



CHALMERS



# Grön betong Möjligheter och begränsningar

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet  
Samhällsbyggnadsteknik

ANTON KRYSSBO  
KRISTIAN SPASOVSKI

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH  
SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, 2020  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



EXAMENSARBETE ACEX20

# Grön betong

Möjligheter och begränsningar

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet*

*Samhällsbyggnadsteknik*

Anton Kryssbo

Kristian Spasovski

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för Byggnadsteknologi

Hållbart byggande

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2020

Grön Betong

Möjligheter och begränsningar

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet*

*Samhällsbyggnadsteknik*

Anton Kryssbo

Kristian Spasovski

© ANTON KRYSSBO, KRISTIAN SPASOVSKI 2020

Examensarbete ACEX20

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Chalmers tekniska högskola 2020

Examinator: Holger Wallbaum - Professor i hållbart byggande på avdelningen för byggnadsteknologi vid Chalmers tekniska högskola.

Handledare: Arezou Baba Ahmadi - Forskarassistent på avdelning för byggnadsteknologi vid Chalmers tekniska högskola.

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för byggnadsteknologi

Hållbart byggande

Chalmers tekniska högskola

412 96 Göteborg

Telefon: 031-772 10 00

Omslagsbild: Skanska

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Göteborg 2020

Grön Betong

Möjligheter och begränsningar

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet  
Samhällsbyggnadsteknik*

Anton Kryssbo

Kristian Spasovski

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för byggnadsteknologi

Hållbart byggande

Chalmers tekniska högskola

## **SAMMANFATTNING**

Nyckelord: Grön betong, Slagg, Flygaska, Silikastoft, Återvunnen betong

Hållbarhet är en fråga som det läggs mer tyngd på inom alla olika branscher för varje dag som går. Det är något som ingen bransch kan undvika då frågan om hur varje bransch kan bidra till en hållbar utveckling alltid är aktuell. Med initiativ i form av lagförslag från regeringen och internationella avtal, finns tydligt lagda delmål kring hur miljöpåverkan måste begränsas för att kunna halvera våra koldioxidutsläpp till 2030.

Grön betong är en typ av hållbar betong som Skanska tagit fram under våren 2019. Målet med den Gröna betongen är att sänka den andel cement som går in i betongen och använda sig av ersättningsmaterial, för att på så sätt minska koldioxidutsläpp och resursanvändning.

Syftet med rapporten är att belysa möjligheter men även eventuella problem som kan uppstå vid användning av Grön betong. Genom att utvärdera den betong som idag klassas som hållbar kommer dess förbättringsområden belysas, och kan lättare utvecklas till att bli mer hållbar. Det här är ett steg på vägen mot målet om en hållbar utveckling och med kontinuerligt arbete kring framtagandet av hållbara byggnadsmaterial kommer byggnadsbranschen minska sitt koldioxidavtryck.

Projektet grundar sig i en omfattande litteraturstudie som kompletterats med olika handledningsmöten tillsammans med experter på både Skanska och Chalmers. Syftet av det kombinerade metodvalet är att kunna stötta och korrigera den litteraturstudie som togs fram för att skapa en större kredibilitet och precision.

De ersättningsmaterial som tas upp i detta projekt är flygaska, slagg och silikastoft, men även användningen av återvunnen betong. Hållbar betong visar på förbättrade eller likvärdiga resultat i flera områden jämfört med en vanlig 100% portlandcement. Olika ersättningsmaterial ger olika resultat och även olika kombinationer av dessa. De förbättrade/likvärdiga områden är: hållfasthetsutveckling, hållfasthet, E-modul, kloridinträngning, arbetbarhet och värmeutveckling, och de försämrade egenskaper är: karbonatisering

Green Concrete

Possibilities and limitations

*Degree Project in the Engineering Programme  
Civil and Environmental Engineering*

Anton Kryssbo

Kristian Spasovski

Department of Architecture and Civil Engineering  
Division of Building Technology  
Sustainable building  
Chalmers University of Technology

## **ABSTRACT**

Key words: Green Concrete, GGBS, Fly Ash, Silica fume, Recycled concrete

Sustainability is a subject that gets more and more traction in different industries for each day that goes by. It is something that no industry can avoid due to the question about how each industry can contribute to a sustainable development will always be relevant. With initiatives in the shape of bills from the government and international agreements, there are distinct milestones of how the environmental impact must be restricted to be able to half our carbon dioxide emissions until 2030.

Green concrete is a kind of sustainable concrete that Skanska has developed during the spring of 2019. The goal with Green concrete is to lower the share of cement that the concrete contains and use substitute materials, and in that way lower the carbon dioxide emissions and use of resources.

The purpose of the report is to illustrate the possibilities but also any problems that may arise with the use of Green concrete. By evaluating the concrete that today is classified as sustainable, its areas of improvement will be illustrated and making it easier to develop while making it more sustainable. This is a step towards our goal of making a sustainable concrete, and with continued work with the development of sustainable building materials the construction industry will lower its carbon dioxide emissions.

The project is based on a comprehensive literature study which is complemented with different supervision meetings together with experts at Skanska and Chalmers. The purpose of the combined method selection is to support and correct the literature study that was made to create greater credibility and precision.

The substitute materials that are being addressed in this project are fly ash, slag, and silica fume, but also the use of recycled concrete. Sustainable concrete shows improvements or equivalent results in different areas compared to 100% ordinary Portland cement. Different substitute materials give different results and different combinations of substitute materials. The improved/equivalent areas are: strength development, strength, modulus of elasticity, workability, chloride penetration and heat of hydration, and worsened properties within: carbonation.

# Innehållsförteckning

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	II
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	- 3 -
FÖRORD	- 5 -
Definitioner	- 6 -
1    INLEDNING	- 8 -
1.1    Bakgrund	- 8 -
1.2    Syfte	- 9 -
1.3    Frågeställningar	- 9 -
1.4    Avgränsningar	- 9 -
2    METOD	- 10 -
2.1    Processbeskrivning	- 10 -
2.2    Litteraturstudie	- 10 -
2.3    Handledningsmöten med Skanska och Chalmers	- 12 -
3    LITTERATURSTUDIE	- 13 -
3.1    Effekter på arbetbarhet	- 13 -
3.1.1    Sättnått och sättid	- 13 -
3.1.2    Värmeutveckling och torksprickor	- 13 -
3.2    Effekter på hållfasthetsaspekter	- 15 -
3.3    Effekter på beständighet	- 19 -
3.3.1    Frostbeständighet	- 19 -
3.3.2    Kloridinträngning och Karbonatiseringsdjup	- 21 -
3.4    Grön betong i verkligheten	- 23 -
4    RESULTAT	- 24 -
4.1    Arbetbarhet och hållfasthet	- 24 -
4.2    Underhåll och beständighet	- 24 -
4.3    Användningssätt	- 25 -
5    DISKUSSION	- 27 -
5.1    Sammanfattning av resultat	- 27 -
5.2    Förslag på användningsområde	- 27 -
5.3    Det gröna i Grön betong	- 28 -
5.4    Diskussion av metod	- 28 -

6 SLUTSATS

- 29 -

7 REFERENSER

- 30 -

# Förord

Examensarbetet är utfört på avdelningen för byggnadsteknologi vid institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik på Chalmers tekniska högskola och motsvarar 15 högskolepoäng. De två författarna studerar på högskoleingenjörsprogrammet samhällsbyggnadsteknik, och examensarbetet har utförts med stöd från utsedd examinator Holger Wallbaum och handledare Arezou Baba Ahmadi som båda tillhör avdelningen Byggnadsteknologi.

Vi vill ge ett stort tack till både Holger och Arezou, men även till Daniel Sigström, Ludvig Dahlgren och Nicklas Järlström från Skanska. Ni har alla hjälpt oss under arbetets gång med att svara på frågor samtidigt som ni visat intresse inför arbetet.

Tack!

Anton Kryssbo  
Kristian Spasovski

Göteborg, Maj, 2020

## Definitioner

**CEM I** - En ren portlandcement (Vattenfall, 2017).

**CEM II** - Portland-kompositcement som innehåller minst 65% portlandklinker (Vattenfall, 2017).

**FA** - Flygaska: "Fine powder of mainly spherical, glassy particles, derived from burning of pulverised coal, with or without co-combustion materials, which has pozzolanic properties and consists essentially of SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and which: is obtained by electrostatic or mechanical precipitation of dust-like particles from the flue gases of the power stations; and may be processed, for example by classification, selection, sieving, drying, blending, grinding or carbon reduction, or by combination of these processes, inadequate production plants, in which case it may consist of fly ashes from different sources, each conforming to the definition given in this clause" SIS (2012).

**GGBS** - Granulerad masugnsslagg: "Vitrified material made by rapid cooling of a slag melt of suitable composition, obtained by smelting iron ore in a blast furnace, consisting of at least two thirds by mass of glassy slag and possessing hydraulic properties when suitably activated", SIS (2006).

**GPC:** Grey Portland Cement

**Grön betong:** "Green concrete is defined as a concrete which uses waste material as at least one of its components, or its production process does not lead to environmental destruction. It should also have high performance and life cycle sustainability. In other words, green concrete is an environment friendly concrete. Green concrete improves the three pillars of sustainability: environmental, economic, and social impacts. The key factors that are used to identify whether the concrete is green are: amount of portland cement replacement materials, manufacturing process and methods, performance and life cycle sustainability impacts" Suhendro (2014).

**Hållbarhet:** "En hållbar utveckling är en utveckling som tillfredsställer dagens behov utan att äventyra kommande generationers möjligheter att tillfredsställa sina behov" FN (2016). Hållbarhet i samband med den här rapporten betyder minskade koldioxidutsläpp och resursanvändning.

**NA** - Natural aggregate: "Ballast av bergmaterial som inte utsatts för något mer än mekanisk bearbetning", SIS (2008).

**OPC:** Ordinary Portland Cement.

**RCA** - Recycled concrete aggregate: "Ballast som erhållits genom bearbetning av oorganiska material som tidigare använts till byggande" SIS (2008).

**RAC** - Recycled aggregate concrete.

**Sättnått** – Sättnått mäts med en sättkon som är utformad enligt svensk standard där sättnåttet är den höjd som betongen sjunker när sättkonen avlägsnas.

**SCM:** Supplementary Cementing Materials

**SF** - Silikastoft: “Very fine particles of amorphous silicon dioxide collected as a by-product of the smelting process used to produce silicon metal and ferro-silicon alloys”, SIS (2009).

**SKB**: Självkompakterande betong

**VCT**: Vattencementtal

**WPC**: White Portland Cement

# 1 Inledning

Samhället står idag inför stora utmaningar vad gäller miljön och den ökande växthuseffekten. Det har resulterat i ett större fokus på hållbarhet och det genomsyrar både hur vi tänker och agerar. Det har i sin tur såklart påverkat byggsektorn där byggnadsmaterialet betong nu står inför nya utmaningar och utvecklingsmöjligheter. Med rådande problem kring miljön är det inte bara viktigt att skapa en så hållbar betong som möjligt, men också en betong som möter svensk standard samtidigt som betongens egenskaper fortsätter att utvecklas kontinuerligt.

