

Aalto-universitetet  
Högskolan för ingenjörsvetenskaper  
Utbildningsprogrammet för byggnads- och miljöteknik

## **Metoder för att framställa en miljövänligare betong**

Kandidatarbete

1.12.2014

**Alexander Åkerlund**

---

<b>Författare</b> Alexander Åkerlund		
<b>Arbetets titel</b> Metoder för att framställa en miljövänligare betong		
<b>Examensprogram</b> Byggnads- och miljöteknik		
<b>Huvudämne</b> Byggnadsmaterial och byggnadsfysik	<b>Huvudämnets kod</b> IA3017	
<b>Ansvarig lärare</b> Simo Hostikka		
<b>Arbetets handledare</b> Hannu Hirsi		
<b>Datum</b> 01.12.2014	<b>Sidantal</b> 24	<b>Språk</b> Svenska

---

## Sammandrag

Betongindustrin är i dagens läge väldigt miljöbelastande. Portlandcementindustrin står för 5 till 7 % av världens koldioxidutsläpp, medan den energikrävande ballastutvinningen förorenar luft och vattendrag samt förändrar landskapsbilden. Detta kandidatarbete handlar om metoder för att framställa en miljövänligare betong. Syftet med arbetet är att undersöka olika avfallsprodukter som kan ersätta portlandcement och traditionell ballast. De olika ersättande materialens härkomst, miljöpåverkan och inverkan på den betong de blandas i presenteras och analyseras. Arbetet behandlar inte tillämpningar i form av tillsatsmedel som förlänger betongens livslängd eller förminskar dess skötselbehov. De kemiska reaktionerna inom betongen genomgås ytligt.

Kandidatarbetet är en litteraturstudie där information från olika utgåvor, såväl böcker som vetenskapliga tidskrifter, sammanställs och analyseras.

Litteraturstudien påvisar att både portlandcement och traditionell ballast kan ersättas med avfallsmaterial. De cementersättande ämnen som arbetet berör är: flygaska, mald granulerad masugnsslagg, silikastoft och risskalsaska. De ballastersättande material som redogörs för är: återanvänd betongballast, keramiska avfall, däckgummiavfall och stenhjöl från stenbrott. Även portlandcement och traditionell ballast introduceras för att ge läsaren en förståelse för problemet med dessa. De olika ersättande materialen har varierande inverkan på betongen, vilka bör beaktas vid val av betongblandning. Också prismässigt är avfallsmaterialen av varierande klass. Genomgående för alla ersättande material är emellertid att de är betydligt miljövänligare än det material de ersätter. Ett flertal av avfallsmaterialen är dessutom problemavfall, vilket innebär att användning av dem i betong löser deras deponeringsproblem.

De slutsatser som dras utifrån litteraturstudien är att inget avfallsmaterial ensamt kan ersätta portlandcementet eller ballasten i betongen utan att ändra på betongens egenskaper. Dock kan man genom att kombinera två eller flera ersättande material i samma betongblandning uppnå liknande eller t.o.m. bättre egenskaper som hos "vanlig" betong. Ett exempel på en sådan fördelaktig kombination är flygaska med stenhjöl från stenbrott. Ytterligare forskning inom synergifördelar avfallsmaterial emellan bör göras för att en ännu miljövänligare konkurrenskraftig betong ska kunna framställas.

---

**Nyckelord** Betong, miljövänlig, cementersättande avfallsmaterial, ballastersättande avfallsmaterial

---

# Innehållsförteckning

1	Inledning .....	4
2	Cement .....	5
2.1	Portlandcement .....	5
2.1.1	Tillverkning.....	5
2.1.2	Utsläpp .....	5
2.1.3	Egenskaper .....	6
2.2	Flygaska .....	6
2.2.1	Allmänt .....	6
2.2.2	Som cementersättande material .....	7
2.3	Mald granulerad masugnsslagg .....	8
2.3.1	Allmänt .....	8
2.3.2	Som cementersättande material .....	9
2.4	Silikastoft.....	11
2.4.1	Allmänt .....	11
2.4.2	Som cementersättande material .....	11
2.5	Risskalsaska .....	12
2.5.1	Allmänt .....	12
2.5.2	Som cementersättande material .....	13
3	Ballast.....	14
3.1	Återanvändning av betongballast .....	14
3.1.1	Allmänt .....	14
3.1.2	Egenskaper .....	15
3.2	Keramiska avfall som ballast.....	15
3.2.1	Allmänt .....	15
3.2.2	Egenskaper .....	16
3.3	Återanvändning av däckgummi som ballast.....	16
3.3.1	Allmänt .....	16
3.3.2	Egenskaper .....	16
3.4	Stenmjöl från stenbrott som fin ballast.....	17
3.4.1	Allmänt .....	17
3.4.2	Egenskaper .....	17
4	Sammanfattning .....	18
5	Slutsatser .....	20
	Källor.....	22

# 1 Inledning

Betong är världens överlägset mest använda byggnadsmaterial, främst tack vare dess hållfasthet, hållbarhet, formbarhet, låga pris och fukttålighet. Huvudingredienserna i traditionell betong är portlandcement, grov och fin ballast, samt vatten. Detta recept har använts i hundratals år, men betongens historia sträcker sig betydligt längre bakåt i tiden än så. Etruskerna i Italien var de som uppfann materialet så tidigt som 500 f.Kr. Denna betong hade samma grundsamansättning som betong idag, d.v.s. vatten, ballast och bindemedel. Dock var bindemedlet inte lika utvecklat som det portlandcement vi använder idag, och ballasten var av varierande kvalitet. Dessutom användes inte armeringsjärn för att förstärka betongen på den tiden. Romarna tog efter etruskerna, vilket bidrog till att användningen av betong var enorm från 300 f.Kr. till 400 e.Kr. Under denna tid var betongen ett nytt och revolutionärt material, och romarna använde det till så gott som alla typer av byggen. Bostadshus, hamnar, tempel och broar byggdes i betong, och många av dessa byggnader står kvar än idag att beskåda. Då romarriket föll år 476 minskade betonganvändningen så avsevärt att den på 1300-talet var näst intill obefintlig. Efter 1300-talet ökade användningen av materialet gradvis fram till 1700-talet. Utvecklingen av det moderna portlandcementet påbörjades av den brittiska ingenjören John Smeaton år 1756. 68 år senare, d.v.s. år 1824, upptäckte och patenterade Joseph Aspdin en metod för att producera portlandcement, och således anses han vara portlandcementets egentliga uppfinnare. Runt år 1850 blev portlandcementets användning i betong vidsträckt, varefter byggande i betong snabbt etablerade sig världen över. Hädanefter har användningen av betong med portlandcement antagit enorma proportioner. En stor användning kräver emellertid också en stor produktion, vilken inte är utan konsekvenser. Betongproduktion, i sin traditionella form, är nämligen påfrestande för miljön. Tillverkningsprocessen förbrukar bränsle och emitterar stora mängder koldioxid. I dagens samhälle, där miljön prioriteras högt, söker man därför metoder för att uppnå en grönare betong.

År 2013 producerade betongindustrin globalt uppskattningsvis 4 miljarder ton Portlandcement, varav ca 1,5 miljoner ton användes i Finland (Cembureau och Betoniteollisuus määrinä ja euroina). Eftersom viktförhållandet mellan koldioxidutsläpp och portlandcementproduktion är nära 0,8:1, svarar portlandcementproduktionen för 5 till 7 % av världens koldioxidutsläpp. Dessutom förbrukas ungefär 5000 MJ energi vid produktion av ett ton portlandcement. Genom ersättning av en del av portlandcementandelen i cementblandningen med ett miljövänligare alternativ kan miljöpåverkningarna förminska. Reaktiva restmaterial från industrin som lämpar sig för detta är flygaska, mald granulerad masugnsslagg, silikastoft och risskalsaska.

Ballasten i betongen är en kombination av sand, grus och krossad sten. Den industri som står för produktionen av dessa förknippas med negativa miljöpåverknings i form av damm, föroreningar i luft och vattendrag, samt en förändrad landskapsbild. Även den höga energikonsumtionen tillhörande denna verksamhet är ett problem. Ballast baserad på avfallsprodukter avlägsnar behovet för produktion av traditionell ballast, och är därför ett miljövänligare alternativ. Till dessa avfallsprodukter hör: återanvänd betong, keramiskt avfall, däckgummi och stenmjöl från stenbrott.

