

CHALMERS



Betongtillverkningens påverkan på klimatet

Minimering av koldioxidutsläpp med hjälp av tillsatsmaterial och energieffektivisering

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Byggteknik*

ARAZ KASO & KEVIN THORÉN

Institutionen för Bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Byggnadsteknologi
Forskargruppen Byggnadsmaterial
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2015
Examensarbete 2015:19

EXAMENSARBETE 2015:19

Betongtillverkningens påverkan på klimatet

Examensarbete inom högskoleingenjörprogrammet

Byggteknik

ARAZ KASO & KEVIN THORÉN

Institutionen för Bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Byggnadsteknologi
Forskargruppen Byggnadsmaterial
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2015

Betongtillverkningens påverkan på klimatet
Minimering av koldioxidutsläpp med hjälp av tillsatsmaterial och
energieffektivisering

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Byggteknik

ARAZ KASO & KEVIN THORÉN

© ARAZ KASO & KEVIN THORÉN, 2015

Examensarbete / Institutionen för Bygg- och miljöteknik,
Chalmers tekniska högskola 2015:19

Institutionen för Bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Byggnadsteknologi
Forskargruppen Byggnadsmaterial
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Tryckeriets namn/ Institutionen för Bygg- och miljöteknik
Göteborg 2015

Betongtillverkningens påverkan på klimatet

Minimering av koldioxidutsläpp med hjälp av tillsatsmaterial och energieffektivisering

Institutionen för Bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Byggnadsteknologi
Forskargruppen Byggnadsmaterial
Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Målet för denna rapport är att utvärdera ett urval av metoder för att minimera utsläpp av koldioxid inom betongindustrin. Betong är ett material som har använts i olika typer av konstruktioner under flera tusen år. Materialet tillverkas genom att blanda cement, vatten, ballast, tillsatsmedel och eventuellt vissa tillsatsmaterial. Val av tillsatser kan påverka betongens egenskaper efter de krav som ställs.

Cementtillverkning är det mest klimatpåverkande steget inom betongindustrin, detta beror på att det under kalcinering bildas koldioxid i form av processutsläpp under förbränning. Resterande utsläpp vid cementtillverkning kommer från förbränning av bränslen samt användning av elektricitet. Utsläpp av koldioxid vid betongtillverkning är ungefär mellan 230-290 kg CO_{2eq}/m³ varav cement står för cirka 80 % - 90 % av utsläppen. Resterande utsläpp kommer från bland annat transport och krossning av ballast.

För att minska utsläppen av koldioxid vid betongtillverkning krävs olika åtgärder och förbättringar, till exempel kan mängden cement reduceras genom att använda olika typer av tillsatsmaterial såsom masugnsslagg, flygaska och silikastoft. Till exempel kan ersättning av cement med masugnsslagg minska koldioxidutsläppen upp till 47 %.

Med hjälp av CCS-metoden kan koldioxidutsläpp från industrier uppsamlas och lagras i geologiska formationer. Detta har potential att minska utsläppen av koldioxid vid cementtillverkning med upp till 56 % till år 2050.

Genom att använda till exempel spillvärmeåtervinning kan cirka 20-45 kWh/ton cement energi återvinnas i en modern cementanläggning, teoretiskt skulle denna åtgärd minska koldioxidutsläppen med 70 miljoner ton år 2003. Med utökad användning av avfallsbränslen och eventuellt förnybara bränslen kan utsläpp av växthusgaser och framförallt koldioxid minskas.

Detta arbete avslutas med att sammanfatta de viktigaste åtgärderna som granskats samt ger förslag på framtida områden att undersöka för att minska koldioxidutsläpp vid betongtillverkning.

Nyckelord: Betong, cement, energi, klimatpåverkan, Koldioxidutsläpp, livscykelanalys, tillsatsmaterial,

Climate impact of concrete production

Minimization of carbon emissions using for example supplementary cementitious materials and improving energy efficiency

Diploma Thesis in the Engineering Programme

Building and Civil Engineering

ARAZ KASO & KEVIN THORÉN

Department of Civil and Environmental Engineering

Division of Building Technology

Research group Building Materials

Chalmers University of Technology

ABSTRACT

The objective of this report is to evaluate a variety of methods to minimize emissions of carbon dioxide in the concrete industry. Concrete is a material used in different types of constructions and has been used for several thousand years. The material is produced by mixing cement, water, aggregates, admixtures and possibly some CRM (Cement Replacement Materials). Selection of additives can affect the properties of the concrete depending on the requirements.

Cement production is the step which has the largest climate impact in the concrete industry, this is due to the calcination where carbon dioxide is released in the form of process emissions during combustion. Remaining emission in cement production comes from burning of fuels and the use of electricity. Emissions of carbon dioxide in concrete production are approximately between 230-290 kg CO_{2eq}/m³ of which cement is responsible for about 80 % - 90 % of the emissions. The remaining emissions come from transportation and crushing of aggregates.

Carbon dioxide reductions can also be achieved by reducing the amount of cement using different types of supplementary cementitious materials such as blast furnace slag, fly ash and silica fume. For example, replacement of cement with blast furnace slag can reduce carbon emissions by up to 47 %.

The CCS-method is an approach where carbon dioxide emissions from industries are collected and stored in geological formations. This has the potential to reduce carbon dioxide emissions for cement production by up to 56 % by 2050.

Using for example waste heat recovery can recover about 20-45 kWh energy in a modern cement plant. In theory, this measure has potential to reduce carbon dioxide emissions by 70 million tonnes in 2003. By increasing the use of waste fuels and possibly renewable fuels, emissions of greenhouse gases and especially carbon dioxide may be reduced.

This work concludes the most potential measures to reduce carbon dioxide and gives suggestions on how the report can be further developed.

Key words: Concrete, cement, climate impact, carbon dioxide emission, energy, life cycle analysis, CRM

Innehåll

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	II
INNEHÅLL	III
FÖRORD	V
1 INLEDNING OCH BAKGRUND	1
1.1 Syfte	2
1.2 Metod	2
1.3 Avgränsningar	3
1.4 Disposition	3
2 BETONG SOM MATERIAL	4
2.1 Betongens historia	4
2.2 Betongens användningsområde, egenskaper och typer	5
2.3 Fördelar med användning av betong som byggnadsmaterial	6
2.4 Nackdelar med användning av betong som byggnadsmaterial	6
3 BETONGENS TILLVERKNINGSPROCESS	7
3.1 Ballast	8
3.2 Transport	8
3.3 Tillsatser och vatten	9
3.3.1 Tillsatsmedel	9
3.3.2 Tillsatsmaterial	9
3.3.3 Vatten	10
3.4 Cement	10
3.4.1 Cement typer	10
3.4.2 Cementpasta, vattencementtal och vattenbindemedelstal	11
3.4.3 Tillverkningsprocess för cement	12
3.4.4 Kalkbrytning	14
4 KLIMATPÅVERKAN FRÅN OLIKA ENERGIKÄLLOR	15
4.1 Cementtillverkning	15
4.1.1 Allmänt om energianvändning och processutsläpp	15
4.1.2 Beskrivning och jämförelse mellan olika processers energibehov	16
4.1.3 Internationell jämförelse	17
4.1.4 Bränslekällor	17
4.2 Tillverkning av kalkprodukter	18
4.2.1 Jämförelse mellan olika ugnstyper och energibehov	18

4.2.2	Bränslen som används	19
4.3	Sammanfattningsvis	19
5	JÄMFÖRELSE MELLAN OLIKA LIVSCYKELANALYSER	20
6	ÅTGÄRDER FÖR ATT MINSKA UTSLÄPP AV KOLDIOXID	22
6.1	Minimering av andelen cement vid betongtillverkning	22
6.1.1	Silikastoft	22
6.1.2	Masugnsslagg	23
6.1.3	Flygaska	24
6.1.4	SS-metoden, praktiskt exempel på minimering av cement	25
6.2	CCS-metoden – avskiljning, upptag och lagring av koldioxid	27
6.3	Återvinning och rivning av betongmaterial	29
6.4	Minimera utsläpp av koldioxid vid transport	29
6.5	Metoder för att minimera energianvändningen vid cementtillverkning	30
6.5.1	Minimera användning av fossila bränslen vid cementtillverkning	31
6.6	Metoder för att minimera energianvändningen vid tillverkning av kalkprodukter	31
6.6.1	Minimera användning av fossila bränslen vid tillverkning av kalkprodukter	32
7	DISKUSSION	33
8	SLUTSATS	35
9	REFERENSER	36

Förord

Detta examensarbete omfattar 15 poäng för byggteknik vid Chalmers Tekniska Högskola i Göteborg. Arbetet är utfört vid institutionen för Bygg- och miljöteknik med handledning av COWI AB.

Vi vill framföra ett stort tack till vår handledare och examinator, Ingemar Segerholm vid institutionen Bygg- och Miljöteknik på Chalmers. Vi vill också framföra ett stort tack till våra handledare, Yvonne Andersson-Sköld och Johanna Millander på COWI AB för all hjälp på vägen. Avslutningsvis ett stort tack även till representanter inom betongindustrin, Thomas Concrete Group AB, Cements AB, HeidelbergCement Group och Abetong AB.

Göteborg, juni 2015

Araz Kaso & Kevin Thorén

1 Inledning och bakgrund

Forskare över hela världen är överens om att människans påverkan på den globala uppvärmningen är den främsta orsaken till att medeltemperaturen på jorden ökar. De senaste 100 åren har jordens medeltemperatur ökat mellan 0,4-0,8°C och till slutet av århundradet förväntas medeltemperaturen öka mellan 0,1-0,2°C/årtionde (Houghton, et al., 2001). Ökade utsläpp av växthusgaser som till exempel koldioxid, metan och dikväveoxid beror på människans förbränning av fossila bränslen, skogsskövling och förändring av landmassor (Khasreen, Banfill & Menzies, 2009).

Koldioxid är den mest bidragande faktorn till den globala uppvärmningen. Utsläppen av koldioxid har ökat dramatiskt under det senaste århundradet vilket ökar behovet av nya och mer klimtvänliga lösningar (Gröndahl & Svanström, 2011). Den globala uppvärmningen leder i sin tur till klimatförändringar vilket ökar risken för att påverka mänskliga och naturliga system negativt. Till exempel kan global uppvärmning leda till smältning av glaciärer och snö, vilket kan förändra och påverka jordens hydrologiska system. Klimatförändringar kan även leda till ett mer extremt väder där bland annat ökenspridning, översvämningar och orkaner riskerar att öka i omfattning (IPCC, 2014).

Det sker ständigt en strävan efter hållbar utveckling och målet är att jordens medeltemperatur inte skall öka mer än två grader under detta århundrade. EU bedömer därför att utsläppen av växthusgaser behöver reduceras med 80-95 % till år 2050 för att målet skall uppfyllas (Al-Ayish, 2013).

Bygg- och fastighetssektorn bidrar till en betydande del av samhällets totala miljöpåverkan och detta ställer allt högre krav på denna sektor ur miljösynpunkt. Byggsektorn står för mellan 40-50 % av Sveriges totala energianvändning, vilket innebär att krav på förbättringar inom byggbranschen ökar succesivt (Strandberg, 2014).

Betongindustrin står för cirka 7 % av världens totala utsläpp av koldioxid (Limbachiya, Bostanci & Kew, 2014) och endast cement som ingår i betongtillverkning står för cirka 5 % av koldioxidutsläppen i Sverige. Detta kommer dels från den kemiska omvandlingen av kalksten till cementklinker och dels från förbränningen, vilket ger ett avsevärt bidrag till den globala uppvärmningen (Åhman, 2004). Inom betongindustrin har en överenskommelse tagits fram efter att koyotoprotokollet slog igenom 1990 för att minska utsläppen med 30 % till år 2020 (Limbachiya, Bostanci & Kew, 2014).

Den storskaliga produktionen av cement som ingår vid betongtillverkning skapar avsevärda mängder utsläpp av koldioxid till atmosfären. Detta leder i sin tur till global uppvärmning och därför krävs alternativa tillverkningsmetoder med lägre utsläpp av koldioxid inom betongindustrin (Gröndahl & Svanström, 2011).

