



Karbonatisering - En förbisedd koldioxidsänka

Anders Selander¹, Carlos Gil Berrocal², Ingemar Löfgren²,
Stefan Sandelin¹, Katarina Malaga³

¹ CEMENTA HeidelbergCement Group; ² Thomas Concrete Group; ³ RISE Research Institutes of Sweden AB

Karbonatisering - En förbisedd koldioxidsänka

Anders Selander¹, Carlos Gil Berrocal², Ingemar Löfgren²,
Stefan Sandelin¹, Katarina Malaga³

¹ Cements Heidelbergcement Group; ² Thomas Concrete Group; ³ RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE rapport 2022:108

ISBN 978-91-89711-53-2

:

Förord

Rapporten beskriver i en enkel form karbonatisering som kemisk fenomen. Var kommer koldioxiden från, hur tas den upp igen av betongen och hur skall den beaktas i en LCA. I tillägg till detta har en fallstudie genomförts där koldioxidupptaget i ett flerbostadshus beräknats för olika scenarier där designlösningar valts för att maximera koldioxidupptaget och därmed även sänka koldioxidavtrycket för hela byggnaden.

Arbetet har genomförts inom ramen för BETCRETE 2.0 som samfinansierats av Vinnova inom programmet utmaningsdriven innovation (UDI) och deltagande företag. Författarna till denna rapport representerar CEMENTA AB (Anders Selander och Stefan Sandelin), THOMAS CONCRETE GROUP AB (Carlos Gil Berrocal och Ingemar Löfgren) samt RISE (Katarina Malaga). Fallstudien som presenteras i Bilaga 2 är skriven av Carlos Gil Berrocal.

Innehåll

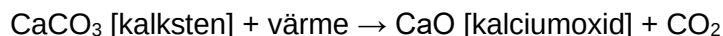
Förord	2
1. Vad är karbonatisering?	4
2. Var kommer koldioxiden ifrån?	4
3. Hur tas koldioxiden upp igen av betongen?	5
4. Hur mycket koldioxid kan tas upp igen?	5
5. Går det att beräkna upptaget?	6
Kan vi påverka genom kloka material- och konstruktionsval?	7
Hur mycket koldioxid tas upp under en byggnads livstid?	8
6. Vilken potential finns i rivning och återvinning?	10
7. Sammanfattning	11
Bilaga 1 – Nulägesbeskrivning	12
Referenser	13
Bilaga 2 - CO ₂ uptake through carbonation of concrete buildings – a case study	15
1. Introduction	15
Background	15
Purpose and limitations	15
2. Methodology	16
Description of Blå Jungfrun and the original reference building	16
Description of the structural system adopted	17
Calculation of concrete volumes and exposed concrete surfaces	18
Scenarios for the calculation of the CO ₂ uptake	19
Concrete mixes for the different elements	21
Example of calculation procedure	23
3. Results	24
Distribution of surface area, concrete volume and CO ₂ emissions	24
CO ₂ uptake	27
CO ₂ uptake in several stages	30
4. Concluding remarks	30

1. Vad är karbonatisering?

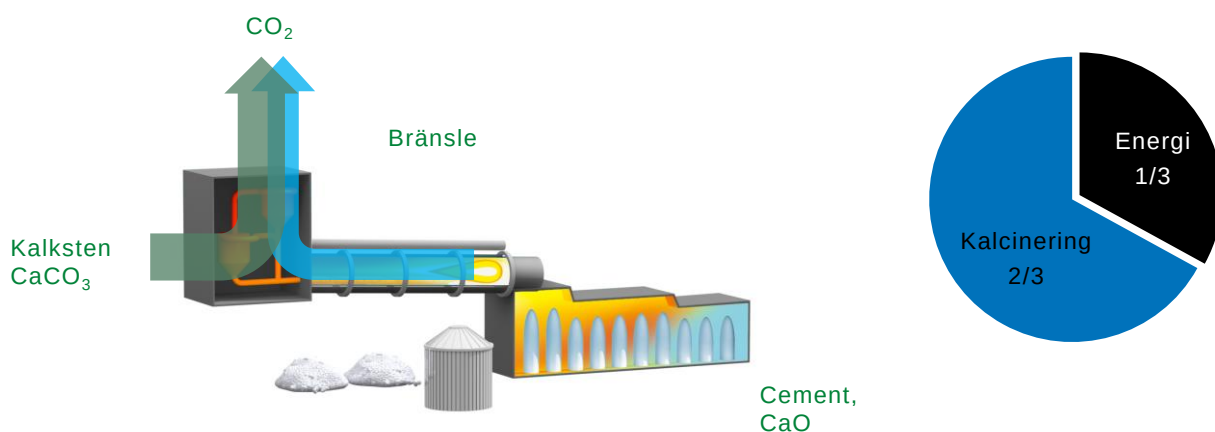
Karbonatisering innebär att betong i byggnader och infrastruktur tar upp koldioxid direkt ur luften och lagrar den permanent. Detta är inte en ny företeelse utan en naturlig process som pågår hela tiden runt omkring oss. Fenomenet är välkänt sedan över 100 år och har mestadels ansetts vara skadligt eftersom processen påverkar risken för att ingjuten armering börjar rosta i utomhusmiljöer. Viktigt att understryka här är att detta alltid beaktas genom val av betongrecept och genom val av tjocklek på det täckande betongskiktet. Olika krav gäller för olika miljöer och hänsyn tas i alla tekniska regelverk som används för betongbyggande. Skademekanismen karbonatisering är dock bara den ena sidan av myntet. Under de senaste åren har forskningen även kunnat visa på karbonatiseringens positiva klimateffekter, som kommer av att betong absorberar en icke försumbar mängd koldioxid ur atmosfären. IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2021) bekräftar också att karbonatisering sker i befintlig infrastruktur och även om kvantifiering i global skala är behäftat med stora osäkerheter väljer författarna till rapporten att lyfta siffran 50 %. Det vill säga hälften av de årliga utsläppen från cementtillverkning absorberas av befintliga (nyproducerade och äldre) betongkonstruktioner.

2. Var kommer koldioxiden ifrån?

I samband med tillverkningen av cement, eller egentligen cementklinkern som finmald utgör den viktigaste komponenten i cement, frigörs koldioxid. En tredjedel av koldioxiden kommer från bränslet i ugnen och två tredjedelar från kalkstenen. Processen kallas för kalcinering.



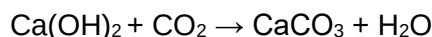
Kalciumoxiden binds i sin tur i flera olika klinkermineral. Figur 1 visar en enkel skiss på en cementfabrik där de två huvudsakliga källorna till koldioxidutsläppen visas.



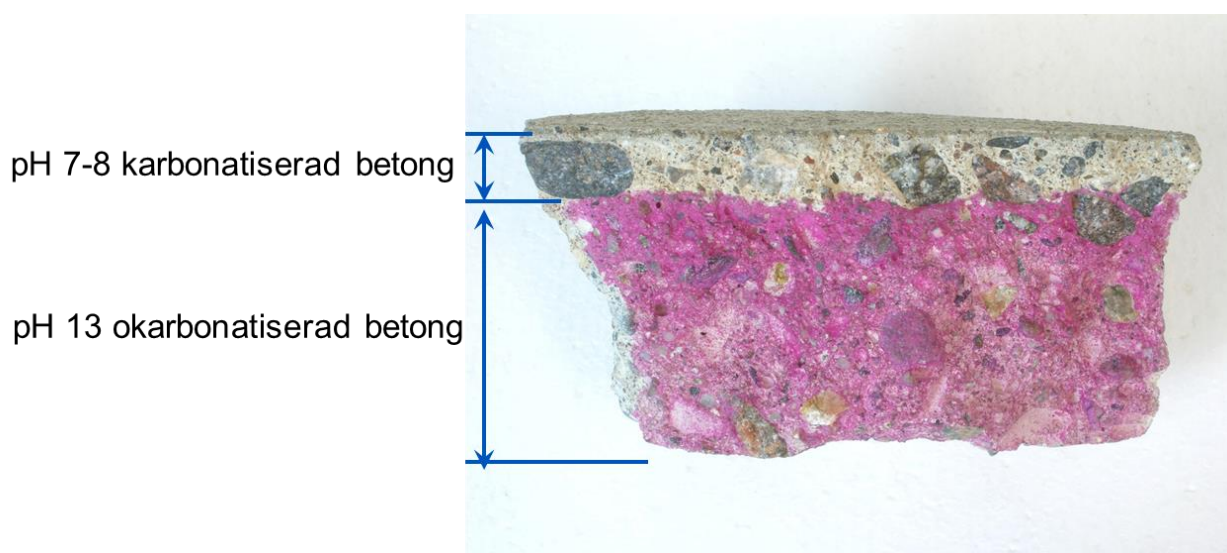
Figur 1: I cementugnen frigörs koldioxid, bunden som kalciumkarbonat, från kalkstenen i en kemisk process som kallas för kalcinering. Processen är energiintensiv och i ugnen frigörs även koldioxid från bränslet.

3. Hur tas koldioxiden upp igen av betongen?

Vid tillverkning av betong blandas cement och vatten med ballast för att skapa betong. Cement och vatten utgör limmet som ger betongen dess styrka och utifrån vilka betonegenskaper som önskas styrs proportionerna mellan de ingående materialen. Betongen hårdnar genom en reaktion mellan cement och vatten där bland annat kalciumhydroxid bildas. Så snart detta är avslutat börjar den koldioxid som lämnade kalkstenen under kalcineringen tas upp av betongen igen. Processen kallas för karbonatisering.



Upptaget sker direkt från luften som omger betongkonstruktionen och startar från ytan. Hur långt processen kommit är lätt att se med hjälp av en pH-indikator eftersom det sker en markant sänkning av pH i den karbonatiserade betongen. Figur 2 visar ett enkelt exempel på detta. Upptaget sker fort i början och därefter långsammare i takt med att karbonatiseringsdjupet ökar. På 25 år tas lika mycket koldioxid upp av betongen som under de efterföljande 75 åren.



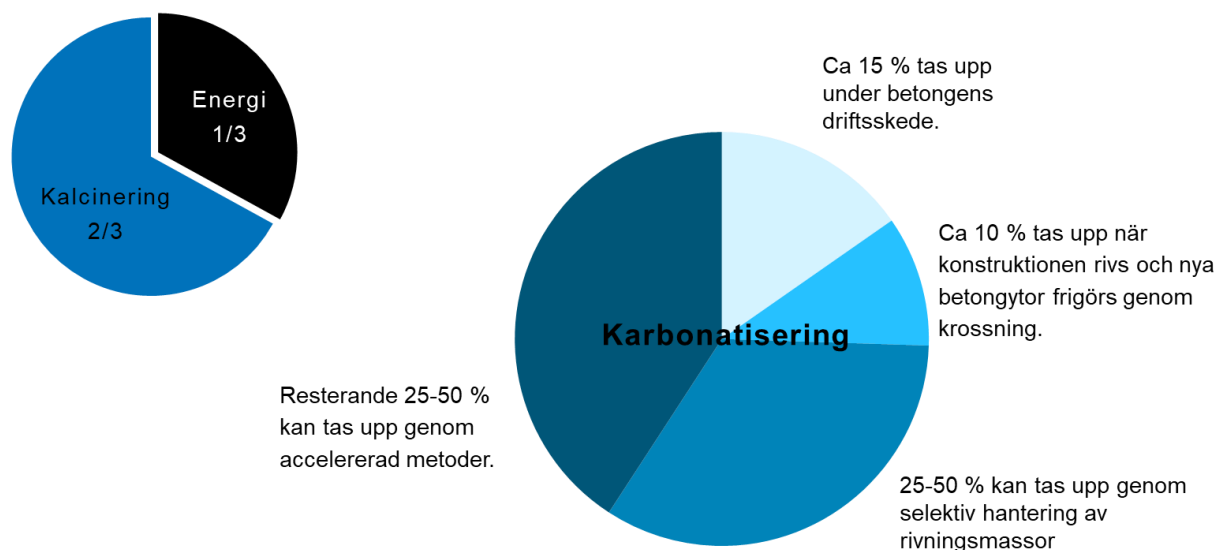
Figur 2: Foto av en spräckt betongyta som har karbonatiserat från ovanifrån och där ett koldioxidupptag skett. pH-indikatorn visar ett markant färgomslag vid karbonatiseringsfronten.