## 1.1 Bakgrund

Jordens befolkning ökar samtidigt som fler delar av världen industrialiseras, vilket bidrar till en ökad efterfrågan på bostäder och infrastruktur. För att kunna täcka efterfrågan krävs det material. Byggnadsmaterialet betong används i stor utsträckning och är även världens näst mest använda tillgång, efter vatten. Den stora miljöpåverkan uppstår vid tillverkningen av cement, som ensamt står för 8–10% av världens mänskliga koldioxidutsläpp (Scrivener, John & Gartner, 2018). För att minska den här påverkan ersätts cementen med till exempel slagg, flygaska och silikastoft. Det här har gjorts under en längre tid för att ändra egenskaper hos betongen men har på senare tid fått en större uppmärksamhet då den också minskar miljöpåverkan. Internationellt är Parisavtalet ett bevis på hur FN visat ett stort intresse i att minska koldioxidutsläppen, för att nå målet av en temperaturökning av högst 1,5°C av jordens medeltemperatur med en maximal ökning på 2°C. För att nå detta mål måste koldioxidutsläppen minst halveras till 2030 (Naturvårdsverket, 2016). Den svenska regeringen har visat intresse för den här frågan när ett nytt lagförslag lagts fram i början av 2020, där förslaget lyder:

“Byggherren ansvarar för att en klimatdeklaration upprättas vid uppförande av ny byggnad. Deklarationen ska lämnas in till den myndighet som regeringen bestämmer. Av 10 kap. 34 § 2 plan- och bygglagen (2010:900) framgår att byggnadsnämnden kan meddela ett slutbesked först efter att en Författningsförslag Ds 2020:4 6 klimatdeklaration har lämnats in enligt första stycket eller byggherren visat att en sådan skyldighet inte finns” (Ds 2020:4).

Grunden till detta beslut kommer från en internationell nivå där den europeiska standarden har ändrats så att miljödeklaration måste finnas med i projekteringsfasen av projekt (Ds 2020:4).

Med lagförslaget som regeringen har tagit fram kommer Boverket få i uppdrag att utveckla en öppen databas med relevant klimatdata, ett klimatdeklarationsregister, informations- och vägledningsunderlag, samt ta fram en plan för fortsatt utveckling av klimatdeklarationer (Boverket, 2020). Trafikverket har idag redan liknande kontroller av deras infrastrukturprojekt där de använder sig av en klimatkalkyl för att beräkna energianvändning och klimatpåverkande utsläpp vid byggande, drift och underhåll (Trafikverket, 2020).

Det finns även ett stort intresse för att minska koldioxidutsläppen från betong hos både tillverkare och entreprenader. Cementa som är en av de större leverantörerna av cement har gått ut med en nollvision där en av punkterna är att använda

ersättningsmaterial i betongen. De menar dock att den största skillnaden kommer att ske genom koldioxidavskiljning, -lagring eller återvinning (Cementa, 2020). Skanska har genom sitt sätt att gradera sina projektets hållbarhet med hjälp av “Gröna kartan” visat intresse för att minska miljöpåverkan av sina projekt. För att underlätta det här lanserade de våren 2019 sin “Gröna betong” där de har färdiga recept för vägg-, bjälklag- och garagebetong (Skanska, 2019).

Även WBCSD har tagit ett globalt initiativ genom att samla de 24 ledande cementtillverkare under CSI (Cement sustainability initiativ) som har som mål att minska miljöpåverkan av världens cementtillverkning (WBCSD, 2020).

## 1.2 Syfte

Syftet med rapporten är att belysa möjligheter men även eventuella problem som kan uppstå vid användningen av Grön betong. Genom att utvärdera den betong som idag klassas som hållbar kommer dess förbättringsområden illustreras, och kan lättare utvecklas till att bli mer hållbar. Det här är ett steg på vägen mot målet om en hållbar utveckling och med kontinuerligt arbete kring framtagandet av hållbara byggnadsmaterial kommer byggnadsbranschen minska sitt koldioxidavtryck.

## 1.3 Frågeställningar

1. Vad är den Gröna betongens möjligheter och begränsningar inom hållfasthet, arbetsbarhet och beständighet?
2. I vilken utsträckning kan Grön betong användas i projekt?

## 1.4 Avgränsningar

- Återvinning av material eller förminskning av spill på byggarbetsplatsen kommer ej tas upp.
- Enbart byggnadsmaterialet benämnt som “Grön betong, Green concrete, hållbar betong och sustainable concrete” kommer tas hänsyn till.
- Ingen typ av LCA kommer ske då även kopplat till hållbarhet berör det ej ovannämnda frågeställningar.
- Enbart ersättningsmaterialen FA, GGBS och SF kommer att undersökas.

## 2 Metod

Avsnittet av vald metod innehåller en processbeskrivning där en redogörelse av arbetets tidsplan och dess olika steg redovisas. I litteraturstudien förklaras den metod som valts för att kunna utföra en noggrann och strukturerad insamling av data. Slutligen beskrivs de olika experter som har bidragit till arbetet och vad deras roll har varit.

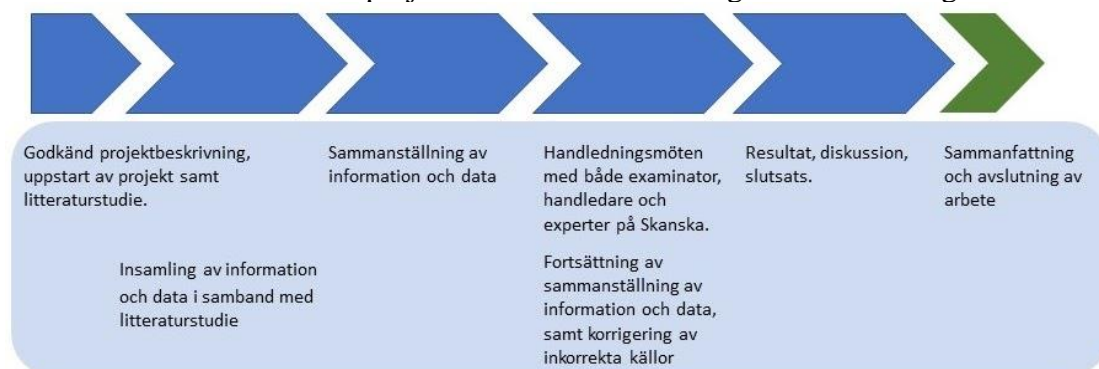
### 2.1 Processbeskrivning

Projektet startade i samband med ett uppstartsmöte tillsammans med utsedd examinator och handledare på Skanska, där den framtagna preliminära projektbeskrivningen diskuterades och godkändes. Efter uppstartsmötet var projektets frågeställningar och syfte fastställda. Med tydliga frågeställningar var nästa steg i arbetsprocessen att utföra en omfattande litteraturstudie för att både bekanta sig med ämnet men också analysera och jämföra resultat.

Det andra steget bestod av insamling av information, data och illustrationer i form av tabeller och figurer genom litteraturstudien.

Det tredje steget bestod av att tillsammans med utsedd examinator, experter inom Skanska teknik och handledare gå över den insamlade informationen. Här var målet att tillsammans identifiera information och data som inte stämde överens med varandra och diskutera anledningen till det.

Efter en genomförd granskning av den sammanställda informationen blev det sista steget att utföra en sammanställning av all sekundär-, och primärdata. En säkerställd sammanställning av all data gav senare plats för analys, diskussion och resultat. Till sist utformades en slutsats i projektet samt en överskådlig sammanfattning.



Figur 1 Processbeskrivning, illustrerad av Kryssbo, Spasovski (2020).

### 2.2 Litteraturstudie

Litteraturstudien utfördes med hjälp av de metodiska ramverk som Arksey och O'Malley (2005) utvecklat. Syftet med att följa detta ramverk är för att utföra en litteraturstudie med fördjupade och breda resultat, och undvika att få tunnelseende av en specifik frågeställning som ställs i arbetet. Arksey och O'Malley tar upp betydelsen om hur viktigt det är med framtagandet av all relevant litteratur och beskriver ramverket i 5 olika steg:

- Steg 1: Identifiera frågeställning
- Steg 2: Identifiera relevanta studier
- Steg 3: Urval av studie
- Steg 4: Kartläggning av data
- Steg 5: Jämföra, summera och rapportera resultat

#### *Steg 1: Identifiera frågeställning*

I samband med utformningen av projektbeskrivningen och uppstartsmötet formulerades följande frågeställningar som kan ses i avsnitt [1.3 Frågeställningar](#). En summering av frågeställningarna är att undersöka betongens möjligheter och begränsningar, både tekniskt och i praktiken.

#### *Steg 2: Identifiera relevanta studier*

Sökningar för att hitta relevanta artiklar gjordes främst via Chalmers bibliotek och Elsevier där sökorden i första hand bestod av “*Green concrete*”, “*fly ash concrete*” och “*GGBS*”. Relevanta artiklar och forskning var också tillgängligt med hjälp av utsedd handledare och examinator på Chalmers som hjälpte styra projektet i rätt riktning. De källor som användes under litteraturstudien var till störst del vetenskapliga artiklar och ”review artiklar”.

Primärkällor var något som prioriterades vid sökning av relevanta studier samtidigt som källor äldre än 20 år uteslöts. Identifiering av relevanta studier utfördes under tidsperioden januari 2020 - februari 2020.

#### *Steg 3: Urval av studie*

Urvalet av studier styrdes utav vad som undersöktes i samband med de tester och experiment som utfördes. Resultat som berörde betongens egenskaper inom kvalitet, hållfasthet och beständighet. Mer specifikt jämfördes den klassiska betongen med varianter av hållbar betong inom kloridinträngning, tryck- och draghållfastheten och värmeutveckling för att nämna några.

#### *Steg 4: Kartläggning av data*

Urvalet av studier samlades i en delad mapp i programvaran Mendeley där aktuell data och information noterades med kommentarer och markeringar. Metoden gjorde det enkelt att på ett strukturerat sätt sortera all utvald litteratur efter år, författare, titel, abstract, slutsats och resultat.

#### *Steg 5: Jämföra, summera och rapportera resultaten*

En jämförelse utfördes av de litteraturstudier som undersökte samma områden av den hållbara betongen i ett försök att hitta avvikelser i resultat av de olika egenskaper som var fastställda vid urval av studier. Data insamlad under litteraturstudien användes senare för att jämföras mot den information som fåtts från experter inom området, främst från Skanska.

## 2.3 Handledningsmöten med Skanska och Chalmers

Handledningsmöten var en viktig del i projektet. De gav möjlighet att stämma av kring den sammanställda datan, om vad som är korrekt, inkorrekt och vad som behövde utvecklas. Under dessa möten deltog:

- Ludvig Dahlgren - Teknisk specialist på Skanska Industrial Solutions.
- Holger Wallbaum - Professor i hållbart byggande på avdelningen för byggnadsteknologi vid Chalmers tekniska högskola.
- Arezou Baba Ahmadi - Forskarassistent på avdelningen för byggnadsteknologi vid Chalmers tekniska högskola.
- Nicklas Järnlström - Produktionschef, Stora projekt väst, Skanska.
- Daniel Sigström - Projektchef Region Stora Projekt Väst, Skanska.

Ludvig Dahlgren har länge arbetat med att utveckla Skanskas hållbara betong, Grön betong. Handledningsmötet gav projektet en god inblick i de tekniska detaljer som behöver belysas under arbetets gång. Hur hanteringen av källor med avseende på vart respektive experiment eller studie har tagit plats var också något som fick ett större fokus.

Syftet med handledningsmötet som både examinatorn Holger Wallbaum och handledare Arezou Baba Ahmadi närvarade på var att konfirmera kredibiliteten hos litteraturen som används i rapportens. Möjligheten med att stämma av den sammanställda datan med flera olika parter var kritiskt för rapportens trovärdighet. Att kunna ha flera olika personer med expertis i området styrka den sammanställda data var väldigt värdefullt för projektet och skapade en trygg grund i litteraturstudien.

Nicklas Järnlström arbetar idag, april 2020, som produktionschef på projektet Citygate i Göteborg. Här har Grön betong en stor plats i projektet eftersom byggnadens hela hisschakt gjuts med den Gröna betongen. För att kunna knyta ihop säcken med litteraturstudien och handledningen av all teori hade Nicklas en viktig roll i arbetet. Nästan all litteratur som står som en grund för teorin är baserade på tester och experiment som inte nödvändigtvis har utförts i praktiken på en arbetsplats, speciellt inte i Sverige. Nicklas syfte till arbetet var att kunna verifiera om all den teori som samlats in under arbetets gång stämmer i praktiken. Att kunna stötta teori tillsammans med erfarenheter från praktiken gav arbetet en starkare kredibilitet och säkerhet.