1.1 Syfte

Syftet med arbetet är att finna det mest klimatpåverkande steget vid betongtillverkning. Sedan undersöks möjligheten att hitta åtgärder för att minimera utsläpp av koldioxid utan att påverka betongens egenskaper negativt. Arbetet utreder ett urval åtgärder som möjligtvis skulle kunna minska klimatpåverkan, innefattande:

- Minskad mängd cement vid betongtillverkning genom att använda tillsatsmaterialen silikastoft, masugnsslagg och flygaska.
- Minska utsläpp av koldioxid genom användning av CCS-metoden och S/S-metoden.
- Återvinna betong för att minska klimatpåverkan och uttag av naturresurser.
- Minimera utsläpp av koldioxid för transporter inom betongindustrin.
- Metoder för att minska energianvändning vid betongtillverkning.

1.2 Metod

Inledningsvis vid projektets start gjordes en planeringsrapport, tidsplan samt fördjupning i ämnet. Resultatet i detta arbete sammanställs från de litteraturstudier som genomförts i det inledande skedet av projektet. Litteraturstudier innefattar insamling av fakta från böcker, internetkällor och intervjuer. En del av de studier som identifierats hänvisar och bygger ofta på tidigare studier, som således innefattas i detta arbete.

Allmän information om tillverkningsprocessen för betong och cement har samlats från olika studier samt telefonintervjuer med bland annat Jan Lilieblad (Produktionschef, Abetong AB) och Stefan Sandelin (R&D Manager, Cementa AB). Livscykelanalyser från olika källor såsom vetenskapliga artiklar, rapporter samt material från Dr. Ingemar Löfgren (R&D Manager / FoU-Chef, Thomas Concrete Group AB) jämfördes för att visa det mest klimatpåverkande steget vid betongtillverkning.

Information om de förslag på åtgärder som redovisas i rapporten hämtades från olika studier med hjälp av representanter i cement- och betongindustrin. Material om till exempel S/S-metoden erhöles från Johanna Millander (Miljökonsult, COWI AB) samt Yvonne Andersson-Sköld (Forsknings- och utvecklingschef för miljö, COWI AB).

1.3 Avgränsningar

Denna rapport kommer att behandla olika metoder för att minska utsläpp av koldioxid vid betongtillverkning och behandlar inte utsläpp av andra växthusgaser. Rapporten har i detta avseende endast undersökt betong med hållfastheten C20/25 och C50/55 samt att betongen har härdat i genomsnitt 28 dagar. Denna rapport har endast undersökt cementtyperna CEM I och CEM II. Detta på grund av att de olika studierna främst har undersökt dessa betongklasser och cementtyper.

I kapitel 4 har rapporten inte tagit hänsyn till energimixens betydelse för utsläpp av koldioxid inom betongindustrin, och klimatpåverkan har endast studerats från energikällor inom cementindustrin. I kapitel 5 har rapporten inte inkluderat kalkbrytning och krossning av ballast på grund av att studierna inte har inkluderat information om vilka antaganden som gjorts.

I kapitel 6 ligger störst fokus på minimering av cement vid betongtillverkning med hjälp av tillsatsmaterial. Även andra åtgärder såsom CCS-metoden, återvinning av betong och metoder för att minska energianvändningen inom betongindustrin behandlas.

1.4 Disposition

Rapporten börjar med en *inledning* som allmänt beskriver den globala uppvärmningen. Sedan börjar *kapitel 2* med en allmän beskrivning av betong som material. I *kapitel 3* behandlas betongens tillverkningsprocess, där beskrivs hur processen genomförs från råmaterial till betongens färdigställande.

Sedan kommer *kapitel 4* som beskriver klimatpåverkan från olika energikällor och energianvändning från processer inom cementindustrin. *Kapitel 5* innehåller en jämförelse mellan olika livscykelanalyser för betongtillverkning.

I *kapitel 6* behandlas olika åtgärder för att minimera koldioxidutsläpp, till exempel genom att öka mängden tillsatsmaterial och därmed minska mängden cement vid tillverkning av betong. Därefter ges förslag på åtgärder för att minska klimatpåverkan från energikällor och energianvändning från processen. *Kapitel 7* innehåller projektets diskussion, *kapitel 8* behandlar rapportens slutsats och *kapitel 9* innehåller rapportens referenslista.

2 Betong som material

Detta kapitel innehåller betongs historia, olika användningsområden samt betongens fördelar och nackdelar.

2.1 Betongens historia

Betongen har en uråldrig historia, redan 500 år före Kristus användes betongen i Italien av etruskerna. Betongen var ett viktigt material för byggutvecklingen under ett par århundraden före Kristus till ett par århundraden efter Kristus. Under dessa år användes betongen till att bygga det mesta som hittills inte hade varit möjligt att bygga till exempel broar, hamnar, bostadshus och amfiteatrar. Eftersom betong är ett hårdigt material så finns det än idag konstruktioner från romerska riket som står kvar och som går att betrakta (Svensk betong, 2015). Pantheon i Rom är ett känt exempel som visar betongens beständighet, se figur 1 nedan.

Romerska rikets fall cirka 500 år efter Kristus resulterade i att kunskaperna om betong successivt gick förlorade. Under 1700-talet blev betong återigen ett viktigt material inom byggbranschen och denna gång skulle betongen utvecklas ännu ett steg och experiment på betong genomfördes. Tester visade att olika blandningar gav materialet unika egenskaper, vilket skulle komma att ge betong en rad olika användningsområden (Svenska betongföreningen, 2015).

I dagsläget är betong en viktig produkt inom samhällets byggbransch. Utvecklingen av betong har möjliggjort mer avancerade konstruktioner än vad som var möjligt att bygga under antiken, detta med hjälp av bland annat armering och olika kemiska tillsatser (Svenska betongföreningen, 2015).



Figur 1 - Pantheon i Rom, Italien. Illustration av Alt, J., (1836).

2.2 Betongens användningsområde, egenskaper och typer

Betong är ett naturmaterial som har använts i bärande konstruktioner i flera tusen år. I dagsläget förekommer betong i ett flertal olika konstruktioner, till exempel fasader, vägar, broar, samt väggar och bjälklag (Tahiri, 2011). Dess egenskaper kan förbättras med olika tillsatsmedel och tillsatsmaterial (mer om tillsatser i kapitel 3) (Svenska betongföreningen, 2015). Inom byggbranschen anses betong vara det material som kännetecknar god beständighet, hållfasthet och formbarhet. Betong anses vara ett stabilt material som genom historien visat sig vara optimalt för byggbranschen att använda sig av. Betong har en rad varierande användningsområden och det sker ständigt en utveckling på området (Blixt & Harmath, 2010).

Stora och komplicerade konstruktioner med enorma påfrestningar, till exempel stora broar, tunnlar och byggnader som byggs idag brukar ha betong som material. Ett exempel på en betongkonstruktion är Sandöbron, se figur 2. Användning av betong i större konstruktioner beror på betongens egenskaper som skapar stabilitet hos konstruktionen. Betong är ett material som kan bearbetas på så sätt att formen ändras till att passa just det bygget som är i fokus, till exempel kan betong modifieras så att den är optimal för brobygge och vid ett annat bygge vara optimal för ett hus (Blixt & Harmath, 2010).

Det finns olika typer av betong liksom de flesta andra byggmaterial, till exempel normal betong, högpresterande betong, självkompakterande betong, lättbetong, lättballastbetong, höghållfast betong och frostbeständig betong. Betongtyperna har olika hållfasthetsklasser beroende på vilka krav som ställs på betongen (Sjunnesson, 2005).



Figur 2 - Sandöbron, Kramfors. Foto av Persson, J., (2008)

2.3 Fördelar med användning av betong som byggnadsmaterial

Fördelarna med att använda sig av betong som byggnadsmaterial är flera. En fördel som spelar stor roll för livslängden för konstruktionen är betongens fuktbeständighet. Materialet är oorganiskt och därför finns minimal risk för att mögel eller röta ska uppstå (Skoogh & Hilding, 2009).

Betong klarar av stora spänningar och detta medför en god beständighet i jämförelse med trä och stål. Värmelagringskapaciteten hos betong är hög vilket innebär att betong kan lagra värme, detta medför att en betongstomme kan skapa stora besparingar när det gäller användning av energi i en konstruktion.

Skydd mot brand är en viktig del inom bygget eftersom en brand alltid är en risk till exempel om bygget gjorts i trä, men med betong så elimineras risken för bränder (Skoogh & Hilding, 2009). Till skillnad från andra material som till exempel trä så kräver inte betong större underhåll än att tvätta bort smuts de första 20-30 åren. Betong kan återvinnas upp till 41 % och dess långa livslängd under drift minskar behovet av nyproduktion och minskar klimatpåverkan (De Schepper et al., 2014).

2.4 Nackdelar med användning av betong som byggnadsmaterial

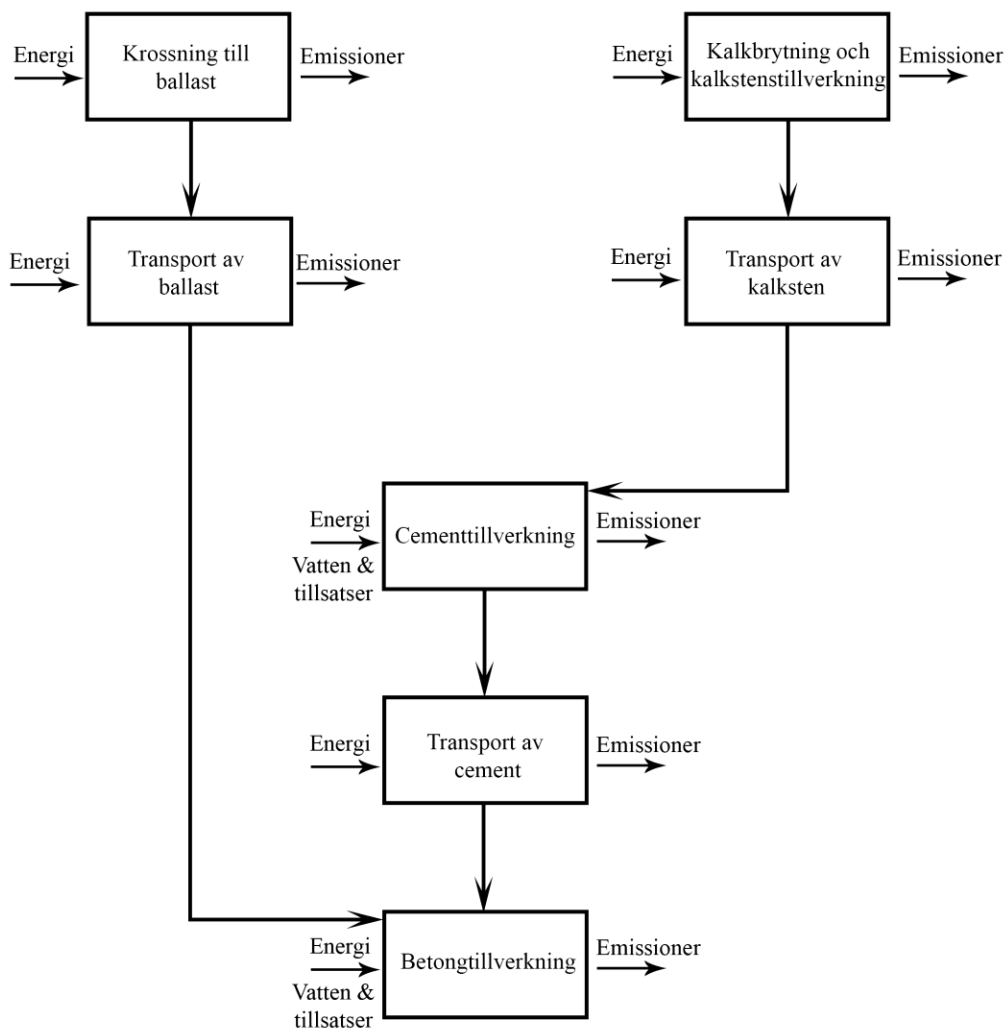
Betong är svårbehandlat efter tillverkning, vid till exempel byggnation med betong så måste planeringen vara noggrann eftersom att ändringar i ett sent skede är svåra att göra (Skoogh & Hilding, 2009).

Betongtillverkning släpper ut stora kvantiteter koldioxid och det krävs stora mängder energi vid tillverkning. En hög värmeledningsförmåga är en stor nackdel som betong har, en hög värmeledningsförmåga kan till exempel leda till stora komplikationer med köldbryggor. Betong tar också lång tid för att torka ut och bli klar för att montera ytskiktet, detta medför längre byggtider (Skoogh & Hilding, 2009).