4. Hur mycket koldioxid kan tas upp igen?

Den tredjedel av koldioxiden som kommer från bränslet i cementugnen kommer inte kunna tas upp av betongen genom karbonatisering. Resterande del från kalcineringen av kalkstenen kan och kommer också i ett längre tidsperspektiv att tas upp av betongen. Figur 3 visar på ett ungefär hur detta upptag ser ut fördelat på olika delar av betongens livscykel. Ca 15 % tas upp under betongens driftsskede där betong med hög hållfasthet i fuktig miljö tar upp mindre medan betong med normal eller låg hållfasthet i torrare miljö kan ta upp mer. Även geometri och ytskikt har betydelse, grova konstruktionsdelar kommer till exempel ta

upp mindre i förhållande till volym och tunna mer och täta beläggningar begränsar upptaget. Ytterligare ca 10 % kan tas upp när konstruktionen rivs och nya betongytor frigörs genom krossning. Dessa upptag sker utan större arbetsinsatser och kostnader.

För att öka upptaget ännu mer krävs aktiva åtgärder och förädling. Genom en selektiv hantering av rivningsmassor och ökad exponering i en för karbonatisering gynnsam luftfuktighet kan ytterligare 25–50 % tas upp. Den resterande delen kräver accelererade metoder.



Figur 3: Schematisk skiss på var koldioxiden kommer från samt hur stor del som kan tas upp under betongens livscykel. Med 100 % upptag genom karbonatisering avses i figuren den andel koldioxid som kommer från kalcineringen.

Om all cement har reagerat så kan i teorin också all koldioxid som kommer från kalkstenen tas upp igen. I praktiken är dock 80–90 % upptag mer rimligt i miljöer där koldioxid, temperatur och fukt styrs för att maximera upptaget.

5. Går det att beräkna upptaget?

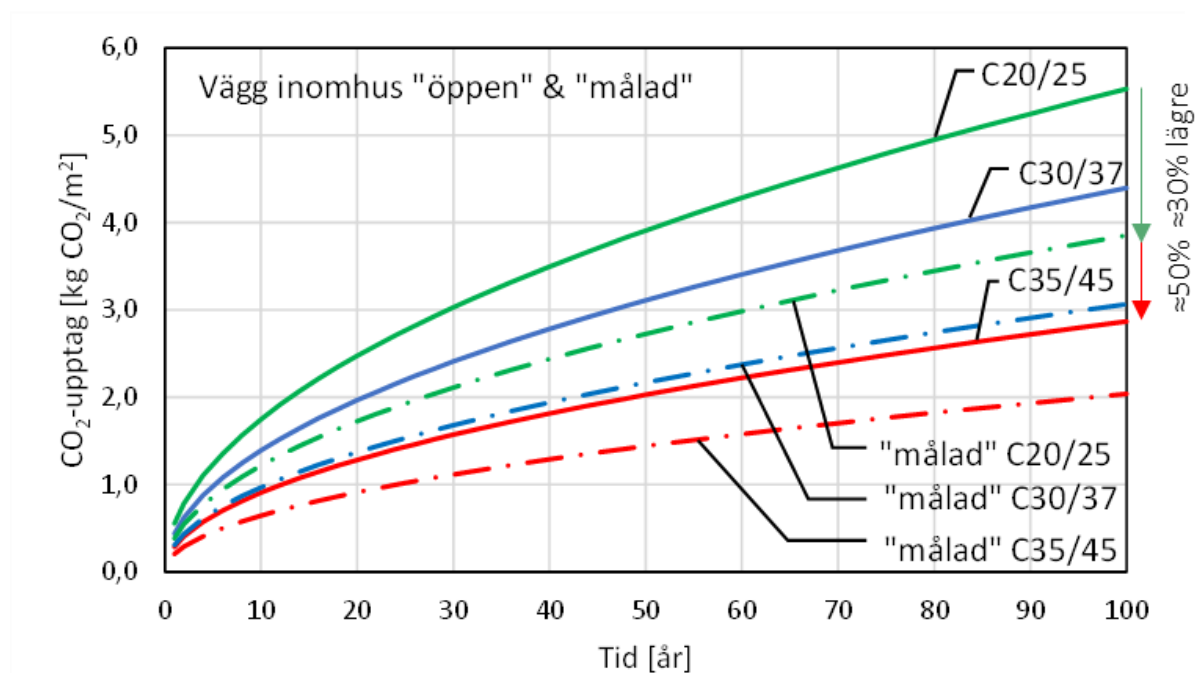
Sedan flera år tillbaka har det bedrivits ett omfattande arbete för att kvantifiera den mängd koldioxid som tas upp av betongkonstruktioner. Eftersom flera faktorer styr detta upptag är det inte möjligt att göra en exakt prognos för varje situation och det kommer vi nog aldrig kunna göra. För att illustrera detta kan vi tänka oss en lägenhetsvägg. Vi kan inte förvänta oss att precis samma ytskikt skall sitta på väggen i 100 år. Byter vi ytskikt förändras också förutsättningarna för koldioxidupptaget. Ett annat exempel skulle kunna vara en källare som är uppvärmd och relativt torr under en del av byggnadens livslängd men kall och fuktig under en annan. Den förstnämnda är gynnsam för karbonatisering medan den senare inte är det. Med detta sagt kan vi ändå göra prognoser utifrån vissa antagande.

Numera finns också standarden SS-EN 16757 som beskriver hur olika faktorer påverkar koldioxidupptaget under brukarskedet. Med stöd från denna går det att beräkna

koldioxidupptaget i en befintlig byggnad men kanske ännu viktigare, i förväg planera för att maximera upptaget där det är möjligt.

Kan vi påverka genom kloka material- och konstruktionsval?

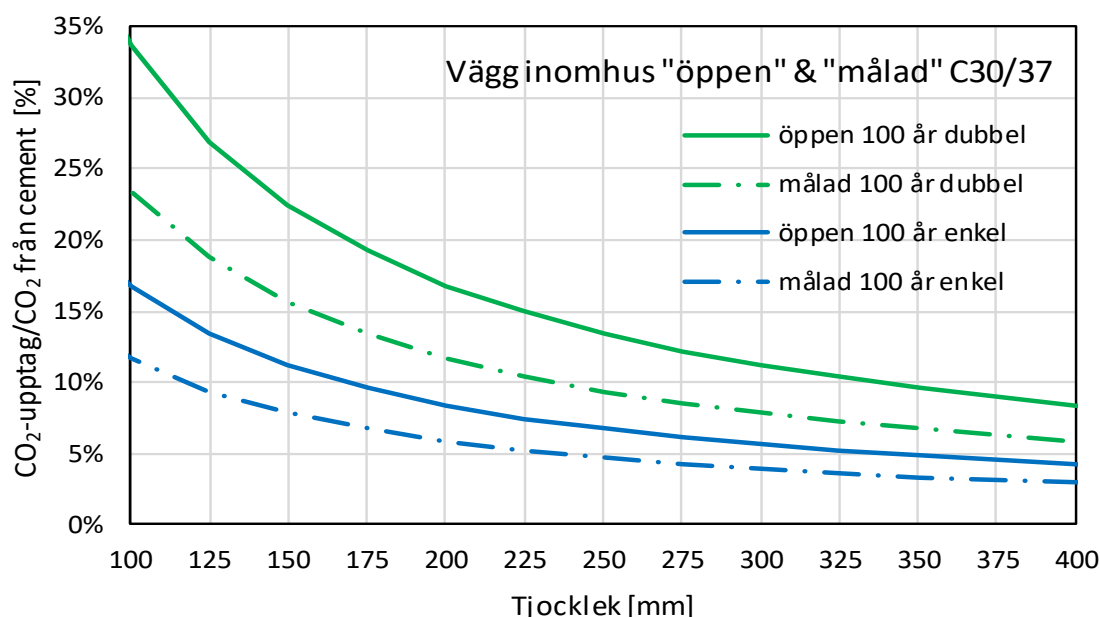
Som med det mesta i vår vardag väljer vi gärna något som är lite bättre/starkare/hållbarare än vad vi faktiskt behöver. Betong är inget undantag här. Genom att välja en högre hållfasthetsklass än vad konstruktionsdelen egentligen kräver lämnar vi också ett större koldioxidavtryck än nödvändigt. Beaktar vi dessutom det framtida koldioxidupptaget får vi en dubbelt negativ verkan eftersom karbonatisering också går långsammare i en starkare/tätare betong. Kloka materialval ger inte bara lägre utsläpp av koldioxid utan också högre upptag. Om beräkningarna utförs enligt SS-EN 16757 - Annex BB fås en bild av hur olika faktorer påverkar. Figur 4 visar ett exempel på en vägg i vilken tre faktorer inkluderats som illustrerar betydelsen av materialval och ålder. Beräknat per kvadratmeterväggyta kan vi se hur hållfasthetsklass och ytskikt spelar in. Genom att måla betongen reduceras koldioxidupptaget med 30 % i detta räkneexempel och genom att gå från hållfasthetsklass C20/25 till C35/45 halveras det. Figuren visar också hur mycket snabbare upptaget går i början. Efter en fjärdedel av tiden har hälften av upptaget skett om förutsättningarna inte förändras under tiden.



Figur 4: Akkumulerat koldioxidupptag i en vägg som funktion av tid. Olika materialval gällande både betong och ytskikt har en avgörande betydelse.

I figur 4 ses hur snabbt koldioxiden tas upp från ytan och några faktorer som påverkar detta. För att få en bild av hur stor andel av den koldioxid som kommer från cementtillverkningen som kan tas upp behöver även geometrin beaktas. Eftersom upptaget sker från ytan blir relationen yta/volym väldigt viktig. I figur 5 är det tydligt hur väggens tjocklek påverkar detta

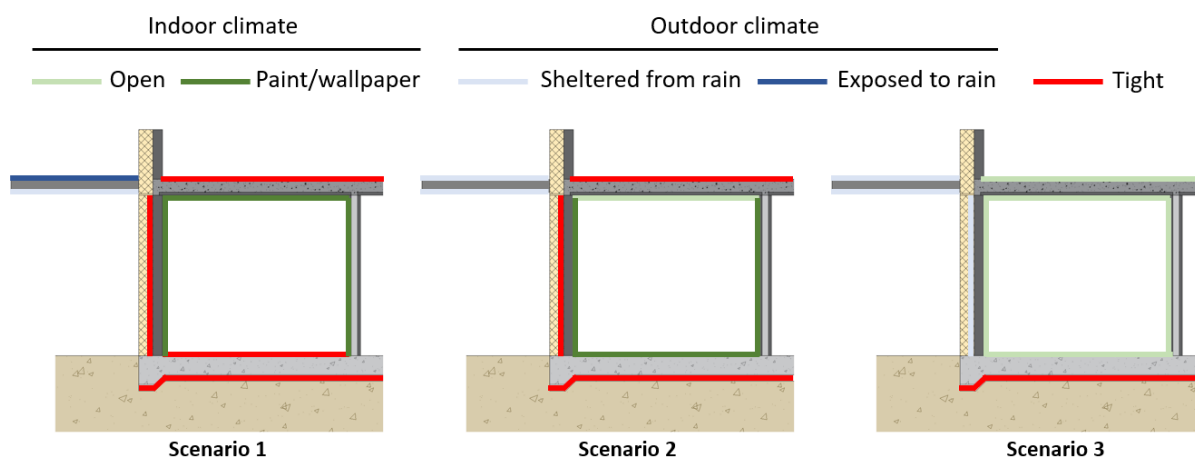
och även om upptaget sker från båda sidor eller endast en. För att öka upptaget skall betongen exponeras och kvoten yta/volym ökas.