Daniel Sigström var handledare för projektet från Skanskas sida och hade en nyttig stöttande roll i arbetet. Daniel hjälpte till att skapa de kontakter som var nödvändiga för att kunna få en korrekt bild till hur Grön betong fungerar i teori och i praktik. Han delade även med sig en hel del kunskap kring hur arbetet med betong i större projekt sker vid exempelvis byggandet av Hisingsbron, samtidigt han gett bra feedback under projektets gång.

## 3 Litteraturstudie

För att minska betongens miljöpåverkan ersätts cement med så kallat ”supplementary cementing materials” som förkortas SCM. Det finns ett stort urval av SCMs att välja bland där de som används mest är flygaska (FA), Granulerad Masugnsslagg (GGBS) och Silikastoft (SF). Rapporten kommer därför ha ett fokus kring dessa produkter och hur de påverkar betongens egenskaper kommer tas upp nedan. Användningen av Recycled concrete aggregate (RCA) och hur den påverkar betongen kommer även att belysas, då det bidrar till en minskad utvinning av nytt material.

### 3.1 Effekter på arbetbarhet

Hur betongen beter sig vid gjutning är en viktig aspekt då det kan försvåra arbetet om betongen separerar eller inte flyter ut som den ska. Det här leder i sin tur till en dålig arbetsmiljö, något som såklart ska undvikas (Personlig kommunikation, Järlström 2020).

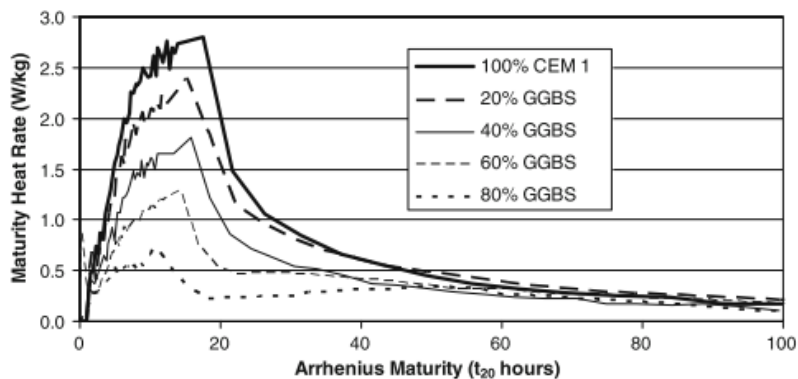
#### 3.1.1 Sättnått och sättid

Berndt (2009) beskriver i sin rapport att FA bidrar till en mer lättarbetad betong, vilket kan leda till kortare vibrationstider. Det konstateras samtidigt i rapporten att GGBS kan bidra till en något lättarbetad betong då sättnåttarna ökade något, medan RCA inte har någon märkvärdig effekt på arbetbarhet jämfört med NA. Däremot visar Xie (2019) i en rapport att sättnåttet minskar när GGBS innehållat ökar vilket föreslår att det kan vara svårt att få en lättflytande betong utan tillsatser av flytämnen i en betong med högre GGBS innehåll. Både den initiala och den slutliga sättiden minskar också med ett ökat innehåll av GGBS enligt samma rapport. Xie hävdar att vct-tal har en stor inverkan på sättid men även sättnått vid höga andelar GGBS. Utöver detta visar Khodair (2017) i sin rapport där han ersätter NA med RCA att medelvärdet på flyttnåttet för SKB minskade från 593 mm till 581 mm då SCM ersatte OPC i betongen.

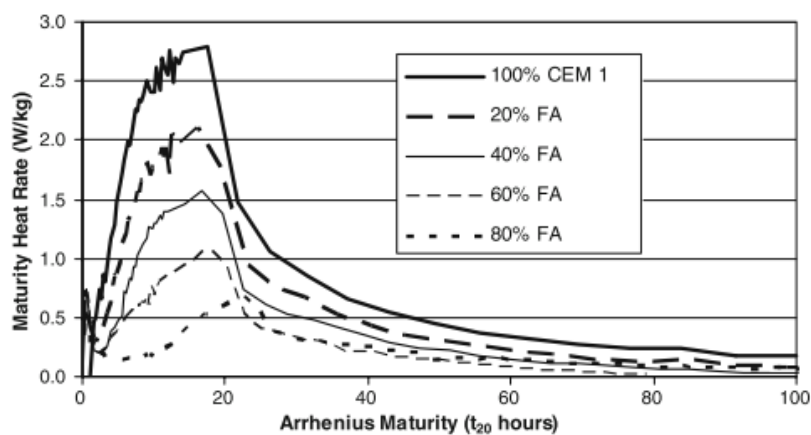
#### 3.1.2 Värmeutveckling och torksprickor

I en rapport av Ballim (2009) där tillsatser av FA, GGBS eller SF påverkar värmeutvecklingen hos betong dras slutsatsen att med en ökad andel GGBS och FA i

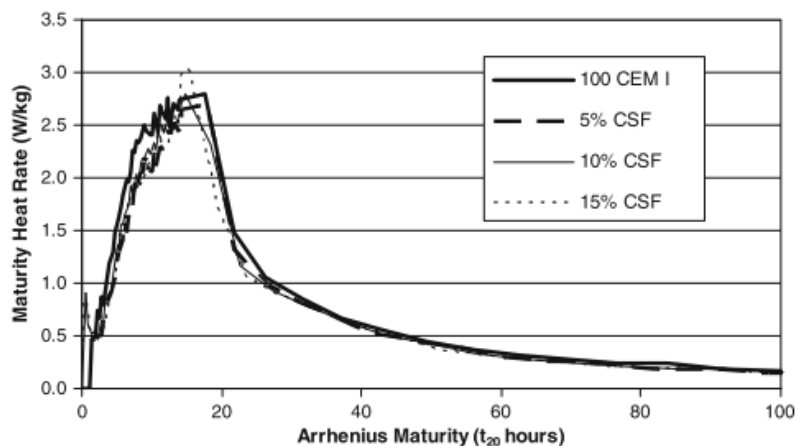
betongen minskar värmeutvecklingen. Det här medan tillsatser av SF inte påverkade värmeutvecklingen nämnvärt (Figur 2–4).



Figur 2 värmeutvecklingsprofil för betong med CEM I och GGBS (Ballim, 2009)



Figur 3 Värmeutvecklingsprofil för betong med CEM I och FA (Ballim, 2009)



Figur 4 Värmeutvecklingsprofiler för betong med CEM I och SF (Ballim, 2009)

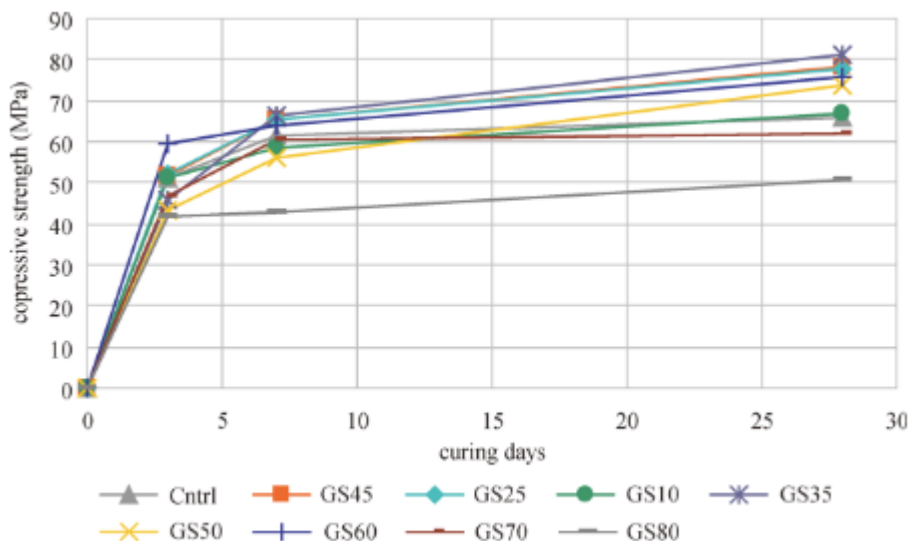
Även Wongkeo (2019) visar i en experimentell studie att värmeutvecklingen minskade för betong med FA. I samma studie hävdar han att om SF och FA används tillsammans blir reduktionen av värmeutvecklingen inte lika stor som för enbart FA men värmeutvecklingen är fortfarande mindre än 100% OPC. Samma slutsats dras

även i en rapport av Mastali (2019). Vidare menar Tao (2019) i sin rapport som grundas på en experimentell studie att värmeutvecklingen hos betong med GGBS och OPC är mindre än för betong med 100% OPC. Det här lyfts även upp i en studie av Kolani (2012) där han genom experiment visar att ökande andel GGBS leder till minskad värmeutveckling i betongen. Yazici (2008) hävdar också i sin rapport att genom att tillsätta FA minskar värmeutvecklingen hos betongen.

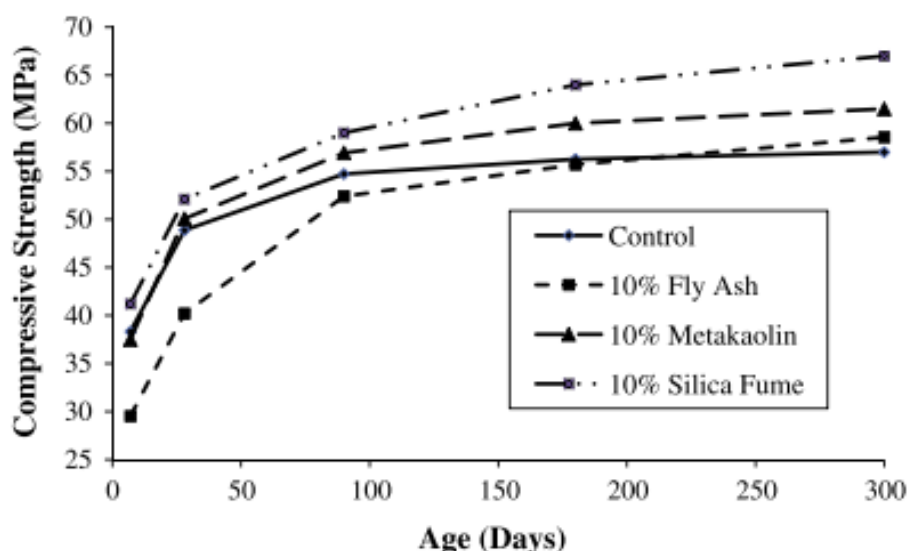
När det gäller torksprickor påstår Güneyisi (2012) i sin rapport att torksprickor försenas samt att maxbredden på de minskar med en ökad andel av SF i betongen. Dellinghausen (2012) menar att krympningen hos betongen minskade då slaggtillsattes till WPC och bäst resultat är vid ett slagginnehåll på 70%. Medan inga större förbättringar kunde uppfattas för fallet med GPC. Khodair (2017) nämner också att betongen producerar mindre värme när den stelnar vilket minskar förekomsten av torkspänningar, som in sin tur leder till torksprickor reduceras hos betongen när GGBS och FA tillsätts där FA bidrar till den största skillnaden. Däremot ökar dessa spänningar då andelen RCA ökar.

### **3.2 Effekter på hållfasthetsaspekter**

I ett experiment som utförs av Güneyisi (2012), kontrolleras vilka effekterna blir av att ersätta OPC med SF med 5%, 10%, 15% vid  $v_{ct}=0.35$  och  $v_{ct}=0.25$ . Resultatet är att tryck och draghållfastheten ökar hos betongen med en ökad andel SF oberoende av  $v_{ct}$  vid 7 och 28 dagar. Experimentet visar dock att hållfasthetstillväxten var sämre än för en betong med 100% OPC efter 3 dagar och är bättre med en ökad andel SF. O.Mohamed (2017) har även genomfört tester med GGBS och får fram att hållfasthetstillväxten är liknande eller sämre i majoriteten av fallet förutom när 60% GGBS användes (Figur 5). Aghabaglou (2014) visar i samband med sitt experiment att genom att ersätta OPC med 10% FA uppnås samma hållfasthet som en betong med enbart OPC efter 300 dagar men betongen har en långsammare hållfasthetstillväxt i ung ålder. Han pekar också ut att genom att ersätta cementen med 10% SF istället så fås en högre hållfasthet under hela tillväxtperioden (Figur 6).