3 Betongens tillverkningsprocess

Betongens massa består av ungefär 10 - 14 % cement, 7 - 9 % vatten, 70 - 80 % ballast (sand, sten eller grus) samt tillsatsmedel och eventuellt tillsatsmaterial. Vilka tillsatser som tillförs till betong kan variera beroende på vad betongen ska användas till och vilka egenskaper som krävs. Processen kan göras på flera olika sätt, till exempel under gjutning beroende på vad betongen ska användas till. Betongpasta bildas när vatten blandas med cement och är betongens bindemedel (Sjunnesson, 2005).

I figur 3 nedan beskrivs processen för att tillverka betong. Från råmaterial till tillverkning av betong. Koldioxid är den största klimatpåverkande emissionen till luften under betongens tillverkningsprocess.

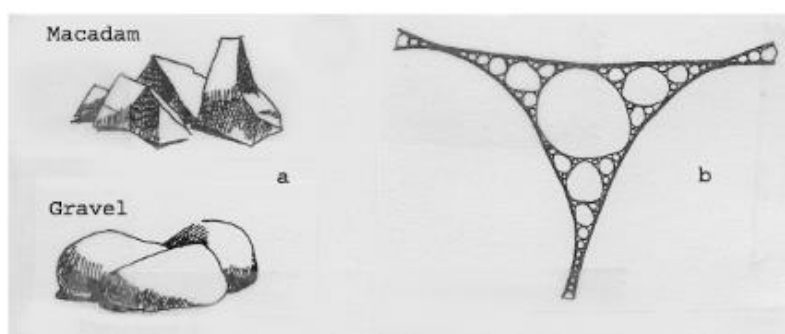


Figur 3 - Tillverkningsprocess för betong

3.1 Ballast

Ballast används vid betongtillverkning och den vanligaste ballasten består av sten, grus och sand i olika kornstorlekar, där sten >8 mm, grus ≤ 8 mm och sand <8 mm, se figur 4. Grus hämtas direkt från naturen och är således inte en krossprodukt som till exempel makadam. Gruset är format av vatten och är rund till sin form, den vanligaste gruskällan är rullstensåsar och därför är grus en ändlig naturresurs (Sjunnesson, 2005).

Makadam är krossad sten som hämtas ur berg genom sprängning. Materialet har en mer ojämn kornform än grus och lämpar sig väl för att skapa stabilitet i betong genom att partiklarna låses fast i varandra vid packning (Sydsten, 2015).



Figur 4 – a) Karaktärisering av ballast och b) den ideala ballasten som fyller hålrum till ett maximum (Sjunnesson, 2005).

3.2 Transport

Det är många råmaterial (till exempel ballast och kalksten) som ska transporteras innan de kan användas till framställning av betong. Det behövs också internt transporter vid brytning av kalksten och ballast. Många av transporterna görs med lastbil, även om en del görs med fartyg. De genomsnittliga transportsträckorna är relativt korta för de flesta materialen men är långa för cement (Sjunnesson, 2005).

Transport som sker med båt och lastbil har negativa effekter på miljön, som nästan uteslutande är en följd av förbränning av fossila bränslen. Miljöproblemen är främst utsläpp av koldioxid, men även andra emissioner som till exempel svaveldioxid och kväveoxider vilket leder till bland annat global uppvärmning, marknära ozon och försurning (Gröndahl & Svanström, 2011).

3.3 Tillsatser och vatten

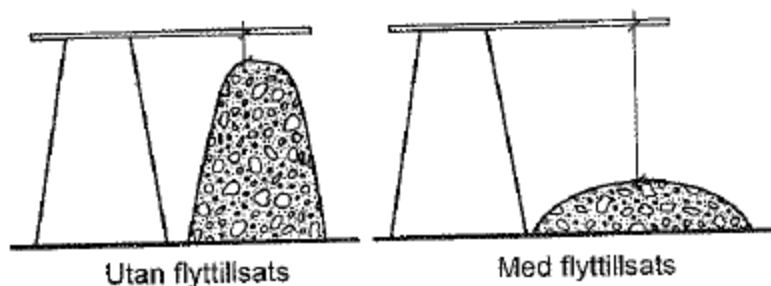
Detta avsnitt behandlar tillsatsmedel, tillsatsmaterial och vatten som ingår i tillverkningsprocessen för betong.

3.3.1 Tillsatsmedel

Det är svårt att skapa betong med goda egenskaper utan användning av tillsatsmedel. Val av de olika tillsatsmedlen kan variera beroende på vilka egenskaper betong skall ha. De kemiska tillsatserna är till exempel flyttillsatser, luftporbildare, vattenreducerare, acceleratorer och retardatorer (Burström, 2001).

I Sverige är luftporbildare och flyttillsatsmedel de mest etablerade tillsatsmedlen. Luftporbildare skapar många små luftbubblor (cirka 0,05-0,3mm) i betongen, bubblorna fungerar som ett extra utrymme för att tillåta vatten att expandera när temperaturen faller under nollpunkten och på så sätt förhindra att betongen fryser sönder (Sjunnesson, 2005).

Flyttillsatsmedel kan kraftigt påverka betongens konsistens och minskar mängden vatten i betong med ungefär 10 – 30 % utan att påverka betongens egenskaper, i figur 5 syns det hur flyttillsatsmedel gör betongen mer lättflytande. Minskningen av vatten leder i sin tur till att krympning hos betongen reduceras samt att hållfasthet ökar (Burström, 2001).



Figur 5 - Flyttillsatsmedlens påverkan på betongens konsistens (Burström, 2001).

3.3.2 Tillsatsmaterial

I betong används olika typer av tillsatsmaterial, till exempel silikastoft, mald granulerad masugnsslagg och flygaska som förbättrar betongens egenskaper, till exempel betongens hållfasthet. I Sverige används mest flygaska och masugnsslagg men även andra tillsatsmaterial som silikastoft kan användas som ersättning (Burström, 2001).

Silikastoft är en restprodukt vid tillverkningen av legeringsämnen till stål, det består av superfina och sfäriska partiklar. Betong med silikastoft används vid höga konstruktioner, där betongens hållfasthet överstiger 140 MPa. Med en betongblandare

kan silikastoftet läggas i separat eller införlivas i en fabriksproducerad kompositcement (Sundqvist & Lif, 2012).

Masugnsslagg, även kallad slaggcement är en biprodukt vid järntillverkningsprocessen. Det är ett icke-metalliskt hydrauliskt cement, det vill säga när det blandas med vatten så löser den långsamt och hårdnar. Huvudsakligen består slaggcement av magnesiumoxid, kalciumoxid, kiseldioxid och aluminiumoxid, den har samma kemiska uppbyggnad som vanligt Portlandcement men med andra proportioner (Prusinski, Marceau & VanGeem, 2003).

Flygaska är en restprodukt från till exempel kolkraftverk, det kan hämtas med hjälp av elektrostatiske och mekaniska avskiljare av bränslegaser, där kol används som bränsle. Eftersom det är många faktorer som påverkar flygaskans egenskaper, så kan kvaliteten på flygaska ändras kraftig mellan olika kolkraftverk (Lindvall, 2011).

Flygaska består mest av silika och aluminium och cirka 45-80 % av flygaskan består av silika- och aluminiumoxider, men det innehåller även andra material som järn och kalcium. När flygaska blandas med cementpasta skapas en produkt som liknar hydratiserad cement, men som har en tätare mikrostruktur och lägre permeabilitet (Nath & Sarker 2011).

3.3.3 Vatten

Olika typer av vatten kan påverka betongens egenskaper negativt. En tumregel är att använda dricksvatten vid betongblandning och undvika att använda saltvatten då det kan orsaka armeringskorrosion och sprickbildning (Sjunnesson, 2005).

3.4 Cement

Cement är ett hydrauliskt bindemedel, detta innebär att cementen hårdnar genom reaktion med vatten till en produkt som inte är vattenlöslig. Råvarorna i cementtillverkning är lera, kalksten och gips, cement kan även innehålla tillsatser som till exempel masugnsslagg och flygaska. Vilka tillsatser som tillförs kan variera beroende på vad cementen ska användas till (Burström, 2001).

3.4.1 Cement typer

Det finns olika typer av cement beroende på egenskaper och beståndsdelarna, se tabell 1 nedan. Den vanligaste typen är Portlandcement som består av lera och kalksten. I Europa kan cement delas upp i fem olika kategorier: CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV och CEM V, typerna ger bland annat information om hur mycket klinkercement som finns i cementen (Irfan, 2011).

Tabell 1 - Cement typer och procentuell mängd klinkercement med resterande mängd tillsatsmaterial (Irfan, 2011).

Cement typ	Benämning	Mängd klinkercement [%]
CEM I	Portlandcement	95-100
CEM II	Portland-kompositcement	65-94
CEM III	Slaggcement	5-64
CEM IV	Puzzolantcement	45-89
CEM V	Blandcement	20-64

CEM I är en anläggningscement som består av en hög andel klinkercement och är Sveriges mest använda cement. Trenden visar dock att CEM II (byggcement) börjar användas i allt högre utsträckning. Detta på grund utav att den innehåller mer tillsatsmaterial, som ger lägre klimatpåverkan utan att påverka egenskaperna negativt (Irfan, 2011).

3.4.2 Cementpasta, vattencementtal och vattenbindemedelstal

Cementpasta bildas när vatten och cement blandas ihop, förhållandet mellan dessa kallas vattencementtal och förkortningen för detta är vct. Det är detta som avgör de olika egenskaperna för cementpastan och betongen, till exempel livslängden, hållfastheten och även värmeutveckling. (Sundqvist & Lif, 2012).

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

Där

W är blandningsvattnet [kg], [kg/m³] eller [l/m³]

C är mängden cement [kg], [kg/m³]

Ett lågt vattencementtal betyder att mängd vatten är lägre än mängd cement i cementpastan, detta innebär att avståndet mellan partiklarna blir mindre vilket skapar en tätare betong. I sin tur leder detta till att betongen får en högre hållfasthet.

Effekten som de olika tillsatsmaterialen har på cementpastans struktur kan variera beroende på mängden av varje tillsats. Hög andel tillsatsmaterial kan medföra kraftig påverkan på strukturen och vid användningen av dessa byts därför vct (vattencementtalet) mot vbt (vattenbindemedelstalet) (Sundqvist & Lif, 2012).

$$vbt = \frac{W}{C + \beta D} \quad (2)$$

Där

W är mängden blandningsvatten [kg]

C är mängden cement [kg]

D är mängden tillsatsmaterial [kg]

β är effektivitetsfaktor (0-1)

För att beskriva hur stor påverkan tillsatserna har på cementpastan så används effektivitetsfaktorn β (Sundqvist & Lif, 2012).

3.4.3 Tillverkningsprocess för cement

Varje år framställs flera miljoner ton kalksten ur dagbrott när kalksten sprängs loss runt om i Sverige. För att minska kostnaderna och tillverkningstid så brukar cementfabriker placeras nära dagbrott. Cementfabrikerna kan producera olika typer av cement beroende på tillsatsmaterial och råmaterial, även positioneringen rent geografiskt av fabriken kan resultera i olika cementtyper. Cementpulver är slutprodukten efter att råmaterialet gått igenom processens olika steg, se figur 6 nedan (Shamoun & Redzepovic, 2014).

Kalksten kan variera i storlek, från grus, till medelstora stenar upp till en storlek på 80 mm. Kalkstenen transporteras senare vidare till vad som kallas för homogeniseringslager. För att uppnå den optimala kemiska sammansättningen mals kalksten med materialet som ska användas till råmjöl. Homogenisering kan ske även längre fram i processen då råmjölet lagras i silor. Råmjölet går genom en serie cykloner i en förvärmningsprocess, där råmjölet värms upp till 850 °C med hjälp av ugnsgaser (Shamoun & Redzepovic, 2014).

