

Grönare betong med mindre avfall

-Koldioxidfångst genom karbonatisering av återvunnet slamavfall
från betongproduktion

Fredrik Roos | Byggnadsmaterial | LTH | Lunds universitet



Grönare betong med mindre avfall

-Koldioxidfångst genom karbonatisering av återvunnet
slamavfall från betongproduktion

Fredrik Roos



LUND
UNIVERSITY

Master Thesis, Report 5129, Division of Building Materials, Faculty of Engineering, Lund University, Lund, 2023

Examensarbete, Rapport 5129, Avdelningen Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund, 2023

Grönare betong med mindre avfall -Koldioxidfångst genom karbonatisering av återvunnet slamavfall från betongproduktion

Greener concrete with less waste -Carbon dioxide capture through carbonation of the recycled sludge waste from concrete production

Fredrik Roos

Report 5129
ISRN LUTVDG/TVBM-23/5129-SE

Antal sidor/Number of pages: 40
Illustrationer/Illustrations:17

Sökord/Keywords

Betong, cement, ballast, återvunnet byggmaterial, koldioxid, karbonatisering

Concrete, cement, aggregate, recycled building material, carbon dioxide, carbonation

© Copyright: Division of Building Materials, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2023
Avdelningen Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2023.

Byggnadsmaterial
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

www.byggnadsmaterial.lth.se

Division of Building Materials
Faculty of Engineering
Lund University
P.O. Box 118
SE-221 00 Lund
Sweden
www.byggnadsmaterial.lth.se/english

Sammanfattning

Då man producerar cement släpps koldioxid ut från både förbränningen av bränslet och kalcineringen av kalksten för att bilda bränd kalk. En del av koldioxiden, motsvarande den som släpps ut vid kalcineringen, kommer kunna absorberas av den härdade betongen. Denna process kallas karbonatisering och rör sig som en front från betongens yta och inåt.

Ett sätt som ibland används för att bygga miljövänligare är att återanvända krossad betong från demolerade betongstrukturer till ballast till nyblandad betong. En betongvägg som även innehåller ballast av betong skulle därmed absorbera mer koldioxid än en betongvägg utan betongballast. Företaget Mapei AB har utvecklat ett pulver som kan suga åt sig överskottsbetongbetong då den roterar i en betongblandarbil och forma den till kulor med varierande storlek. Dessa kulor kan användas som ballast inom ny betongproduktion medan de absorberar koldioxid.

I denna litteraturstudie undersöktes hur mycket koldioxid 1 m³ återvunnen betong kunde karbonatisera då den förvarades för sig själv samt hur mycket den återvunna betongballasten kunde karbonatiseras då den används i en 1 m³ betongvägg. Även förutsättningarna för karbonatisering undersöktes för att kunna lägga fram optimala förhållanden att absorbera koldioxiden.

Om den återvunna betongballasten kunde ersätta ballast av jungfruligt material till 100 % kunde den mesta av koldioxiden från kalcineringen vid cementproduktionen absorberas för en betongvägg. Undersökningen visade även att ballasten kunde karbonatiseras avsevärt innan den tillsattes i betongblandningen om den förvarades med tillgång till luft och även utsattes för väta.

Abstract

When producing cement, carbon dioxide is released from both the combustion of the fuel and the calcination of limestone to form quicklime. Part of this carbon dioxide, corresponding to that released during calcination, can be absorbed by the hardened concrete by a process called carbonation that moves like a front from the surface of the concrete inwards.

One way that is sometimes used to build more environmentally friendly is to reuse crushed concrete from demolished concrete structures as aggregate for freshly mixed concrete. A concrete wall that also contains such recycled concrete aggregate would thus absorb more carbon dioxide than a concrete wall without concrete aggregate. The company Mapei AB has developed a powder that can absorb excess concrete as it rotates in a concrete mixer truck and form it into balls of varying sizes. These balls can be used as aggregate in new concrete production while absorbing carbon dioxide.

In this literature study, it was investigated how much carbon dioxide 1 m³ of recycled concrete could carbonize when it was stored by itself and how much the recycled concrete aggregate could carbonize when it was used in a 1 m³ concrete wall. The conditions for carbonation were also investigated in order to present optimal conditions for absorbing the carbon dioxide.

If the recycled concrete aggregate could replace 100% virgin material aggregate, most of the carbon dioxide from the calcination in cement production could be absorbed for a concrete wall. The investigation also showed that the aggregate could be significantly carbonated before it was added to the concrete mix if it was stored with access to air and also exposed to moisture

Förord

Detta arbete utgör den avslutande delen av högskoleingenjörsprogrammet med inriktning byggteknik och arkitektur vid Lunds Tekniska Högskola och motsvarar 22,5 högskolepoäng.

Arbetet genomfördes i samarbete med Mapei AB och fortsatte på tidigare studier angående produkten Re-Con-Zero. Denna del av studierna fokuserade på Re-Con-Zeros förmåga att absorbera koldioxid från atmosfären.

Ett stort tack riktas till min handledare Peter Johansson samt Mapei ABs kontaktperson Sven-Henrik Norman. Ytterligare tack riktas till Renata Martinez Baeza som hjälpt att hitta relevant information.

Ord- och begreppsförklaring

Ballast

-Sten, grus eller sand med varierande storlekar som används i betong.

Re-Con-Zero

-Pulverprodukt som används för att binda färsk betong och bildar därefter kulor då de cirkulerar i en betongblandare.

Relativ fuktighet

-Förkortas som RF och är ett mått på hur mycket fukt luften innehåller i relation hur mycket fukt luften maximalt kan innehålla vilket styrs av luftens temperatur. Relativ fuktighet mäts oftast i procent.

Kalcinering

Processen då kalksten hettas upp för att bilda bränd kalk vilket man gör cement av. Denna process släpper ut koldioxid.

Karbonatisering

Processen då betongen absorberar koldioxid.

Vattencementtal

Förkortas vct och är förhållandet mellan vatten och cement i betongen avgör hållfastheten permeabilitet och andra viktiga egenskaper hos betongen.

Innehållsförteckning

1 Inledning	9
1.1 Introduktion.....	9
1.2 Bakgrund	9
1.3 Syfte och mål	9
1.4 Problemformuleringar	10
1.5 Avgränsningar	10
1.6 Metod	10
2 Betongens beståndsdelar	11
2.1 Cement	11
2.2 Ballast	12
2.3 Vatten	13
2.4 Tillsattsmaterial	13
2.5 Betongballast från returbetong.....	13
3 Cementpastans kemiska reaktioner	15
3.1 Hydratieringens kemiska process.....	15
3.2 Karbonatiseringens kemiska process	15
4 Koldioxidupptagning under betongens bruksskede	17
4.1 Förutsättningar för karbonatisering.....	17
4.2 Ekvationer för karbonatiseringsdjupet.....	18
4.3 Ytskiktens inverkan på karbonatiseringshastigheten	20
4.4 Tillsattsmaterialens inverkan på karbonatiseringshastigheten	21
4.5 Mätning av karbonatiseringsdjup med hjälp av fenolftalein	22
4.6 Ekvation för koldioxidupptag, metod 1	24
4.7 Koldioxidupptag för cement, metod 2	27
4.8 Karbonatisering av krossad betong och återvunnen ballast	32
4.9 Utsläpp och upptag av 1 m ³ betong	33
5. Diskussion	37
7. Slutsats	38
8. Referenser	39

1 Inledning

1.1 Introduktion

Då betong har många eftertraktade egenskaper, så som hög tryckhållfasthet och enkelt att forma som man vill, används den i stora mängder för konstruktioner som byggnader, vägar och broar. Det är orsaken till att betong är den näst mest använda produkten i världen efter vatten. Den årliga produktionen låg år 2021 på 4,4 miljarder ton globalt (Statista, 2023) där Sverige stod för ca 4,6 miljoner m³ för husbygge och 1,6 miljoner m³ inom infrastruktur siffror för 2020 från (svensk betong).

En av egenskaperna som gör betong så eftertraktat är även att ingredienserna är förhållandevis enkla att hitta i naturen. Vatten, sand, grus, sten och ingredienserna (kalksten och lera) till att tillverka cement.

Enligt (Lehne & Preston, 2018) släpper cementtillverkningen ut 8 % av de globala koldioxidutsläppen. Omkring 40 % av dessa som följd av upphettning av ugnarna med fossila bränslen och 50 % till följd av den kemiska reaktionen (Aylard & Hawson, 2002). Utsläppen av växthusgaser är något som man försöker minska och det finns flera ideer på hur koldioxidutsläppen från betongindustrin kan minskas. En väg att gå är att använda förnybara bränslen till förbränningsugnarna men i detta arbete ska vi istället undersöka hur betongen faktiskt absorberar koldioxid under sin livscykel.

Då betongen är i kontakt med luft återgår nämligen den koldioxid som ursprungligen var bunden till kalkstenen och bildar något som liknar kalksten på nytt. Detta fenomen kallas karbonatisering. Med tiden rör sig koldioxiden djupare och absorberas även längre in.

Även om man vill minska utsläppen av växthusgaserna är det inte alltid fördelaktigt att betongen återupptar koldioxiden. Allteftersom betongen karbonatiseras sänks pH-värdet som en front från betongens yta och inåt. I de konstruktioner som innehåller armering kan detta leda till att armeringen rostar.

1.2 Bakgrund

Det är vanligt då betong körs ut till en byggarbetsplats att det antingen har beställts för stor volym betong eller att det helt enkelt har lagts till en marginalmängd för att säkerställa att betongen räcker för avsett ändamål. Detta innebär att betongblandarfordonen kör tillbaka till tillverkarna med en oanvänd produkt vilket kan motsvara 3-5 % av all betong som skickas ut från betongfabriken. Denna betong måste i sin tur tvättas ur bilarna vilket förbrukar vatten samt leder till att en del betong måste läggas på deponi utan att användas.

Företaget Mapei AB har utvecklat en produkt med namnet Re-Con Zero. Produkten är ett pulvermedel innehållande en superabsorberande polymer som kan skölja ur blandartrummorna där det suger åt sig den blöta betongen och bildar korn med varierande storlek. Dessa korn kan man sedan, efter att betongen torkat, använda som ballastmaterial. På detta sätt absorberar även ballasten koldioxid.

1.3 Syfte och mål

I denna rapport kommer betongens karbonatiserande förmåga undersökas för att få en översikt i hur mycket koldioxid som kan tas upp av återvunnen betongballast.

1.4 Problemformuleringar

- Vilka yttre förhållanden krävs för att karbonatiseringen ska ske mest effektivt med hänsyn till omgivande syresättning och fukthalt.
- Hur kan man maximera koldioxidbindningen av återvunnen ballast.
- Är den potentiella koldioxidbindningen tillräckligt stor för att kunna räknas med i en miljöpåverkansanalys där återvunnen ballast ersätter jungfruligt material i en kubikmeter betong.

1.5 Avgränsningar

Då betong förekommer i så pass många användningsområden, klimat, former och med olika recept, är det svårt att avgöra karbonatiseringen för varje specifik tillämpning. Det har tagits fram en rad olika uträkningar genom åren men här tas endast ett par formler i åtanke. Fokus riktas mot att undersöka och redovisa för ett optimalt koldioxidupptag. Då produkten är förhållandevis ny, är tillgänglig information begränsad.

1.6 Metod

Eftersom laborativa studier med syfte att studera betongs karbonatiserande egenskaper kan ta år att genomföra kommer detta arbete endast genomföras som en litteraturstudie med teoretiska resultat.

2. Betongens beståndsdelar

Som tidigare nämnts är betongen uppbyggd av flera olika beståndsdelar.

2.1 Cement

Cement är den mest karakteristiska ingrediensen i betong och fungerar som bindemedel genom att reagera med vatten för att sedan härda. Den vanligaste typen kallas Portlandcement och uppfanns i England på 1800-talet av Joseph Aspdin. Dock använde redan romarna ett cementliknande material kallat puzzolaner gjort på vulkanisk sand och aska. Med detta material kunde de bygga många av de antika strukturer vi kan se än idag. Efter romarrikets fall glömdes denna teknik bort tills dokument skrivna av den romerske arkitekten Vitruvius hittades i ett kloster i Schweiz år 1414 (Burström 2018).

