KONSTRUKTIONS- & MATERIALTEKNISK OPTIMERING AV BETONG

MÖJLIGA MILJÖVINSTER

Tornerefelt, Hannes & Wong, Richard

16 mars 2021

Abstract

The greenhouse effect and the emission of greenhouse gases, namely carbon dioxide, is a global issue which today permeates alot of the societal consciousness and therefore also alot of the conducted research. The construction industry is not different in this regard. The construction sector in Sweden, for example, generates more than 12 million metric tonnes of carbon dioxide equivalents every year, this is around one fifth of all emissions in Sweden.

Concrete is the most common construction material in the world. Reasons for why concrete has taken this position in construction projects stem from, for example, its low cost, the global availability of raw materials and its durability. Despite all its positive characterstics concrete is, and especially the manufacturing of cement, one of the largest producers of greenhouse gases originating from the construction sector. Currently it's reported that cement production amounts to between 3 and 8 % of the global emissions of greenhouse gases. As urbanisation increases in third world countries, and with it the demand for cheap construction materials, studies have argued that the production of cement's share of global emissions can amount to as much as 30 % by 2050. Something will have to be done to stop this development.

Many research projects are currently operating with the intent of analyzing what possibilities there are to mitigate emissions from cement production. This master's thesis focuses on two possibilities: material technical, namely the substitution of portland cement with additives, and structural technical where, during design, larger importance is given to the reduction of concrete use. Another way of investigating CO_2-emission, that the industry has shown intrest in, is Carbon Capture Storage (CCS). This means that the carbon dioxide which is released during the firing of limestone amid cement production is collected and stored (for example in pockets in the bedrock under the sea).

The material technical part is studied through casting and strength testing of concrete composed of different constituents. The types of concretes that were chosen were one reference recipe only containing portland cement as binder, one which represents todays additives; concrete where 20 % of the cement has been substituted by blast furnace slag. In addition to this, two innovative types of concrete were chosen, which see limited use today. These were a concrete containing Calcium Sulfoaluminate ($C\bar{S}A$) cement and one containing cement composed of Limestone and Calcined Clay Cement (LCCC). The results showed that the properties of the two latter concretes, though different from one another, to a large degree displayed attributes that closely resembled that of the ordinary PC concrete and therefore also good opportunities for use.

During discussion with currently practicing consultants in design engineering it was brought up that concrete constructions are often oversized. This with regard to size and quality of concrete as a way to pass acoustics requirements as well as to reduce drying time of the concrete. The structural technical part therefore studies the floor

part of a reference project which, though it will not be named due to confidentiality, is taken from the real world. In this project the floors were constructed as partially prefabricated concrete slabs with casting. Different design alternatives were suggested and their respective reduction of cement was analyzed. These suggestions consist of a partially prefabricated concrete slab with less in-situ casting, T-beams and, to a lesser extent, pre-tensioned hollowcore slab. The results of the analyses showed that large improvements can be made to minimize the environmental impact of this part of a residencial building project. These solutions are currently associated with increased cost of the projects, for example as a result of longer construction times.

It is concluded that there exist many possibilities regarding reduction of emission of greenhouse gases from the construction sector, but that it might be associated with increased cost. There are today very limited incentives to reduce the amount of cement used during construction. It might be advantageous for legislative bodies to examine the effect of, for example, excise duty on cement.

Sammanfattning

Växthuseffekten och utsläpp av växthusgaser som bland annat koldioxid är ett globalt problem som idag genomsyrar mycket av det samhälleliga medvetandet och därför också den forskning som förs. Byggvetenskaperna är inte annorlunda i denna aspekt och sett till de utsläpp som denna sektor, byggsektorn, bidrar med varje år kan man förstå varför. Till exempel i Sverige står byggsektorn varje år för koldioxidutsläpp av drygt 12 miljoner ton koldioxidekvivalenter, detta är runt 1/5 av hela Sveriges utsläpp.

Betong är det vanligaste byggnadsmaterialet i världen och denna trend ser ut att öka snarare än minska de kommande åren. Anledningar till varför betong blivit så pass använt vid byggprojekt är bland annat dess låga konstnad, globala tillgång till råmaterial samt goda beständighet. Trots alla dess positiva egenskaper är betong, och speciellt tillverkning av det ingående cementet, en av de största källorna av växthusgasutsläpp för byggsektorn. I dagsläget presenteras siffror på att cementproduktion står för mellan 3 och 8 % av all världens utsläpp av växthusgaser. I takt med urbanisering av U-länder och det ökande behovet av billiga byggmaterial finns det studier som idag driver tesen att hela 30 % av all världens utsläpp kommer komma från cementproduktion 2050. Något måste därför göras för att hejda denna utveckling.

Många forskningsprojekt bedrivs idag för att undersöka vilka möjligheter som finns för minskning av utsläpp från cementtillverkning. Detta examensarbete fokuserar på två möjligheter: det materialtekniska, och i synnerhet utbyte av vanligt portlandcement mot tillsatsmaterial, samt det konstruktionstekniska, där projekteringsprocessen lägger större vikt vid att minimera cementanvändning. En ytterligare möjlighet, som många i branschen har visat intresse för, är Carbon Capture Storage (CCS). Detta innebär att den koldioxid som släpps ut vid förbränning av kalksten vid cementproduktion samlas in och lagras (till exempel i bergfickor under havets botten).

Den materialtekniska delen studeras genom gjutning och hållfasthetstestning av betonger med olika beståndsdelar. Det som valdes var ett referensrecept endast bestående av portlandcement som bindemedel, ett recept som representerar dagens tillsatsmaterial; betong där 20 % av cementet ersätts av slagg. Utöver detta valdes även två nyskapande betonger som idag används i begränsad omfattning, ett bestående av Kalciumsulfoaluminatcement ($C\bar{S}A$) och ett bestående av kalksten och kalcinerad lera (LCCC). Resultaten visade att egenskaperna för de två sistnämnda betongerna, dock annorlunda inbördes, till stor del visade likheter med dagens betonger och därför också goda möjligheter för användning.

Vid diskussion med konsulter inom konstruktionsteknik kom det på tal att betongkonstruktioner ofta överdimensioneras som ett billigt sätt att klara av krav på akustik samt att stora mängder cement används för att förkorta uttorkningstider. Därför studerades mellanbjälklaget i ett referensprojekt som, även om det inte kommer att nämnas vilket på grund av sekretess, är ett verkligt projekt. Avsikten var att reducera cementmängden som används. Bjälklaget var utformat som ett plattbärlag

med pågjutning. Olika alternativ för utformning föreslogs och dess effekt på mängd använd cement utreddes. Dessa innefattar plattbärlag med mindre pågjutning, TT-kassett samt förspänt håldäck. Resultaten från denna del visade att det finns stora förbättringar som kan göras för att minimera miljöpåverkan från byggprojekt. Dessa lösningar är idag dock associerade med förhöjda kostnader, bland annat på grund av förlängda byggtider.

Slutsatserna som drogs var att det finns stora möjligheter att minska utsläppen som byggsektorn idag genererar men att det kan vara förknippat med höga kostnader. Det finns idag mycket begränsade incitament till att försöka minska den cementmängd som används och det kan vara fördelaktigt för lagstiftande organ att undersöka effekter av punktskatter på, till exempel, cement.

Förord

Denna rapport är resultatet av examensarbetet som utförts under 30 veckor höstterminen 2020, detta i samarbete med avdelningen för Konstruktionsteknik på Lunds Tekniska Högskola och PE Teknik & Arkitektur. Examensarbetet har skrivits av Hannes Tornerefelt och Richard Wong och är slutmomentet för vår Civilingenjörsutbildning inom Väg- och Vattenbyggnad med inriktning konstruktionsteknik.

Vi vill börja med att rikta ett stort tack till våra handledare Jonas Niklewski och Lars Wadsö. De har alltid funnits tillgängliga för frågor och svar inom konstruktionsteknik och materialteknik respektive och även för ovärderlig vägledning genom arbetet. Vi vill även tacka PE Teknik & Arkitektur och speciellt Johan Jönsson och Anders Lagerås som kom med ursprungsidén och sedan stöttat oss genom arbetet med både vägledning och materiel. Ett stort tack till våra familjer och vänner för den energi som de gett under denna speciella period. Även tack till de andra i branschen som bidragit med sin expertis under arbetets gång, Paul Sandberg, Peter Weywadt och Nilla Olsson.

Slutligen vill vi även tacka Adam, Evelina och Martin för en trevlig höst ihop och för många timmar av givande kortspel.

Innehåll

Abstract **I**

Sammanfattning **III**

Förord **V**

Innehåll **IX**

1 Inledning **1**

1.1 Miljö 2

1.2 Syfte och frågeställning 4

1.3 Avgränsningar 5

1.4 Allmänt 5

1.4.1 Tillverkning av cement 5

1.4.2 Återvunnen betong 6

1.4.3 Karbonatisering av cement och betong 6

1.5 Betong 7

1.5.1 Tillverkning och härdning 7

1.5.1.1 Värmeutveckling (Kalorimetri) 8

1.5.2 Uttorkning 9

1.5.3 Tillsatsmaterial 10

1.5.3.1 Påverkan på egenskaper 10

1.5.3.2 Flygaska 11

1.5.3.3 Masugnsslagg 12

1.5.3.4 Problem med dagens tillsatsmaterial 13

1.5.3.5 Alternativa cement 14
1.6 Betong som konstruktionsmaterial 17
1.6.1 Hållfasthet 18

2 Mätning **23**

2.1 Metod 23
2.1.1 Tillverkning och tryckprovning av betong enligt standard 23
2.2 Betonggjutning 24
2.3 Hållfasthetsmätning 26
2.4 Kalorimetri 28

3 Mätresultat **29**

3.1 Hållfasthet 29
3.2 Kalorimetri 29

4 Analys & diskussion: mätning **31**

4.1 Branschstandard (A) 31
4.2 Betong med slagg (B) 31
4.3 C$\bar{S}$A (C) 31
4.4 LCCC (D) 32
4.5 Jämförelse 32
4.5.1 Praktisk tillämpning 34
4.6 Kalorimeteri 35

5 Beräkning **37**

5.1 Referensprojekt 37
5.1.1 Förslag 38
5.2 Metod 38
5.2.1 Koldioxidekvivalenter 39

5.2.2 Laster 40
5.2.3 Geometriska beräkningar för TT-kassett 40
5.2.4 Brottgränstillstånd, ULS 41
5.2.5 Bruksgränstillstånd, SLS 43
5.2.6 Parameterstudie 46

6 Beräkningsresultat **47**

6.1 Alternativ: Plattbärlag 47
6.1.1 Parameterstudie 48
6.2 Alternativ: TT-kassett 49
6.2.1 Parameterstudie 50

7 Analys & diskussion: beräkningar **53**

7.1 Beräkningar 53
7.1.1 Plattbärlag 53
7.1.2 TT-kassett 54
7.1.3 Förspänt håldäck 56
7.1.4 Jämförelse 56

8 Slutsats **59**

8.1 Framtida studier 60

Litteratur **63**

1 Inledning

Betong är ett av våra viktigaste byggnadsmaterial, det används mestadels till stommaterial i konstruktioner. De egenskaper som betong kännetecknas av är bland annat god beständighet, formbarhet och hållfasthet. Några exempel på konstruktioner där betong vanligen förekommer är husgrunder, fasader, mellanbjälklag, industrigolv, vägar och broar.

Betongliknande material har funnits i flera hundra år före vår tideräknings början, det användes då till konstruktioner som t.ex akvedukter, vattencisterner, bostadshus, broar och hamnar. Än idag finns det kvar betongkonstruktioner från antiken, ett exempel är den unika ”Pantheon” i Rom som har en enorm kupol med spännvidd på 45m. Det är också från de romerska orden för deras betongliknande material “concretum” (jämför med engelskans concrete) och de tillverkade byggnadsverken “opus cæmentitium” som dagens terminologi härrör. Från gamla bevarade texter (se: Vitruvius - De architectura, libri decem) vet vi ungefär vilka material romarna använde till sin “concretum”. Detta var i huvudsak släckt kalk och olika amorfa kiselsyror. En stor källa till dessa amorfa kiselsyror var för romarna den italienska halvön Puzzuoli, och idag kallas dessa typer av material just “puzzolaner” efter denna halvö. Exempel på puzzolaner är vulkanisk sand, aska samt tegelmjöl [1].

Figur 1.1: Pantheon i Rom

Dagens betong består av tre huvudsakliga beståndsdelar, cement, vatten och ballast (sten, grus, och sand). Utöver dessa kan även tillsatsmedel och tillsatsmaterial användas för att till exempel förändra betongens egenskaper eller, som kommer att

vara en stor del av detta arbete, för att minska betongens miljöpåverkan. Då cement och vatten blandas bildas en cementpasta som fungerar som ett hydrauliskt bindemedel (hårdnar vid reaktion med vatten till ett material som är vattenbeständigt) i betongen, vilken håller samman ballasten, eftersom cementens hållfasthet normalt är lägre än ballastens så beror betongens konstruktionstekniska egenskaper till stor del på cementet. Cementets egenskaper i sin tur är mycket sammanhängande med cementens vattencementtal, vct, vilken beskriver förhållandet mellan mängden vatten och mängden cement i en cementpasta [1].

En av betongens största styrkor som konstruktionsmaterial är dess relativt låga kostnad. Cementbaserade byggmaterial uppvisar egentligen inga lysande konstruktionstekniska egenskaper, jämfört med till exempel stål. Trots detta, på grund av dess låga produktionskostnad, så produceras idag mer än 1 kubikmeter betong per person på jorden varje år. Försök till ytterligare utveckling av betong för att förbättra dess konstruktionstekniska egenskaper har lett till att kostnaden att producera sådan betong kan jämföras med kostnaden att producera stål trots att egenskaperna ändå inte är jämförbara [2].

1.1 Miljö

2015 startade, på regeringens initiativ, plattformen "Fossilfritt Sverige" med målet att Sverige ska vara världsledande i jakten på att bli ett fossilfritt välfärdsland. Som resultat av detta tog "Svensk betong" 2017 fram rapporten "Betong och klimat" som, för att citera förordet i denna rapport, syftar till:

"... att redovisa det arbete som svensk betongindustri genomför just nu avseende klimatförbättringar. I rapporten redovisas fakta om betongs klimatpåverkan och betongbranschens målsättning. Rapporten innehåller också sammanfattande information om betongs innehåll, egenskaper, funktion och livslängd samt långsiktig hållbarhet ur ett livscykelperspektiv."

Svensk Betong är en branschorganisation för företag som tillverkar fabriksbetong, utövar betongpumpning samt företag som tillverkar och/eller monterar betongprodukter [3]. Efter 2017 har arbetet med att minska betongens miljöpåverkan fortskridit och Svensk betong har nu publicerat rapporten "Klimatförbättrad betong". I denna rapport presenterar de 3 olika steg av klimatförbättrad betong jämfört med godtycklig branschstandard för olika konstruktionsdelar. De tre stegen delas in i procentuell minskning (10, 25, 40) av koldioxidutsläpp i förhållande till branschreferens. Hur dessa minskningar ska uppnås specificeras dock inte men det nämns till exempel att 10 % minskning kan uppnås med hjälp av "optimerad bindemedelssammansättning" medan 40 % minskning "ställer höga krav på samverkan mellan beställare, konstruktör, betongleverantör och entreprenör..." [4].

Det finns många olika funktionskrav som man som konstruktör och byggherre behöver förhålla sig till, till exempel krav på akustik, brandskyddskrav samt krav på tillfredställande innertakshöjd. Ofta när byggnader med betongstomme byggs idag används betongens tvärsnitt inte bara som bärande element, då tillräckligt stort tvärsnitt väljs

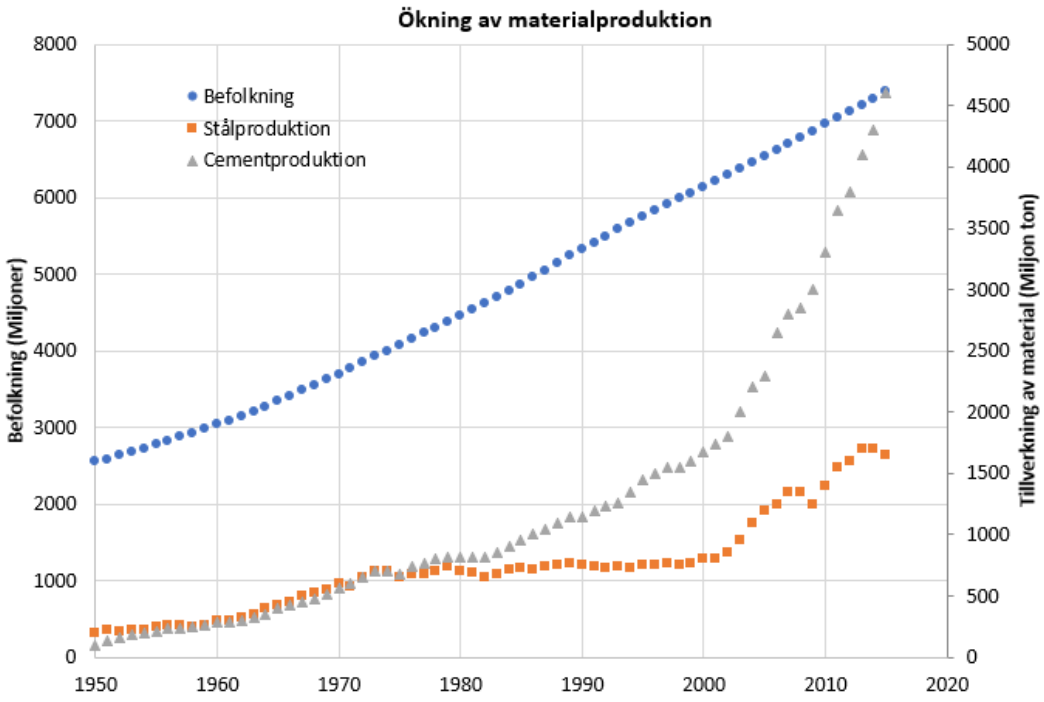
kommer även krav på akustik och brandskydd att uppfyllas. För brandskydd verkar detta vara relativt enkelt att uppnå. Enligt SIS krävs ett betongbjälklag med tjockleken 175 mm för att uppnå högsta brandskyddskravet (REI240) vilket i sammanhanget inte är speciellt tjockt [5]. För ljudisolering följer att mer massa ger bättre ljudisolering och intuitivt följer att ett större tvärsnitt ger större massa [6]. På Svensk Betongs hemsida kan det till exempel läsas i avsnittet för ljud att "Betong är ett tungt och styvt material med goda ljudegenskaper" [7]. Kopplat till citatet från föregående stycke finns det här kanske utrymme för andra lösningar för att uppnå krav på akustik, utan att använda överdimensionerade betongtvärsnitt. Detta ställer visserligen högre krav på samverkan än det idag generellt gör i detta avseende. För att uppnå tillräcklig ljudisolering hade beklädnader istället kunnat användas än endast ett stort betongtvärsnitt. Varför detta hade varit fördelaktigt att uppnå nedan.

Tillverkning av betong är en stor källa till utsläpp av koldioxidekvivalenter i dagens samhälle. 2017 stod Bygg- och fastighetssektorn i Sverige för utsläpp av cirka 12,2 miljoner ton koldioxidekvivalenter, detta är cirka 20 % av hela Sveriges utsläpp det året. I denna siffra räknades endast inhemska utsläpp med, alltså saknas utsläppen för allt importerat material vilka uppgick till nästan 6 miljoner koldioxidekvivalenter [8]. Vid livscykelanalys av betong uppskattas cementtillverkningen stå för uppemot 80 % av betongens "utsläpp" av koldioxidekvivalenter [9]. Trenderna ser liknande ut på andra platser i världen och av hela världens totala utsläpp av växthusgaser uppger vissa källor att cementtillverkningen står för cirka 4 % [10] medan andra påstår att det kan vara så mycket som 5 - 8 % [2]. Under de senaste 65 åren har cementproduktionen ökat mer än 30-faldigt medan produktionen av råstål endast ökat trefaldigt och träanvändningen har varit relativt oförändrad [11]. Efterfrågan på betong antas fortsätta öka till 2050 för att sedan minska, detta på grund av den förutspådda stabiliseringen av världsbefolkningen [12]. Om betongefterfrågan ökar i förutspådd takt och produktionen av cement förblir oförändrad kan så mycket som 30 % av världens alla utsläpp 2050 komma från cementproduktion [11].

2009 föreslog International energy authority (IEA) att den huvudsakliga lösningen för att mitigera utsläppen av växthusgaser borde vara insamling och förvaring av koldioxid (CO_2 capture and storage, CCS) [11]. Teknologin har forskats på och utvecklats sen dess, men finns inte på industriell skala idag, även om tester har utförts på fabriker för cementproduktion [13]. Trots detta är teknologin fortfarande i sin linda och därför både kostsam och energikrävande. Andra metoder för att minska utsläppen av växthusgaser bör därför undersökas då ingen tillräcklig uppskattning på hur stora miljövinster som kan göras med denna typ av teknologi finns att tillgå [11].

På grund av skenande energipriser under oljekrisen på 1970-talet är de ugnar som idag används för förbränning av råmaterial, på industriell skala, inom cementproduktion några av världens mest effektiva termiska maskiner. Det finns således begränsad möjlighet att förbättra deras energieffektivitet ytterligare, miljövinster måste alltså göras under andra skeden av produktionen. Vidare är de flesta cementtillverkningsfabriker flexibla med sin energikälla och återvunna material står för en stor del av förbränningen i Europa, ett exempel på detta är att hälften av alla återvunna däck i Europa, 1.3 miljoner, 2013 gick till klinkerförbränning för cementproduktion [12].

De två sätt som föreslås för att substantiellt minska koldioxidutsläpp relaterat till



Figur 1.2: Ökning av cementproduktion kontra stålproduktion från 1950, data från [11]

betong som konstruktionsmaterial är att byta ut portlandcementet mot olika tillsatsmaterial och att optimera cementmängden i betongen. Betong som blandas på plats vid ett bygge är påvisat mycket mer ineffektivt än det som produceras vid storskaliga fabriker. Studier har visat att cementhalten kan skilja med en faktor tre utan att påverka betongens prestanda. Effektivisering på detta område kan leda till så höga koldioxidreduktioner som 50 % [12]. Som uppföljning på IEAs rapport från 2009 så tillsatte UNEP-SBCI (United Nations Environment Programme - Sustainable Buildings and Climate Initiative) en arbetsgrupp 2015 för att utreda vilka miljömässiga vinster som kan göras genom andra materiallösningar, fler än 20 världsledande experter på området deltog som del av denna arbetsgrupp [11]. Resultat från denna arbetsgrupp, rådande forskning samt annan relaterad information presenteras mer ingående i kapitel 1.5.3, ”Tillsatsmaterial”.

1.2 Syfte och frågeställning

Syftet med examensarbetet, med bakgrund av det som presenteras i kapitel 1.1, är att optimera användandet av betong på ett material- och konstruktionsteknisk sätt. Ur det materialtekniska perspektivet kommer det studeras om det finns andra cementalternativ som ger lägre miljöpåverkan men ger liknande egenskaper som de betonger som produceras idag. Den konstruktionstekniska delen består av analys och optimering av en konstruktionsdel för att se om det går att minska användandet av cement.

De frågeställningar som kommer att behandlas i arbetet är följande:

- Finns det mer miljövänliga alternativa bindemedel som kan användas i framtiden,

i så fall hur är egenskaperna hos dessa alternativ?

- Går det att minska på användandet av cement i bjälklag om man bortser från krav på till exempel tid och akustik?

1.3 Avgränsningar

Ur miljöteknisk synpunkt analyseras endast hållfastheten, aspekter som beständighet utreds ej. För den konstruktionstekniska analysen föreslås alternativen utan hänsyn till rimlighet ur ett tidsperspektiv, detta diskuteras istället senare.

