

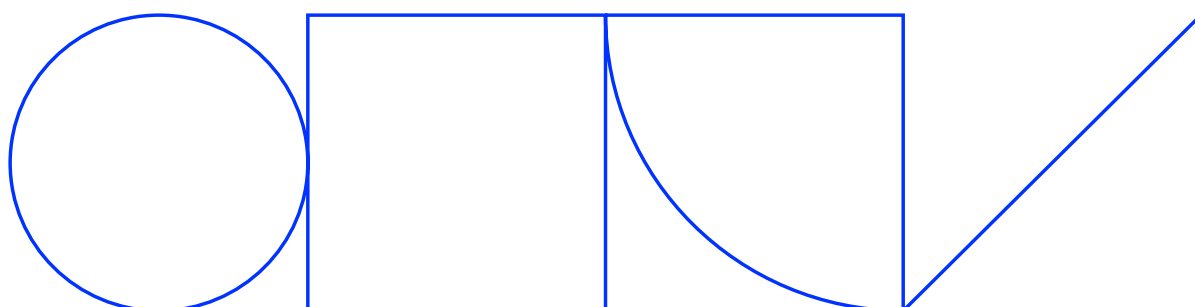
PROJEKTNR. 14156

Koldioxidupptag i krossad betong

Förstudie anläggningsprojekt

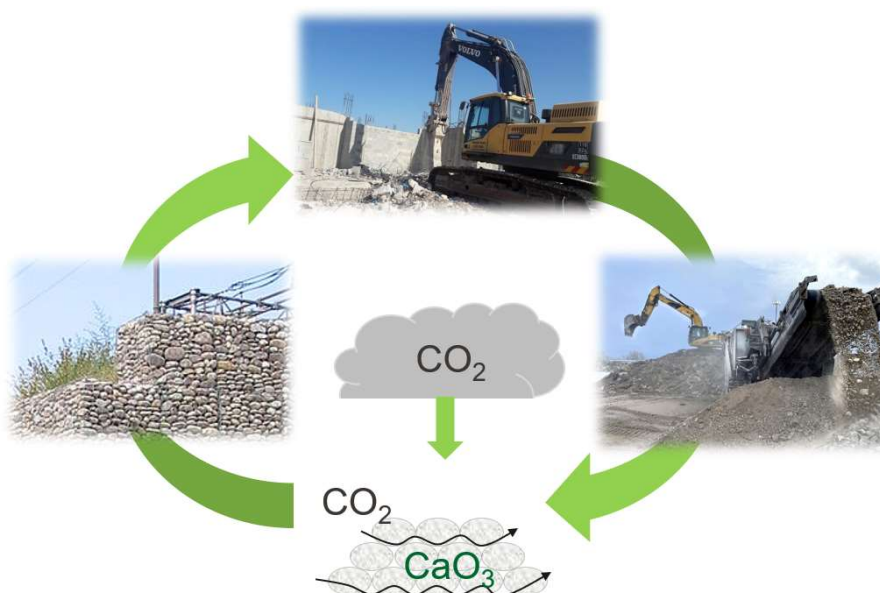
Nils Rydén
Peab

2025-02-28



KOLDIOXIDUPPTAG I KROSSAD BETONG

Förstudie anläggningsprojekt



Nils Rydén

2025-02-28

FÖRORD

Denna förstudie har utförts på Peab av Nils Rydén som också är huvudförfattare till rapporten. Martin Laninge, Oskar Linderöth, Linus Brander och Martin Walfridsson har också bidragit med värdefull input till projektet och rapporten.

Projektet har finansierats av Sveriges Bygg och Utvecklingsfond (SBUF), Betcrete 3 (VINNOVA) och Peab samt genom egenfinansiering från de företag som ingått i projektets referensgrupp. Ett stort tack riktas till finansiärerna och alla som bidragit i referensgruppen. Särskilt tack till Alexander Oliva Rivera (RISE), Ronny Andersson (tidigare Heidelberg) och Katja Fridh (Malmö Universitet) som bidragit med värdefulla referenser, erfarenhet och kunskap.

Nils Rydén, 2025-02-28

SAMMANFATTNING

Inom denna förstudie har vi sammanställt rådande kunskapsläge och befintliga data kring koldioxidupptag i krossad betong genom karbonatisering. Vi har fokuserat på ”passiva” åtgärder/hantering av krossad betong i anläggningsprojekt för att maximera upptaget av CO₂ direkt i projekten utan ytterligare energikrävande industriella processer. Det långsiktiga målet är att kunna bidra till en ökad återvinning av krossad betong och samtidigt kunna minska den totala klimatpåverkan i ett anläggningsprojekt.

I Sverige uppstår idag ca 2 miljoner ton krossad betong per år vid rivning och ombyggnad av gamla hus och anläggningar. Ungefär 2/3 av dessa massor används oftast som lågvärdiga fyllnadsmassor eller underbyggnad till vägar i en sluten miljö där CO₂ transporteras långsamt vilket leder till mycket långsam eller ingen karbonatisering. Detta innebär i praktiken att det finns en outnyttjad potential (ca 50 kg CO₂-upptag per ton krossad betong) eller totalt ca 100 000 ton CO₂ per år i Sverige som idag inte utnyttjas fullt ut. Resultaten från denna förstudie indikerar att 10-30 kg extra CO₂ per ton krossad betong skulle kunna bindas relativt enkelt (passivt) om betongen:

- krossas i så fina fraktioner som möjligt (helst ca 0-10 mm)
- sorteras/siktas i sorterade fraktioner med liknande storlek
- förvaras utomhus utan packning och lagom fuktigt (RF ca 60%) ca 3-6 månader

Resultaten från förstudien visar dock en stor spridning (osäkerhet) i lagrad mängd CO₂ per ton krossad betong i de försök och mätningar som hittills gjorts runt om i världen. I många av studierna har man tyvärr haft bristfällig kontroll på ursprunglig karbonatiseringsgrad innan krossning och/eller innan mätning av lagrad mängd CO₂ påbörjats. Det har också konstaterats att en stor mängd riktigt fina fraktioner ”försvinner” okontrollerat som damm under själva krossningen och hanteringen av den krossade betongen (ca 20% av den ursprungliga mängden bindemedel). Dessa fina fraktioner har störst potential att binda mycket CO₂ på kort tid och borde också tas om hand för ett ökat kontrollerat CO₂-upptag i krossad betong.

Denna förstudie ger också förslag på hur krossad betong skulle kunna användas mer i både temporära och permanenta konstruktioner i anläggningsprojekt. Förutom att lagras temporärt på plats i sorterade luftiga högar innan fortsatt återvinning skulle krossad betong kunna användas både temporärt och permanent i till exempel gabioner till stödmurar och bullervallar eller som ytmaterial i slänter nära vägar och broar.

Det långsiktiga målet med koldioxidupptag i krossad betong är att minska klimatbelastningen från anläggningsprojektet genom att permanent binda CO₂ från atmosfären i den krossade betongen som sedan används i projektet. Idag finns det dock inget färdigt regelverk eller riktlinjer för CO₂-upptag i bygg och anläggningsprojekt (kolsänkor). Regelverket kring kolsänkor, klimatkalkyler, rapportering av CO₂-upptag och koldioxidkrediter är fortfarande under utveckling. Men det kan ändå konstateras att mätning, verifiering och uppföljning av lagrad mängd CO₂ sannolikt kommer bli en viktig del i en framtida tillämpning av koldioxidupptag i krossad betong. Metoder för praktisk mätning och verifiering av CO₂-upptag har därför också tagits med i rapporten. Slutligen är det också mycket viktigt att beakta att hantering och lagring av CO₂ i krossad betong inte leder till andra negativa miljöeffekter (lakning av skadliga ämnen) eller ytterligare CO₂-utsläpp från krossning och hantering.

INNEHÅLL

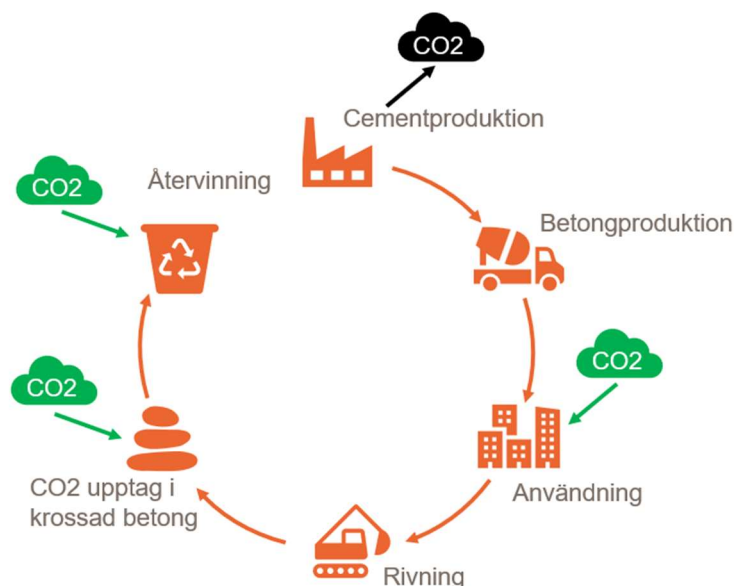
INLEDNING	4
RESULTAT	8
FAKTORER SOM PÅVERKAR CO ₂ -UPPTAGET I KROSSAD BETONG	8
UPPMÄTT CO ₂ -UPPTAG I KROSSAD BETONG	10
RESULTAT FRÅN RAPPORTERADE FÖRSÖK I SVERIGE OCH ANDRA LÄNDER	11
TEORETISKT UPPSKATTAT CO ₂ -UPPTAG I KROSSAD BETONG	17
MÄTMETODER FÖR KVANTIFIERING AV CO ₂ -UPPTAG I KROSSAD BETONG.....	18
<i>Vägning av materialets massa</i>	<i>19</i>
<i>Termogravimetrisk Analys (TGA)</i>	<i>20</i>
<i>Syrametoden</i>	<i>20</i>
<i>Fenolftalein test</i>	<i>20</i>
REKOMMENDATIONER FÖR ANVÄNDNING AV GAMMAL KROSSAD BETONG I	
ANLÄGGNINGSPROJEKT	21
GABIONER AV KROSSAD SORTERAD BETONG	22
KROSSAD BETONG SOM TEMPORÄRT YTMATERIAL	23
KROSSAD BETONG SOM PERMANENT YTMATERIAL	23
KROSSAD BETONG SOM PERMANENT FYLL OCH ÖVERBYGGNAD.....	24
KROSSAD BETONG I BULLERVALLAR	24
KROSSAD BETONG I NY BETONG.....	24
POTENTIELLT MERVÄRDE I ANLÄGGNINGSPROJEKT	24
REFERENSER	26

INLEDNING

Det råder idag en stor enighet om att samhället och byggbranschen måste minska utsläppen av koldioxid (CO₂) till atmosfären. I IPCC-rapporten från 4 april 2022 understryks behovet av koldioxidinfångning och koldioxidlagring (Carbon Dioxid Removal CDR) om världens nettoutsläpp ska kunna minska i tid (IPCC 2022). EU har därmed satt mål om att fånga in flera hundra miljoner ton koldioxid per år 2040. I Sverige har den klimatpolitiska vägvalsutredningen föreslagit kompletterande åtgärder som redan år 2030 ska motsvarar minst 3,7 miljoner ton koldioxid per år. Av dessa ska 2 miljoner ton fångas in och lagras med så kallad bio-CCS teknik där koldioxid från förbränning av biogent material fångas in och lagras permanent (SOU 2020:4). År 2045 är målet att fånga in minst 10 miljoner ton biogen koldioxid per år.