Ett led i cementtillverkningen är att hetta upp kalksten (CaCO_3) till ca $900\text{ }^\circ\text{C}$ vilket bildar bränd kalk (CaO) varvid koldioxid (CO_2) släpps ut. Sedan tillsätts andra ämnen som kiseldioxid (SiO_2), aluminiumoxid (Al_2O_3) och järnoxid (Fe_2O_3) och blandningen hettas upp till $1450\text{ }^\circ\text{C}$ för att bilda portlandcement i form små kulor som kallas cementklinker. Dessa kulor krossas sedan och för att reglera cementets reaktion med vatten tillsätts ca 5 % gips (CaSO_4). Då cement kan användas i så många olika tillämpningar kan det ibland krävas typer och klasser med olika mekaniska, fysikaliska eller kemiska egenskaper (Burstöm 2018).

De tre viktigaste huvudtyperna är:

CEM I

Denna typ kallas Portlandcement och innehåller Portlandklinker med upp till 5 % kalkstensfiller som tillsatsmedel för att bland annat förbättra betongens arbetbarhet. Denna typ kan delas in i olika kvaliteter som standard Portlandcement (Std P), och snabbhärdande cement (SH), som namnet antyder härdar snabbt med 50 % högre hållfasthet efter första dygnet än standardcement. Ytterligare kvaliteter är anläggningscement med långsam värmeutveckling som passar bra till grova konstruktioner och vit Portlandcement med lågt innehåll av järnoxid används då man vill ha ljusa betongprodukter och färgat cement tillverkas genom att tillägga 2-10 % metalloxyder.

CEM II

Kallas sammansatta Portlandcement och innehåller minst 65 % Portlandklinker och kan innehålla tillsatsmaterialen masugnsslagg, flygaska, silikastoft och kalksten. Dessa tillsatsmaterialen har lagts till för att minska cementets miljöpåverkan. De svenska produkter som kan inräknas till denna typ är Bascement och Byggcement från Cementa AB.

CEM III

Kallas slaggcement och innehåller 19-64 % portlandklinker där resterande är masugnsslagg och har en långsam hållfasthetsutveckling men där sluthållfastheten är lika hög eller högre än Portlandcement.

Övriga huvudtyper är:

CEM IV

Kallad puzzolancement innehåller 45-89 % Portlandsklinker och resterande utgörs av puzzolant material.

CEM V

Kallad kompositcement innehåller 20-64 % Portlandsklinker och övrigt består utav slagg och pozzolant material.

Varken CEM IV eller CEM V används normalt i Sverige. (Ezmorrod 2022)

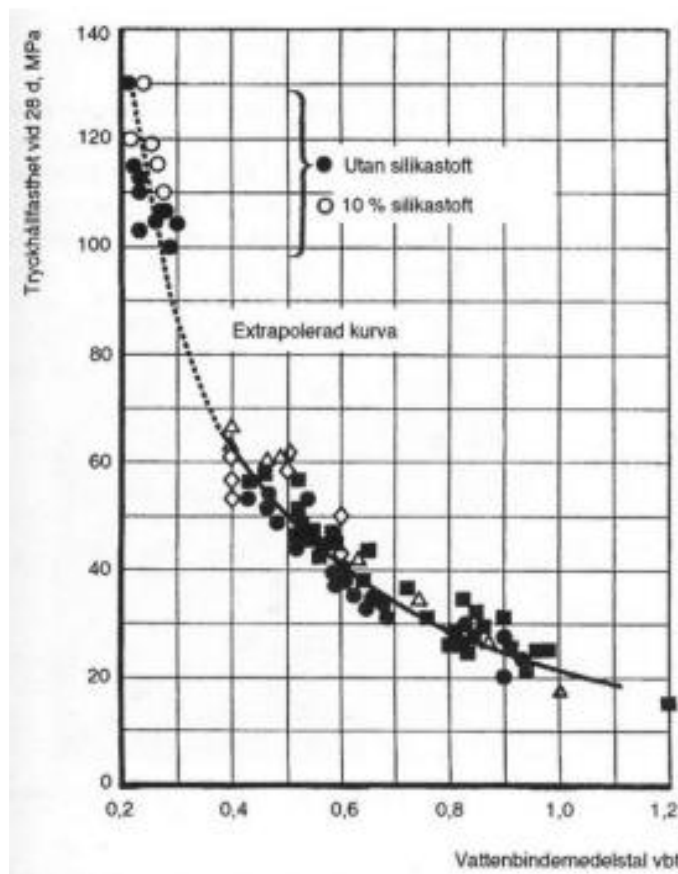
2.2 Vatten

Cementet härdar genom att reagera med vatten. Det ställs inga högre krav på vattnets kvalitet och generellt kan vanligt dricksvatten användas. Saltvatten eller avloppsvatten bör undvikas då den kan ha negativ påverkan på armeringens beständighet. Proportionen mellan vatten och cement i blandningen kallas *vattencementtalet* och beräknas med formeln:

$$vct = \frac{W}{C} \quad (\text{ekv. 1})$$

Där W är mängden vatten mätt i kg, kg/m^3 eller l/m^3 och C är mängden cement mätt i samma enheter som W (Burström 2018).

Med en liten mängd vatten i blandningen fylls en större andel av porerna ut av cementgelen vilket ger en tätare betong med högre tryckhållfasthet (se figur 1).



Figur 1: Samband mellan tryckhållfasthet och vattenbindemedelstal $vbt \approx vct_{ekv}$ (Burfors 2018 s.299)

2.3 Ballast

Förutom cementpastan krävs även stenmaterial i olika storlekar kallat ballast för att tillverka betong. Kornstorlekarna kan variera från 0,001 mm upp till 64 mm i diameter och består av sand, grus eller större krossat bergmaterial. Det är viktigt att storlekarna varierar då de mindre kornen fyller upp hålrummen mellan de större kornen och de utrymmen som ej går att fylla med ballast fylls istället upp av cementpastan (Burström 2018). Upp till 70% av betongen kan bestå av ballastmaterial (H. Y. Haji & Y. Beigi 2017).

2.4 Tillsatsmaterial: Ofta blandas restprodukter från industrier in i betongen vilket kan reducera klimatpåverkan genom minskad cementanvändning. Masugnsslagg är en restprodukt av järntillverkning med ett CO₂ utsläpp på 30 kg per ton producerat slagg jämfört med 730 kg CO₂ från ett ton producerad byggcement. För att skilja järnet från övriga material tillsätts kalk i smältprocessen. Slaggprodukten är därför nära släkt med Portlandcement då den innehåller många liknande ämnen som kalk (CaO), kiselsyra (SiO₂) och aluminiumoxid (Al₂O₃). Det som gör slaggen så användbar i cementblandningen är att den fungerar som cement men den reagerar så pass långsamt med enbart vatten att den måste kombineras med Portlandcement (Thomas Betong). Mald granulerat masugnsslagg kan ersätta 10-60 % av cementvikten. Flygaska är en restprodukt från kolkraftverk och innehåller främst kiseldioxid. Flygaska kan ersätta 5-30 % av cementen. Silikastoft är en restprodukt från tillverkning av legering till stål och kan tillsättas med 3-10 % räknat på cementvikten. Silikastoft består av glasig kiseldioxid (Burström 2018).

2.5 Betongballast från returbetong

Under 2021 genomfördes laborativa tester av Re-Con-Zero (förkortat RCZ) ballastens egenskaper av (H. Svensson 2021). Testerna begränsades till hållfasthetsklass C30/37.

Returbetong benämns den betong som blivit över vid formgjutning på byggarbetsplatser och som måste transporteras tillbaka till betongfabriken. Vid gjutning av betong brukar man tillägga en säkerhetsmarginal på 2-3 % som sedan skickas tillbaka med betongbilen. Vid mindre aktörer kan även större felberäkningar ha gjorts vilket genererar mer returbetong. Då betongblandarfordonet återvänder till betongfabriken behöver det därför tömma ut denna restbetong samt sköljas ur med vatten. Restbetongen används ofta inte till något vidare syfte utan lagras på deponi. Tvättslammet som genereras måste även det slängas på deponi och kan uppgå till tusentals ton per år från en normalstor betongfabrik.

Re-Con-Zero fungerar som ett pulver vilket suger åt sig betongen och bildar korn i varierande storlek vilka kan återanvändas i form av ballast i kommande betonggjutningar. Med dagens branschstandard EN-206 är det tillåtet att använda upp till 5 % återvunnen ballast från restbetong (Mapei AB 2021). RCZ-ballasten som bildas kan användas till så kallad torrtvätt då den tillsammans med ytterligare RCZ-pulver tillsätts till andra blandartunnor som behöver rengöras. Då kornen fortfarande har en absorberande effekt och kan de suga åt sig slam som annars hade dumpats i slambassänger. I denna process ökar kornens volym då de drar åt sig slammet.

Labbtестerna som genomfördes visade att då vanlig grovballast ersattes till 100% med RCZ-ballast ökade tryckhållfastheten i samtliga tester. Även undersökningar av mängden Ca gjordes vilket gav resultat som visade på att RCZ absorberade ca 91 % av den ursprungliga Ca mängden.

Tabell 1: Labbtest av tryckhållfasthet på traditionell byggbetong med naturlig grovballast och byggbetong med grovballast ersatt av RCZ-ballast (H. Svensson 2021).

Typ	vikt (g)	Tryckhållfasthet (MPa)
C30/37 grundrecept	2381	50,1
100 % ersatt grovballast prov 1	2292	59,4
100 % ersatt grovballast prov 2	2282	57,5

3. Cementpastans kemiska processer

3.1 Hydrateringens kemiska process

De viktigaste mineralerna i cementen är bränd kalk, kiseldioxid, aluminiumoxid och järnoxid. De förkortas oftast som:

CaO=C, SiO₂=S, Al₂O₃=A och Fe₂O₃=F. Sammansatt som klinkermineraler skrivs de i sin tur som:

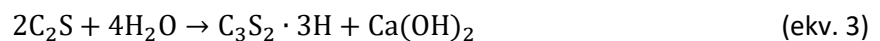
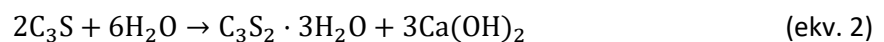
Alit, C₃S = (3CaO SiO₂)

Belit, C₂S = (2CaO SiO₂)

Aluminat, C₃A = (3CaO Al₂O₃)

Ferrit C₄AF = (4CaO Al₂O₃ Fe₂O₃)

Då vatten tillsätts är reaktionerna med C₃S och C₂S viktigast för hållfastheten i ett tidigt skede. För dessa reaktioner skrivs som:



På detta sätt får man kalciumsilikathydrat (C₃S₂ · 3H₂O) förkortat som (C-S-H) och kalciumhydroxid (Ca(OH)₂) även kallad (CH) vilket tillsammans utgör cementpastan fungerar som bindemedel som håller ihop betongen (Burström 2018).

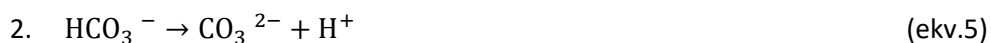
Förutom C-S-H och CH bildas också ettringit (CaO)₃(Al₂O₃)(CaSO₄)₃·32H₂O även förkortat AFt då aluminat reagerar med vatten och gips. Ettringit omvandlas efter ca 1 dygn till monosulfat (Ca₄Al₂O₆(SO₄)·14H₂) förkortat AFm.

3.2 Karbonatiseringens kemiska process

Karbonatiseringsprocessen fungerar i korthet i omvänd ordning som hydratiseringsprocessen och kan förklaras med formlerna:



För att en reaktion ska kunna ske mellan kalciumhydroxiden och koldioxiden krävs flera steg där det första innebär att koldioxiden löses upp i vatten.



Karbonatjonen (CO₃²⁻) kan reagera med Ca joner



Med de två fria H⁺ jonerna kan sedan 2OH⁻ bilda 2 H₂O



Då mängden Ca minskar börjar kalciumhydroxiden lösas upp

Den sammanfattade reaktionen kan då skrivas:



Under karbonatiseringsprocessen kan tre olika former av kalciumhydroxiden formas. Som kalцит vilket är den vanligaste formen som även kallas kalkspat samt aragonit och vaterit.