Figur 5 Hållfasthetstillväxt för betong med GGBS, där siffrorna står för andelen GGBS och Cntrl är en blandning med bara OPC (O. Mohamed, 2017)

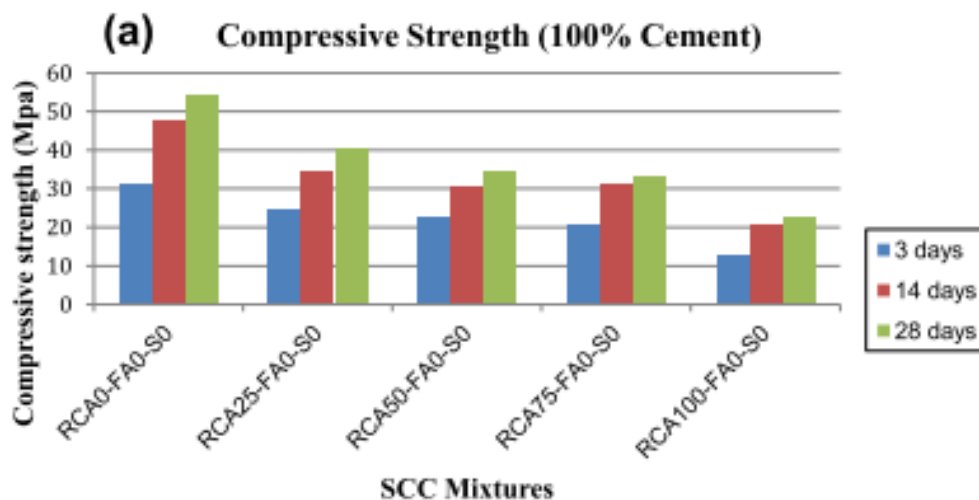


Figur 6 Hållfasthetstillväxt för betong med SF och FA (Aghabaglou, 2014)

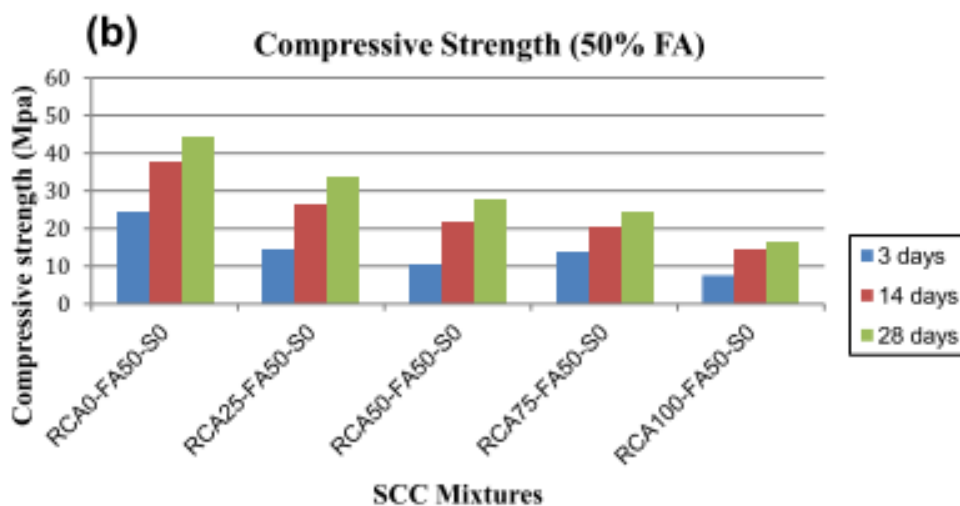
I rapporten lyfter Aghabaglou (2014) att E-modulen efter 90 dagar och framåt är samma för betongen med FA som för den med 100% OPC medan den är sämre innan 90 dagar. I fallet med SF är E-modulen samma eller något högre. Även Y. Zhang m.fl (2019) hävdar i sin rapport att SF har en positiv effekt på tryckhållfastheten medan FA har en negativ effekt. Yazici (2008) har genomfört ett experiment där han ersatt OPC med FA och SF och visar att FA har en negativ effekt på tryckhållfastheten men genom att tillsätta 10% SF fick alla proverna samma hållfasthet som betong med 100% OPC efter 90 dagar. Han visar också att E-modulen minskar drastiskt då FA innehållet överstiger 30% medan E-modulen först minskar efter 50% FA då även 10% SF tillsatts.

Genom en experimentell studie har Berndt (2009) undersökt hur betongen påverkas av att ersätta cement med SCMs samtidigt som ballast ersätts med RCA. Med dessa

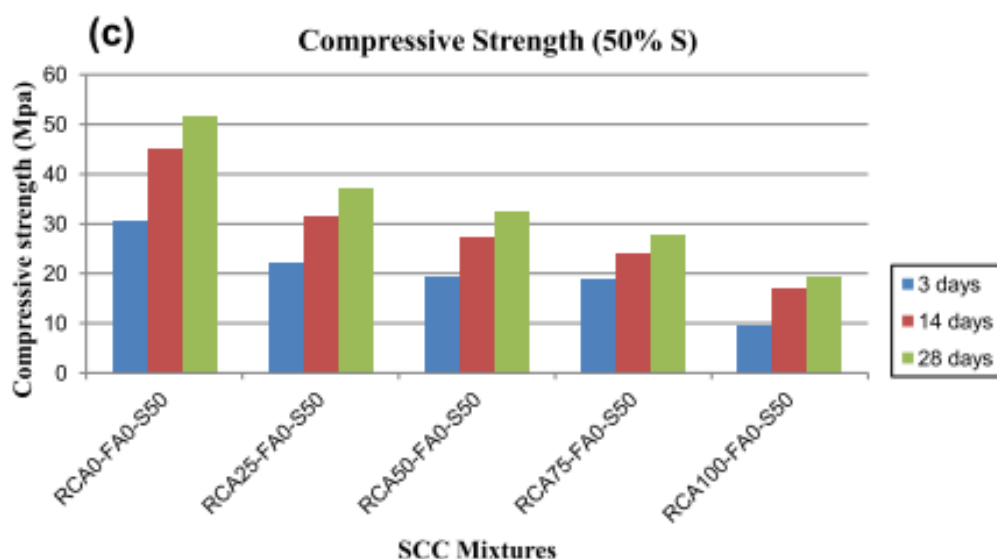
tester visar Berndt att återvunnen ballast och FA har en negativ effekt på både E-modul och tryckhållfasthet medan GGBS presterar likvärdigt vid 50% ersättning med hänsyn till E-modul och bättre vid tester av tryckhållfasthet vid 28 dygn och framåt. När GGBS-innehållet ökade till 70% minskade E-modulen något medan tryckhållfastheten är samma som för 100% OPC. Samma resultat påvisas när böjhållfastheten testas. Khodair (2017) testar i sin rapport olika halter RCA för betong med 100% OPC, 50%FA, 50%GGBS och 25%FA+25%GGBS. I rapporten visar Khodair att FA och RCA har en negativ effekt på både tryck- och böjhållfastheten hos betongen medan ett slagginnehåll på 50% inte påverkade hållfastheten efter 28 dagar nämnvärt se figur 7a-7d.



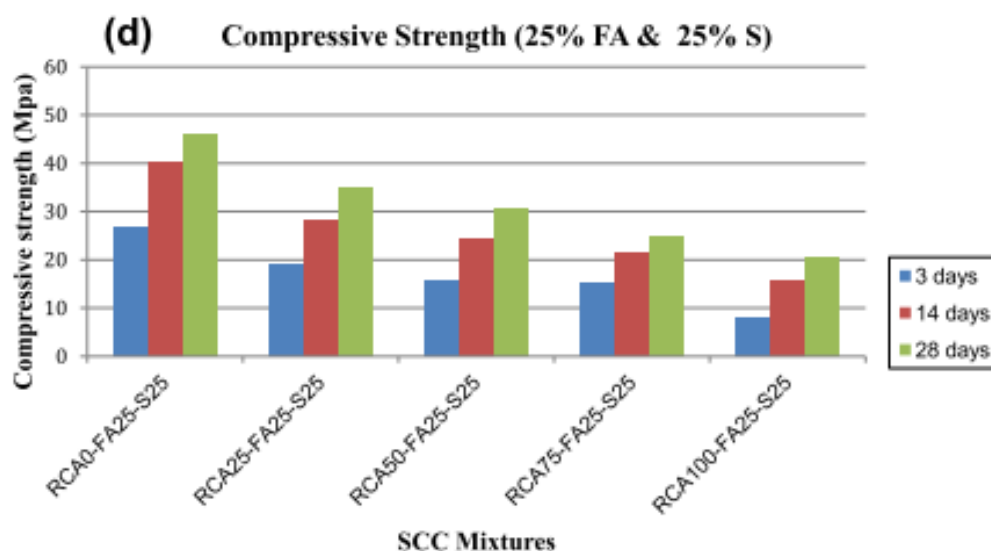
Figur 7a Hållfasthet för betong med 100% OPC och varierande innehåll RCA (Khodair, 2017)



Figur 7b Hållfasthet för betong med CEM I och 50% FA med varierande innehåll RCA (Khodair, 2017)



Figur 7c Hållfasthet för betong med CEM I och 50% GGBS med varierande innehåll RCA (Khodair, 2017)



Figur 7d Hållfasthet för betong med CEM I och 25% FA+25% GGBS med varierande innehåll RCA (Khodair, 2017)

Liu (2018) hävdar i sin rapport att GGBS och SF har en positiv effekt på till exempel tryck- och böjållfasthet medan FA har en direkt negativ effekt på samma parametrar. Experiment har även utförts av Xie (2019) där han undersöker hur innehållet av GGBS i en cement tillsammans med FA påverkar olika parametrar av betongen. Här bevisas att en ökad andel GGBS leder till en bättre tryckållfasthet och en högre E-modul, och att tryckållfastheten alltid är högre än referensbetongen som innehåller 100% OPC. Liknande resultat finns i ett experiment av Hawileh (2017) där beteendet hos balkar med olika procent GGBS granskas. Resultaten visar att för 50% och 70% GGBS ökar både styvheten och då förmågan att bära last jämfört med fallet där bara OPC användes. Däremot påverkas båda parametrarna negativt med ett innehåll på 90% GGBS. I en annan rapport Z. Guo m.fl. (2020) menar författarna att tryckållfastheten ökar med ett ökat GGBS innehåll när betong med FA och

återvunnen ballast tillsätts. GGBS har en liknande effekt på draghållfastheten hävdar också forskarna.

Forskare menar även att en tillsats av GGBS ökar både tryck- och böjhållfastheten hos en betong med FA (Liu, 2018). Vidare konstaterar McNally (2012) att en ersättning av CEMII cement med 50% GGBS inte har någon större inverkan på tryckhållfastheten, utan det är när 70% GGBS används den börjar minska. Vidare visar Tao (2019) i sin rapport där han bland annat kontrollerar GGBS effekt på tryckhållfastheten att tidig hållfasthet minskar då GGBS tillsätts medan 28-dagars hållfastheten är oförändrad, vilket han menar beror på att GGBS i betong gör att hållfastheten växer under en längre tid.