I Sverige bidrar byggbranschen till 21% av Sveriges territoriella koldioxidutsläpp och de största utsläppen sker i samband med transporter och tillverkning av stål och cement (Boverket 2021). Cementtillverkningen i Sverige släpper ut ca 2.5 miljoner ton CO₂/år. De huvudsakliga utsläppen från cementproduktionen sker i samband med bränsle till upphettningen av kalksten (40-50 %) och den påföljande kemiska omvandling av kalkstenen (50-60 %), så kallad kalcinering. Utöver dessa stora koldioxidutsläpp bidrar byggbranschen med ca 39 % av allt avfall i Sverige och ca 50 % av all utvinning av nya material (Boverket, 2025).

Denna rapport fokuserar på koldioxidupptag i krossad betong innan materialet återvinns i nya konstruktioner. Ett ökat koldioxidupptag och återvinning kan bidra till att minska både klimatbelastningen och mängden avfall från bygg och anläggningsbranschen (Figur 1).

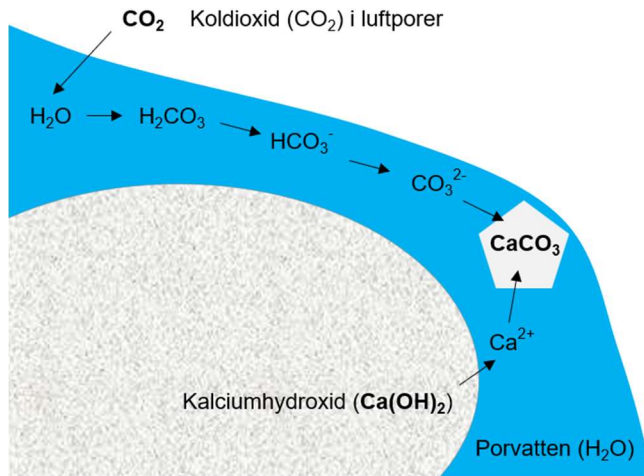


Figur 1. Schematisk figur över betongens livscykel. De största CO₂-utsläppen sker vid tillverkning av cement men betongen kan också ta upp CO₂ under användningen, krossning och återvinning. Denna rapport fokuserar på CO₂-upptag i krossad betong.

De kemiska utsläppen från kalcinering av kalksten (ca 1 milj ton i Sverige) är med dagens teknik oundvikliga utsläpp vid tillverkningen av traditionellt Portland Cement. För att på sikt minska dessa utsläpp från befintliga fabriker planerar cementindustrin för industriell koldioxidinfångning och lagring så kallad Carbon Capture and Storage (CCS) (se tex. www.brevikccs.com). Normalt kan ca 15 % av utsläppen från den kemiska omvandlingen av kalksten tas upp igen naturligt under betongens användningsfas (~100 år). Detta naturliga ”passiva” upptag sker genom den omvända processen där oxider och hydroxider i betongen omvandlas tillbaka till karbonater (karbonatisering), (Betonghandbok Material, 2021). För kalciumkarbonat kan processen sammanfattas som:

Kalciumoxid (CaO) och/eller Kalciumhydroxid (Ca(OH)₂) + CO₂ → Kalciumkarbonat (CaCO₃) + vatten (H₂O) och värme

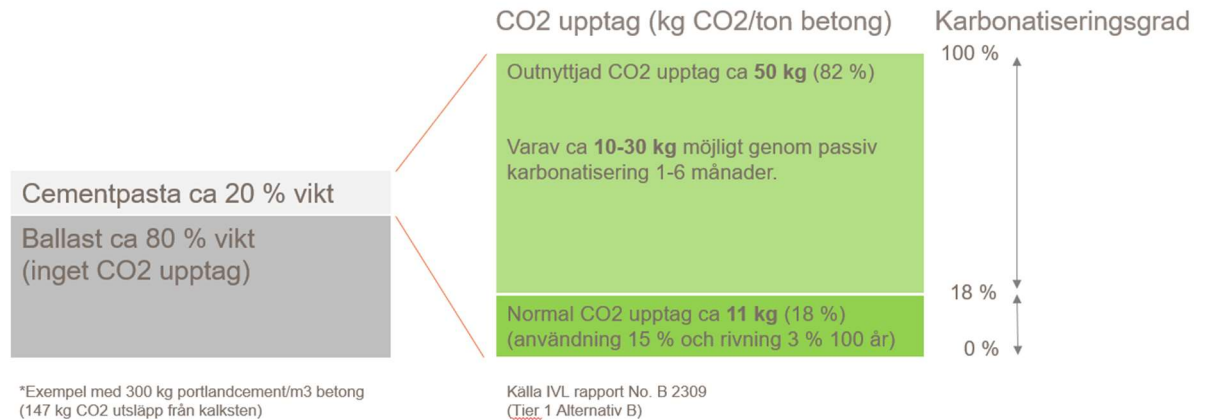
Förenklingen ovan sker egentligen i flera stegvisa delreaktioner där tillgången till vatten/fukt är en förutsättning (Betonghandbok Material, 2021), se Figur 2. Vatten i betongens porer löser ut positiva joner av alkaliska jordartsmetaller (som Ca²⁺) från den hydratiserade cementpastan. När koldioxid tränger in i betongens porer och löser sig i porvattnet bildas kolsyra (H₂CO₃) som i sin tur ger negativa karbonatjoner (CO₃²⁻) vilka slutligen reagerar med de positiva kalciumjonerna (Ca²⁺) och bildar kalciumkarbonat (CaCO₃). Reaktionen kan också ske med andra hydratiserade ämnen i betongen (Brucite Mg(OH)₂ och kiseldioxid från kalciumsilikater samt aluminater från kalciumaluminater) och ge andra karbonater som också binder CO₂. Processen drivs inåt i betongen genom diffusion av CO₂ från luften och utvecklingen avtar med tiden (proportionellt mot roten ur tiden) på grund av att betongens yta blir allt tätare och mer svårgenomtränglig i takt med att den karbonatiseras från ytan och inåt. Detta gör att resterande ca 85 % av de kemiska CO₂-utsläppen från kalcineringen normalt inte binds tillbaka under en betongkonstruktions användningsfas i en bro eller ett hus (Betonghandbok Material, 2021). I SIS-CEN/TR 17310:2019 (E) anges ett genomsnittligt naturligt upptag under användningsfasen (100 år) på ca 25 kg CO₂/m³ för byggnader av betong och ca 5 kg CO₂/m³ för tätare anläggningskonstruktioner med lägre porositet. Denna förenkling gäller generellt för de flesta betongkonstruktioner där tjockleken oftast överstiger karbonatiseringsdjupet under användningsfasen. Men det ska observeras att det kan finnas exempel på tunna cementbaserade produkter som takpannor där hela tjockleken skulle kunna karbonatiseras innan rivning (Strippel mfl., 2025). Observera också att karbonatiseringsprocessen från ytan och inåt ger karbonatiserad krossad betong ett hårdare och tätare ytskikt vilket är positivt för efterföljande återvinning av gammal betong i ny betong (Sereng mfl., 2021; Sadagopan, 2021).



Figur 2. Schematisk figur i mikroskala över karbonatisering inne i betongens porer (figur efter Wang mfl., 2022).

När gamla betongkonstruktioner rivs och betongen krossas upp exponeras dock nya färskbetongtytor igen och karbonatiseringen kan därmed få ny fart i kombination med fortsatt hydratisering (Figur 1). Med dagens relativt snabba och osorterade hantering av rivningsmassor där betong krossas upp och sedan deponeras eller används som fyllnadsmassor, karbonatiserar dock bara betongen ytterligare ca 3 % (Strippel mfl., 2021). Figur 3 illustrerar dagens normala CO_2 -upptag (ca 18 %) under normal användning och rivning samt den resterande fulla potentialen (ca 82 %) av möjligt upptag i gammal krossad betong (Andersson mfl., 2013). Den fulla potentialen i exemplet (ca 147 kg CO_2/m^3 eller 61 kg CO_2/ton krossad betong) är i samma storleksordning som rekommendationerna i SIS-CEN/TR 17310:2019 (E) för full karbonatisering under mycket lång tid.

I Sverige uppstår idag ca 2 miljoner ton (830 000 m^3) krossad betong vid rivning och ombyggnad av gamla hus och anläggningar. Ca 2/3 av dessa massor används oftast som lågvärdiga fyllnadsmassor eller underbyggnad till vägar i en sluten miljö där nytt CO_2 transporteras långsamt vilket leder till mycket långsam karbonatisering (Engelsen mfl., 2012). Om denna mängd krossad betong istället kunde karbonatiseras mer och snabbare skulle en betydande mängd CO_2 kunna fångas in från luften och lagras i gammal krossad betong samtidigt som kvalitén kan förbättras (Sereng mfl., 2021).



Figur 3. Normalt CO₂-upptag (ca 18 %) jämfört med den till stor del outnyttjade potentialen (ca 82 % extra) för CO₂-upptag genom mer karbonatisering av gammal krossad betong.

Det finns därför en stor potential och möjlighet för byggbranschen att fånga in koldioxid från atmosfären genom ”rätt hantering” av krossad betong. Uppskattningsvis skulle ytterligare ca 100 000 ton CO₂ per år kunna fångas upp genom full karbonatisering av gammal krossad betong i Sverige (2 milj ton x 50 kg CO₂/ton). Det finns dock lite kvantitativa data och rekommendationer på vad ”rätt hantering” är och hur mycket eller lite CO₂ som verkligen tas upp under olika lagringsförhållande (Andersson mfl., 2013).

Inom detta projekt har vi sammanställt rådande kunskapsläge och befintlig data från olika försök och rapporter om CO₂-upptag i krossad betong. Vi har också tagit fram rekommendationer på åtgärder/hantering av krossad betong i anläggningsprojekt för att maximera upptaget av CO₂ direkt i projekten utan energikrävande transporter (Van Roijen mfl., 2024). Projektet är planerat som en mindre förstudie där sammanställningen av befintlig kunskap och fakta kan leda till direkt användning i branschen. Resultaten förväntas kunna ge entreprenörer konkret vägledning i vad som är rätt hantering av gammal krossad betong i anläggningsprojekt för att maximera CO₂-upptaget. Redovisade förslag på användning av krossad betong i projekten kan förslagsvis leda till nya FoU projekt med fokus på mätningar och uppföljning under längre tid.

Långsiktigt är målet att resultaten från detta projekt ska kunna bidra till nya möjligheter för cirkulär materialhantering i byggbranschen där avfall kan uppgraderas till en användbar produkt och bidra till negativa utsläpp av CO₂ (kolsänka). Projektet är avgränsat till naturligt ”passivt” CO₂-upptag (karbonatisering) av krossad betong i anläggningsprojekt. Vi har fokuserat på enkla åtgärder/hantering av krossad betong i anläggningsprojekt för att maximera det ”passiva” upptaget av CO₂ direkt i projekten utan energikrävande transporter eller andra industriella processer. Snabbare accelererad karbonatisering av krossad betong genom olika industriella processer med ökad CO₂ koncentration, tryck och temperatur ingår endast översiktligt i detta projekt. Accelererad karbonatisering i en industriell process syftar till att minska tiden och öka upptaget av CO₂ med hjälp av ytterligare fysisk eller kemisk behandling, se till exempel FastCarb projektet i Frankrike (www.fastcarb.fr). I FastCarb projektet uppskattades CO₂-

utsläppen relaterade till transporter och bearbetning av den krossade karbonatiserade betongen till ca 11 kg CO₂/ton krossad betong (Izoret mfl., 2022). Dessa utsläpp är förhållandevis höga och en stor andel av de potentiella CO₂-upptaget i krossad betong vilket motiverar utvärderingen av mer lokal och passiv karbonatisering av krossad betong i bygg eller anläggningsprojekt (Van Roijen mfl., 2024).

Denna rapport berör inte heller en potentiell cirkulär användning av karbonatiserad krossad betong som ny ballast i ny betong. Denna naturliga slutgiltiga användningen av karbonatiserad gammal krossad betong är en lovande applikation som redan tillämpas internationellt och har studerats i ett flertal tidigare rapporter (Rogers mfl., 2016; Sadagopan, 2021; Izoret mfl., 2022).