1.4 Allmänt

1.4.1 Tillverkning av cement

Cement är kemiskt uppbyggt av olika typer av kalciumsilikater, till exempel alit (C_3S), belit (C_2S), trikalciumalumit (C_3Al) och trikalciumaluferrit (C_3AF). Dessa kalciumsilikater erhålls genom kalcinering av olika mängder kalksten, lera, gips samt eventuella tillsatsmaterial beroende på vilken typ av cement som efterfrågas [14]. Kalcinering kallas den process då flyktiga ämnen avgår genom uppvärmning av oorganiska material. Processen är vanlig vid framställning av olika typer av oxidkeramik men den mest klassiska av dessa processer är just sönderfallet av kalciumkarbonat, även kallat kalksten, till kalciumoxid (CaO). Denna process frigör restprodukten koldioxid (CO_2) vilket är en välkänd växthusgas [15].

Kalksten är den huvudsakliga råvaran vid framställning av cement och även den som står för de största utsläppen av växthusgaser för betong som helhet. Processen för att tillverka cement följer förenklat de tre stegen:

- Brytning av råmaterial - detta är ofta i nära anslutning till cementfabriken för att minimera transportkostnader
- Tillverkning av cementklinker genom förbränning - råmaterialen krossas och blandas till ett mycket fint pulver. Pulvret passerar sedan genom en ugn som värmer det till cirka 1450 °C. Under denna uppvärmning avår CO_2, materialet reagerar och bildar små kulor/klumpar (genom sintring), dessa kallas för cementklinker
- Cement blir till genom malning - cementklinkern mals ner till ett fint pulver (cirka 300 - 1000 m^2/kg). Man tillsätter även ca 5 % kalciumsulfat för att hålla hydratationsprocessen under kontroll, nu kan även andra tillsatsmedel/material blandas in.

Det är under förbränningen som kalcinering pågår i kalkstenen och alltså då stora mängder koldioxid släpps ut [14]. Cirka 60 % av utsläppen som cementproduktion

genererar kommer från kalkstenens kalcinering, och resterande kommer från bränslena vid själva förbränningsprocessen [16].

Cembureau specificerar i en EPD (Environmental Product Declaration) för cementtillverkning i Europa att man, för cement av kvalité CEM I, bör räkna med 803 kg koldioxidekvivalenter för varje ton cement som man tillverkar. Praktiskt taget 100 % av denna vikt är på grund av förbränning av fossila bränslen, endast 0,24 kg kommer från biogena bränslen [17]. Ibland ger även individuella cementproducenter EPDs (Miljövarudeklaration - Environmental Product Declaration) på sina produkter, bland annat Cementa (en svensk cementproducent som ingår i Heidelbergkoncernen) som rapporterar att deras "Byggcement" som är av typ CEM II bidrar med 759 kg koldioxidekvivalenter per ton [18]. En anledning till att detta värde är lägre än det som Cembureau föreslår är att det i en cement av typ CEM II kan tillåtas upp till 35 % tillsatsmaterial enligt SIS vilka förmodligen har lägre miljöpåverkan än portlandcement, PC [19].

1.4.2 Återvunnen betong

Ett sätt att reducera miljöpåverkan vid betongproduktion, som används i varierande grad, är att byta ut en del av ballasten i betongen till återvunnen betong. Återvunnen betong "tillverkas" på sådant sätt att redan hårdnad betong mals ner för att sedan fungera som den nya ballasten då man tillverkar ny betong. Utöver den ursprungliga ballasten består alltså återvunnen betong också till viss del av överblivet murbruk/cement [14]. Den återvunna betongen klassas på två olika sätt, rest-/spillbetong och rivningsbetong. Rest-/spillbetong är överbliven betong vid betongtillverkning som låtits hårdna för att sedan malas ner till ny ballast. Denna betong anses vara fri från miljöbelastande ämnen. Rivningsbetong är sådan som fungerat som byggnadsmaterial i en konstruktion. På grund av detta kan det finnas spår av andra ämnen och material än endast cement och ballast, exempel kan vara isolering, skumplast och elinstallationer. Detta måste tas hänsyn till då man väljer var denna typ av återvunnen betong ska återanvändas med avseende på bland annat hållfasthet då denna kan vara något försämrad [20].

1.4.3 Karbonatisering av cement och betong

Under sin livslängd pågår en kontinuerlig kemisk process i den härdande cementpastan och betong kallad karbonatisering. Detta innebär, praktiskt taget, att en del av den koldioxid som avgått vid kalcinering av kalksten under cementenproduktionen åter binds i materialet. Precis som att kalcinering innebär att kalciumkarbonat ($CaCO_3$) övergår i kalciumoxid (CaO) och koldioxid (CO_2) avgår så innebär karbonatiseringen det motsatta, koldioxid binds från luften och kalciumoxid övergår till kalciumkarbonat [1].

I teorin kan denna process beräknas som en miljövinst, men i vilken utsträckning är omdiskuterat. Miljövinsten som kan göras kan aldrig bli större än det som släpptes ut vid tillverkning, då mer koldioxid än det som avgått under produktion inte kan bindas. I teorin kan dock all denna koldioxid återupptas men beroende på olika förutsättningar

kan denna process ibland vara mycket långsam. Att fullt karbonatisera en 200 mm tjock betongstruktur kan ta upp emot 2 500 år. Om detta är bra eller dåligt är också en fråga om perspektiv, då när denna "karbonatiseringsfront" når armeringen börjar denna korrodera (då stål används), vilket kan leda till större negativa effekter, både ekonomiskt och miljömässigt, än det man tjänar på karbonatiseringen.

Studier från Sverige har påvisat att alla befintliga betongkonstruktioner med möjlighet att karbonatisera årligen upptar cirka 17 % av den koldioxid som cementproduktionen i Sverige släpper ut under ett godtyckligt år. Detta motsvarar cirka 300 000 ton koldioxid som binds från atmosfären. Referensåret vid dessa undersökningar var 2011 och krossad betong som tidigare varit del av en konstruktion var inte inkluderad i denna beräkning [21].

1.5 Betong

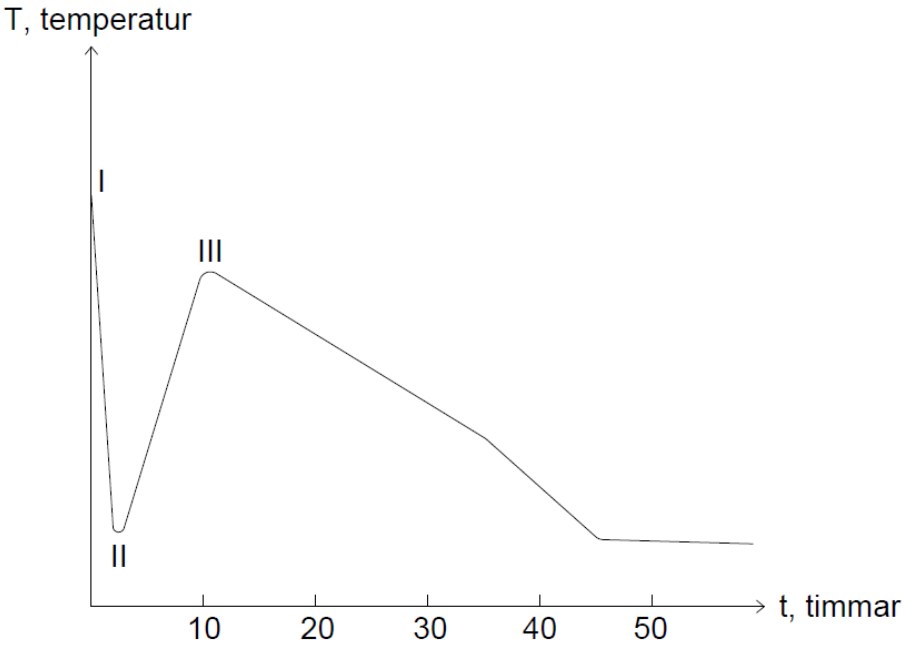
1.5.1 Tillverkning och härdning

Då vatten tillsätts till ballasten och cementpulvret påbörjas en hydratationsprocess. Omedelbart när vattnet tillsätts börjar de mest reaktiva ämnena i cementpulvret att reagera med vattnet, detta är generellt aluminaterna (C_3A). De bildar tillsammans med vattnet en typ av gel med högt aluminiuminnehåll. Gelen reagerar i sin tur med olika sulfater vilka bildar stavliknande kristaller av ettringit. Denna process är exoterm, det vill säga den genererar värme, dock varar den endast en kort tid (någon enstaka timme). Detta kallas fas 1 och betongen betecknas som "färsk betong" [22].

Denna första reaktion följs upp av en period på ett par timmar under vilken värmeutvecklingen i betongmassan är låg, detta kallas fas 2 och betongen kallas för "ung betong" under denna process. Betongens tillstyvning börjar under denna fas. Det är också därför det under den första halvan av denna reaktion som betongmassan bäst lämpar sig för läggas. Betongen är då fortfarande arbetsbar, men under andra halvan av denna process kommer betongen att styvna avsevärt och det blir då svårare att få ut betongen i önskad form [22]. Under denna fas är betongen känslig för uttorkning, temperaturpåverkan och belastning [1].

I slutet av fas 2 börjar aliten och beliten att reagera, från denna reaktion bildas kalciumkiselhydrat (kallad C-S-H) och kalciumhydroxid, CH (också kallad portlandit). Denna process fortsätter sedan in i fas 3 då betongens hållfasthet fortsätter att öka. Denna process tar flera dygn, riktvärdet i Eurocode för betongens hållfasthet är den som erhållits efter 28 dygn. Betongen har då nästan uppnått 100 % av sin sluthållfasthet, trots detta fortsätter hydratationsprocesserna i upp till ett år eller mer efter vattnets inblandning [22].

I figur 1.3 kan den reagerande betongens värmeutveckling ses under det första 2-3 dagarna. Som kan ses är det initialt vid inblandning av vatten i cementpulvret och ballasten samt i början av fas 3 som värmeutveckling är som störst. Denna värmeutveckling kan både vara positiv och negativ beroende på förutsättningarna för byggandet. Då betong gjuts under kalla förhållanden kan värmeutvecklingen bidra till att hålla den



Figur 1.3: Karakteristisk värmeutveckling i betong under de första dygnen, data från [22]

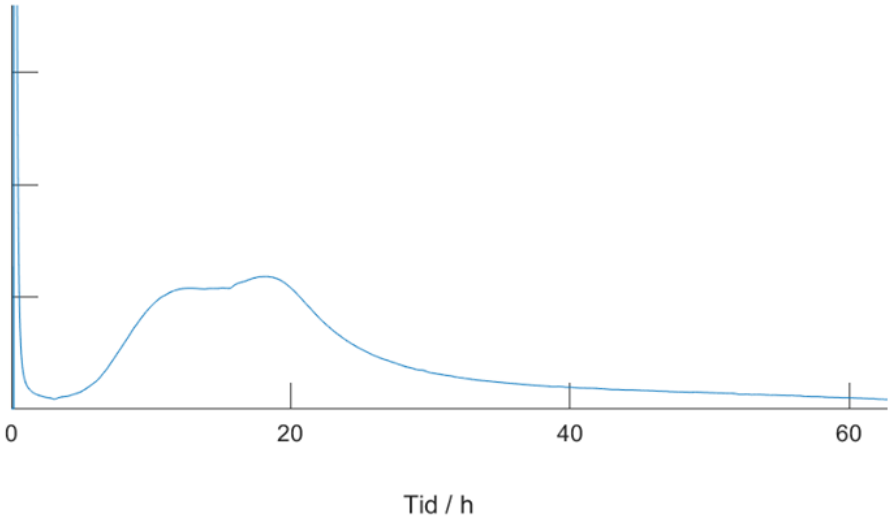
nygjutna betongen över fryspunkten medan gjutning av grova konstruktioner med hög cementhalt kan leda till så höga temperaturer att det finns risk för sprickbildning under betongens avsvalnande [1]. Även då konstruktionen gjuts i form, och det därför inte finns möjlighet för temperaturbetingade rörelser, så kan sprickor uppträda då denna värmeutveckling fortgår. Dessa sprickor propagerar genomgående tvärs genom konstruktionen [23].

Då man undersöker den exoterma reaktion som sker i betongen och tittar på hur mycket energi som betongen avger så får man en kurva vilken till stor del liknar den som erhålls då man undersöker betongens temperatur. En stor skillnad är dock att betongen påvisar två toppar under ”fas III” snarare än en. Av dessa två pucklar kännetecknar den första då silikaterna (som beskrivs i kapitel 1.4.1) når sin reaktionstopp och den andra då de närvarande sulfaterna förbrukats. Detta kan ses i figur 1.4 [24]. Undersökning av avgiven energi från denna reaktion görs genom kalorimetri vilken beskrivs i kapitel 1.5.1.1.

1.5.1.1 Värmeutveckling (Kalorimetri)

Kalorimetri är en analysmetod som kan användas för att undersöka och jämföra hydratationsprocessen i olika cement. Det finns 3 huvudsakliga sätt att mäta med kalorimetri på cementbaserade produkter:

- Adiabatisk/Semi-adiabatisk kalorimeter - Temperaturenökningen mäts i ett isolerat prov av bruk eller betong
- Lösningskalorimeter - Total värme under hydratationsprocessen bestäms genom att lösa cement och hydratiserad cementpasta i starka syror



Figur 1.4: Karakteristisk energiproduktion i betong under de första dygnen, överensstämmer med teori från [24]

- Isoterm kalorimeter - Värmeutvecklingen mäts kontinuerligt i små prov av bruk eller betong vilka hålls vid konstant temperatur

Av dessa är den isoterma den mest mångsidiga och denna typ av kalometri används även inom många andra industrier idag [25].

Kalorimeterimätningar på cement kan ge information om hur snabbt och hur mycket en viss typ av cement hydratiserar efter kontakt med vatten och kan därför ge ett svar på vilken värmeutveckling man kan förvänta sig då man gjuter betong av en godtycklig cementpasta. Utöver detta kan även hållfasthetsutvecklingen, till viss del, approximeras [25].

1.5.2 Uttorkning

Betongkvalitén till stomsystemet för de flesta bostadshus och kontorshus dimensioneras oftast av uttorkningstiden. I de flesta byggprojekten är det tidplanen som avgör hur lång uttorkningstiden kan vara och till exempel måste betongen vara tillräcklig torr för valet av material som ska appliceras på golvet [26]. Byggfukt i betong förekommer i tidigt skede då betongen gjuts men även då betongen utsätts för t.ex. regn eller en vattenskada.

Fukt transporteras genom konvektion, diffusion och kapillärt. Konvektion innebär att när luft förflyttas så följer vattenmolekylerna med vilket ger en fukttransport genom luft. Diffusion innebär att vattenmolekyler förflyttar sig från områden med hög ånghalt till områden med låg ånghalt. Kapillärt flöde uppstår som resultat av kapillärkraften vilken uppstår i smala rör (kapillärer) som resultat av adhesion och kohesion. Beräkningar för uttorkning är komplicerade eftersom det är ett icke stationärt förlopp där transportkoefficienter varierar med fukthalten. Det går att utföra beräkningar med datorprogram men det finns även förenklade metoder som kan användas. De förenklade metoderna är uppskattningar som då inte ger exakta värden.

Dessa delas in i två grupper där ena beräknar ut med avseende på att materialens porstruktur inte ändras med tiden och den andra är då när porstrukturen i material förändras med tiden vilket även gör att fuktegenskaper ändras [1].

1.5.3 Tillsatsmaterial

Tillsatsmaterial och tillsatsmedel kan tillsättas istället för cement i betong för att förändra betongens egenskaper och/eller för att minska den miljöpåverkan som tillverkning av cement medför, detta arbete kommer att beröra tillsatsmaterialen i allmänhet och flygaska (FA, Fly ash), masugnsslagg (GGBS, Ground-granulated blast-furnace slag) samt kalksten och kalcinerad lera (LCCC) i synnerhet. Utöver detta berörs även Kalcium-sulfoaluminatcement ($C\bar{S}A$) vilket är en typ av cement där PC inte används. På engelska heter tillsatsmaterial i betong "supplementary cementitious materials" eller SCM, denna förkortning förekommer även i detta arbete. Den europeiska kommitén för standardisering klassificerar SCM inom två huvudkategorier (EN-206+A1).

- Typ 1: I praktiken inerta tillsatser
- Typ 2: Reaktiva puzzolaner eller hydrauliska material

Typ 1 SCM fungerar, som det låter, på det sättet att det inte bidrar till reaktionen mellan cement och vatten, exempel på typ 1 SCM är till exempel kalkstenspulver. Detta kan dock ha andra effekter. Studier har exempelvis påvisat att kalkstenspulver förbättrar betongens packningsgrad vilket kan leda till positiva effekter såsom minskad vatteninträngning [27]. Kalkstenspulver är inte en restprodukt utan produceras för ändamålet att, bland annat, användas i cement. Denna SCM är således inte klimatneutral utan kräver energi för att tillverkas, dock finns det exempel på typ 1 SCM som är klimatneutrala restprodukter från bland annat granit- och marmorindustri. Typ 2 SCM består av naturliga puzzolaner, exempel på dessa är flygaska, vulkaniska askor, kiseldioxid samt masugnsslagg. Tillsatsmaterial från denna grupp reagerar på liknande sätt som portlandcement i närvaro av cement och vatten [14].

1.5.3.1 Påverkan på egenskaper

Betongens egenskaper består som tidigare nämnt till stor del av förhållandet mellan vatten och cement, betongens vct. Betongens hållfasthet utvecklas under cementets hydratationsprocess vilken inleds då vatten tillsätts till cementpulver. Under denna process så ordnar cementpartiklarna sig i svaga strukturer vilka är omgivna av vatten. Ju mer vatten som blandas i (ger högre vct) desto längre mellan dessa cementpartiklar är det. När vattnet sedan avdunstar lämnas ytorna mellan cementpartiklarna tomma. Detta ger en betong som är mindre tät och som har lägre hållfasthet [28].

Då tillsatsmaterial tillsätts vid tillverkning av betong är bestämning av dess vct inte längre helt enkel. Dessa tillsatser kan påverka hydratationsprocessen och ge missvisande siffror om samma formel används för bestämning av betongens vct. Ett exempel

på hur man tar hänsyn till dessa effekter är att introducera ett "effektivt" vattencementtal, vct_{eff}, vilket numera är implementerat i Eurocode. Denna formel ser ut på följande vis:

$$vct_{eff} = \frac{v}{(c + k * \mathrm{SCM})} \tag{1.1}$$

Cementationseffektiviteten, k, betecknar här i vilken utsträckning tillsatsmaterialet bidrar till hållfasthetsutvecklingen i betongen [29]. Det brukar bestämmas genom tester på tryckhållfasthet för betongen, men andra kriterier används ibland till exempel karbonatisering och permeabilitet [30]. I Europa ligger värdet för flygaska vanligtvis mellan 0,2 och 0,4 då man använder det i konstruktionsbetong [30]. SIS (Svenska Institutet för Standarder) ger ett k-värde endast beroende på i vilken typ av betong tillsatsmaterialet ska användas, för cement av klass CEMI och CEMII är detta värde satt till 0,4 [31]. I verkligheten är det många olika aspekter som spelar in för vilket k-värde tillsatsmaterialet faktiskt har. För flygaskan spelar fysiska egenskaper som partikelstorlek och form samt distribution roll men också kemiska aspekter som glasinnehåll. Även cementets fysiska och kemiska egenskaper spelar roll för flygaskans slutliga k-värde, även här spelar partikelstorlek och form roll men även aspekter som alkaliinnehåll har effekt. På grund av detta kan inte en godtycklig typ av flygaskas k-värde bestämmas direkt utan den beror också på vilken typ av cement som används [30]. För masugnsslagg specificerar SIS att k-värdet bör ansättas till 0,6 samt att förhållandet mellan slagg och övrigt cement inte bör överskrida 1. Då så ändå är fallet får det slagg som överskrider 1:1 förhållandet inte räknas in vid beräkning av erforderligt vct enligt ekvation 1.1. Då cementrecept vanligtvis görs per kilo så kommer tillsättandet av tillsatsmaterial att påverka fler egenskaper än man kanske tror. Om 40 kilo cementpulver ska bytas ut mot ett tillsatsmaterial, i ett betongrecept på 1000 kilo, med ett k-värde på 0,4 så måste 100 kilo tillsatsmaterial tillsättas för att samma cementationseffektivitet ska uppnås. Detta betyder att andra beståndsdelar som, till exempel, ballasten eller vattnet också måste bytas ut för att "rymma" tillsatsmaterialet. Detta kan då ge relativt stora effekter på den färdiga betongens egenskaper [31].

1.5.3.2 Flygaska

Flygaska är en restprodukt, innehållande bland annat kiseloxid och aluminiumoxid [32], från kolkraftverk och värmeverk där mycket av tillsatsmaterialet går på deponi [33]. Idag används flygaska för att ersätta en del av cementen, detta för att minska miljöpåverkan då tillverkningen av cement är en stor källa för utsläpp av växthusgaser. Enligt siffror från USA är det drygt 1/3 av all producerad flygaska som används som substitut i portlandcement. 2017 uppgick detta till 12,8 miljoner ton flygaska som gavs ett ytterligare syfte än som bara fyllnadsmaterial [34]. En stor anledning till att flygaska inte används i större utsträckning är att möjligheten att göra det till stor del beror på flygaskans kvalité, vilken kan vara mycket skiftande. Det finns potential för att öka användningen av flygaskan, men då krävs bättre karaktärisering och klassificering [11].

Då länder som Kina och Indien fortfarande är mycket beroende av sina kolkraftverk antas inte produktionen av flygaska att minska inom de närmsta 30 åren, dock om efterfrågan ökar inhemskt i dessa länder kan priset på flygaska bli för högt för att kunna användas i någon vidare utsträckning endast för sina miljömässiga vinster [14]. Nordamerika är också en stor producent av flygaska, men på grund av upptäckter av skiffergasfyndigheter kan produktionen av flygaska här komma att minskas [11]. Cement med tillsatt flygaska erhåller ett antal förändrade egenskaper utöver den klimatmässiga vinsten som görs. De effekter som får klassas som positiva är förbättrad arbetbarhet, minskad vattenåtgång samt förbättrad sammanhållning. De negativa inkluderar, bland annat, förlängd torktid och därför också förlängd hållfasthetsutveckling [14].

Proceduren att tillsätta flygaska vid betongtillverkning som substitut till vanligt portlandcement är en teknik med gamla anor. Redan 1942 finns dokumentation att flygaskinblandad cement användes vid reperationer av Hooverdammen, byggd i Coloradofloden på gränsen mellan Nevada och Arizona i USA. 10 år senare stod Hungry Horsedammen klar i Montana USA och enligt dokumentation ska 35 % av portlandcementet som användes ha varit substituerat med flygaska [35].

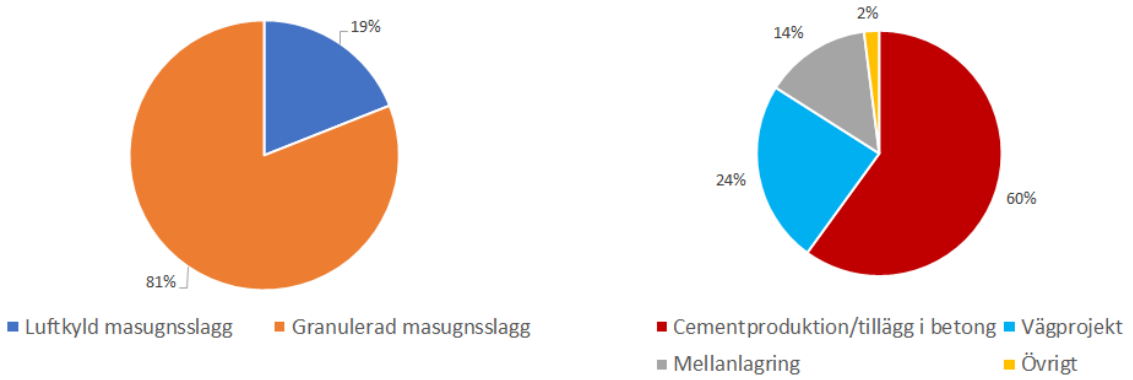
Tillsatsmaterialet har likt cement puzzolana egenskaper. Kisel- och aluminiumföreningar reagerar med kalciumhydroxid, vilket bildas när cementpulvret reagerar med vatten. Flygaskans reaktion är således beroende av cementets reaktion. Denna process bidrar, bland annat, till betongens hållfasthet och täthet [20]. I dag är användningen av flygaska ofta begränsad, med vissa undantag, till cirka 20 % massmängd. Anledningen till detta är att större mängder flygaska ger betong med större osäkerhet rörande dess egenskaper. Flygaskans egenskaper på betongen kan bland annat bero på typen av kol, typ av förbränningsugn samt förbränningstemperatur [34].