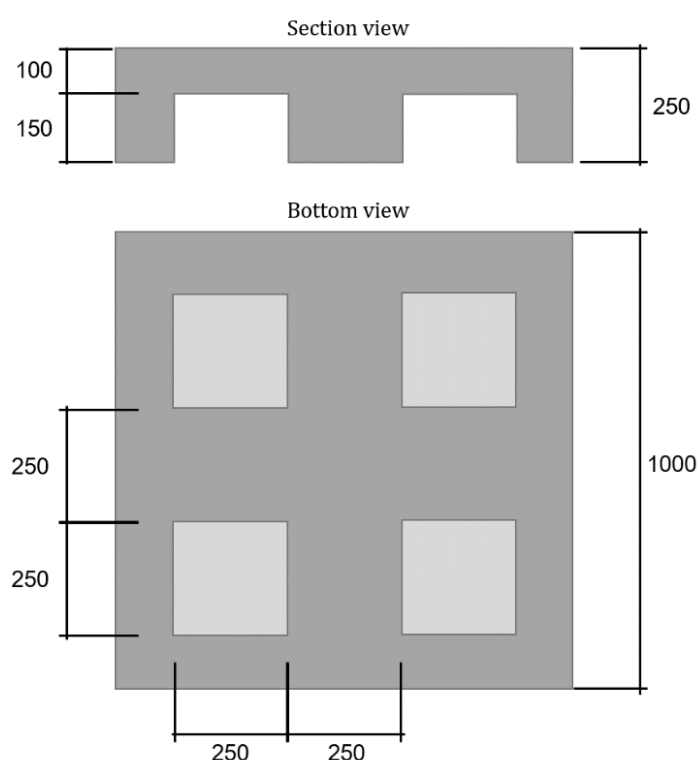
Figur 5: Ackumulerat koldioxidupptag i en vägg efter 100 år som funktion av väggens tjocklek. Här presenterat som andel av den koldioxid som kommer från cementtillverkningen. Olika val av ytskikt påverkar och upptaget fördubblas om det sker från båda sidor.

Hur mycket koldioxid tas upp under en byggnads livstid?

Svaret på denna fråga beror så klart på många faktorer. I Bilaga 2 redovisas en fallstudie där en LCA genomförts med koldioxidupptag enligt SS-EN 16757. Beräkningarna baseras på 100 års livslängd, något som borde vara lika självklart för bostadshus som för många anläggningskonstruktioner. Beräkningsexemplet utgår från Blå Jungfrun som färdigställdes 2010. Utifrån givna förutsättningar har koldioxidupptaget beräknats (Scenario 1). Därefter har materialvalen i ytskikten optimerats för koldioxidupptag samtidigt som balkongerna har glasats in (Scenario 2 & 3) och till sist har även en annan konstruktionslösning valts för bjälklagen vilket ökar kvoten yta/volym (Scenario 4). För samtliga fall har beräkningarna genomförts för en standardbetong och en klimatförbättrad. Figur 6 visar Scenario 1 till 3 med gradvis förbättrade förutsättningar för koldioxidupptag och figur 7 en så kallad "waffle slab" som valdes till bjälklagen där. Till bjälklagen används den största volymen betong och här finns även den största potentialen för att öka koldioxidupptaget.

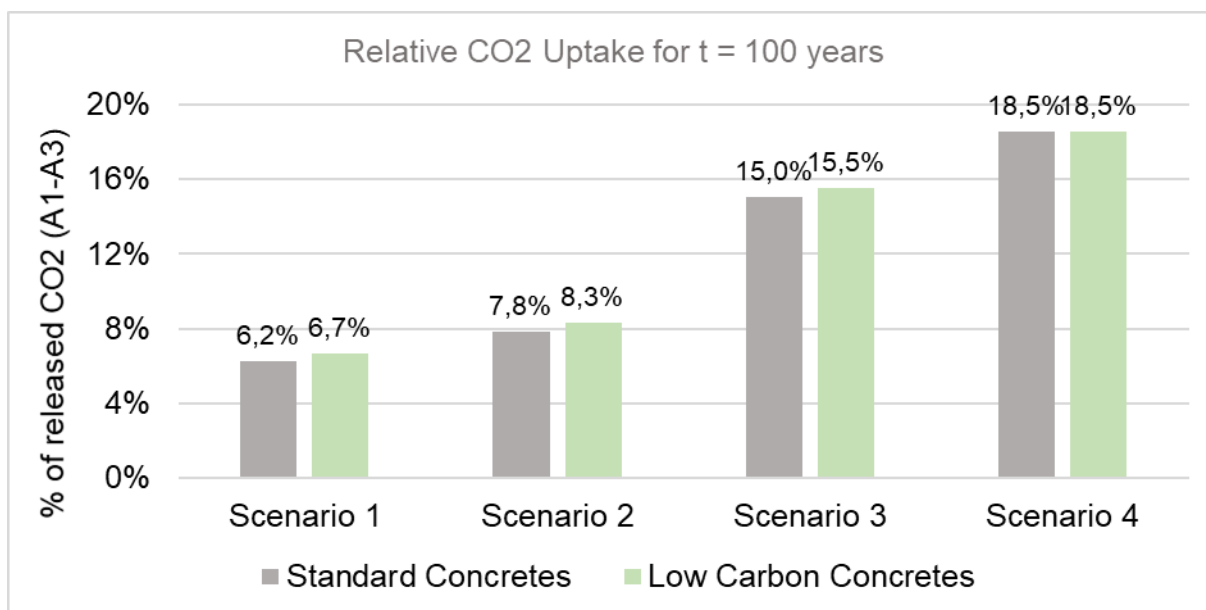


Figur 6: Illustration av Scenario 1 till 3 som använts i beräkningarna. Genom att välja öppnare ytskikt skapas en miljö där koldioxid lättare tas upp. För detaljer kring materialvalen se Bilaga 2.



Figur 7: I Scenario 4 användes en så kallad "waffle slab" för att öka kvoten yta/volym och på så sätt öka koldioxidupptaget. Måtten anges i mm.

När utfallet summeras för Scenario 1-4 inses snabbt att koldioxidupptaget kan bli ganska stort om designen utformas för karbonatisering. Figur 8 visar att nästan 20 % av den koldioxid som betongen har orsakat kommer tas upp om Scenario 4 skulle tillämpas.



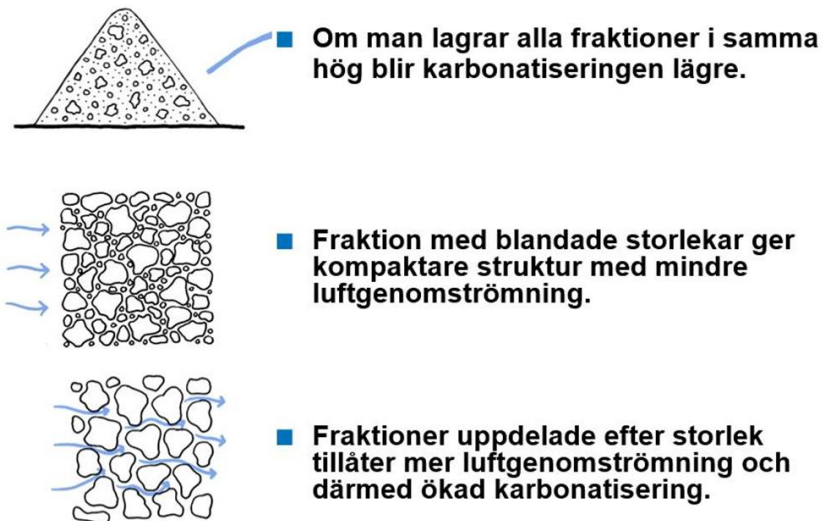
Figur 8: Koldioxidupptag för scenario 1-4 i fallstudien som redovisas i Bilaga 2. Procenttalet anger upptag i relation till betongens koldioxidavtryck där ca 90 % härrör från cementtillverkningen.

6. Vilken potential finns i rivning och återvinning?

Under betongens driftskede skall vi fortfarande beakta karbonatisering som en skademekanism som i förlängningen kan leda till armeringskorrosion. I torra inomhusmiljöer är dock risken låg och här finns en möjlighet att genom väl genomtänkta konstruktionslösningar och ytskikt öka koldioxidupptaget utan att äventyra säkerheten. Det finns också möjligheter att använda alternativa icke korroderande armeringsmaterial (t.ex. kolfiber, FRP, etc.) där karbonatisering blir en icke-fråga.

För att maximera koldioxidupptaget i betong krävs exponering och gynnsam miljö. Ca 25 % av den koldioxid som kommer från kalkstenen/kalcineringen tas upp under drift och rivning av en betongkonstruktion utan att några extra åtgärder vidtas. Skall betongen ta upp resterande 75 % krävs däremot starkare ekonomiska incitament än idag för hanteringen av rivningsmassor. Här finns en potential och relativt enkla metoder som ökar den exponerade ytan kan ha stor betydelse för koldioxidupptaget. I Figur 9 illustreras en enkel åtgärd som sortering av rivningsmassor i olika fraktioner. Detta leder till att den exponerade ytan mångdubblas och karbonatiseringen går betydligt fortare.

Flera studier och fullskaleförsök visar också att det redan idag är möjligt att genom sortering och accelererad karbonatisering av rivningsbetong skapa ett tillsatsmaterial som går att använda i cement och i betong. I takt med att priset för koldioxid stiger kommer med största sannolikhet flera varianter på CCU kopplat till karbonatisering tas fram.



Figur 9: Illustration av hur fraktioner uppdelade efter storlek möjliggör att fler och större ytor exponeras för luftens koldioxid vilket leder till högre koldioxidupptag.

7. Sammanfattning

- Karbonatisering är en naturlig process som pågår hela tiden i betong runt omkring oss. För att maximera koldioxidupptaget i betong krävs exponering och gynnsam miljö.
- Kloka konstruktions- och materialval (t.ex. diffusionsöppna ytskikt) ger inte bara lägre utsläpp av koldioxid utan också högre upptag. Överdimensionering innebär det omvända och ger inte bara högre utsläpp av koldioxid utan också lägre upptag. Genom att inkludera och designa för karbonatisering är det möjligt att upp till 20 % av betongens koldioxidavtryck kan tas upp igen under byggnadens brukarskede.
- Ca 25 % av den koldioxid som kommer från kalkstenen tas i normala fall upp under drift och rivning av en betongkonstruktion. Skall betongen ta upp resterande 75 % krävs aktiva åtgärder och därmed starkare ekonomiska incitament än idag för hantering av rivningsmassor.

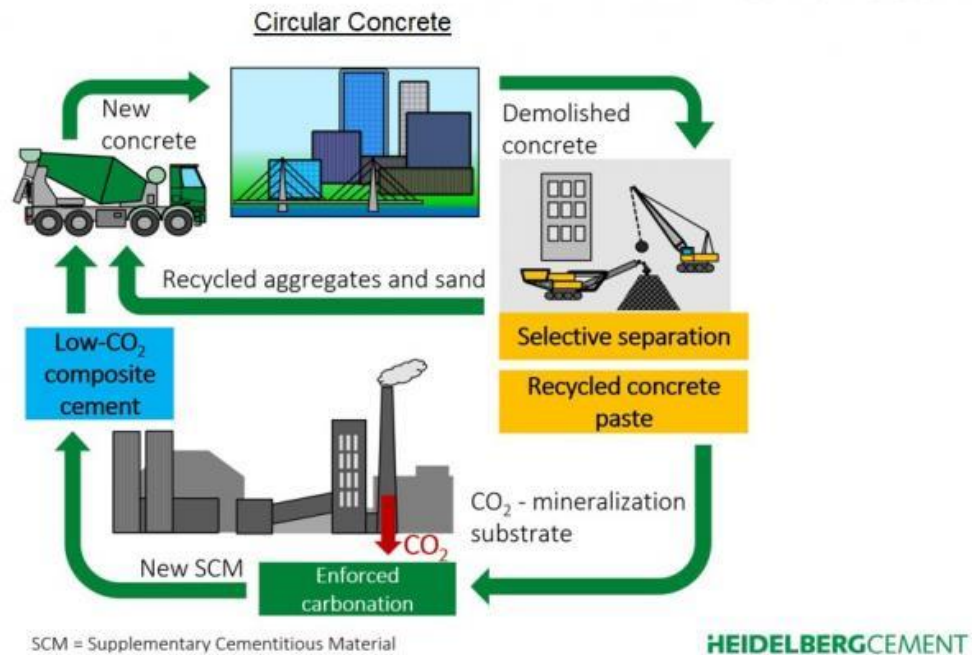
Bilaga 1 – Nulägesbeskrivning

Den kemiska processen för karbonatisering är känd sedan mer än 100 år tillbaka och är inkluderad i tekniska regelverk för att undvika att karbonatiseringsinitierad armeringskorrosion begränsar livslängden hos betongkonstruktioner. På sätt och vis har problematiken kring karbonatisering som en livslängsbegränsande mekanism byggts bort. Baksidan är att samma sak skett även i torra inomhusmiljöer där processen är helt ofarlig ur ett beständighetsperspektiv. Här finns en stor potential att öka koldioxidupptaget genom att i stället bygga för att gynna karbonatisering.