RESULTAT

I detta kapitel redovisas insamlade resultat från projektets litteraturgenomgång av både svenska och internationella rapporter på området.

Faktorer som påverkar CO₂-upptaget i krossad betong

Gammal krossad betong består i huvudsak av hydratiserad cementpasta (cement och vatten ca 20 %) samt ballast (sand och sten ca 80 %), se Figur 3. CO₂-upptaget i krossad betong sker enbart i cementpastan och en hög andel cementpasta i en given partikel är därför en förutsättning för ett högt CO₂-upptag (Leemann mfl., 2023). Det finns också flera andra faktorer som påverkar hur mycket CO₂ som kan fångas upp i krossad betong. I Tabell 1 nedan sammanställs identifierade parametrar som alla kan påverka karbonatiseringen och därmed CO₂-upptaget i en krossad betongpartikel. När den krossade betongen lagras i högar, tillkommer också högens storlek, partikelsammansättning samt partikelns läge i högen, CO₂-upptaget. Partiklar som ligger nära ytan i en hög karbonatiserar fortare än partiklar som ligger längre in i högen på grund av mindre luftgenomströmning inne i en tät hög (Strippel 2013). För en typisk hög med krossad betong som förvaras utomhus är det vanligtvis partikelstorleken och högens partikelstorleksfördelning (kornkurva) som påverkar hur mycket CO₂ som kan tas upp under en given tid. Den ursprungliga betongens porositet och mängd bindemedel (hållfastheten) påverkar också både karboniseringshastigheten och den totala mängden CO₂ som kan tas upp i den krossade betongen (SIS-CEN/TR 17310:2019 (E)).

Tabell 1. Parametrar som påverkar CO₂-upptag i krossad betong.

Parameter	Effekt på CO ₂ -upptag	Referens
Hög andel cementpasta i partikeln	Ökar	Leemann mfl., (2023)
Låg initial karbonatiseringsgrad	Ökar	Thiery mfl. (2013)
Högre mängd bindemedel i recept	Ökar	Thiery mfl. (2013)
Mindre kornstorlek (större yta m ² /m ³)	Ökar	Stripple (2013)
Högre porositet (högt vct)	Ökar	Kikuchi och Kuroda (2011)
Optimal fuktighet (RF ca 60-80 %)	Ökar	SIS-CEN/TR 17310:2019
Högre temperatur	Ökar	
Högre lufttryck	Ökar	
Högre CO ₂ koncentration i luften	Ökar	Thiery mfl. (2013)
Mängd alternativa bindemedel	Ökar/Minskar	Stripple mfl, (2021)

Osorterade högar med stor variation i partikelstorlek packar sig naturligt med tiden och blir i princip helt täta för genomströmning av CO₂ vilket resulterar i en låg karbonatiseringsgrad inne i högen (Figur 4). Stripple (2013) uppskattade det karbonatiserade djupet till ca 30 cm i osorterade högar med krossad betong som legat ute på en återvinningsdepå för krossad betong. Om den krossade osorterade betongen dessutom packas med vält eller liknande minskar karbonatiseringsdjupet ytterligare. Hou mfl (2021) mätte upp karbonatiseringshastigheten (k faktorn) i packad krossad betong i lab och konstaterade att karbonatiseringshastigheten kunde jämföras med karbonatiseringen i en betong med låg hållfasthet (ca 5-16 mm/år^{1/2} beroende på relativ fuktighet), (Hou mfl., 2021). Dessa resultat är också i linje med resultaten från ett stort fullskaletest på E6 i Norge där lakning från gammal krossad betong i en vägöverbyggnad studerades under flera års tid. Karbonatiseringen i den krossade packade betongen under asfalten var försumbar eller omätbar efter 6 år (Engelsen mfl., 2012). På en referensyta utan asfalt kunde dock en betydande karbonatisering mätas upp efter 6 år.

I den japanska rapporten av Kikuchi och Kuroda (2011) observerades en ökad karbonatisering i högar av opackad krossad betong som avsiktligt vattnades en till två gånger i veckan. Detta resultat stämmer väl överens med andra undersökningar där optimal relativ fuktighet för snabbast möjliga karbonatisering ofta ligger kring 60 % (SIS 13710).



Figur 4. Schematisk figur som illustrerar ökad möjlighet till karbonatisering i en fuktig luftig sorterad hög där alla partiklar har liknande storlek (vänster) jämfört med en osorterad tät hög med partiklar av olika storlekar (höger).

Uppmätt CO₂-upptag i krossad betong

Karbonatiseringsgraden anges ofta i % som upptagen mängd CO₂ jämfört med kemiskt frigjord mängd CO₂ från kalcineringen (alltså exkl. CO₂-utsläpp från det bränsle som används vid uppvärmningen av kalkstenen). Alternativt kan också karbonatiseringsgraden anges som mängden kalciumkarbonat (CaCO₃) som bildats (karbonatiserat) jämfört med mängden tillgänglig reaktiv kalciumoxid (CaO) i bindemedlet (SIS 17310). Båda definitionerna ger samma karbonatiseringsgrad i %. I denna rapport fokuserar vi på det kvantitativa upptaget av CO₂ i krossad betong och använder därför oftast upptagen mängd CO₂ i kg/m³ eller kg/ton krossad betong. För att följa praxis från tidigare rapporter på området använder vi också en konstant densitet för både krossad och okrossad betong på 2400 kg/m³ när vi växlar mellan m³ och ton. I krossad betong är skrymdensiteten egentligen något lägre på grund av den ökade porositeten.

Det finns tyvärr lite kvantitativa data där CO₂-upptaget i gammal krossad betong kunnat mätas upp under de olika förhållande som redovisas i Tabell 1. I Tabell 2 har vi sammanställt de resultat, i kg CO₂/ton krossad betong, som vi identifierat inom detta projekt. Det bör observeras att CO₂-upptaget (i kg) i många fall har beräknats utifrån karbonatiseringsgraden och inte verifierats genom kemisk analys och viktökning. I dessa fall uppskattas CO₂-upptaget som:

$$\text{CO}_2\text{-upptag (kg/m}^3\text{)} = \text{Cementinnehåll (kg/m}^3\text{)} * \text{Bindningskapacitet (kg CO}_2\text{/ kg cement)} * \text{Karbonatiseringsgrad (\%)}$$

Bindningskapaciteten sätts ofta till 0,49 för Portland Cement (CEM I) vilket idag är det vanligaste bindemedlet i gammal betong som rivs (Strippel mfl., 2021). Bindningskapaciteten motsvarar teoretisk tillgänglig mängd reaktiv kalciumoxid som kan reagera med koldioxid (SIS-CEN/TR 17310:2019 (E)). Värdet på 0,49 beräknas utifrån; (1) gammal Portlandklinker innehåller ca 65 % CaO, (2) gammal Portlandcement innehåller ca 95 % Portlandklinker, (3) Det behövs 56 g CaO för att binda 44 g CO₂ i 100 g ny CaCO₃. Sammantaget ger detta en bindningskapacitet i kg CO₂ per kg cement på $0,65 * 0,95 * (44/56) = 0,49$. Denna teoretiska bindningskapacitet innebär dock att all CaO har omvandlats till CaCO₃ i den delen av den krossade betongen som definierats som karbonatiserad. I praktiken kan detta vara en allt för optimistisk förenkling och det finns också rapporter där CO₂-upptaget beräknat från karbonatiseringsgraden (från fenolftalein test) har reducerats till en lägre mer praktiskt tillämpbar bindningskapacitet (Leemann mfl., 2023). I SIS-CEN/TR 17310:2019 (E) rekommenderas en reduktion på 25 % av bindningskapaciteten ($0,49 * 0,75 = 0,37$) för praktiska tillämpningar men de flesta beräkningar i rapporten använder ändå en oreducerad bindningskapacitet på 0,49.

Sammantaget bör det poängteras att CO₂-upptag som uppskattas/beräknas utifrån karbonatiseringsgraden är mer osäker jämfört med de studier där CO₂-upptaget faktiskt verifieras kemiskt och genom vägning (Kikuchi och Kuroda, 2011).

Bindningskapaciteten för nya typer av cement är inte lika väl undersökt men minskar sannolikt något med tillsatser som slagg och flygaska (CEM II och CEM III) (SIS-CEN/TR 17310:2019 (E)). Cementinnehållet i gammal krossad betong kan typiskt variera mellan ca 250 och 450 kg/m³ betong beroende på typ av betong, vilket ger ett maximalt CO₂-upptag på ca 125-225

kg/m³ (teoretiskt). I Figur 3 har vi använt ett exempel på 300 kg cement per m³ vilket ger ett teoretiskt maximalt upptag på 147 kg CO₂ per m³ betong (61 kg CO₂/ton krossad betong).

När CO₂-upptaget redovisas som kg/m³ eller kg/ton bör det också uppmärksammas att grövre fraktioner oftast innehåller relativt sett mer ballast (krossat berg och sand) där inget upptag kan ske. Mängden bunden CO₂ per m³ eller ton blir därmed avsevärt mindre för grövre fraktioner även utan hänsyn till relativt mindre cementpasta och en mindre specifik yta för grövre partiklar (m²/m³).

I flera rapporter har också förlusten av mycket fina partiklar som uppstår under själva krossningen av gammal betong uppmärksammas (Stripple, 2013). Enligt (SIS-CEN/TR 17310:2019 (E)) mätte Rogers mfl. (2016) upp förlusten av cementpasta till hela 122 kg/m³ vilket i deras fall motsvarade 24 % av den ursprunglig mängden bindemedel. Eftersom dessa partiklar är mycket små och består av nästan enbart bindemedel karbonatiseras dessa sannolikt på relativt kort tid direkt i luften eller på markytan (Stripple, 2013). Om exempelvis en karbonatiseringsgrad på 75 % kan uppnås på en vecka och bindningskapaciteten är 0,49 blir upptaget i detta ”borttappade” damm och finmaterial ca 44 kg/m³ (122*0,49*0,75) eller ca 19 kg/ton (44/2,4) enligt beräkningen ovan (SIS-CEN/TR 17310:2019 (E)).

Resultat från rapporterade försök i Sverige och andra länder

I ett tidigare SBUF projekt med fokus på användning av gammal betong som ballast i ny betong krossades och lagrades betong från gamla järnvägsslipers och gamla hålbjälklag (Rogers mfl., 2016). Den krossade betongen siktades och lagrades utomhus under tak i fraktionerna 0-4 mm, 4-8 mm och 8-16 mm under 18 månader. Den krossade betongen lagrades i 40 cm tjocka skikt på pallar i pallkragar med nät i botten för effektivare luftgenomströmning. Karbonatiseringsgraden mättes sedan upp på olika djup i respektive fraktion och typ av betong. Den finaste fraktionen 0-4 mm hade efter 18 månader en karbonatiseringsgrad på 40-65 % i ytan vilket motsvarar ett CO₂-upptag på ca 50 kg CO₂/ton krossad betong (Tabell 2). De båda grövre fraktionerna hade under motsvarande tid och lagring en karbonatiseringsgrad på ca 25-40 % och ett motsvarande CO₂-upptag på ca 5-11 kg CO₂/ ton krossad betong (Tabell 2). De grövre fraktionerna innehåller relativt sett mer ballast och mindre cementpasta jämfört med 0-4 mm fraktionen vilket gör att upptaget per ton krossad betong blir mindre. Den specifika ytan för de grövre fraktionerna är också mindre vilket också bidrar till ett mindre CO₂-upptag (Tabell 1). Mängden cementpasta per viktenhet i den krossade betongen från gamla järnvägsslipers mättes upp till 28, 12 och 7 % i respektive fraktion (0-4, 4-8 och 8-16 mm). Motsvarande mängd cementpasta var bara 18, 6, och 3 % i motsvarande fraktioner från de krossade hålbjälklagen. Mängden cementpasta (mängden bindemedel och vatten) visade som förväntat ha stor betydelse på CO₂-upptaget i den krossade betongen (Tabell 1). Lagringsdjupet visade sig också ha relativt stor betydelse för CO₂-upptaget i 0-4 mm fraktionen. Karbonatiseringsgraden i 0-4 mm fraktionen var ca dubbelt så hög i ytan jämfört med på 12 cm djup från ytan medan motsvarande skillnaden bara var ca 10-20 % i 4-8 mm och 8-16 mm fraktionerna. Skillnaden antogs vara direkt relaterad till hur lätt luften kunde passera genom de 40 cm tjocka högarna (gasdiffusion). Fraktionerna 4-8 mm och 8-16 mm har inga riktigt fina partiklar ner mot 0 mm vilket gör att den sorterade fraktionen får en mer öppen struktur där luften (fukt och CO₂) kan röra sig fritt.