Då flygaska är en restprodukt kan det råda oenighet rörande om tillsatsmaterialet i sig bidrar med utsläpp eller om det borde räknas som nollutsläpp och alla utsläpp istället bör tillskrivas värmeutvinningen. I en studie gjord av Danish Technological Institute - Concrete center presenteras en EPD för flygaska i danmark. Enligt denna bidrar tillverkningen av 1 ton flygaska med 201 kg koldioxidekvivalenter [36].

1.5.3.3 Masugnsslagg

Masugnsslagg är ett icke-metalliskt ämne som är en biprodukt vid tillverkning av stål. När en blandning av järnmalm, koks och kalksten smälts samman i en ugn bildas järn och masugnsslagg vid temperaturen 1500 ℃. Beroende på vilken metod som används för att kyla och konsolidera slaggen kan tre olika sorters masugnsslagg tillverkas. Dessa är granulerad masugnsslagg (granulated blast furnace slag, GBFS), luftkyld masugnsslagg (air-cooled blast furnace slag, ABFS) och expanderande slagg (expand slag) [37]. I Europa producerades 23 miljoner ton slagg år 2012. Enligt figur 1.5 visas andelen GBFS och ABFS som tillverkades i Europa år 2012 samt vilka områden dessa material används inom [38].

Hydratationen för GGBFS med vatten är långsammare än vanligt PC. Därför tillsätts PC, alkaliska salter eller kalksten för att skynda på reaktionen [39]. Ground GBFS,



Figur 1.5: Procentuell fördelning av GBFS och ABFS samt användningsområden 2012, data från [38]

GGBFS (mald GBFS), som tillsatsmaterial har många egenskapsförändrande effekter som måste tas hänsyn till, bland annat låg hållfasthet i tidigt skede men bättre slutlig hållfasthet och mindre vattenmängd [40].

Precis som flygaska är slagg en restprodukt och även här kan det råda meningsskiljaktigheter om till vilken del av produktionen utsläppen bör tillskrivas. ”Slag Cement Association” föreslår i en rapport att de företag som ingår i denna grupp bör beräkna slaggets koldioxidekvivalenter under tillverkning som 147 kg per ton [41].

1.5.3.4 Problem med dagens tillsatsmaterial

Både flygaska och masugnsslagg är restprodukter från två väldigt miljöbelastande industrier, kolkraftverk för elproduktion respektive stålproduktion. Det finns idag inga direkta substitut till stål som konstruktionsmaterial för vissa typer av byggnader och anläggningar. Därför är det också svårt att motivera nedskärningar inom denna bransch. Den tillgång på masugnsslagg som finns idag är relativt liten i förhållande till vad som skulle kunna användas vid betongproduktion. I takt med att betongproduktionen har ökat snabbare än stålproduktionen, 10- kontra 3-faldig ökning de senaste 65 åren [14], är det idag endast 8 % av portlandcement som substitueras med slagg. Detta är mer än en halvering jämfört med de 17 % som användes 1980. Utöver detta produceras stål i huvudsak mest i I-länder, där efterfrågan på betong antas vara mindre än i U-länderna de kommande 30 åren. Utbyggnad av stålindustri för att få tillgång till mer slagg att substituera portlandcementet mot är en åtgärd som bidrar till mer utsläpp av växthusgaser än vad det sparar. Cirka 330 miljoner ton masugnsslagg produceras varje år och runt 80 % av detta används redan som tillsatsmaterial, det finns således väldigt begränsad möjlighet att utöka användningen av denna form av tillsatsmaterial vid betongtillverkning [11].

Det finns idag vissa projekt som jobbar för att minska utsläppen från stålindustrin, ett sådant är HYBRIT (”Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology”) projektet. Detta är en samlad ansträngning från SSAB, LKAB samt Vattenfall för att på sikt kunna producera fossilfritt stål. Detta innefattar, bland annat, byte av ugnar till vätedrivna sådana, vilket då kan substituera kolet som används idag. Vilken effekt

detta får på mängden slagg som produceras är inte helt känd men det hade kunnat leda till ytterligare begränsning av tillgång på detta [42].

Flygaska är en restprodukt från en typ av industri vilken släpper ut mycket stora mängder växthusgaser jämfört med andra konkurrerande teknologier som finns att tillgå. På grund av detta bör produktionen av flygaska sjunka i framtiden och förhoppningsvis även försvinna helt. Detta tillsammans med den relativt låga andel masugnsslagg som kan användas som tillsatsmaterial ger en situation där andra typer av, mer lättillgängliga, tillsatsmaterial bör undersökas som substitut för portlandcement. Industrin står idag utan ett, på sikt, bra substitut [11].

1.5.3.5 Alternativa cement

Limestone Calcined Clay Cement, LCCC

Mycket av den information som finns att tillgå i detta kapitel är hämtat från LC3s (ett företag baserat i Schweiz vilka utvecklar en typ av LCCC) hemsida "https://lc3.ch/" och ska därför i dagsläget tas med viss skepsis, då det finns anledning för upphovsmännen att ge en positiv bild av detta cement. Gruppen består av forskare huvudsakligen från Schweiz, Indien och Kuba. Utöver att själva bedriva forskning kring materialet finansierar även gruppen doktorat i dessa tre länder och inom några år finns förhoppningsvis väl underbyggd forskning vilken kan intyga eller bestrida den information som presenteras idag.

LCCC cement är en typ av cement där stor del av det vanliga portlandcementet har ersatts med kalcinerad lera, kalksten och gips. Namnet LCCC kommer just från det engelska namnet limestone calcinated clay cement (kalksten kalcinerad lercement) vilket abbreiverat blir LCCC. Så stor del som 50 % av det vanliga portlandcementet kan ersättas med dessa alternativa material och cementet får en slutgiltig sammansättning av 50 % portlandcement, 30 % kalcinerad lera, 15 % kalksten och 5 % gips. Det kan tyckas ointuitivt att ersätta en andel portlandcement med kalksten då cementet till allra största del är uppbyggt av just kalksten, skillnaden är de ekonomiska samt miljömässiga vinster man gör då man slipper kalcineringsprocessen. Kalkstenen hettas alltså inte upp (vilket är energikrävande) och därför förbigås den kemiska kalcineringsprocessen i vilken koldioxid avgår från ämnet. Med hjälp av denna ersättning av vanligt portlandcement sägs en koldioxidreducering på upp till 40 % kunna vara möjlig, detta skulle placera en sådan betong i klass 3 för miljökompenserad betong enligt Svensk Betong [43]. Hydratationen för LCCC är långsammare än vanligt portlandcement. Härdningstiden är kortare för bara portlandcement än då kalksten och kalcinerad lera blandas i och tryckhållfastheten blir även lägre för betong med LCCC [44].

LC3 gruppen beskriver att man kan använda redan existerande utrustning, med viss modifikation, för att producera denna typ av cement. Detta skulle då vara attraktivt för cementproducenter eftersom stora investeringar i ny utrustning inte är nödvändig. Skillnader mot hur vanlig portlandcement produceras är att den kalcinerade leran också måste hettas upp men dock inte till samma temperatur som portlandcementet.

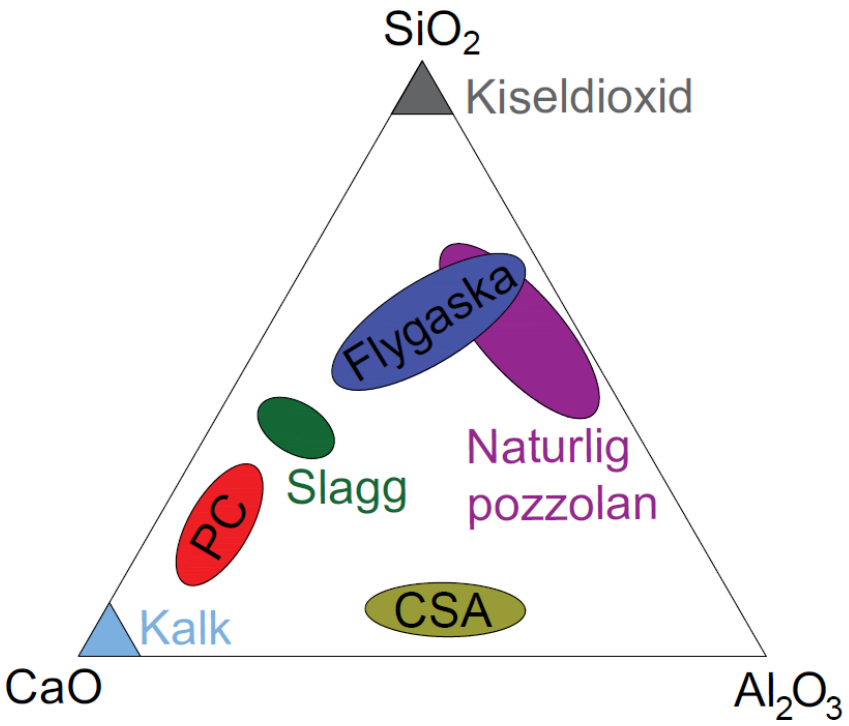
Detta skulle kunna leda till att producenterna behöver ha två ugnar som arbetar vid olika temperatur, till skillnad från idag. Den kalcinerade leran behöver hettas upp till 800 °C, vilket är drygt hälften av vad portlandcementet kräver. Vid denna temperatur leder kemiska processer till utvecklandet av ämnen med puzzolana egenskaper, namnet kalcinerad lera hänvisar till att kalcineringsprocessen som sker vid höga temperaturer till största del redan har skett och därför släpps inte samma mängder koldioxid ut. Utöver att leran under kalcinering inte släpper ut lika mycket koldioxid som portlandcementet så är energivinsten att bränna vid en sådan lägre temperatur stor [43].

Aalborgportland är också ett av de företag som idag utvecklar denna typ av cement. I en EPD för deras produkt "FutureCEM CEM II/B-M (Q-LL) 52,5 N" redovisar de 599 kg koldioxidekvivalenter per producerat ton cement. Exakt sammansättning redovisas inte men det antas vara någorlunda likt den sammansättning som LC3 föreslår [45].

$C\bar{S}A$

Kalciumsulfoaluminatcement även förkortat $C\bar{S}AC$ (makronen/strecket används här för att särskilja svavel/sulfat från kisel, kemiskt tecken: Si, vilket vanligtvis är det man menar med förkortningen S i cementsammanhang), är en typ av cement som har en snabb hållfasthetsutveckling vid hydratation och lågt koldioxidutsläpp vid tillverkning. På 70-talet forskade China Building Materials Academy, CBMA, på $C\bar{S}AC$ och utvecklade en optimerad kemisk uppbyggnad av cementklinkern [46]. $C\bar{S}A$-cement tillverkades huvudsakligen för betongrör med egenspänningar på grund av deras svällningsegenskaper [47]. Nu har produktionen av $C\bar{S}AC$ ökat och flera olika varianter av cementet har tillverkats med olika egenskaper, exempel är bland annat hög hållfasthet vid tidig ålder och typer som innehåller mycket järnoxider [46]. Kalciumoxid, kiseloxid och i mindre utsträckning aluminiumoxid är de oxider som dominerar portlandcementets sammansättning. Med kemisk terminologi, som tidigare nämnt, kallas dessa för alit, belit, aluminat och ferrit. Figur 1.6 visar skillnaderna i sammansättning mellan PC och olika tillsatsmaterial. Man kan se att $C\bar{S}A$ består till större del av aluminiumoxider men mindre av kalciumoxider och kiseloxider, dock har $C\bar{S}A$ rikligt med svaveltrioxider. Dessa brukar oftast nämnas som Ye'elimite ($C_4A_3\bar{S}$), belit, ferrit och anhydrit ($CaSO_4$, kalciumsulfat) och är den optimerade kemiska uppbyggnaden som CBMA utvecklade. Vid hydratation bildas huvudsakligen ettringit ($C_6A\bar{S}_3H_{32}$), amorf aluminat och monosulfat ($C_4A\bar{S}H_{18}$). Det är bildningen av nålliknande ettringitfällningar vid tidig ålder ger en väldigt snabb hållfasthetutveckling [48].

Tillverkning av $C\bar{S}AC$ sker i roterande ugnar. I Kina tillverkas cementet i ugnar som tidigare har använts för att tillverka Portlandcement men som nu har ändrats för att tillverka $C\bar{S}AC$, dock i lägre kapacitet. För cementet sker kalcinering vid temperaturer mellan 1300 ℃ och 1350 ℃ vilket är ungefär 150 ℃ till 200 ℃ lägre jämfört med då vanlig Portlandcement kalcineras. Den lägre temperaturen gör att det krävs mindre energi vid tillverkning vilket är positivt ur miljösynpunkt. Den resulterande cementklinkern är porös och spröd jämfört med Portlandcementklinkern, alltså är det även lättare att mala klinker på $C\bar{S}A$-cement. Detta betyder också att det inte krävs lika mycket energi att mala cementklinkern. $C\bar{S}A$ innehåller mer Ca, kalcium, än vad vanlig portlandcement gör och därmed blir koldioxidutsläppen lägre under eldningsprocessen.

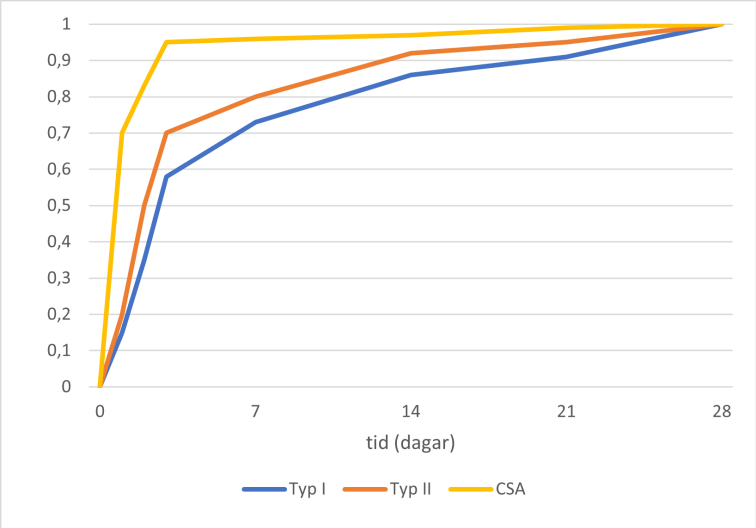


Figur 1.6: Kemisk sammansättning av olika typer av material med puzzolana egenskaper, data från [48]

C$\bar{S}$A har ett högt innehåll av $CaSO_4$ på 15-25 % medan för vanlig portlandcement är det endast en liten del av den kemiska samansättningen som består av detta ämne. $CaSO_4$ ersätter med andra ord en del av den kalcinerande cementandelen i C$\bar{S}$A vilket minskar utsläppen på grund av minskad kalcinering [46]. En studie från Kroatien visar fördelar med C$\bar{S}$A jämfört med portlandcement. Den visar att energianvändningen minskar med 33 % vid malning av C$\bar{S}$A cement. Det vanliga gipset har bytts ut mot fosforgips vilket förkortar eldningsprocessen, vilket också kommer att bidra med lägre utsläpp. Studien visar också att koldioxidutsläppen minskas med 42.5 % om fosforgips används och att vid sintring kan även 1.1 GJ/(ton cement) energi sparas jämfört med vanlig portlandcement. Detta betyder att C$\bar{S}$A med fosforgips kan placeras i klass 2 eller eventuellt 3 enligt rapporten "Klimatförbättrad betong" [49].

Vid tester utförda i Storbritannien tillverkades C$\bar{S}$AC betongkuber med vct 0,43 och härdade vid temperaturen 20 °C vid relativ luftfuktighet >98 %, de innehöll 18 % gips. Efter 1- och 3-dagars härdning uppgick tryckhållfastheten till 44,2 MPa respektive 53,9 MPa [46]. När ye'elimiten reagerar med vatten så löses gipset upp och bildar ettringit, detta sker väldigt snabbt. Ettringit påverkar också tillstyvnaden av betongen, betongen kan påbörja sin tillstyvning så tidigt som efter 10 minuter om ett lågt vct väljs. För att kunna arbeta med C$\bar{S}$A kan därför retarderande tillsatsmedel används som då fördröjer betongens tillstyvnad och hållfasthetsutveckling men som gör att det blir lättare att arbeta med. Figur 1.7 visar hållfasthetsutvecklingen för betong med tre olika typer av cement. Jämförelsen mellan C$\bar{S}$A cement och typ II cement, snabbhärdande portlandcement (finmalt), är det som är mest intressant då typ II också har snabb hållfasthetsutveckling. För typ II cement uppnås 50 % av dess tryckhållsfasthet efter ungefär tre dagar men för C$\bar{S}$A uppnås 50 % redan efter några timmar [48].

Exakta värden för koldioxidekvivalenter producerade av C$\bar{S}$A-cement har inte hittats men enligt ”Global Cement” ska Vicat (fransk cementproducent) med sin C$\bar{S}$A-cement, ”Alpenat”, kunna påvisa 30 % reducerade utsläpp jämfört med vanlig PC [50]. Detta är något lägre än de siffror som presenterats tidigare i detta kapitel och skulle betyda att sådan cement under produktion bidrar med cirka 530 kg koldioxidekvivalenter per ton cement.



Figur 1.7: Relativ hållfasthetsutvecklingsjämförelse av 3 olika typer av cement, var av en är ett C$\bar{S}$A-cement. Data från [48]

I tabell 1.1 kan koldioxidekvivalenter, för varje ton tillverkat, för vanligt PC-, flygaska-, slagg-, LCCC- samt C$\bar{S}$A-cement; värdena är hämtade från deras respektive kapitel.

Tabell 1.1: Koldioxidekvivalenter per tillverkat ton

Bindemedel	Koldioxidekvivalenter per ton
Portlandcement	759 kg
Flygaska	201 kg
Slagg	147 kg
LCCC	599 kg
C$\bar{S}$A	530 kg

.

1.6 Betong som konstruktionsmaterial

Som nämnt i kapitel 1.1 står bygg- och fastighetssektorn för en stor del av hela Sveriges totala utsläpp. Det förekommer allt fler studier om att materialproduktionen och byggprocessen för nya byggnader kommer att ha en stor påverkan på miljön de kommande 50 åren. Om dessa aspekter beaktas i planeringsprocessen finns det möjligheter att minska miljöpåverkan [51]. Intresset har nått fram till beslutagare och därmed har Regeringen gett Boverket i uppdrag att skapa en sammanställning av kunskap om klimatpåverkan för byggprocessen [52]. Boverket har nu tagit fram ett förslag om hur LCA-beräkning kan användas i byggprocessen vid nybyggnation och ombyggnation av

byggnader för att minska på miljöpåverkan. Förstudie, programskede, projektering och produktion ingår i nybyggnation av byggnader [53]. I detta examensarbete kommer optimering av mellanbjälklag att utföras för att kunna jämföra koldioxidekvivalenter för olika alternativ och kommer därför att ligga under projektering. Endast steg A1-3 ”Produktionsskede” i en LCA kommer att beaktas i arbetet.

1.6.1 Hållfasthet

Hållfasthet och styvhet är två av de viktigaste materialegenskaperna som används vid dimensionering av betongkonstruktioner. Utöver dessa två är beständighet, täthet och bearbetbarhet några viktiga egenskaper som måste tas hänsyn till. När man tittar specifikt på hållfasthet ser man snabbt att draghållfastheten är väldigt låg i förhållande till tryckhållfastheten. Därför beaktas den oftast inte vid dimensionering, istället antas alla dragkrafter upptas av armeringsstålen vilka gjuts in just för detta syfte. Tryckhållfastheten är även starkt kopplad till andra egenskaper och då den är enkel att mäta används den som jämförelse mellan olika betongkvalitér, detta gör den till den viktigaste materialegenskapen för betong. De övriga materialegenskaperna beror mer eller mindre på tryckhållfastheten därför uppskattas dessa egenskaper från tryckhållfastheten [54].

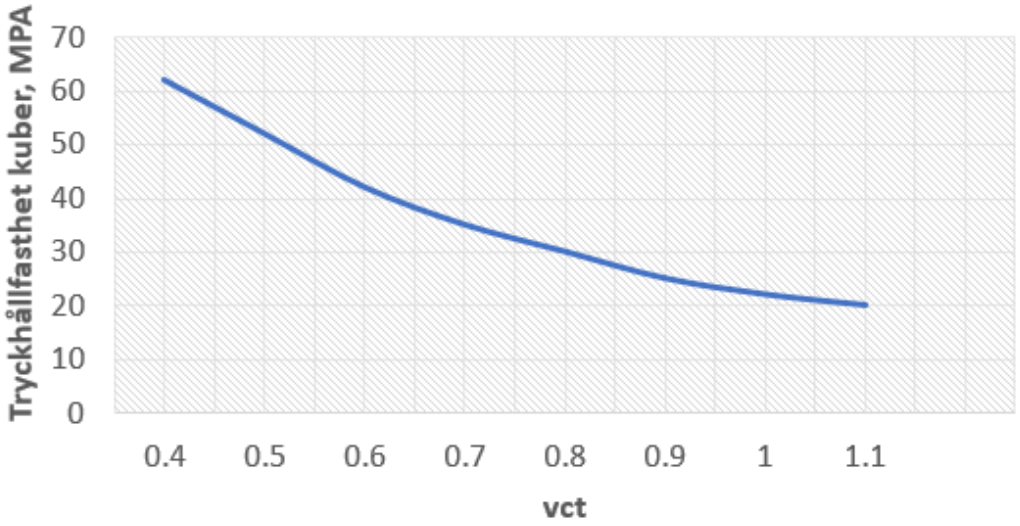
Som tidigare nämnts beror betongens hållfasthet till stor del på den hårdnade cementens egenskaper och förhållandet mellan cement och vatten i bindemedlet. Detta har varit känt i över 100 år och redan 1919 postulerade Duff A. Abrams ”Abrams's law” vilken beskriver just detta förhållande. Lagen, som inte är en riktig lag utan snarare en kurvpassning från experimentella resultat ser ut som följer

$$S = \frac{14000}{7^x} \tag{1.2}$$

där
S är betongens hållfasthet i psi.
x är betongens vattencementtal, vct.

Eftersom denna ”lag” framtogs i USA på 1910-talet är enheten för betongens hållfasthet uttryckt i psi eller Pound per Square Inch, omvandlat till megapascal blir 14000 istället 96,53 och nämnaren är densamma [55]. Detta uttryck för betongens hållfasthet utvecklades under följande århundrade och idag finns många olika förslag på hur man approximerar hållfastheten utefter betongens vct. Tillägg som gjorts är bland annat att ta hänsyn till luftinnehållet eller att ändra randvilkor så att när vatteninnehållet är högt blir hållfastheten 0 snarare än när vatteninnehållet är oändligt som i Abrams lag [56].