Syftet med detta arbete är att studera metoder för att framställa en miljövänligare betong på materialnivå. Metoderna som behandlas är ersättning av portlandcementet och ballasten i betong med olika avfallsprodukter. Arbetet förevisar och granskar de olika avfallsmaterialens

härkomst och miljöpåverkan, samt deras inverkan på betongen de används i. Några tydliga synergifördelar metoderna emellan påpekas. De kemiska reaktionerna inom betongen studeras ytligt.

Betongens livslängd och skötselbehov påverkar indirekt miljöbelastningen, men tillämpningar för att förbättra dessa aspekter ingår inte i arbetet. Inte heller effekten av armeringsjärn eller tillverkningen av dessa behandlas i arbetet. Arbetet är en litteraturstudie, vilket innebär att ingen empirisk forskning utförs.

Arbetet börjar med att i kapitel två presentera och analysera portlandcementet, varefter det samma görs för de olika cementersättande ämnena. Därpå följer i kapitel tre en analys av olika ballastersättande avfallsprodukter. Kapitel fyra sammanfattar resultaten från litteraturstudien. Slutligen presenteras författarens slutsatser i kapitel fem.

## **2 Cement**

### **2.1 Portlandcement**

För att man ska kunna analysera cementersättande ämnen bör det traditionella portlandcementet först introduceras.

#### **2.1.1 Tillverkning**

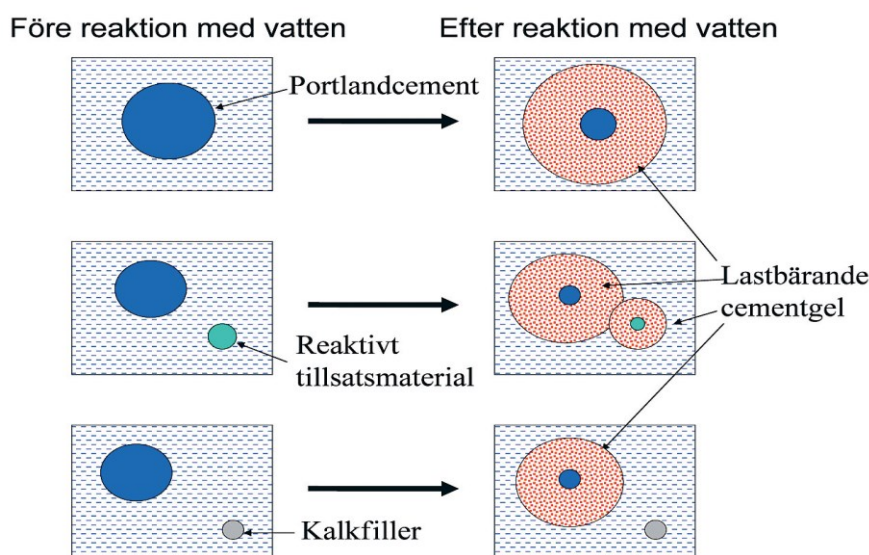
Portlandcement tillverkas genom förbränning av lera och kalksten i en cementugn med en temperatur på ungefär 1450 °C. Det brända materialet kyls ner och mals till cementklinker. Då klinkern mals kan portlandcementets reaktivitet regleras genom partikelstorleken, där en mer finmald klinker ger högre reaktivitet. De beståndsdelar i klinkern som huvudsakligen ger betongen dess hållfasthet, täthet och beständighet är mineralerna di-kalciumsilikat,  $C_2S$ , och tri-kalciumsilikat,  $C_3S$ . Viktförhållandet mellan  $C_3S$  och  $C_2S$  är oftast cirka 0,6/0,2 i färdig cementklinker, eftersom  $C_3S$  reagerar betydligt snabbare med vatten. Då man mal cementklinkern tillsätts ofta gips och mald kalksten i blandningen (max 4 % respektive 5 %). Gipsen bidrar till att styra cementets bindning, medan den malda kalkstenen främst tillsätts för att sänka priset på cementblandningen. Den malda kalkstenen är icke-reaktiv, och fungerar endast som filler (vilket illustreras i figur 1). Andelen gips och mald kalksten varierar beroende på cementets användningsändamål. (Fagerlund, G. 2010)

#### **2.1.2 Utsläpp**

Eftersom bränningen av portlandcement sker i höga temperaturer så är processen väldigt energikrävande. Bränslet som används avger koldioxid, trots att man allt mer börjat övergå från fossila bränslen till avfallsbaserade bränslen. Då kalkstenen bryts ned till kalciumoxid i ugnen framkommer dessutom koldioxid som ett biämne från reaktionen. Produktionen av ett ton cementklinker kräver en förbränning av ungefär 1,2 ton kalksten. Kalkstenen avger under förbränningen cirka 520 kg koldioxid endast från den kemiska reaktionen. Sammanlagt är koldioxidutsläppen ungefär 800 kg för varje ton cement som tillverkas, då bränsleförbrukningen och tillsättningen av mald kalksten beaktas. (Fagerlund, G. 2010)

## 2.1.3 Egenskaper

Portlandcement reagerar aktivt med vatten, vilket innebär att det är ett hydrauliskt bindemedel. Kalciumsilikaterna i cementet reagerar med vatten och bildar två huvudsakliga produkter, nämligen cementgel och kalciumhydroxid. Cementgelen är en väldigt finkornig massa, och det är den som ger betongen dess hållfasthet, täthet och beständighet. Kalciumhydroxiden bidrar i sig inte till några av de goda egenskaperna i betongen, men den reagerar med tillsatsmaterial såsom puzzolanerna flygaska, risskalsaska och silikastoft. Kalciumhydroxiden är väsentlig eftersom puzzolana material måste aktiveras för att bilda bindemedel, då de inte självständigt reagerar med vatten. Figur 1 påvisar hur kalciumhydroxiden tillsammans med ett puzzolant material bildar cementgel. (Fagerlund, G. 2010)



Figur 1. Principiellt resultat av puzzolanreaktionen. (Fagerlund, G. 2010)

Ungefär 20 viktprocent av cementklinkern består av aluminium- och järnhaltiga föreningar. Dessa påverkar betongens beständighet antingen positivt (t.ex. genom att binda kloridjoner), eller negativt (t.ex. genom att öka temperaturen vid härdning, eller sänka sulfatresistensen). Vid härdning utvecklas värme i portlandcementet p.g.a. kemiska reaktioner. Denna värme har en positiv inverkan vintertid då det är kallt ute, men under sommaren kan den bidra till sprickbildning i betongen ifall den inre temperaturen blir för hög. (Fagerlund, G. 2010)

Förutom det använda portlandcementets egenskaper inverkar också den mängd vatten som tillsätts betongen på dess hållfasthet. Termen vattencementtal, förkortat vct, redogör för vikt-förhållandet mellan vatten och cement. Ett lägre vct innebär en högre hållfasthet, då blandningen innehåller mera cement. Den ökade cementandelen leder till en högre temperatur vid betongens härdning, vilket i sin tur resulterar i en ökad risk för sprickbildning. Dessutom medför ett lägre vct en sämre bearbetbarhet för betongblandningen.

## 2.2 Flygaska

### 2.2.1 Allmänt

Flygaska (FA) är ett förorenande ämne vilket bildas som biprodukt vid förbränning av kol. Detta innebär att FA är tillgänglig världen över från kolkraftverk. Avskaffandet av denna biprodukt har blivit ett allvarligt miljöproblem. Rapporter angående mängder flygaska är inte

överensstämmande, men en rapport från ”2013 World of Coal Ash” konferensen ger en relativt realistisk inblick i situationen. År 2010 tillkom ungefär 780 miljoner ton kolaska, varav cirka 660 miljoner ton bestod av FA (uppskattningsvis 85 % av kolaskan). Globalt sett återanvändes ungefär 53,5 %, av kolaskan, varierande från 10,6 % (mellersta och östra Afrika) till 96,4% (Japan). Kina och Indien, som tillsammans stod för 65 % av den globala cementproduktionen år 2013 (Cembureau), utnyttjade 67 % respektive 14 % av den mängd kolaska de producerade (tillsammans 500 miljoner ton). (Heidrich, m.fl. 2013) Följaktligen kan flygaska betraktas som den femte största råvarutillgången i världen. Den flygaska som inte återanvänds deponeras, vilket i framtiden kan bli dyrt – om inte förbjudet. (Ahmaruzzaman, M. kap. 1. 2010)