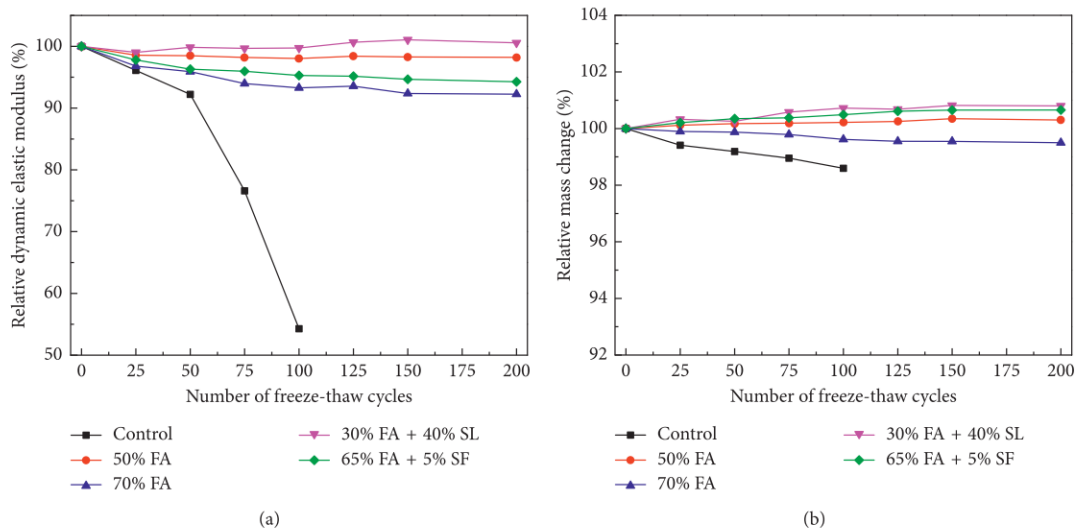
### **3.3 Effekter på beständighet**

Betongens beständighet är en viktig aspekt då betongkonstruktioner byggs för att stå under en lång tid. Hur hög beständighet som betongen har påverkar bland annat hur mycket reparationer som den kräver för att bibehålla driftdugligt skick. En hög beständighet leder till både besparingar ekonomiskt och av material. Nedan kommer SCMs påverkan på det vanligaste beständighetsparametrarna belysas.

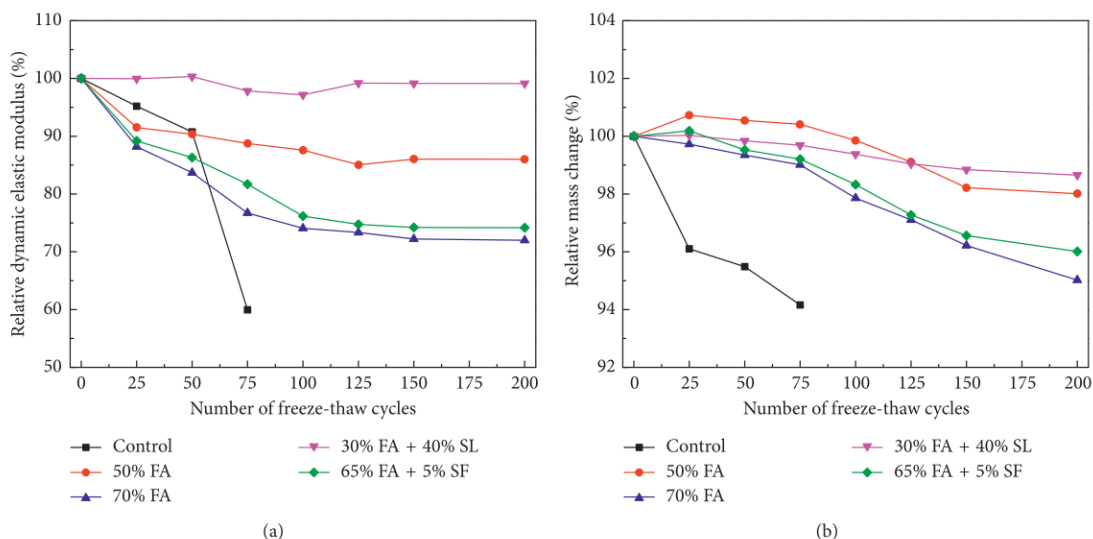
#### **3.3.1 Frostbeständighet**

I ett experiment gjort av Liu m.fl. (2018) där de bland annat testar vilken effekt GGBS har på frostbeständigheten hos betong med höga halter av FA. De visar att jämfört med betong utan SCMs som har ca 50% lägre E-modul är E-modulen så gott som oförändrad för betongen med 30% FA och 40% GGBS när de frystestas i tappvatten (Figur 8). Den här betongblandningen var också den enda i försöket som där E-modulen är oförändrad när den frystestas i en saltlösning (Figur 9). Vid båda frystesten visar blandningen bra resultat för tryckhållfasthet och böjhållfasthet där den bara minskade 15 MPa resp. 3 MPa för vid tappvatten och 27 resp. 4 MPa vid saltlösningen efter 200 fryscyklar. Det här kan jämföras med betongen utan SCMs som redan efter 100 fryscyklar förlorar 30 MPa då den testades i tappvatten.

Aghabaglou (2014) visar i sin rapport att frostbeständigheten ökar för betong med FA och SF, där SF hade störst reduktion av tryckhållfastheten efter frystestet. Även Liu (2018) visar i sin rapport att SCMs har goda egenskaper för frostbeständigheten hos betongen, där alla blandningar presterar bättre när den dynamiska E-modulen testas efter frystester i både saltlösningen och tappvatten. Blandningen som presterar bäst innehåller 30% FA + 40% GGBS, vilket har samma E-modul efter 250 cykler i båda fallen. Det här kan jämföras med betongen med 100% OPC som efter 100 cykler förlorar 45 % respektive 40% av den dynamiska E-modulen för tappvatten resp. saltlösning. Vid mätningar av tryckhållfasthet presterar betongen med 30% FA + 40% GGBS och betongen med 50% GGBS likvärdigt med en förlust på ca 10-12 MPa respektive 25 MPa vid tappvatten respektive saltlösning. Alla betonger med SCMs i presterade bättre. Samma resultat fås vid test av böjhållfasthet med skillnad från att alla blandningar med SCMs presterade likvärdigt.



Figur 8a-b (a)Relativ dynamisk E-modul (b) relativ massförändring vid frystest utfört i tappvatten (Liu, 2018)



Figur 9a-b (a)Relativ dynamisk E-modul (b) relativ massförändring vid frystest utfört i saltvatten (Liu, 2018)

Yazici (2008) utför tester på betong med höga halter FA med eller utan inblandning av SF. Resultatet på dessa tester visar att tryckhållfastheten hos efter 90 fryscyklar är högre jämfört med betong med 100% OPC. Draghållfastheten är däremot enbart högre för proverna med SF medan prover med enbart FA presterar sämre än om enbart OPC används. Årskog (2010) menar i sin rapport att betong med 70% GGBS och 10% SF kan bidra till en god frostbeständighet efter att ha testat betongen enligt Borås-metoden. Borås-metoden är den metod som följer svensk standard.

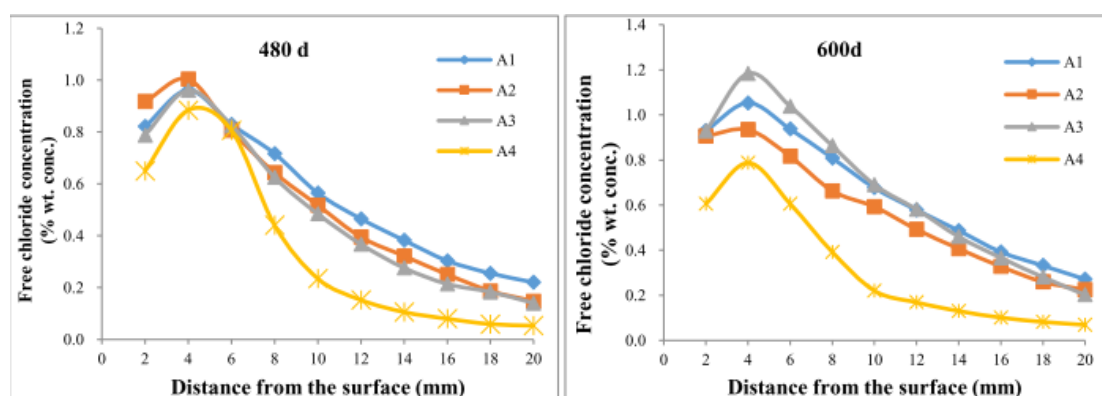
I sin avhandling hävdar Strand (2018) avskalningen inte ökar då OPC ersätts med 20% FA i fallet då betongen inte är karboniserad. Däremot ökar avskalning då denna procentsats istället är 35%. Han menar därpå att GGBS minskar avskalningen hos betongen oberoende om det tillförs 20% eller 35% för icke-karboniserad betong. Frostbeständigheten bestäms sedan utifrån den här avskalningen där mindre avskalning leder till högre frostbeständighet. Han har även gjort tester på karboniserad betong, då ökar betongens avskalning med en ökad tillsats av FA. För GGBS har betongen samma avskalning som 100% OPC då innehållet är <35% GGBS medan

större en inblandning av GGBS leder till ökad avskalning. Detta visar att frostbeständigheten blir ett problematiskt i ett långsiktigt perspektiv både för FA och GGBS. I en rapport från Statens Vegvesen (2014) visar de att tillsättningen av GGBS försämrar frostbeständigheten.

Vidare redovisar H. Guo m.fl. (2018) i sin rapport vilka faktorer som påverkar RACs frostbeständighet. RAC har en högre porositet och vattenabsorption som leder till en sämre frostbeständighet. I och med att RAC består av återvunnen betong är det svårt att få med enbart betong utan att en viss mängd cementrester och dylikt följer med. Desto mer cementrester som följer med desto högre porositet och vattenabsorption. Den återvunna betongens frostbeständighet beror också på kornstorleken hos den RCA som används. Guo m.fl. menar på att vid användningen av en stor mängd av RCA tillsammans med ett högt vct har RCAs kornstorlek en stor inverkan. Det här för att en finare RCA har en ogynnsam effekt på RACs livslängd än vad ett grövre kornstorlekar av RCA har. För att vidare försöka motverka den svaga livslängden som RAC har, kan RCA som kommer ifrån betong med högre styrka användas. Rätt mängd FA kan också användas för att förbättra frostbeständigheten av RAC.

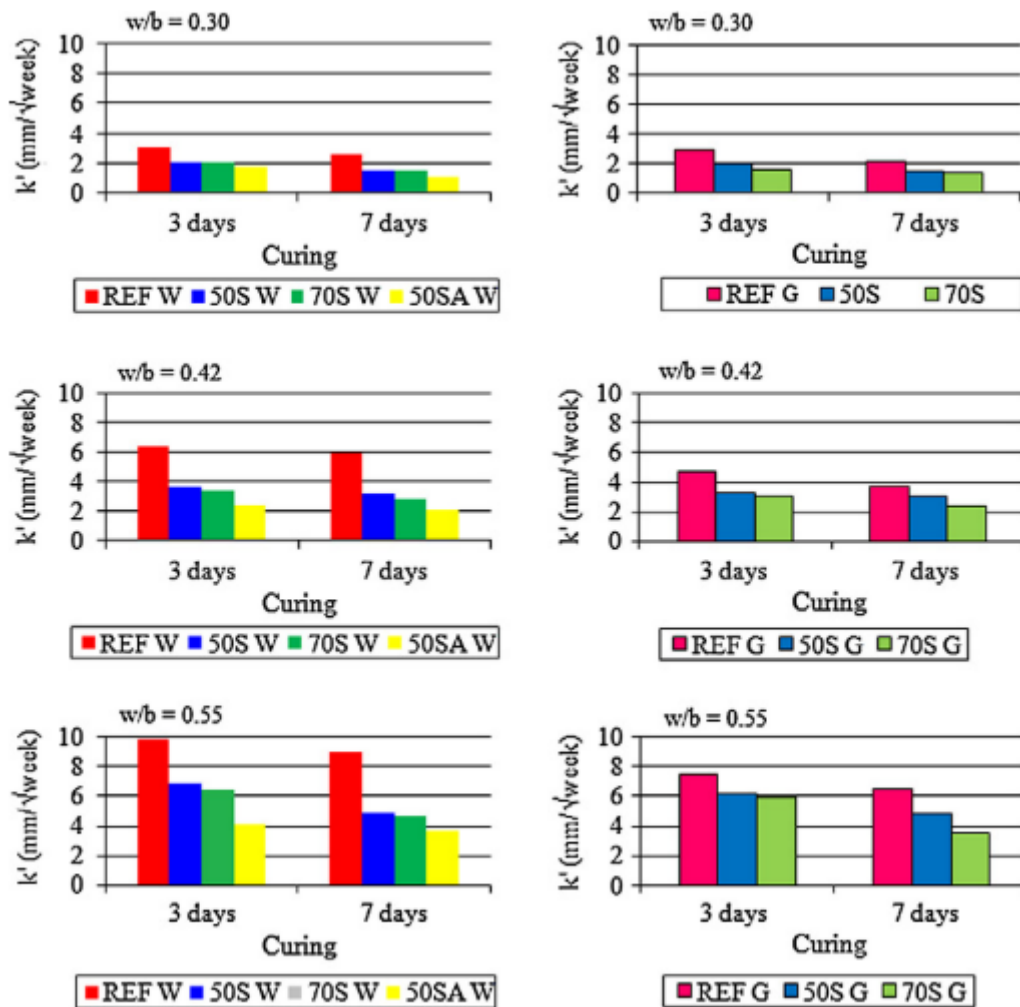
### 3.3.2 Kloridinträngning och Karbonatiseringsdjup