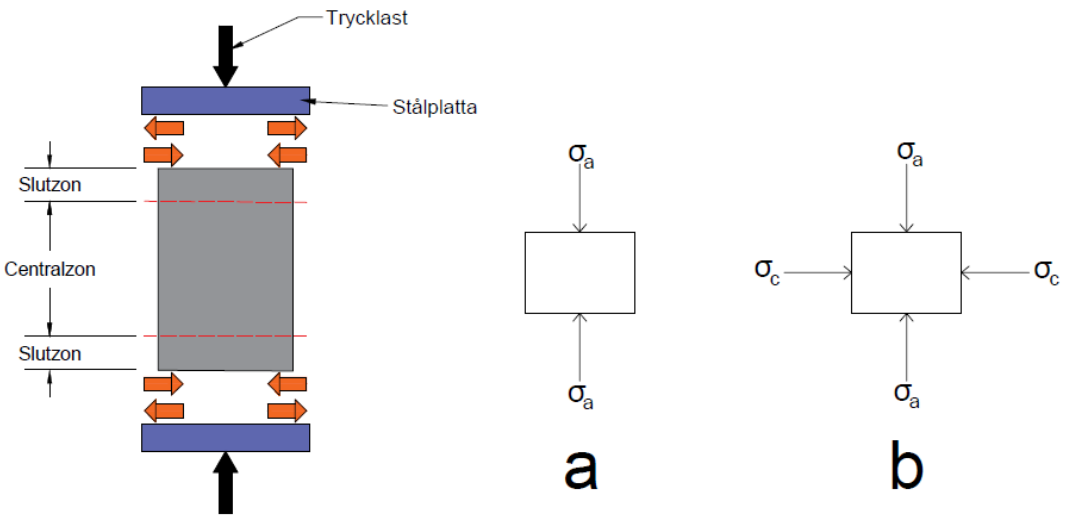
För att få fram tryckhållfastheten i betong tillverkas kuber eller cylindrar som belastas tills provet inte klarar av mer last, det vill säga den högsta lasten som uppstår, även kallad för brottlast. Resultatet beror på bland annat härdningstid, betongsammansättning och belastningshastighet. Hållfasthetsvärden i Sverige tas i regel fram genom att kuber med storleken 150 mm (längd, bredd och höjd) härdas i 28 dagar, ef-



Figur 1.8: Experimentellt framtagen tryckhållfasthet för betongkuber med olika vct, data från [1]

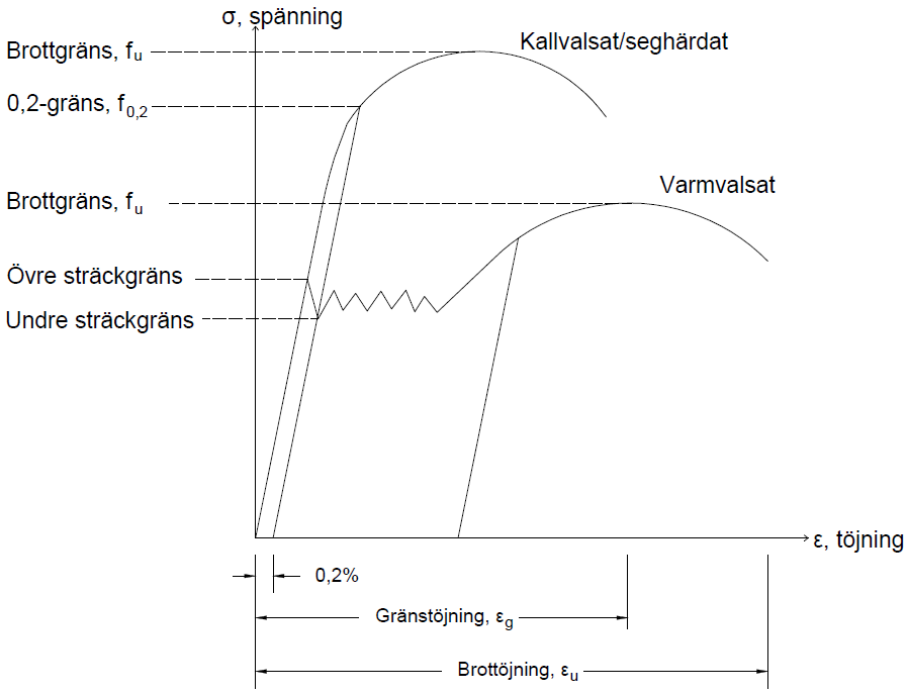
ter detta tryckbelastas de genom rent tryck i en riktning [54]. Cylinderhållfastheten är ungefär 80-90 % av kubhållfastheten, de cylindrar som provtrycks har måtten 150 mm i diameter och 300 mm i höjd [1]. Försök i laboratorium med kuber ger högre värden på tryckhållfasthet än verkliga konstruktioner, med en skillnad på 10-20 % [54]. Baserat på dessa siffror kan slutsatsen dras att cylinderhållfashet överensstämmer bättre med uppvisat praktiskt beteende i konstruktioner. Anledningar till dessa resultat kan vara ökad, så kallad, ”platen restraint” för kubproverna. Kort förklarat innebär detta, på grund av dess geometri, att kuberna utsätts för laterala spänningar där plattorna trycker mot provkroppen. Kuben vill expandera i sidled då provkroppen trycks ihop (hur mycket är en materialegenskap vilken beskrivs av Poissons konstant eller tvärkontrationstalet, för betong brukar detta vara mellan 0,2 till 0,25 vilket betyder att den expanderar 20 - 25 % av hur mycket den trycks ihop). På grund av friktion mot plattorna hålls dessa expansioner emot och spänningar uppstår. Dessa spänningar avtar med avstånd från plattorna, men på grund av dess kubiska form blir kuberna aldrig riktigt enaxiellt belastade. För cylindrarna är avstånden tillräckligt långa för att mittsektionen inte ska utsättas för denna spänning och kan därför sägas vara enaxiellt belastade [57]. Detta kan ses i figur 1.9 där 1.9(a) visar spänningsförhållandet mellan de sträckade linjerna (kallad ”Centralzon”) och 1.9(b) visar förhållandet mellan plattan och den sträckade linjen (kallad ”Slutzon”).

Draghållfastheten är som nämnt mycket låg, cirka 10 % av tryckhållfastheten. Sprickbildning kan uppkomma när betongen utsätts för drag även vid måttliga belastningar vilket snabbt kan leda till att betongen går i brott. Detta är anledningen till att armering måste användas i betongkonstruktioner. Det finns flera material som kan användas som armering men i detta examensarbete behandlas enbart stålarmering. Stål är ett isotropt material vilket betyder att det har likadana egenskaper i alla riktningar, till skillnad från betong. Armeringens uppgift är att uppta de dragkrafter i konstruktionen som uppstår efter att betongen har börjat spricka [58]. Arbetskurvor för både kallbearbetat- och varmbearbetat stål visas i figur 1.10. Övre sträckgränsen



Figur 1.9: Uppkommande krafter samt spänningsfördelning i en betongcylinder under enaxiellt tryckprov [57]

beskriver gränsen under vilken stålet fortfarande är elastiskt, det vill säga då den belastas och får en viss töjning när den sedan avlastas så kommer töjningen återgå och stålet återfår sin ursprungliga längd. Belastning över sträckgränsen gör att materialet flyter/plasticieras som då betyder att töjningen som ges av belastningen inte kommer att återgå till ursprunglig längd vid avlastning. Varmbearbetat stål kan dock utsättas för högre laster då den plasticeras tills den når brottöjningen. Brottgräns beskriver den högsta last som stålet klarar av, den är relaterad till gränstöjningen som då beskriver töjningen vid den högsta lasten. För kallbearbetat stål finns det ingen tydlig sträckgräns då den har tillverkats för att ha en högre hållfasthet, nackdelen med detta är att materialet då inte töjs lika mycket jämfört med varmbearbetat.



Figur 1.10: Arbetskurvor för kall- och varmvalsat stål [58]

I enkelarmerad betong fördelas dragkrafterna till armeringen och i huvudsak tryckkrafterna till betongen. Denna uppdelning är välbetänkt eftersom betongen har låg hållfasthet och med för lite armering ger detta upphov till sprött brott, som kan ge upphov till plötsliga brott. Sprött brott innebär att armeringen inte flyter före konstruktionen går i brott. Detta leder till sämre materialutnyttjande, risk för plötsligt brott samt sämre möjligheter att omfördela laster. För segt brott flyter armeringen innan det går till brott vilket gör att laster kan omfördelas. Betongkonstruktioner med armering bör därför dimensioneras för segt brott. Konstruktionen blir även starkare då dragkrafterna tas upp av armeringen mer effektivt samt med armering får konstruktionen större deformationer innan den går till brott [54]. Den armerade betongen är en samverkanskonstruktion där krafter överförs genom vidhäftning och kontakttryck mellan betong och armeringen. Kontakttryck förekommer i armeringens förtagningar [58].

2 Mätning

I detta kapitel beskrivs, steg för steg, hur gjutningen av betongen gick till väga. Det ska nämnas att all gjutning gjordes inte vid samma tillfälle utan under 3 olika dagar. Syftet med mätningarna är att kunna få ut hållfasthetskurvor för de olika recepten, sedan göra en jämförelse mellan dessa och diskutera hur de olika recepten kan utnyttjas.

2.1 Metod

Färsk betong tillverkas enligt standard SS-EN 12390-2:2019 vid LTHs faciliteter på V-huset i Lund. Då betongen gjutits hälls den i kubiska formar för att härda. Betongkuberna trycktestas sedan vid olika förutbestämda intervall, nämligen 1, 3, 7, 14, samt 28 dagar. Extra vikt läggs vid att undersöka tidig hållfasthet (efter 1 och 3 dagar) samt 28-dagarshållfastheten, då detta är branschstandarden för betongens slutgiltiga hållfasthet, vid dessa tillfällen trycktestas 2 kuber istället för 1.

2.1.1 Tillverkning och tryckprovning av betong enligt standard

Betong blandas i en betongblandare, därefter hälls betongen i kubiska former som sedan vibreras till full kompaktering. Måtten på formerna varierar men oftast användas 100 mm eller 150 mm för provtryckning. Provkroppen lagras sedan i formen, i åtminstone 16 timmar men inte längre än 3 dagar, med en temperatur på 20 + 5 °C. För att undvika uttorkning kan plastfoile placeras för att täcka provkroppen. Provkroppen avformas och läggs sedan i vattenbad med temperaturen 20 + 2 °C, alternativt kan provkroppen läggas i en kammare med temperaturen 20 + 2 °C och relativa fuktigheten > 95 % men det är svårt att uppnå dessa kriterier.

När provkroppen har härdat avsedd tid ska överskottsvattnet på ytan torkas bort. Även alla tryckplattor på tryckpressen ska torkas för att få bort all främmande material. Provkroppen placeras sedan så att lasten appliceras vinkelrät mot gjutriktningen, hjälpplattor/distansstycken ska även placeras mellan provkroppen och tryckpressens plattor. Provkroppen ska centreras efter den undre pressplatta med en precision på + 1 % av det tänkta måttet hos provkroppen. Om hjälpplattor används måste dessa centreras i relation till provkroppens övre respektive undre yta. När allt är till rätta så kan belastningen påbörjas, belastningshastigheten väljs 0,6 + 0,2 MPa/s och provkroppen trycks tills den inte klarar av någon större last. Den högsta lasten beskriver den slutgiltiga hållfastheten som provkroppen har.

2.2 Betonggjutning

Det första recept som tillverkades var ett referensrecept endast innehållande ”byggcement” från Cementa AB som bindemedel, detta är ett cement av typ CEM II (A) vilket betyder att mellan 80 och 94 % består av portlandklinker och resterande del av mald kalksten. Detta cement och den betong som gjuts representerar en referensbetong med hög andel PC, vilken till stor del används inom byggindustrin idag. Innehållet i detta recept samt vct redovisas i tabell 2.1. De andra 3 betongerna som gjöts bestod av olika typer av bindemedel, två där en del av portlandklinkern bytts ut mot ett tillsatsmaterial och ett där bindemedlet bytts ut helt mot en annan typ av bindemedel. Recepten för dessa redovisas i tabell 2.1. Flyttillsatsmedel kan även förekomma om betongen är svårarbetad, mängd flyttillsatsmedel som användes redovisas i tabell 2.1. Kubformerna som betongen gjöts i var 100x100 mm^2. Provtryckning sker efter 1, 3, 7, 14 och 28 dagar för att erhålla tendenskurvor för betongens hållfasthetsutveckling.

Tabell 2.1: Grundrecept för tillverkning av betongkuber

	Recept A	Recept B	Recept C	Recept D
Sand	10,98 kg	10,98 kg	10,98 kg	10,98 kg
2-5 mm	2,44 kg	2,44 kg	2,44 kg	2,44 kg
4-8 mm	2,44 kg	2,44 kg	2,44 kg	2,44 kg
8-12 mm	2,44 kg	2,44 kg	2,44 kg	2,44 kg
Byggcement	6,52 kg	5,22 kg	-	-
Slagg	-	1,30 kg	-	-
CSA	-	-	6,52 kg	-
LCCC	-	-	-	6,52 kg
Vatten	2,44 kg	2,44 kg	2,44 kg	2,44 kg
Flyttillsatsmedel	30,6 g	12,2 g	-	32,3 g
vct/vbt	0,44	0,44	0,44	0,44

Stenmaterialen förvaras i behållare i betonglabbet. För de större stenfraktionerna antas det att ingen väsentlig mängd fukt ansamlats och vid uppvägning antas 0 g vatten tillföras. Detta stämmer inte för sanden, på grund av dess finkorninghet kan en inte obetydlig mängd vatten antas tillföras till recepten. För att ta reda på hur stor andel vatten som finns i fraktionen sand används 3 fuktmätare. En godtycklig mängd sand placeras på vågen i fuktmätaren, den värmer sedan upp sanden och skillnaden i vikt efter uppvärmningen antas vara all tidigare fritt vatten som avgått. Mätningarna visade att sandfraktionen innehåll cirka 4 % vatten vilket beaktas vid viktberäkningarna.

Sand, stenmaterial, bindemedel och vatten vägs upp i hinkar, vilket visas i figur 2.1. De 4 olika betongrecepten kallas här för A, B, C och D. A är referensreceptet endast innehållande vanlig referenscement. I recept B har 20 % av referenscementet bytts ut mot slagg. C är en $C\bar{S}A$-betong vilken inte innehåller vanlig PC (utan i huvudsak de beståndsdelar vilka beskrivs i kapitel 1.5.3.5, först och främst ye’elimite & belit). Recept D har 21-35 % av portlandcementet bytts ut mot kalcinerad lera och kalksten. Anledningen till att exakt siffra inte kan ges här är eftersom detta är en kommersiell produkt som snart ska börja säljas på marknaden och exakt sammansättning finns ej angiven.

Figur 2.1: Stenmaterial vägs upp

När allt ingående material har vägts upp till rätt mängd torrblandades det i betongblandaren. Därefter tillsätts vatten när blandaren är igång. Flyttillsatsmedel tillsätts för att erhålla ungefär liknande konsistens på alla recept (i slutändan blev D något mer lättflytande än de andra). Torrblandning av stenmaterialet kan ses i figur 2.2.

Figur 2.2: Stenmaterial blandas i en betongblandare

Efter att flyttillsatsen och betongmassan har blandats så testas sättmåttet. Sättmåttet testas genom att först fylla en tredjedel av en sättmåttskon (alltså en kon där spetsen saknas genom vilket hål man fyller betongen) med betongmassan som sedan blir stampad 25 gånger med en stålstav, därefter fylls den ytterligare en tredjedel och blir slagen 25 gånger till och till slut så fylls konen helt och blir slagen 25 gånger till. Sättmåttet avläses med en tumstock genom att konen lyfts och ställs bredvid betongmassan, när betongen sjunker ihop används stålstaven som referens, se figur 2.3.

När sättmåttet har bestämts så läggs betongmassan tillbaka i betongblandaren för att blandas ytterligare. Strax efter stannas blandaren och kubformer som har blivit

Figur 2.3: Betongens sättmått mäts

oljade fylls till hälften med betongmassan, de vibreras sedan på ett vibratorbord för att jämna ut massan som blir mer lättflytande då den skakas, därefter fylls hela kuben och vibreras ytterligare för att få en jämn yta. Det blev 12 kuber av A och C, 11 kuber av B och D. Dessa står sedan under plastfolie i 24 timmar för undvika uttorkning av betongen, se figur 2.4.

2.3 Hållfasthetsmätning

Betongkuberna avformas och två av betongkuberna provtrycks direkt, resterande kuber placeras i vattenbad med en vattentemperatur på 20 °C till de ska provtryckas. En avformad kub kan ses i figur 2.5 Betongkuberna provtrycks automatiskt i maskin med en hastighet på 0,6 MPa/s. Två tryckpressade betongkuber av CS̄A- och slagg-betong kan ses i figur 2.6. Man kan även se deras olika sprickuppförande då de närmar sig hållfashetsförlust.

Figur 2.4: De fyllda formarna förvaras under plast de första 24 timmarna

Figur 2.5: En avformad betongkub med form i bakgrunden

Figur 2.6: Skillnad i sprickbildning vid brott i kuberna, slaggbetong (t.h.) och C$\bar{S}$A-betong (t.v.) (Detta var efter 28 dagar)

2.4 Kalorimetri

Två prov för kalorimetritestning, på cirka 12 g, producerades för varje tillhörande betong (A, B, C och D). Proven bestod av bindemedel, normsand, vatten och flyttillsatsmedel. Exakt blandning redovisas i tabell 2.2. Som kan ses blev det mer vatten än menat i det andra provet för betong C. Exakt samma sammansättning av stenmaterialet som i betongerna valdes att inte användas för kalorimetrimätningarna. Detta eftersom de stora fraktionerna tar mycket stor plats i proven och har i slutändan inte direkt inverkan på bindemedlets reaktion. Normsand valdes därför som representation av stenmaterialet.

Tabell 2.2: Recept för kalorimetriprov

	Recept A	Recept B	Recept C	Recept D
	I	I	I	I
Normsand	6 g	6 g	6 g	6 g
Bindemedel	4 g	4 g	4 g	4 g
Vatten	1,8 g	1,8 g	1,8 g	1,8 g
Flyttillsatsmedel	0,020 g	0,020 g	0,020 g	0,020 g
vct/vbt	0,45	0,45	0,45	0,45
	II	II	II	II
Normsand	6 g	6 g	6 g	6 g
Bindemedel	4 g	4 g	4 g	4 g
Vatten	1,8 g	1,8 g	2,0 g	1,8 g
Flyttillsatsmedel	0,020 g	0,020 g	0,022 g	0,020 g
vct/vbt	0,45	0,45	0,50	0,45

Bindemedlet och normsanden vägdes på en våg med 1 % noggrannhet (det vill säga, till exempel, 3,996 - 4.004 g ansågs acceptabelt för bindmedelsvikten). När rätt mängd vägts upp hälldes de två beståndsdelarna i en plastampull. En godtycklig mängd vatten mättes upp och så mycket flyttillsatsmedel som gav 0,5 % av bindemedelsvikten, det vill säga 0,011 g per g vatten, tillsattes. Denna blandning hälldes sedan i en vattendoserare vilken ställdes in på att producera 1,8 g. Detta vatten tillsätts sedan i proven vilka placeras i en centrifug ("vortex mixer") vilken vibrerar provet i 30 sekunder i 1800 rpm (revolutions per minute). Efter detta placeras proven i den isoterma kalorimetern för analys.

3 Mätresultat

3.1 Hållfasthet

Resultat av hållfastheten av de olika recepten presenteras i tabell 3.1 där det även nämns hur många provkroppar som trycktes vid de olika intervallen.

Tabell 3.1: Resultat av provtryckning

Dag	Recept A	n	Recept B	n	*Recept C	n	Recept D	n
1	36,20 MPa	2	28,90 MPa	2	42,75 MPa	2	21,55 MPa	2
3	47,25 MPa	2	40,95 MPa	2	43,90 MPa	2	37,90 MPa	2
7	52,20 MPa	1	48,70 MPa	1	44,90 MPa	1	48.20 MPa	2
14	55,55 MPa	2	56,50 MPa	1	51,30 MPa	1	60,85 MPa	2
28	58,75 MPa	2	59,90 MPa	2	52,05 MPa	2	67,30 MPa	3

* Resultaten från C$\bar{S}$A-cementet var otillfredsställande. Det antas att cementet var gammalt, då det stått i betonglabbet i minst ett år. De resultat som presenteras nedan i graf 3.2 tillhandahölls av Lars Wadsö och Paul Sandberg som gjöt och testade dessa betongkuber i nära anslutning till oss med ett nyare C$\bar{S}$A-cement. Då testtiderna inte var samma för oss som för Lars Wadsö och Paul Sandberg har värdena linjärapproximerats i graf 3.1 (C) för dag 7 och 14. Detta antas ha liten effekt på resultatet då det intressanta med C$\bar{S}$A-cementet är dess snabba hållfasthetsutveckling de första dygnen.

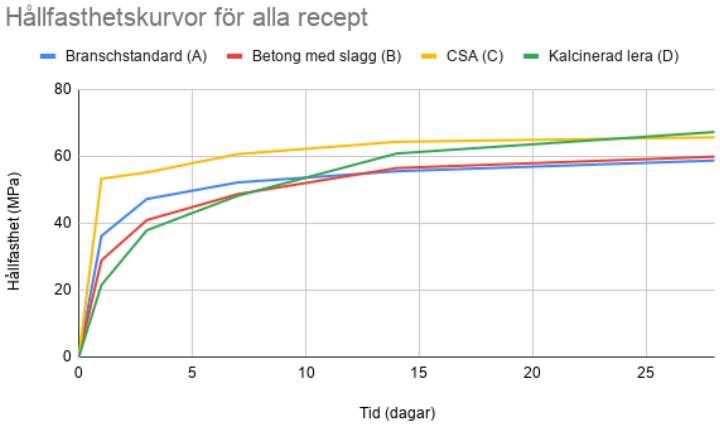
Tabell 3.2: C$\bar{S}$A Resultat

Dag	Recept C
1	53,30 MPa
3	55,20 MPa
10	63,00 MPa
28	65,70 MPa

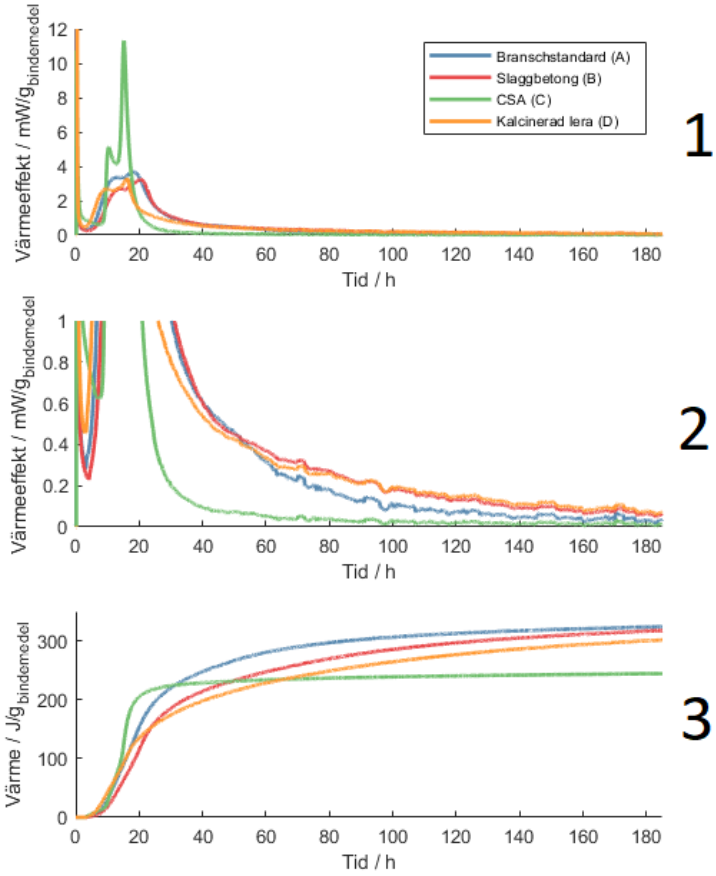
Figur 3.1 visar alla hållfasthetskurvor sammansatta i en graf.

3.2 Kalorimetri

Resultaten från den utförda kalorimetrianalysen presenteras i figur 3.2. 3.2 (1) visar reaktionen för de 4 betongerna under de 180 första timmarna med betong C:s topp synlig, (2) är samma graf men där skillnaderna mellan de andra 3 recepten efter 2 dygn är tydligare eftersom topparna inte är med. (3) visar integralen av graf (1) & (2) alltså summering av energin under de första 180 timmarna.



Figur 3.1: Hållfasthetsutveckling för de 4 olika, tillverkade, betongerna i samma graf



Figur 3.2: Kalorimetriresultat för de 4 betongrecepten

4 Analys & diskussion: mätning

Resultaten från mätningen, hållfasthetstest samt kalorimeteri, analyseras och diskuteras här.