När kolen upphettas smälter den, varefter den snabbt kyls ner och således bildar små sfäriska partiklar, d.v.s. flygaska. FA består i huvudsak av silikat, aluminiumoxid, järnoxid och kalciumoxid. Vid förbränningen kvarblir en del kol i askan, vilken inverkar på flygaskans egenskaper. I regel är dock FA ett relativt konsekvent material, och i Finland godkänns inte FA med över 9 massprocent kol (SFS-EN 197-1. 2012). FA kan pulveriseras för ökad finhet, vilket ger den en högre reaktivitet. (Siddique, R. 2011)

## 2.2.2 Som cementsättande material

Flygaska är ett puzzolant material, vilket innebär att det reagerar med kalciumhydroxid. Silikaten i FA är den huvudsakliga bidragaren till den puzzolana reaktionen, då den tillsammans med kalciumhydroxid och vatten bildar bindemedel (Siddique, R. 2011). Detta innebär att en del av portlandcementet kan ersättas med FA för att få en miljövänligare cementblandning. Produktionen av FA emitterar ingen koldioxid eftersom det är en biprodukt från industrin. Prismässigt är FA i regel en aning billigare än ren portlandcement, dock är skillnaderna små och varierande. Enligt den europeiska cementstandarden, som även gäller i Finland, godkänns två flygaskacement: CEM II/A-V med 6-20 viktprocent FA, och CEM II/B-V med 21-35 viktprocent FA (SFS-EN 197-1. 2012).

Användning av flygaska som tillsatsmedel i cement ger en del goda egenskaper. Till dessa hör följande: (Siddique, R. 2011)

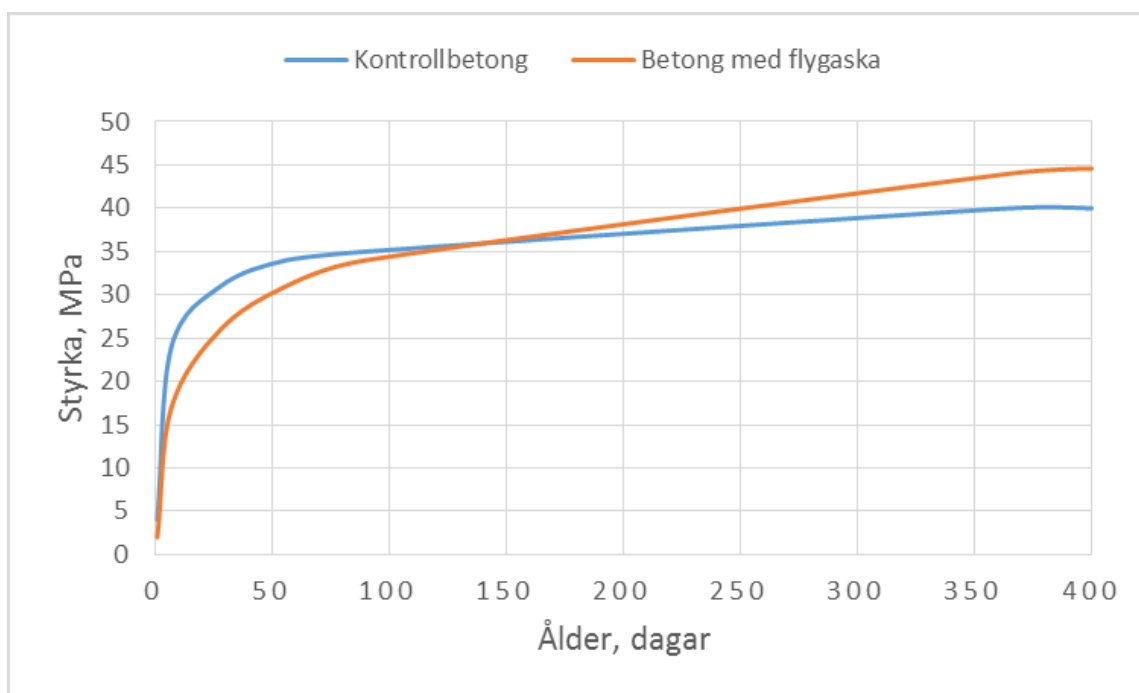
- för färsk betong;
  - ökad bearbetbarhet
  - förminskat vattenbehov
  - förminskad vattenseparation (d.v.s. mindre vatten stiger till ytan efter gjutning)
  - sänkt temperaturutveckling (följaktligen mindre risk för sprickbildning),
- för hårdnad betong;
  - ökad långtidshållfasthet
  - sänkt permeabilitet (d.v.s. utomstående fuktighet genomtränger inte betongen lika lätt)
  - höjd resistens mot sulfatangrepp
  - höjd resistens mot armeringskorrosion
  - höjd resistens mot alkalisilikareaktion.

Nackdelen med flygaskacement är dock en sänkt hållfasthet i början av betongens härdningsprocess eftersom den puzzolana reaktionen är sekundär till portlandcementens reaktion. De glasartade partiklarna i flygaskan bryts ner först då portlandcementen hydratiserats tillräckligt för att höja porvattnets pH-värde till åtminstone 13,2, vilket kan ta upp till en vecka för en del blandningar. När den puzzolana aktiviteten väl kommit igång kan den regleras med finheten

av flygaskpartiklarna, där finare partiklar ger en snabbare hydratisering. Den tidiga hållfastheten hos betong med FA kan höjas, såsom för vanlig portlandcement, genom att minska vattenmängden i relation till bindemedelsmängden. Figur 2 illustrerar skillnaderna i hållfasthetsutvecklingen mellan betong med och utan FA. Betongen utan FA får en högre hållfasthet i början av härdningsprocessen, men dess hållfasthetsutveckling avtar före betongens med FA. Härmed kommer betongen med FA slutligen att vara starkare. (Knutsson, A. s. 2010)

Frostbeständigheten hos betong med flygaska har varit en orosfaktor i kalla klimat. Knutsson undersökte detta för korrekt luftinträngd betong, d.v.s. betong innehållande tillräckligt med luftporer för vattnets frysexpansion. Hennes laboreringar bevisade att frysbeständigheten för betong med mindre mängder FA är liknande som eller bättre än för den utan FA. Vid stora mängder ersättning minskar dock andelen luftporer, vilket innebär att ytterligare luftporbildande tillsatsmedel krävs för att uppnå önskad frostbeständighet. (Knutsson, A. 2010)

Vid gjutning under kalla förhållanden kan den sänkta temperaturutvecklingen hos betong med flygaska medföra större risk för förfrysning i härdningsskedet. För att undvika detta bör ytterligare uppvärmningsåtgärder vidtas under härdningsprocessen.



Figur 2. Skillnader i hållfasthetsutveckling mellan betong med och utan flygaska.

## 2.3 Mald granulerad masugnsslagg

### 2.3.1 Allmänt

Masugnsslagg är en restprodukt från stålindustrin, där järnmalm, koks och flussmedel smälts i en masugn med temperaturer runt 1500 °C. Ovanpå det smälta järnet bildas en flytande slaggprodukt, bestående av kalksten och gråberg. Slaggen kyls ner snabbt med släckhärdning, varefter den får en glasig grusaktig struktur. Denna produkt mals ner till en finkornig massa som kallas mald granulerad masugnsslagg (GGBS, ground granulated blast furnace slag). Två av



tre viktandelar av den granulerade masugnsslaggen ska bestå av kalciumoxid (CaO), magnesiumoxid (MgO) och kiseloxid (SiO<sub>2</sub>). Dessutom bör viktförhållandet (CaO + MgO)/(SiO<sub>2</sub>) överskrida 1. (SFS-EN 197-1)

Årligen tillkommer flera hundra tusen ton masugnsslagg vid järnproduktionen i Finland (Finnsementti). Eftersom GGBS är en restprodukt så avger produktionen av ett ton GGBS endast 0,07 ton koldioxid. Energiförbrukningen för tillverkningen av ett ton GGBS anses vara ungefär 1300MJ, vilket kan jämföras med ungefär 5000MJ per ton portlandcement. Härmed är GGBS ett betydligt miljövänligare alternativ för bindemedel i betong än portlandcement. (Arivalagan, S. 2014)