I rapporten av Aghabaglou (2014) påvisas en positiv effekt av SF och FA på kloridinträngning där SF ger störst effekt. Utöver det här visar även Güneyisi (2012) genom tester att en ökad andel SF leder till en bättre impermeabilitet vilket påvisar en tätare betong. I en studie hävdar Zhang (2019) att SF har en stark positiv effekt på betongens kloridinträngning, där konstanten nästan halveras vid tillsatts av 5% SF (Figur 10). Berndt (2009) visar i sin studie att FA och återvunnen ballast har en negativ effekt på kloridinträngning hos betongen medan GGBS har en positiv effekt oberoende på andel inblandat. Berndt hävdar att inte alla sorter av FA har en positiv effekt på kloridinträngning.



Figur 10 Kloridinträngning för blandningar (A1) 100%OPC, (A2) 5% SF, (A3) 20%FA och (A4) 15% FA+5% SF (Zhang, 2019)

Vidare menar Cheng m.fl. (2005) i sin rapport att ökande GGBS innehåll leder till mindre kloridinträngning och en lägre permeabilitet hos betongen. Dellnghausen (2012) visar med genomförda tester på betong som har ett slagginnehåll på 50% och 70 % för WPC och GPC. Resultatet visar på att genom att ersätta cement med slagg minskar kloridinträngningen hos betongen oberoende om WPC eller GPC används (Figur 11).



Figur 11 Kloridinträngningskoefficienter för blandningar med 50–70% GGBS samt en REF med OPC (Dellinhausen, 2012)

Khodair (2017) hävdar i sin rapport att både FA och GGBS ökar resistansen mot kloridinträngning både när RAC och NAC används, det här på grund av att betongen blir tätare. Khartabil (2019) redogör i sin rapport att en ökad andel FA kommer resultera i ett sämre skydd mot rostskador på armeringen genom karbonatisering då betongen blir mindre basisk. Han visar också RAC försämrar skyddet med ökande andel FA och RAC med undantag för provet med 30% FA där 40% RAC presterade bättre än 20% RAC, Skyddet kan antas vara konstant för 20% och 30% FA när NA används enligt Khartabil. Guo (2018) menar att betong med RCA presterar bättre jämfört om betong med NA i avseende på kloridinträngning. Däremot blir karbonatiseringsdjupet större då andelen RCA ökas hos betongen. Gou hävdar också att det beror på vilken RCA som används då betongens egenskaper blir sämre med ökande andel omkringliggande betong som finns kvar samt om finmalen RCA används.

McNally (2012) visar i en experimentell studie att då GGBS tillsätts till betongblandningen ökar resistansen mot kloridinträngning men samtidigt ökar karbonatiseringsdjupet. Han menar dock att karbonatiseringsdjupet fortfarande är på en godkänd nivå. Bakharev (2001) har i sin studie kommit fram till slutsatsen att GGBS bidrar till en försämrad resistans mot karbonatisering. Strand (2018) hävdar i

sin avhandling att karbonatiseringsdjupet ökar då FA tillsätts till betongen medan tillsatsen av GGBS inte påverkar karbonatiseringsdjupet nämnvärt. I sin rapport hävdar Yazici (2008) att FA ökar impermeabiliteten och då ökar skyddet mot kloridinträngning. Vidare i en rapport från Statens Vegvesen i Norge (2014) menar författarna att laborationer och tester som genomförts i Nederländerna i över 60 år visar att betong med GGBS har ett bra skydd mot kloridinträngning däremot är resistansen mot karbonatisering sämre. Även Gruyaert (2013) menar på att karbonatiseringsdjupet ökar med ökad andel GGBS samt att resistansen påverkas nämnvärt av härdningstiden.

### 3.4 Grön betong i verkligheten

För att kunna få en betong godkänd måste den följa den svensk standard som visar bland annat hur mycket SCMs som får blandas i beroende på vilken klimatklass som betongen ska uppfylla (Figur 12). Det som går att utläsa från denna tabell är att om OPC ska ersättas i en högre grad kommer betongen inte att kunna nå några högre klimatklasser. Detta är enligt Dahlgren (personlig kommunikation, 2020) grunden till varför Skanska har valt att i nuläget producera Väggbetong, Bjälklagsbetong och Garagebetong som uppnår de lägre klimatklasser medan de använder anläggningbetong för de högre klimatklasserna.

Kravelement	Exponeringsklass																		
	X0	XC 1	XC 2	XC 3	XC 4	XS 1	XS 2	XS 3	XD 1	XD 2	XD 3	XF 1	XF 2	XF 3	XF 4	XA 1	XA 2	XA 3	
Cement enligt SS-EN 197-1	Alla	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M <sup>h)</sup> II/B-M <sup>h)</sup> III/A	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M <sup>h)</sup> II/B-M <sup>h)</sup> III/A	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M <sup>h)</sup> II/B-M <sup>h)</sup> M <sup>h)</sup>	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M <sup>h)</sup> II/B-M <sup>h)</sup> III/A	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M <sup>h)</sup> II/B-M <sup>h)</sup> M <sup>h)</sup>	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M <sup>h)</sup> II/B-M <sup>h)</sup> M <sup>h)</sup>	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M <sup>h)</sup> II/B-M <sup>h)</sup> M <sup>h)</sup>	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M <sup>h)</sup> II/B-M <sup>h)</sup> M <sup>h)</sup>	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M <sup>h)</sup> II/B-M <sup>h)</sup> M <sup>h)</sup>	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M <sup>h)</sup> II/B-M <sup>h)</sup> M <sup>h)</sup>	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M <sup>h)</sup> II/B-M <sup>h)</sup> M <sup>h)</sup>	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M <sup>h)</sup> II/B-M <sup>h)</sup> M <sup>h)</sup>	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M <sup>h)</sup> II/B-M <sup>h)</sup> M <sup>h)</sup>	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M <sup>h)</sup> II/B-M <sup>h)</sup> M <sup>h)</sup>	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M <sup>h)</sup> II/B-M <sup>h)</sup> M <sup>h)</sup>	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V II/A-LL II/A-M <sup>h)</sup> II/B-M <sup>h)</sup> M <sup>h)</sup>	Sulfat-resis- tenta binde- medel se 5.3.2(5 ) II/A II/B	a)
Hållfasthetsklass hos cement	≥ 32,5	≥ 32,5	≥ 32,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5
Andel PC-klinker av bindemedel <sup>b)</sup>	≥ 30 <sup>d)</sup>	≥ 35	≥ 35	≥ 65	≥ 65	≥ 35	≥ 35	≥ 65	≥ 35	≥ 35	≥ 65	≥ 65	≥ 65	≥ 65	≥ 65	≥ 80	≥ 35 <sup>f)</sup>	≥ 35 <sup>f)</sup>	a)
Andel av bindemedlet <sup>c)</sup>																			
Silkastoft	≤10	≤10	≤10	≤10	≤10	≤10	≤10	≤10	≤10	≤10	≤10	≤10	≤10	≤5	≤5	≤10	≤10 <sup>g)</sup>	≤10 <sup>g)</sup>	a)
Flygaska	≤35	≤35	≤35	≤35	≤35	≤35	≤35	≤35	≤35	≤35	≤35	≤35	≤35	≤35 <sup>h)</sup>	≤20	≤35	≤35 <sup>h)</sup>	≤35 <sup>h)</sup>	
Slagg	≤70 <sup>h)</sup>	≤65	≤65	≤35	≤35	≤65	≤65	≤35	≤65	≤65	≤35	≤35	≤35	≤35 <sup>h)</sup>	≤20	≤65 <sup>h)</sup>	≤35 <sup>h)</sup>	≤35 <sup>h)</sup>	

a) Bestäms i varje enskilt fall  
b) Andel anges som massfraktion i %. Det ska förutsättas att cementtypen i fråga innehåller lägsta möjliga andel portlandcementklinker enligt SS-EN 197-1.  
c) Andel anges som massfraktion i %. I denna andel ska både det som ingår som huvudbeståndsdel i cementet och det som tillsätts vid blandningen medräknas. Om ett cement där tillsatsmaterial ingår används ska det förutsättas att det innehåller högsta möjliga andel tillsatsmaterial för cementtypen i fråga enligt SS-EN 197-1.  
d) Lägre andel får tillämpas om tillsatsmaterial enbart ingår som huvudbeståndsdel i ett accepterat ordinärt cement enligt SS-EN 197-1 eller i en motsvarande bindemedelskombination med påvisad likvärdig prestanda enligt bilaga 0.  
e) Högre andel får tillämpas om tillsatsmaterialet enbart ingår som en huvudbeståndsdel i ett tillåtet ordinärt cement enligt SS-EN 197-1 eller i en motsvarande bindemedelskombination med påvisad likvärdig prestanda enligt bilaga 0.  
f) Gäller endast då tillsatsmaterial kombineras med CEM I-SR0 eller CEM I-SR3 enligt SS-EN 197-1 eller cement som uppfyller SS 134204.  
g) Endast cement med S, V eller D.  
h) Endast cement med S eller V.  
i) Endast cement med S, V, D eller LL.  
j) Endast cement med S, V eller LL.  
ANM. För att minimera risken för bildning av det svällande mineralet thaumasit bör cement innehållande kalkstensfyller som en huvudbeståndsdel (beteckning LL och i vissa fall M) undvikas i betong i marin miljö längs västkusten och i Öresund. För "lining" i bergtunnlar utsatt för grundvattentryck bör dessa cement undvikas när sulfathalten (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) i vattnet överskrider 200 mg/l.

Figur 12 Accepterade bindemedelssammansättningar i de olika exponeringsklasserna (SS 137003:2015)

FA likaså GGBS är restprodukter som kommer från kolkraftverk respektive stålindustrier som utgör störst negativ miljöpåverkan genom deras mängd av koldioxidutsläpp. Enbart i Sverige stod järn- och stålindustrin för 34% utav de totala koldioxidutsläppen inom industri år 2018 (Naturvårdsverket, 2019). Den här industrin står även för mellan 4% och 7% det globala totala koldioxidutsläppet (SETIS, 2020). Samma sak gäller för FA, där kolförbränning också utgör stora mängder utsläpp av koldioxid. Koldrivna kraftverk är i toppen av de globala koldioxidutsläppen med cirka 30% av all energirelaterade koldioxidutsläpp (IEA, 2019).

## 4 Resultat

Med kombinerad litteraturstudie och handledning av experter på Skanska och Chalmers skapades en god grund i litteraturstudien. Följande rubriker kommer ge en sammanfattad bild av Grön betong.