En viktig del av det arbete som ligger till grund för hur koldioxidupptaget kan beräknas i SS-EN 16757 [1] och CEN/TR 17310 [2] har genomförts av svenska forskare. Redan 2005 beskrev Lagerblad koldioxidupptaget ur ett livscykelperspektiv [3] och från 2013 och framåt har en rad intressanta artiklar, rapporter och delar i handböcker publicerats som beskriver karbonatisering och hur koldioxidupptag kan beräknas för såväl drift som rivning och återanvändning [4–9]. I takt med att klimatfrågan tar allt större plats i debatten har också intresset för att på något sätt kvantifiera betongens roll i detta ökat markant och frågan har en central roll i såväl den svenska betong som cementbranschens färdplaner [10–11]. Först ut i Sverige att ta fram en EPD som inkluderar koldioxidupptaget under driftskedet var Betongindustri [12].

Internationellt finns också ett stort intresse för karbonatisering vilket avspeglas i det faktum att IPCC nu också bekräftar att karbonatisering sker i befintlig infrastruktur och även om kvantifiering i global skala är behäftat med stora osäkerheter väljer författarna till rapporten att lyfta siffran 50 %. Det vill säga hälften av de årliga utsläppen från cementtillverkning absorberas av befintliga (nyproducerade och äldre) betongkonstruktioner [13].

Trots att svenska forskare bidragit starkt till att standarden för beräkning av koldioxidupptag under driftskedet är det faktiskt flera andra länder som kommit längre gällande implementeringen i byggbranschen. I våra grannländer Finland [14] och Norge [15] ges redan möjligheten att inkludera karbonatisering och blickar vi utanför Norden kan Canadas riktlinjer [16] utgöra ett bra exempel där även rivning och återvinning inkluderas. Inom cementindustrin arbetas det mycket med accelererad karbonatisering för att skapa tillsatsmaterial av krossad betong där ballasten till stor del sorterats ut. Den färdiga produkten kan då användas för att ersätta en viss andel portlandcement [17]. Karbonatiseringsgraden i sådana material ligger någonstans mellan 80 och 90 %. Framgångsrika fullskaleförsök på detta har genomförts vid Norcems cementfabrik i Brevik där rökgaserna använts för att karbonatisera materialet. Den utsorterade ballasten kan återanvändas igen i betong. Figur 1 visar hur detta angreppssätt kan bidra till ett cirkulärt betongbyggande.



Figur 1: Koncept för ett cirkulärt betongbyggande hämtat från Heidelberg cement. Efter att en betongkonstruktion som av olika skäl inte längre kan stå kvar rivits sker en sortering. Ballasten kan återanvändas i ny betong och pastan genomgår en accelererad karbonatisering som därefter kan användas som ett nytt tillsatsmaterial i cement.

Att beakta koldioxidupptaget som sker i betong fyller två olika funktioner. Den första handlar om att i en LCA kunna ge en rättvisande bild av vilken klimatpåverkan en betongkonstruktion har i ett kort perspektiv men också i ett längre. Den andra funktionen handlar om möjligheten till förbättringar. En gemensam och accepterad modell för koldioxidupptaget gör att vi kan se om en åtgärd/förändring sänker koldioxidavtrycket. Karbonatiseringen sker oavsett vad vi gör men det går att förändra hastigheten vilket kan göra en stor skillnad.

Referenser

- [1] SS-EN 16757:2017 Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Product Category Rules for concrete and concrete elements
- [2] SIS-CEN/TR 17310:2019 Carbonation and CO₂ uptake in concrete
- [3] Andersson R., Strippel H., Gustafsson T., & Ljungkrantz C. (2019): Carbonation as a method to improve climate performance for cement based material. Cement and Concrete Research 124 (2019) 105819.
- [4] Andersson R., Fridh K., Strippel H., Häglund M. (2013): Calculating CO₂ Uptake for Existing Concrete Structures during and after Service Life. Environmental Science & Technology, 2013, 47(20), pp 11625–11633.
- [5] Betonghandbok Material, 2021, Del 2: Kap 35 Hållbarhet, Svensk Byggtjänst, ISBN 978-91-7917-088-2.
- [6] Erlandsson M. (2020): Modell för bedömning av svenska byggnaders klimatpåverkan – inklusive konsekvenser av befintliga åtgärder och styrmedel. IVL rapport C 433, IVL Svenska Miljöinstitutet

- [7] Stripple H. (2013): Greenhouse gas strategies for cement containing products. IVL Report B2024, Swedish Environmental Research Institute.
- [8] Stripple H., Ljungkrantz C., Gustafsson T., Andersson R. (2018): CO₂ uptake in cement containing products - Background and calculation models for IPCC implementation. IVL report B 2309, Swedish Environmental Research Institute.
- [9] Löfgren I. (2021): Betydelsen av betongens koldioxidupptag ur ett livscykelperspektiv. Husbyggaren nr 1 2021, pp. 27-31
- [10] Färdplan för en klimatneutral konkurrenskraft – betongbranschen (2018): [ffs_betongbranschen.pdf \(svensketong.se\)](https://www.svenskabetong.se/ffs_betongbranschen.pdf)
- [11] Färdplan cement för ett klimatneutralt betongbyggande (2018): [Färdplan cement för ett klimatneutralt betongbyggande | Cementa](#)
- [12] Berglund P., Axeling j., (2021): Betongindustri sjösätter den första miljödeklarationen med karbonatisering. [Den första miljödeklarationen - EPD - med karbonatisering \(betongindustri.se\)](#)
- [13] IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.
- [14] Method for the whole life carbon assessment of buildings (2019): Publications of the Ministry of the Environment 2019:23 [Method for the whole life carbon assessment of buildings \(valtioneuvosto.fi\)](#)
- [15] NS 3720:2018 Metode for klimagassberegninger for bygninger – Method for greenhouse gas calculations for buildings
- [16] Bowick M., O'Connor J., Salazar J., Meil J., Cooney R., (2022): National guidelines for whole-building life cycle assessment, National Research Council of Canada, ISBN 978-0-660-42369-2
- [17] Zajac M., Skocek J., Skibsted J., Ben Haha M., (2021): CO₂ mineralization of demolished concrete wastes into a supplementary cementitious material – a new CCU approach for the cement industry, RILEM Technical Letters (2021) 6: 53-60 <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2021.141>

Bilaga 2 - CO₂ uptake through carbonation of concrete buildings – a case study

1. Introduction

Background

Concrete is the most used construction material in the world, but the production of cement, its main component, is also a significant source of carbon dioxide (CO₂) emissions. It has been estimated that cement production accounts for around 6 to 8 % of the total global CO₂ emissions. Consequently, the Swedish construction sector has set the goal to make the entire value chain in the construction sector climate neutral by 2045. In order to meet this ambitious goal, the concrete industry is adopting measures to reduce the CO₂ emissions of concrete buildings and other civil engineering structures. As a result, today the substitution of cement clinker by other supplementary cementitious materials (SCMs) to reduce the carbon footprint of concrete is becoming common practice. However, reducing the amount of cement clinker in concrete is not sufficient and additional measures are required to achieve climate neutrality. But to this end, carbonation of concrete is important as it for some type of structures will bind some of the CO₂ emitted during manufacturing.

Purpose and limitations

The first purpose of this case study is to quantify the uptake of CO₂ in a typical residential multistorey building in Sweden and the second purpose is to illustrate what can be achieved if carbonation is considered already from the start of the design process. The calculation of the CO₂ uptake was performed according to the model presented in the Annex BB of the Swedish Standard SS-EN 16757:2017.

The case study is limited to calculations and the actual carbon uptake is not verified with measurements. The impact on durability is considered in the design process and none of the suggested scenarios will affect the life span of 100 years chosen for the calculations.

2. Methodology

Description of Blå Jungfrun and the original reference building

Blå Jungfrun is located in Hökarängen, approximately 10 km south of the city of Stockholm and accommodates a total of 97 apartments divided in four buildings. The project was carried out by Skanska as a turnkey contract and the construction started in 2008 while the last tenants moved in the fall of 2010. Blå Jungfrun was chosen in this report because it can be considered as a representative example of how this type of buildings are built today. Moreover, several studies by IVL-Svenska Miljöinstitutet have applied Life Cycle Analysis to investigate the carbon footprint of both the original and alternative structural solutions, which provides additional information that could be used to compare the results in this report. In this report, Hus 3 of Blå Jungfrun building complex was chosen as the reference building for the case study, see Fig. 1.



Figure 1. General view of the Blå Jungfrun building complex. The reference building (hus 3) is highlighted. Source: <https://www.google.se/maps/@59.2499423,18.0908937,111a,35y,306.19h,61.72t/data=!3m1!1e3?hl=sv>

The reference building accommodates 22 apartments distributed in 6 floors, including the ground floor. The free height of the floors is 2.5 m. Heating and ventilation installations are placed in the attic floor, which also supports the timber structure that carries the roof. The building has two staircases with two corresponding elevator shafts, see Fig. 2 and 3.

The original structural system of the reference building used the so-called VST system for both the inner and outer walls. The VST system is a method to build cast-in-situ walls, sometimes used by Skanska, where a prefabricated permanent formwork consisting of two thin (24 mm) cementitious fibreboards is lifted on site and then filled with concrete. VST walls are manufactured according to the actual requirements of the project, including openings for doors, windows, installations, etc, and they are delivered with reinforcement.

The floors of the original building consisted of 200 mm cast-in-situ concrete using 50 mm prefabricated lattice girder planks as permanent formwork (without prestressing). A 200 mm bottom slab was used as the buildings foundation while prefabricated concrete balconies with a thickness of 200 mm were anchored to the southern façade.

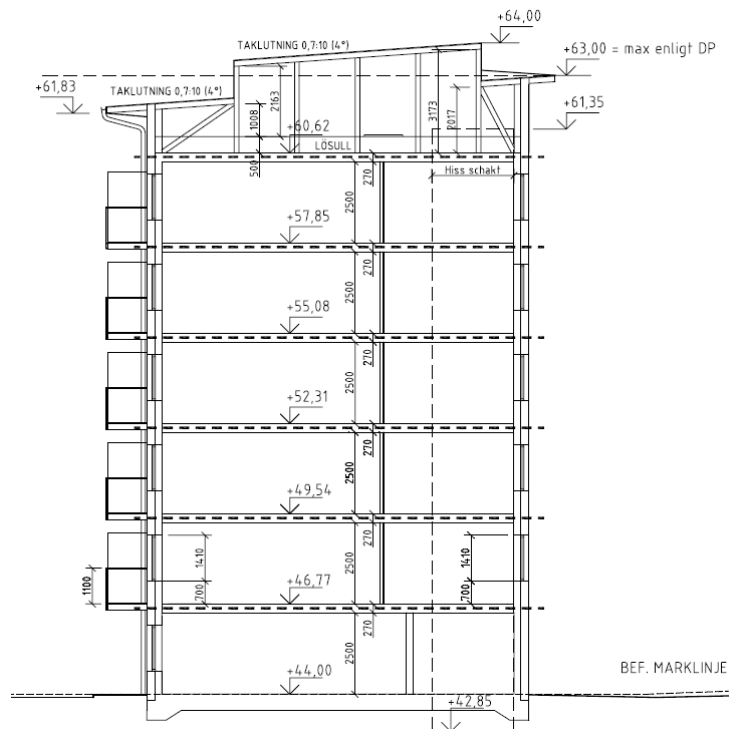


Figure 2. Section of the reference building.