4.1 Branschstandard (A)

Resultatet stämde väl överens med vad som kunde förväntas av denna typ av betong. Jämför man resultatet för 28-dagars hållfasthet med figur 1.8 så överensstämmer dessa två värden mycket väl, avläsning från figuren ger cirka 2 MPa, eller knappt 4 %, skillnad. Jämför man istället med ekvation 1.2 är skillnaden högre, nästan 20 MPa. Även om man antar stor platen restraint för testkuberna (20 %) så skiljer det över 10 MPa mot det värde som erhölls under laborationerna. Linjen som visar denna betongs hållfasthetsutveckling i grafen (figur 3.1 (A)) överensstämmer även den med förväntat. Hållfasthetsutvecklingen är hög under de första dagarna för att sedan sakta mattas av, detta följer portlandcements hydratationsprocess väl.

4.2 Betong med slagg (B)

För betong med slagg var det förväntat, enligt teorin rörande detta tillsatsmaterial, att detta recept skulle ha en långsammare hållfasthetsutveckling i början. Detta på grund av slaggens långsammare hydratation, dock också att betongen i slutändan skulle få ett högre resultat på hållfastheten än A. Resultaten som presenteras tyder just på detta. Dock var denna skillnad liten jämfört med branschstandarden, endast drygt 1 MPa.

4.3 C$\bar{S}$A (C)

Förväntat resultat på receptet var en hög hållfasthet vid tidig ålder, hållfastheten för en dag uppnår redan 53,3 MPa. Därefter ökade hållfastheten endast med 23 % till 28 dagar, nästan all denna ökning sker också före 14 dygn och efter detta är ytterligare hållfasthetsutveckling mycket låg. Trots detta är denna betong den som uppvisar högst hållfasthet under nästan alla mätningstillfällen.

4.4 LCCC (D)

På grund av relativt litet underlag på tillsatsmaterialet i fråga var det svårt att anta vilka effekter det skulle ge på betongens hållfasthet. Enligt teorin för andra betonger med substituerat tillsatsmaterial antogs långsammare tidig hållfasthetsutveckling, vilket visade sig stämma. Hållfasthetsutvecklingen följer ungefär samma mönster som för vanlig PC men de skillnader den uppvisar är, bland annat, långsammare tidig hållfasthet som sedan inte avstannar lika snabbt som den utveckling man kan anta för vanlig PC (vanligt för all betong med tillsatsmaterial vars egenskaper uppvisar långsammare hydratationsprocess, till exempel, på grund av tillgång på ämnen för reaktion vilka bildas då portlandcement hydratiserar, se kapitel 1.5.3.2). Resultatet på provtryckningen av betong med LCCC visade dock att hållfastheten var uppe på 60,85 MPa redan efter 14 dagar och efter 28 dagar var denna betong den med högst hållfasthet. Detta är motstridigt mot den teori som presenteras i kapitel 1.5.3.5 där en studie påvisade lägre 28-dagarshållfasthet än vanligt PC. Anledningar till detta kan vara olika sammansättning på det bindemedel som tillämpades i den studien jämfört med det som använts här. Dock om ingen speciell typ av optimering nyttjats för det bindemedel som använts här borde effekten på hållfasthetsutvecklingen vara likvärdig oberoende av studie. Ytterligare förklaring kan vara att de små mängder som producerats inte representerar ett medelvärde väl utan är placerade i en övre percentil.

4.5 Jämförelse

Snabbast tidig hållfasthetsutveckling (1 dygn) hade, som nämnt, C$\bar{S}$A-betongen (C); utefter vad teorin säger var detta förväntat. På denna följde den vanliga PC-betongen (A), sedan slaggbetongen (B) och sist den kalcinerade leran (D). För tidig hållfasthet kan därför de experimentella resultaten helt och hållet överensstämma med vad som förväntades. Den del som inte var helt känd före var förhållandet i cementationseffekt som slagg respektive LCCC skulle uppvisa för deras respektive betonger, B & D. För dessa två tillsatsmaterial verkar det efter experimenten vara så att slagg, trots en långsammare hållfasthetsutveckling än när den inte är närvarande, ger upphov till högre tidig hållfasthet än LCCC. Något som gör det svårt att dra denna slutsats är att den exakta andel av recept D som består av tillsatsmaterialet inte är känt, det rör sig om mellan 21 - 35 %, anledningen till detta presenteras i kapitel 2.2. Om andelen är närmare den lägre gränsen (21 - 25 %) kan de slutsatser som föreslås tidigare i detta kapitel (att slagg som tillsatsmaterial ger högre tidig hållfasthet än LCCC) antas bära viss vikt. Skulle det dock vara så att andelen är närmare den övre gränsen (30 - 35 %) är samma slutsats mycket svår att dra. Skulle andelen slagg i så fall vara samma hade dess tidiga hållfasthetsutveckling varit mindre än den var i denna laboration, då andelen slagg endast var 20 %. Slutsatserna som kan dras mellan dessa två betonger är således beroende på aspekter vilka vi inte känner till. Det som kan sägas är att för tidig hållfasthet så ger båda tillsatsmaterialen märkbar effekt hos deras respektive betonger.

Efter 3 dygn är den inbördes rangordningen för hållfastheten oförändrad gentemot efter första dagen, dock finns det många skillnader på värdena som kan poängteras.

Mest påtaglig är den mycket låga ökning som recept C redan då uppvisar, knappt 4 % från dygn 1 till 3. Jämfört med A som ökar drygt 30 &, B som ökar drygt 40 & och D som ökar hela 75 % under samma period. Redan vid denna tidpunkt kan man se C$\bar{S}$A-betongernas karakteristiska snabba hållfasthetstillväxt som sedan, lika intensivt som den startat, abrupt slutar. Något som också är värt att poängtera är betong D:s stora ökning från dygn 1 till 3. Trots att betongen har en förhållandevis låg hållfasthetsutveckling det första dygnet, och den är fortfarande den betong som har lägst hållfasthet, så ökar hållfastheten för denna betong med god marginal mest under dygn 2 och 3.

Även efter 7 dygn råder samma inbördes rangordning som för dygn 1 & dygn 3. Ökningen jämfört med föregående mätning följer samma mönster här som från dygn 1 till dygn 3. Betong D ökar mest, drygt 25 %, följt av betong B, knappt 20 %, sedan betong A, drygt 10 % och till sist betong C, knappt 10 %. Betong D har vid detta tillfälle nästan övertagit betong B och det skiljer endast 0,5 MPa mellan dem. Denna skillnad är för liten för att kunna dra en slutsats om vilken som är "faktiskt" bäst på grund av fåtalet provkroppar. På grund av att det vid vissa gjutningar blev färre provkroppar som producerades än andra (Färre av A & B) har det (på grund av 7 dygn ansågs vara den minst relevanta tidpunkten för analysen) vid detta tillfälle endast testats 1 provkropp av de ovan nämnda betongerna (även vid 14 dygn testas endast 1 kub av recept A). Recept D kan således redan innan denna tidpunkt ha högre hållfasthet än recept B. Recept C, C$\bar{S}$A-betongen, verkar under denna period ha en ökad hållfasthetsutveckling jämfört med från dygn 1 till dygn 3 (10 % på 4 dygn jämfört med 4 % på 2 dygn). En anledning att dessa resultat har erhållits bör vara att värdena för C-betongen har kurvanpassats mellan dygn 3 och dygn 28 då denna betong hade annorlunda mättider än de övriga, anledning till detta ges i kapitel 3.1.

För hållfastheten efter 14 dygn kan man göra ett par intressanta iakttagelser. Betong C har fortfarande högst hållfasthet men utöver detta har betong A vid detta tillfälle blivit passerad i hållfasthet av båda de betongerna som innehåller tillsatsmaterial (B & D). Detta stämmer överens med den teori som finns att tillgå för betong med slagg som tillsatsmaterial, vilket nämns i kapitel 4.2. Något som dock inte var väntat var att betong D, LCCC, skulle uppvisa högre hållfasthet än betong A & B. Än en gång är det något svårt att dra exakta slutsatser här på grund av få provkroppar (2 för A och D, 1 för B) men betong D uppvisar en hållfasthet som är 9 % respektive 7 % bättre än de för betong A & B.

Den slutliga (28-dagars)hållfastheten för betong A, B, C och D, som kan ses i tabell 3.1 och 3.2, blev 58,5 MPa, 59,9 MPa, 65,7 MPa respektive 67,3 MPa. En ökning med 5,4 %, 5,7 %, 2,1 % samt 9,6 % för respektive recept jämfört med testen som gjordes 2 veckor tidigare. Betong D passerar betong C i hållfasthet vid detta tillfälle och blir då den enda betong att uppvisa ett högre hållfasthetsvärden än C$\bar{S}$A-betongen. Att hållfasthetsutvecklingen skulle vara mycket låg för betong C så här "sent" var förväntat, dock var det osäkert om någon av betongrecepten skulle överstiga dess hållfasthet och att det till slut visade sig vara betong D (LCCC) som var den enda som lyckades med detta var långt ifrån förväntat. Det recept som ansågs ha störst potential till detta var recept B. Teorin rörande betong med masugnsslagg är att den trots lägre tidig hållfasthet får högre än betonger med vanligt PC, dock kan det vara så att den hållfasthet uppnås senare än efter 28 dygn. I slutändan placerade betong B

sig som den med näst lägst 28-dagarshållfasthet endast den betong som bara innehöll vanligt PC, recept A, påvisade ett lägre värde. Detta i sig var överraskande. Recept A antogs påvisa högre 28-dagarshållfasthet än, iallafall, recept D och beroende på när betong B:s överträffande av vanlig PC betongs hållfasthet teoretiskt inträffar även denna. Många intressanta egenskaper har således påvisats i denna, om än begränsade, materialtekniska studie rörande likheter och skillnader för betonger med olika tillsatsmaterial i förhållande till betong med vanligt PC.

4.5.1 Praktisk tillämpning

Från de värden som erhållits kan en kortfattad diskussion göras mellan de olika betongernas möjlighet till praktisk tillämpning. Eftersom det endast är hållfasthet/hållfasthetsutveckling samt värmeutveckling som undersökts så är det utifrån detta lämpligheten kommer analyseras. Faktorer som till exempel beständighet är något som också måste utredas noga innan man kan säga ifall betongerna är faktiskt praktiskt tillämpbara.

Den aspekt som förmodligen kommer spela störst roll är den tidiga hållfastheten. När den specifika betongen blir självbärande och sedan lastbärande i en struktur har stora implikationer för andra delar av projektet, huvudsakligen sett till tid. En typ av betong som uppnår dessa gränsvärden tidigare är en betong som kan användas för att korta ner byggtider då nästkommande steg kan utföras tidigare. Sett till detta är C$\bar{S}$A-betongen (C) den bästa då den har mycket snabb hållfasthetsutveckling i början, och den med minst potential är betong med LCCC (D). Dock kan uttorkningstiden påverkas av användandet av tillsatsmaterial och kan därför också påverka tidsaspekten i ett byggprojekt. Då betong används till, till exempel, bjälklag eller grundplatta måste den erhålla en viss relativ fuktighet innan golvbeläggningar kan påföras, för att fuktskador inte ska uppstå senare. En utförlig analys av de ”nyskapande” betongerna hade här varit intressant för att se vilka effekter detta ger på uttorkningstid och därför också praktisk tillämpbarhet.

Värmeutveckling är en aspekt som kan vara antingen positiv eller negativ. Då man har för hög värmeutveckling kan detta leda till sprickor om snabb avsvalning sker. Å andra sidan kan högre värmeutveckling vara positiv om man gjuter i minusgrader, då frostbildning i den härdande betongen hade kunnat vara förödande. Även här är det C$\bar{S}$A-betongen (C) som uppvisar den största värmeutvecklingen medan de andra är relativt lika. Då erfarenheten är stor kring användning av vanlig PC-betong hade ett skifte till, till exempel, LCCC-betong inte varit svår eftersom den termiskt uppför sig på ungefär samma sätt. Att istället använda C$\bar{S}$A-betong hade kunnat leda till problem, förmodligen först och främst i början av ett storskaligt användande. Då värmeutvecklingen är så pass mycket större kan det också vara svårare att exakt förutse vad som kommer att hända med betongen under avsvalnande.

De olika betongerna har, inte helt oförväntat, olika egenskaper vilka kan både gynna eller missgynna deras praktiska tillämpbarhet.

4.6 Kalorimeteri

Betong A uppvisar förväntat beteende av vanlig PC betong med toppar först vid initial reaktion samt de två topparna som kännetecknas av silikaternas reaktionstopp samt då sulfaterna förbrukats, beskrivet i kapitel 1.5.1. De två betongerna som innehåller tillsatsmaterial (B och D) uppvisar ungefär samma beteende med små variationer. Recept B når topparna någon timme senare är A dock är denna skillnad väldigt liten, maxvärdet är också lite reducerad vilket är rimligt då man ser till teorin (bland annat kapitel 1.5.3.1). Betong D verkar ha en något tidigarelagd reaktion jämfört med betong A, detta går emot den presenterade teorin (kapitel 1.5.3.5) och vad detta beror på är inte känt. Det som stämmer överens med teorin är de något lägre värdena som presenteras då båda topparna har lägre maxvärde än vad topparna för recept A har, vilket tyder på långsammare hydratation. Ytterlighetsfallet bland dessa recept är uppenbarligen recept C. Precis som för hållfastheten är energiutvecklingen förhållandevis mycket hög i de tidiga stadierna för att sedan dö ut nästan helt efter runt 2 dygn. En ytterligare skillnad är den mycket stora andra topp som denna betong uppvisar till skillnad från de andra. Då denna topp kännetecknas av förbrukningen av alla tillgängliga sulfater i betongen kan detta bero på den förhållandevis stora tillgång till dessa som är närvarande i C$\bar{S}$A-betonger.

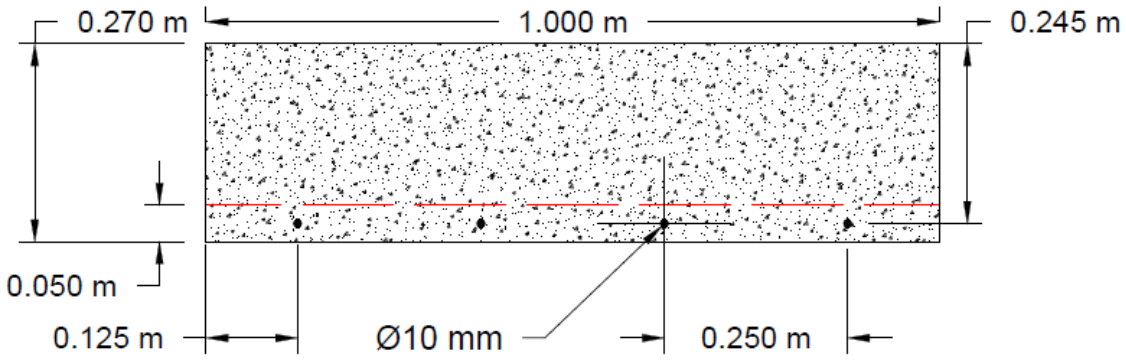
5 Beräkning

I detta kapitel presenteras beräkningsgången för två alternativa utformningar av ett mellanbjälklag i ett referensprojekt. Det huvudsakliga syftet här är att med konstruktionstekniska lösningar använda mindre mängd cement och därför också bespara utsläpp av koldioxidekvivalenter. Efter att förslag på utformning presenterats, vilka innefattar ett plattbärlag samt ett bjälklag uppbyggt av TT-kassetter, så utförs även en parameterstudie för dessa förslag där de olika parametrarnas effekt på mängden utsläppta koldioxidekvivalenter analyseras. Det som justeras förutom den parameter som är vald är mängd armering för att uppnå krav i brott- och bruksgränstillstånden.

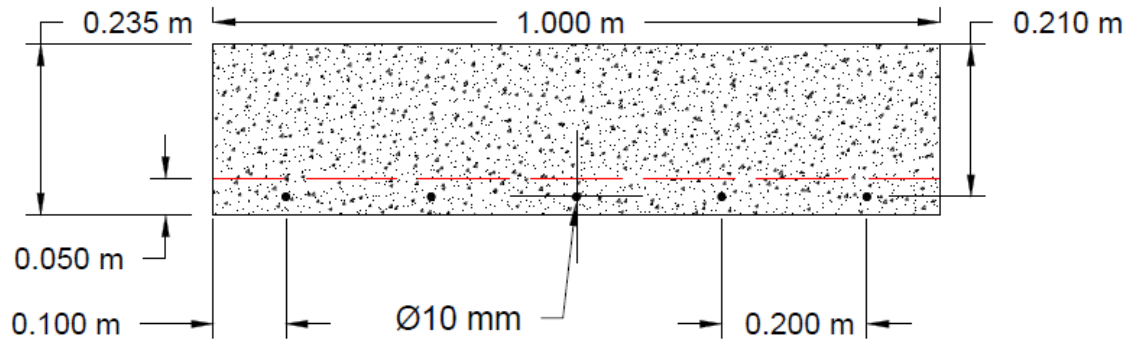
5.1 Referensprojekt

Den konstruktionsdel som valts att analyseras är ett bärande betongbjälklag i en verklig byggnad under konstruktion, detta då verklighetsförankring eftersträvades. Vilket projekt detta är kommer av sekretesskäl inte att redovisas. I de dokument som erhållits rörande referensprojektet från företaget ”PE teknik & arkitektur” konstrueras bjälklaget av fritt upplagda plattbärlag. Dessa armeras ytterligare vid behov för att sedan gjutas samman till en kontinuerlig platta. Plattan är kontinuerlig även över stöd. Avståndet mellan de bärande ytter- och innerväggarna är 6,33 meter. Det finns 4 bärande innerväggar och tillsammans med ytterväggarna blir detta totalt 6 stöd som plattan spänner över.

Bjälklagets totala dimension är cirka 13 m * 32,5 m * 0,27 m alltså 110 m^3 betong per våningsplan. Byggnaden har 4 våningsplan, då grunden av byggnaden inte analyseras lämnar detta 3 våningsplan uppbyggda av mellanbjälklag, alltså totalt 330 m^3 betong används i byggnaden till denna konstruktionsdel. Geometrin för bjälklaget per meter presenteras i figur 5.1 (i fält) och i figur 5.2 (över stöd).



Figur 5.1: Fälttvärsnitt på mellanbjälklag från referensprojekt



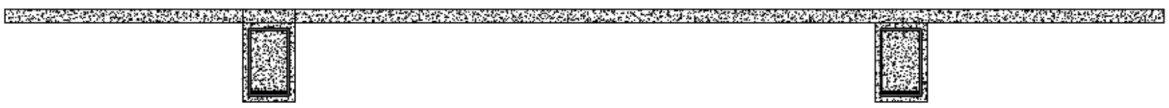
Figur 5.2: Stödtvärsnitt på mellanbjälklag från referensprojekt

Enligt erhållna dokument ingår mellanbjälklaget i exponeringsklass XC1, då gäller minsta $vct_{equ} < 0{,}90$ enligt Svensk Standard SS 137003:2015 [59]. Vid jämförelse med vanlig PC ger detta minsta hållfasthetsklass C20/25. I referensprojektet är det bestämt att den lägsta betongkvalitén som får ansättas är C30/37, förmodligen på grund av uttorkningstid. Vid förslag på alternativa möjligheter är C20/25 den lägsta hållfasthetsklass som kommer att användas.

5.1.1 Förslag

Förslaget på alternativt utförande av plattbärlag ämnar förändra betongkvalité samt geometri för bjälklaget, men liknar annars referensprojektets utförande till stor del. Den platta som prefabriceras initialt är 5 cm tjock.

För TT-kassetten presenteras generell tvärsnittsutformning i figur 5.3. Kassetterna antas ligga fritt upplagda över 2 stöd och med samma spännvidd som plattbärlagens facklängd (6,33 m), vilket är avståndet mellan de bärande väggarna i byggnaden.



Figur 5.3: Tvärsnittsutformning av TT-kassett

5.2 Metod

Beräkningarna utförs enligt gällande regelverk, Eurocode, och värden och formler är först och främst tagna från Eurokod 2 - Dimensionering av betongkonstruktioner [54] samt *Betongbyggnad* av Björn Engström [58]. Beräkningarna har till största del utförts i Excel för att underlätta enkel korrigering av de ingående parametrarna.

5.2.1 Koldioxidekvivalenter

För 3 av de 4 betongrecepten erhålls koldioxidekvivalenter för dessa från tabell 1.1. För betong B (vilken är 80 % PC och 20 % slagg) beräknas koldioxidekvivalenten som procentuell massvikt multiplicerat med koldioxidekvivalenten för beståndsdelarna. Erforderligt vct, vct_{eff}, enligt ekvation 1.1. K-värdet för slagget ansätts till 0,6 enligt kapitel 1.5.3.1, för kalksten-kalcinerad lera finns det ännu inget värde enligt SIS och eftersom den exakta fördelningen är okänd beräknas dess vct_{eff} inte. Dessa värden redovisas i tabell 5.1. Observera att de bindemedel som används här inte nödvändigtvis överensstämmer exakt med de som används under mätningarna, värdena är hämtade från publika källor för produkter som till stor del liknar de som använts. Koldioxidekvivalentvärdet för cement till recept A (Tabell 5.1) är det som används när de konstruktionstekniska alternativen analyseras. Det antas alltså att betongen tillverkas med ett cement likvärdigt Cementas "byggcement" sett till miljöpåverkan (enligt kapitel 1.4.1).

Tabell 5.1: Koldioxidekvivalenter per tillverkat ton cement samt effektivt vct

Recept	Koldioxidekvivalenter per ton	vct_{eff}
A	759 kg	0,44
B	637 kg	0,48
C	530 kg	0,44
D	599 kg	-

Koldioxidekvivalent har även tagits fram för stålarmering för att jämföra med betong. I de förslag som presenteras måste oftast den minskning av betong som förslagen innebär balanseras med större andel armering, därför krävs även denna siffra för att denna jämförelse ska bli rättvis. Den redovisas i tabell 5.2. Fossila bränslen står för största delen av dessa utsläpp, cirka 96,5 % och resterande 3,5 % står bio-bränsle för.

Tabell 5.2: Koldioxidekvivalent per tillverkat ton stål

	Koldioxidekvivalenter per ton
Stålarmering	410 kg

Vid beräkning av besparing för de olika alternativen, vilka redogörs för nedan, beräknas både procentuell minskning av betongvolym (vilket sedan kan kopplas till en cementmängd) samt minskning av cementmängd som följd av reducerad hållfasthetsklass. Det senare görs förenklat med hjälp av det referensrecept som tillverkades vid mätningen samt förhållandet mellan hållfasthet och vct enligt figur 1.8. Skillnaden i vct kan härledas till en cementviktskillnad mellan de två aktuella betongerna då övriga beståndsdelar antas vara samma som det som presenteras i tabell 2.2 (A). Då kompaktdensiteter ansätts på stenmaterialet (2700 kg/m^3) samt cementen (2800 kg/m^3) kan även besparing per kubikmeter producerad betong erhållas, vilket anses vara det intressanta. Då beräknas först hur stor vikt cement som hade besparats i ett prov av samma storlek som referensreceptet vilket sedan kan härledas till viktminskning per kubikmeter. Då kompaktdensiteter används ansätts även rimlig porositet för betong för att ta hänsyn till att den vikt som ger 1 kubikmeter beståndsdelar ger mer än 1 kubikmeter färdig betong (20 % porositet används).

5.2.2 Laster

Laster som varierar i rummet delas in i bunden last och fri last. Den bundna lasten har en entydig bestämd fördelning över konstruktionen medan den fria lasten har en godtycklig fördelning över konstruktionen. Laster som varierar över tid delas in i tre olika grupper, permanent last, variabel last och olyckslast. Här undersöks endast permanent samt variabel (i detta fall endast nyttig) last.

Egentyngen beskriver hela konstruktionens tyngd där val av material avgör hur stor egentyngden blir, egentyngden klassificeras som en permanent last. Tungheten för material är därför en viktig aspekt och finns att hitta i handböcker och produktblad. Densiteten, ρ_b, för betongen ansätts till 2400 kg/m^3, därmed beräknas den karakteristiska egentyngden fram genom ekvation 5.1.

$$G_k = \rho_b * g * h * b \tag{5.1}$$

Den nyttiga lasten består av bl.a. fast inredning, personlaster och extrema laster. I inredning räknas bl.a. möbler och flyttbara väggar, dessa laster ändras sällan under byggnadens livstid. Extrema laster är speciella situationer som t.ex. folksamlingar eller om tillfälliga möbler sätts in. Då bjälklaget, som nämnt, ingår som konstruktiondel i ett bostadshus ansätts den karakteristiska nyttiga lasten, q_k, till 2 kN/m^2 enligt Eurocode. Då bjälklaget fungerar som konstruktiondel, men ej stomstabiliserande, i ett bostadshus ansätts säkerhetsklass II vilket ger reduktionsfaktorn γ_d=0,91.