### 4.1 Arbetbarhet och hållfasthet

Som visat av litteraturstudien ökar arbetsbarheten generellt hos betong med FA och GGBS vilket i sin tur bidrar till en bättre arbetsmiljö för de som gjuter. Den fysiska påfrestningen minskar eftersom betongen blir mer lättarbetad och flyter ut. Det finns dock en gräns på hur mycket GGBS som kan tillsättas då höga halter kan ge en motsatt effekt. Däremot försämras arbetsbarheten hos betongen med tillsättningen av SF, men så länge andelen är under 10% ska inga större problem uppstå. För att kunna åstadkomma en betong som flyter ut väl och även bidrar till en bättre arbetbarhet är FA att föredra som SCM, medan GGBS och SF bör användas mer sparsamt.

En annan parameter som måste tas hänsyn till är hur värmeutvecklingen förändras vid användning av SCMs. Värmeutvecklingen minskar vid användningen av GGBS och FA, det här kan leda till problem vid gjutningar som sker under de kalla delarna under året. De här problemen uppstår då mer värme måste tillföras under gjutningen så att betongen ska härda som tänkt. Däremot kan det ses som en fördel vid gjutningar som sker vid varmare klimat då betongen inte behöver kylning i lika stor utsträckning. Det här kan både spara tid och pengar då kylrör kanske inte behövs installeras i lika stor utsträckning som det görs idag samt att kostnaden för att kyla betong samtidigt minskar. SF visar på en motsatt effekt på värmeutvecklingen, men om SF används tillsammans med GGBS eller FA blir värmeutvecklingen mindre än vad det skulle blivit med 100% OPC.

GGBS och mer specifikt FA leder till att hållfasthetstillväxten för ung/färsk betong inte är lika hög som en 100% OPC. Det här kan leda till att tiden som betongen måste vara i formen blir längre eftersom den inte uppnått en viss hållfasthet. Detta skulle då kunna vägas upp med tiden som sparas vid kylningsarbetet vid vissa gjutningar. Den kan vara fördelaktigt att kombinera tillsatsmedlet GGBS med SF eller en accelerator i denna aspekt. Det här bidrar till att försumma problemet med den försämrade hållfasthetstillväxten i tidigt skede i den utsträckningen så att den är jämförbar med 100% OPC. Kombinationen bidrar även till en fördel i en mindre värmeutveckling.

### 4.2 Underhåll och beständighet

Med avseende på hållfasthet har GGBS samma möjlighet att utveckla hållfasthet om inte större då den växer under en längre tid. FA har även egenskaper inom det här området men används i mindre utsträckning eftersom den behöver en viss del OPC för att kunna reagera med för att utnyttja den här egenskapen. Som tumregel försämras RCA hållfastheten hos betongen. För att undvika det här problemet kan betong med höga halter RCA användas till estetiska eller andra element som inte i första hand konstrueras för sin bärande kapacitet. Det här skulle kunna vara konstruktioner såsom sittplatser men även icke bärande innerväggar. Tjockleken på innerväggar styrs ofta för att möta de ljud- och brandkrav som ställs på byggnaden och hållfasthetskrav är inte nödvändigtvis ett svårt krav att nå (personlig

kommunikation, Järlström 2020). För att undvika överdimensionera väggars hållfasthet kan RCA utnyttjas i denna aspekt. GGBS och SF kan ersätta cement utan att hållfasthetsparametrarna som kontrolleras i den här rapporten hos betongen påverkas nämnvärt. Det här gör att konstruktioner där bärighet har ett stort fokus är det bättre att använda dessa ersättningsmaterial. Där SF är att föredra för att uppnå en snabb hållfasthetstillväxt medan GGBS är att föredra för att ersätta cement i en större grad. Som nämnt tidigare kan en kombinerad blandning av de båda tillsatsmedlen även ett bra alternativ.

Med avseende på beständighet bidrar som sagt alla SCMs som studerats till en tätare betong och en högre resistans mot kloridinträngning. Det ska däremot tilläggas att vid höga halter av FA och GGBS kommer betongens frostbeständighet och karboniseringsdjupet påverkas negativt. Karboniseringsdjupet påverkas speciellt vid höga halter av FA. Däremot bör konstruktioner som utsatt för många fryscykler undvikas att gjutas med betong med ersättningsmaterial. Det här kan leda till stora skador och i sin tur större reparationsarbeten. Vidare skulle det här leda till en större användning av den totala betongen och motverkar det klimattänk som är grunden för användning av Grön betong.

### **4.3 Användningssätt**

Sammanfattningsvis handlar mycket om att använda rätt betong på rätt plats och att Grön betong ska implementeras där det är fördelaktigt och kan inte ses som en ett byggnadsmaterial som kan användas överallt. Det här arbetssättet leder till att antalet betongsorter ökar i projekt. Det här har diskuterats med Järlström (personlig kommunikation, 2020) som inte uppfattade det som ett problem så länge projekteringen är gjord på ett bra sätt. Den ska såklart användas enligt svensk standard så byggnader konstrueras både för att spara på miljöpåverkan i nuet samtidigt som den inte ska behöva stora reparationer eller till och med ersättas i förtid för att fel betong användes. På grund hur SCMs påverkar betongen måste hänsyn till användningen av Grön betong tas redan vid projekteringen och desto tidigare desto bättre. Exempelvis kan mer tyngd i arbetet med klimatklasser tas upp vid projektering. Idag kan betong med SCMs uppnå lägre klimatklasser, här är det viktigt att förstå vilken miljöklass som en konstruktion kommer uthärda. Om en för hög klimatklass sätts kan möjligheten att använda betong med SCMs försvinna.

Såklart är inte det här den slutgiltiga lösningen på alla problem då både FA och GGBS kommer från industrier med stora koldioxidutsläpp, vilket resulterar i att koldioxidutsläppen egentligen inte är noll. Däremot reduceras det totala koldioxidutsläppen om användningen av cement kan reduceras. Efterfrågan av FA och GGBS kan ses som ett ekonomiskt incitament då det gör både stålindustrin och kolkraftverken lönsammare eftersom de kan sälja deras restprodukter. Incitamentet är däremot inte tillräckligt stort för att bibehålla förstahandsproduktionen om efterfrågan för denna skulle minska. Det här gör det fortsatt försvarbart att använda FA och GGBS i betong för det bidrar till reducerade koldioxidutsläpp. Hur fördelningen av koldioxidutsläppen av FA och GGBS ser ut är däremot idag inte fastställt och behöver utredas närmare. Det sker idag vidare forskning på nya material som kan komma att ersätta FA och GGBS och i möten med Dahlgren och Ahmadi (personlig kommunikation, 2020) har kalcinerade leror och bioaskor lyfts fram som lovande framtida substitut. Dock behövs det mycket mer omfattande forskning kring hur dessa substitut kan användas på ett optimerat sätt som möter svensk standard. Deras främsta

fördel är dess förminskade miljöpåverkan, då exempelvis kalcinerade leror inte behövs värmas upp i lika höga temperaturer.

## 5 Diskussion

I resultatet sammanfattades vilka fördelar och nackdelar som finns med att ersätta portlandcement med flygaska, slagg och silikastoft i betong. Utmaningen ligger sen i att vikta de här fördelarna och nackdelarna för att få ett optimalt resultat och att använda grön betong på ett effektivt sätt som möjligt utifrån vilka förutsättningar som finns i de specifika projekt.

### 5.1 Sammanfattning av resultat

	Litteraturstudie			Ludvig Dahlgren			
	GGBS	FA	SF	GGBS	FA	SF	
Frostbeständighet	●	●	●	●	●	●	● Förbättrad/likvärdig ● Försämrad ● Motsägbar information ● Information saknas
Hållfasthetsutv.	●	●	●	●	●	●	
Hållfasthet	●	●	●	●	●	●	
E-modul	●	●	●	●	●	●	
Karbonatisering	●	●	●	●	●	●	
Kloridinträngning	●	●	●	●	●	●	
Arbetsbarhet	●	●	●	●	●	●	
Värmeutveckling	●	●	●	●	●	●	

Tabell 1 Sammanfattning av egenskaper hos substitut FA, GGBS och SF, illustrerad av Kryssbo, Spasovski (2020).

Tabellen över är visuell representation av den genomförda litteraturstudien samt handledingsmöte med Ludvig Dahlgren se Tabell 1. Syftet är att ge en översiktlig bild av vad som har undersökts samt hur betongens egenskaper påverkas av de olika tillsatsmaterialen. Grön betyder att den SCM:n bidrar till en egenskap förbättras eller är likvärdig mot klassisk betong medan Röd betyder att egenskapen istället försämras. Gul betyder att olika källor visar på olika resultat eller att det beror på andelen SCM som tillsätts och Blå betyder att den aktuella egenskapen inte diskuterats vid handledingsmötet.

### 5.2 Förslag på användningsområde

Baserat på vår litteraturstudie och handledingsmöten skulle betong med SF och GGBS kunna användas inom prefabtillverkning då SF och GGBS ger en snabb hållfasthetsutveckling samtidigt som den minskar värmeutvecklingen vilket då minskar kylningsproblem som kan uppstå då prefabtillverkning ofta sker i något uppvärmda lokaler. För element som inte ska vara bärande kan även RAC implementeras då den sänker miljöpåverkan ytterligare. Då den externa klimatpåverkan är som minst inomhus gör den sämre beständigheten hos betong med RAC mindre kritisk.

Då GGBS har ett bra skydd mot kloridinträngning kan den med fördel användas i marina miljöer speciellt med höga salthalter då betongen inte utsätts för många fryscyklar under vattenytan. FA och SF kan också användas här men är enligt oss ett

sämre val på grund av att karbonatiseringsdjupet blir mycket större och kan inte användas i lika stora halter som GGBS. Garage är även ett bra ställe att använda betong med GGBS då det kan förekomma höga halter klorider här medan plattan är isolerad mot frysskador.

### **5.3 Det gröna i Grön betong**

Efter en kort stund in på litteraturstudien bekantade vi oss med vad "Green concrete" egentligen var, så skapades en fråga som följt med under hela projektets gång. Hur grön är den gröna betongen egentligen? Är det rätt att kalla en betong som innehåller stora delar flygaska och/eller slagg för ett hållbart alternativ med tanke på vilka industrier de här restprodukterna kommer ifrån?

Med tanke på vilka industrier dessa substitut kommer från var vi kritiska till att kalla betongen för hållbar. Efter att ha läst flertal olika artiklar där den gröna betongen hyllades med dess låga sammanlagda koldioxidutsläpp började vi ifrågasätta hur mätningen av dess koldioxidutsläpp valts göras. Det verkar som att substituten hanteras som att de inte bidrar till någon mängd koldioxidutsläpp alls på grund av att de är en slags restprodukt. Det här är något vi har varit kritiska mot och är osäkra om det här är ett korrekt sätt att mäta den hållbara betongens klimatpåverkan gentemot den klassiska betongen. Borde det inte vara en rättvis mätning om man adderade den mängd koldioxid kolförbränning utgör mot den mängden flygaska som används? Det här känner vi ger en mer äkta bild av vad en hållbar betong idag egentligen är. För att göra den här avvägningen kan en detaljerad LCA eller liknande genomföras.

### **5.4 Diskussion av metod**

Litteraturstudien för att få fram relevant underlag till arbetet fungerade väl för arbetet. I kombination med kompletterande handledningstillfällen kunde en viss kvalitet av litteraturstudien säkerställas.

Det var dock inte felfritt och det fanns områden som kunde förbättras i metoden. Ett av de problemen som uppstod var att viss litteratur som ansågs som relevant för arbetet var främst forskning från Asien, mer specifikt Kina och Indien. I med att stor andel av den forskning som legat som underlag i arbetet är experiment och tester, har denna forskning behövts att kontrolleras mer noggrant. De problem som kan uppstå med denna forskning är att de olika parametrarna som testas utförs med andra standarder som vi inte har i Sverige. Exempelvis visade det sig att Kina och Sverige inte har samma tester för frostbeständighet. Här skildes resultaten en hel del jämfört med en svensk studie vilket belysts med hjälp av Ludvig Dahlgren. För att ta hänsyn till det här vägdes den svenska källan något högre då det är svensk standard som följs.