I takt med reaktionen förbrukas CH vilket minskar koncentrationen av Ca. Då det inte finns mer kalciumhydroxid att lösas med kommer istället C-S-H börja lösas upp. Kalciumcilikathydratet börja kompensera genom att släppa ifrån sig Ca-joner och CaO/SiO₂ förhållandet förändras. Vid okarboniserad betong ligger proportionerna mellan CaO/SiO₂ på 1,65 jämfört med 0,85 för betong som karbonatiserats (L Andersson 2016).

I ung betong ligger pH-värdet över 12,5 men då C-S-H släpper ifrån sig Ca-jonerna sjunker pH-värdet. Vid pH 11,6 och 10,6 kommer monosulfat (AFm) respektive ettringit (AFt) att lösas upp och när pH halten sjunkit lägre än 9,2 kommer inga av de ursprungliga fria kalciumjonerna finnas kvar (L. Andersson 2016). När karbonatiseringsfronten når armeringsjärnen och pH-värdet sjunker under 9 börjar järnet rosta vilket kan leda till sprickbildning. Detta kommer dock inte behandlas vidare i denna rapport

Karbonatiseringen sker främst genom gasdiffusion då luft lätt kan tränga in i betongens porer. Även om diffusionen sker genom luften krävs vatten för att reaktionen ska kunna ske, på grund av detta är RF viktig. Om betongen befinner sig under vatten sker en mycket långsammare process än gasdiffusion och om det inte finns någon genomströmning av vatten, t.ex. om betongen är vattentät i strukturer som dammar, står vattnet i stort sett stilla utan att transportera bort jonerna. Då är jontransporten istället styrd utav långsam diffusion, dvs koncentrationskillnaderna mellan den mättade porlösningen och den omättade omgivningen (Rosenqvist 2017).

I takt med karbonatiseringen har mätningar visat en liten volymökning hos betongen. Man antar här att det är tomma porer som fylls igen, något som i sin tur försvårar för koldioxiden att tränga djupare in. Slutligen kommer ca 75 % av CaO kunna karbonatiseras och resterande kommer fortsätta vara bundet till CSH (Lagerblad 2005).

4. Koldioxidupptagning under betongens bruksskede

4.1 Förutsättningar för karbonatisering

De faktorer som krävs för att karbonatisering ska kunna ske och med vilken hastighet processen sker kan beskrivas enligt (Fagerlund 1992) som följande:

Mängden karboniserbart material

Den mängd kalciumhydroxid som betongen innehåller avgör hur mycket som kan karboniseras. Ju större mängd kalciumhydroxid desto mer fylls porerna igen när reaktionen med koldioxiden sker vilket gör att karboniseringsfronten rör sig långsammare.

Koldioxidhalten i omgivningen

Med högre CO₂-koncentration i omgivande luft t.ex i vissa industrilokaler påskyndas karboniseringsprocessen i betongen.. I takt med att koldioxidhalten ökar kommer alltså även karboniseringshastigheten att öka. De strukturer som byggs idag och i framtiden kommer därför ha en ökad karboniseringshastighet.

Betongens täthet

Karboniseringen kan endast röra sig så pass snabbt som koldioxiden kan tränga in i betongen (gasdiffusion) i form av porer. Med en tätare betong (vilket beror på vct) går denna process långsammare. Alltså är ett lägre vattencementtal i direkt korrelation med en minskad karboniseringshastighet.

Relativ fukthalt

Enligt ekvation 8 måste koldioxiden lösas upp i vatten innan den kan reagera med kalciumhydroxiden. Därför sker karbonatisering mycket långsamt i torra klimat men det går även långsamt i mycket fuktiga miljöer då diffusion av gaser sker långsammare i vatten än i luft. De förhållandena där karboniseringshastigheten som högst är inomhusklimat med ett RF på 50-60 %.

Då betong används i så pass stor utsträckning i olika användningsområden kommer inte all betong ha samma förutsättningar för karboniseringen. Enligt (Lagerblad 2005) kan användningsområdena delas upp i:

- Hus
- Broar
- Dammar
- Hamnar
- Vägbottnar
- Betongvägar
- Betongprodukter

Inom dessa användningsuppgifter kan betongen delas upp ytterligare beroende på vilken uppgift den har. Detta kan delas upp i:

Utomhusbetong oskyddad

Detta är den betong som kommer befinna sig på utsidan av bl.a byggnader i form av husväggar eller broar och framförallt vara direkt utsatt för regn vilket kommer innebära en långsammare karbonatisering. Dock kan man även här dela upp betongen i ett vågrätt läge och i ett lodrätt läge. Betong som befinner sig i ett lodrätt läge borde torka snabbare efter regn än den betong som befinner sig i ett vågrätt läge.

Utomhusbetong skyddad från regn

Även denna betong kommer befinna sig på utsidan av byggnader eller broar men är placerad så att den ej kommer vara utsatt för regn. Kan t.ex. kan vara väggar skyddade av tak eller undersidan av broar. Skillnaden mellan den skyddade och den oskyddade betongen kommer framför allt vara mängden vatten som den utsätts för medan RF och CO₂-halt bör vara liknande.

Inomhusbetong

Detta kommer framför allt vara inomhusväggar eller bjälklag av betong som ej utsätts för regn. Koldioxidhalten och temperaturen inomhus är ofta högre än utomhus men även RF i normalt inomhusklimat brukar ligga på 40-60 %. Dessa förutsättningar leder till att betongen inomhus kommer karbonatiseras snabbare än betong i utomhusklimat.

Nedgrävd betong

Detta kan vara betonggrunder eller betongrör som befinner sig under marken. Den kommer ej vara i direkt kontakt med luft eller regn men kommer utsättas för vattnet i marken och biologisk nedbrytning i marken tillsätter ytterligare CO₂. Om detta måste dock undersökas vidare.

Betong under vatten

Framför allt hamnkonstruktioner eller pelare till bropelare under vattennivån tillhör denna kategori. Då porerna i betongen är igentäppta av vattnet kommer karbonatiseringen här ske mycket långsamt.

Betong i industri

Detta kan t.ex. vara skorstenar i fabriker eller spannmålssilon där en högre halt koldioxid finns. Detta kommer leda till en snabbare karbonatisering. (Fagerlund 1992)

4.2 Ekvationer för karboniseringsdjupet

Då cementen i betongens yta karbonatiseras, mättas den och kan inte reagera med mer koldioxid. Koldioxiden måste därför röra sig längre in för att reagera med cementen som ligger bakom den karbonatiserade ytan. Allt eftersom denna karbonatiserade front rör sig längre in i betongen har koldioxiden en längre sträcka att färdas för att nå okarboniserad cement där koncentrationen av koldioxid är noll. Transportsträckan för koldioxiden att röra sig igenom den karbonatiserade fronten beräknas med ekvation 9.

$$q_m = D_c \frac{c_{free} - 0}{x} \quad (\text{ekv. 9})$$

Där q_m är hastigheten som koldioxiden rör sig genom karboniseringsfronten (m^3s^{-1}).

D_c är koldioxidens diffusivitet (m^2s^{-1}) i den mättade betongen.

C_{free} är koldioxidens koncentration i luften (g m^{-3})

x är karbonatiseringsfrontens djup i betongen (m^{-3}).

Tiden det tar för koldioxidfronten att röra sig en strecka dx kan beräknas med ekvation 10.

$$q_m \cdot dt = c_{abs} \cdot dx \quad (\text{ekv. 10})$$

Där (dt) är flödet under ett tidsintervall (m^3s^{-1}) och (dx) är sträckan (m^{-3}) som fronten förflyttas.

C_{abs} är den mängd koldioxid som cementen absorberar (g m^{-3}).

Ekvation 9 och 10 kan skrivas ihop till ekvation 11.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{D_c \cdot C_{free}}{c_{abs}} \cdot \frac{1}{x} \quad (\text{ekv. 11})$$

Ekvation 11 kan lösas med ekvation 12.

$$x = \sqrt{\frac{2D_c \cdot C_{free}}{c_{abs}}} \cdot \sqrt{t} \quad (\text{ekv. 12})$$

Där t står för tid (s)

Koldioxidkoncentrationen i luften är välkänd, men man vet oftast inte diffusiviteten eller hur mycket koldioxid som binds i en betong. Ekvation 12 används då enbart för att visa att det finns en proportionallitet mellan inträngningsdjupet och roten ur tiden som har gått sedan en konstruktion färdigställdes och man använder då o praktiken:

$$x = k \times \sqrt{t} \quad (\text{ekv. 13})$$

Där:

k är faktor som varierar med vilket typ av betong som använts i form av hållfasthetsklasser samt i vilket omgivning betongen befinner sig i (inomhus, utomhus, skyddat av regn, under vattenytan etc.)
 k -faktorn för olika betongvarianter och miljöer visas i tabell 2,3 och 4.

t är tiden (år)

Tabell 2: Föreslagna k-värden för betongytor med betongtyp CEM / (Lagerblad 2005). Att utgå från cementtyp CEM / fungerar utmärkt då den nästan enbart innehåller Portlandsklinker och en mycken liten del kalkstensfiller. Detta gör det lättare att utgå från ett grundvärde.

Hållfasthetsklass	<15MPa	15-20MPa	25-35MPa	>35MPa
Betong under vatten	2mm/ $\sqrt{\text{år}}$	1.0mm/ $\sqrt{\text{år}}$	0,75mm/ $\sqrt{\text{år}}$	0,5mm/ $\sqrt{\text{år}}$
Nedgrävd betong	3mm/ $\sqrt{\text{år}}$	1,5mm/ $\sqrt{\text{år}}$	1,0mm/ $\sqrt{\text{år}}$	0,75mm/ $\sqrt{\text{år}}$
Oskyddad betong/utsatt för regn	5mm/ $\sqrt{\text{år}}$	2,5mm/ $\sqrt{\text{år}}$	1,5mm/ $\sqrt{\text{år}}$	1,0mm/ $\sqrt{\text{år}}$
Skyddad betong utomhus	10mm/ $\sqrt{\text{år}}$	6mm/ $\sqrt{\text{år}}$	4mm/ $\sqrt{\text{år}}$	2,5mm/ $\sqrt{\text{år}}$
Inomhusbetong	15mm/ $\sqrt{\text{år}}$	9mm/ $\sqrt{\text{år}}$	6mm/ $\sqrt{\text{år}}$	3,5mm/ $\sqrt{\text{år}}$

Data i Tabell 2 är tagen från nordiska klimat. Vad man kan utläsa i Tabell 2 är också att med högre hållfasthet minskar karbonatiseringshastigheten för samtliga klimat i och med att den är tätare med lägre porositet. Betong som befinner sig under vatten, speciellt då vattnet är stillastående, har det långsammaste karbonatiseringshastigheten då den främst drivs av långsam vätskediffusion som beskrivits i kapitel 3.2. Karbonatiseringen av den nedgrävda betongen antas främst bero på nedbrytningen av biologiskt material som avger CO₂ (Lagerblad 2005).

4.3 Ytskiktets inverkan på karbonatiseringshastigheten

Då betong i många miljöer inte står i fri kontakt med luften utan har någon typ av beläggning i form av färg eller tapet kommer de varken vara utsatta av samma RF eller CO₂-halt som omgivningen och det kommer att sakta ner diffusionsprocessen. Ju tjockare ytskikt desto långsammare kommer karbonatiseringen att gå. I fall som dessa måste man anta en justering av k-värdena för betongen.

Tabell 3: Justering av k-värde för betong med någon typ av ytbehandling enligt (Lagerblad 2005)

Betong inomhus	$k \times 0,7$
Betong utomhus	$k \times 0,9$
Betong för infrastruktur	$k \times 1,0$

För betongen i inomhusmiljö som oftast har ett täckande skikt av färg eller tapet har karbonatiseringshastigheten reducerats med mellan 30-50 % vilket sammanfaller med tester gjorda av svenska betonginstitutet (Lagerblad 2005) med vilket man måste multiplicera k-värdet med 0,7. För betong i utomhusmiljö brukar färgen skilja sig åt från den man använder i inomhusmiljö och att den oftast skyddar från regn vilket håller betongen torrare till viss mån hjälper karbonatiseringen. I detta fall antas en reduktion i k-värdet med 10 %. För betong i infrastruktur används ytbehandling som både kan försvåra diffusion men även hålla den torr. Då dessa faktorer tar ut varandra kommer k-värdet förbli detsamma.