5.2.3 Geometriska beräkningar för TT-kassett

Utöver den beräkningsgång som presenteras nedan beskrivs här först de ytterligare geometriska beräkningar som krävs för TT-kassetten. Först bestäms erforderligt täckskikt för längsarmeringen och tvärkraftsarmeringen enligt ekvation 5.2 där $c_{min} = \phi_{armering}$ och $c_{dev} = 10$ mm

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \tag{5.2}$$

Täckbehovet från underkant samt från sidorna till längsarmeringen beräknas enligt ekvation 5.3.

$$c = max\begin{pmatrix} c_{nom,tvär} \\ c_{nom,längs+\phi_{tvär}} \end{pmatrix} \tag{5.3}$$

Den effektiva höjden, d, beräknas från tryckt kant till armerings tyngdpunkt. Armeringen placeras i flera lager vid behov.

Den effektiva flänsbredden, b_{eff}, beräknas enligt ekvation 5.4. Se avsnitt 5.3.2 i Eurocode.

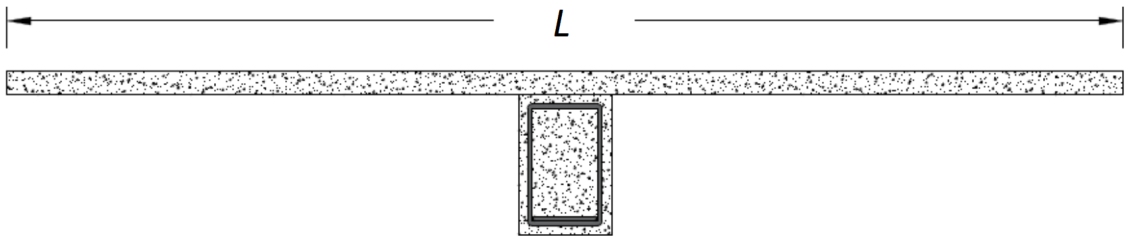
$$b_{eff} = \sum b_{eff,i} + b_w \leq b \tag{5.4}$$

där $b_{eff,i}$ är den effektiva flänsbredden på en sida om livet, b_w är bredden på livet och b är facklängden. Den effektiva flänsbredden, $b_{eff,i}$, beräknas enligt ekvation 5.5, där l_0 är avståndet mellan momentnollpunkter.

$$b_{eff,i} = 0,2b_i + 0,1l_0 \leq 0,2l_0 \tag{5.5}$$

5.2.4 Brottgränstillstånd, ULS

I brottgränstillståndet beräknas den dimensionerande lasten som det största värdet av ekvation 5.6 enligt lastfall STR-B (ekvation 6.10a) eller ekvation 5.7 enligt lastfall STR-B (ekvation 6.10b) i EC2. Den kombination som blir störst indikerar om den permanenta- eller nyttiga lasten är dominerande. Första termen i ekvationerna avser den permanenta lasten och betecknas q_g när den används senare, på samma sätt betecknas den andra termen, den nyttiga, som q_n. γ_d är, som nämnt, en reduktionsfaktor vilken bestäms av konstruktionsdelens säkerhetsklass och ψ är en lastreduktionsfaktor vilken bland annat tar hänsyn till huvudlast och övriga laster. Då permanent last dominerar används ekvation 5.6 och vid dominerande nyttig last används ekvation 5.7. Beräkningarna utförs per meter bjälklag för plattbärlaget och för ett fack, enligt figur 5.4, för TT-kassetten (notera att facklängd för TT-kassetten inte är orienterad längs samma axel som facklängden för plattbärlaget, facklängden för plattbärlaget beskriver den kontinuerliga plattans avstånd mellan bärande väggar).



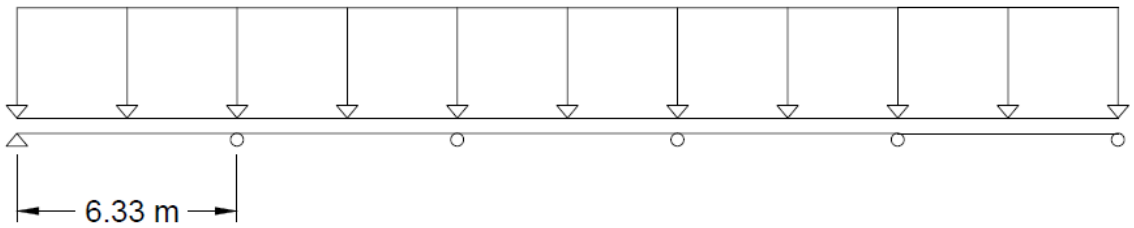
Figur 5.4: Definition av en facklängd för TT-kassetten

$$q_{tot} = \gamma_d * 1,35 * G_k + \gamma_d * 1,5 * \psi_0 * q_k \tag{5.6}$$

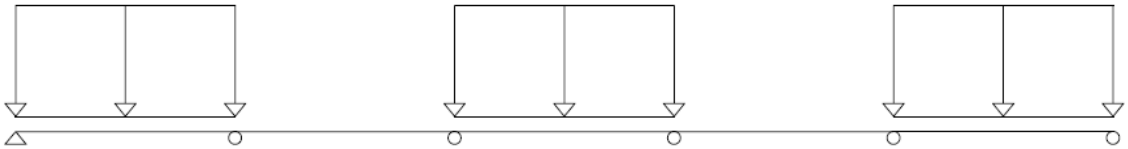
$$q_{tot} = \gamma_d * 1,2 * G_k + \gamma_d * 1,5 * q_k \tag{5.7}$$

Egentyngden för plattbärlaget kommer att beräknas som en utbredd last över 5 fack (figur 5.5), för den nyttiga lasten kommer det fall som ger störst moment i fält respektive över stöd att väljas. Detta kan ses i figur 5.6 och 5.7 respektive.

$$M_{max,i} = (konstant_{g,i} * q_g * l^2) + (konstant_{n,i} * q_n * l^2) \tag{5.8}$$



Figur 5.5: Lastfall för egentyngden



Figur 5.6: Värst lastfall för nyttig last i fält

Figur 5.7: Värst lastfall för nyttig last i stöd

TT-kassetten beräknas som fritt upplagd över två stöd med samma avstånd som för plattbärlaget (6,33 meter). Ekvation för dimensionernade moment för detta lastfall presenteras i ekvation 5.9

$$M_{max} = \frac{qL^2}{8} \tag{5.9}$$

Beräkningarna för de två förslagens momentkapacitet beräknas genom att ställa upp kraft- och momentjämvikt i tvärsnittet. I beräkningarna antas en bilinjär arbetskurva med horisontell övre gren för armeringsstålet och ett rektangulärt tryckblock i betongen. Kraftjämvikts- och momentjämviktsekvationen redovisas i ekvationerna 5.10 och 5.11. Där A_s är arean på armeringen, σ_s är dragspänningen i armeringen, f_{cd} är tryckhållfastheten i betongen, x är läge för neutrala lagret och b är betongtvärsnittets bredd. Observera att rektangulärt tryckblock används även för TT-kassetter och att detta kan leda till beräkningsfel då tryckblocket är djupare än flänstjockleken, vilket måste kontrolleras.

$$A_s * \sigma_s = f_{cd} * 0,8 * x * b \tag{5.10}$$

$$M_{kap} = f_{cd} * 0,8 * x * b * (d - 0,4 * x) \tag{5.11}$$

Ifall armeringen flyter (segt brott) kontrolleras genom ekvation 5.12.

$$\varepsilon_s \geq \varepsilon_{sy} \tag{5.12}$$

där töjningen i stålet, ε_s, beräknas genom ekvation 5.13. ε_{cu} är brottstukning för betong och gäller för betongkvalitéer med karakteristisk hållfasthet som är lika med eller understiger 50 MPa. x är neutrallagrets läge.

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu}\frac{d-x}{x} \tag{5.13}$$

och flyttöjningen i stålet, ε_{sy}, beräknas genom ekvation 5.14. E_s är elasticitetsmodulen för armeringen och f_{yd} är armeringens sträckgräns.

$$\varepsilon_{sy} = \frac{f_{yd}}{E_s} \tag{5.14}$$

5.2.5 Bruksgränstillstånd, SLS

Beräkning av nedböjning utförs för två olika lastkombinatationer, karakteristisk och kvasi-permanent. Karakteristisk avser en permanent skada (irreversibelt gränstillstånd) då en stor last angriper konstruktionen (50-årslast) och kvasi-permanent avser utböjning från långtidslast (tidsmedelvärde), vilket till exempel kan ge effekt på bjälklagets utseende. Den karakteristiska och kvasi-permanenta lastkombinationen redovisas i ekvation 5.15 respektive 5.16.

$$q_{tot} = 1 * G_k + 1 * q_k \tag{5.15}$$

$$q_{tot} = 1 * G_k + \psi_2 * q_k \tag{5.16}$$

De skillnader som finns mellan beräkning av den karakteristiska lastkombinationen och den kvasi-permanenta är momentet av lasterna samt den effektiva elasticitetsmodulen, $E_{c,ef}$. $E_{c,ef}$ beräknas enligt ekvation 5.17 (jämför med ekvation 5.23 där $E_{c,ef}$ används vid beräkning av kvasi-permanenta laster istället för E_{cm}). φ_{∞,t_0} är kryptalet vilket bestäms enligt figur 3.1 i EC2 [60].

$$E_{c,ef} = \frac{E_{cm}}{1+\varphi_{\infty,t_0}} \tag{5.17}$$

Kravet för maximal nedböjning i projektet är ansatt till l/400 dock max 15 mm. Längden mellan stöd för bjälklaget är som nämnt 6,33 m. Detta ger $v_{max} = 15{,}8$ mm således begränsas nedböjningen till $v_{max} = 15$ mm. För att beräkna nedböjningen för bjälklaget kommer lastfall med två upplag och en utbredd last att användas, formeln presenteras i ekvation 5.18. Detta är en förenkling på säkra sidan för plattbärlaget

eftersom det kommer ge en utböjning som är något större än vad den hade varit i verkligheten.

$$v_{max} = \frac{5ql^4}{384 * EI} \tag{5.18}$$

Nedböjning delas in i två delar: stadium I, osprucket tvärsnitt, och stadium II, sprucket tvärsnitt. Böjstyvheten, EI, delas därför in i $(EI)_I$ och $(EI)_{II}$ för stadium I respektive stadium II. Detta ger två ekvationer för nedböjningen som redovisas i ekvation 5.19 och 5.20.

$$v_{max,I} = \frac{5ql^4}{384 * (EI)_I} \tag{5.19}$$

och

$$v_{max,II} = \frac{5ql^4}{384 * (EI)_{II}} \tag{5.20}$$

Ekvation 5.21 visar hur böjstyvheten beräknas i stadium I. Vid karakteristiskt lastfall (korttids-) antas inga reduktioner på elasticitetsmodulen. Vid kvasi-permanenta deformationer måste dock effekter som, till exempel, krypning och dess påverkan på betongens elasticitetsmodul tas hänsyn till. Vilken inverkan detta får på betongens elasticitetsmodul beskrevs ovan enligt ekvation 5.17.

$$(EI)_I = E_{c,ef} * I_{tot} \tag{5.21}$$

För att beräkna tröghetsmomentet, I, i stadium 1 och 2 bestäms neutrala lagrets läge med hjälp av tyngdpunktsberäkningar. I stadium 1 bortses det från tillskottet från armeringen eftersom detta bidrag är så pass litet, beräkningen utförs således för hela betongtvärsnittet. I stadium två antas all betong under neutrala lagret vara sprucket och bortses därför från, den tryckta betongdelen balanseras således av den dragna armeringen och beräkningen utförs för dessa ekvivalenta areor. Båda tvärsnitten är i båda stadierna symmetriska kring en systemlinje vilken går lodrätt genom mitten av kroppen, den globala tyngdpunkten behöver därför endast bestämmas längs en axel. Tyngdpunkten beräknas enligt 5.22 där A_{cc} är betongarea, z är avstånd från neutrallager till tryckt kant, z_s är avståndet från den dragna armeringens mittpunkt till neutrallagret. A_s är armeringsarea och α är en faktor som tar hänsyn till betongen och stålets annorlunda elasticitetsmoduler (enligt ekvation 5.23 och även ekvation 5.17 i kvasipermanent tillstånd).

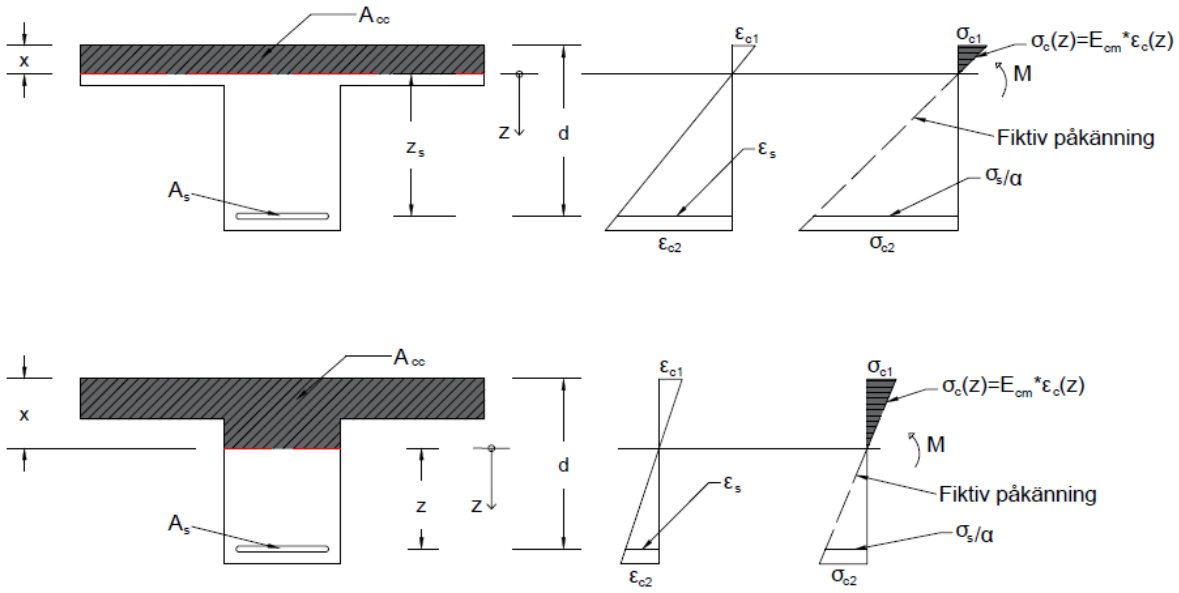
$$\int_{Acc} z * dA + z_s * \alpha A_s = 0 \tag{5.22}$$

$$\alpha = \frac{E_s}{E_{cm}} \tag{5.23}$$

Tröghetsmomentet i stadium 1 kan därefter bestämmas med hjälp av Steiners sats enligt ekvation 5.24. I_I är totalt tröghetsmoment, b är bredd (b_{eff} för TT-kassetten och 1 för plattbärlaget), h är höjd på avsedd tvärsnittsdel, A är area för avsedd tvärsnittsdel och d är avstånd från lokal till global tyngdpunkt.

$$I_I = \sum (\frac{bh^3}{12} + Ad^2) \tag{5.24}$$

För TT-kassetten kontrolleras det om tryckzonen sträcker sig ner i livet eller ej, detta påverkar hur tröghetsmomentet beräknas. I figur 5.8 visas de två alternativen.



Figur 5.8: Spänningsfördelning för TT-tvärsnitt beroende av längd på tryckzon

Tröghetsmomentet i stadium 2 kan sedan bestämmas enligt ekvation 5.25, vilket är en omskrivning av Steiners sats (jämför med ekvation 5.24). I_{II} är tröghetsmomentet i stadium 2, b är effektiv flänsbredd för TT-kassetten och 1 för plattbärlaget, x är tryckzonens höjd, A_s är armeringens area och d är den effektiva höjden.

$$I_{II} = \frac{bx^3}{3} + \alpha A_s(d-x)^2 \tag{5.25}$$

När dessa tröghetsmoment har tagits fram kan utböjningen bestämmas enligt ekvation 5.19 och 5.20, fördelningskoefficienten, ζ, som beaktar dragspänningar i betong mellan sprickor beräknas enligt ekvation 5.26 och total nedböjning beräknas därefter enligt ekvation 5.27.

$$\zeta = 1 - \beta * \frac{M_{cr}}{M} \tag{5.26}$$

$$v_{max,tot} = \zeta * v_{max,II} + (1 - \zeta) * v_{max,I} \tag{5.27}$$

Där sprickmomentet, M_{cr}, beräknas enligt ekvation 5.28. f_{ctm} är medelvärdet på draghållfastheten för betongen och W är böjmoståndet för betongen.

$$M_{cr} = f_{ctm} * W \tag{5.28}$$

5.2.6 Parameterstudie

Då parameterstudien utförs används det ett ”referenstvärsnitt” som grund för beräkningarna. För plattbärlaget är detta referensprojektets utformning för bjälklaget och för TT-kassetten är referenstvärsnittet det förslag som presenteras i kapitel 6.2. En parameter varieras åt gången. För plattbärlaget är detta betongkvalité samt pågjutningens höjd. För TT-kassetten varieras betongkvalité, facklängd (se figur 5.4) samt livhöjd. De resultat för besparing av koldioxidekvivalenter som sedan erhålls från beräkningarna redovisas som procentuell förändring jämfört med referenstvärsnittet.

6 Beräkningsresultat

I detta kapitel presenteras geometri samt de intressanta parametrar som erhållits från beräkningarna för de bjälklagsförslag som föreslås som alternativ till referensprojektets plattbärlag.

6.1 Alternativ: Plattbärlag

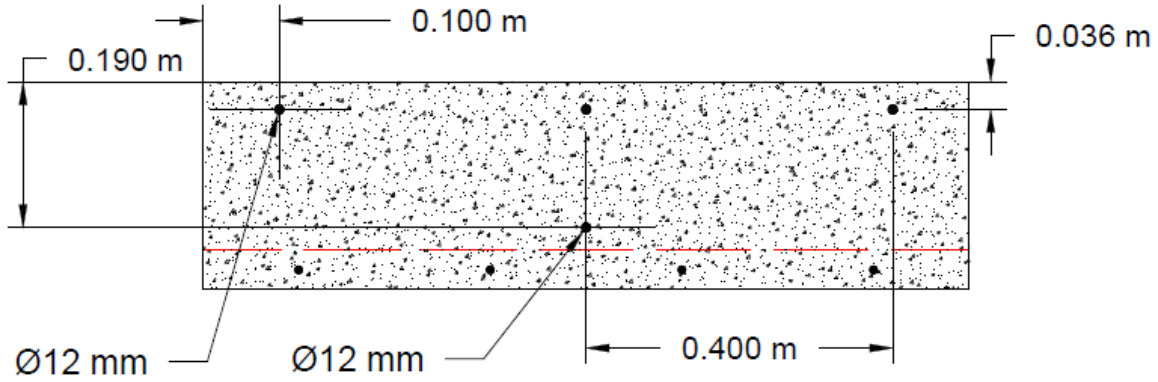
Ett förslag på alternativt utförande med samma typ av plattbärlag presenteras här. Värden som erhållits från beräkningarna presenteras i tabell 6.1. I figur 6.1 och 6.2 visas de optimerade tvärsnitten samt ingående geometri för bjälklaget i fält respektive stöd. Lägsta hållfasthetsklass som enligt standard får användas till denna konstruktionsdel med exponeringsklass XC1 är, som nämnt, C20 [59]. Beräkningar med denna hållfasthetsklass gav stora utböjningar vid kvasi-permanenta laster. Förslaget som presenteras är därför utfört med betong av hållfasthetsklass C25, enligt figur 1.8 stämmer detta ungefär överens med ett vct på 0,8 för betongen (krävs för beräkning av cementmängd).

Tabell 6.1: Optimerade resultat för plattbärlag med betongkvalité C25 över 5 fack

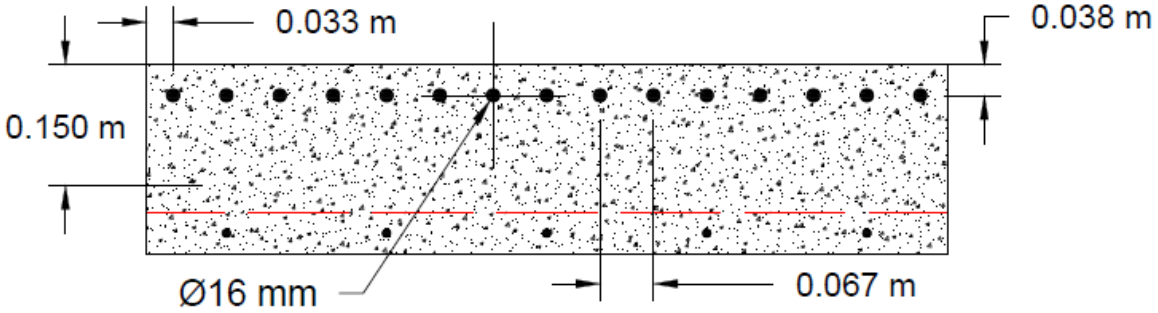
Höjd pågjutning	h	0,185 m
Total höjd	h_{tot}	0,235 m
Egentyngd	G_k	5,8 kN/m^2
Nyttig last	Q_k	2,0 kN/m^2
Fältarmering i underkant	A_s	5*10ϕ mm^2
Maxmoment av laster i fält	$M_{max,f}$	29,8 kNm
Momentkapacitet i fält	$M_{kap,f}$	35,0 kNm
Stödarmering i överkant	A_s	16*16ϕ mm^2
Maxmoment av laster i stöd	$M_{max,s}$	39,7 kNm
Momentkapacitet i stöd	$M_{kap,s}$	41,9 kNm
Nedböjning, karakteristisk (fält)	$v_{max,tot}$	13,9 mm
Nedböjning, kvasi-permanent (fält)	$v_{max,tot}$	13,0 mm

Hur stor besparing av koldioxidekvivalenter som detta innebär för aktuellt alternativ redovisas i tabell 6.2.

I hela byggnaden skulle detta innebära en besparing på cirka 23,3 ton koldioxidekvivalenter som resultat av mindre använd cement. Utöver minskningen som cementreduktionen bidrar med så leder den ökade mängden armering till ökade utsläpp av koldioxidekvivalenter från stålproduktion. Skillnaden i utsläpp från denna källa mellan detta förslag och referensprojektet blir cirka 3,2 ton fler koldioxidekvivalenter. Faktisk besparing är alltså cirka 20,1 ton koldioxidekvivalenter.