I SBUF rapporten redovisas bara uppmätt mängd cementpasta i respektive fraktion och karbonatiseringsgraden i olika fraktioner och på olika djup (Rogers mfl., 2016). I Tabell 2 och Figur 5 har CO₂-upptaget i den karbonatiserade cementpastan beräknats utifrån ett antaget gammalt betongrecept med 350 kg cement per m³ betong och ett vattencementtal (vct) på 0,43 (på samma sätt som också gjorts i SIS17310 tabell 7). Karbonatiseringsgraden på ytan är här ett medelvärde från både överytan (0 cm) och underytan med nätbotten. Värdet för 12 cm djup har också medelvärdesbildat på samma sätt från mätningarna 12 cm från både över och underytan.

I Schweiz har också bristen på kvantitativa data på CO₂-upptag i gammal krossad betong uppmärksamats i ett nytt projekt (Leemann mfl., 2023). I den nya studien från EMPA i Schweiz undersöktes olika typer av lagringsförhållande, lagringsdjup och fraktioner från tre olika betongfabriker som hanterade gammal krossad betong för återvinning. Tre olika försök och material studerades (RA-1, RA-2 och RA-3) där det första och andra försöket studerade krossad betong från gamla järnvägsslipers respektive krossad betong från gamla rivna byggnader. I de två första försöken lagrades material i mindre högar på EMPA och i större högar på respektive fabrik och CO₂-upptaget bestämdes både vid tiden noll och efter 1,5 respektive 6 månaders lagring på EMPA samt efter 8 månader på betongfabriken. I det tredje försöket (RA-3) lagrades materialet endast på betongfabriken och mätningar utfördes vid tiden noll och efter 2 månader.

Även i denna studie var CO₂-upptaget störst i den finaste sorterade fraktionen (0-4 mm), se Tabell 2 och Figur 5. Lagringsdjupet och lagringsmiljön (med eller utan tak) visade dock inte ha någon större betydelse i denna studie. Dock poängteras det i rapporten att allt material var mycket fuktigt i början på mätningarna och kanske aldrig riktigt torkade. I Schweiz försvårades uppskattningen av CO₂-upptaget ytterligare på grund av att betongen redan innehöll en stor mängd kalksten i själva ballasten. CO₂-upptaget beräknades därför utifrån förändringen i karbonatiseringsgrad under försöken. I denna studie hade den krossade betongen redan karbonatiserat till viss del under både bruksskede och efter ursprunglig krossning, vilket verkar ha resulterat i generellt något lägre CO₂-upptag under själva mätperioden (Leemann mfl., 2023).

Kikuchi och Kuroda (2011) i Japan gjorde en omfattande studie på CO₂-upptaget i krossad betong. I deras rapport redovisas mätningar på mängden CaCO₃ från tre olika typer av försök. I det första försöket gjordes kontrollerade mätningar på CO₂-upptaget i nytt krossat murbruk som lagrades både med och utan bevattning (två gånger i veckan). Resultaten från detta första försök på murbruk har inte tagits med här (Tabell 2 och Figur 5) eftersom materialet skiljer sig något från gammal krossad betong, men försöket visade tydligt att CO₂-upptaget var stort (maximalt ca 90 kg CO₂/ton efter 3 månader) och de högsta nivåerna uppnåddes om materialet vattnades två gånger i veckan, särskilt upptaget i de riktigt fina fraktionerna (+100 % CO₂-upptag i 0-0,5 mm fraktionen).

I det andra försöket av Kikuchi och Kuroda (2011) undersöktes CO₂-upptaget i krossad betong från en gammal byggnad i Tokyo från 1963. Betongens ursprungliga hållfasthet var 26,7 MPa och efter ca 50 års användning, rivning, grov krossning och tillfällig förvaring hade den krossade betongen en CaCO₃ andel på 13 % (karbonatiseringsgrad). En storsäck av den krossade betongen krossades sedan upp ytterligare till mindre partiklar under 10 mm och CO₂-upptaget i både 0-2 mm fraktionen och 0-10 mm fraktionen mättes upp med termogravimetrisk analys

(TGA). Den krossade betongen lagrades sedan både med och utan bevattning (en gång i veckan). Nettoupptaget på 1 en månad utan bevattning blev ca 1 kg CO₂/ton krossad betong för 0-2 mm fraktionen och 2 kg CO₂/ton för 0-10 mm fraktionen. Efter 3 mån hade upptaget utan bevattning ökat till 8 kg i 0-2 mm fraktionen och 5 kg i 0-10 mm fraktionen. CO₂-upptaget i motsvarande försök med bevattning en gång i veckan blev efter 1 mån ca 14 kg CO₂/ton i 0-2 mm fraktionen och efter 3 mån ca 36 kg CO₂/ton. I 0-10 mm fraktionen var motsvarande upptag efter 1 respektive 3 månader med bevattning ca 13 och 21 kg CO₂/ton. CO₂-upptagen ovan och i Tabell 2 har beräknats utifrån uppmätt relativ ökning av mängden CaCO₃ med samma metod som används i artikeln (ekv 1 i Kikuchi och Kuroda, 2011).

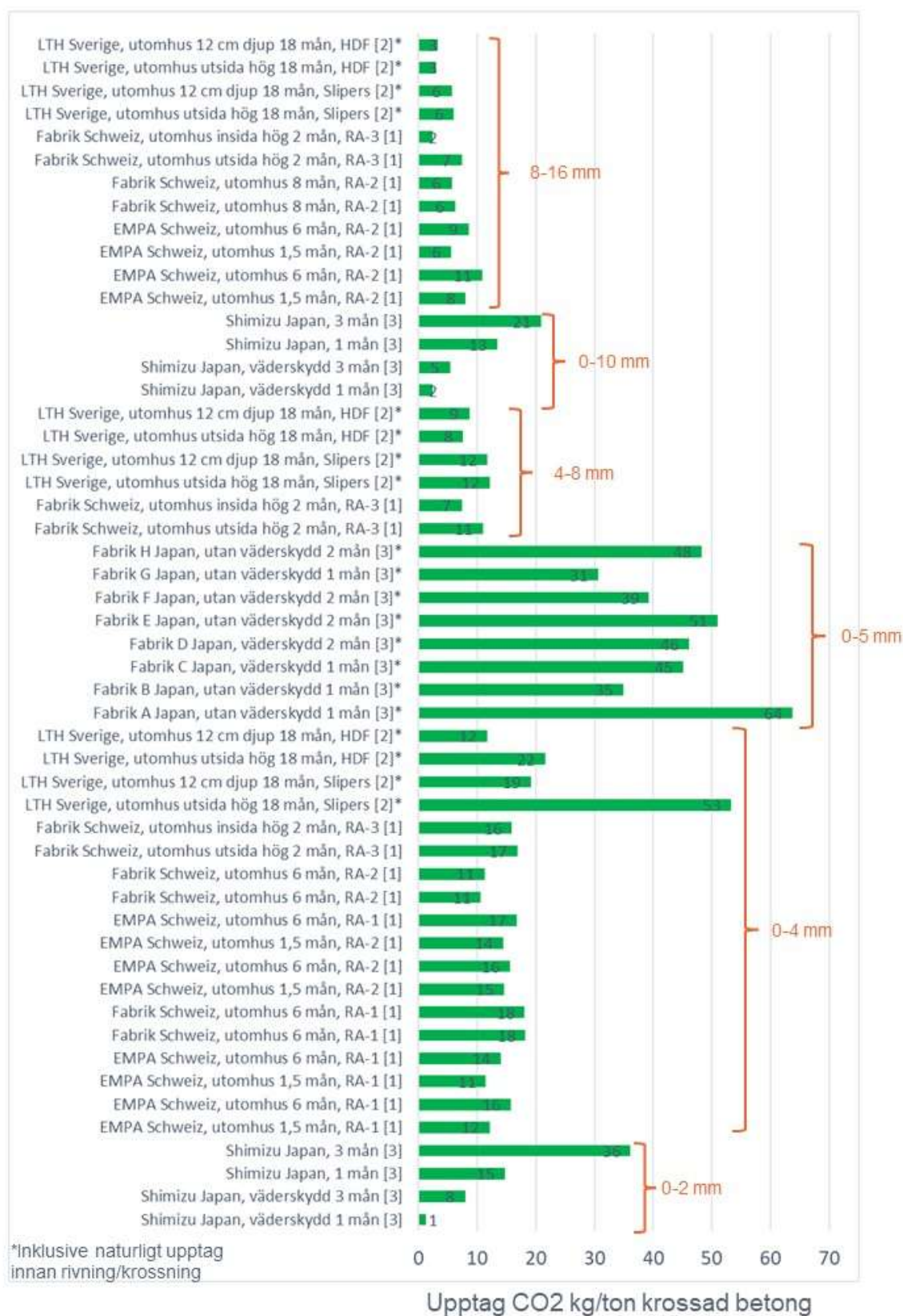
Kikuchi och Kurodas (2011) tredje försök gjordes på krossad betong från 8 olika krossningsanläggningar i Japan. Försöken gjordes på krossad betong av 0-40 mm stora partiklar men CO₂-upptaget mättes bara i partiklar mindre än 5 mm (ca 24 %) och upptaget i större partiklar sattes till noll. Efter 1-3 månaders lagring låg mängden CaCO₃ från de olika krossningsverken mellan 19 % och 35 % med ett medelvärde på 28 %. Medelvärdet motsvarade ett CO₂-upptag på 11 kg/ton krossad betong vilket dock uppskattades vara i underkant av verkligt upptag eftersom bara partiklar mindre än 5 mm (24 % av vikten) i hela mängden (0-40 mm) togs med i denna beräkning. Upptaget i större partiklar var svårare att kvantifiera och ansågs inte bidra till någon större mängd CO₂-upptag på grund av mindre specifik yta och relativt sett mer ballast. I denna tredje studie från verkliga krossningsanläggningar saknades data på den ursprungliga mängden CaCO₃ och värdena inkluderar därför det upptag (karbonatisering) som skedde innan rivning och krossning. Data från alla 8 olika krossningsanläggningar (A-H) redovisas i Tabell 2 och Figur 5 och representerar här bara 0-5 mm fraktionen.

De rapporterade försöken och rapporterna ovan indikerar att det finns en möjlighet att öka CO₂-upptaget genom rätt hantering av krossad betong som gynnar karbonatiseringen (Tabell 1 och 2). Detta ökade upptag under några månader behöver dock jämföras med det naturliga upptaget som sker under betydligt längre tid inne i en deponi eller packad vägöverbyggnad (additionalitet). Tyvärr finns det även här relativt få studier där koldioxidupptaget i dessa traditionella applikationer kunnat kvantifieras i fält i verkliga konstruktioner. Utifrån parametrarna i Tabell 1 är det också lätt att inse att förutsättningarna för en effektiv och snabb karbonatisering är mycket ogynnsamma långt inne i en tät deponi eller vägöverbyggnad.