4.4 Tillsatsmaterialens inverkan på karbonatiseringshastigheten

Som beskrivits i kapitel 2.4 innehåller betong ofta tillsatsmaterial av olika anledning. Silikastoft vilket består av glasig kisedioxid (SiO_2) kan användas i en utsträckning på 3-10 % av cementvikten främst i CEM II.

Tabell 4: Justering av k-värden baserat på tillsatsmaterialens inverkan på betongen. Dessa värden är antaganden och måste verifieras med vidare studier (Lagerblad 2005).

Cementviktt %	<10	10-20	20-30	30-40	40-60	60-80
kalkstensfiller		$k \times 1,05$	$k \times 1,10$			
Silikastoft	$k \times 1,05$	$k \times 1,10$				
Flygaska		$k \times 1,05$		$k \times 1,10$		
Granulerad Masugnsslagg	$k \times 1,05$	$k \times 1,10$	$k \times 1,15$	$k \times 1,20$	$k \times 1,25$	$k \times 1,30$

Cement med kalkstensfiller antas ha samma porositet som 100 % Portlandsklinker. Då kalkstensfiller i huvudsak är ett icke-reagerande tillsatsmaterial kommer de att bidra till att det finns en mindre andel cement som kan reagera med koldioxiden. Detta i sin tur gör att karbonatiseringshastigheten är snabbare då ingen reaktion med kalkstensfillern minskar porositeten och koldioxiden kan tränga in i betongen snabbare. Då mängden silikastoft som tillsätts ökar från 5 % till 10 % antas en ökning av karbonatiseringshastigheten med ca 5 %.

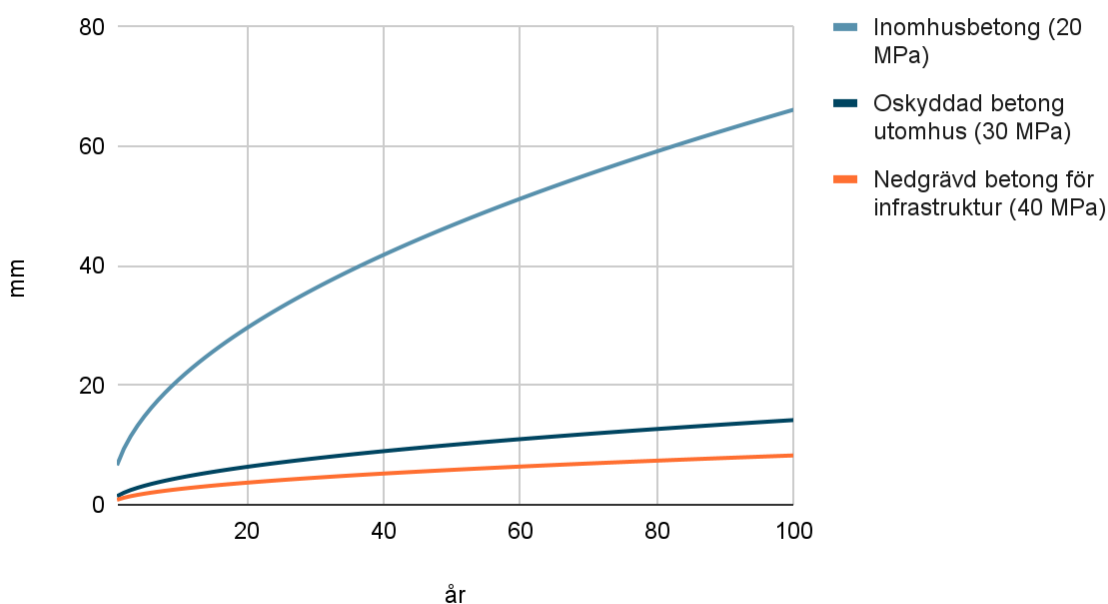
Flygaska som innehåller silika (kiseldioxid, i detta sammanhang förkortat S), kommer vid tillförelse i cementen reagera med kalciumhydroxiden (i detta sammanhang förkortat CH). Denna reaktion bildar C-S-H och minskar samtidigt andelen CH. Beroende på vilken flygaska som används fungerar den även som utfyllnadsmaterial vilket ger samma effekt som kalkstensfillern. Det granulerade masugnsslagget kan ersätta stora mängder av cementen, särskilt i CEM III. Denna typ av cement kommer även ha större porer vilket i sin tur gör karbonatiseringen lättare. Även masugnsslagget kommer ha en liknande effekt som kalkstensfillern. (Lagerblad 2005). Som exempel på dessa k-värden med justeringar kan ett ungefärligt värde tillsättas som:

Ex 1:-Inomhusbetong med hållfasthetsklass 20MPa med mängden tillsatsmaterial 15 % kalkstensfiller ger: $k = 9 \times 0,7 \times 1,05 \times \sqrt{t}$

ex 2:-Oskyddad utomhusbetong med hållfasthetsklass 30MPa med 15 % flygaska ger: $k = 1,5 \times 0,9 \times 1,05 \times \sqrt{t}$

ex 3:-Nedgrävd betong för infrastruktur med hållfasthetsklass 40MPa och 10 % granulerat masugnsslagget ger då: $k = 0,75 \times 1,0 \times 1,10 \times \sqrt{t}$

Karbonatiseringsdjup



Figur 2: Karbonatiseringsdjup under 100 år för 3 olika typer av betong.

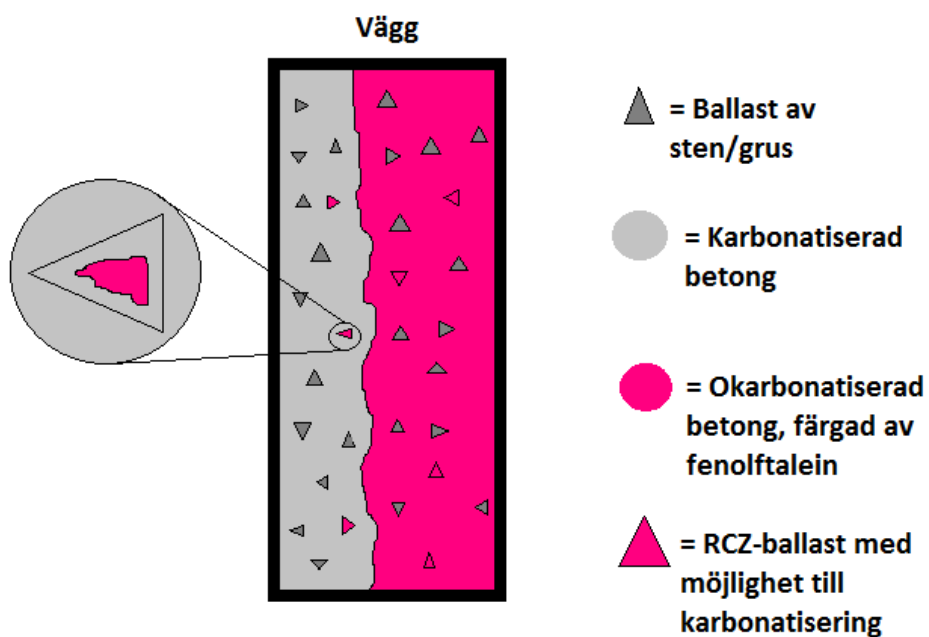
4.5 Mätning av karbonatiseringsdjup med hjälp av fenolftalein.

För att i praktiken undersöka karbonatiseringsdjupet har man ofta använt fenolftalein $C_{20}H_{14}O_4$ som sprejas på utsågade tvärsnitt från betongkonstruktionen. Numera används oftast thymolftalein eftersom fenolftalein anses vara cancerogent, men i denna rapport visas exempel med fenolftalein eftersom det ger mycket tydligare färgskillnader. För nygjuten betong ligger pH-värdet på >12,5 och sjunker succesivt då C-S-H släpper ifrån sig sina Ca-joner. Betongen som fortfarande har ett pH-värde på 12,5 kommer visa en rosalila färg efter fenolftaleinet sprutas på medan karbonatiserad betong ej visar någon färgändring. Se figur 2 och figur 3.



Figur 3: Betong som har utsatts med accelererad karbonatisering med en tydlig karbonatiseringsfront (L Andersson 2016)

Viktigt att notera i figurer 3 är att ingen ballast kan karbonatiseras då den består av natursten/grus och visar därför små ytor som är opåverkade av fenolftaleinet och behåller sin naturliga färg. Om ballasten istället består av återanvänd betong borde större mängd kunna karbonatiseras enligt figur 4.



Figur 4: Vägg med RCZ-ballast i karbonatiseringsskede

4.6 Ekvation för koldioxidupptag, metod 1

För att beräkna mängden koldioxid som sedan tas upp av betongen kan man använda sig av ekvation 14 som föreslås av (Lagerblad 2005).

$$\text{CO}_2\text{upptag} = 0,75 \times C \times \text{CaO} \times \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CaO}}} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad \text{(ekv. 14)}$$

0,75 är mängden CaO som kan karbonatiseras (75 %)

C är mängden Portlandcement i kg per m³

CaO är mängden CaO i cementen (wt %)

M är molvikt

M_{CO_2} är 44g/mol

M_{CaO} är 56g/mol

Mängden CaO i Portlandcement uppskattas av (Babatobe Albert m.fl 2006), (ur Rehman m.fl 2018) och (Dvorkin m.fl 2018) till mellan 62-67 %. I denna rapport används medelvärdet 65 % CaO.

För att bestämma mängden Portlandcement i kg per m³ används tabell 5 (om cementhalten inte är känd).

Tabell 5: Mängd Portlandcement per m³ (Concrete center, Jenny Burrridge)

Hållfasthet betong (MPa)	cement kg/m ³
15-20	220
20-25	240-280
25-30	240-300
28-35	260-320
30-37	280-340
35-45	300-360

Ekvation 14 kan sedan skrivas om till ekvation 15 enligt (E Possan 2017):

$$\text{CO}_2\text{upptag} = y \times A \times 0,75 \times C \times \text{CaO} \times \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CaO}}} \quad \text{(ekv. 15)}$$

y är karbonatiseringsdjupet (m)

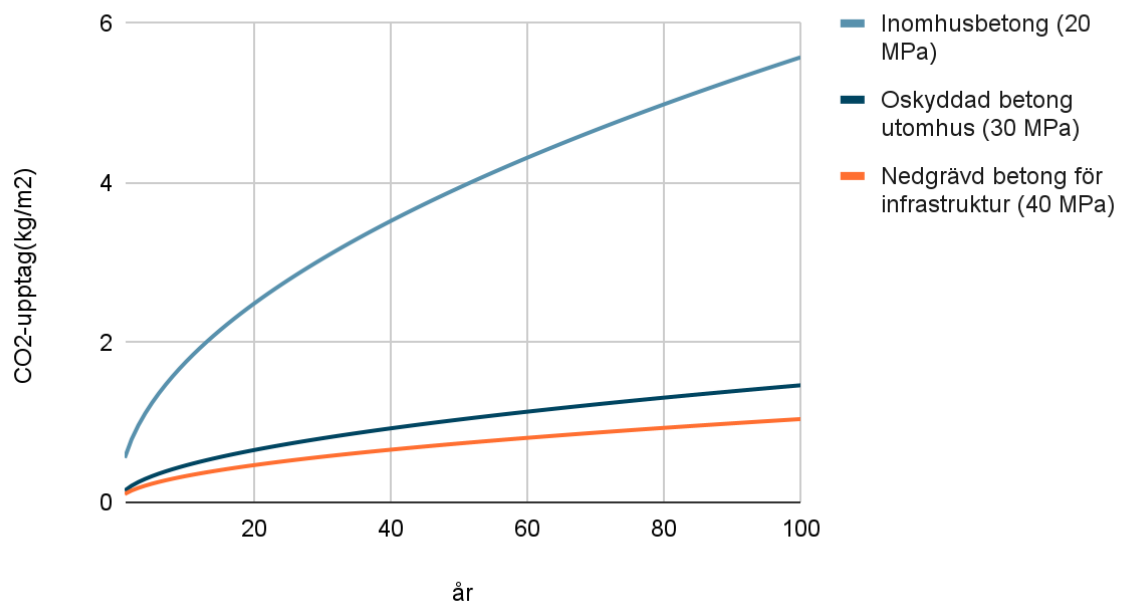
A är betongyta som utsätts för karbonatisering (m^2)

Med ekvation 13 och ekvation 14 kan vi räkna på ex 1 från kapitel 4.4.

ex 1: Innomhusbetong med ett täcksikt av färg och hållfasthetsklass 20 MPa med mängden tillsatsmaterial 15 % kalkstensfiller.