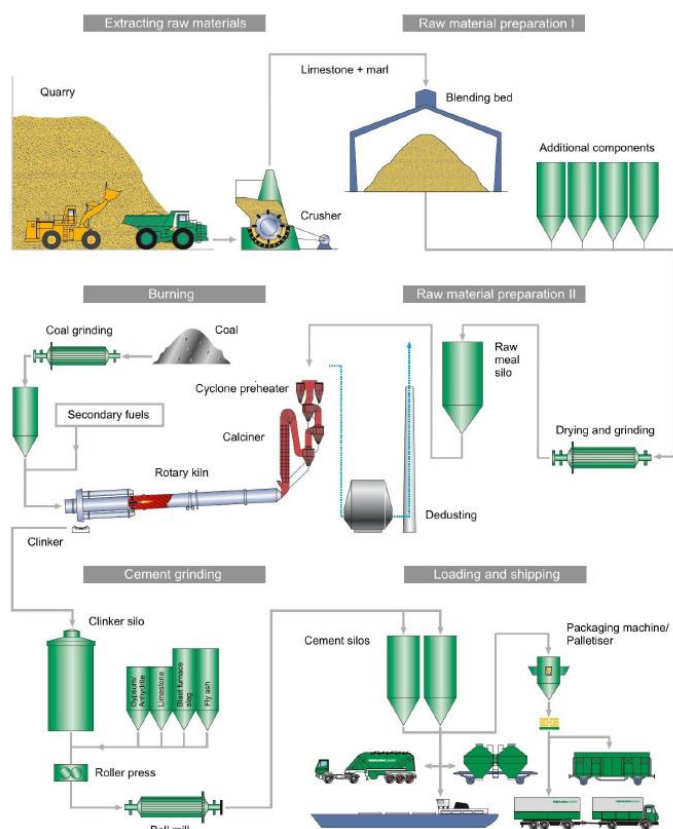
Vidare i processen kommer steget kalcinering, det betyder att kalkstenen värms upp, bryts ner och bildar kalk (Tahiri, 2011). Temperaturen i denna process brukar vara upp till 1000°C och mellan 40 - 50 % av de totala emissionerna av koldioxid vid cementtillverknings kommer främst från förbränningsprocessen (Shamoun & Redzepovic, 2014), enligt:



När kalcineringsprocessen går vidare till klinkerproduktionen så höjs temperaturen till 1450°C i roterugnar. Till följd av denna höga temperatur sker en kemisk och fysisk reaktion som kallas sintring. Sintring är processen där råmjölet omvandlas till cementklinker. När klinkern kommer ut från ugnen så går den vidare till kylningsprocessen (Shamoun & Redzepovic, 2014).

För att reaktiviteten i klinkermaterialen skall behållas, måste kylningsprocessen vara snabb och effektiv. Därför förvaras klinkermaterialet i fabriken tills nästa steg i processen ska behandla den, lagringen kan vara i silos eller planlager. För att cementen ska bli redo att användas så tillsätts olika mineraler som till exempel slagg eller flygaska, beroende på vilken cementtyp som ska tillverkas och vad den ska användas till (Shamoun & Redzepovic, 2014).

Cement behöver optimeras och därför tillsätts gips som förbättrar cementens egenskaper, till exempel volymbeständighet, hållfasthet och livslängd. Den mals sedan ner till ett grått pulver. Till exempel innehåller CEM I cirka 95 % klinker, 4-5 % gips och resten är krossad kalksten. Färdigt cement förvaras vidare i utlastningssilos där homogenisering kan vara aktuell, efter detta transporteras cementen som slutprodukt till packningsstation eller säljs som lösvikt. (Shamoun & Redzepovic, 2014).



Figur 6 - Tillverkningsprocess för cement (HeidelbergCement Group, 2014)

3.4.4 Kalkbrytning

Utvinningsplatsen för kalk förstör närliggande områden då höga koncentrationer av kalk sprids ut i mark och vattendrag. Kalk är en ändlig resurs och miljöproblemen vid brytning är bland annat utsläpp av koldioxid, men kalkbrytning kan även påverka naturen och den biologiska mångfalden negativt (Krausz, 2012).

4 Klimatpåverkan från olika energikällor

Inom betongindustrin är processer vid cementtillverkning och tillverkning av kalkprodukter till cement de mest energikrävande, eftersom det krävs stora mängder energi till exempel vid drift av förbränningsugnar. Fokus i detta kapitel läggs därför på olika processer inom dessa områden. Fossila bränslen är den huvudsakliga energikällan som används vid cementtillverkning och tillverkning av kalkprodukter, på grund av detta blir nettoutsläppen av koldioxid stora (BAT, 2013).

4.1 Cementtillverkning

Detta avsnitt behandlar energianvändning och utsläpp beroende på processteknik, samt vilka bränslekällor som används vid cementtillverkning.

4.1.1 Allmänt om energianvändning och processutsläpp

I slutet av 90-talet producerade cementindustrin ungefär 2,3 miljoner ton klinker och använde därmed cirka 2100 GWh bränsle och 310 GWh el. Samtidigt tillverkade kalkindustrin 606 000 ton bränd kalk vilket innebar en användning av cirka 870 GWh bränsle och 95 GWh el (Åhman, 2004).

Ungefär 50 % av koldioxidutsläppen (540kg CO₂/ton cementklinker) kommer från kalcinering där kalksten omvandlas till kalciumoxid och koldioxid. De resterande utsläppen av koldioxid vid cementtillverkning kommer från förbränning av bränslen som står för mellan 30 % - 50 % av koldioxidutsläppen. Då kalcinering är en endoterm reaktion krävs stora mängder energi med temperaturer på cirka 1400-1500°C, vilket kräver cirka 1,700 MJ/ton cement (Hasanbeigi, Price & Lin, 2012).

För varje ton cement som tillverkas krävs cirka 100-110 kWh elektricitet, vilket motsvarar ungefär 1-10 % av koldioxid-utsläppen beroende på vilken energimix som används (Hasanbeigi, Price & Lin, 2012). Cementindustrin förbrukar cirka 3 % av världens primäre energi och ungefär 1,5 % av världens tillverkade elektricitet (WWF, 2008). Ungefär 80 % av elanvändningen går till råkvarnar och frånluftsfläktar som används till bland annat brännugnar, råkvarnar och cementkvarnar. Elanvändningen står dessutom för cirka 20 % av det totala energibehovet inom cementindustrin (BAT, 2013).

I förhållande till kalcinering och förbränningen av fossila bränslen i brännugnar, är utsläppen av koldioxid från elanvändning relativt liten vid cementtillverkning. Elektricitet vid cementtillverkning står trots detta för cirka 25 % - 30 % av produktionskostnaden av cement (WWF, 2008).

4.1.2 Beskrivning och jämförelse mellan olika processers energibehov

Energibehovet hos cementugnar kan variera stort beroende på vilken process som används. För att hantera materialet som tillsätts under tillverkning finns det fyra olika tekniker; torr, semi-torr, semi-våt och våt process. Den våta processen innebär att råmjöl blandas med vatten, denna metod kräver mer energi då vattnet som används måste förångas. Den torra processen innebär att råmaterialen mals och torkas till råmjöl för att sedan matas till ugnen med förvärmning och/eller förkalcinering (BAT, 2013).

Cementtillverkning med torr process används främst i moderna cementanläggningar, då denna process kräver minst energi av de olika metoderna. För att ytterligare sänka energibehovet kan förvärmning användas. Antingen förvärms endast tillsatsmaterialet innan det tillsätts i roterugnen, eller så används också en förkalcinering där koldioxiden avdrivs från kalkstenen (Stripple, Sternhufvud & Skårman, 2005).

En torr process med förvärmning och förkalcinering är effektivast och har nästan ett halverat energibehov i jämförelse med en dålig schaktugn eller en lång förbränningsugn med våt process. I tabell 2 nedan syns energibehovet för de olika processer som används inom cementindustrin (BAT, 2013).

Tabell 2 – Energianvändning för olika processtekniker vid framställning av klinker (Åhman, 2005).

Processteknik	Torr			Semi-torr		Semi-våt		Våt	
Ugn	Lång 1-2 stegs SP ^a	4 stegs SP	4-6 stegs PC ^a	Lång	Lepol ^c	Lepol (3 kamrar)	3 och 4 steg SP och PC med tork	Lång	2 stegs PC med tork
Råvara	Torr råmjöl			Pelleterat råmjöl		Filterkaka (pressad)		Slurry	
Fukthalt (%)	0,5-1,0			10-12		16-21		28-43	
Ugnskapacitet (ton klinker/dag)	300- 2800	300- 4000	2000- 10000	300- 1500	300- 2000	300- 3000	2000- 5000	300- 3600	2000- 5000
Specifik värme (GJ/ton klinker)	3,6- 4,5	3,1- 3,5	3,0- 3,2	3,5- 3,9	3,2- 3,6	3,6-4,5	3,4-3,6	5,0- 7,5	4,5-5,0

^a SP = Cyclone preheater kiln; Ugn med förvärmning i cyklon

^b PC = Cyclone preheater/precalciner kiln; Ugn med förvärmning och förkalcinering i cyklon

^c Lepol = travelling grate preheater kiln; Ugn med förvärmning i rörlig rostbädd

4.1.3 Internationell jämförelse

Internationellt varierar energiförbrukningen och koldioxidutsläppen vid cementtillverkning relativt mycket, där Japan ligger i framkant när det gäller låga utsläpp av koldioxid och en liten energiförbrukning. Detta med hjälp av moderna anläggningar med hög effektivitet och ett lågt klinkernehåll i cementen. Andelen våta anläggningar i USA är 25 % och andelen klinker är hög vilket förklarar de högre utsläppen av koldioxid och energiförbrukning i jämförelse med övriga indikatorer. I Sverige används endast torra anläggningar vilket är bättre än övriga EU-länder som har ungefär 6 % våta och 16 % semi-våta eller semi-torra anläggningar. I tabell 3 nedan syns en jämförelse mellan några indikatorer och deras respektive koldioxidutsläpp samt energiutsläpp (Åhman, 2004).

Tabell 3 - Jämförelse av viktiga indikatorer för cementtillverkning (Åhman, 2004).

Indikatorer	Typ	Kg CO ₂ /kg cement	GJ/ton cement	Klinker/cement
Japan	Torr	0,73	3,1	0,80
USA	Torr/våt	0,99	5,25–5,5	0,88
Europa	Torr/våt	0,84	4,1	0,81
Sverige	Torr	0,80	3,65	0,89

4.1.4 Bränslekällor

Inom cementindustrin används främst fossila bränslen som energikälla. Kol är det mest använda bränslet vid cementtillverkning i ett europeiskt perspektiv, men även andra bränslen såsom petroleumkocks och avfallsbränslen används i hög utsträckning. (BAT, 2013). Upp till 70 % av de bränslen som används i Sverige är kol och petroleumkocks, jämfört med övriga EU-länder som använder upp till 90 % (Åhman, 2004). I tabell 4 nedan syns fördelningen mellan olika bränsletyper i EU-27 (EU-medlemmar år 2007).

Tabell 4 – Bränslekonsumention uttryckt i procent av värmeutveckling från cementindustrin i EU-27 (BAT, 2013).

Bränsletyp	Procent av totala (%)
Kol (fossil)	18,7
Avfallsbränslen	17,9
Petroleumkocks och kol (fossil)	15,9
Brunkol och andra solida bränslen (fossil)	4,8
Eldningsolja	3,1
Naturgas (fossil)	1,0

4.2 Tillverkning av kalkprodukter

Detta avsnitt behandlar klimatpåverkan från tillverkning av kalkprodukter, som ingår i cementtillverkning. Avsnittet innehåller även information om energianvändning, utsläpp beroende på processerteknik samt vilka bränslekällor som används inom kalkindustrin.

4.2.1 Jämförelse mellan olika ugnstyper och energibehov

Det finns en rad olika typer och varianter av ugnar inom kalkindustrin, till exempel schaktugnar, roterande ugnar och fluidiserande ugnar. Ungefär 90 % av alla ugnar i Europa är av typen schaktugn, dessa är placerade vertikalt med en höjd upp till 30 meter och en diameter på 6 meter. Principiellt för en schaktugn är att kalkstenen matas in i den övre delen och går igenom olika steg på sin väg ner genom ugnen för att tillslut bli kalk (BAT, 2013).

Roterande ugnar är i motsats till schaktugnen, placerad horisontellt med en lutning nedåt på 1-4°. Denna typ av ugn kan vara upp till 150 meter lång med en diameter på ungefär 2-4,5 meter. Kalkstenen matas in i den övre delen medan bränslet och luften som skall förbrännas kommer in i den nedre änden. Den brända kalken som kommer ut från ugnen kyls av i en kylzon, och förvärmer därmed luften som matas in för förbränning (BAT, 2013).

Ur energisynpunkt är schaktugnarna generellt sett mest fördelaktiga medan de roterande ugnarna är det motsatta. Dock kan förvärmning sänka energiförbrukningen hos de roterande ugnarna till lägre nivåer. I tabell 5 nedan jämförs olika typer av ugnar med respektive värme- och elförbrukning. En övergång från roterande ugnar till schaktugnar är tekniskt svårt då kalken från de roterande ugnarna håller en högre kvalitet, vilket efterfrågas inom vissa industrier (Åhman, 2004).