Det finns dock ett fåtal studier där karbonatiserad krossad betong i vägöverbyggnader studerats. I en norsk studie fokuserad på lakvatten från krossad betong i en verklig vägöverbyggnad observerades en låg karbonatiseringsgrad i den packade inbyggda krossade betongen (Engelsen mfl. 2012). Hou mfl (2021) mätte upp karbonatiseringshastigheten i packad krossad betong i laboratorium och konstaterade att karbonatiseringshastigheten kunde jämföras med karbonatiseringen i en betong med låg hållfasthet (ca 5-16 mm/år^{0.5} beroende på relativ fuktighet), (Hou mfl., 2021).

Tabell 2. Uppmätt CO2-upptag i krossad betong från tidigare projekt.

CO2 upptag (kg/ton)	Karb. grad (%)	Fraktion (mm)	Lagringstid (mån)	Övrigt	Inklusive upptag i bruksskedet	Referens
1		0-2	1	Shimizu, väderskydd	Nej	[3] Kikuchi och Kuroda, 2011
8		0-2	3	Shimizu, väderskydd	Nej	[3] Kikuchi och Kuroda, 2011
15		0-2	1	Shimizu, vattning 1 gång i veckan	Nej	[3] Kikuchi och Kuroda, 2011
36		0-2	3	Shimizu, vattning 1 gång i veckan	Nej	[3] Kikuchi och Kuroda, 2011
12	16	0-4	1,5	EMPA RA-1 med väderskydd	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
16	21	0-4	6	EMPA RA-1 med väderskydd	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
11	15	0-4	1,5	EMPA RA-1 utan väderskydd	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
14	18	0-4	6	EMPA RA-1 utan väderskydd	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
18	24	0-4	6	Betongfabrik RA-1 Schweiz	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
18	24	0-4	6	Betongfabrik RA-1 Schweiz	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
15	24	0-4	1,5	EMPA RA-2 med väderskydd	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
16	26	0-4	6	EMPA RA-2 med väderskydd	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
14	24	0-4	1,5	EMPA RA-2 utan väderskydd	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
17	28	0-4	6	EMPA RA-1 utan väderskydd	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
11	18	0-4	6	Betongfabrik RA-2 Schweiz	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
11	19	0-4	6	Betongfabrik RA-2 Schweiz	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
17	28	0-4	2	Betongfabrik RA-3 Schweiz	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
16	26	0-4	2	Betongfabrik RA-3 Schweiz, utomhu	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
53	56	0-4	18	Slipers (S)	Ja	[2] Rogers mfl., 2016
19	20	0-4	18	Slipers (S)	Ja	[2] Rogers mfl., 2016
22	35	0-4	18	Hålbj (HCS)	Ja	[2] Rogers mfl., 2016
12	19	0-4	18	Hålbj (HCS)	Ja	[2] Rogers mfl., 2016
64		0-5	1	Betongfabrik A Japan, utan vädersk	Ja	[3] Kikuchi och Kuroda, 2011
35		0-5	1	Betongfabrik B Japan, utan vädersk	Ja	[3] Kikuchi och Kuroda, 2011
45		0-5	1	Betongfabrik C Japan, väderskydd	Ja	[3] Kikuchi och Kuroda, 2011
46		0-5	2	Betongfabrik D Japan, väderskydd	Ja	[3] Kikuchi och Kuroda, 2011
51		0-5	2	Betongfabrik E Japan, utan vädersk	Ja	[3] Kikuchi och Kuroda, 2011
39		0-5	2	Betongfabrik F Japan, utan vädersk	Ja	[3] Kikuchi och Kuroda, 2011
31		0-5	1	Betongfabrik G Japan, utan vädersk	Ja	[3] Kikuchi och Kuroda, 2011
48		0-5	2	Betongfabrik H Japan, utan vädersk	Ja	[3] Kikuchi och Kuroda, 2011
11	18	4-8		Betongfabrik RA-3 Schweiz, utomhus i hög, utsida av hög	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
7	12	4-8	2	Betongfabrik RA-3 Schweiz, utomhu	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
12	30	4-8	18	Slipers (S)	Ja	[2] Rogers mfl., 2016
12	29	4-8	18	Slipers (S)	Ja	[2] Rogers mfl., 2016
8	37	4-8	18	Hålbj (HCS)	Ja	[2] Rogers mfl., 2016
9	42	4-8	18	Hålbj (HCS)	Ja	[2] Rogers mfl., 2016
2		0-10	1	Shimizu, väderskydd	Nej	[3] Kikuchi och Kuroda, 2011
5		0-10	3	Shimizu, väderskydd	Nej	[3] Kikuchi och Kuroda, 2011
13		0-10	1	Shimizu, vattning 1 gång i veckan	Nej	[3] Kikuchi och Kuroda, 2011
21		0-10	3	Shimizu, vattning 1 gång i veckan	Nej	[3] Kikuchi och Kuroda, 2011
8	13	8-16	1,5	EMPA RA-2 med väderskydd	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
11	18	8-16	6	EMPA RA-2 med väderskydd	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
6	9	8-16	1,5	EMPA RA-2 utan väderskydd	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
9	14	8-16	6	EMPA RA-2 utan väderskydd	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
6	10	8-16		Betongfabrik RA-2 Schweiz, utomhus i hög, utsida av hög	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
6	9	8-16		Betongfabrik RA-2 Schweiz, utomhus i hög, utsida av hög	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
7	12	8-16	2	Betongfabrik RA-3 Schweiz	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
2	4	8-16	2	Betongfabrik RA-3 Schweiz	Nej	[1] Leemann mfl., 2023
6	25	8-16	18	Slipers (S)	Ja	[2] Rogers mfl., 2016
6	24	8-16	18	Slipers (S)	Ja	[2] Rogers mfl., 2016
3	29	8-16	18	Hålbj (HCS)	Ja	[2] Rogers mfl., 2016
3	32	8-16	18	Hålbj (HCS)	Ja	[2] Rogers mfl., 2016



Figur 5. CO2-upptag från olika rapporterade försök på krossad betong. Se Tabell 2 för fler detaljer och referenser.

Sammantaget visar resultaten från de försök som identifierats i denna förstudie en relativt stor spridning i CO₂-upptag från olika studier och försök. Störst koldioxidupptag i krossad betong har uppmätts i finare fraktioner (< 6 mm) med stor andel cementpasta som lagrats utomhus i luftiga högar utan regnskydd eller med bevattning 1-2 gånger i veckan. I dessa fina sorterade fraktioner har ett CO₂-upptag på 40-60 kg CO₂/ton krossad betong observerats efter 1-3 månader. Det ska dock observeras att flera av de högsta värdena i Tabell 2 och Figur 4 inkluderar ett okänt initialt upptag innan krossning och mätning av CO₂-upptag. Detta initiala upptag inkluderar både naturligt upptag under betongens bruksskede och upptag efter krossning men innan mätningarna påbörjats. Till exempel, har Kikuchi och Kurodas (2011) ett CO₂-upptag i fina fraktioner efter en månads lagring som varierar mellan 1-64 kg CO₂/ton. Det låga upptaget på 1 kg CO₂ mättes upp i krossad betong som redan hade tagit upp 21 kg CO₂/ton innan mätningen började och som lagrades torrt utan bevattning. Det höga upptaget på 64 kg CO₂/ton efter en månad mättes upp på krossad betong som lagrades utomhus utan väderskydd på en betongfabrik där det initial upptaget inte kunde bestämmas och därmed är inkluderat. Detta inkonsekventa sätt att mäta CO₂-upptaget i krossad betong gör det tyvärr svårt att jämföra resultat från olika studier och dra generella slutsatser om CO₂-upptaget i olika miljöer som funktion av lagringstid.

Värdena ovan kan jämföras med det uppskattade naturliga upptaget på ca 11 kg CO₂/ton (Figur 3) från normal användning, rivning och deponering. Observera dock att detta också är osäkra uppskattade värden och det faktiska upptaget (karbonatiseringsgraden) kan variera mycket mellan olika betongkonstruktioner och exponeringsmiljöer. Till exempel anges ca 2 kg CO₂/ton för anläggningskonstruktioner och 10 kg CO₂/ton för byggnader av betong under en normal användningsfas på 100 år (SIS-CEN/TR 17310:2019 (E)). Men upptaget kan sannolikt vara större om fina fraktioner av krossad betong mellanlagras innan någon mätning börjar göras vilket sannolikt skett med Kikuchi och Kurodas (2011) höga initiala värde på 21 kg CO₂/ton. Om de högsta värdena i Tabell 2 och Figur 5 reduceras med ca 21 kg CO₂/ton ger detta ett uppskattat extra nettoupptag på grund av extra lagring under gynnsamma förhållande på ca 20-40 kg CO₂/ton krossad betong. Dessa lägre justerade värden närmar sig de försök som gjorts på fina fraktioner i Schweiz där det varit möjligt att särskilja det extra netto CO₂-upptaget som skett efter krossning och lagring i de olika försöken (Tabell 2 och Figur 4).

För de grövre fraktionerna över 5 mm är de rapporterade upptagen betydligt lägre per ton krossad betong, ca 10 kg CO₂/ton men med stor spridning 2-21 kg CO₂/ton (Tabell 2 och Figur 4). Som diskuterats tidigare är upptaget förväntat lägre enbart utifrån det faktum att de större partiklarna oftast innehåller relativt sett mer ballast (där inget CO₂-upptag kan ske), samt att de större partiklarna har relativt sett mindre specifik yta (m²/m³) jämfört med mindre partiklar.

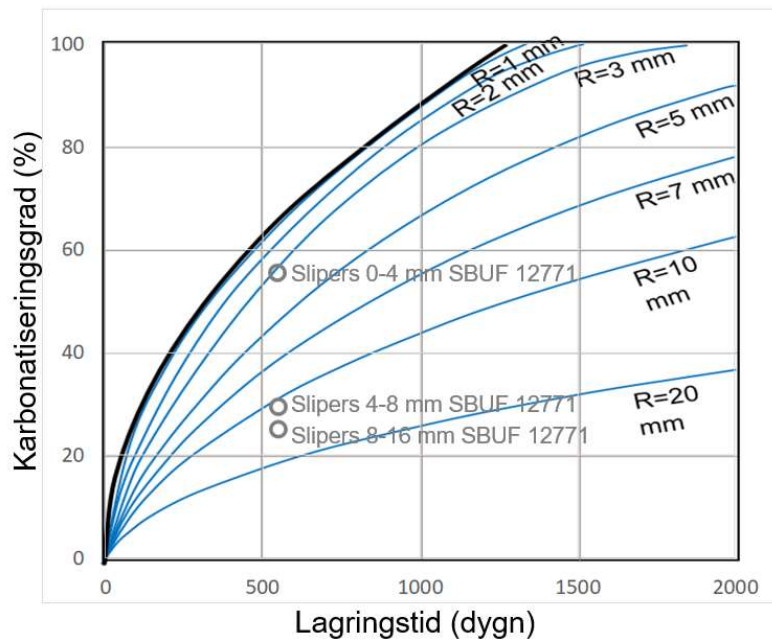
Det ska observeras att alla värden i Tabell 2 och Figur 5 motsvarar ett CO₂-upptag per ton i siktade fraktioner där merparten av naturlig ballast och grövre fraktioner sorterats ut från de finare fraktionerna. Det högsta rapporterade värdet på 64 kg CO₂/ton krossad betong motsvarar alltså 1 ton av enbart utsorterad 0-5 mm fraktion. Om värdena till exempel ska tillämpas för en gammal bro eller byggnad med en given mängd betong måste hänsyn tas till att hela volymen

inte kan krossas ner till fina fraktioner med stort upptag på grund av ballasten i betongen. Om utsorterade större partiklar inkluderas för ett representativt medelvärde för en betongkonstruktion som rivits och krossats blir upptaget lägre. Kikuchi och Kurodas (2011) använde till exempel ett medelvärde på 11 kg CO₂-upptag från ett ton krossad betong om alla fraktioner av den krossade betongen i deras rapport slogs samman. I deras fall räknade dom då inte med något CO₂-upptag i partiklar större än 5 mm vilket motsvarade 76 % av vikten i deras krossade betong (Kikuchi och Kurodas, 2011). Stripple (2013) angav en typisk kornfördelningskurva för krossad betong där ca 50 % av den krossade betongen hade partiklar mindre än 4 mm. Denna relativt stora andel 0-4 mm material stämmer väl överens med kornfördelningskurvor från krossad betong i flera rapporter (Leemann mfl., 2023b) men kornkurvan är beroende på vilken typ av kross som används.