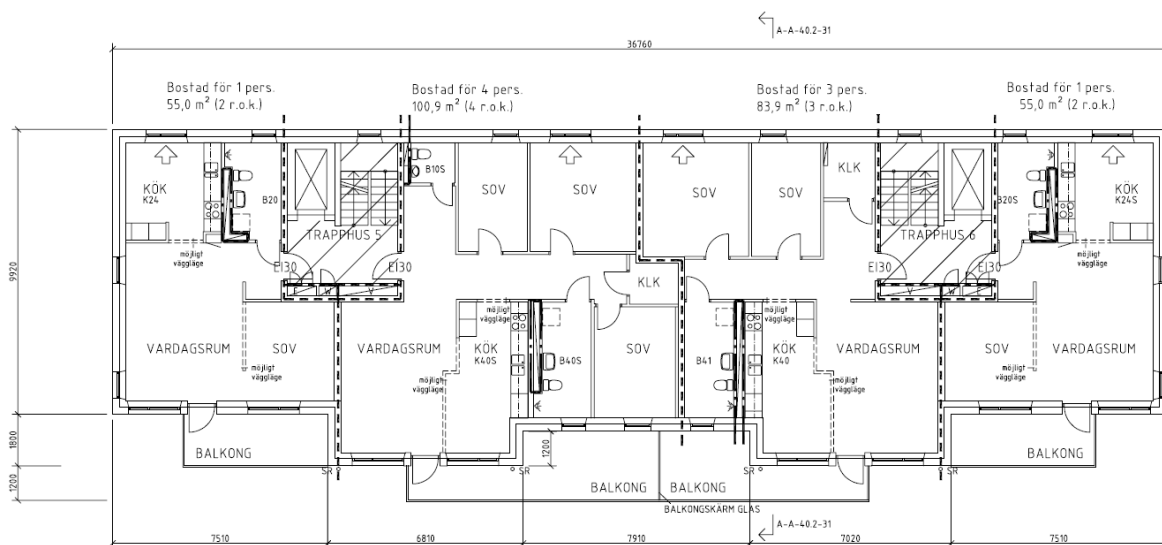


Figure 3. Floor plan of the reference building for floors 2-6.

Description of the structural system adopted

Even though the reference building chosen for the study case can be considered as a typical representative example of a multi-storey residential building in Sweden in terms of floor plan, size, number of floors, etc., the VST system used by Skanska for the walls is not amongst the most frequently used solutions. For that reason, the structural system of the reference building was modified so that it would be a more representative solution of what today is commonly used in building construction.

The structural system of the reference building was re-designed according to the original drawings using a semi-prefabricated concrete solution combining precast and cast-in-situ elements. The different elements are illustrated in Fig. 4 and they are as follows:

External walls: precast half-sandwich walls consisting of a 150 mm bearing layer of precast concrete completed with an external 150 mm phenolic insulation board, a 50 mm mineral wool layer and 20 mm plaster.

Inner walls: 200 mm concrete shell walls consisting of two 50 mm prefab concrete shells connected through vertical lattice girders with a 100 mm cast-in-situ concrete core.

Floor slabs: 250 mm concrete floors consisting of a 50 mm prefab lattice girder plank completed with a 200 mm cast-in-situ concrete layer.

Ground slab: a 200 mm cast-in-situ concrete slab with a 300 mm polystyrene insulation board under the slab.

Balconies: 200 mm thick prefabricated concrete balconies.

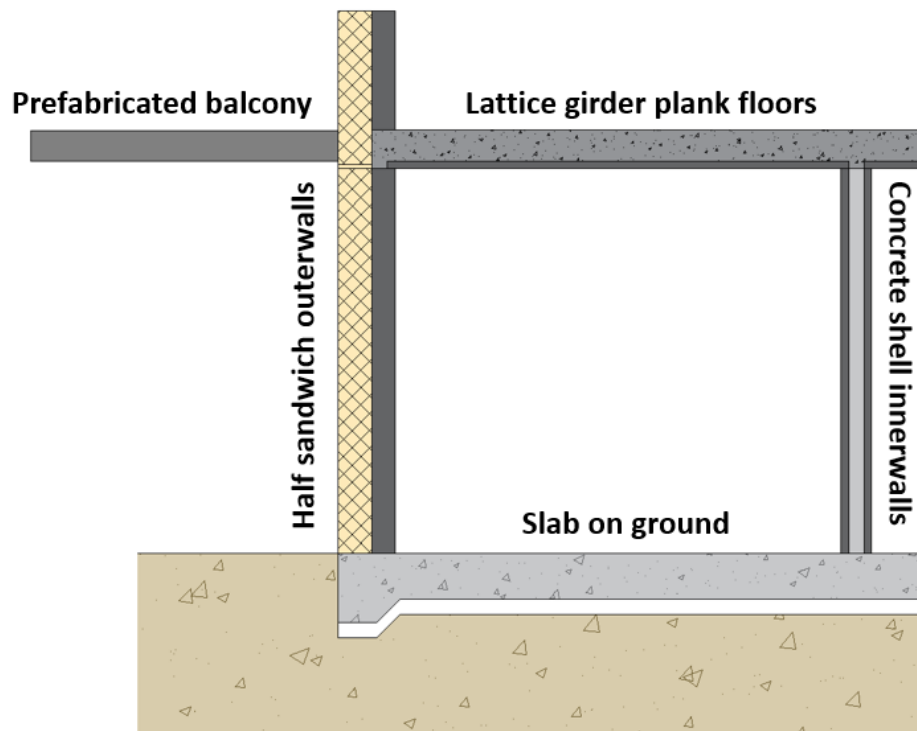


Figure 4. Illustration of the different bearing elements used in the modified structural system of the reference building.

Calculation of concrete volumes and exposed concrete surfaces

As previously mentioned, carbonation of concrete is a process that occurs primarily at the surface of the concrete and progresses slowly inwards. Consequently, the amount of exposed concrete surface area is a central parameter in determining how much CO₂ a structure can absorb. Similarly, the embodied carbon of a structure is directly related to the material volume, which is often expressed in kilograms of CO₂ equivalents per cubic meter (kg CO₂ eq./m³). For that reason, a three-dimensional BIM model of the reference building using the elements described in the previous section was created in Autodesk Revit, see

Fig. 5. It should be noted that the model contains only bearing elements, i.e., partitions and other elements such as doors, windows, installations, etc., are not included.

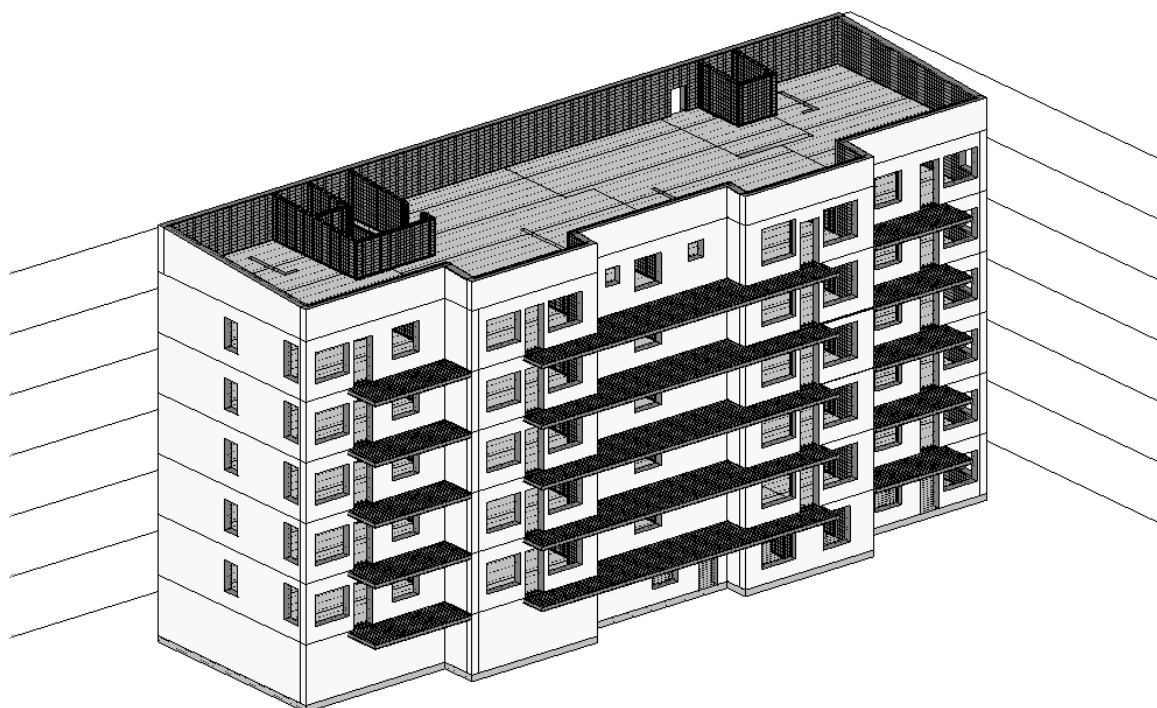


Figure 5. 3D view of the reference building BIM model created in Autodesk Revit.

Table 1 presents a summary of the total volume and exposed surface area of the different elements. Note that the exposed surfaces of the elements along their thickness, e.g., along the perimeter of the balconies or in the openings of doors and windows, have been ignored.

Table 1. Exposed surface area and volume of the reference building elements measured from the BIM model.

Element	Exposed surface area ^(a) [m ²]	Volume [m ³]
Façades	1468.1	220.2
Inner walls (prefab)	931.5	93.2
Inner walls (cast-in-situ)	-	93.2
Floors (prefab)	2030.7	101.5
Floors (cast-in-situ)	2030.7	406.1
Ground slab	390.3	78.1
Balconies	277.0	55.6

^(a) The exposed surface area presented corresponds only to one side of the element.

Scenarios for the calculation of the CO₂ uptake

The penetration of the carbonation front in concrete is a diffusive process and, as such, it is influenced by the diffusivity of the material as well as the exposure conditions. The former is controlled by the pore structure, and it can be related to the water-cement ratio (w/c) of the concrete and thus to its strength. The lower the w/c, the tighter the pore structure becomes and the slower the carbonation front advances. On the other hand, the exposure conditions

have an impact on both the rate and the degree of carbonation. As the degree of saturation in the concrete increases, the carbonation rate decreases as the transport of CO_2 shifts from gas diffusion to ion diffusion which is slower. Conversely, since water is required for CO_2 and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ to dissolve and form CaCO_3 , the degree of carbonation defined as the percentage of reactive CaO present in hydrated cement that is converted to CaCO_3 , is positively affected by a higher relative humidity.

Despite the significant influence of the exposure conditions on the process of carbonation, one aspect that is usually deciding is the finishing of the concrete surface. Indeed, for carbonation to occur the concrete needs to be exposed to the atmosphere. Therefore, the use of non-breathable materials such as tiles, parquet or laminates on the floors or sealing paints in the walls/ceilings, will hinder the carbonation of the concrete. From that perspective, three different scenarios have been considered, which are illustrated in Fig. 6:

- Scenario 1: all floors have parquet or laminate, inner walls and ceilings are painted or have wallpaper, the insulation of the façade is airtight, and the upper side of the balconies is exposed to rain.
- Scenario 2: all floors have parquet or laminate, except the ground slab which is painted, the inner walls are painted or have wallpaper, the ceilings are exposed, balconies are sheltered from rain and the insulation of the façade is airtight.
- Scenario 3: all floors, walls and ceilings are exposed, balconies are sheltered from rain and the insulation of the façade is changed to a breathable material.

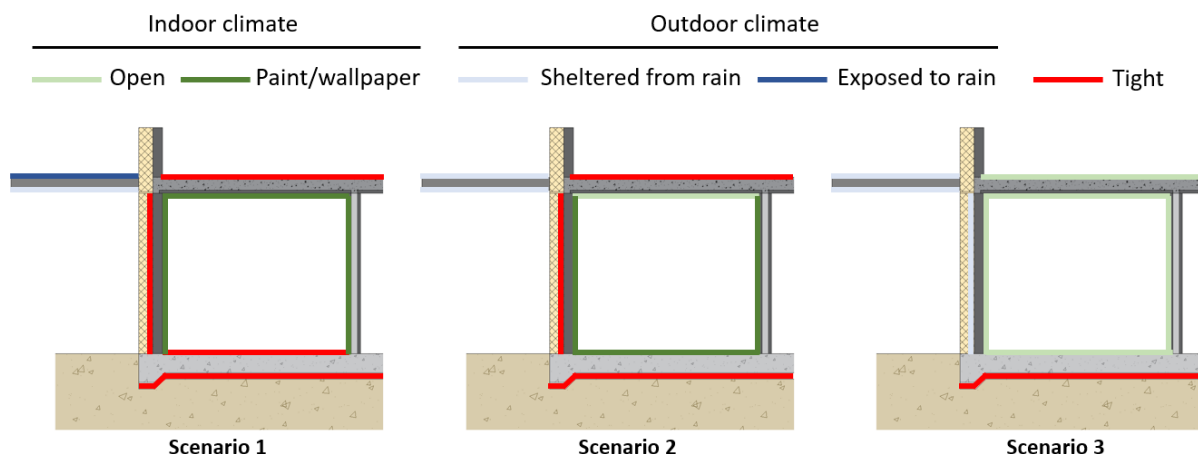


Figure 6. Visualization of the exposure conditions of each element surface for the three considered scenarios.