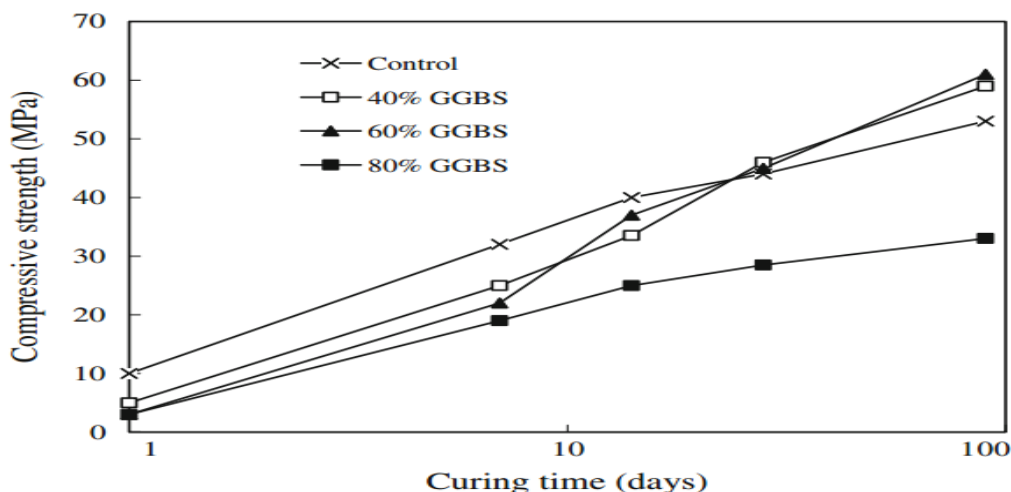
### 2.3.2 Som cementsättande material

GGBS är ett latent hydrauliskt ämne, vilket betyder att det måste aktiveras av sulfater eller alkali som finns i portlandcement för att producera eget bindemedel. Detta innebär, såsom för betong med flygaska, att tryckhållfastheten hos betong med GGBS är lägre i början av härdningsprocessen. Tryckhållfastheten ökar dock med tiden då porositeten minskar och mikrostrukturen blir tätare, och slutligen nås en högre hållfasthet än hos betong med vanlig portlandcement. Eftersom GGBS inte innehåller SiO<sub>3</sub>, så har betong med GGBS en förhöjd resistens mot sulfatangrepp. De tekniska fördelarna med GGBS i betong är följande: (Siddique, R. 2011)

- för färsk betong;
  - ökad bearbetbarhet
  - ökad pumpbarhet
  - lägre värmeutveckling
- för hårdnad betong;
  - ökad långtidshållfasthet
  - kemiskt stabilare
  - sänkt permeabilitet
  - höjd resistens mot kloridinträngning
  - höjd resistens mot sulfatangrepp
  - höjd resistens mot alkali-kiselreaktionen.

Enligt den gällande europeiska cementstandarden godkänns fem olika typer av slaggcement: CEM II/A-S med 6-20 viktprocent GGBS, CEM II/B-S med 21-35 viktprocent GGBS, CEM III/A med 36-65 viktprocent GGBS, CEM III/B med 66-80 viktprocent GGBS och CEM III/C med 81-95 viktprocent GGBS (SFS-EN 197-1. 2012). Vanligtvis används 50 % ersättning för de flesta tillämpningarna. Högre ersättning lämpar sig främst för aggressiva omgivningar där de höjda resistenserna kommer till nytta, eller vid fall då mycket låg värmeutveckling är nödvändig. (Siddique, R. 2011)

Som tidigare nämnts utvecklas tryckhållfastheten för betong med GGBS från att vara lägre än den med portlandcement i början av härdningen, till att slutligen överstiga portlandcementbetongens. Detta stämmer dock endast för lägre ersättningsgrader, och då andelen GGBS överskrider 60 viktprocent av cementblandningens börjar den slutliga hållfastheten avta. Khatib och Hibbert gjorde en undersökning där tryckhållfastheten för betong med 0, 40, 60 och 80 viktprocent GGBS i cementblandningen dokumenterades under 100 dagar. Resultaten från undersökningen ses i Figur 3. Tryckhållfastheten för betongen med 80 viktprocent GGBS i cementen är betydligt lägre än den med endast portlandcement, vilket bör beaktas vid val av cementblandning. (Siddique, R. 2011)

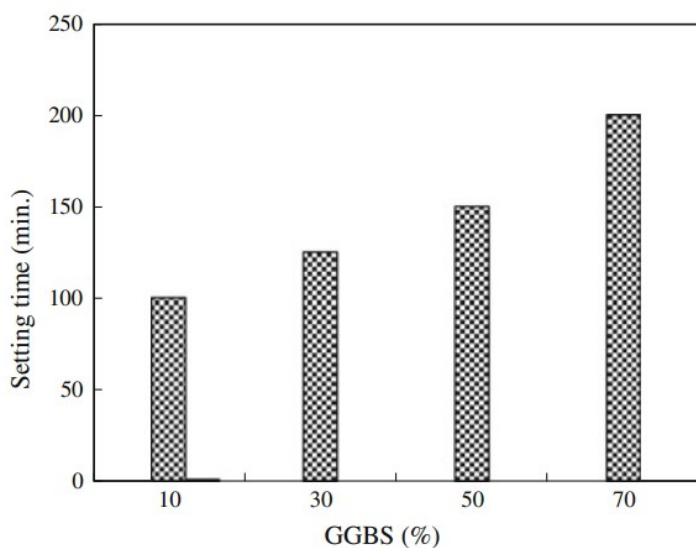


Figur 3. GGBS effekt på tryckhållfasthetens utveckling (Khatib och Hibbert. 2005)

GGBS är naturligt benvit till färgen. Denna vita färg syns också hos betong som innehåller GGBS, speciellt vid ersättning över 50 %. Färgen ger ett estetiskt behagligare intryck än traditionell betong. Dessutom innebär den ljusare grundfärgen att det ofta krävs mindre pigment om betongen ska färgas. (Arivalagan, S. 2014)

Ersättning av portlandcement med GGBS resulterar, till skillnad från ersättning med flygaska, i en ökad vattenseparation hos betongen. Skillnaderna är tydligare vid högre ersättningsgrader. Höjd vattenseparation är inte alltid en dålig egenskap då den sänker vattencementtalet och förtätar betongen. Dock kan en alltför långvarig och intensiv vattenseparation leda till komplikationer för den färdiga betongen. (Siddique, R: 2011)

Betong med GGBS har i regel en längre sättningstid (d.v.s. tiden från blandandet av betongen tills den nått en viss styvhet) än en liknande betong med endast portlandcement. Följaktligen är betong med GGBS formbar en längre tid, vilket bidrar till färre fogar inuti betongen. Detta är gynnsamt i synnerhet i varma förhållanden, men under stram tidtabell och kallt väder kan denna egenskap leda till problem. Sättningstiden ökar med ökad mängd GGBS, vilket demonstreras i figur 4. (Siddique, R. 2011)



Figur 4. GGBS effekt på betongens sättning (Siddique, R. 2011)

## 2.4 Silikastoft

### 2.4.1 Allmänt

Silikastoft är en restprodukt från framställning av metallisk kisel och kiseljärn. När kvarts och kol reduceras till kisel i temperaturer upp till 2000 °C produceras förångad kiseldioxid ( $\text{SiO}_2$ ), som sedan fångas upp i ett elektroniskt filter. Ångan kyls ner i filtret och bildar det extremt finkorniga puzzolana kiselstoffet (oftast kallat silikastoft). Framställning av metallisk kisel resulterar i kiselstoff som består till 85-95 % av  $\text{SiO}_2$ . Det samma gäller för kiseljärn som består av minst 75 % kisel, men från kiseljärn som endast består av 50 % kisel kommer ett silikastoft med mycket lägre  $\text{SiO}_2$ -bestånd, och därmed sämre puzzolana egenskaper. I Finland får silikastoft med en  $\text{SiO}_2$  andel under 80 % inte användas (Finlands Byggbestämelse-samling B4. 2005).