Figur 6.1: Optimerad fälttvärsnitt



Figur 6.2: Optimerad stödtvärsnitt

Tabell 6.2: Besparade koldioxidekvivalenter för alternativ: Plattbärlag

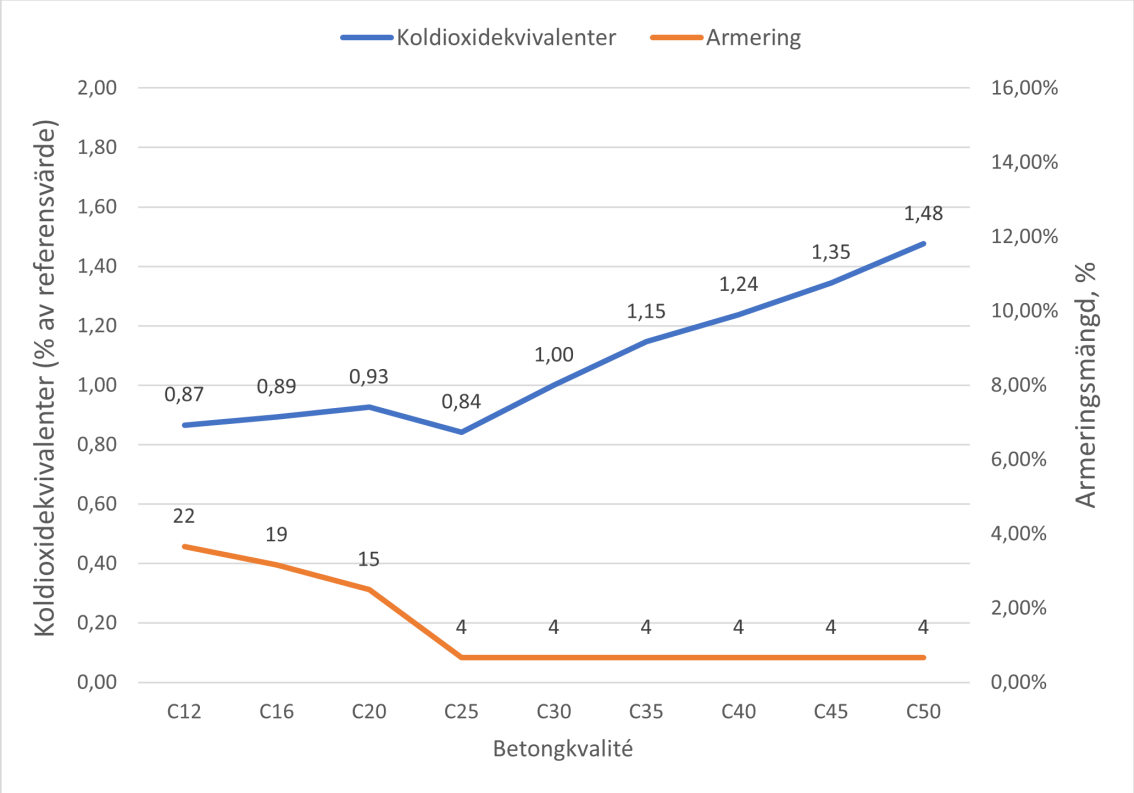
Resultat av förändrat vct	-
Minskning av cement/m^3 betong, kg	besparade CO^2ekvivalenter, kg/m^3
54,6	41,5
Resultat av minskad betongmängd	-
Minskning av cement/m^3 betong, kg	besparade CO^2ekvivalenter, kg/m^3
38,5	29,2
Totalt	-
93,1	70,7
Procentuell förändring, %	-
26,2	-

6.1.1 Parameterstudie

I parameterstudien för detta förslag presenteras vilken effekt att variera betongkvalitén samt pågjutningshöjden har på mängden koldioxidekvivalenter i hela byggnaden, för att underlätta för jämförelse med andra förslag. I referensprojektet användes C30 som betongkvalité och 0,27 m som höjd, vid ändring av betongkvalité kommer höjden att vara konstant (0,27 m) och vid höjdändring kommer betong av typ C30 att användas. För detta förslag valdes det att endast analysera plattbärlaget i fält där utböjning, till skillnad från i stöd, också är en dimensionerande parameter.

Resultaten för utsläpp av koldioxidekvivalenter redovisas i figur 6.3 och 6.4. Då ingående betongkvalitéer samt den geometriska höjden varierades förändrades även antal armeringsjärn som krävdes för att uppnå krav på momentkapacitet (segt verkningsätt uppnåddes vid beräkning för alla variationer) samt utböjning. Armeringsmängden presenteras i figurerna med den enhetslösa variabeln ρ vilken beräknas enligt ekvation 6.1. De armeringsstänger som användes i beräkningarna har diametern 10 mm.

$$\rho = \frac{A_s}{b * d} \tag{6.1}$$



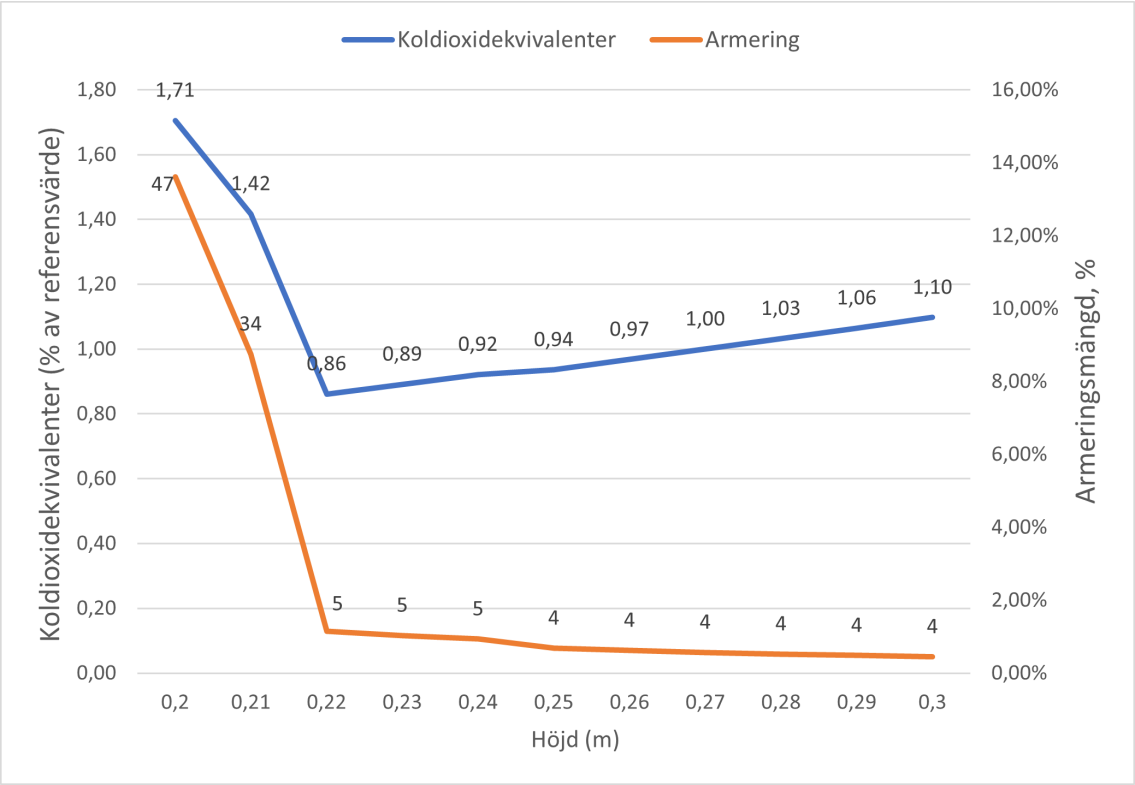
Figur 6.3: Koldioxidekvivalenter vid ändring av betongkvalité samt armeringsmängd

6.2 Alternativ: TT-kassett

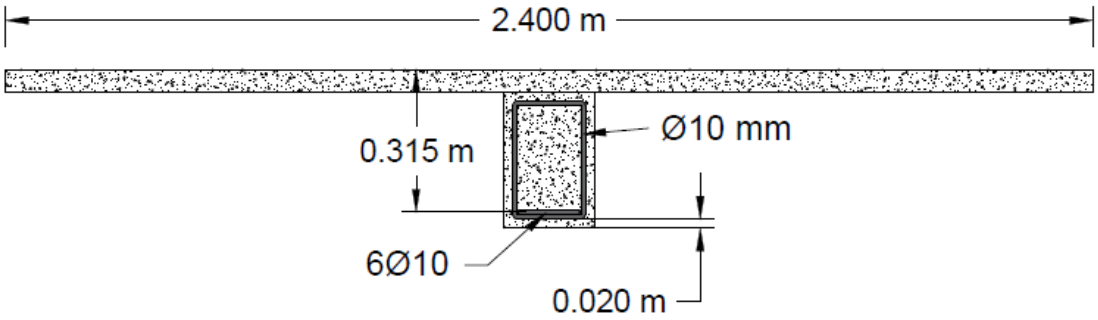
Utförande med alternativ geometri, TT-kassett presenteras här. Värden som erhållits från beräkningarna presenteras i tabell 6.3. I figur 6.5 visas tvärsnittet. På grund av mycket reducerad mängd använd betong och således mindre egentyngder blir utböjningen för denna typ av bjälklag mindre, betong av kvalité C20 (vct 0,9) kan därför användas här.

Hur stor besparing av koldioxidekvivalenter som detta innebär för aktuellt alternativ redovisas i tabell 6.4.

I hela byggnaden skulle detta innebära en besparing på cirka 68,7 ton koldioxidekvivalenter. Detta förslag innebär också minskat armeringsbehov, cirka 1,2 ton koldiox-



Figur 6.4: Koldioxidekvivalenter vid höjdändring samt armeringsmängd



Figur 6.5: TT-kassettens tvärsnitt

idekvivalenter sparas på detta vis. Totalt blir besparingen alltså 69,9 ton koldioxidekvivalenter.

6.2.1 Parameterstudie

Likt för plattbärlagsförslaget utförs en parameterstudie för detta förslag. Här analyseras tre parametrar, nämligen betongkvalité, facklängd samt livhöjd på TT-kassetten. Referensvärdena från det ovan presenterade förslaget används som grund, det vill säga då en parameter ändras hålls de andra konstanta. Även här presenteras resultatet som totalt utsläpp av koldioxidekvivalenter för hela byggnadens bjälklag. Resultaten redovisas i figur 6.6 och här kan det även ses hur armeringsmängden förändras, vilken likt för plattbärlaget beräknas enligt ekvation 6.1. Armeringsstängerna har diametern 10

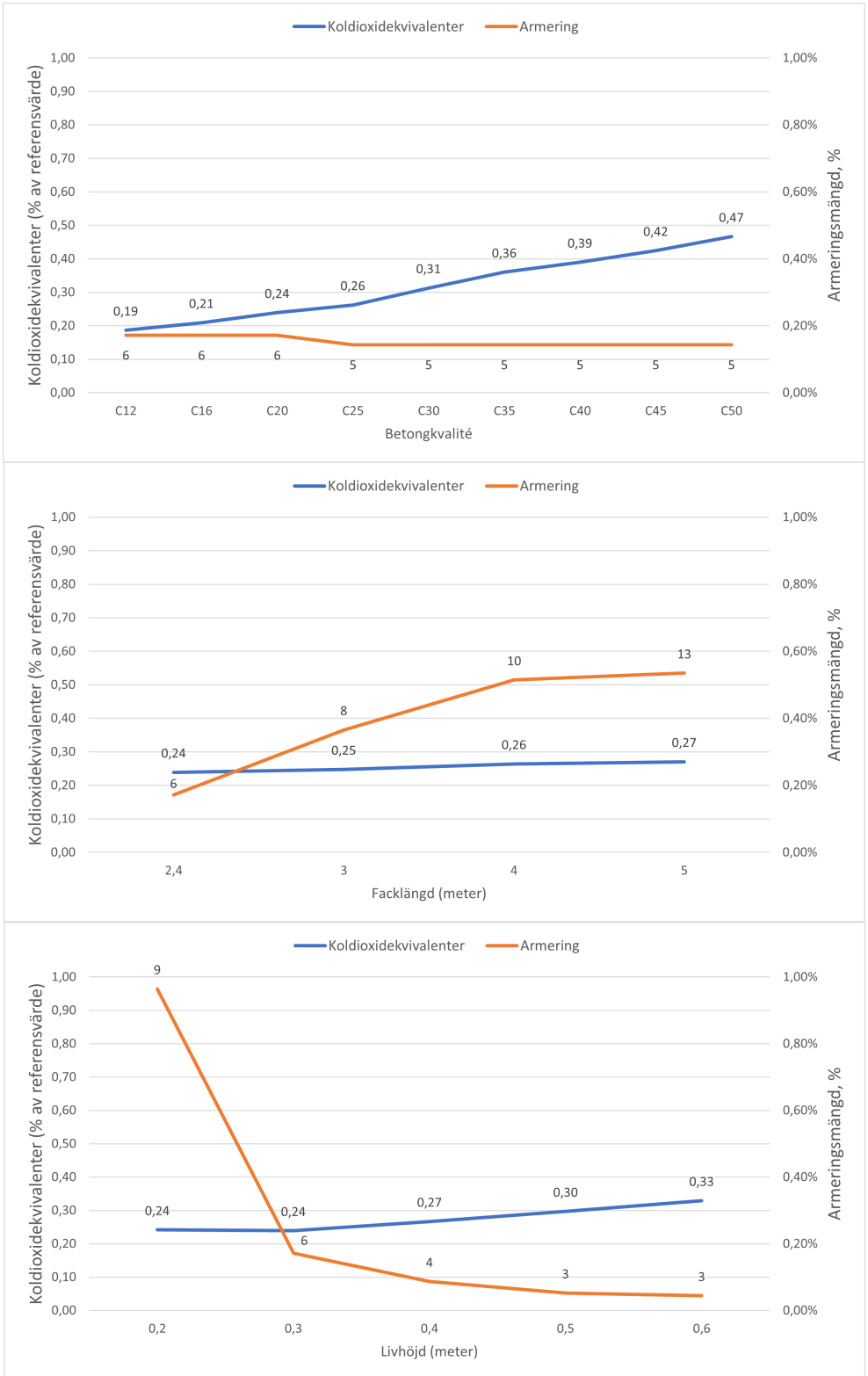
Tabell 6.3: Optimerade resultat för TT-kassett med betongkvalité C20, notera att beräkningarna är utförda för ett fack och sedan omvandlat till per meter för att underlätta jämförelse med plattbärlaget

Flänshöjd	f_h	0,05 m
Effektiv flänsbredd	b_{eff}	1,94 m
Livbredd	l_b	0,2 m
Livhöjd	l_h	0,3 m
Facklängd	L	2,4 m
Egentyngd	G_k	1,1 kN/m^2
Nyttig last	Q_k	2,0 kN/m^2
Armering i liv	A_s	$6\phi 10$
Maxmoment av laster per meter	M_{max}	19,6 kNm
Momentkapacitet per meter	M_{kap}	26,9 kNm
Nedböjning, karakteristisk	$v_{max,tot}$	11,8 mm
Nedböjning, kvasi-permanent	$v_{max,tot}$	9,4 mm

Tabell 6.4: Besparade koldioxidekvivalenter för alternativ: TT-kassett (Betong)

Resultat av förändrat vct	-
Minskning av cement/m^3 betong, kg	besparade CO^2ekvivalenter, kg/m^3
81,9	62,2
Resultat av minskad betongmängd	-
Minskning av cement/m^3 betong, kg	besparade CO^2ekvivalenter, kg/m^3
192,2	145,9
Totalt	-
274,1	208,1
Procentuell förändring, %	-
77,1	-

mm med undantag för de 9 stänger i parameterstudien där livhöjden varierades (0,2 meter), vilka hade diametern 16 mm.



Figur 6.6: Resultat av parameterstudien för TT-kassetten

7 Analys & diskussion: beräkningar

7.1 Beräkningar

Syftet med beräkningarna var att optimera själva mellanbjälklaget för att kunna minska användandet av cement. Detta uppnåddes på två sätt:

- Minskning av mängden cement per andel betong genom lägre hållfasthetsklass
- Minskning av betongvolym i bjälklaget - genom att antingen sänka höjden eller använda alternativa geometriska utformningar

För de alternativ som presenteras kommer hållfasthetsklassförändringen eller reducering av använd betong på grund av geometriförändring att vara dominerande med avseende på reducerat PC-användande. För plattbärlagsföslaget är det hållfasthetsförändringen som ger störst besparing medan för TT-kassetten är det reduceringen av mängd använd betong som ger störst besparing. Hållfasthetsklassen har här den nackdelen att det även kommer att leda till förlängd uttorkningstid medan ett mindre tvärsnitt ger förkortad tid.

Uttorkningstid har mycket stor effekt på kostnad i ett byggprojekt och är ofta avgörande vid val av betongkvalité. Lägre vct ger snabbare uttorkning eftersom större andel av vattnet binds kemiskt och då inte behöver transporteras genom och ur betongen. Denna aspekt förbigås vid beräkningarna och det som undersöks är istället vad som hade varit konstruktionstekniskt möjligt och vilka positiva effekter detta kan ge miljömässigt. I verkligheten hade en avsevärd förlängning av uttorkningstiden fördyrat projektet. Idag kan den ökade materialkostnaden för cementet relativt enkelt motiveras med besparingar kopplade till kortare byggtider och därför väljs betonger med lågt vct, idag hade det inte varit ekonomiskt gångbart för ett företag att bygga med endast fokus på miljövänlighet.

7.1.1 Plattbärlag

Exponeringsklassen för plattbärlag i projektet är XC1 och därför får betongkvalitén som lägst vara C20 som nämnt tidigare i kapitel 5.1. I referensprojektet används betong av typ C30, resultatet från de beräkningar som utförts tyder dock på att det går att sänka betongkvalitén till C25. För att gå ner till betongkvalité C25 måste dock armeringsmängden öka både i fält och stöd. I fält behövs ett ytterligare armeringsjärn, per meter, i underkant med samma storlek. I stöd måste armeringen i överkant ökas från 12 till 16 mm i diameter och antalet ökas från 3 armeringsjärn till 16. I underkant går det att göra en minskning från 5 till 4 armeringsjärn, de som är ingjutna i plattbärlaget räcker för att bära lasterna. Den större mängd betong som besparas i

förhållande till den ökade mängden armering leder dock ändå till en miljövänlig besparing. Total besparing av betong som resultat av minskning av pågjutningens höjd är $\frac{0,27-0,235}{0,27} = 13,0$ %. Detta ger 13,89 m^3 besparad betong per våning och 41,66 m^3 på hela byggnaden. Besparing av koldioxidekvivalenter genom dessa åtgärder blev totalt 20,1 ton.

Resultatet visar på att nedböjningen i detta fall var dimensionerande. Sänkning av höjden påverkade nedböjningen i större skala än momentkapaciteten. I slutändan blev nedböjningen, för detta förslag, i karakteristisk och kvasi-permanent, 13,9 mm respektive 13,0 mm. Jämför man endast momentkapaciteten av bjälklaget med maxmomentet från lasterna visade det sig att man kunde gå ner till C12 i betongkvalité. Att detaljstyra betongkvalité för de olika ingående konstruktionsdelarna är ett mer komplicerat förfarande då det ger större utrymme för misstag och förseningar. Enklare är att lokalisera den del som kräver "bäst" betong (högst hållfasthetklass, sämst ur miljösynpunkt) och sedan använda denna betongkvalité på alla delar. Eftersom detta förslag består av ett plattbärlag, vilket innebär platsgjutning, så är detta ett problem som denna typ av bjälklag lider av. Förmodligen är detta, tillsammans med uttorkningstider, en stor anledning till att detta oftast inte görs.

Då höjden på mellanbjälklaget sänks något krävs en utvärdering om detta förslag ändå uppfyller de andra kraven som finns, till exempel krav på akustik och brandskyddskrav. Ifall de inte uppfylls krävs andra åtgärder, till exempel, inklädnad av innertaket för att uppnå ljudreducering genom bjälklaget. Detta kan då leda till att tjockleken på mellanbjälklaget totalt sett ökar, inte minskar som man först kan tro, vilket ger upphov till andra problem.

Parameterstudien visade att sänkning av betongkvalité från C30 till C25 minskade utsläpp av koldioxidekvivalenter med 17 % och höjdminskning från 0,27 m till 0,235 m minskade utsläpp av koldioxidekvivalenter med 12 %. Minskades betongkvalitén ytterligare till C20, C16 och C12 ökades antal armeringsjärn per meter från 4 till 15, 19 respektive 22 stycken. Det visade att den procentuella minskningen av utsläpp av koldioxidekvivalenter avstannade något på grund av de tillagda armeringsjärnen. Det alternativ som genererar minst koldioxidekvivalenter vid höjdändring var när plattbärlagret har höjden 0,22 m, efter detta är armeringsmängden konstant och det enda som förändras är en konstant ökning av betongmängd (varför linjen efter detta är rak i figur 6.4). Sänks höjden ytterligare kommer det att generera mer utsläpp, detta beror på ökningen av armeringsjärn. Det krävs totalt 34 och 47 stycken per meter för höjd 0,21 m respektive 0,20 m. Att använda höjden 0,22 m på bjälklaget gick dock inte att uppnå samtidigt som man sänkte betongkvalitén, vilket var varför denna höjd inte presenterades i alternativet.

7.1.2 TT-kassett

Resultaten från beräkningarna visade att med detta alternativ kunde mycket stora mängder betong besparas, drygt 240 m^3 över hela byggnaden. Då bjälklagets geometri jämförs med det rektangulära tvärsnittet i referensprojektet minskades mängden betong med över 70 %. Detta i kombination med en lägre hållfasthetsklass (C20) samt minskat armeringsbehov resulterade i en stor besparing räknat i koldioxidekvivalen-

ter på drygt 70 ton. Den mycket minimerade användningen av betong ger bjälklaget mycket lägre egentyngd, vilket är en stor anledning till att det trots det reducerade tvärsnittet ändå klarar av de nyttiga laster som det utsätts för.

Parameterstudien visade att det alternativ som presenterats för TT-kassetten var väl motiverat med anledning av reduktion av utsläppta koldioxidekvivalenter. Detta eftersom det värde som valts för de tre parametrar som varierades producerade det lägsta värdet på just detta. Betongkvalitén ansattes till det lägsta som var tillåtet (C20), och trots minskat armeringsbehov så gav högre hållfasthetsklass större utsläpp av koldioxidekvivalenter. Förändring av facklängd (vilket ökar avståndet mellan balkliven och således ger mindre använd betong) gav snabbt upphov till mycket större armeringsbehov, vilket gjorde att även här ökade utsläppen i takt med denna förändring. Det mest intressanta resultatet här var förmodligen det som erhölls från livhöjdsförändringen, där det värde som valts för förslaget var ett "minimi-värde", både lägre och högre livhöjd gav upphov till fler koldioxidekvivalenter. Det är möjligt att om man analyserat fler värden än de 5 som valts så hade det faktiska min-värdet inte varit exakt på 0,3 meter. Dock eftersom de värden som valts är de dimensioner som vanligtvis massproduceras ansågs en allt för specifik analys av dimensionerna inte vara intressant då detta förmodligen hade medfört en stor ökad kostnad på grund av specialbeställda dimensioner på TT-kassetten. Både förändring av betongkvalitén och facklängd är alternativ som man relativt enkelt kan förändra i ett godtyckligt byggprojekt, detta är dock inte sant för livhöjden. Varför detta är fallet diskuteras mer ingående i de nästkommande styckena.

TT-kassetten, trots dess fördelar, har produktionstekniska nackdelar associerade med dess geometri. Till exempel kommer detta bjälklag med största sannolikhet inte att klara av de akustiska krav som ställs på konstruktionsdelar i ett bostadshus. Detta kan ofta vara en anledning till att stora tvärsnitt i betong används, det är ett effektivt och billigt sätt att ljudisolera. Det bör dock inte vara allt för svårt att med hjälp av olika beklädnader klara av de akustikkrav som finns. Man kan på någorlunda enkelt sätt lägga installationer mellan bjälklagets liv och sedan klä in dem samt mellanrummet för att få ett enhetligt tak. En arkitektonisk avvägning måste göras ifall man vill ha ett homogent innertak eller om man accepterar att kassettens livstycken syns. Oberoende av vad man väljer så har innertakets höjd med detta alternativ sänkts med minst 8 cm över livet på kassetterna vilket skulle kunna vara ett problem. Eftersom Boverket ställer krav på minst 2,4 meter i rumshöjd skulle detta i förlängningen kunna innebära att byggnaden måste bli högre eftersom varje våning kräver mer plats på höjden. Detta kan då ha, bortsett från många ytterligare problematiska omständigheter med att öka höjden på ett hus, direkt motsatt effekt från vad som var avsikten från början; att bespara koldioxidekvivalenter. Då huset blir högre måste också mer betong användas vilket detta förslag från början varit ämnat att undvika.