För att förbättra arbetets kredibilitet föreslås det att ta in fler personer med expertis inom betong som byggnadsmaterial, samt att utöka urvalet av litteratur som teorin grundar sig i. Det här är något som vi anser är ett förbättringsområde och med tanke på hur stort det här arbetet är, har rapporten en tillräcklig start grund i litteraturen.

## 6 Slutsats

Något som visades tydligt under arbetets gång var även om en bra och hållbar betong finns tillgänglig krävs det en hel del för att kunna implementera in den i branschen. Byggbranschen verkar styras av en hel del normer och traditionsarbete som kan försvåra övergången till ett nytt byggnadsmaterial som betar sig annorlunda. Ett vidare arbete med att omsätta hållbar betong i praktiken kommer förhoppningsvist skapa en trend till en exklusiv användning av hållbar betong där den är applicerbar.

För Grön betong med FA och GGBS är arbetsbarheten god medan SF påverkar den negativt då betongen blir klistrig och blir på så sätt svår att arbeta med. Både FA och GGBS bidrar även till en minskad värmeutveckling och hållfasthetsutveckling medan SF bidrar till att båda dessa parametrar ökar. När det gäller frostbeständighet och karbonatisering minskar resistansen då GGBS, FA eller RCA tillsätts. Skyddet mot kloridinträngning ökar när GGBS, FA eller SF används medan RCA har en negativ effekt. Den slutliga hållfastheten som uppnås när alla processer är klara påverkas inte nämnvärt för FA, GGBS och SF medan RCA försämrar hållfastheten. Något unikt med GGBS är att den skapar en ökad hållfasthetstillväxt under en längre tid jämfört med 100% OPC, det här kan ge en betong med GGBS en högre slutlig hållfasthet. E-modulen påverkas inte nämnvärt när SCMs används.

RCA kan användas i innerväggar då det ofta är brand och ljudkrav som är dimensionerande och klimatklasserna är låga. Medan en blandning av SF och GGBS kan användas vid prefabtilverkning. GGBS kan också användas vid undervattensgjutningar och garage. Utöver dessa fall ska Grön betong användas i så stor utsträckning som möjligt och där de uppfyller svensk standard.

### ***Vidare studier:***

I rapporten har bara de tre stora SCMs som används i en större utsträckning idag kontrollerats och som fortsättning på det här arbetet kan framtida SCMs och dess påverkan på betongens egenskaper undersökas. Rapporten är uppbyggd på ett sådant sätt att den ska ge en helhetsbild av nuläget så ett alternativ att utöka studien genom att ta med kontakt med fler experter för att få fram idéer från i spetskunskap. Rapporten ger också bara förslag på hur Grön betong kan användas utifrån den teoretiska bakgrunden från litteraturstudien men inte hur detta skulle gå till i praktiken. Ett sätt att fortsätta den här utvecklingen är att noggrannare kolla på vad som krävs och hur det ska gå till att anpassa det dagliga arbetet och projektering av Grön betong. Detta innefattar till exempel hur nya värmeberäkningar kan utföras med avseende på hur mycket och vilken SCM som tillsätts till betongen.

## 7 Referenser

- Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: Towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology: Theory and Practice*, 8(1), 19–32. <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
- Ballim, Y., & Graham, P. C. (2009). The effects of supplementary cementing materials in modifying the heat of hydration of concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 42(6), 803–811. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9425-3>
- Berndt, M. L. (2009). Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2606–2613. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.011>
- Boverket. (2020) *Klimatdeklaration vid uppförande av byggnad*. Hämtad 2020-04-18 från: <https://www.boverket.se/sv/byggande/uppdrag/klimatdeklaration/>
- Cementa. (2020). Nollvision för koldioxid. Hämtad 2020-03-25 från <https://www.cementa.se/sv/nollvision2030>
- Cheng, A., Huang, R., Wu, J. K., & Chen, C. H. (2005). Influence of GGBS on durability and corrosion behavior of reinforced concrete. *Materials Chemistry and Physics*, 93(2–3), 404–411. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.03.043>
- Dellinghausen, L. M., Gastaldini, A. L. G., Vanzin, F. J., & Veiga, K. K. (2012). Total shrinkage, oxygen permeability, and chloride ion penetration in concrete made with white Portland cement and blast-furnace slag. *Construction and Building Materials*, 37, 652–659. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.076>
- Ds 2020:4. Klimatdeklaration för byggnader. Stockholm: Regeringskansliet Finansdepartementet. Hämtad från <https://www.regeringen.se/rattsliga-dokument/departementsserien-och-promemorior/2020/02/ds-20204/>
- Favier, A; De Wolf, C; Scrivener, K; Habert, G(2018) A sustainable future for the European Cement and Concrete Industry - Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050. *ETH Zurich-Research Collection*. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000301843>
- Gruyaert, E., Van Den Heede, P., & De Belie, N. (2013). *Carbonation of slag concrete: Effect of the cement replacement level and curing on the carbonation coefficient - Effect of carbonation on the pore structure*. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.024>

- Guo, Z., Jiang, T., Zhang, J., Kong, X., Chen, C., & Lehman, D. E. (2020). Mechanical and durability properties of sustainable self-compacting concrete with recycled concrete aggregate and fly ash, slag and silica fume. *Construction and Building Materials*, 231, 117115. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117115>
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Karaoğlu, S., & Mermerdaş, K. (2012). Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. *Construction and Building Materials*, 34, 120–130. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.017>
- Hawileh, R. A., Abdalla, J. A., Fardmanesh, F., Shahsana, P., & Khalili, A. (2017). Performance of reinforced concrete beams cast with different percentages of GGBS replacement to cement. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17(3), 511–519. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.11.006>
- IEA. (2019) *Global Energy & CO2 Status Report 2019*. Hämtad 2020-03-20 från: <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019>
- International Classifications for Standards, Sweden. SS-EN 12620+A1:2008. Ballast för betong. Stockholm SIS Förlag AB, Hämtad från <https://enav.sis.se/>
- Khartabil, A., & Martini, S. Al. (2019). Carbonation resistance of sustainable concrete using recycled aggregate and supplementary cementitious materials. *Key Engineering Materials*, 803 KEM, 246–252. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.803.246>
- Khodair, Y., & Bommareddy, B. (2017). Self-consolidating concrete using recycled concrete aggregate and high volume of fly ash, and slag. *Construction and Building Materials*, 153, 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.063>
- Kolani, B., Buffo-Lacarrière, L., Sellier, A., Escadeillas, G., Boutillon, L., & Linger, L. (2012). Hydration of slag-blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 34(9), 1009–1018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.05.007>
- Liu, Y., Zhou, X., Lv, C., Yang, Y., & Liu, T. (2018). Use of Silica Fume and GGBS to Improve Frost Resistance of ECC with High-Volume Fly Ash. *Advances in Civil Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/7987589>
- Mardani-Aghabaglou, A., Inan Sezer, G., & Ramyar, K. (2014). Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point. *Construction and Building Materials*, 70, 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.089>
- Mastali, M., Dalvand, A., Sattarifard, A. R., Abdollahnejad, Z., Nematollahi, B., Sanjayan, J. G., & Illikainen, M. (2019). A comparison of the effects of pozzolanic binders on the hardened-state properties of high-strength cementitious composites reinforced with waste tire fibers. *Composites Part B: Engineering*, 162(September 2018), 134–153. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.10.100>

- McNally, C., & Sheils, E. (2012). Probability-based assessment of the durability characteristics of concretes manufactured using CEM II and GGBS binders. *Construction and Building Materials*, 30, 22–29.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.029>
- Naturvårdsverket. (2019) *Utsläpp av växthusgaser från industrin*. Hämtad 2020-03-20 från:<https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-utslapp-fran-industrin/?>
- Statens Vegvesen (2014) *Slag cement concrete- the Dutch experience*. Oslo. Statens Vegvesen
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114(June), 2–26.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- SETIS. (2020) *Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Reduction in the Iron and Steel Industry*. Hämtad 2020-03-20 från:[https://setis.ec.europa.eu/system/files/Technology\\_Information\\_Sheet\\_Energy\\_Efficiency\\_and\\_CO<sub>2</sub>\\_Reduction\\_in\\_the\\_Iron\\_and\\_Steel\\_Industry.pdf](https://setis.ec.europa.eu/system/files/Technology_Information_Sheet_Energy_Efficiency_and_CO2_Reduction_in_the_Iron_and_Steel_Industry.pdf)
- Skanska.(2019)Grönt byggande i praktiken. Hämtad 2020-03-25 från <https://www.skanska.se/om-skanska/hallbarhet/gront-byggande/sa-arbetar-vi/>
- Strand, M. (2018). Experimental Study of De-icing Salt-frost Scaling in Concrete with Low-calcium Fly Ash or Slag: Influence of Drying and Carbonation, and Air Content. Lund: Faculty of Engineering, LTH at Lund University.
- Suhendro, B. (2014). Toward green concrete for better sustainable environment. *Procedia Engineering*, 95(Scescm), 305–320.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.190>
- Swedish Standards Institute . SS-EN 15167-1:2006.Mald granulerad masugnsslagg för användning i betong , bruk och injekteringsbruk – Del 1 : Definitioner , specifikationer och kriterier för överensstämmelse. Stockholm: SIS Förlag AB Hämtad från <https://enav.sis.se/>
- Swedish Standards Institute SS 137003:2015. Betong – Användning av SS-EN 206 i Sverige. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från <https://enav.sis.se/>
- Swedish Standards Institute. SS-EN 13263-1:2005+A1:2009. Silikastoft till betong – Del 1: Definitioner, krav samt kriterier för överensstämmelse. Stockholm: SIS Förlag AB Hämtad från <https://enav.sis.se/>
- Swedish Standards Institute. SS-EN 450-1:2012.Flygaska för betong – Del 1: Definition, specifikationer och kriterier för överensstämmelse. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från <https://enav.sis.se/>
- Tao, J., & Wei, X. (2019). Effect of ground granulated blast-furnace slag on the hydration and properties of cement paste. *Advances in Cement Research*, 31(6), 251–260. <https://doi.org/10.1680/jadcr.17.00166>

- Trafikverket. (2020) *Klimatkalkyl – infrastrukturens klimatpåverkan och energianvändning i ett livscykelerspektiv*. Hämtad 2020-04-10 från: <https://www.trafikverket.se/tjanster/system-och-verktyg/Prognos--och-analysverktyg/Klimatkalkyl/>
- Vattenfall. (2017) *EPCC – Hur man praktiskt kan gå tillväga*. Hämtad 2020-06-08 från: <https://www.vattenfall.se/globalassets/foretag/tjanster/provning-och-certifiering/cementa-epcc-2017-05-16.pdf>
- WBCSD.(2020).Cemnet Sustainability Initiative.Hämtad 2020-03-25 från <https://www.wbcd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Cement-Sustainability-Initiative-CSI>
- Wongkeo, W., Thongsanitgarn, P., Poon, C. S., & Chaipanich, A. (2019). Heat of hydration of cement pastes containing high-volume fly ash and silica fume. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138(3), 2065–2075. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08641-7>
- Xie, J., Wang, J., Rao, R., Wang, C., & Fang, C. (2019). Effects of combined usage of GGBS and fly ash on workability and mechanical properties of alkali activated geopolymer concrete with recycled aggregate. *Composites Part B: Engineering*, 164(June 2018), 179–190. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.067>
- Yazici, H. (2008). The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 22(4), 456–462. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.002>
- Zhang, Q. F. (2014). A study on the optimal proportions of slag and fly ash in green concrete. *Applied Mechanics and Materials*, 443, 247–252. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.443.247>
- Zhang, Y., Zhang, J., Luo, W., Wang, J., Shi, J., Zhuang, H., & Wang, Y. (2019). Effect of compressive strength and chloride diffusion on life cycle CO<sub>2</sub> assessment of concrete containing supplementary cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, 218, 450–458. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.335>
- Årskog, V, Gjörv, O.E (2010) *Slag cements and frost resistance*. (Concrete under Severe Conditions) London. Taylor & Francis Group

**INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH  
SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA**

Göteborg, Sverige 2020  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



**CHALMERS**