Tabell 5 - Energiförbrukning vid kalkbränning (Åhman, 2004).

Ugnstyp		Värmeförbrukning [GJ/ton kalk]	Elförbrukning [kWh/ton kalk]
Schaktugnar	Vanliga schaktugnar ^a	4-4,7	5-45
	Parallell-flödes regenerativ schaktugn	3,6-4,2	20-40
Roterande ugnar	Lång roterande ugn	6,5-7,5	18-25
	Roterande ugnar med förvärmning ^b	4,8-6,1	17-100
Fluidiserande ugnar	Rörlig rostbädd	3,7-4,8	31-38
	Övriga fluidiserande ugnar ^c	4,6-5,4	20-25

^a Bl.a nämns "Mixed feed - double-inclined- . multi-chamber-, and annular shaft kilns" i (BAT, 2001).

^b Rostbädd och cyklon förvärmning finns. Observera att det är rostbädden som använder uppemot 100 kWh_{el}/ton kalk medan en ugn med cyklon använder 23 till 40 kWh_{el}/ton

^c T.ex "gas suspension calcination kiln"

4.2.2 Bränslen som används

Inom kalkindustrin blandas inte bränslen på samma sätt som i cementindustrin, där en viss del av energin kan komma från avfall och en annan del från till exempel kol eller eldningsolja. Orsaken till detta är främst att det är större risk för föroreningar vid användning av vissa typer av bränslen. Detta går inte att förena med de höga kvalitetskrav som ställs på slutprodukten inom kalkindustrin när den används i nya processer, till exempel inom pappersindustrin (BAT, 2013).

I ett europeiskt perspektiv används främst fossila bränslen som bränslekälla inom kalkindustrin, men även andra bränslen såsom biomassa och avfallsbränslen förekommer. I tabell 6 nedan syns fördelning mellan olika bränsletyper som används inom kalkindustrin i EU-27 år 2003 (BAT 2013).

Tabell 6 - Fördelning mellan bränsletyper vid kalkförbränning i EU-27 (BAT, 2013).

Bränsletyp	Procent av totala (%)
Gas (fossil)	43
Fast form (fossil)	41
Flytande (fossil)	7
Avfall	8
Biomassa	1
Övriga	-

4.3 Sammanfattningsvis

Betong släpper ut ca 0,73–0,99 ton CO₂/ton betong beroende på olika faktorer som till exempel andelen cementklinker. Koldioxidutsläppen kommer främst från förbränning av fossila bränslen och i form av processutsläpp vid cementtillverkning. Processutsläpp innebär de utsläpp som uppstår under kalcineringsprocessen, vilket således inte innefattar förbränning av bränslen (Hasanbeigi, Price & Lin, 2012)(Åhman, 2004).

Kalkindustrin är en energiintensiv industri där det krävs mycket energi i form av fossila bränslen, vilket i sin tur leder till global uppvärmning. Energikostnaderna står för mellan 30-60 % av den totala produktionskostnaden. Förbränningsugnarna drivs främst med fossila bränslen men även i mindre skala används avfall och biomassa som bränsle (BAT, 2013).

5 Jämförelse mellan olika livscykelanalyser

Varje år tillverkas tio miljarder ton betong i världen, vilket innebär att det krävs en stor mängd naturresurser för att kunna framställa betong. Av världens totala ballast som årligen tillverkas används ungefär 42 % vid betongtillverkning. Detta kräver mycket energi och transport, vilket i sin tur leder till olika miljöbelastningar. Andra effekter på miljön som är kopplad till byggsektorn är relaterad till produktionen av avfall. Byggsektor genererar årligen cirka 850 miljoner ton avfall, vilket motsvarar ungefär 31 % av världens totala avfall (De Schepper et al., 2014).

Vid själva betongtillverkningen har de olika studierna använt sig av olika energikällor. Nisbet (2002) och Prusinski (2003) räknar med förbränning av kol och diesel medan Sjunnesson (2005), De Schepper (2014) och Irfan (2011) främst har använt diesel och elektricitet. Detta är en förklaring till skillnaden mellan studierna (tabell 7 & 8), då kol ger större utsläpp av koldioxid per energienhet jämfört med till exempel diesel (EIA, 2014).

Utsläppen av koldioxid vid transport är av olika hög grad beroende på vilka antaganden som har gjorts i de olika studierna (tabell 7 & 8). Till exempel har Sjunnesson (2005) antagit att transport av cement sker med lastbil och lastfartyg samt en transportsträcka på 100 km efter betongen är färdig, där betongen transporteras med lastbil. De Schepper (2014) har antagit en transportsträcka på 50 km från betongfabrik till byggarbetsplatsen medan Irfan (2011) och Prusinski (2003) inte har inkluderat denna transportsträcka för betong i sina beräkningar.

De olika studierna i tabell 7 och 8 har redovisat utsläpp för betonghållfastheten C20/25, medan studien De Schepper (2014) har använt sig av C50/55 vilket i sin tur leder till högre utsläpp av koldioxid vid cementtillverkning.

Tabell 7 - Koldioxidutsläpp(kg CO₂ eq/m³) vid betongtillverkning

Studier	Krossning av Ballast	Transport	Cementtillverkning	Betongtillverkning	Summa
Sjunnesson (2005)	2,0	47,0 ^a	230,0	5,5	284,5
De Schepper (2014)	2,5	25,0 ^b	265,0	4,0	296,5
Irfan (2011)	6,3	10,6	213,4	5,3	235,6

^a Sjunnesson har antagit en transportsträcka på 100 km efter betongen är färdig

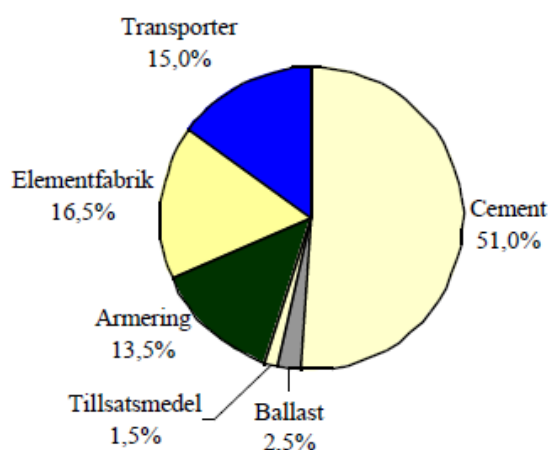
^b De Schepper har antagit en transportsträcka på 50 km efter betongen är färdig

Tabell 8 - Koldioxidutsläpp(kg CO₂/m³) vid betongtillverkning

Studier	Krossning av Ballast	Transport	Cementtillverkning	Betongtillverkning	Summa
Nisbet (2002)	4,71	8,71	201	14,2	228,62
Prusinski (2003)	4,60	9,20	200	14,0	227,80

Cirka 70-80 % av den globala uppvärmningspotentialen inom betongindustrin kommer från cementtillverkning. Internationellt står tillverkningen av cement för cirka 1,6 miljarder ton koldioxid varje år (De Schepper et al., 2014). I Sverige släpper produktionen av cement ut ca 2,8 miljoner ton koldioxid årligen, vilket motsvarar ungefär 5 % av landets totala utsläpp. Branschens monetära betydelse motsvarar cirka 0,1 % av Sveriges BNP, vilket innebär att dess utsläpp av koldioxid är av stor betydelse i förhållande till dess ekonomiska betydelse (Åhman, 2004).

Genom att göra en jämförelse mellan de olika studierna som visas i tabell 7 & 8 syns det tydligt att cementtillverkningen har störst utsläpp av koldioxid. Detta stämmer överens med figur 7 nedan, där cementtillverkningen är det mest klimatpåverkande steget vid betongtillverkning. Orsaken till denna stora klimatpåverkan vid cementtillverkning kommer från förbränningsprocessen (se 3.4.3). Vid cementtillverkningen står klinkerproduktionen för cirka 60 % av koldioxidutsläppen, där kalksten omvandlas till kalciumoxid och koldioxid (De Schepper et al., 2014).



Figur 7 – Fördelning av koldioxidutsläpp vid betongtillverkning (Cementa FOU, 1998).

Från år 2000-2006 har den globala cementproduktionen ökat med ungefär 54 % och nettoutsläppen av koldioxid har ökat med cirka 42 % under denna tid. Därför behövs det nya förslag och åtgärder för att kunna minska klimatpåverkan för att skapa en klimatvänligare betong (IEA & WBCSD, 2009).

6 Åtgärder för att minska utsläpp av koldioxid

I detta avsnitt beskrivs olika metoder för att minska utsläppen av koldioxid vid betongtillverkning.

6.1 Minimering av andelen cement vid betongtillverkning

Klimatpåverkan från betong kan minska genom att ersätta en del av Portlandcement med olika tillsatsmaterial, till exempel silikastoft, masugnsslagg (GGBS) och flygaska (Irfan, 2011). Dessa material är för tillfället koldioxidneutrala, vilket ger betongen potential för att minska klimatpåverkan. Dock accepterar inte den europeiska stålindustrin detta av konkurrensskäl och förhandlingar pågår för att ta fram en definition av vilken koldioxidbelastning masugnsslagg i betong ska ha inom en relativt snar framtid enligt Rönneblad¹. Dessa tillsatser har en viss effekt på andra miljöindikatorer som till exempel förurning och vattenanvändning (CI-premier, 2012).

Val av tillsatsmaterial beror på olika faktorer, till exempel tillgången beroende på det geografiska läget, vilken typ av cement som används vid betongtillverkning samt vilka egenskaper hos betongen som efterfrågas (Gorkum, 2010). Tillsatsmaterial minskar inte bara miljöbelastningen utan kan till exempel leda till bättre hållfasthet och lägre energianvändning vid betongtillverkning (Irfan, 2011).

6.1.1 Silikastoft

Silikastoft kan ersätta cirka 4-10 % av Portlandcement vid betongtillverkningen, vilket i sin tur minskar mängden koldioxidutsläpp. En annan anledning till att silikastoft används i hög grad är för att den innehåller kiselsyra som reagerar med kalciumhydroxid. Denna reaktion bildar mer cementgel jämfört med användning av endast vatten (Sundqvist & Lif, 2012).

Silikastoftet förbättrar betongens egenskaper, till exempel får betongen högre böjdraghållfasthet, draghållfasthet, tryckhållfasthet, elasticitetsmodul och bindningsstyrka. Dessutom förbättrar silikastoftet betongens hållbarhet och ökar dess seghet (Basmahji & Texén, 2012).

¹ Anders Rönneblad (Projektledare på cementa utveckling) intervjuad av författaren den 13 april 2015.

6.1.2 Masugnsslagg

Under de senaste åren har användningen av slaggcement ökat från cirka 1,1 till 3,1 miljoner ton per år. Anledningen till att den globala användningen av slaggcement har ökat så mycket är för att det ger betongen bättre hållfasthet. Dessutom förbättrar slaggcement betongens hållbarhet under dess livslängd (Prusinski, Marceau & VanGeem, 2003).

Vid betongtillverkning kan masugnsslagg ersätta Portlandcement med cirka 25-85 % beroende på vilka tillämpningar och egenskaper betongen ska ha (Irfan, 2011). Detta medför att den globala uppvärmingspotentialen kan minska med upp till 47 % för tillverkning av betong (Materials, 2014). I tabell 9 nedan beskrivs hur mängden slagg påverkar utsläppen av koldioxid vid betongtillverkning.

Tabell 9 - Koldioxidutsläpp(kg CO₂ eq/m³) vid betongtillverkning för olika mängder masugnsslagg (Irfan, 2011).

Mängd Slagg [%]	Krossning av Ballast	Transport	Cementtillverkning	Betongtillverkning	Summa
0	6,3	10,6	213,4	5,3	235,6
25	6,1	13,4	164,1	5,3	188,9
50	6,2	15,1	135,2	5,3	161,8
100	6,2	17,3	103,6	5,3	132,4

Mängden råmaterial vid betongtillverkning kan minska med cirka 2,9 % vid ersättning av Portlandcement med upp till 20 % masugnsslagg. Detta kan minska mängden koldioxid som släpps ut under tillverkningsprocessen för betong (Prusinski, Marceau & VanGeem, 2003).

Betong med masugnsslagg har bättre egenskaper än ren Portlandcement i vissa avseenden. Användningen av masugnsslagg ger betong högre motstånd mot kloridinträngning, sulfatangrepp och alkali-kiselreaktioner. Ersättning med masugnsslagg minskar även saltutslag, reducerar permeabiliteten och dessutom skapar den en bättre kemisk stabilitet och lägre värmeutveckling. Användningen av masugnsslagg ökar även betongens hållfasthet och dess beständighet (Basmahji & Texén, 2012).