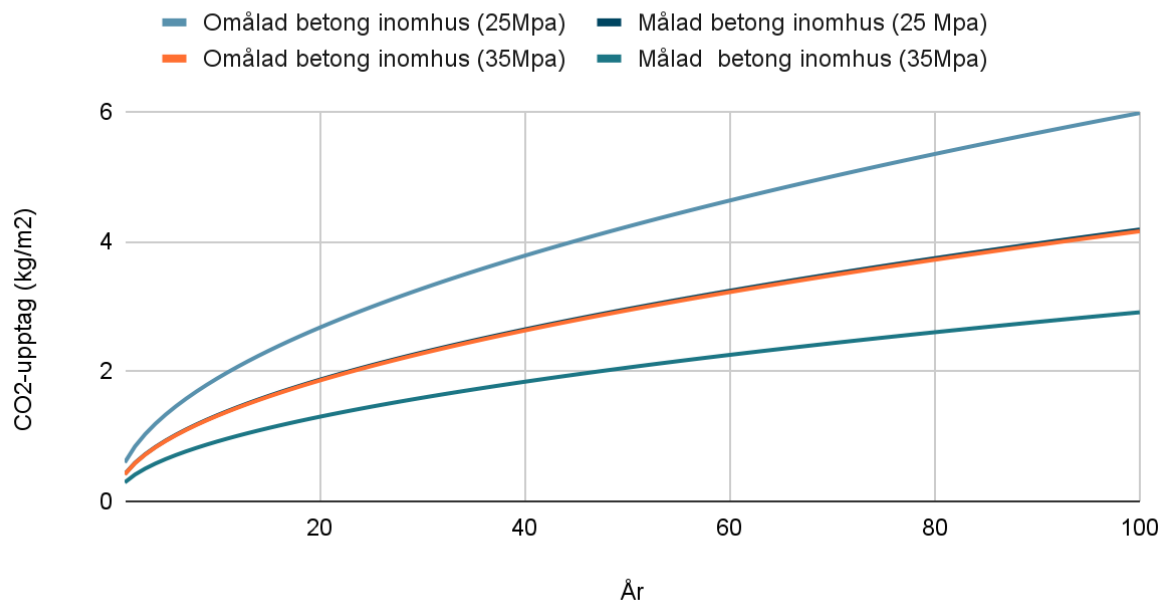
Om vi räknar på en betongyta per m^2 får vi koldioxidupptaget enligt ekvation 14:

Koldioxidupptag



Figur 5: Koldioxidupptag för 3 olika typer av betong där karbonatiseringsdjupet är taget från figur 2.

Koldioxidupptag



Figur 6: Koldioxidupptagning för en vägg med olika typer av betong med eller utan ytbehandling. Beräknad med metod 1, jämför med figur 7.

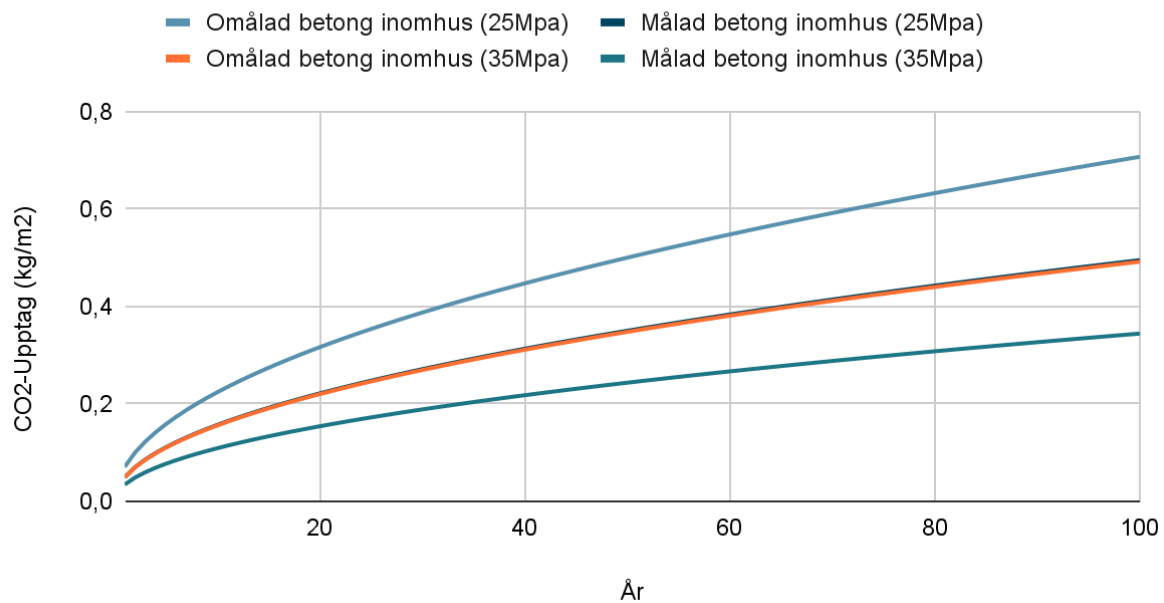
Om cementen utgör ca 25 % och ballasten utgör ca 65 % av betongen där upp till 5 % av ballasten består av återanvänd ballast kan ett ungefärligt värde räknas ut för hur mycket re-con-zero som kan karbonatiseras under en byggnads livstid. I undersökningar absorberade RCZ ballasten upp 91 % av den ursprungliga Ca mängden.

För att kunna ge RCZ-ballasten med dessa förutsättningar ett värde för koldioxidupptag under bruksfas kan följande ekvation skrivas:

$$CO_2 - \text{upptag}_{RCZ} = CO_2 - \text{upptag}_{\text{ursprung}} \cdot 4 \cdot 0,65 \cdot 0,05 \cdot 0,91 \quad (\text{ekv. 16})$$

Där ($CO_2\text{-upptag}_{\text{ursprung}}$) är koldioxidupptaget för cementen inom användningsområdet (vägg, grundplatta, bjälklag etc.) som RCZ-ballasten används. Dessa värden ändras då förhållandet mellan cement och ballast ändras samt mängden RCZ-ballast som används.

Koldioxidupptag RCZ-ballast



Figur 7: Koldioxidupptagningen för RCZ-ballast i en vägg under 100 års tid. Beräknad med ekvation 15. Jämför med figur 9.

4.7 Koldioxidupptag för cement, metod 2

I en studie av (I Löfgren 2021) användes ekvation 17.

$$\text{CO}_2\text{-upptag} = (k_1 \times \sqrt{t}/1000) \times (\text{CO}_2 - \text{upptag}_{\text{tcc}}) \times C \times \text{Carb}_i \text{ (kgCO}_2\text{/m}^2\text{)} \quad (\text{ekv.17})$$

k_1 är karbonatiseringshastigheten (mm/ $\sqrt{\text{år}}$)

t är tiden (år)

$\text{CO}_2\text{-upptag}_{\text{tcc}}$ är maximala teoretiska $\text{CO}_2\text{-upptaget}$ i kg $\text{CO}_2\text{/kg}$ cement. För Portlandcement (CEM I) är det 0,49.

C är cementinnehållet i betongen (kg/m³)

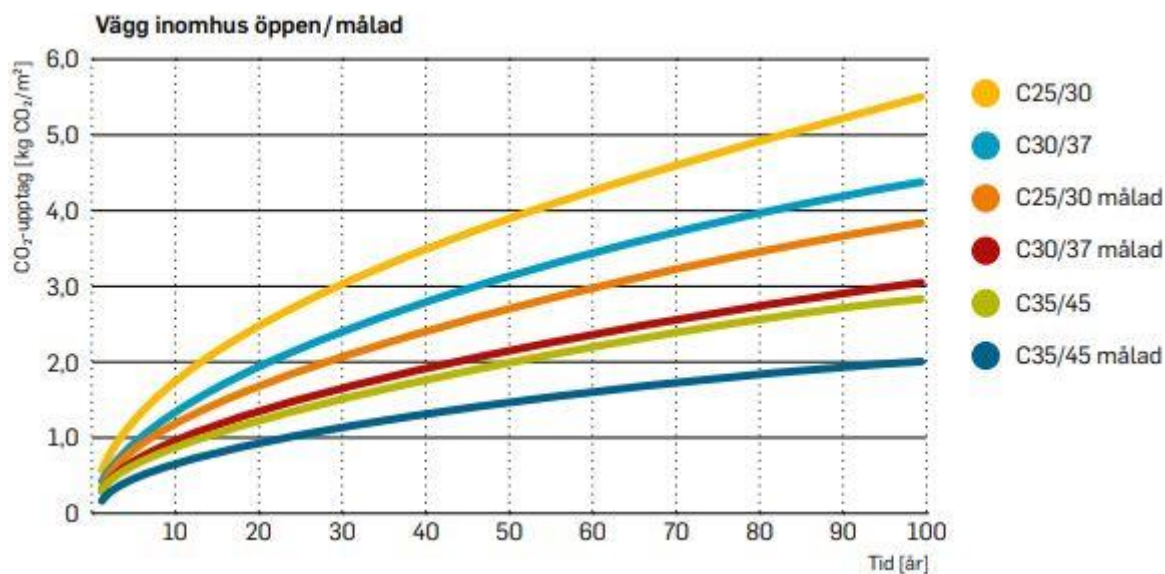
Carb_i är karbonatiseringsgraden (%)

För detta exempel används värden liknande de i tabell 2 för att avgöra karbonatiseringshastighet och karbonatiseringsgrad.

Tabell 6: Karbonatiseringshastigheten ($\text{mm}/\sqrt{\text{år}}$) samt karbonatiseringsgraden (%) för cement i olika användningsområden och med olika hållfasthetsklasser (I Löfgren 2021).

hållfasthet	<15Mpa	15-20Mpa	25-30Mpa	>35Mpa	
	$k_1(\text{mm}/\sqrt{\text{år}})$	$k_1(\text{mm}/\sqrt{\text{år}})$	$k_1(\text{mm}/\sqrt{\text{år}})$	$k_1(\text{mm}/\sqrt{\text{år}})$	Carb ₁ (%)
Anläggning					
Regnutsatt	-	2,7	1,6	1,1	85
Skyddad	-	6,6	4,4	2,7	75
I mark	-	1,1	0,8	0,5	85
Hus					
Utomhus Regnutsatt	5,5	2,7	1,6	1,1	85
Utomhus skyddad	11,0	6,6	4,4	2,7	75
Inomhus beläggning	11,6	6,9	4,6	2,7	40
Inomhus utan beläggning	16,5	9,9	6,6	3,8	40
I mark	-	1,1	0,8	0,5	85

Med värdena från tabell 6 kan sedan koldioxidupptaget beräknas för cement med olika funktioner.

