkaa 76 000 t vuodessa





Kuva 10: Suomen betonikannan hiilinielun kehitys vuosien 2018 ja 2000 välillä