Till exempel kan mängden koldioxidutsläpp reduceras genom att öka andelen slagg. Vid ersättning med 25 % slagg minskar koldioxidutsläppen med cirka 20 %. Vid ersättning av Portlandcement med 100 % slagg minskar utsläppen av koldioxid med cirka 44 %, enligt tabell 9 ovan (Irfan, 2011).

6.1.3 Flygaska

Sedan 1900-talet har flygaska använts som ett kompletterande material för cement vid betongtillverkning. Användning av flygaska har ökat stadigt under de senaste 50 åren, och år 2005 uppgick den till cirka 15 miljoner ton i USA (Thomas, 2007). Flygaska kan ersätta Portlandcement med cirka 15 % - 25 % vid betongtillverkning för betong med hög hållfasthet. Dock kan mängden variera beroende på olika faktorer, till exempel kraven på hållfasthet, klimat och det geografiska läget. Höga mängder flygaska (40 % - 50 %) kan användas för betong med normal hållfasthet (Nath & Sarker, 2011). I tabell 10 nedan visas olika doseringsnivåer av flygaska i cement och dess klassificering.

Tabell 10 – Doseringsnivåer för flygaska (Thomas, 2007).

Massprocent av mängd flygaska i cement [%]	Klassificering
<15	Låg
15-30	Måttlig
30-50	Hög
>50	Mycket hög

Genom att använda flygaska vid betongtillverkning minskar stenseparationen och vattenseparationen, vilket förbättrar pumpbarheten. Det leder också till ett lägre vatteninnehåll i jämförelse med en betong baserad på Portlandcement, men kan variera beroende på typ av flygaska och andra faktorer. Mängden vatten kan minska med cirka 3 % vid användning av 10 % flygaska i betong (Thomas, 2007).

Betong med flygaska har bättre motståndskraft mot till exempel armeringskorrosion, sulfatangrepp och alkali-kiselreaktioner. Användning av flygaska i betong leder även till bättre hållfasthet, längre livslängd och minskar behovet av att använda orörda naturresurser såsom sten och grus. En välproportionerad betongblandning med flygaska har också en förbättrad bearbetbarhet i jämförelse med en vanlig Portlandcementbetong (Basmahji & Texén, 2012).

Vid användning av flygaska krävs det mindre energi vid tillverkning av betong, vilket i sin tur leder till mindre utsläpp av koldioxid. Det enda klimatrelaterade problemet flygaska har är transport till landfyllning (Irfan, 2011). Enligt Löfgren² ger flygaska mycket lågt nettoutskott av koldioxid till atmosfären vid betongtillverkning. I tabell 11 nedan beskrivs hur mängden flygaska påverkar utsläppen av koldioxid vid betongtillverkning.

² Dr. Ingemar Löfgren (R&D Manager / FoU-Chef, Thomas Concrete Group AB) intervjuad av författaren den 2 april 2015.

Tabell 11 - Koldioxidutsläpp(kg CO₂eq/m³) vid betongtillverkning för olika mängder flygaska (Irfan, 2011).

Mängd Flygaska [%]	Krossning av Ballast	Transport	Cementtillverkning	Betongtillverkning	Summa
0	6,3	10,6	213,4	5,3	235,6
10	6,1	11,3	201,5	5,3	224,2
20	6,2	11,9	191,2	5,3	214,6

Genom att ersätta andelen Portlandcement med 10 % flygaska, kan koldioxidutsläppen minska med cirka 5 %. Vid en ersättning med 20 % flygaska minskar utsläppen av koldioxid med cirka 9 %, enligt tabell 12 ovan (Irfan, 2011).

6.1.4 SS-metoden, praktiskt exempel på minimering av cement

Mudder- eller schaktmassor med högt lerinnehåll och eventuella föroreningar kan användas som utfyllnad i till exempel ett hamnområde. För att massorna skall gå att använda ur ett geotekniskt och miljösäkert perspektiv behöver de stabiliseras och solidifieras. Detta kan till exempel göras med den så kallade S/S-metoden (SGI, 2011b).

Metoden går ut på att bindemedel blandas i muddermassor för att förbättra massornas hållfasthets- och deformations-egenskaper samtidigt som mobiliteten minskar hos eventuella föroreningar i massorna.

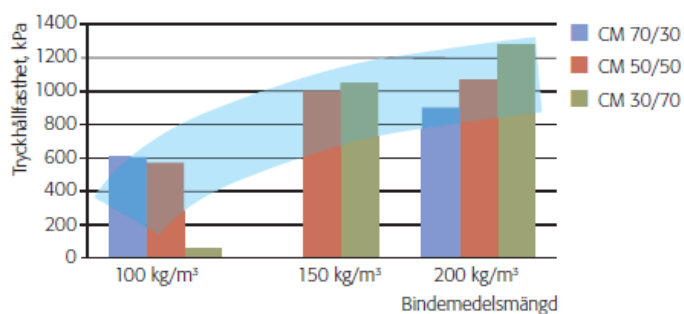
Bindemedel som används är till exempel cement, granulerad masugnsslagg och andra tillsatsmaterial såsom kalk, flygaska, bioaska med mera. Förhållande mellan bindemedlen och tillsatserna skapar de egenskaper som krävs hos massorna för den aktuella situationen. (SGI, 2011a).

Stabilisering syftar vanligtvis till bindandet av föroreningar i massorna för att minska deras mobilitet, men kan även leda till att de behandlade massorna får en ökad bärighet och stabilitet. Solidifiering innebär att massorna omvandlas till en solid kropp med lägre vattengenomsläpplighet vilket därmed minskar utlakning av eventuella föroreningar från de behandlade massorna (SGI, 2011a).

Val av bindemedel och blandning av dessa måste tas fram i varje enskilt projekt beroende på massornas egenskaper. Några egenskaper som kan undersökas är till exempel massornas hållfasthet, läkningsegenskaper och om massorna innehåller föroreningar. Beroende på vilka egenskaper massorna har kan sedan ett underlag tas fram för att optimera bindemedlen (SGI, 2011b).

Cement blandat med mald granulerad masugnsslagg som till exempel Merit och/eller flygaska används vanligen som bindemedel vid S/S-metoden i olika proportioner. Val av proportioner påverkar hållfastheten avsevärt, där ökad mängd bindemedel vanligen ger en högre hållfasthet medan val av bindemedel har en mindre betydelse (SGI, 2011a). I figur 8 nedan syns tryckhållfastheten beroende på blandningsproportionerna av cement och slagg samt bindemedelsmängd/m³ massor som stabiliseras.

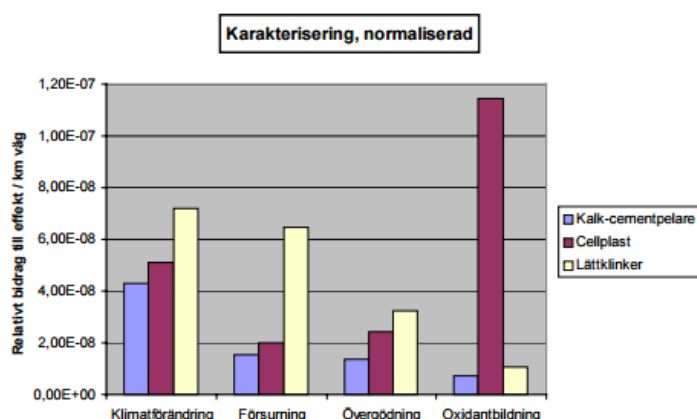
Genom att använda en lägre mängd cement kan en god hållfasthet fortfarande vara uppfylld men med lägre klimatpåverkan, vilket i projekt med stora mängder massor kan göra avsevärd skillnad i koldioxidutsläpp (SGI, 2011b). Enligt Löfgren³ kan det vid markstabilisering användas upp till 90 % slagg och 10 % cement, eller cirka 30 % flygaska istället för slagg beroende på projektets förutsättningar.



Figur 8 - Tryckhållfasthet hos provkroppar med olika bindemedelsmängder och förhållande mellan Byggcement och Merit 5000 (SGI, 2011b).

Genom att använda muddermassor som till exempel utfyllnadsmaterial minskar behovet av andra byggnadsmaterial och transporter, vilket leder till lägre energiförbrukning och minskade utsläpp av till exempel koldioxid (SGI, 2011b).

En jämförelse mellan S/S-metoden, som till exempel djupstabilisering och användning av lättfyllnadsmaterial såsom cellplast och lättklinker tyder på lägre klimatpåverkan vid användning av S/S-metoden i ett vägbygge. Även energigång, försurningspotential med mera är lägre än för lättfyllnadsalternativen vilket innebär att djupstabilisering är att föredra. Användning av cellplast ger dessutom avsevärt större oxidantbildning än de övriga kategorierna. I figur 9 nedan syns att djupstabilisering med kalk-cementpelare har lägre miljöpåverkan i samtliga kategorier än lättfyllnadsalternativen (Rydberg & Andersson, 2003).



Figur 9 - Jämförelse av de olika alternativen påverkan på klimat, försurning, övergödning och oxidantbildning, (Rydberg & Andersson, 2003).

³ Dr. Ingemar Löfgren (R&D Manager / FoU-Chef, Thomas Concrete Group AB) intervjuad av författaren den 2 april 2015.

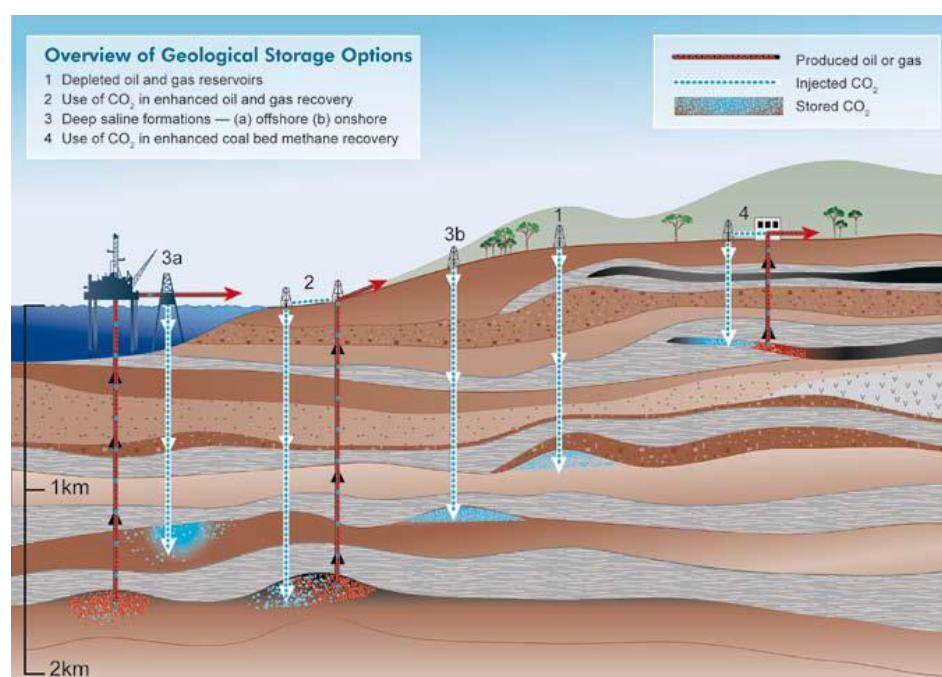
6.2 CCS-metoden – avskiljning, upptag och lagring av koldioxid

CCS-metoden (Carbon Capture and Storage) är en metod som innebär att koldioxidutsläpp som kommer från stora utsläppskällor, till exempel cementindustrin, kan förhindras i hög utsträckning genom att samla och lagra koldioxid. Användning av CCS-metoden från mindre och mobila källor är besvärligt och ekonomiskt svårt att genomföra, därför bör dessa områden istället arbeta med energieffektiviseringar och förnybara energikällor framför traditionella (IPCC, 2005).