### 2.4.2 Som cementersättande material

Silikastoftet består av extremt små sfäriska partiklar (upp till hundra gånger mindre än de som portlandcement består av). Detta, tillsammans med det faktum att silikastoftet till väldigt stor del består av kiseldioxid med amorf struktur, innebär att stoftet är ett mycket reaktivt puzzolant material. Då silikastoft blandas med portlandcement reagerar stoftet med kalciumhydroxiden och bildar bindemedel. Den europeiska standarden godkänner en typ av cementblandning med silikastoft, d.v.s. CEM II/A-D där silikastoftet endast får stå för 6-10 viktprocent. (SFS-EN 197-1. 2012)

Vattenbehovet ökar vid användning av silikastoft. Upp till en liter vatten kan behövas för varje kg silikastoft som tilläggs. Följaktligen krävs oftast vattenreducerande eller superplastiserande tillsatsmedel för att få en god bearbetbarhet för betongen. Med korrekt användning av dessa tillsatsmedel kan den färdiga silikastoftbetongen nå mycket hög tryckhållfasthet. Ersättning med silikastoft i cementblandningen är överlag ett effektivt sätt att öka de mekaniska egenskaperna hos betongen. De goda egenskaperna hos hårdnad silikastoftbetong är följande: (Siddique, R. 2011)

- ökad tidig tryckhållfasthet
- ökad böjhållfasthet, draghållfasthet och elasticitetsmodul
- betydligt lägre permeabilitet för klorid och vattenintrång
- bättre beständighet och seghet
- förminskat slitage på däck, golv, ytlager och marina byggnationer
- utmärkt resistens mot kemiska attacker från klorider, syror, nitrater och sulfater
- högre bindningsstyrka
- högre elektrisk resistivitet
- utmärkt frostbeständighet (Zhang och Malhotra. 1996).

Betong med silikastoft har en avsevärt högre tryckhållfasthet än betong med endast portlandcement. Det finns två huvudsakliga orsaker till detta. Den ena är att bindningen mellan ballasten och cementpastan förbättras p.g.a. den puzzolana reaktionen. Den andra är förbättringen i betongens mikrostruktur, då de små silikastoftpartiklarna fyller utrymmena som bildas mellan portlandcementpartiklarna. Detta fenomen kallas partikelpackning, och det gör betongen till en enhetligare massa. (Siddique, R. 2011)

Silikastoft är ett betydligt dyrare material än portlandcement, vilket begränsar dess användning. Vanligtvis nyttjas silikastoft endast i betong som behöver hög tryckhållfasthet. Mazloom m.fl. undersökte tryckhållfasthetsutvecklingen för betongblandningar med 0, 6, 10 och 15 viktprocent silikatstoft över en 400 dagar lång tidsperiod. Alla blandningar hade vattencementtalet 0,35. Resultaten, som visas i Tabell 1, påvisar att silikastoftbetongen efter 28 dagar är 21 % hårdare än portlandcementbetongen. När 90 dagar gått har de olika betongblandningarna näst intill samma tryckhållfasthet, vilket också gäller efter 400 dagar. Detta innebär att betong med silikastoft har en kraftigare tryckhållfasthetsökning än betong med portlandcement i ett tidigt skede. Skillnaderna i ökningen avtar efter ungefär 28 dagar, och slutligen uppnår betongblandningarna samma hållfasthet. Dessa tryckhållfastheter kan ytterligare manipuleras med reglering av blandningens vattenmängd. För att möjliggöra detta behövs ofta vattenreducerande eller superplasticerande tillsatsmedel. Med en ännu högre ersättningsandel och ett betydligt lägre vct kan betong med silikastoft uppnå tryckhållfastheter som närmar sig 300 MPa. (Siddique, R. 2010)

Silikatstoft (vikt-%)	Tryckhållfasthet (MPa)						
	7 dagar	14 dagar	28 dagar	42 dagar	90 dagar	365 dagar	400 dagar
0	46	52	58	62	64	73	74
6	50.5	58	65	69	71	73	73
10	52	61	67.5	71	74	73	73
15	53	63	70	73	76	75	76

Tabell 1. Silikastoftens effekt på betongens tryckhållfasthetsutveckling (Mazloom m.fl. 2004)

Färsk betong med silikastoft är mer sammanhängande än betong med portlandcement och har mindre benägenhet till segregation. Silikastoft i betong påvisar också sänkt vattenseparation. Detta beror delvis på kemiska reaktioner, och delvis på att stoftpartiklarna blockerar porerna i färsk betong. Betong med silikastoft har ett större vattenbehov och följaktligen en sämre bearbetbarhet. Således krävs ofta vattenreducerande eller superplasticerande tillsatsmedel för att upprätthålla den färska betongens konsistens. Användning av silikastoft ökar inte betongens egenvikt avsevärt. (Siddique, R. 2010)

## 2.5 Risskalsaska

### 2.5.1 Allmänt

Risskal är en restprodukt från jordbruk. Skalen från riskornen avlägsnas under malningsprocessen. Årligen produceras över 700 miljoner ton ris, varav risskalen utgör ungefär 20 viktprocent (Siddique, R. 2010). Skalen är tåliga och mycket motståndskraftiga mot naturlig nedbrytning. Följaktligen har deponeringen av dessa blivit ett problem. Det har konstaterats att endast cement- och betongindustrierna kan konsumera så stora mängder fast puzzolant avfall (Hwang och Chandra, 1996). Risskal består av cirka 50 % cellulosa, 25-30 % lignin och 15-20 % kiseldioxid (silika). Risskalsaska (RHA, rice husk ash) tillverkas genom förbränning av risskalen. Vid förbränningen avlägsnas ligninet och cellulosan, vilket lämnar kvar den amorfa risskalsaskan. Förbränningen sker under en timme i temperaturer mellan 550 °C och 700 °C. Askan mals eller pulveriseras till önskad finhet. RHA som förbränts i kontrollerade förhållanden består till 85-90 % av kiseldioxid, vilket innebär att det är ett puzzolant material. Risskalsaska produceras huvudsakligen i områden där det finns tillgång till rikligt med risgrödor. Förbränningsprocessens krav på noggrannhet, och det faktum att RHA är dyrare än portland-

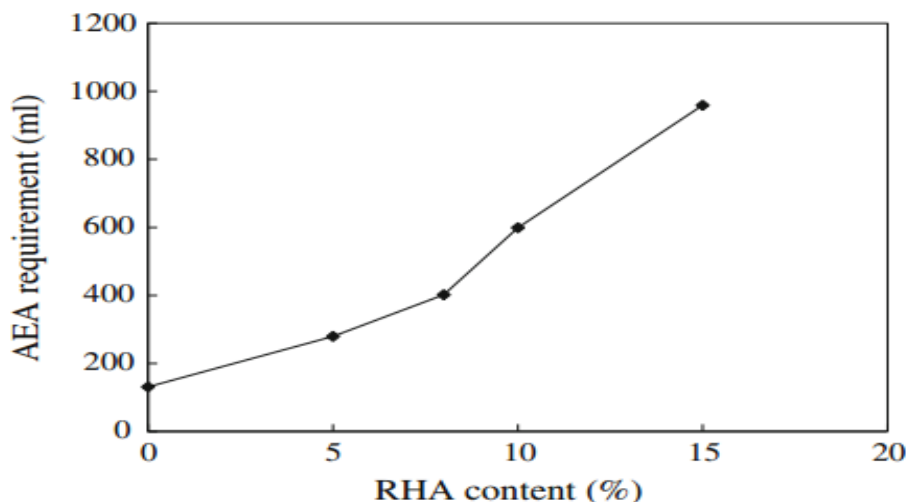
cement, är dock de avgörande orsakerna till att användning av RHA inte är mer omfattande. (Siddique, R. 2010)