Teoretiskt uppskattat CO₂-upptag i krossad betong

Det finns flera olika teoretiska modeller för att uppskatta det teoretiska CO₂-upptaget i betong och krossad betong. De flesta modeller bygger på en uppskattning av exponerad yta och karbonatiseringsdjupet (d_c) i betongkonstruktioner vilket är ungefär proportionellt mot roten ur tiden. Den så kallade k faktorn ($\text{mm}/\text{år}^{0.5}$) representerar karbonatiseringshastigheten, och d_c i mm efter t år kan uppskattas som ($d_c = kt^{0.5}$). Karbonatiseringshastigheten (k) är generellt högre i byggnader (ca 1-17) jämfört med anläggningskonstruktioner (ca 0,5-7) och beror på hållfasthet, exponeringsklimat och betongrecept mm. Denna enkla modell visar tydligt hur stor betydelse partikelstorleken (exponerad yta) har och hur lite betong som karbonatiserar naturligt under en betongkonstruktions livslängd på ca 100 år (5-170 mm). Denna enkla modell kan också tillämpas på krossad betong där olika partikelstorlekar får olika specifik yta (m^2/m^3) (Stripple 2013; Hussini och Davila, 2023; Stripple mfl., 2025).

Det finns också mer avancerade modeller som tar hänsyn till diffusion i sorterade högar av krossad betong. Figur 6 visar resultatet från en teoretisk modell av karbonatisering i sorterade luftiga högar av krossad betong (Thiery mfl., 2013) tillsammans med uppmätta värden från SBUF 12771 (Rogers mfl., 2016). Den beräknade teoretiska karbonatiseringen i Figur 6 motsvarar en mindre cylinder med höjd 7 cm och diameter 7 cm fylld med sfäriska partiklar av cementpasta med ett vatten cement tal på 0,55 och RF=60% (Thiery mfl., 2013). Figuren ska bara ses som ett exempel på hur karbonatiseringshastigheten påverkas av partikelstorleken men resultaten ligger i samma härad som uppmätta resultat från SBUF-projektet.



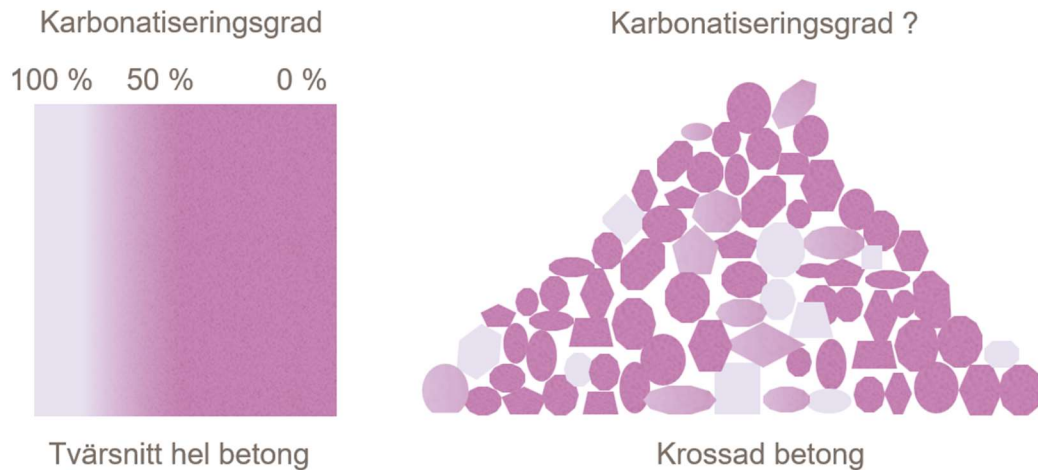
Figur 6. Teoretisk modell av karbonatisering i en hög med sfäriska partiklar av krossad betong, data från Thierry mfl. 2013 (blå linjer). Resultat från krossade betongslipers som lagrats i motsvarande sorterade högar i 18 månader, (Rogers mfl., 2016) (grå cirklar).

Mätmetoder för kvantifiering av CO₂-upptag i krossad betong

För att ett anläggningsprojekt ska kunna tillgodosäkra sig ett eventuellt CO₂-upptag i krossad betong är det viktigt att kunna kvantifiera det extra upptag som skett på grund av de extra åtgärder som gjorts i projektet. Nedan listas identifierade mätmetoder som kan vara relevanta för att kunna kvantifiera CO₂-upptag i krossad betong. I detta sammanhang bör det än en gång observeras att CO₂ endast kan bindas i cementpastan i den krossade betongen (Figur 3). Under krossning av betongen är det främst cementpastan som krossas och inte ballasten i betongen (Stripples mfl., 2025). Grövre fraktioner av krossad betong kan alltså till största delen bestå av ballast med ett tunt lager cementpasta där CO₂-upptaget endast kan ske i det tunna lagret med cementpasta (Stripples, 2013).

De flesta mätmetoder som hittills använts för att kvantifiera koldioxidupptaget i krossad betong bygger också på det fundamentala antagandet att resultatet från små representativa prover kan representera en större mängd krossad betong. Denna metodik och antagande kan ifrågasättas och kan sannolikt förklara en viss del av den stora spridning som sammanställts i föregående avsnitt med resultat ovan. Det är särskilt det initiala CO₂-upptaget som blir väldigt svårt att uppskatta efter att en betongkonstruktion rivits och betongen krossats och blandats i en stor hög. Det naturliga och initiala CO₂-upptaget som skett under konstruktionens användningsfas har bara skett i ytan av betongen men när betongen krossats och blandats har den karbonatiserade volymen av betongen blandats upp med helt okarbonatiserad betong (se Figur 7). Ett alternativ skulle kunna vara att mäta upp karbonatiseringsdjupet med indikatorvätska (fenolftalein-test, se nedan) innan eller under själva rivningen och på så sätt räkna ut hur stor del av den rivna betongen som karbonatiserat under användningsfasen. En liknande metodik har också nyligen

föreslagits av Stripple mfl. (2025) för att kunna uppskatta CO₂-upptag från en betongkonstruktion med största möjliga precision (Tier 3 nivå i IPCC).



Figur 7. Karbonatiseringen utgår från ytan av en betongkonstruktion (vänster). När hela betongkonstruktionen krossats upp i en hög har fullt karbonatiserad betong blandats upp med helt okarbonatiserad betong och det kan bli svårt att ta ett representativt prov för hela volymen (höger).

Vägning av materialets massa

När CO₂ binds i gammal krossad betong genom karbonatisering ökar vikten på den krossade betongen med i princip motsvarande mängd bunden CO₂. En liten del vatten bildas också under karbonatiseringen (se Ekvation 1). Förutsatt att vattenkvot (fuktkvot) och mängd betong är konstant kan alltså bunden mängd CO₂ kvantifieras genom att mäta upp viktökningen på samma mängd krossad betong före och efter karbonatisering. Denna metod skulle kunna tillämpas på en större eller mindre mängd krossad betong ute i fält förutsatt att vikten kan mätas med stor noggrannhet och vattenkvoten kan kontrolleras eller mätas upp.

Det finns idag många olika system för digital vägning i maskiner och truckar, för vikter under 5 ton ligger bra mätsystemen typiskt på en noggrannhet på ca 0,1 % av vikten. Viktökningen på grund av bunden CO₂ som identifierats i denna rapport (Tabell 2 och Figur 5) ligger i många fall på ca 1-2 % av vikten (ca 10-20 kg CO₂/ton) vilket alltså borde kunna mätas upp i fält på större kontrollerade volymer om ca 1 m³ (gabioner). Detta förutsätter dock att vattenkvoten (fuktkvoten) kan hållas konstant eller mätas upp med stor noggrannhet. Vattenkvoten i torr och våt krossad betong kan variera från ca 2 % till 10 % beroende på kornstorlek, porositet mm (Sereng mfl., 2021).

Termogravimetrisk Analys (TGA)

Termogravimetrisk analys (TGA) används i laboratorium för att kvantifiera ett materials kemiska beståndsdelar. Ett litet prov (ca 5-100 mg) värms upp till ca 1000° C under kontrollerad atmosfär (kvävgas, luft eller syrgas) samtidigt som vikten på provet mäts upp mycket noga. Under uppvärmningen kommer olika kemiska beståndsdelar förångas vid olika temperaturer vilket gör det möjligt att uppskatta mängden bunden CO₂. TGA metodens fördel är att den kan verifiera och kvantifiera mängden bunden CO₂ i krossad betong. Metodens nackdel är att endast mycket små (ca 5-100 mg) och mycket finfördelade (ca 80 µm) prover kan undersökas i laboratorium. Kaddah mfl. (2023) föreslog en ny metod där TGA kompletteras med uppvärmning av större mängder krossad betong (ca 200 g) i en större ugn för mer representativa värden på en större volym krossad betong. I det franska FastCarb projektet använde Izoret mfl. (2023) också större prover på 500 g i större ugn för att mäta upptaget av CO₂. En nackdel kan också vara att metoden inte skiljer på CO₂ från karbonatiserad cementpasta, kalkstensfiller och kalkstenballast.

Syrametoden

Kalciumkarbonat (kalcit eller kalksten) kan mineraliskt kännas igen med det så kallade syra-testet där en syra droppas på en sten och koldioxid avgår med tydligt fräsande och bubblande om stenen innehåller kalciumkarbonat. Metoden kan användas för att kvantifiera andelen cementpasta i betongen. Rogers mfl (2016) använde syrametoden för att mäta upp karbonatiseringsgraden i prover av krossad betong. Ett materialprov löstes upp i 18.5 % saltsyra (HCL) i en sluten behållare och tryckökningen från avgående CO₂ mättes upp och kalciuminnehållet bestämdes sedan med ICP-AES metoden (Inductively coupled plasma atomic emission spectrometry) (Rogers mfl., 2016).

Fenolftalein test

Fenolftalein är en indikatorvätska som kan appliceras på en färsk spräckt betongyta för att se vilken del av betongen som har ett högt pH och därmed indikerar låg eller ingen karbonatisering. Indikatorvätskan blir mörkt lila vid pH högre än 8-9 och ofärgad då pH är lägre.

Karbonatiseringsdjupet kan mätas upp med ett skjutmått på den spräckta ytan enligt standarden (SS 137242). Karbonatiseringsdjupet definieras som det avstånd från ytan till det område där den lila färgen börjar (ofärgat område). När denna metod används för att uppskatta CO₂-upptaget i betong bör det dock observeras att karbonatiseringsgraden inte måste vara 100 % i det ofärgade området (Leemann mfl., 2023). I praktiken kan karbonatiseringsgraden vara något lägre och metoden indikerar bara skillnader i pH och inte själva karbonatiseringsgraden (SIS 17310).