Utsläpp av koldioxid som vanligtvis släpps ut till atmosfären under processen separeras från andra emissioner. Den separerade koldioxiden komprimeras och transporteras för att i ett senare skede lagras i någon form under en lång tidsperiod. För att märkbart påverka atmosfärens koncentration av koldioxid behöver reservoaren där koldioxiden lagras vara av signifikant storlek i förhållande till de årliga utsläppen av koldioxid till atmosfären (IPCC, 2005). Det har uppskattats att cementindustrin vid betongtillverkning kan sänka sina årliga utsläpp av koldioxid med upp till 56 % till år 2050 med hjälp av CCS-metoden. (Li et al., 2013)

Lagringen av den uppsamlade koldioxiden kan ske i till exempel geologiska formationer som utarmade saltformationer, olje- och gasfält (se figur 10 nedan). Liknande tekniker för att lagra koldioxid i dessa formationer används redan av olje- och gasindustrin och har visat sig vara ekonomiskt genomförbart för bland annat oljefält, gasfält och saltformationer (IPCC, 2005).

Genom att injicera den uppsamlade koldioxiden i olika geologiska formationer på djup under 800 m kommer koldioxiden att befinna sig i ett superkritiskt tillstånd, det vill säga hamnat under så högt tryck att den är i vätskeform. Detta innebär en ökad kapacitet för lagring och minskad risk för att koldioxiden skall vandra upp till ytan, ut i atmosfären (IPCC, 2005).



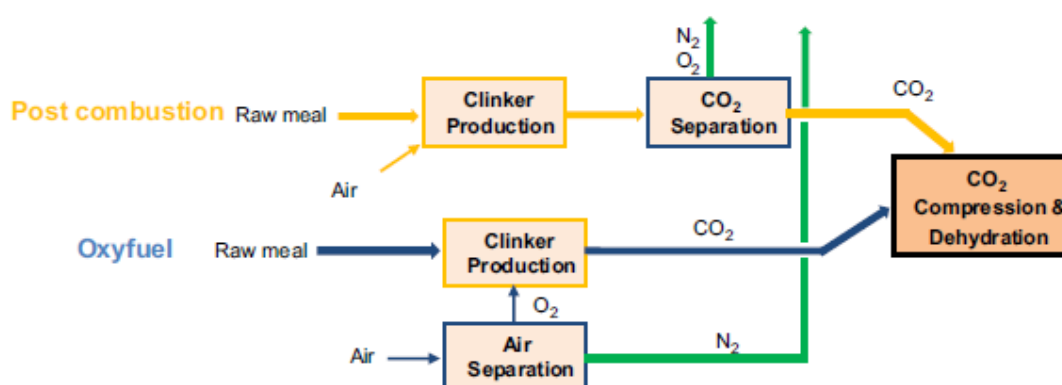
Figur 10 – Översikt av alternativ för lagring av koldioxid i geologiska formationer (IPCC, 2005).

Post-combustion och oxyfuel är de två CCS-metoder som anses vara bäst lämpade för att applicera i cementindustrin vid betongtillverkning, processschemat för metoderna syns i figur 11 nedan. Vid post-combustion avskiljs koldioxiden efter förbränningen av energikällan som används under ett lågt tryck och en låg temperatur. Denna metod kräver mycket liten modifiering av den befintliga produktionsprocessen för cement vilket innebär att metoden lämpar sig väl för att appliceras i nya och befintliga cementugnar.

Genom att samla upp den rökgas som bildas vid förbränning och leda genom ett aminbaserat lösningsmedel kan koldioxiden avskiljas och fångas i lösningsmedlet. Den uppsamlade koldioxiden pumpas sen till en desorbator som avskiljer koldioxiden från lösningsmedlet. Koldioxiden renas, komprimeras och transporteras sen till lagringsplatsen. Denna metod kräver dock cirka 45 % extra energi för att driva desorbatorn och 5 % för att komprimera och transportera den avskilda koldioxiden (Li, et al., 2013).

Oxyfuel-metoden innebär att syrgas matas in i förbränningsugnen istället för vanlig luft. Syrgasen separeras från vanlig luft och kräver därför en enhet av bästa tillgängliga teknik för att separera syret från luften och det krävs stora förändringar av utrustningen som används i förbränningsprocessen för att separera syret. Den rökgas som kommer från förbränningen av klinker och från kalcineringsprocessen återanvänds och blandas med syrgasen för att balansera massflödet i processen (Li, et al., 2013).

Då oxyfuel-metoden använder syrgas istället för luft ökar koncentrationen av koldioxid vid förbränning och denna metod förväntas kunna ge en reduktion av koldioxidutsläppen på mellan 63 % upp till nästan 100 %. Eftersom denna metod kräver stora förändringar av brännugnen och annan utrustning är den bäst lämpad för nybyggda cementfabriker (Li, et al., 2013).



Figur 11 - Avskiljning av koldioxid genom CCS-metoderna post-combustion och oxyfuel i en cementfabrik (Li, et al., 2013).

Ekonomiskt så ökar kostnaderna för cementtillverkning vid användning av CCS-metoden. Det uppskattas att kostnaden vid användning av post-combustion metoden uppgår i cirka 161 USD/ton cement och 60 USD/ton cement för användning av oxyfuel-metoden men varierar beroende på till exempel elpriser (Li, et al., 2013).

6.3 Återvinning och rivning av betongmaterial

Under de senaste åren har återvinning av betong fått större betydelse. Detta på grund av den växande mängden betong som krävs vid byggnation och ökade miljökrav. Varje år återvinns cirka 960 000 ton betong från bygg- och rivningsverksamhet i Sverige (Hellström, 2006).

Återvinning av betong sker genom att betong transporteras till en återvinningsstation, där betongen krossas till olika storlek beroende på vad betongen ska användas till. Krossad betong kan användas i olika områden, till exempel som fyllnadsmaterial i vägbyggen, eller som ballast i betongtillverkning (Sjunnesson, 2005). Mängden betong som kan återvinnas varierar mellan 8 % och 41 %, beroende på vilka egenskaper betongen skall ha (De Schepper et al., 2014).

Återvinning av betong skapar möjligheter att minska utsläpp av växthusgaser, framförallt koldioxid. Genom att använda mellan 20 % - 30 % återvunnen betong vid betongtillverkning kommer klimatpåverkan minska samtidigt som betongens hållfasthetsegenskaper inte påverkas i någon högre utsträckning (De Schepper et al., 2014). Återanvändning av krossad betong som ballastmaterial kan minska energianvändningen med upp till 20 % för ballastkrossning. (Mousavi, 2013).

Betongåtervinning bidrar inte bara till att minska utsläpp av koldioxid, utan kan även minska mängden naturresurser av till exempel sten och grus. Dessutom kan återvinning av betong minimera fasta avfall och minska transportsträckor inom betongindustrin (Klee, 2009).

6.4 Minimera utsläpp av koldioxid vid transport

Vid jämförelse mellan de olika studierna syns det att transporten av råmaterial är den näst största efter cement när det handlar om klimatbelastningen vid betongtillverkning, se tabell 7 & 8 i kapitel 5.

Om transportsträckorna kortas ner eller om miljövänligare drivmedel (till exempel förnybara bränslen) används vid betongtillverkning så sjunker den totala miljöförstörmingspotentialen direkt proportionerligt med transportförbättringen (Sjunnesson, 2005).

Ytterligare en miljöförbättring på transportområdet är om det finns tillfälliga betongfabriker istället för regionala, då kommer transporterna ut till användningsplatserna att minskas vilket i sin tur leder till stora miljöförbättringar inom transportsektorn (Sjunnesson, 2005). Enligt Sandelin⁴ skapar depåer av råmaterial kortare transportavstånd till kunder vilket ytterligare hjälper transportsektorn inom betongindustrin att minimera klimatpåverkan.

⁴ Stefan Sandelin (R&D Manager, Cementa AB Skövde) intervjuad av författaren den 17 mars 2015.

Dessutom kan mängden koldioxidutsläpp minskas genom att använda järnväg- och båttransport istället för vägtransport i högre utsträckning. Detta beror på att järnvägs- och båttransporter använder mindre mängd energi per ton transporterat material (De Schepper et al., 2014).

6.5 Metoder för att minimera energianvändningen vid cementtillverkning

I Sverige är betongindustrin energieffektiv ur ett internationellt perspektiv, dock kan små energieffektiviseringar vara möjliga genom till exempel en ännu bättre styrning och reglering av cementugnarna. Det är vid cementtillverkning också möjligt att optimera kalcinatoren så att förbränningen sker med ett lägre luftöverskott och en högre värmeväxlingsförmåga i förvärmaren. En bedömning uppskattar denna åtgärd till att kunna sänka energibehovet med cirka 3 % samt kunna öka produktionen då den vanligtvis begränsas beroende på mängden rökgas som bildas. (Stripple, Sternhufvud & Skårman, 2005).

Effektivare ugnar och andra tekniker har nästan halverat energiförbrukningen inom cementindustrin, från cirka 6 GJ/ton cementklinker till 3,7 GJ/ton cementklinker sedan 1960-talet (Åhman, 2004). Att reducera mängden klinker i cementen minskar också koldioxidutsläppen, både från råmaterialanvändning och från ett minskat energibehov. (Stripple, Sternhufvud & Skårman, 2005).

Avgaser på moderna cementanläggningar har en temperatur på ungefär 350°C, vilket potentiellt skulle kunna omvandlas till elektrisk energi eller användas till förvärmning av råmaterial. Spillvärmeåtervinning kan nå en effektivitet på 30-60 % beroende på vilken teknik som används och är mest effektiv på större anläggningar.

För varje ton cement som produceras kan cirka 20-45 kWh återvinnas, om cementanläggningar använde sig av denna teknik skulle teoretiskt 68 TWh totalt kunna återvinnas år 2003. Detta motsvarar 0,4 % av världens elanvändning vilket skulle minskat koldioxidutsläppen med cirka 70 miljoner ton. Idag används dock inte tekniken i någon större utsträckning men ger potential till framtida klimatförbättringar inom betongindustrin (WWF, 2008).

Reduktion av elanvändning vid cementtillverkning kan ske genom att till exempel installera strömhanteringsystem eller frekvensomriktare för fläktar. Dessutom kan elanvändningen minska genom att minimera luftläckage i systemet och att öka användningen av energieffektivare utrustning (BAT, 2013).

6.5.1 Minimera användning av fossila bränslen vid cementtillverkning

Inom cementindustrin används främst fossila bränslen som energikälla. Genom att i högre grad använda avfallsbränslen och förnybara bränslen istället för konventionella, fossila bränslen skulle miljöbelastningen minska inom betongindustrin. Att förbränna avfallsbränslen istället för att lägga på deponi minskar också utsläppen av koldioxid avsevärt, eftersom avfall vid nedbrytning bildar bland annat koldioxid (Stripple, Sternhufvud & Skårman, 2005).

Enligt Sandelin⁵ beror den utbredda användningen av fossila bränslen främst på att biobränslen har ett lågt energivärde och inte de kemiska egenskaperna som krävs, till exempel får bränslet inte innehålla alkalier. Däremot menar Sandelin att det sker en ständig forskning och utveckling för att hitta alternativa bränslen i stora kvantiteter, med hög kvalitet och kemisk sammansättning som uppfyller kraven. Detta stämmer överens med EU:s BAT (2013) referensdokument som menar att olika typer av avfallsbränslen påverkar kvaliteten på slutprodukten.

Något att ha i åtanke är att användningen av alternativa bränslen kan ge upphov till ett ökat energibehov. Detta eftersom det kan krävas högre syrehalter under förbränning och/eller att det utvecklas mer förbränningsgaser. Detta innebär en lägre värmeväxling med råmaterialen, vilket leder till att det krävs större mängder bränsle som kompensation (Stripple, Sternhufvud & Skårman, 2005).

6.6 Metoder för att minimera energianvändningen vid tillverkning av kalkprodukter

Genom att i högre utsträckning använda schaktugnar inom kalkindustrin har koldioxidutsläppen under tidsperioden 1990-2004 minskat från 1,35 ton CO₂/ton bränd kalk till 1,25 ton CO₂/ton bränd kalk. Att installera förvärmare hos befintliga roterugnar är en möjlig lösning, dock är kostnaden för denna investering hög och ligger på mellan 80-100 miljoner kronor. Slutproduktens kvalitet förändras också vid användning av förvärmning, bland annat bildas det högre halter av svavel och produkten blir mer lösbränd (Stripple, Sternhufvud & Skårman, 2005).

Det är även möjligt att installera värmväxlare i roterugnar för att återvinna värme från den rökgas som bildas under förbränningsprocessen. Denna återvunna värme kan bland annat användas till att torka kalkstenen. Andra möjligheter är att konvertera befintliga schaktugnar till en parallell-flödes schaktugn, vilket leder till ett lägre energibehov och längre livslängd hos ugnen (BAT, 2013).

⁵ Stefan Sandelin (R&D Manager, Cementa AB Skövde) intervjuad av författaren den 17 mars 2015.