## 2.5.2 Som cementersättande material

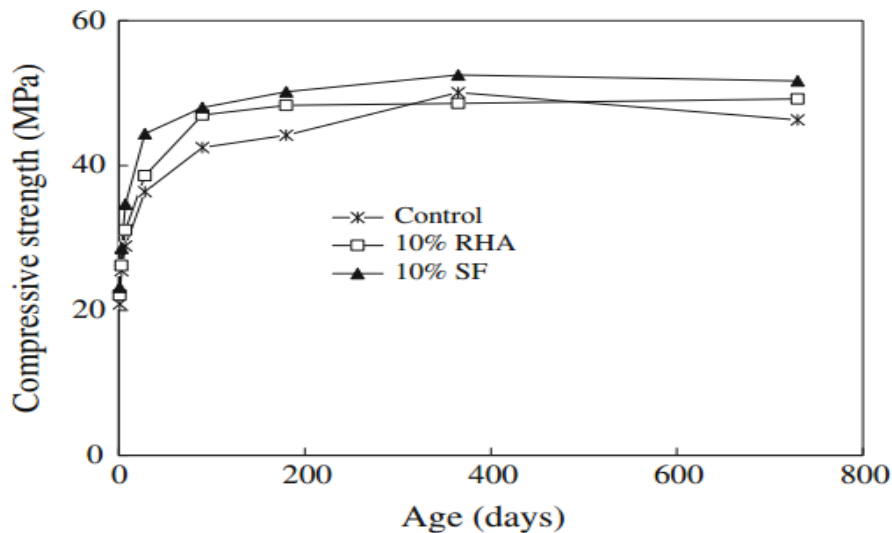
Risskalsaska består till stor del av  $\text{SiO}_2$ . Välbränd och välmalad RHA är ett puzzolant material med hög reaktivitet. RHA reagerar alltså inte självmant med vatten, utan kalciumhydroxiden i portlandcementet krävs för att aktivera kiseldioxiden och bilda bindemedel. Vanligtvis rör sig andelen ersättning mellan 0 och 30 viktprocent. Användning av RHA som cementersättande material i betong har flera fördelar, såsom ökad styrka och beständighet. De miljömässiga fördelar som användning av RHA-betong medför är återanvändning av avfallsmaterial och sänkta koldioxidutsläpp då en mindre mängd portlandcement nyttjas. (Siddique, R. 2010)

Siddique listar ett antal laborationer i sin undersökning, av vilka följande slutsatser kan dras om RHA-betong:

- Vattenkravet ökar lineärt med mängden RHA, alltså kan vattenreducerande eller superplasticerande tillsatsmedel behövas för att uppnå önskad bearbetbarhet.
- Ökat behov av luftporbildande tillsatsmedel då RHA-andelen ökar, förhållandet demonstreras i figur 5. (Zhang och Malhotra. 1996)
- Tryckhållfastheten ökar, dock inte i samma grad som för silikastoft. Zhang och Malhotra gjorde en undersökning där tryckhållfastheten dokumenterades för betong med endast portlandcement, med 10 viktprocent silikastoft och med 10 viktprocent RHA under 730 dagar. Resultaten syns i figur 6.
- Böjhållfastheten, Draghållfastheten och Elasticitetsmodulen ökar vid ersättning upp till 15 % RHA.
- Användning av RHA i betong leder till att permeabiliteten och risken för korrosion minskar.
- Frostbeständigheten ökar avsevärt vid cementersättning med RHA. (Zhang och Malhotra)



Figur 5. Förhållandet mellan behovet av luftporbildare och mängden RHA i betong (Zhang och Malhotra. 1996).



Figur 6. Tryckhållfastheten för betong med endast portlandcement, med 10 viktprocent RHA och med 10 viktprocent silikastoft (SF, silica fume). (Zhang och Malhotra. 1996)

### 3 Ballast

Ett vanligt blandningsförhållande i betong är en del cement, en del vatten, två delar sand och tre delar sten. Sand- och stendelarna kallas tillsammans ballast, som utgör den största andelen av betongen. Ballastutvinningen är påfrestande för miljön i form av utarmning av naturresurser, hög energikonsumtion och deponeringsproblem. Alternativa ballastkällor används allt mer för att minska de direkta miljöpåverkningarna och för att bli av med problematiskt avfall.

#### 3.1 Återanvändning av betongballast

##### 3.1.1 Allmänt

Varje dag demoleras betongbyggnader, och från dessa kommer stora mängder betongbråte som antingen deponeras eller används som filler. Detta bråte kan istället återanvändas som ballast för ny betong ifall det genomgår en ändamålsenlig process. Kortfattat går processen för att framställa återanvänd betongballast (RCA, recycled concrete aggregate) ut på att krossa bråtet till önskad finhet (både fin och grov ballast kan tillverkas), varefter krosset siktas och separeras. Betong innehåller i regel stora mängder armeringsjärn, vilket avlägsnas genom att föra krosset över ett magnetband. Det är viktigt att allt järn- tegel- och trämaterial avlägsnas för att framställa högklassig RCA. (Günçan, N. 1995)

Med användning av betongbråte som ballast vid renovering av stora projekt, såsom landningsbanor eller betongvägar, kan avsevärda besparingar göras. Genom att konstruera en anläggning för ballaståtervinning vid byggplatsen behöver mindre bråte föras bort och ballast för den nya betongen behöver inte hämtas till. Detta kan även tillämpas vid jordbävningssområden där stora mängder betongkonstruktioner ska återställas. (Günçan, N. 1995)

### 3.1.2 Egenskaper

Egenskaperna för RCA är ofta relaterade till den betong som de kommit från, men vissa överliggande egenskaper gäller för nästan all betong som innehåller RCA: (Topcu, I. 2004)

- för färsk betong eller för aggregaten i sig;
  - sämre bearbetbarhet (15-20 % skillnad mellan betong med 100 % RCA och betong med vanlig ballast)
  - lägre egenvikt (~94 % av vad betong med vanlig ballast har),
- för hårdnad betong;
  - högre kapillaritet (vattenupptagningsförmåga)
  - lägre tryckhållfasthet (~90 % av vad betong med vanlig ballast har efter 28 dagar)
  - högre frostbeständighet vid användning av fin RCA istället för vanlig sand
  - en aning lägre böjhållfasthet
  - sämre beständighet.

Till egenskaperna skiljer sig återanvänd betongballast från vanlig ballast på följande sätt:

- betydligt högre Los Angeles-värde (motstånd mot nötning, högre värde = ”mjukare” sten)
- betydligt högre krossytegrad (relativt mått på ballastens motståndskraft mot gradvis applicerad tryckbelastning, högre är bättre).

Användning av RCA tillsammans med tillsatsmedel kan lösa ett flertal av de karakteristiska problemen för betong med RCA. Limbachiya m.fl. gjorde år 2012 en undersökning där 30 %, 50 % och 100 % RCA användes i betong vars cementblandning innehöll 20 %, 30 % och 35 % flygaska (FA), samt olika sorters portlandcement. Resultaten de fick var följande:

- Upp till 30 % RCA har ingen effekt på de mekaniska egenskaperna eller på beständigheten hos betong med endast portlandcement eller med 30 % FA. Härmed drog de slutsatsen att 30 % RCA är den optimala ersättningsmängden.
- Karbonatiseringen (negativ egenskap som leder till korrosion på armering) ökade med ökad användning av RCA. Detta skulle kunna bromsas genom att kombinera RCA med FA.
- Användning av FA i RCA-betong kan avsevärt höja betongens resistivitet mot kemiska angrepp, och härmed också betongens beständighet.
- Användning av RCA och andra industriella restprodukter, samt ett lämpligt bindemedel och vattencementtal, kan avsevärt öka hållbarheten och miljövänligheten inom betongindustrin.

## 3.2 Keramiska avfall som ballast

### 3.2.1 Allmänt

Uppskattningsvis 30 % av det keramiska materialet går till spillo inom keramikindustrin, vilket innebär att avfallsmängder på upp till flera miljoner ton per år uppstår endast i Europa. Endast en liten del av detta avfall återanvänds för tillfället, och följaktligen fylls deponier runtom världen med denna tåliga, hårda och högt resistent restprodukt. Efterhand som keramiskt avfall ökar i mängder, ökar också pressen på keramikindustrin att lösa problemet med dess avskaffande. Allt detta sker medan reserverna för konventionell ballast tvinar. Byggbranschens natur, i synnerhet betongindustrin, är sådan att keramiska avfall kan återanvändas utan att dramatiska ändringar på produktionen eller användningsprocessen måste göras. Ersättning

av traditionell ballast med ballast gjord på keramiskt avfall (BKA) har både ekonomiska fördelar och är miljövänligt. BKA kan krossas till både fin och grov ballast, beroende på dess användningsändamål. (Senthamarai, R. 2005)

### 3.2.2 Egenskaper

Följande slutsatser kan dras angående betong med BKA:

- Grov BKA ger sänkningar i tryckhållfasthet, draghållfasthet och böjhållfasthet av respektive storlekar 3,8 %, 18,2 %, 6 %. (Senthamarai, R. 2005)
- Ersättning av traditionell sand med keramisk sand är ett bra alternativ, då ingen hållfasthetsförlust sker utan endast en ökning i beständigheten hos betongen. (Pacheco-Torgal, F. 2010)
- Huvudproblemet med grov BKA är den höga kapillariteten som medförs. Denna kan leda till dålig beständighet då vattenupptagningen suger in aggressiva ämnen, såsom skadliga salter, i betongen. (Correia, m.fl. 2006)
- Problemet med vattenupptagningen kan delvis lösas genom att fuktmätta den keramiska ballasten före gjutning. (Correia, m.fl. 2006)
- BKA-betong påvisar ypperliga egenskaper för att motstå nötning. (Correia, m.fl. 2006)
- Ett användningsändamål som BKA-betong lämpar sig för är artefakter, såsom trottoarplattor. Där spelar de mekaniska egenskaperna liten roll, medan nötningsresistensen kommer till stor nytta. (Correia, m.fl. 2006)