Fenolftalein test kan också användas i kombination med avancerad bildanalys där andelen karbonatiserad betong i ett tvärsnitt (bild) analyseras automatiskt (Leemann mfl., 2023; Oliva Rivera mfl., 2023)

REKOMMENDATIONER FÖR ANVÄNDNING AV GAMMAL KROSSAD BETONG I ANLÄGGNINGSPROJEKT

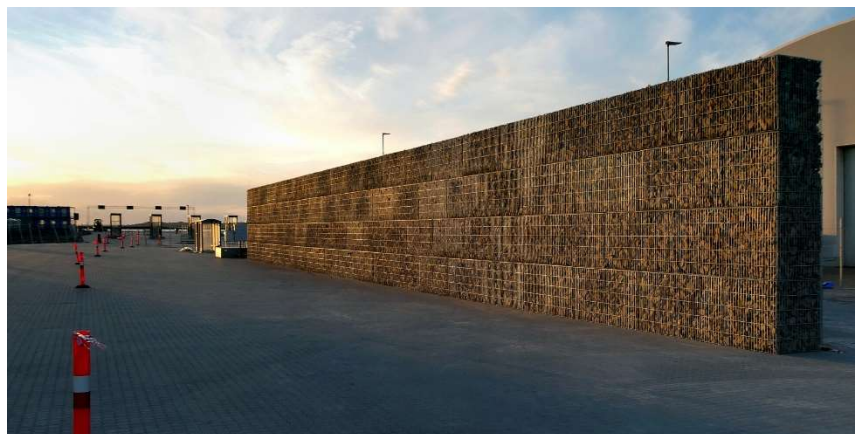
Baserat på resultaten från denna förstudie kan CO₂-upptaget i gammal krossad betong öka med ca 10-30 kg/ton om krossad betong hanteras rätt med avseende på maximal karbonatisering. Optimal hantering innebär i detta fall att betongen krossas upp till fina fraktioner och siktas och lagras eller används på ett sätt som gör att alla partiklar har god tillgång till CO₂ i luften. Det är också viktigt att beakta CO₂-utsläpp från själva hanteringen och krossningen också beaktas så att inte de positiva effekterna äts upp av nya utsläpp (Van Roijen mfl., 2024).

Normalt rivs betong idag ner till ca 300-900 mm stora delar på plats för att kunna transporteras till en anläggning för förkrossning ner till ca 40-150 mm stora fraktioner (Stripple mfl, 2025). Efter denna förkrossning kan materialet eventuellt krossas en andra gång vilket då ger ca 5-40 mm stora partiklar. Mer och finare krossning kostar tid och energi och görs inte rutinemässigt om det inte behövs för att skapa någon form av mervärde. Nedeljković mfl. (2023) konstaterade att energiåtgången vid krossning av betong ökade med en faktor 3 när partikelstorleken minskade från 25 mm till 5 mm. Det finns redan idag både mobila och eldrivna maskiner och krossar som i Sverige kan drivas på grön el vilket på sikt borde minska denna risk för CO₂-utsläpp i samband med krossad betong i anläggningsprojekt.

I samband med en ökad användning av gammal krossad betong i anläggningsprojekt är det också viktigt att beakta potentiell spridning/lakning av skadliga ämnen från betongen till omgivningen (Engelsen mfl., 2010; Engelsen mfl., 2012; Puthussery mfl., 2017). Betongen bör helst undersökas redan innan rivning och helst separeras så mycket som möjligt under själva rivningen för att minimera inblandning av andra byggnadsmaterial och potentiellt skadliga ämnen från andra material (Brander mfl., 2020; Naturvårdverket, 2010). Särskilt skadligt och viktigt är sexvärt krom (Cr⁶⁺) som kan finnas i gammal betong från 80-talet och tidigare. Flera studier har dock visat att även om Cr⁶⁺ kan lakas ut från gammal betong reduceras detta till mindre skadligt Cr³⁺ när lakvatten kommer i kontakt med organiskt material i mark eller vatten som har betydligt lägre pH jämfört med betongen. Detta innebär alltså att även om Cr⁶⁺ lakas ut från lakvatten med högt pH är det i praktiken väldigt lite som sprids vidare i naturen om lakvattnet kommer i kontakt med jord eller vatten som innehåller organiskt material och mer normala pH värden (Eckbo mfl., 2022). Helsing (2019) poängterar också att det är förhållandevis lätt att kontrollera och ta hand om lakvatten från krossad betong om betongen sorteras och förvaras på ett kontrollerat sätt som bidrar till ökad karbonatisering. I Naturvårdverkets handbok om återvinning av avfall i anläggningsarbete finns rekommendationer på provning och gränsvärden för rivningsmaterial som används/lagras i naturligt (obundet) tillstånd (Naturvårdsverket, 2010; Naturvårdsverket, 2022). Brander mfl. (2020) har sammanställt befintligt regelverk för användning av gammal krossad betong i ny betong och vägkonstruktioner. Nedan följer några förslag på potentiella temporära och permanenta användningsområden med fokus på koldioxidupptag i krossad betong i anläggningsprojekt.

Gabioner av krossad sorterad betong

Gabioner är en konstruktion där en nätkorg av metall eller annat material fylls med jord eller sten. Flera gabioner kan staplas tillsammans för att bygga en skyddsmur, stödmur, bullerskärm eller annan typ av större konstruktion. Gabioner av krossad sorterad betong skulle kunna användas som både temporära och permanenta konstruktioner i anläggningsprojekt. Efter önskad lagringstid och karbonatisering kan den krossade betongen i en temporär konstruktion flyttas och användas som ballast i ny betong utan spill. En gabion skulle också kunna vägas för att kvantifiera bunden mängd CO₂ förutsatt att fuktkvoten i den krossade betongen är konstant eller kan kontrolleras. Förutsatt att det finns gammal betong som ska rivs inom projektet minskar klimatbelastningen genom minskade transporter och upptag av CO₂ med denna lösning. Gabioner kan tillverkas på plats och kan också kombineras med klätterväxter för att binda ytterligare koldioxid från atmosfären. Gabioner kan också ge ett positivt bidrag till biologisk mångfald genom att skapa skydd för insekter och små djur (Park- och naturförvaltningen i Göteborg 2017).



Figur 8. Exempel på gabioner som staplats på varandra och bildar en temporär mur (foto Jonn Leffmann CC BY-SA 3.0).



Figur 9. Exempel på gabioner som staplats på varandra och bildar en permanent stödkonstruktion (foto Acanfora CC BY-SA 3.0).

Krossad betong som temporärt ytmaterial

Krossad betong skulle också kunna användas som temporärt ytmaterial inom anläggningsprojekt. Idag används oftast högvärdigt nytt krossmaterial för tillfälliga hårdgjorda ytor inom bygg- och anläggningsprojekt. Dessa ytor används till temporär uppställning av fordon, maskiner, bodar mm under produktionen. Om ett relativt tunt lager av krossad betong ($<0,1$ m) läggs ut i ytan skapas sannolikt goda förutsättningar för upptag av CO₂ under produktionen som kan vara flera år i större projekt. Efter avslutat projekt kan materialet användas i nya tillämpningar eller fyll inom projektet för permanent lagring av CO₂. Förutsatt att det finns gammal betong som ska rivs inom projektet minskar klimatbelastningen genom minskade transporter och upptag av CO₂ med denna lösning.

Krossad betong som permanent ytmaterial

Krossad betong skulle också kunna användas som permanent ytmaterial inom anläggningsprojekt. Idag används oftast högvärdigt nytt krossmaterial i slänter intill vägar och

trafikplatser där krav på god dränering, släntstabilitet, erosionsskydd, trafiksäkerhet mm behöver säkerställas. Krossad sorterad betong skulle här kunna användas som permanent ytligt fyllnadsmaterial för upptag och permanent lagring av CO₂ i anläggningsprojekt. Förutsatt att det finns gammal betong som ska rivas inom projektet minskar klimatbelastningen genom minskade transporter och upptag av CO₂ med denna lösning. För denna tillämpning kan Naturvårdverkets handbok om återvinning av avfall i anläggningsarbete användas för rekommendationer på provning och gränsvärden för rivningsmaterial som används/lagras i naturligt (obundet) tillstånd (Naturvårdsverket, 2010).

Krossad betong som permanent fyll och överbyggnad

Krossad betong kan också kunna användas som permanent fyllnadsmaterial eller i vägöverbyggnader. Det finns redan ett regelverk från Trafikverket som reglerar var och hur mycket krossad betong som kan användas beroende på den krossade betongens kornkurva, hållfasthet, nötningsegenskaper (TDOK 2013:0532).

Krossad betong i bullervallar

Krossad betong kan också kunna användas i bullervallar eller andra konstruktioner för att dämpa buller. Obundna sorterade material med öppen porstruktur är effektiva på att absorbera ljud (Koussa mfl., 2013). Krossad betong kan också användas för att tillverka nya ljudabsorberade material med öppen porstruktur för maximal dämpning av buller (Arenas mfl., 2017; Lázaro mfl., 2022).

Krossad betong i ny betong

Gammal krossad betong kan också användas som ballast i ny betong. Internationellt tillämpas detta redan mer i flera andra länder jämfört med i Sverige (Wang mfl., 2021). Denna förstudie fokuserar på själva koldioxidupptaget i krossad betong och tillämpningen av gammal krossad betong i ny betong ingår inte i denna rapport. Det finns flera andra rapporter och pågående projekt som fokuserar på tillämpningen av gammal krossad betong i ny betong (Rogers mfl., 2016; Brander mfl., 2020; Sadagopan, 2021; Wang mfl., 2021; Izoret mfl., 2022). I detta sammanhang bör det dock nämnas att det finns undersökningar som visar att själva karbonatiseringen av gammal krossad betong ger positiva effekter på vattenabsorption och hållfasthet på ballasten vid tillämpningen av gammal krossad betong som ballast i ny betong (Sereng mfl., 2021; Oliva Rivera mfl., 2023).

POTENTIELLT MERVÄRDE I ANLÄGGNINGSPROJEKT

I det nyligen avslutade SBUF projektet *”Att hävda klimatneutralitet i bygg- och anläggningsprojekt”* sammanfattas nuvarande regelverk och principer för hur negativa utsläpp i bygg eller anläggningsprojekt skulle kunna hanteras (Möllersten mfl., 2024). Projektet analyserar en fiktiv fallstudie med CO₂-upptag genom karbonatisering av gammal krossad betong i ett bygg

eller anläggningsprojekt utifrån den senaste versionen av "The Greenhouse Gas Protocol Land Sector and Removals Guidance" (GHGP-LSRG 2024). Fallstudien har inte kunnat ge tydliga svar om exakt hur de negativa utsläppen skulle kunna redovisas (tillgodoräknas) i klimatkalkylen för ett bygg eller anläggningsprojekt. Regelverk och riktlinjer är fortfarande mest framtagna för nationer eller organisationers årliga rapportering. Men resultaten från rapporten bekräftar att negativa utsläpp utöver naturliga upptag sannolikt kommer få större betydelse och kunna tillgodoräknas på något vis i enskilda bygg- och anläggningsprojekt i framtiden. Denna typ av CO₂-upptag behöver då sannolikt rapporteras separat som så kallade "bidragsanspråk" och kan inte omedelbart kvittas mot andra utsläpp i projektets klimatkalkyl eller rapportering för att hävda "klimatneutralitet" (så kallade kompensationsanspråk). Rapporten betonar också hur gällande och framtida regelverk går mot allt striktare krav på att företag måste minska sina befintliga utsläpp inom verksamheten/projektet så långt det är möjligt så att endast så kallade "residuala utsläpp" kvarstår innan externa växthushuskrediter kan användas för att hävda klimatneutralitet. Detta betyder troligen att interna åtgärder som ger ett upptag av CO₂ inom den egna verksamheten kommer att uppmuntras och få stor betydelse jämfört med externa mer riskfyllda växthushuskrediter. Framtida regelverk kommer samtidigt också ha mycket strikta krav på kvantifiering av verkliga permanenta CO₂-upptag som inte skulle ske utan särskilda åtgärder inom den egna verksamheten/projektet (principerna om försiktighet, permanens och additionalitet). Negativa utsläpp inom ett byggprojekt kommer därför sannolikt att behöva redovisas och följas upp årsvis och separat precis som det redan görs inom nationell utsläppsrapportering enligt GHGP där CO₂-upptag från skog till exempel redovisas separat.