A fourth, additional scenario is considered with the same exposure conditions as in Scenario 3, but in which the typology of the floor slab is changed from lattice girder planks to a cast-in-situ waffle slab. Waffle slabs are two-way slabs in which the material is used more efficiently, thus reducing the total volume of required concrete. Moreover, the ribbed pattern of the slab's underside significantly increases the amount of exposed surface. Based on Boverket's mandatory provisions (EKS 11), the reference building is classified as building class Br1 and the floors are assigned a fire safety class equal to 4, thus requiring a fire resistance classification REI 60. According to Table 2, a minimum rib width of 200 mm and a minimum slab thickness of 80 mm would be required.

Table 2. Minimum dimensions of two-way slabs to fulfil fire resistance requirements, from ¹.

Standard Fire Resistance	Minimum dimensions (mm)			
	Possible combinations of width of ribs b_{min} and axis distance a			Slab thickness h_s and axis distance a in flange
1	2	3	4	5
REI 30	$b_{min} = 80$ $a = 15^*$			$h_s = 80$ $a = 10^*$
REI 60	$b_{min} = 100$ $a = 35$	120 25	≥ 200 15*	$h_s = 80$ $a = 10^*$
REI 90	$b_{min} = 120$ $a = 45$	160 40	≥ 250 30	$h_s = 100$ $a = 15^*$
REI 120	$b_{min} = 160$ $a = 60$	190 55	≥ 300 40	$h_s = 120$ $a = 20$
REI 180	$b_{min} = 220$ $a = 75$	260 70	≥ 410 60	$h_s = 150$ $a = 30$
REI 240	$b_{min} = 280$ $a = 90$	350 75	≥ 500 70	$h_s = 175$ $a = 40$
$a_{sd} = a + 10$				
For prestressed ribbed slabs, the axis-distance a should be increased in accordance with 5.2(4).				
a_{sd} denotes the distance measured between the axis of the reinforcement and lateral surface of the rib exposed to fire.				
* Normally the cover required by EN 1992-1-1 will control.				

As a conservative estimation and in order to facilitate the compliance of additional requirements, such as, sound insulation, the rib width is chosen as 250 mm and the slab thickness as 100 mm, whereas the overall thickness of the floor is kept constant at 250 mm, according to Fig. 7. This example has not been verified structurally but it is included here to illustrate how increasing the exposure surface area of the concrete elements through choosing a more favourable structural topology can affect the CO₂ uptake of the element.

Concrete mixes for the different elements

The composition of a concrete mix also plays an important role on how much CO₂ an element is able to take up. On one hand the w/c controls the diffusivity of the concrete and consequently the rate of carbonation. On the other hand, the total amount of reactive CaO and thus the maximum theoretical CO₂ uptake is directly related to the amount of cement in the concrete mix.

In this study, two different sets of mixes were chosen for the different elements. First, a set of four concrete mixes is chosen to represent typical a concrete composition that would be used today for the different elements comprising the system of the reference building.

The second set includes five concrete mixes designed as a low-carbon alternative, where CEM II/B-LL is used instead of CEM I and where different percentages of cement are replaced by ground granulated blast furnace slag. This set of mixes represents a trend that

¹ SS-EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design

is slowly becoming a common practice as the construction sector strives to reduce climate impact and eventually reach climate neutrality.

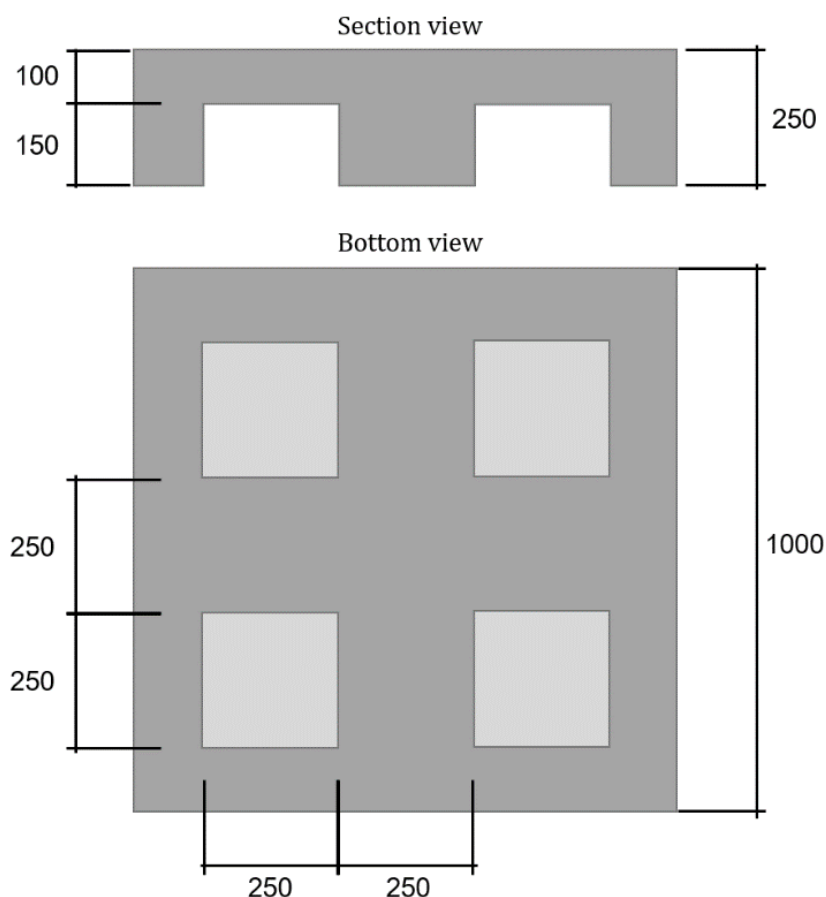


Figure 7. Schematic representation of the geometry and dimensions of the waffle slab chosen for Scenario 4. All measurements are in millimetres.

In Table 3 and Table 4, the characteristics of the different concrete mixes used for the calculation of the CO₂ uptake as well as the Global Warming Potential (GWP) in terms of kg CO₂ eqv./m³ are presented for the standard and low-carbon concrete mixes, respectively, which account for the production stage (A1-A3).

Table 3. Characteristics of common concrete mixes used for the calculation of the CO₂ uptake

Id	Element	Strength Class	Cement Type	Binder Content [kg/m ³]	Slag Content [%]	GWP [kg CO ₂ eqv./m ³]
SC1	Floors (cast-in-situ)	C32/40	CEM II/A-LL	390	0	276
SC2	Floors, walls, façades (prefab)	C30/37	CEM I	360	0	350
SC3	Balconies	C32/40	CEM I	432	0	400
SC4	Ground slab, walls (cast-in-situ)	C30/37	CEM II/A-LL	335	0	237

Table 4. Characteristics of climate improved concrete mixes used for the calculation of the CO₂ uptake

Id	Element	Strength Class	Cement Type	Binder Content [kg/m ³]	Slag Content [%]	GWP [kg CO ₂ eqv./m ³]
LC1	Floors (cast-in-situ)	C30/37	CEM II/A-LL	313	35	164
LC2	Walls (prefab)	C30/37	CEM II/B-S	360	21	294
LC3	Floors, façades (prefab)	C30/37	CEM II/A-LL	300	19	223
LC4	Balconies	C32/40	CEM II/A-LL	328	19	217
LC5	Ground slab, walls (cast-in-situ)	C30/37	CEM II/A-LL	300	19	184

Note: Similar mixes might differ in GWP depending on the energy consumed in transport from and to the factory

Example of calculation procedure

The calculation of the CO₂ uptake was performed according to the model presented in the Annex BB of the Swedish Standard SS-EN 16757:2017². In this section, an example is presented to illustrate the procedure. Moreover, a low-carbon concrete is chosen for the example to motivate the choice of parameters in the calculations.

For the example, a 1 m² of slab with a thickness of 200 mm made of LC1 is used. Only 1 side of the slab is considered, i.e., the exposed surface area is 1 m². The exposure considered is “Buildings – Indoor dry climate without cover”. The CO₂ uptake is calculated at 100 years.

The general expression to calculate the CO₂ uptake during *t* years in kg per m² of concrete surface is:

$$CO_2 \text{ uptake} = k \cdot K_k \cdot \sqrt{t} \cdot 10^{-3} \cdot U_{tcc} \cdot C \cdot D_c \quad (1)$$

where for this example:

k is the carbonation rate for a C30/37 and indoor dry climate without cover given in mm/year^{0.5} *k* = 6.6

D_c is degree of carbonation for indoor dry climate *D_c* = 0.4

C is the total binder content given in kg/m³ *C* = 313

K_k is a correction factor for the carbonation rate for cement with additional major constituents. In this case, the cement type CEM II/A-LL contains a 10-20% limestone filler which represents about 6.5-13% of the total binder content whereas slag comprises 35% of the total binder. Therefore, a factor *K_k* = 1.20 is chosen corresponding to an addition of slag between 30 and 40%.

U_{tcc} is the maximum theoretical uptake in kg CO₂/kg cement, which can be calculated as:

$$U_{tcc} = w \cdot C_c \cdot (m_{CO_2}/m_{CaO}) \quad (2)$$

where:

w is proportion of reactive CaO given in kg CaO/kg cement clinker *w* = 0.65

² SS-EN 16757:2017 Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Product Category Rules for concrete and concrete elements

C_c is the proportion of cement clinker in the binder. For this example, the binder has 65% cement out of which 85% is cement clinker and the rest is limestone filler. $C_c = 0.55$

m_{CO_2} is the molar weight of CO₂ given in g/mol $m_{CO_2} = 44$

m_{CaO} is the molar weight of CaO given in g/mol $m_{CaO} = 56$

Replacing the values in Eq. (2), we obtain that the maximum theoretical uptake is 0.28 kg CO₂/kg cement. Replacing now the remaining values in Eq. (1), results in a CO₂ uptake of 2.8 kg CO₂/m². At the same time, 1m² of slab releases $164 \cdot 0.2 = 32.8$ kg CO₂ eqv./m². Proportionally, carbonation of only one side of the slab is able to bind about 8.5% of the released CO₂ during production in a period of 100 years.

3. Results

In this section, the results of the CO₂ uptake calculations for the different scenarios and the two sets of concrete mixes considered are presented and discussed. Moreover, the carbon footprint of the different structural elements of the reference building is calculated for the two sets of concrete mixes and the result is compared to the corresponding CO₂ uptake. Before that, the contribution of the different structural elements of the reference building, in terms of surface area, concrete volume and emitted CO₂ is analysed to identify which elements have a larger impact on the CO₂ emissions and which hold a greater CO₂ uptake potential.

Distribution of surface area, concrete volume and CO₂ emissions

In table 5, the total exposed surface area and concrete volume of the different structural elements is presented for Scenario 3 together with the values for the floor slab in Scenario 4. Regarding the total exposed surface area, the presented values represent an upper threshold of the available concrete surface for carbonation where all elements have two sides exposed with the exception of the ground slab, for which the bottom side in contact with an EPS insulation layer has not been considered. For scenario 4, the geometry of the waffle slab presented in Fig. 7 represents a 60% increase of exposed surface area (on the bottom side) while the total volume (and weight) of concrete is reduced by 15%.

Table 5. Total exposed surface area and concrete volume of the different structural elements

Scenario	Element	Total exposed surface area [m ²]	Volume [m ³]
3	Façades	2936.3	220.2
	Inner walls (prefab)	1863.0	93.2
	Inner walls (cast-in-situ)	-	93.2
	Floors (prefab)	2030.7	101.5
	Floors (cast-in-situ)	2030.7	406.1
	Ground slab	390.3	78.1
	Balconies	554.0	55.6
4	Floors (cast-in-situ)	5279.8	431.5

Fig. 8 illustrates the distribution of total exposed surface area among the different structural elements where it can be seen that for scenario 3 floors represent about 41% of the available surface area, followed by façades, inner walls, balconies and finally the ground slab featuring the least available surface with just 4% of the total. The increase of exposed surface area obtained by changing the topology of the floors to a waffle slab increased

contribution of the floors up to 48%, almost half of the available surface area in the building, while the contribution of the other elements decreased slightly keeping the same distribution. These results show that floors hold the greatest potential for CO₂ uptake in terms of available carbonation area, even in buildings with bearing façades and inner walls.