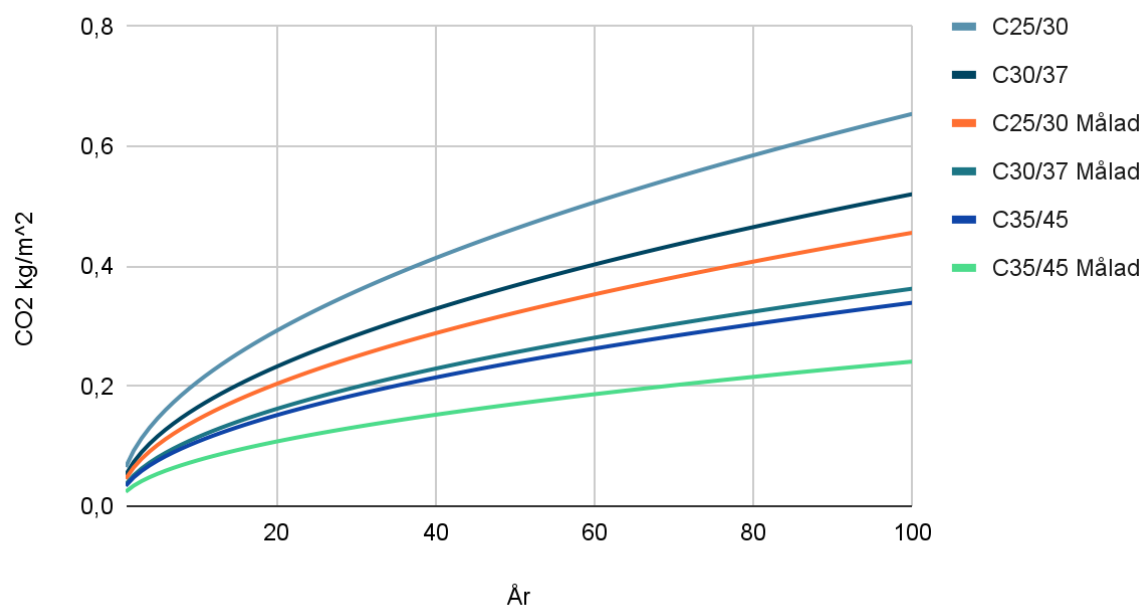


Figur 8: Koldioxidupptag för vägg med olika typer av hållfasthetsklasser under en tidsperiod på 100 år (I Löfgren 2021).

Genom att använda ett exempel ur figur 5 där en vägg utan beläggning och hållfasthetsklass C20/25 kan ta upp 5,5 kg CO₂/m² på 100 år kan upptaget för RCZ-ballasten beräknas med ekvation 16:

$$5,5 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2 \times 4 \times 0,65 \times 0,05 \times 0,91 = 0,65 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$$

Koldioxidupptag kg/m²

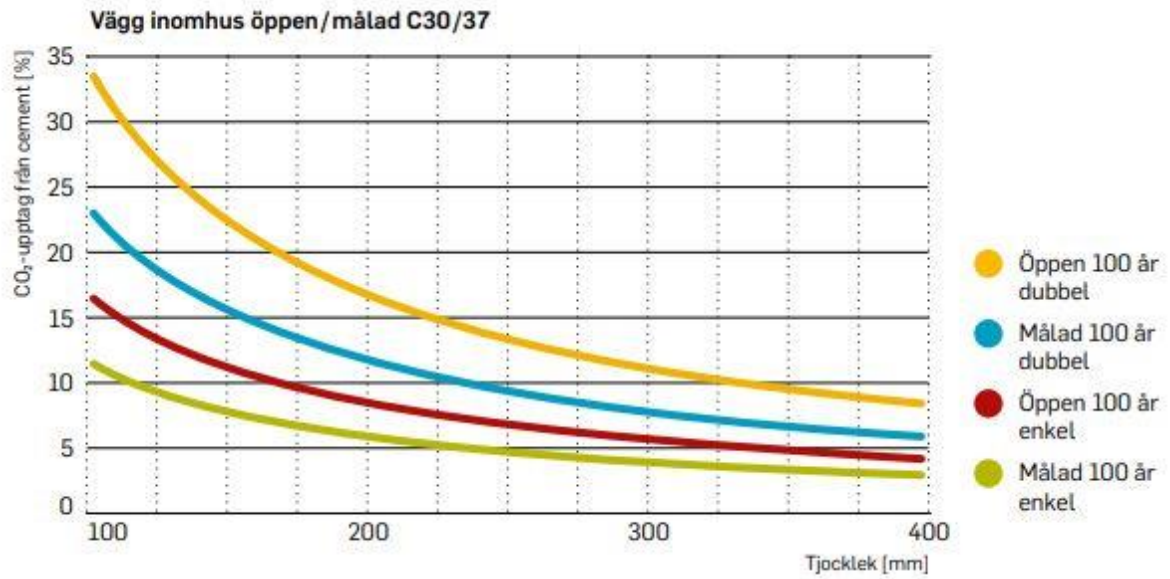


Figur 9: Koldioxidupptag för RCZ-ballast i vägg inomhus med olika typer av hållfasthetsklasser beräknat med ekvation 16.

Karbonatiseringen förekommer inte bara på ena sidan av ett betongelement utan jobbar inåt från alla öppna sidor som CO₂ förekommer på vilket innebär att t.ex. en vägg karbonatiseras både från sidan som befinner sig utomhus och sidan som befinner sig inomhus. Då förutsättningarna och beläggningar oftast är olika skiljer sig även hastigheten för hur snabbt de olika sidorna karbonatiseras.

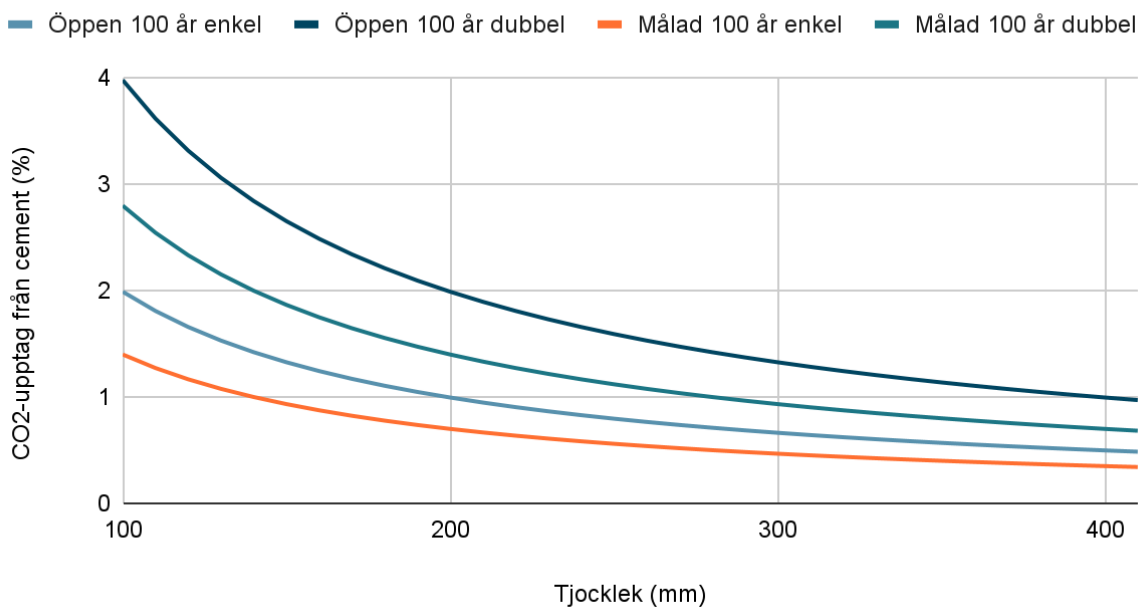
Tabell 7: Koldioxidupptag från vägg som exponerats på en eller båda sidor under 50 eller 100 års tid. Procenthalterna visar hur stor andel av den ursprungliga koldioxiden som släppts ut vid cementproduktionen för att tillverka väggen som åter blivit bunden av cementen.

	50 år (kg CO ₂ /m ²)	100 år (kg CO ₂ /m ²)	t=200mm 50 år exponering		t=200mm 100 år exponering	
			enkel	dubbel	enkel	dubbel
<u>Vägg utan beläggning</u>						
C20/25 (C=285 kg/m ³)	3,9	5,5	8,9 %	17,8 %	12,6 %	25,2 %
C30/37 (C=340 kg/m ³)	3,1	4,4	5,9 %	11,9 %	8,4 %	16,8 %
C35/45 (C=385 kg/m ³)	2,0	2,9	3,4 %	6,8 %	4,8 %	9,7 %
<u>Vägg med beläggning</u>						
C20/25 (C=285 kg/m ³)	2,7	3,9	6,2 %	12,4 %	8,8 %	17,7 %
C30/37 (C=340 kg/m ³)	2,2	3,1	4,1 %	8,3 %	5,9 %	11,7 %
C35/45 (C=385 kg/m ³)	1,4	2,0	2,4 %	4,9 %	3,4 %	6,9 %



Figur 10: Koldioxidupptag i % av ursprunglig koldioxidutsläpp för vägg inomhus med olika tjocklekar och med eller utan beläggning efter 100 år (I Löfgren 2021).

Vägg inomhus/målad C30/37



Figur 11: Koldioxidupptag för RCZ-ballast i % av ursprunglig koldioxidutsläpp för vägg inomhus med olika tjocklekar med eller utan beläggning.

4.8 Karbonatisering av krossad betong och återvunnen ballast

Betongkonstruktioner antas nå sin brukslivslängd vid ca 50-100 år efter vilket de sedan demoleras och krossas. Då en ökad blottad yta ökar karbonatiseringen är krossad betong ett optimalt sätt att återuppta koldioxid. Om betongen låts utsättas för luft efter demoleringen karbonatiseras den troligtvis till sin fulla potential (vilket är omkring 75 % av befintlig Ca i cementen) inom 10 år (Lagerblad 2005).

Med rätt förvaring kan ballastkornen från Re-Con-Zero fungera på samma sätt som krossad betong och därmed kunna absorbera en betydande mängd koldioxid redan innan de tillsätts som ballast och omsluts med ytterligare betong.

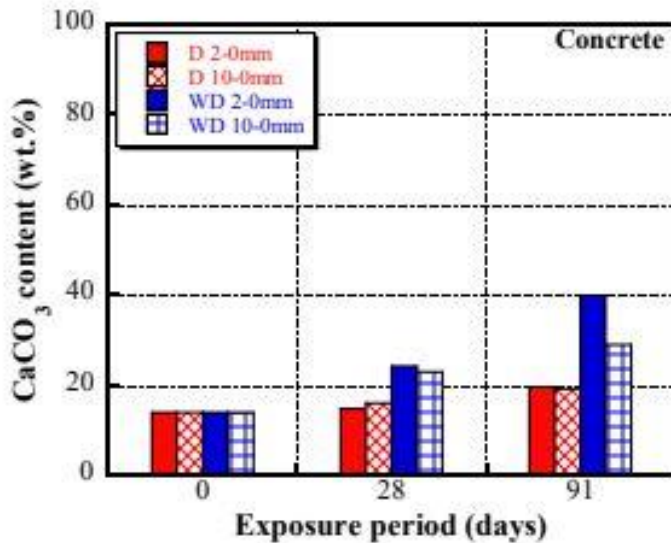
Tabell 8: Koldioxidupptag efter 18 månaders tid för 1 m³ krossad betong i olika storlekar utomhus, skyddat från regn. För de yttersta 25% av volymen för kornstorleken 0-4 mm skiljde karbonatiseringsgraden sig jämfört med det inre lagret som uppgjorde 75% av volymen. Beräkningarna gjordes genom att mäta andelen cementpasta för varje kornstorlek (Stripple 2021).

Kornstorlek mm	Relativ mängd	Cementpasta*		Cement	Karbonatiseringsgrad %	CO ₂ -upptag(kg CO ₂ /m ³ betong)**
		%	kg			
0-4 yttre lager	0,25	25	75	53	55	14
0-4 inre lager	0,25	25	225	158	20	15
4-8	0,15	10	36	25	25	4
8-16	0,35	5	42	29	30	4
Total	1.0	378	265			37

*Cementpasta, kg 350/500. Cement 350 kg/m³, vatten 150 kg/m³, w/c=0,43, 70 % cementpasta.

**Cement – karbonatiseringsgrad - 0,49

Om ekvation 17 antas, bör resultaten i tabell 8 motsvara ett koldioxidupptag på 18 kg/m³ på 4 månader. Tester genomfördes av (Kikuchi och Kuroda 2011) och gav resultatet i figur 12.



Figur 12: CaCO₃-innehåll för krossad betong från 8 olika återvinningsstationer i Tokyo som förvarades i normalt –torrt- (D) klimat eller spredades med vatten en gång per vecka (WD).

Testerna i figur 12 visar att efter 3 månader innehöll betongen i genomsnitt 30 % CaCO₃. I detta exempel beräknade man att av 1000 kg cementpulver fick man efter att ha reagerat med vatten och låtit härda, cirka 1350 kg härdad cementpasta. Det innebär att 30 % av 1350 kg härdad cementpasta innehöll 405 kg CaCO₃. Då molvikten för CaCO₃=100,1 och CO₂=44,0 upptog därför dessa prover ca 180 kg koldioxid.