## 3.3 Återanvändning av däckgummi som ballast

### 3.3.1 Allmänt

I Finland bildas årligen runt 50 tusen ton bildäcksavfall. Däcken strimlas eller mals till önskad storlek vid återanvändningsstationer. Största delen av Finlands däckgummiavfall återanvänds, och en stor del av detta står byggbranschen för (Suomen Rengaskierrätys Oy). Inom betongproduktion kan däckgummi utnyttjas som ersättande material för naturlig ballast. Genom denna metod åstadkommer man, förutom återanvändning av problemavfall, även besparingar av naturtillgångar. Dessutom har däckgummiballast (DGB) fördelen, jämt mot andra avfallsprodukter med återanvändningspotential, att återvinningsmetoden är väl utvecklad och etablerad. Således medför användning av DGB också ekonomisk nytta. (M. Mavroulidou. 2010)

### 3.3.2 Egenskaper

Däckgummi har logiskt en låg elasticitetsmodul (ju lägre modul desto mjukare material). Detta innebär att en bit DGB i betong fungerar som en stor por utan någon betydande funktion då det gäller bärförmåga. Följaktligen beror tryck- och draghållfastheten till stor del direkt på mängden DGB i betongen. Eldin undersökte fullständig ersättning av ballasten för en portlandcement-betong med den planerade tryckhållfastheten 35 MPa. Han fann att tryckhållfastheten minskade upp till 85 % och draghållfastheten upp till 50 % med DGB. När endast sanden ersattes med smulat däckgummi observerades en mindre sänkning (65 %) av tryckhållfastheten. Dessa försämrade mekaniska egenskaper som DGB medför begränsar dess användning i betong med strukturellt syfte. (Eldin, N. 1993)



Förutom tidigare nämnda egenskaper förekommer följande särdrag hos betong med DGB: (Siddique, R. 2004)

- för färsk betong;
  - bearbetbarheten samma eller bättre än hos vanlig betong
  - högre luftbestånd än hos vanlig betong utan användning av luftporbildare
  - låg egenvikt p.g.a. gummipartiklarnas låga vikt och det ökade luftbeståndet
- för hårdnad betong;
  - högre seghet och stötmotstånd än vanlig betong
  - sänkt frostbeständighet.

Eldin föreslår att betong med DGB endast har följande möjliga användningsändamål: (Eldin, N. 1993)

- arkitektoniska tillämpningar där lätt vikt värderas och mekanisk styrka är oviktig
- ändamål där lågstyrkebetong lämpar sig såsom uppfarter och trottoarer
- vägräcken runt broar eller liknande konstruktioner p.g.a. DGB-betongens höga seghet
- ljudvallar eller applikationer för vibrationsdämpning tack vare den goda ljuddämpningsförmåga och förmåga att absorbera vibrationer som DGB innehar.

## 3.4 Stenmjöl från stenbrott som fin ballast

### 3.4.1 Allmänt

Vanligtvis används sand som fin ballast i betong. Dock har förtvinandet av de naturliga sandtillgångarna och ökade kostnader p.g.a. lång transport lett till att begäret ökat för ersättande material. Stenmjöl, som är en biprodukt från krossprocessen vid stenbrottsaktivitet, är ett sådant material. Stenmjöl anses allmänt vara ett avfallsmaterial som belastar miljön i form av deponeringsproblem. Härmed medför användning av stenmjöl som fin ballast förutom ekonomiska fördelar, också nytta i form av miljöbevaring. (Safiuddin, M. 2007)

### 3.4.2 Egenskaper

Stenmjölet är ett finare material än vanlig sand, med över dubbelt så stor andel (12-15 %) partiklar under 0,075 mm storlek. Stenmjölet har också en densitet som överskrider den hos naturlig sand med ca 20 %. Förutom fysiska skillnader mellan stenmjöl och sand finns också kemiska olikheter. (Sukesh m.fl. 2013) Dessa skiljaktigheter orsakar följande särdrag för betong innehållande stenmjöl:

- sämre bearbetbarhet eftersom stenmjölet absorberar vatten
- liknande eller ökad tryckhållfasthet (55 – 75 % ersättning vore idealt för hållfasthetsegenskaper) (Sukesh m.fl. 2013)
- ökad resistens mot syror och sulfater (Ilangovana m.fl. 2008)
- ökad övergripande hållfasthet, runt 10 – 15 % vid fullständig ersättning (Ilangovana m.fl. 2008)
- lägre permeabilitet (d.v.s. lägre vattengenomtränglighet). (Ilangovana m.fl. 2008)

Ilangovana m.fl. rekommenderar starkt ersättning av sand med stenmjöl vid betongproduktion. Dock uppmanar de att göra tesgjutningar för att finna korrekt vattenmängd och blandningsförhållanden, eftersom egenskaperna hos stenmjölet kan variera beroende på dess härkomst.

Sukesh m.fl. poängterar att samtidig användning av flygaska och stensmjöl kan ha ytterligare fördelar, såsom att stensmjölet delvis kompenserar för den sänkta tidiga hållfastheten som flygaskan medför. Dessutom gottgör flygaskan den försämrade bearbetbarheten som stensmjölet orsakar. Nyttjande av båda dessa ersättande material samtidigt vore till stor grad både ekonomiskt och miljömässigt hållbart.

## 4 Sammanfattning

Syftet med kandidatarbetet var att undersöka metoder för att framställa en miljövänligare betong. Arbetet gjordes som en litteraturstudie där information från tidigare utgåvor samlades. Arbetet redogör för olika avfallsmaterial som kan ersätta portlandcementet och den traditionella ballasten i betong. De egenskaper materialen medför till betongen presenteras och undersöks. Arbetet gör dessutom läsaren bekant med portlandcement och traditionell ballast för att läsaren ska få förståelse för problemen med dessa. Avfallsprodukterna som ingår i arbetet är listade nedan, varefter resultaten från litteraturstudien genomgås kortfattat.

- Cementsättande avfallsprodukter:
  - flygaska
  - mald granulerad masugnsslagg
  - silikastoft
  - risskalsaska.
- Ballastersättande avfallsprodukter:
  - återvunnen betongballast
  - keramiskt avfall
  - däckgummiavfall
  - stensmjöl från stenbrott.

Portlandcement- och ballastproduktion är väldigt miljöpåfrestande processer. Portlandcement tillverkas genom att förbränna lera och kalksten i en cementugn med temperaturen 1450 °C, varefter materialet kyls och mals ner. Processen är energikrävande och avger en stor mängd koldioxid. Koldioxidutsläppen för portlandcementproduktionen har uppmätts vara ungefär 800kg CO<sub>2</sub> per ton cement producerat. Miljöpåverkningarna vid ballastutvinning utgörs av utarmning av naturresurser, hög energikonsumtion och deponeringsproblem av avfallsprodukter. Det finns alltså ett stort behov för alternativa miljövänligare materiallösningar för dessa ingredienser i betongen.

Flygaska (FA) är ett problemavfall som uppstår i stora mängder från kolkraftverk. FA är ett puzzolant material, vilket innebär att det krävs portlandcement i cementblandningen för att aktivera dess bindande egenskaper. I Finland godkänns cementblandningar med upp till 35 viktprocent FA. De egenskaper som FA medför till betongen är: ökad bearbetbarhet, förminskat vattenbehov, förminskad vattenseparation, sänkt temperaturutveckling, sänkt tidig hållfasthet, ökad långtidshållfasthet, sänkt permeabilitet och ökad resistens mot kemiska angrepp. Användning av flygaska i betong är inte endast miljövänligt tack vare det sänkta behovet av portlandcement, utan också för att ett problemavfall som annars kräver deponering återanvänds.