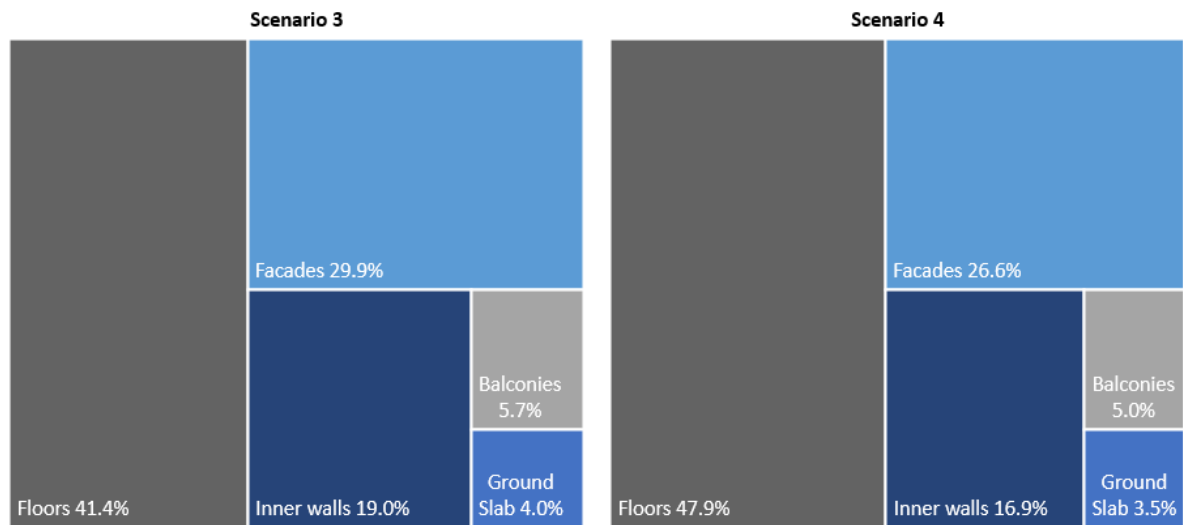


Figure 8. Distribution of total exposed surface area among the different structural elements.

In Fig. 9, the distribution of volume for the reference geometry used in scenarios 1,2 and 3, as well as the distribution for scenario 4. Similar to what was observed for the distribution of exposed surface area, the largest amount of concrete is concentrated in the floors, with a percentage varying between 49% and 44%. Proportionally, façades present a lower volume to surface ratio due to their smaller thickness while the ground slab has a slightly larger proportional contribution due to the fact that only one side was counted for the exposed surface.

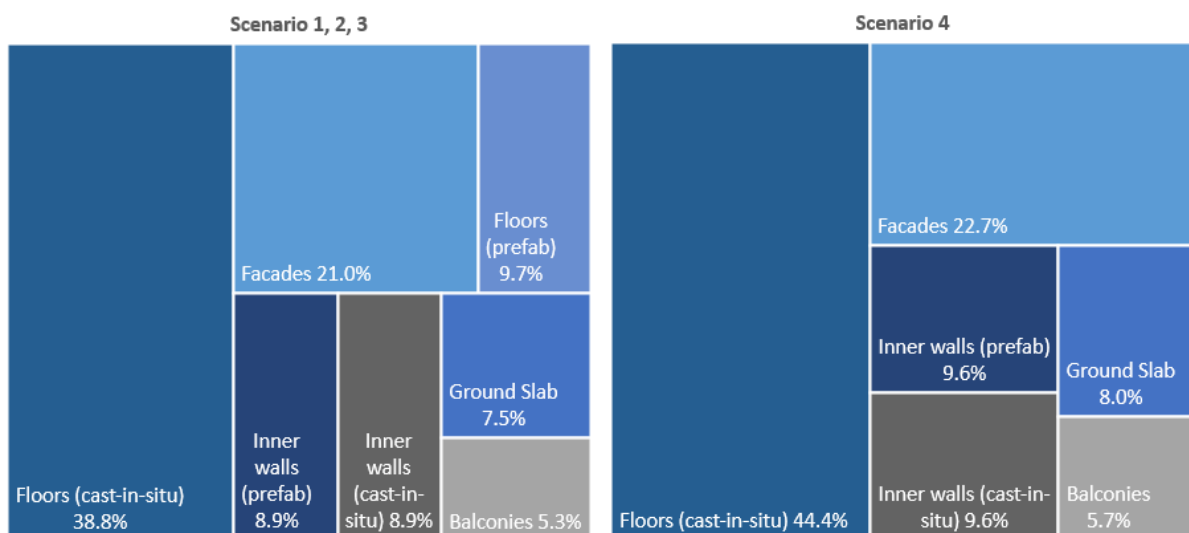


Figure 9. Distribution of concrete volume among the different structural elements

The concrete volumes given in Table 5 were combined with the GWP values of the different concrete mixes presented in Table 3 and 4, in order to obtain the CO₂ emissions of the different elements for the production stage (A1-A3). The results of the emitted CO₂ are presented in table 6 for the different structural elements as well as the accumulated value of

all the elements for the scenarios and concrete mixes considered. It worth noting that using the low carbon concretes enabled a reduction of the carbon footprint of the reference building of almost 35% and by using a waffle slab, an additional 10% could be reduced compared to the original solution.

Table 6. CO₂ emissions of the different structural elements

	Scenario	Element	Emitted CO ₂ eqv. [ton]	Total emitted CO ₂ eqv. [ton]
Standard Concretes	1, 2, 3	Façades	77.1	320.1
		Inner walls (prefab)	32.6	
		Inner walls (cast-in-situ)	22.1	
		Floors (prefab)	35.5	
		Floors (cast-in-situ)	112.1	
		Ground slab	18.5	
		Balconies	22.2	
	4	Floors (cast-in-situ)	119.1	291.6
Low carbon Concretes	1, 2, 3	Façades	49.1	209.3
		Inner walls (prefab)	27.4	
		Inner walls (cast-in-situ)	17.1	
		Floors (prefab)	22.6	
		Floors (cast-in-situ)	66.6	
		Ground slab	14.4	
		Balconies	12.1	
	4	Floors (cast-in-situ)	70.8	190.8

A comparison of the distribution of CO₂ emissions among the different structural elements is presented in Fig. 10 for the different scenarios and concrete mixes considered. As anticipated, the greater contribution of the floors to the overall volume of concrete resulted in the highest carbon footprint in all cases compared to the other structural elements.

It can also be observed that the role of the concrete mix composition had little effect on the distribution of CO₂ emissions, where the distribution resembled to a large extent the concrete volume distribution. This is also true for the low carbon concretes, where the GWP was significantly lower than for the standard concretes, but only minor variations could be observed between the relative CO₂ emissions among the elements.

From Fig. 10, it can also be seen that the distribution of CO₂ emissions is quite balanced between prefabricated and cast-in-situ elements. For the reference system, about 52% of the emissions come from prefabricated concrete whereas in scenario 4, removing the lattice girder planks lowers that percentage to about 45%.

From the results shown in Fig. 8, 9 and 10, it is clear that floors represent the building elements with the highest carbon footprint but also with the greatest potential for carbon uptake, provided their surfaces are not sealed. Furthermore, the contribution of floors would be even more significant in a system with slabs on columns, where the total surface area and volume of vertical elements would be minimal. As such, reducing the volume/thickness of the floors and lowering the GWP of the concrete used in floors through the adjustment of the concrete mix composition and binder type is seen as the most effective way of reducing

the carbon footprint in buildings. On the other hand, increasing the slenderness or exposed surface area seems an efficient way to increase the amount of bound CO₂ through concrete carbonation.

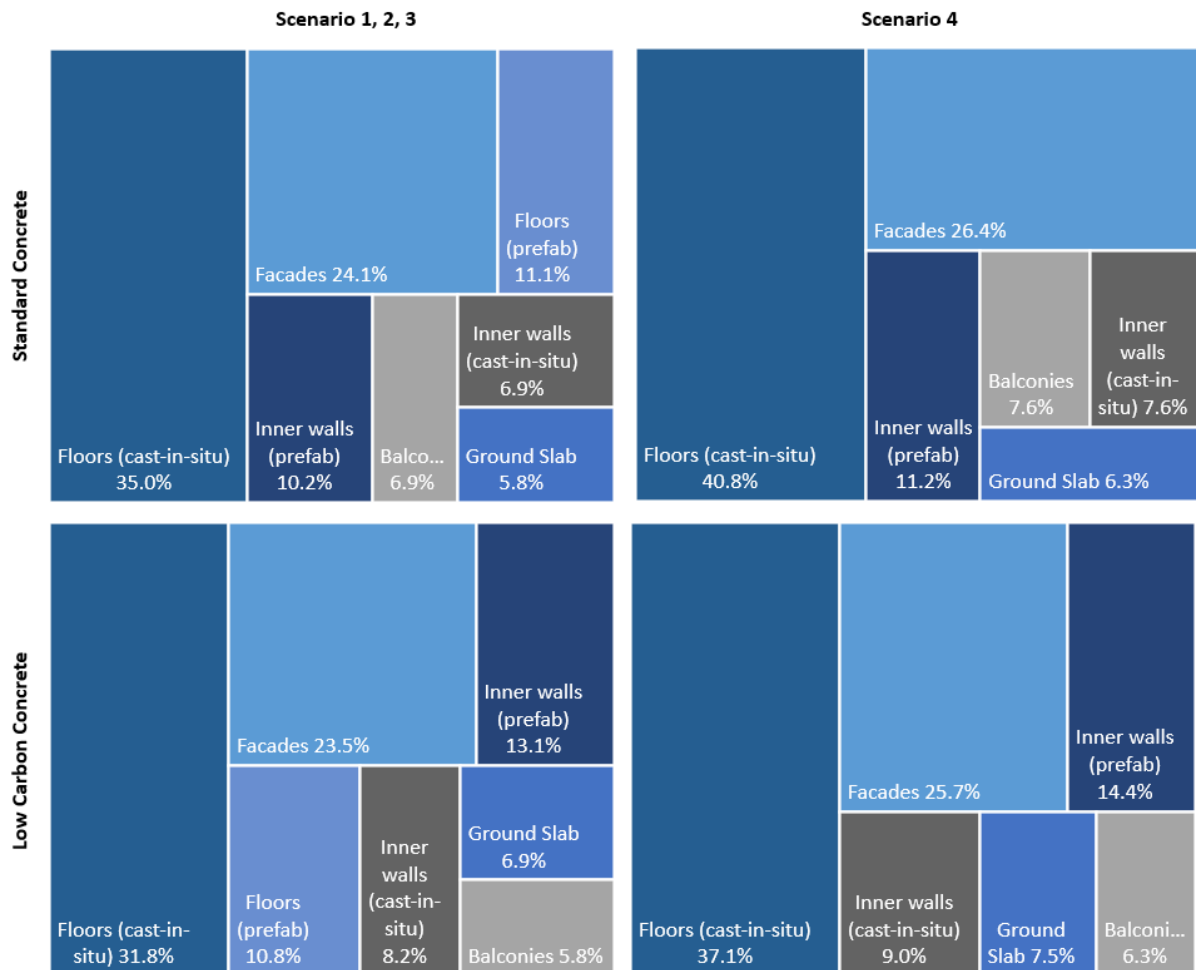


Figure 10. Distribution of CO₂ emissions among the different structural elements for the different scenarios and concrete mixes considered.

CO₂ uptake

The calculation results of the CO₂ uptake from the different elements are summarized in Table 7 for the different scenarios and concrete mixes considered. It can be seen that the contribution of each individual structural element follows the same distribution seen for the exposed surface areas, namely floors with the highest uptake followed in descending order of contribution by façades, inner walls, balconies and the ground slab.

However, some small differences in the distribution of the CO₂ uptake can be observed with respect to the distribution of exposed surface area due to the different environment exposures. As an example, balconies had only about 40% more exposed area than the ground slab, but their CO₂ uptake is more than twice that of the ground slab in scenario 3. This can be explained by the degree of carbonation, which for façades and balconies in outdoor climate and sheltered from rain is taken as 0.85 whereas for indoor climate the degree of carbonation is only 0.4. These results highlight the impact of the environmental conditions on the carbonation process.