6.6.1 Minimera användning av fossila bränslen vid tillverkning av kalkprodukter

Användning av till exempel naturgas har potential att minska koldioxidutsläppen inom kalkindustrin. Dock är priset inte tillräckligt lågt för att kunna konkurrera med traditionella fossila bränslen i dagsläget och det krävs dessutom högre energiförbrukning hos ugnarna vid användning av naturgas. Biobränslen är inte ett alternativ i dagsläget då det krävs stora mängder energi för att torka och pulverisera bränslet. En annan anledning är att det inte bildas tillräckligt med värme vid förbränning av biobränslen för att slutprodukten skall få uppfylld kvalitet (Stripple, Sternhufvud & Skårman, 2005).

En ökad användning av avfallsbränslen ger också potential att minska koldioxidutsläppen. Sedan 1997 har användningen av avfallsbränslen succesivt ökat inom kalkindustrin, det är dock viktigt att dessa bränslen uppfyller de kvalitetskrav som ställs för att kalkstenen skall få tillräcklig kvalitet. Användning av avfallsbränslen minskar i många fall antalet användningsområden där kalkstenen vanligtvis kan användas. Något som också talar för användning av avfallsbränslen är den låga kostnaden i förhållande till transport och inköpspris för fossila bränslen. (BAT, 2013).

7 Diskussion

Rapporten visar att tillverkning av betong släpper ut stora mängder koldioxid, där cementindustrin står för den största andelen utsläpp med mellan 210-260 kg CO_{2eq}/m³ cement enligt kapitel 5. Även transporter står för en stor del av koldioxidutsläppen för tillverkning av betong, men i relation till cementtillverkning är det ändå en relativt liten del av utsläppen som kommer från transporter. Detta stämmer överens med de studier som vi har undersökt och det representanterna från cement- och betongindustrin som vi har intervjuat har beskrivit.

De flesta och mest effektiva åtgärderna som beskrivs i olika rapporter för att minska koldioxidutsläpp är vid cementtillverkning. Genom att ersätta Portlandcement med masugnsslagg och flygaska finns det stor potential att minska koldioxidutsläpp för tillverkning av betong. Dessa tillsatsmaterial är troligtvis de bäst lämpade åtgärderna för att minimera koldioxidutsläpp inom betongindustrin. Detta eftersom egenskaperna hos betongen inte förändras eller till och med kan förbättras i vissa fall.

Användning av flygaska och masugnsslagg är också ekonomiskt tillämpligt. Vid användning av masugnsslagg och flygaska blir prisskillnaden i stort sett minimal, vilket ökar användningsmöjligheten för dessa tillsatsmaterial avsevärt. Masugnsslagg kan ersätta en större andel cement än flygaska utan att påverka slutprodukten egenskaper och därför är ersättning med slagg en bättre metod för att minska koldioxidutsläpp vid betongtillverkning. Eventuellt kan en kombination av tillsatsmaterialen användas.

En ytterligare metod för att minska koldioxidutsläpp är användning av den tidigare beskrivna CCS-metoden. Metoden är troligtvis en mycket dyr åtgärd i jämförelse med ersättning av Portlandcement med slagg och flygaska för reducering av koldioxidutsläpp. I en intervju med Stefan Sandelin från Cementa beskrev han att användning av till exempel oxyfuel-metoden är mycket dyr, därför används metoden inte i så hög grad inom branschen.

Transport inom betongindustrin står för näst högst utsläpp av koldioxid efter cementprocessen. Genom att använda depåer, transportfartyg och förnybara bränslen i högre utsträckning borde utsläppen av koldioxid minska. Detta kan även minska andra miljöproblem såsom försurning, bildandet av marknära ozon och andra transport relaterade miljöproblem.

Genom att återvinna betong bör utsläppen av koldioxid minska ytterligare. Denna metod påverkar koldioxidutsläppen relativt lite i jämförelse med till exempel ersättning av cement med tillsatsmaterial men kan ändå vara en bra metod för att minska användningen av naturresurser, som till exempel sten och grus.

Ytterligare kan man minska klimatpåverkan genom att energieffektivisera kalk- och cementindustrin vid betongtillverkning. Klimatpåverkan borde också kunna minskas genom att till exempel optimera kalcinatoren och använda spillvärmeåtervinning i högre utsträckning. Energieffektiviseringar inom betongindustrin har redan skett i hög grad, och det är därför svårt att minska energibehovet ytterligare. Det är också svårt att övergå till förnybara bränslen då dessa kan påverka negativt på slutproduktens egenskaper, att öka användningen av avfallsbränslen är troligtvis en rimligare lösning.

8 Slutsats

De viktigaste åtgärderna för att minska koldioxidutsläpp vid betongtillverkning är följande:

- Minska mängden cement i betong genom att ersätta en del av cementen med tillsatsmaterialen masugnsslagg och flygaska.
- Användning av CCS-metoden för att samla upp och lagra koldioxid i geologiska formationer.
- Energieffektiviseringar där bland annat spillvärmeåtervinning har stor potential att minska utsläppen av koldioxid.

Ytterligare åtgärder som kan undersökas i framtiden för att minska klimatpåverkan vid betongtillverkning, som detta arbete inte behandlat är till exempel:

- Optimera byggnader och konstruktioner efter de krav som ställs för att minska användningen av betong, vilket resulterar i ett lägre koldioxidutsläpp.
- Fördjupning i energieffektiviseringar, hur alternativa bränslen samt hur val av energi-mix påverkar utsläppen av koldioxid inom betongindustrin.
- Undersök hur val av cementtyp påverkar koldioxidutsläpp, till exempel jämföra CEM II till CEM V.
- Studera hur val av betonghållfasthetsklasser utöver C20/25 påverkar koldioxidutsläppen.

9 Referenser

- Al-Ayish, N. (2013). *Miljövärdering av resurssnål betong med införande i BIM*. Examensarbete, KTH, Stockholm. (2015-03-30).
- BAT (2001). *Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries*. European Commission. (2015-03-29).
- BAT (2013). *Best available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide*. European Commission. (2015-03-25).
- Basmahji, J., & Texén, S. (2012). *Tryckhållfasthet för resurssnål betong*. Examensarbete, KTH, Stockholm. (2015-04-18)
- Blixt, L., & Harmath, L. (2010). *Uttorkning av betong – Mätning samt modellering*. Examensarbete, Högskolan i Halmstad, Halmstad. (2015-02-07).
- Burström, P. G. (2001). *Byggnadsmaterial, Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*. Lund: Studentlitteratur AB. (2015-02-20).
- Cementa FoU. (1998). *Livscykelanalys Betongelement*. (2015-03-25).
- CI-premier, 2012. *The effect of silica fume on the properties of concrete as defined in concrete society report 74, cementitious materials*. United Kingdom. (2015-04-18).
- De Schepper, M., et al. (2014). *Life Cycle Assessment of Completely Recyclable Concrete*. Ghent University, Belgien. (2015-03-10).
- EIA (2014). *How much carbon dioxide is produced when different fuels are burned?* <http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=73&t=11> (2015-04-07).
- Gorkum, C. (2010). *CO2 emissions and energy consumption during the construction of concrete structures*. Examensarbete, Delft University of Technology, Nederländerna, (2015-04-20).
- Gröndahl, F., & Svanström, M. (2001). *Hållbar utveckling: en introduktion för ingenjörer och problemlösare*. (2015-02-20).
- Hasanbeigi, A., Price, L., & Lin, E. (2012). *Emerging energy-efficiency and CO2 emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review*. University of California, USA. (2015-02-22).
- HeidelbergCement Group. (2014). *Cement CEM II/A-LL 42.5 R*. Stockholm. (2015-04-10).
- Hellström, J. (2006), *Livscykelanalys av industrigolv*. Examensarbete, Linköpings Universitet, Linköping. (2015-03-27).
- Houghton, J.T., et al. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University, Storbritannien. (2015-02-27).

- IEA & WBCSD (2009). *Cement Technology Roadmap 2009 – Carbon emissions reductions up to 2050*. (2015-04-25).
- IPCC (2005). *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge University, Storbritannien. (2015-04-19).
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge University, Storbritannien & USA. (2015-04-17).
- Irfan, M. (2011). *Carbon Footprint of Ready Mix Concrete and the Role of Environmental Classification Systems*. Examensarbete, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg. (2015-04-01).
- Khasreen, M.M., Banfill, F.G.P., & Menzies, F.G. (2009). *Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review*. Heriot Watt University, Storbritannien. (2015-02-27).
- Klee, H. (2009). *Recycling Concrete*. WBCSD. (2015-04-19).
- Krausz, E. (2012). *Ignaberga kalkbrott-återställningsplaner i teori och praktik*. Examensarbete, Högskolan Kristianstad, Kristianstad. (2015-02-21).
- Li, J., et al. (2013). *Technological, economic and financial prospects of carbon dioxide capture in the cement industry*. University of Edinburgh, Storbritannien. (2014-04-20).
- Limbachiya, M., Bostanci, S. C. & Kew, H. (2014). *Suitability of BS EN 197-1 CEM II and CEM V cement for production of low carbon concrete*. Kingston University, Storbritannien. (2015-01-26).
- Lindvall, A. (2011). *Beständighetsegenskaper hos anläggningsbetong med stenkolsflygaska*. Thomas Concrete Group AB. Göteborg, (2015-04-12).
- Mousavi, M. (2013). *Life Cycle Assessment of Portland Cement and Concrete Bridge*. Examensarbete, KTH, Stockholm. (2015-04-20).
- Nath, P., & Sarker, P. (2011). *Effect of Fly Ash on the Durability Properties of High Strength Concrete*. Curtin University, Australien. (2015-04-12).
- Nisbet, M., Marceau, M., & VanGeem, M. (2002). *Environmental Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete*. Portland Cement Association. (2015-02-20).
- Prusinski, J. Marceau, M. & VanGeem, M. (2003). *Life Cycle Inventory of Slag Cement Concrete*. USA. (2015-04-01).
- Rydberg, T., & Andersson, R. (2003). *Miljöeffektbedömning (LCA) för markstabilisering*. (2015-05-07).
- SGI (2011a). *Stabilisering och solidifiering av muddermassor*. Linköping. (2015-03-31).

- SGI (2011b). *Vägledning för nyttiggörande av muddermassor i hamn- och anläggningskonstruktioner – Stabilisering och solidifiering av förorenade muddermassor*. Linköping (2015-04-01).
- Shamoun, D., & Redzepovic, M. (2014). *Miljöoptimering av betongprodukter-koldioxidupptag genom karbonatisering av järnvägssliprar*. Examensarbete, Linnéuniversitetet, Kalmar. (2015-02-21).
- Sjunnesson, J. (2005). *Life Cycle Assessment of Concrete*. Examensarbete, Lunds Tekniska Högskola, Lund. (2015-02-20).
- Skoogh, M. & Hilding, A. (2009). *Stommateriäl för villor – trä eller betong?* Examensarbete. Jönköping: Högskolan i Jönköping. (2015-02-06).
- Strandberg, B. (2014). *Bygga hus, Illustrerad byglära*. (2015-03-01).
- Stripple, H., Sternhufvud, C., & Skårman, T. (2005). *Utredning om möjligheterna att minska utsläppen av fossil koldioxid från mineralindustrin*. Göteborg. (2015-04-18).
- Sundqvist, D., & Lif J. (2012). *Utvärdering av SikaAer Solid Luftporbildare i betong*. Examensarbete, Lunds Tekniska Högskola, Lund (2015-03-22).
- Svensk betong. (2015). <http://www.svenskbetong.se> (2015-02-07).
- Svenska Betongföreningen (2015). *Materialet Betong*. <http://betongforeningen.se/materialet-betong/> (2015-02-06).
- Sydsten. (2015). *Makadam*. <http://www.sydsten.se/Produkter/Krossprodukter/Makadam.aspx> (2015-02-07).
- Tahiri, A. (2011). *livscykelanalys på passivhus och normalhus m.a.p totalt CO₂-utsläpp*. Examensarbete, Lunds Tekniska Högskola, Lund. (2015-02-27).
- Thomas, M. (2007). *Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete*. University of New Brunswick, Kanada. (2015-04-13).
- WWF (2008). *A blueprint for a climate friendly cement industry*. WWF International (2015-02-27).
- Åhman, M. (2004). *Den svenska cement- och kalkindustrin – konsekvenser av EU:s system för handel med utsläppsrätter*. Lunds Tekniska Högskola, Lund. (2015-03-25).