Ett betongrecept som använder 300 kg cementpulver per m³ betong skulle då ett upptag på $((300\text{kg}/\text{m}^3)/(1350\text{kg}/\text{m}^3)) \times 180\text{kg}/\text{m}^3 = 40\text{kg}/\text{m}^3$ CO₂ vilket stämmer bra överrens med värdena i tabell 8.

4.9 Utsläpp och upptag av 1 m³ betong

För att tillverka 1000 kg cement används 1100 kg kalksten (Toshifumi Kikuchi and Yasuhiro Kuroda 2011). Per 1000 kg cement släpper produktionen ut mellan 700-800 kg CO₂ (Naturskyddsföreningen 2022). Bränsle för förbränningen står för 40 % och kemiska reaktionen för 50 % (World Business Council for Sustainable Development). Detta motsvarar 280-320kg och 350-400 kg respektive.

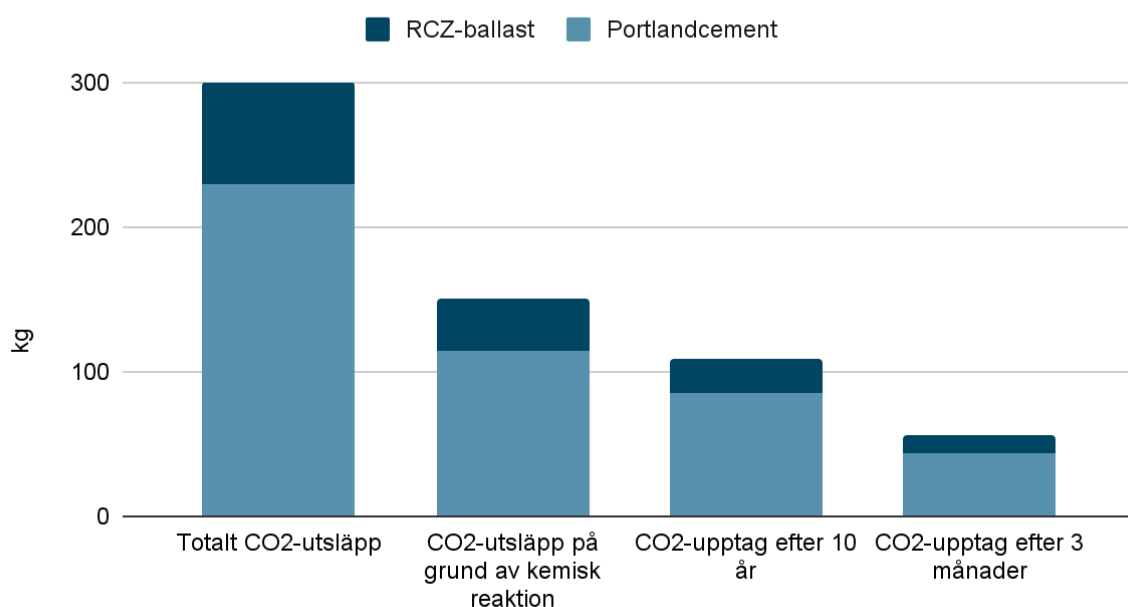
1 m³ betong kan generellt ha ingredienserna enligt tabell 9:

Tabell 9: Generellt betongrecept.

Material	kg/m ³ betong
vatten	165
cement	300
sand	800
grus	1050

Enligt receptet i tabell 9 skulle 210-240 kg CO₂ totalt släppas ut för att tillverka 1 m³ betong varav 105-120 kg CO₂ på grund av den kalcineringen. Receptet i tabell 9 kräver sammanlagt 1850 kg ballast. Om 5 % består av RCZ-ballast, används ytterligare 93 kg betong som tillverkats i ett tidigare skede, vilket släpper ut 65-75 kg CO₂ varav omkring 35 kg CO₂ till följd av den kalcineringen. 75 % av cementens befintliga Ca kommer att karbonatiseras inom 10 år om luft kan strömma igenom efter demolering enligt kapitel 3.2. Uträkningarna av (Kikuchi och Kuroda 2011) visade att 3 månader efter demolering av betongkonstruktionerna hade 38 % av utsläppen till följd av den kemiska reaktionen under produktionsskedet återtagits av cementen. Det skulle innebära ett koldioxidupptag på omkring 105-115 kg CO₂ efter 10 år samt 50-60 kg CO₂ 3 månader efter demolering. Då RCZ-ballasten innehåller mindre mängd Ca, återtar den troligtvis omkring 10 % mindre koldioxidmängd än vanlig cement.

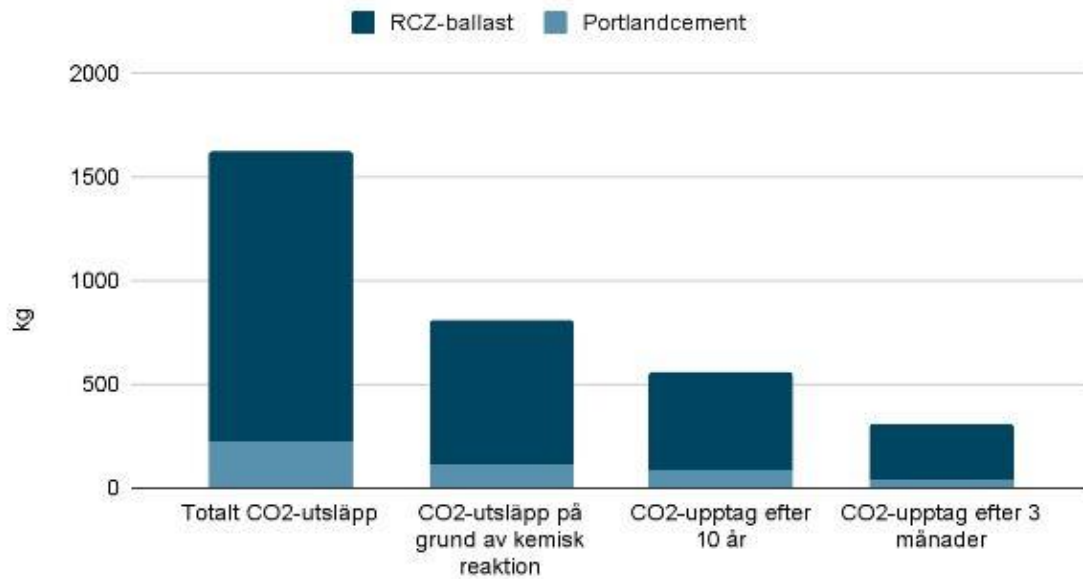
CO₂-utsläpp och upptag per m³ betong



Figur 13: CO₂-utsläpp och upptag för Portlandcement där RCZ-ballast ersätter 5 % jungfruligt material för 1 m³ demolerad betong med recept från tabell 9.

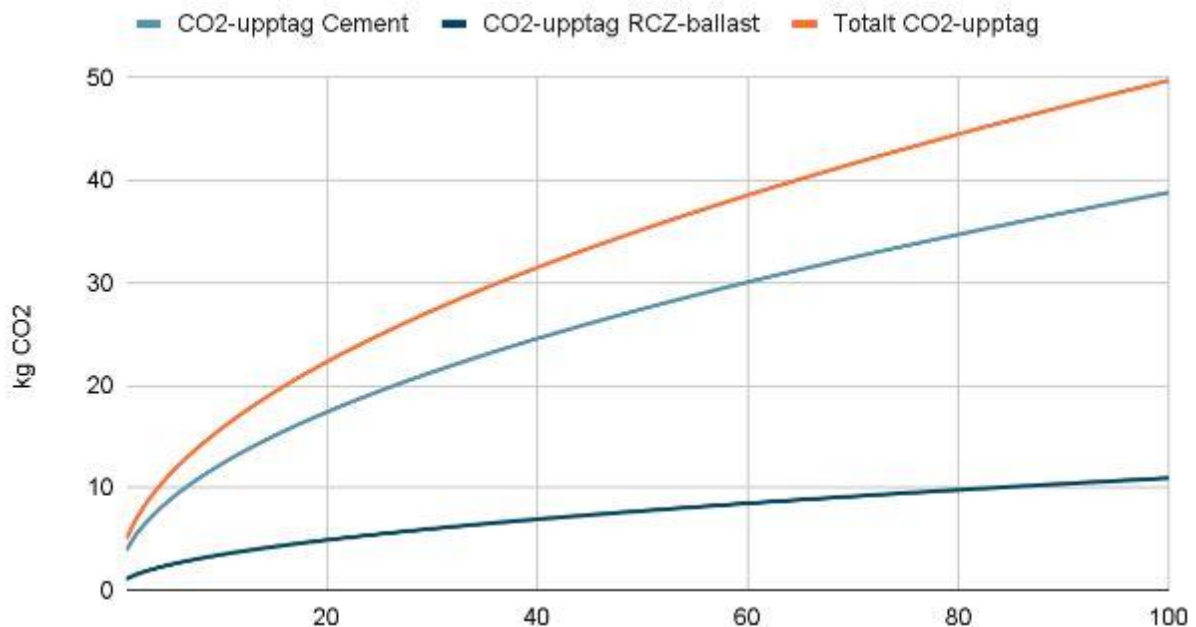
Om återvunnen ballast till fullo skulle ersätta jungfruligt material skulle enligt betongsreceptet i tabell 9, 1295-1480 kg CO₂ släppas ut av betongproduktionen för ballasten. 650-740 kg av denna CO₂ skulle släppas ut som följd av den kemiska reaktionen. Figur 14 visar att RCZ-ballasten har möjlighet att absorbera cirka 450-500 kg CO₂ 10 år efter demolering samt omkring 215-265 kg CO₂ 3 månader efter demolering.

CO₂-utsläpp och upptag per m³ betong

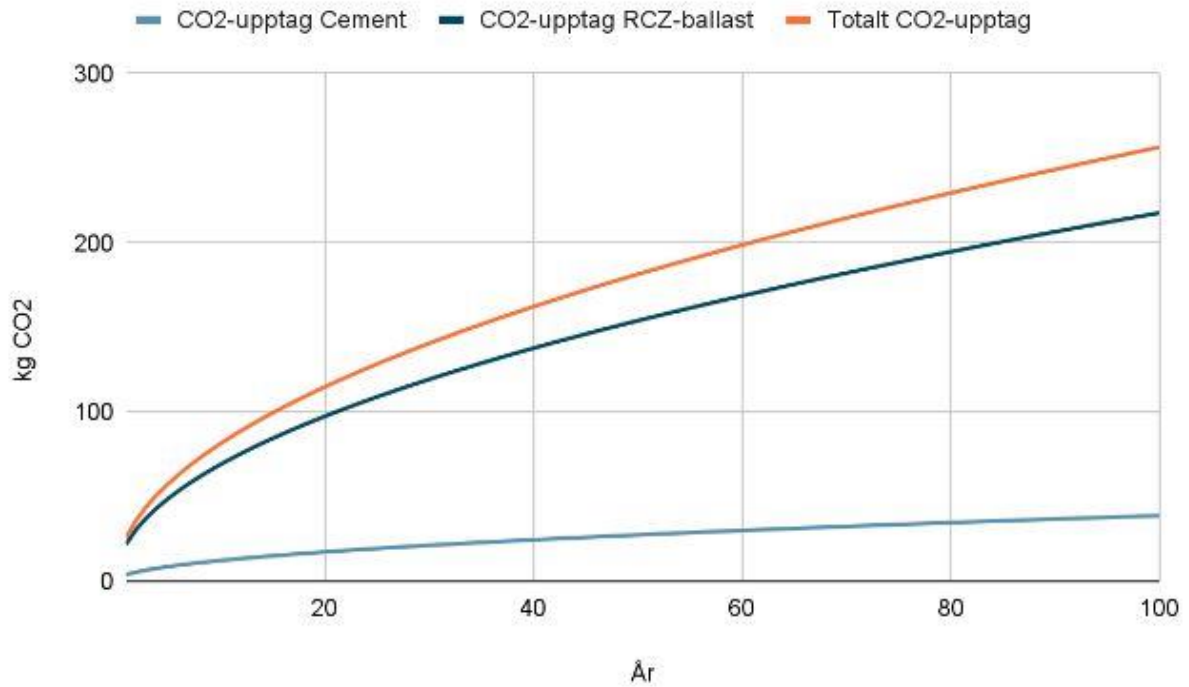


Figur 14: CO₂-utsläpp och upptag för Portlandcement där RCZ-ballast ersätter jungfruligt material till fullo för 1 m³ demolerad betong med recept från tabell 9.