An additional factor that plays an important role on the carbonation process and thus on the CO₂ uptake is the rate of carbonation represented by the factor k . As previously mentioned, this is affected by the environmental conditions but also by the diffusivity of the concrete. One way to increase k and consequently the CO₂ uptake is by increasing the w/c of the concrete mix. In the model presented in the Swedish Standard SS-EN 16757:2017, the value of k is given as a function of the concrete characteristic strength. However, k is given in discrete intervals of the strength jumping from 15-20 MPa to 25-35 MPa. Consequently, for a standard concrete mix with a characteristic strength of 30 MPa, the strength should be reduced to 20 MPa in order to obtain an increase of the k factor, which is a significant reduction of strength. A more continuous description of the carbonation rate as a function of the concrete strength (or w/c) would facilitate studying the influence of that parameter.

Table 7. Calculated CO₂ uptake for the different scenarios and concrete mixes considered in Ton CO₂ eqv.

	Element	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Standard Concretes	Façades	4.72	4.72	15.23	15.23
	Inner walls	5.99	5.99	8.59	8.59
	Floors	6.53	9.36	18.89	24.78
	Ground slab	0.00	1.10	1.57	1.57
	Balconies	2.71	3.84	3.84	3.84
	Total	19.94	25.00	48.13	54.01
Low Carbon Concretes	Façades	3.13	3.13	10.12	10.12
	Inner walls	4.87	4.87	6.98	6.98
	Floors	4.34	6.22	11.90	14.78
	Ground slab	0.00	0.83	1.20	1.20
	Balconies	1.64	2.32	2.32	2.32
	Total	13.97	17.38	32.52	35.39

In Fig. 11, the total CO₂ uptake for the different scenarios is compared for the two sets of concrete mixes. First, it can be observed how increasing the amount of exposed surface area has a dramatic impact on the total amount of CO₂ absorbed, going from approximately 20 tonnes CO₂ in scenario 1 up to 48 ton in scenario 3 for the standard concretes. A further increase can be observed in scenario 4 with the choice of a waffle slab for the floors.

It can be also seen that, in absolute terms, the standard concretes with a higher binder content and a significantly higher proportion of cement clinker are able to bind between 40% and 50% more CO₂ compared to their low carbon counterparts. It is worth mentioning that the calculations carried out are a conservative estimation of the CO₂ uptake that do not take into account any contribution of reactive CaO in supplementary cementitious materials. As such, it can be expected that, in reality, the difference between the two sets of concrete mixes would be somewhat smaller.

In Fig. 12, the values shown in Fig. 11 have been normalized with respect to the total emitted CO₂ for the different scenarios and concrete mixes. The results indicate that in relative terms, low carbon concretes have a similar CO₂ uptake capacity to standard concretes with higher cement contents. It is worth highlighting that up to 15% of the total

CO₂ emitted in production could be easily absorbed through carbonation during the service life of a building by simply choosing finishings, paints, insulations and flooring systems that enable carbonation of the concrete. Moreover, it is feasible to reach even higher CO₂ uptake levels by choosing structural solutions that favour high surface to volume ratios.

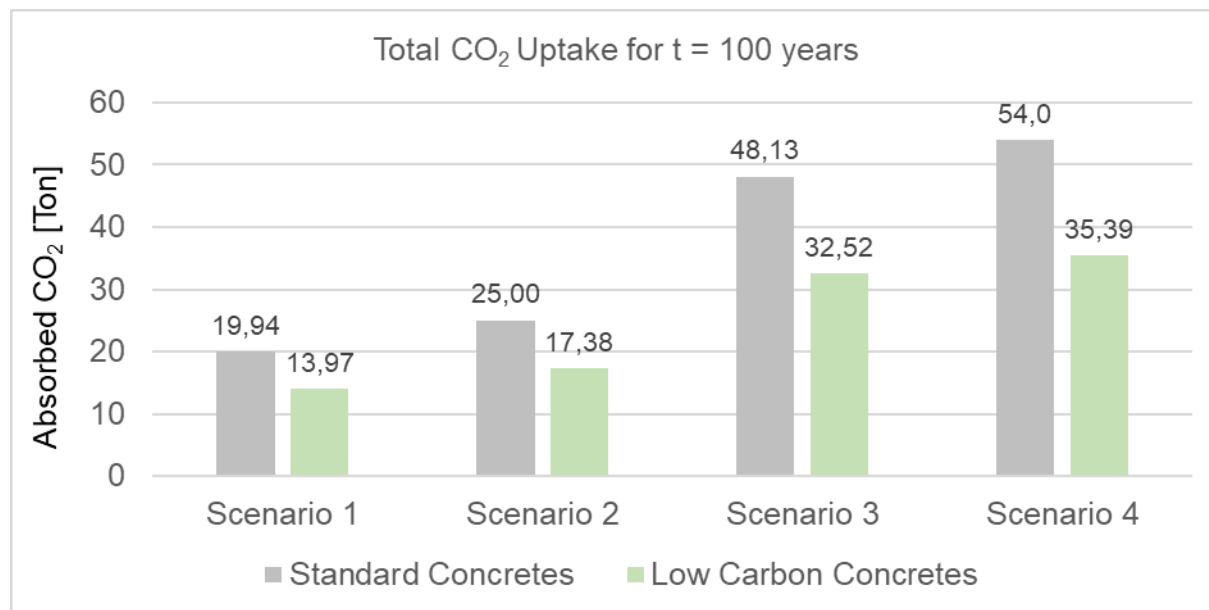


Figure 11. Comparison of the total CO₂ uptake for the different scenarios and concrete mixes considered.

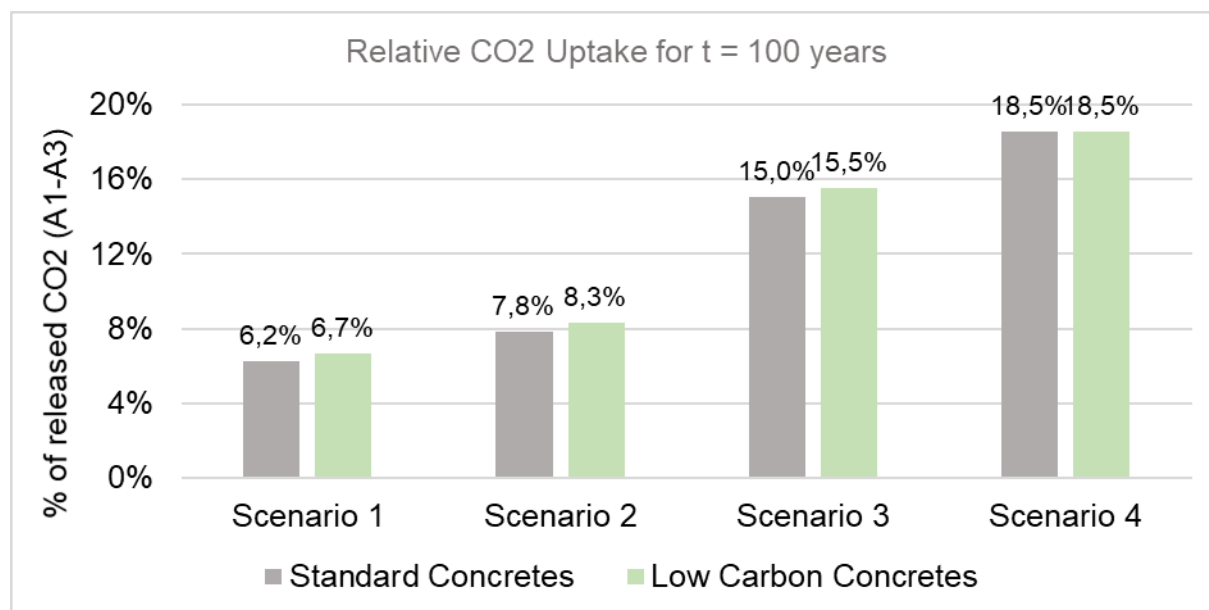


Figure 12. Comparison of the CO₂ uptake relative to the CO₂ emissions during the stages A1-A3 for the different scenarios and concrete mixes considered

A final aspect that is important to highlight is that carbonation does not vary linearly with time, but it occurs more rapidly in the beginning. This is illustrated in Fig 13. Where the evolution of the total CO₂ uptake for scenario 3 over a period of 100 years is presented for the set of standard concrete mixes. In the same figure, the CO₂ uptake after 25 and 50 years is highlighted with red markers, showing that it is 50% and 71% of the final uptake at 100 years, respectively. This diagram illustrates that with right choices and smart design, up to 10% of the emitted CO₂ during production could be re-absorbed after just 25 years.

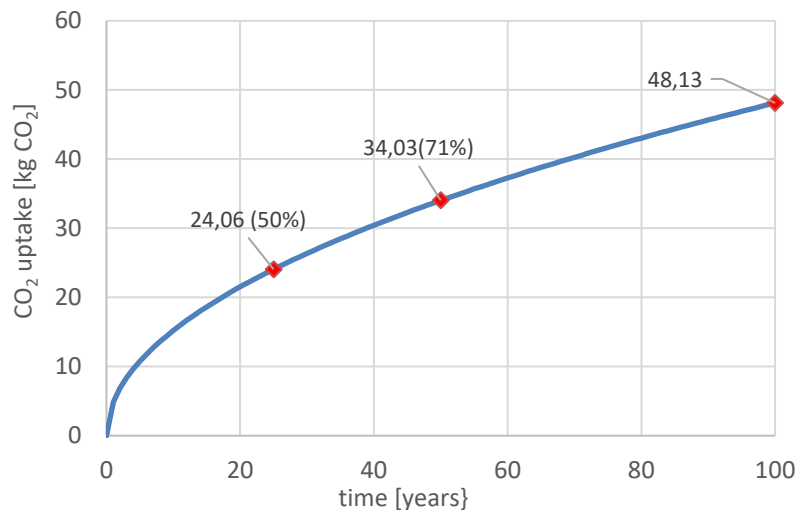


Figure 13. Evolution of the total CO₂ uptake for scenario 3 with the standard concrete mixes.

CO₂ uptake in several stages

In the previous section it has been shown that a concrete building can absorb during its service life up to 20% of the CO₂ released in production. However, carbonation might occur also after the end of life of a building. As previously discussed, carbonation is a diffusive process in which CO₂ is absorbed through the concrete surface. When a building is demolished (module C in an LCA) and the concrete is crushed, the specific surface of the concrete increases tremendously and so it does the potential for CO₂ uptake. In CEN/TR 17310 a modest uptake of about 5 kg CO₂/m³ of concrete (i.e. about 2 kg/tonne) is indicated if the material is stockpiled for some months (1 to 4). But it is also stated that an improved handling of the material and stockpiling it in separate sizes may increase the uptake to about 20 kg CO₂/m³.

Recently, several ongoing research initiatives have started looking into accelerating the carbonation process of crushed concrete by exposing it to high CO₂ concentrations, which improves its quality as recycle aggregate concrete (RAC) as well as it increases the binding capacity. Similarly, accelerated carbonation of fine materials resulting from concrete crushing can increase its reactivity making it suitable as a filler material for partial cement substitution. It is also worth noting that in some cases, precast concrete elements may also undergo some carbonation during long-term storage periods. Zajac et al.³ reviews several techniques for carbon mineralization, which includes both the coarse and fine fraction of recycled concrete, and Villagrán-Zaccardi et al.⁴ discusses the potential and valorisation of RCA. With this growing interest and the potential carbon sink recycled concrete possess it is not unlikely that this will become standard practice in a few years and that increased circularity and reuse will be promoted.

4. Concluding remarks

The report investigates the potential CO₂ binding capacity of buildings made of concrete throughout their service life by analysing a typical residential multistorey building. The results

³ Review - CO₂ Mineralization Methods in Cement and Concrete Industry, *Energies* 2022, 15, 3597. <https://doi.org/10.3390/en15103597>

⁴ Review - Complete re-utilization of waste concretes-Valorisation pathways and research needs, *Resources, Conservation & Recycling* 177 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105955>

show that the amount of absorbed CO₂ by concrete carbonation is a non-negligible share of the CO₂ originally released during manufacturing, which should be considered in the life cycle analysis of concrete buildings.

This case study indicates that almost 20 % of the CO₂ released in production can be absorbed during the life span of a typical multistorey building if carbonation is considered in the design process. Due to the nature of carbonation and the fact that it starts from the surface, up to 10% of the emitted CO₂ during production could be re-absorbed after just 25 years.