Det bör också observeras att naturliga CO₂-upptag som sker utan någon åtgärd (18 % av det totala potentiella upptaget se Fig 3) inte kan inkluderas som en eventuell kolsänka i ett projekt. Eventuella naturliga CO₂-upptag som sker under materialets livscykel kan bara tillgodoräknas som Scope 1 upptag av den som tillverkat ursprungsmaterialet och därmed belastats med tillhörande utsläpp i den egna verksamheten (Scope 1). Utifrån detta har cementindustrin i Sverige redan föreslagit ett årligt naturligt upptag i all befintlig betong i Sverige på 23 % av sina egna årliga koldioxidutsläpp inom Scope 1 (Strippel mfl., 2021). Av dessa 23 % motsvarar 2 % end-of-life (krossning mellanlagring) och 1 % återanvändning. Om mängden betong är känd så rekommenderas ett normalt CO₂-upptag vid rivning och krossning (end-of-life) vara 10 kg/m³ och ytterligare 10 kg/m³ vid återanvändning som ballast (secondary use). Ca 20 kg/m³ (ca 8 kg/ton) anses alltså redan vara ett totalt naturligt upptag av CO₂ och har föreslagits ingå i tillverkarens rapporterade utsläpp och i Sveriges rapportering till FN:s klimatkonvention som ett naturligt upptag (Strippel mfl., 2021). Observera att dessa 8 kg CO₂/ton krossad betong är ett generellt medelvärde för all typ av betong och värdet skiljer sig något från de 11 kg CO₂/ton som beräknats från ett specifikt betongrecept i Figur 3.

Om särskilda åtgärder görs för att öka CO₂-upptaget i krossad betong och detta upptag därmed överskrider 8 kg/ton borde det kunna räknas som ett negativt utsläpp i ett projekt även om det idag inte finns någon formell reglering av detta upptag. För att ändå uppskatta hur ett fiktivt anläggningsprojekt eventuellt skulle kunna tillgodoräkna sig ett potentiellt upptag av CO₂ inom projektet ges ett konkret exempel här nedan.

Vid ett vägbygge rivs en gammal betongbro och betongen (2400 ton) krossas upp och lagras i ideala förhållande för karbonatisering. CO₂-upptaget under projektet verifieras genom mätningar till 15 kg/ton. Av dessa 15 kg/ton hade ca 8 kg CO₂/ton krossad betong tagits upp även med dagens hantering där den största delen av gammal riven betong krossas och används till lågvärdigt fyllnadsmaterial (Stripple mfl., 2021). Som förslag skulle alltså projektet och företaget kunna redovisa ett CO₂-upptag på ca $(15-8)*2400=16\,800$ kg CO₂ som ett så kallat ”bidragsanspråk”.

REFERENSER

- Andersson, R., Fridh, K., Stripple, H., Häglund, M., 2013, Calculating CO₂ Uptake for Existing Concrete Structures during and after Service Life, Environ. Sci. Technol., Vol. 47, pp. 11625–11633. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es401775w>
- Arenas, C., Luna-Galiano, Y., Leiva, C., Vilches, L.F., Arroyo, F., Villegas, R., Fernández-Pereira, C., 2017, Development of a fly ash-based geopolymeric concrete with construction and demolition wastes as aggregates in acoustic barriers, Construction and Building Materials, Volume 134, pp. 433-442, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.119>
- Betonghandbok Material, 2021, Del 2: Kap 35 Hållbarhet, Svensk Byggtjänst, ISBN 978-91-7917-088-2.
- Boverket, 2021, Miljöindikatorer – aktuell status, <https://www.boverket.se>
- Boverket, 2025, Avfall. <https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/miljoindikatorer---aktuell-status/avfall/> Hämtad 2025-02-04
- Brander, L., Helsing, E., Gabrielsson, I., 2020, Constructivate arbetspaket 3 – Återvinning av rivningsavfall som ballast i betong, RISE Rapport 2020:25, https://ccbuild.se/media/v1/ftstn/rise-constructivate-wp3-betong_20200527.pdf
- Eckbo, C., Okkenhaug G., och Hale S.E., 2022, The effects of soil organic matter on leaching of hexavalent chromium from concrete waste: Batch and column experiments, Journal of Environmental Management, Vol. 309, 114708, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114708>
- Engelsen, C.J., Van der Sloot, H.A., Wibetoe, G., Justnes, H., Lund, W., Stoltenberg-Hansson, E., 2010, Leaching characterisation and geochemical modelling of minor and trace elements from recycled concrete aggregate. Cement Concr. Res. 2010, 40 pp. 1639–1649.
- Engelsen, C. J., Wibetoe, G., Van Der Sloot, H. A., Lund, W. & Petkovic, G. 2012. Field site leaching from recycled concrete aggregates applied as sub-base material in road construction. Science of the Total Environment, 427-428, 86-97.
- GHGP-LSRG, 2024, The Greenhouse Gas Protocol Land Sector and Removals Guidance, Draft for Pilot Testing and Review, <https://ghgprotocol.org/land-sector-and-removals-guidance>

Helsing, E. 2019. Krom i krossad återvunnen betong. Borås: RISE Research Institutes of Sweden AB.

Hou, Y., Mahieux, P.Y., Lux, J., Turcry, P., Aït-Mokhtar, A., 2021, Carbonation rate of compacted recycled aggregates for sub-base layers of pavement, Construction and Building Materials, Volume 312, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125420>.

Hussini, T., och Davila J.C., 2023, Karbonatisering av riven betong, Examensarbete, Uppsala Universitet, ISRN UTH-INGUTB-EX-B-2023/014-SE

Izoret, L., Pernin, T., Potier, J-M., Torrenti, J.M., 2023, Impact of Industrial Application of Fast Carbonation of Recycled Concrete Aggregates. Applied Sciences. 13. 849. [10.3390/app13020849](https://doi.org/10.3390/app13020849).

IPCC 2022, IPCC Sixth Assessment Report, Mitigation of Climate Change,

Kaddah, F., Roziere, E., Ranaivomanana, H., Amiri, O., 2023, Complementary use of thermogravimetric analysis and oven to assess the composition and bound CO2 content of recycled concrete aggregates, Developments in the Built Environment, Volume 15, <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100184>.

Kikuchi T, Kuroda Y. Carbon dioxide uptake in demolished crushed concrete. Journal of Advanced Concrete Technology 9: 115-124 (2011).

Koussa, F., Defrance, J., Jean, P., Blanc-Benon, P., 2013, Acoustic performance of gabions noise barriers: Numerical and experimental approaches, Applied Acoustics, Volume 74, Issue 1, pp. 189-197, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.07.009>

Lázaro, J., Pereira, M., Costa, P.A., Godinho, L., 2022, Performance of Low-Height Railway Noise Barriers with Porous Materials, Applied Sciences (Switzerland), 12 (6), art. no. 2960, DOI: [10.3390/app12062960](https://doi.org/10.3390/app12062960)

Leemann, A., Münch, B., och Wyrzykowski, M., 2023, CO2 absorption of recycled concrete aggregates in natural conditions, Materials Today Communications, Vol. 36, 106569, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106569>

Leemann, A., Winnefeld, F., Münch, B., Tiefenthaler, J., 2023b, Accelerated carbonation of recycled concrete aggregates and its implications for the production of recycling concrete, Journal of Building Engineering, Vol. 79, 107779, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107779>.

Möllersten, K., Kloow, E., Sandgren, A., 2024, Att hävda klimatneutralitet i bygg- och anläggningsprojekt, SBUF projekt 14238, <https://www.sbuf.se/projektresultat/projekt?id=31244fbc-ba2e-4cbc-8b4e-cb9c06ac5921>

Naturvårdsverket, 2010. Återvinning av avfall i anläggningsarbete, handbok 2010:1. Februari 2010. ISBN-978-91-620-0164-3.

Naturvårdsverket, 2022, Avfall i Sverige 2022 uppkomst och behandling, Rapport 7161, september 2024. ISBN 978-91-620-7161-5.

Nedeljković, M., Kamat, A., Holthuizen, P., Tošić, N., Schlangen, E., Fennis, S., 2023, Energy consumption of a laboratory jaw crusher during normal and high strength concrete recycling, Minerals Engineering, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108421>

Oliva Rivera, A., Suchorzewski, J., Malaga, M., 2023, Potential of CO₂-Storage in Recycled Concrete Aggregates by Accelerated Carbonation, RILEM Proceedings SynerCrete 2023, Springer, 2023, Vol. 44, s. 604-615, DOI: 10.1007/978-3-031-33187-9_56.

Park- och naturförvaltningen i Göteborg, 2017, Parker och naturområden. Handbok för ett varierat växt- och djurliv, Park- och naturförvaltningen, Göteborgs Stad, www.goteborg.se/parkochnatur

Puthussery, J. V., Kumar, R. & Garg, A., 2017, Evaluation of recycled concrete aggregates for their suitability in construction activities: An experimental study. Waste Management, 60, 270–276.

Rogers, P., Fridh, K., Gram, H.E., Westerholm, M., 2016, Återvunnenbetong som ballast i ny betong, SBUF projekt 12771, <https://www.sbuf.se/projektresultat/projekt?id=335520fd-c404-4f91-abe7-51c25f1de1fe>

Sadagopan, M., 2021, Recycling of concrete in new structural concrete, PhD thesis, Swedish Centre for Resource Recovery, University of Borås, ISBN 978-91-89271-20-3.

Sereng, M., Djerbi, A., Metalssi, O., Dangla, P., Torrenti, J.M., 2021, Improvement of Recycled Aggregates Properties by Means of CO₂ Uptake. Applied Sciences. 11. 6571. 10.3390/app11146571.

SIS-CEN/TR 17310:2019 (E), 2019, Teknisk rapport SIS-CEN/TR 17310:2019, Publicerad 2019-09-16, Utgåva 1, Språk engelska, 91.100.30, STD-80015483, www.sis.se

SOU 2020:4, Betänkande av Klimatpolitiska vägvalsutredningen, Vägen till en klimatpositiv framtid, Regeringskansliet 2020, ISBN 978-91-38-25019-8.

SS 137242, SVENSK STANDARD, Betongprovning - Hårdnad betong - Karbonatiseringsdjup

Stripple, H., 2013, Greenhouse gas strategies for cement containing products, IVL Report B2024, 2013

Stripple, H., Ljungkrantz, C., Gustafsson, T., Ronny Andersson, R., 2021, CO₂ uptake in cement containing products, IVL rapport No. B 2309, Maj 2021.

Stripple, H., Ljungkrantz, C., Gustafsson, T., Ronny Andersson, R., 2025, CO₂ uptake in cement-containing products – Background and calculation models for implementation in national greenhouse gas emission inventories, IVL rapport No. B 2499, Feb 2025.

Thiery, M., Dangla, P., Belin, P., Habert, G., Roussel, N., 2013, Carbonation kinetics of a bed of recycled concrete aggregates: A laboratory study on model materials, Cement and Concrete Research, Vol. 46, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.01.005>

TDOK 2013:0532, Alternativa material för vägkonstruktioner, Trafikverket, Kravdokument, Version 1.0, 2014-07-01. <https://trvdokument.trafikverket.se>

Van Roijen, E., Sethares, K., Kendall, A., Miller, S.A., 2024, The climate benefits from cement carbonation are being overestimated. Nat Commun 15, 4848, <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48965-z>

Wang, B., Yan, L., Fu, Q., Kasal, B., 2021, A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete, Resources, Conservation and Recycling, Volume 171, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105565>

Wang, D., Xiao, J., Duan, Z., 2022, Strategies to accelerate CO2 sequestration of cement-based materials and their application prospects, Construction and Building Materials, Vol. 314, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125646