Då detta förslag innebär färdiggjutna kassetter och inte platsgjutning lider detta problem inte av den kompliceringsfaktor som detaljstyrning av betongkvalitér innebär. Dock försvåras, på grund av dess geometri, till exempel placering av innerväggar. För det första blir innerväggar som inte löper parallellt med kassettens liv svårare att projektera då det skulle kunna innebära att infräsningar måste göras för att inkorporera liven. Vidare blir det även svårt att lägga parallella väggar i nära anslutning till kassettens liv. Detta då dessa ofta är välvda där livet och flensen möts och inte helt

vinkelräta vilket försvårar detta samspel. Ett sätt att göra detta är att klä in ljudisolering samt kassettens liv med samma beklädnad och sedan endast resa innerväggarna hit, detta skulle dock ytterligare sänka innertakets höjd med beklädnadens tjocklek. Denna komplikation kan tillsammans med detta bjälklags, i förhållande, möjlighet till stora spännvidder vara anledningen till att det först och främst idag används i industrilokaler.

7.1.3 Förspänt håldäck

Förutom de två förslagen som presenteras tidigare kan även förspänt håldäck nämnas. En övergripande beräkning kan göras med hjälp av "Håldäck - direkt" vilket är ett samarbete mellan Svensk betong och Strusoft AB. Här matas bjälklagets spännvidd, lasttyp samt extra brottlast in och en översiktlig beräkning föreslår dimensioner på ett håldäck [61].

Då beräkning utförs med hjälp av "Håldäck direkt" med gällande indata (spännvidd = 6,33 m och extra brottlast = 0 kN/m) föreslås ett håldäck av typen HD/F 120/20. Detta håldäck har dimensionerna 6,33*1,2*0,2 m^3. En stor andel av tvärsnittet består, som namnet "håldäck" antyder, av hålrum. För jämförelse med plattbärlaget har ett håldäck av denna typ endast en ekvivalent höjd på 0,103 m. Procentuell minskning i betongmängd för detta alternativ blir således $\frac{0,27-0,103}{0,27}$ = 61,9 %. Totalt, i hela byggnaden, skulle detta innebära en besparing på cirka 204 m^3 betong. En stor skillnad jämfört med andra typer av bjälklag är dock att håldäck, på grund av krav på hög tidig hållfasthet, ofta utförs med betong med lågt vct och därför mycket cement. Vanliga värden är runt 0,4 vct och hållfasthetsklass C40/50. På grund av detta kan det ibland, trots mycket sparad betong innebära mer använd cement och därför i slutändan ett sämre alternativ ur miljösynpunkt.

7.1.4 Jämförelse

För jämförelsens skull har det antagits att håldäcket utförs med betong av hållfasthetsklass C40/50 (vct 0,4). Detta ger, beräknat på samma sätt som för de övriga bjälklagstyperna, cirka 535 kg cement per kubikmeter betong. Jämför man detta med referensprojektet där samma siffra blev ca 355 kg cement ser man att förslaget fortfarande har en positiv effekt på användningen av cement eftersom mängden betong mer än halveras. Detta trots att mängden cement i varje kubikmeter betong ökar med mer än 50 %. Sett till hela byggnaden använder referensprojektet drygt 117 ton cement medan håldäcksförslaget använder drygt 67 ton cement. För plattbärlagsförslaget är denna siffra knappt 85 ton cement och för TT-kassetten är den så liten som knappt 25 ton cement. Siffrorna presenteras också i tabell 7.1.

Som kan ses från dessa siffror är TT-kassetten överlägset bäst ur rent miljömässigt perspektiv. Dock uppstår andra problem, som diskuterats ovan, bland annat att innertaket blir lägre. Plattbärlagsförslaget och håldäcksförslaget har omvänd effekt här där man istället skulle kunna sänka takhöjden och därför också hela byggnadens höjd. Håldäcket visar den största skillnaden här med 7 cm sänkning eller drygt 20 cm för hela byggnaden. Detta leder till, extra, minskad användning av cement i andra kon-

Tabell 7.1: Total cementanvändning för bjälklaget med de olika alternativen

Alternativ	Total cementanvändning, ton
Referens	117
Plattbärlag	85
TT-kassett	25
Förspänt håldäck	67

.

struktionsdelar, huvudsakligen väggarna då dessa inte behöver vara lika höga. Det är inte bara cementanvändningen som minskar som resultat av denna sänkning, utan även materialet till till exempel stålpelare, innerväggar och andra ingående konstruktionselement. Dock kan det vara så att denna minskning av betong leder till att de akustikkrav som finns inte uppfylls och inklädnad av innertaket även här skulle behövas. Denna positiva effekt går i så fall förlorad.

8 Slutsats

Målsättningen med arbetet var att utreda vilka, rimliga, alternativ det i dagsläget finns för att genom material- och konstruktionstekniska lösningar minska användningen av portlandcement. Detta på grund av de stora mängder koldioxidekvivalenter som släpps ut vid produktion av cement. Resultaten från de två delarna har påvisat möjligheter till nedskärningar med båda sätten, men de har också olika individuella svårigheter associerade med sig.

Den materialtekniska delen har påvisat att de två nyskapande tillsatsmaterialen som användes i recept C & D ($C\bar{S}A$-cement respektive cement med kalcinerad lera och kalksten, LCCC) har egenskaper som överensstämmer med hur vanligt portlandcement (A) och PC med slagg som tillsatsmaterial (B) uppför sig när det används som konstruktionsmaterial. Hållfasthetsutvecklingen är dock av annorlunda karaktär inbördes. För $C\bar{S}A$-cementet observerades den mycket snabba hållfasthetsutveckling och sedan också snabba stagnation som var förväntad. Vad som förväntades från betongen med LCCC som bindemedel var inte helt klart då det fortfarande finns relativt lite forskning om detta tillsatsmaterial. Av de fyra cementtyperna så påvisade LCCC den lägsta tidiga hållfasthetsutvecklingen och samtidigt den högsta slutliga (28-dagars)hållfastheten. De två tillsatsmaterialen kan därför antas spela två olika roller i framtiden rörande i vilken typ av konstruktion de används samt hur man använder dem. Det har således påvisats möjlighet att uppnå de högre stegen av klimatförbättrad betong enligt Svensk Betong med de nyskapande betonger som presenteras i detta arbete.

I den konstruktionstekniska delen föreslås några alternativ till det utförande som föreslagits i referensprojektet. Alla förslag har som mål att minimera mängden PC som används till utformandet av bjälklagen, de olika alternativen kommer med individuella fördelar och nackdelar. Alternativ 1, plattbärlaget med mindre tjocklek är det som till störst del liknar det utförande som valts i referensprojektet. Det är det enda alternativ som inte använder sig av helt prefabricerade element och därför kräver transport av flytande betong till byggplatsen. Även detta har både positiva och negativa aspekter, att gjuta på plats gör att man blir beroende av väderleken. Dock tar det mindre plats att frakta flytande betong än som härdat element vilket gör att man kan frakta mer betong åt gången. På grund av TT-kassettens geometri blir det omöjligt att inte frakta ”luft” vilket kan bidra ytterligare till utsläpp. Då arbetets fokus endast var att se till de utsläpp som genereras vid tillverkning av cementen och armeringen är detta en bisak men ändå något man kan ta med sig.

TT-kassetten var överlägset det alternativ som gjorde störst miljömässiga vinster. Men också den som har störst produktionstekniska problem förknippade med sig och sin geometri, vilket förmodligen är förklaring till varför den till störst del används till hall/industribyggnader. Dess och håldäckets kapacitet för stora spännvidder utnyttjas inte i detta projekt, dock om det från tidigt projekteringsskede varit klart att något av dessa förslag skulle användas hade man haft större möjlighet till att ha bärande väggar på större avstånd och där med kanske få fler alternativ till lägenhetsutformning.

Förhoppningen är att både den materialtekniska och den konstruktionstekniska delen kan kombineras för att tillsammans överbrygga de svårigheter som de enskilt har rörande besparing av cement. Ett bra exempel på detta kan till exempel vara de förspända håldäckens krav på hög tidig hållfasthet. En lösning på detta hade kunnat vara att andvända delvis eller endast C$\bar{S}$A-cement för att tillgodose detta (om detta går beror på i vilken utsträckning man kan kombinera C$\bar{S}$A-cement med vanligt PC eller andra tillsatsmaterial och få en betong med tillfredställande egenskaper). Det hade kunnat leda till ett minskat krav på PC för att få hög tidig hållfasthetsutveckling. I dagsläget är detta ett för dyrt alternativ på grund av de begränsade tillgångarna på råmaterial för tillverkning av C$\bar{S}$A-cement. För att detta skulle kunna bli ett attraktivt alternativ för branschen krävs förmodligen koldioxidskatter på PC, vilket kan leda till dyrare byggande och därför dyrare bostäder och kontor med mera. Ett ytterligare bekymmer som kommit upp då dialog med betongtillverkare förts är att sådan betong inte klarar av exponeringskraven lika bra som betong med PC. Det är möjligt att en konstruktionsdel som ett mellanbjälklag, som är utsatt förhållandevis lite av åverkan utifrån, ändå skulle klara av att konstrueras med detta material. Ytterligare utredning med hänsyn till svenskt regelverk krävs innan detta kan realiseras i praktiken.

Ytterligare alternativ kan vara de konstruktionsdelar som inte kräver hög tidig hållfasthetsutveckling, till exempel plattbärlag. Den del av plattbärlaget som kommer prefabricerat måste redan klara av att ta all egentyngd när den ohärdade betongen gjuts på. Om en betong med till exempel LCCC gjuts på uppnås, enligt vår visserligen begränsade studie, samma om inte högre 28-dagarshållfasthet samtidigt som man kan minska mängden PC med runt 30 %. Detta stämmer då stämp inte används, då stämp används får man utreda vilka tidskrav som finns för att bjälklaget ska vara självbärande, på grund av betonger med LCCCs långsamma tidiga hållfasthetsutveckling kan detta innebära förseningar eftersom stämpen måste lämnas kvar längre tid.

Slutligen kan det nämnas att det idag finns mycket begränsade incitament för både konsulter och byggherrar att på något sätt prioritera besparing av cement, prispressande görs på miljöns bekostnad. Vilka alternativ som finns för att ändra på detta är upp till lagstiftande organ att utreda, de som ligger närmast till hands att undersöka är, till exempel, punktskatter på cement. Det är svårt att veta exakt vilken effekt detta hade fått och precis som byggtidsförlängning som resultat av högre vct på använda betonger skulle det i slutändan kunna leda till högre priser på kontor och bostäder. Det finns idag ett stort behov av billiga bostäder och här måste de positiva och negativa aspekterna grundligt utredas.

8.1 Framtida studier

Ytterligare forskning krävs rörande vilka egenskaper C$\bar{S}$A-cementet och LCCC ger på betongen. Aspekter som beständighet, till exempel frostbeständighet eller hur dessa betonger reagerar vid kemiska angrepp, måste undersökas för att helt kunna utreda deras lämplighet som konstruktionsmaterial. Vi har under arbetets gång fått höra tveksamheter runt hur väl lämpade C$\bar{S}$A-betonger är som material i konstruktionsdelar som är mer utsatta (högre exponeringsklass). I detta arbete har endast deras

hållfasthet analyserats från dag 1 till dag 28.

Betong med bindemedel av kombinerat C$\bar{S}$A-cement och LCCC är en intressant materialteknisk studie för att se vilka egenskaper som betongen får. Där hållfasthetsutvecklingen för dessa två är olika, snabb hållfasthetutveckling för C$\bar{S}$A och långsam hållfasthetsutveckling men hög slutlig hållfasthet för LCCC, kan man möjligen justera detta utefter behov. Till exempel i ett projekt där det valts att bygga med betong av LCCC och konstruktionsdelarna måste ha en hög hållfasthet efter någon dag. Om det då sker förseningar/leveransfel etc. kanske man kan blanda i extra mycket C$\bar{S}$A i betongen för att få den hållfasthet man vill ha för att hålla projektets tidplan.

Uttorkningstid är en betydande faktor i byggnadsprojekt när man bygger med betong. En genomgående studie på detta vore intressant för att kunna se om man på något sätt kan minska miljöpåverkan genom att på ett rimligt sätt använda betong med högre vct, det vill säga planeringsoptimering med hänsyn till miljövänlig betong.

Det skulle också vara intressant att jämföra hur bjälklag av trä förhåller sig till bjälklag av betong där man till exempel undersöker ett projekt för att se om det blir bättre miljömässigt att bygga med trä eller betong.

För alternativt håldäck behövs en mer genomgående beräkning göras då vi har använt oss av ”Håldäck direkt”i arbetet. Det stämmer även för de andra förslagen, beräkningarna gjordes i huvudsak i Excel och har inte dubbelkollats med något kommersiellt beräkningsprogram vilket hade varit intressant. Håldäck har ett invecklat uppförande de första dygnen och avancerade beräkningsmodeller används för att undersöka bland annat sprickmoment, gränsvärden för förspänning, excentriciteter med mera. Om ytterligare tid funnits hade en mer grundlig analys av denna bjälklagstyp kunnat utföras och ett mer optimerat tvärsnitt hade möjligtvis kunnat presenteras. Dessa håldäck massproduceras och att specialbeställa ett nytt tvärsnitt som idag inte existerar för produktion av stora volymer är inte rimligt. Ett bjälklag i ett bostadhus utsätts för samma typ av last oberoende av vilken byggnad som undersöks, det som är annorlunda från fall till fall är oftast bara spännvidden. Om spännvidden ändras till 4 meter föreslås ändå samma typ av håldäck, HD/F 120/20, trots att maxmomentet då är mindre än hälften. Det kan därför kanske finnas utrymme för att undersöka mindre tvärsnitt för massproduktion, för att på så sätt kunna spara in använd betong. Dock på grund av dess komplicerade uppförande kan detta vara lättare sagt än gjort och andra flaskhalsar än endast momentkapacitet lär existera.

Optimering av andra konstruktionsdelar i ett bostadshus skulle vara intressant att undersöka, detta kan vara till exempel väggar/valv och platta på mark.

Litteratur

[1] P.G Burström. *Byggnadsmaterial*. Studentlitteratur AB, 2007.

[2] Karen L. Scrivener och James R. Kirkpatrick. *Cement and Concrete Research, Innovation in use and research on cementitious material*. Vol. 38. Elsevier Ltd. The Netherlands, 2008, s. 128–136.

[3] Svensk Betong. *Betong och klimat - En rapport om arbetet för klimatneutral betong*. Tekn. rapport. 2017.

[4] Svensk Betong. *Klimatförbättrad betong*. Tekn. rapport.

[5] Svenska Institutet för Standarder (SIS). *SVENSK STANDARD SS-EN 1992-1-2:2004, Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner – Del 1-2: Allmänna regler – Brandteknisk dimensionering*. Tekn. rapport. 2018.

[6] ISOVER Saint-Gobain. *Ljudisolering - mot buller och störande ljud*. 2020. URL: https://www.isover.se/isolera-mot-buller-och-storande-ljud (hämtad 2020-01-19).

[7] Svensk Betong. *Ljud*. 2020. URL: https://www.svenskbetong.se/bygga-med-betong/bygga-med-prefab/ljud (hämtad 2020-01-19).

[8] Boverket. *Utsläpp av växthusgaser från bygg- och fastighetssektorn*. 2020. URL: https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/miljoindikatorer---aktuell-status/vaxthusgaser/ (hämtad 2020-09-14).

[9] David J. M. Flower och Jay G. Sanjayan. "Green House Gas Emissions due to Concrete Manufacture". I: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 12.5 (2007), s. 282–288.

[10] Robbie M. Andrew. "Global CO2 emissions from cement production, 1928–2018". I: (2019).

[11] Karen L. Scrivener et al. *Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry*. Tekn. rapport. 2016.

[12] Guillaume Habert et al. *Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries*. 2020. URL: https://www.nature.com/articles/s43017-020-0093-3 (hämtad 2020-09-16).

[13] Climate Technology Centre Network. *CCS from cement production*. URL: https://www.ctc-n.org/technologies/ccs-cement-production (hämtad 2020-09-17).

[14] Mohammed Sonebi et al. *Sustainability of Construction Materials, Sustainability of cement, concrete and cement replacement materials in construction*. Elsevier Ltd. The Netherlands, 2016, s. 371–396.

[15] B. Rand. *Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials, Chapter Calcination*. Pergamon Cambridge, USA, 1991.

[16] Svensk Betong. *Koldioxidutsläpp*. 2020. URL: https://www.svenskbetong.se/bygga-med-betong/bygga-med-prefab/miljo-och-hallbarhet/koldioxidutslapp (hämtad 2020-11-12).

[17] Cembureau The European Cement Association. *Environmental Product Declaration (EPD) according to EN 15804 and ISO 14025*. Tekn. rapport. 2020.

[18] HeidelbergCement Group Cementa AB. *ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION as per /ISO 14025/ and /EN 15804/*. Tekn. rapport. 2019.

[19] Svenska Institutet för Standarder (SIS). *SVENSK STANDARD SS-EN 197-1:2011, Cement – Del 1: Sammansättning och fordringar för ordinära cement*. Tekn. rapport. 2013.

[20] Svensk Betong. *Återvinning*. 2020. URL: `https://www.svenskbetong.se/bygga-med-betong/bygga-med-platsgjutet/hallbart-byggande/bestandighet-och-livslangd-2` (hämtad 2020-09-10).

[21] Ronny Andersson et al. "Calculating CO2 Uptake for Existing Concrete Structures during and after Service Life". I: *Environmental Science Technology* (2013).

[22] Nick Winter. *Cement Hydration*. URL: `https://www.understanding-cement.com/hydration.html` (hämtad 2020-09-30).

[23] Mats Emborg et al. *Temperatursprickor i Betongkonstruktioner*. Tekn. rapport. Väg- och Vattenbyggnad, Luleå Tekniska Universitet, 1997.

[24] Christian Pichler och Roman Lackner. *Construction and Building Materials, Post-peak decelerating reaction of Portland cement: Monitoring by heatflow calorimetry, modelling by Elovich-Landsberg model and reaction-order model*. Vol. 231. Elsevier Ltd. The Netherlands, 2020.

[25] Lars Wadsö. "Applications of an eight-channel isothermal conduction calorimeter for cement hydration studies". I: *Cement International* 5 (2005), s. 94–101.

[26] Niklas Johansson. *Uttorkning av betong : inverkan av cementtyp, betongkvalitet och omgivande fuktförhållanden*. Tekn. rapport. 2005.

[27] Lucie Svermova et al. *Cement and Concrete Composites, Influence of mix proportions on rheology of cement grouts containing limestone powder*. Vol. 25. Elsevier Ltd. The Netherlands, 2003, s. 737–749.

[28] Samson Apebo et al. "Effect of Water-Cement Ratio on the Compressive Strength of gravel – crushed over burnt bricks concrete". I: *Civil and Environmental Research* 3 (2013).

[29] Marketa Chroma et al. "Concrete durability and the k-value concept". I: *Cement, Wapno, Beton* 2014 (2014), s. 81–92.

[30] Leo J. L. Vissers et al. *Studies in Environmental Science, Fly Ash as Binder in Concrete*. Vol. 71. Elsevier Ltd. The Netherlands, 1997, s. 279–288.

[31] Svenska Institutet för Standarder (SIS). *SVENSK STANDARD SS-EN 206:2013+A1:2016, Betong – Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelses*. Tekn. rapport. 2018.

[32] Federal Highway Administration (FHWA). *Fly Ash Facts for Highway Engineers, Fly Ash - An Engineering Material*. 2017. URL: `https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/fach01.cfm` (hämtad 2020-09-10).

[33] Anders Haaker. *Ragns-Sells ska återvinna resurser ur flygaska från avfallsförbränning*. 2019. URL: `https://bioenergitidningen.se/teknik-utrustning/ragns-sells-ska-atervinna-resurser-ur-flygaska-fran-avfallsforbranning` (hämtad 2020-09-10).

[34] Shinhyu Kang et al. *Cement and Concrete Research, Predicting the compressive strength of fly ash concrete with the Particle Model*. Vol. 137. Elsevier Ltd. The Netherlands, 2020.

[35] EcoSmart. *History*. URL: http://ecosmartconcrete.com/?page_id=250#:~:text=Fly\%20ash\%20was\%20introduced\%20commercially,the\%20benefits\%20were\%20better\%20understood. (hämtad 2020-09-18).

[36] Claus Pade. *Carbon Footprint of Fly Ash*. Tekn. rapport. Danish Technological Institute - Concrete Centre, 2015.

[37] Isa Yuksel. *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete, Blast-furnace slag*. Woodhead Publishing, 2018, s. 361–415.

[38] Ivankas N. Grubeša et al. *Characteristics and Uses of Steel Slag in Building Construction, Application of blast furnace slag in civil engineering: Worldwide studies*. Elsevier Ltd. The Netherlands, 2016, s. 51–66.

[39] George C. Wang. *The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction, Slag use in cement manufacture and cementitious applications*. Elsevier Ltd. The Netherlands, 2016, s. 305–337.

[40] Hasan Alanyali et al. *Concrete Produced by Steel-Making Slag (Basic Oxygen Furnace) Addition in Portland Cement*. URL: https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1744-7402.2008.02317.x (hämtad 2020-09-30).

[41] Slag Cement Association (SCA). *Environmental Product Declaration According to ISO 14025 and ISO 21930*. Tekn. rapport. 2015.

[42] Vattenfall SSAB LKAB. *HYBRIT - Fossil-free steel*. Tekn. rapport. 2017.

[43] LC3. 2020. URL: https://lc3.ch/ (hämtad 2020-09-10).

[44] Mwiti J. Marangu. "Properties of activated blended cement containing high content of calcined clay". I: 8 (2018).

[45] EPD International AB. *Environmental Product Declaration In accordance with ISO 14025 for: FutureCEM® cement CEM II/B-M (Q-LL) 52,5 N Aalborg Portland A/S*. Tekn. rapport. 2019.

[46] Fredrik P. Glasser och Liang Zhang. "High-performance cement matrices based on calcium sulfoaluminate-belite compositions". I: *Cement and Concrete Research* 31.12 (2001), s. 1881–1886.

[47] Guillaume Habert. *Eco-efficient Construction and Building Materials, Assessing the environmental impact of conventional and 'green' cement production*. Elsevier Ltd. The Netherlands, 2014, s. 199–238.

[48] Andrew Sorensen et al. "Calcium Sulfoaluminate (CSA) Cement: Benefits and Applications". I: *Concrete International* 40 (2018), s. 65–69.

[49] Neven Ukrainczyk et al. "Calcium Sulfoaluminate Eco-Cement from Industrial Waste". I: (2011).

[50] Global Cement. *Vicat starts industrial scale trial production of low-CO2 cement*. 2013. URL: https://www.globalcement.com/news/item/1742-vicat-starts-industrial-scale-trial-production-of-low-co2-cement (hämtad 2020-12-08).

[51] Mathias et al. Larsson. *Byggandets klimatpåverkan*. Tekn. rapport. 2016.

[52] Boverket. *Byggnaders klimatpåverkan utifrån ett livscykelperspektiv*. Tekn. rapport. 2015.

[53] Boverket. *LCA i byggprocessen*. 2020. URL: https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/livscykelanalys/lca-i-byggprocessen/ (hämtad 2020-10-07).

[54] Tord Isaksson et al. *Byggkonstruktion*. Studentlitteratur AB, 2020.

[55] Duff A. Abrams. *Design of Concrete Mixtures*. Tekn. rapport. Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago, 1919.

[56] Janos Popovics Sandor Ujhelyi. "Contribution to the Concrete Strength versus Water-Cement Ratio Relationship". I: *Journal of Materials in Civil Engineering* 20.7 (2008).

[57] Tanmoy Mukhopadhyay et al. "Effect of Platen Restraint on Stress–Strain Behavior of Concrete Under Uniaxial Compression: a Comparative Study". I: *Strength of Materials* 48.4 (2016), s. 592–602.

[58] Björn Engström. *Betongbyggnad*.

[59] Svenska Institutet för Standarder (SIS). *SVENSK STANDARD SS 137003:2015, Betong – Användning av SS-EN 206 i Sverige*. Tekn. rapport. 2015.

[60] Svenska Institutet för Standarder (SIS). *SVENSK STANDARD SS-EN 1992-1-1:2005, Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner - Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader*. Tekn. rapport. 2008.

[61] Svensk Betong/Strusoft AB. *Håldäck direkt*. 2020. URL: https://www.svenskbetong.se/bygga-med-betong/bygga-med-prefab/statik/haldack/haldack-direkt (hämtad 2020-12-17).