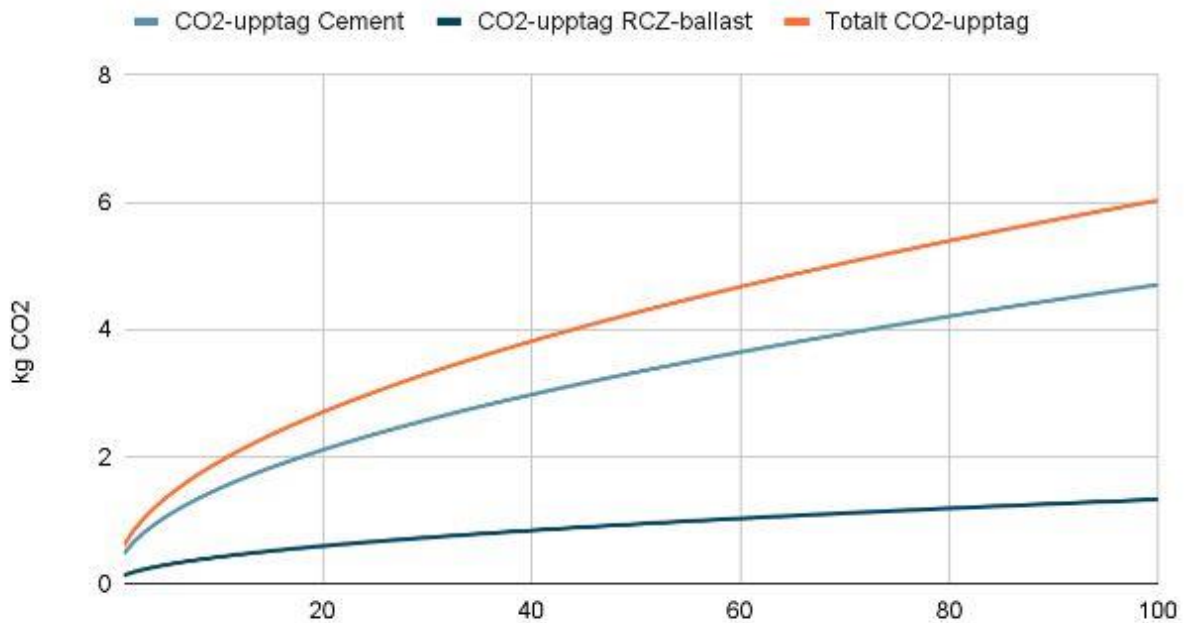
En inomhusvägg av betong kan antas ha en tjocklek på cirka 200 mm. 1 m³ betong räcker därmed till 5 m² betongvägg. Receptet i tabell 9 ger ett vct på 0,55. Enligt (Thomasbetong) ger detta en tryckhållfasthet på 30 MPa.



Figur 15: CO₂-upptaget för Portlandcement med 5 % RCZ-ballast hos en 5 m³ betongvägg utan tillsatsmedel inomhus som karbonatiseras från 2 sidor. Betongreceptet i tabell 9 används.



Figur 16: CO₂-upptaget för Portlandcement där RCZ-ballast till fullo ersätter jungfruligt material hos en 5 m³ betongvägg utan tillsatsmedel som karbonatiseras från 2 sidor. Betongreceptet i tabell 9 används.



Figur 17: CO₂-upptaget för Portlandcement och RCZ-ballast hos en 5 m³ betonggrund utan tillsatsmedel i mark som karbonatiseras från 2 sidor. Betongreceptet i tabell 9 används.

5. Diskussion

Fördelen med RCZ-ballasten, förutsatt att den förvaras på rätt sätt innan användning, är att den kan återta upp till ca 35 % av koldioxiden som släppts ut av kalcinering under en 3 månaders period redan innan det tas i bruk. Efter 10 år antas 70 % av koldioxiden som släppts ut av kalcinering kunna absorberas av RCZ-ballast. Det är värt att tillägga att om överbliven cement dumpas i bassänger eller lagras under jorden försvåras koldioxidupptaget avsevärt. Genom att återanvända det genom ballast kan karbonatiseringshastigheten öka mångfaldigt. Under litteraturstudien användes två beräkningsmodeller för att beräkna hur mycket cementpastan kunde absorbera i ett brukskede samt resultaten från två separata provtagningar av krossad betong för att kunna dra slutsatser till hur mycket RCZ-ballasten skulle kunna absorbera om den ej används. Detta för att kunna jämföra resultaten av båda källorna. Det finns ett flertal andra beräkningsmodeller samt fler provtagningar som kan ge en mer information om koldioxidupptagningsförmågan hos cementpastan men som ej användes för att inte göra arbetet för långt.

Eftersom RCZ-ballasten består av betong innehållande cement, har produktionen även släppt ut koldioxid proportionellt med all annan cement. Absorptionsförmågan av koldioxid antas även vara lägre än för vanlig cement då undersökningar visade att endast 91 % av CaO från den ursprungliga cementen hade bundits till RCZ-ballasten. Det finns för tillfället inte tillräckligt med information för att avgöra hur återvunnen ballast som redan börjat karbonatiseras reagerar då den tillsätts som ballast i våt betong.

Vidare laborativa studier krävs för att både mäta karbonatiseringsdjupet med hjälp av thymolftalein samt mätningar av koldioxidupptaget hos RCZ-ballasten. Även mätningar av återanvänd krossad betong som används som ballast kan göras för att undersöka hur koldioxiden absorberas då ballasten är omsluten av våt betong.

7. Slutsats

Tidigare studier visar att de förhållanden som främst gynnar karbonatiseringen är den relativa fuktigheten i omgivningen samt betongens täthet. Då den relativa fuktigheten når 50-60 %, uppnås optimala förhållanden för snabb karbonatiseringen.

Betongens täthet avgör tryckhållfasteten och bestäms av förhållandet mellan cement och vatten. Ett ökat vct ger fler porer där porväggarna kan reagera med kringliggande koldioxid. Dock krävs det att betongen har en viss tryckhållfasthet för att kunna användas.

Det är även viktigt att låta betongen ha en fri yta mot omkringliggande luft. Då betongen täcks över av färg, tapet eller andra beläggningar bromsas karbonatiseringen in. Även då betongen befinner sig under vatten eller under jord försvåras koldioxidupptaget kraftigt.

-Vad litteraturstudien visar är att precis som vanlig cement kommer troligvis RCZ-ballasten återta en del av koldioxiden som släppts ut vid tillverkningen. Det bästa sätt att få cementen att karbonatisera är att ha så stor kontaktyta med luften omkring som möjligt vilket ger det absolut största koldioxidupptaget per kubikmeter. Detta är lättast genom krossad betong.

-Då RCZ-ballasten enligt tidigare tester innehåller cirka 90 % av cementens ursprungliga Ca kommer den även kunna absorbera cirka 90 % av vad cementen klarar av. När det kommer till bärande konstruktioner säger lagen att endast 5 % av ballasten får vara återvunnen vilket innebär att RCZ-ballastens möjlighet att öka karbonatiseringen av t.ex. en betongvägg ligger på 25-30 % av vad cementen i cementpastan absorberar. För en tidsperiod på 100 år ligger koldioxidupptaget för RCZ-ballasten i en vägg omkring 16 % av koldioxidutsläppet under produktionen.

-Om ballast av jungfruligt material ersätts till fullo av återvunnen betong finns det möjlighet att absorbera upp till 6 gånger av vad cementen i betongens cementpasta på egen hand skulle klara av.

Referenser

Lehne, J. & Preston, F. (2018) *Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete*. Energy, London, The Royal Institute of International Affairs, Chatham House, Environment and Resources Department

<https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/publications/research/2018-06-13-making-concrete-change-cement-lehne-preston.pdf>

Aylard, R. & Hawson, L. (2002) *The cement sustainability initiative ,our agenda for action*.

Switzerland, World business council for Sustainable development

<https://web.archive.org/web/20070714085318/http://www.wbcasd.org/DocRoot/11BetslPgkEie83rTa0J/cement-action-plan.pdf>

Statista, (2023), använd 1 Maj 2023. <https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/>

Svensk Betong, (2020) använd 1 Maj 2023.

https://www.svenskbetong.se/images/Betongindikatorn/2021/Betongindikatorn_resultat_2020_-_hel%C3%A5r.pdf

Andersson, L. (2016) *Koldioxidupptag i betong -Accelererade laboratorieförsök*. Stockholm: Kungliga tekniska högskolan <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:957543/FULLTEXT01.pdf>

Lagerblad, B. (2005) *Carbon dioxide uptake during concrete life cycle – State of the art* Cement och Betong Institutet, Stockholm

Fagerlund, G. (1992). *Betongkonstruktioners beständighet: en översikt* (3:e uppl.). Cementa.

Löfgren, I (2021) *Betydelsen av betongens koldioxidupptag ur ett livscykelperspektiv*. Thomas concrete group. <https://cms.betongarhallbart.se/wp-content/uploads/2021/03/betongens-koldioxid-upptag-lca-hb2101.pdf>

Stripple, H. Ljungkrantz, C. Gustavsson, T. Andersson, R. (2021) *CO2 uptake in cementcontaining products Background and calculation models for implementation in national greenhouse gas emission inventories*. Cementa AB & IVL reseach foundation, Stockholm

<https://www.ivl.se/download/18.34244ba71728fcb3f3f8f9/1622457897161/B2309.pdf>

Rosenqvist, M. (2017) *Bestämning av frisk och urlakad betongs kemiska sammansättning Utvärdering av metoden mikrosondanalys*. Energiforsk AB

<https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/22331/bestamning-av-frisk-och-urlakad-betongs-kemiska-sammansattning-energiforskrapport-2017-251.pdf>

Andersson, R. Stripple, H. Gustavsson, T. Ljungkrantz, C. (2019) *Carbonation as a method to improve climate performance for cement based material*. Cement and Concrete Research 124

Possan, E. Thomas, W. A. Aleandri, G. Felix, E. Dos Santos, A. (2017) *Case Studies in Construction Materials* 6.

Ezmorrod, S. (2022) *Temperaturens inverkan på självtorkningen hos klimatförbättrad betong* Lunds Universitet.

Mapei AB (2021) Pressmeddelande <https://www.mynewsdesk.com/se/mapei-2/pressreleases/recon-zero-evo-aatervinner-restbetong-2514305>

Babatobe Albert, A. B. Njoku, C. (2006). *The Potentials of Groundnut Shell Ash as Concrete Admixture*. Nigeria, Federal University of Technology,

Rehman S. Ibrahim, Z. Memon, S. A. Ankor, T. (2018) *Influence of Graphene Nanosheets on Rheology, Microstructure, Strength Development and Self-Sensing Properties of Cement Based Composites*.

Dvorkin, L. Lushnikova, N, Bezusyak, O. , Sonebi, M. Khatib, J. (2018) *Hydration characteristics and structure formation of cement pastes containing metakaolin*

Burridge, J. *How to Specify Durable and Sustainable Concrete* Concretecenter.com
file:///C:/Users/Eeee/Downloads/sp1_how_to_specify_durable_sustainable_concrete_april_2012_2.pdf

Kikuchi, T. & Kuroda, Y. (2011) *Carbon Dioxide Uptake in Demolished and Crushed Concrete* Japan Concrete Institute.

Thomas Betong, använd 1 maj 2023 <https://thomasbetong.se/produkter/betong-med-krav-pa-vct>

Svensson, H. (2021) *Cirkulär betongballast - En laborativ utvärdering av tvättmetod för återvinning av returbetong och cementslam från betongbilar*. Lunds Universitet

Haji, H.Y. & Beigi, Y. (2017). *Ersättning av naturgrus med krossat berg i betong Laboratoriestudium på Ulricehamn Betong*. Högskolan i Borås

Burström, P.G & Nilver, K (2018) *Byggnads Material*, Studentlitteratur