Mald granulerad masugnsslagg (GGBS) är en restprodukt från stålindustrin med försumbart koldioxidutsläpp. I Finland tillkommer årligen hundratusentals ton GGBS från industrin. GGBS är ett latent hydrauliskt ämne, alltså kräver det en del portlandcement för att aktivera bindemedelsproduktionen. I Finland accepteras upp till 95 viktprocent GGBS i cementblandningen. Dock används vanligtvis blandningar med runt 50 procent GGBS. Betong innehåll-

lande GGBS har typiskt följande särdrag: ökad bearbetbarhet, ökad pumpbarhet, ökad vatten-separation, lägre värmeutveckling, ökad sättningstid, sänkt tidig hållfasthet, ökad långtidshållfasthet (vid ersättning under 60 %), kemiskt stabilare, sänkt permeabilitet, ökad resistens mot kemiska angrepp och vitare färg. Ersättning av portlandcement med GGBS minskar koldioxidutsläppen och energiförbrukningen för betongproduktionen, samt återanvänder avfall.

Silikastoft uppstår som en restprodukt vid framställning av metallisk kisel och kiseljärn. Silikastoft är ett väldigt fint och reaktivt puzzolant material. I Finland godkänns 6-10 viktprocent silikastoft i cementblandningar. Betong med silikastoft har ett betydligt högre vattenbehov än traditionell betong, och följaktligen används ofta vattenreducerande eller superplasticerande ämnen tillsammans med materialet. Utmärkande egenskaper för betong med silikastoft är följande: mer sammanhängande, mindre segregation, sänkt vattenseparation, större vattenbehov, sämre bearbetbarhet, ökad tidig hållfasthet, ökad sen hållfasthet, lägre permeabilitet, bättre beständighet, höjd resistens mot kemiska angrepp och bättre frostbeständighet. Silikastoft används huvudsakligen i betong då mycket höga tryckhållfastheter eftersträvas, eftersom stoftet är betydligt dyrare än portlandcement.

Risskalsaska (RHA) är ett problemavfall från risodling. Årligen produceras över 700 miljoner ton ris, varav 140 miljoner ton utgörs av risskal. Vanligtvis deponeras risskalen, men de kan också genomgå en förbränningsprocess för att bilda puzzolanisk risskalsaska. RHA produceras i huvudsak i länder där det finns tillgång till rikligt med risgrödor. Den känsliga förbränningsprocessen och askans höga pris är de huvudsakliga orsakerna till att användning av RHA inte är mer vidsträckt. Då RHA blandas i betong får betongen följande typegenskaper: ökat vattenbehov, ökat behov av luftporbildande tillsatsmedel, ökad tidig hållfasthet, ökad långtidshållfasthet, ökad beständighet, minskad permeabilitet, minskad risk för korrosion och ökad frostbeständighet. Vanligtvis används inte mer än 15 massprocent RHA i cementblandningen.

Betongbråte från demolerade byggnader kan återanvändas som ballast ifall det genomgår en ändamålsenlig process. Genom att konstruera en anläggning för ballaståtervinning vid stora renoveringsprojekt kan stora besparingar göras. Den optimala mängden återanvänd ballast (RCA) har bevisats vara 30 % av den totala ballastmängden. Då ballasten innehåller RCA får betongen en aning avvikande egenskaper än betong med vanlig ballast, nämligen: sämre bearbetbarhet, lägre egenvikt, lägre tryckhållfasthet, högre böjhållfasthet, högre kapillaritet, högre frostbeständighet och sämre beständighet. RCA kan kombineras med andra avfallsmaterial, exempelvis flygaska, i betong för att nullifiera många av de negativa egenskaperna.

Keramikindustrin avger årligen massiva mängder keramiskt avfall. Detta avfall kan krossas till antingen fin eller grov ballast ämnad för betongproduktion. Användning av keramikavfall som ballast skulle resultera i både ekonomiska fördelar och en miljövänligare betong. Grov keramikballast ger betongen sämre mekaniska egenskaper, men ökad nötningsresistens. Således kan betong med grov keramikballast fungera väl i exempelvis trottoarer. Däremot kan traditionell sand väl ersättas med fint mald keramikavfall, då det inte uppger hållfasthetssänkningar i betongen utan endast ökar dess beständighet. Ett överhängande problem med keramikballast är att det medför en ökad kapillaritet för betongen. Detta kan undvikas genom att fuktmetta ballasten i förväg.

I Finland bildas årligen runt 50 tusen ton bildäcksavfall. Detta avfall kan användas som betongballast ifall det strimlas eller mals vid en återanvändningsstation. Följaktligen blir man av med problemavfall tillika som naturtillgångar besparas. Utmärkande egenskaper för betong

med återanvänt däckgummi som ballast är: högre luftbestånd, lägre egenvikt, avsevärt försämrad hållfasthet, högre seghet och stötmotstånd, högre ljuddämpningsförmåga och sänkt frostbeständighet. Den låga hållfastheten begränsar användningen av däckgummiballast i betong. Dock kan däckgummiballast lämpa sig väl för vissa ändamål, exempelvis för trottoarer, vägräcken och ljudvallar.

Sanden som används som fin ballast i betong kan ersättas med stenhjöl, som är en biprodukt från krossprocessen vid stenbrottsaktivitet. Stenhjöl är ett problemavfall som vanligtvis deponeras, och därmed vore återanvändning av materialet gynnsamt. Stenhjölet är ett betydligt finare material än sand, och denna fysiska skillnad, tillsammans med kemiska olikheter, ger betong med stenhjöl följande egenskaper: sämre bearbetbarhet, ökad hållfasthet, ökad resistens mot syror och sulfater, lägre permeabilitet. Användning av stenhjölballast tillsammans med flygaska i betong är gynnsamt eftersom de två materialen kompletterar varandra.

## 5 Slutsatser

Betongproduktion i sin traditionella form är väldigt skadligt för miljön. Portlandcementdelen och ballastdelen i betongen kan ersättas med olika avfallsmaterial för att minska miljöpåverkingarna. Idag används redan ett flertal av de i arbetet presenterade ersättande materialen i många betongblandningar. Dessa är dock oftast specialblandningar och grön betong anses sällan vara ett alternativ då ”vanliga” betongkonstruktioner utan speciella krav planeras. För att ändra på detta synsätt bör den gröna betongen göras ekonomiskt och egenskapsmässigt konkurrenskraftig gentemot den traditionella betongen. Detta kan uppnås antingen genom ytterligare forskning i synergifördelar olika avfallsmaterial emellan, där en konkurrenskraftig grön betong eftersträvas, eller genom att beskatta miljöskadlig betong för att höja dess pris.

De avfallsprodukter som är mest undersökta som ersättande material i betong är flygaska, mald granulerad masugnsslagg och silikastoft. Av dessa tre material är flygaskan det mest använda i dagens läge. Detta beror delvis på att flygaskan nyttjats längre än de två andra i betong, varvid askan har etablerat sig i betongindustrin, och delvis på flygaskans låga pris (se tabell 2.) samt goda egenskaper.

Mald granulerad masugnsslagg har liknande förutsättningar som flygaska att bli vedertagen som cementersättande ämne, dock kräver detta att också järnindustrin engagerar sig. Nu spelar masugnsslaggen en liten roll för järnindustrin, trots att massorna är stora, och man bryr sig inte vart slaggen går. För att uppmuntra järnindustrin att samarbeta med betongindustrin i syftet att öka materialets användning i betong, skulle staten kunna ge understöd för att göra verksamheten lönsam. Således skulle ett fördelaktigt omlopp uppstå för intäkterna från den möjliga tidigare nämnda skatten på miljöskadlig betong.

Silikastoft är, till skillnad från flygaska och masugnsslagg och som ses i tabell 2, ett betydligt dyrare material än portlandcement. Detta begränsar silikastoftets användning i ”vanlig” betong, trots att egenskaperna det medför är utmärkta. Således nyttjas silikastoft nästan uteslutande i högstyrkebetong, vilket knappast kommer att förändras. Även risskalsaska är en aning dyrare än portlandcement, dock inte i samma nivå som silikastoft. Förutom dess pris inskränker också risgrödornas tillgång områdesvis och förbränningsprocessens krav på noggrannhet användningen av risskalsaska i betong.

Priserna för portlandcement och de olika cementersättande materialen presenteras nedan i tabell 2. Priserna är tagna från [www.alibaba.com](http://www.alibaba.com), som är världens ledande plattform för grossisthandel. Dessa priser är emellertid de lägsta för de olika materialen, vilket antagligen innebär att materialkvaliteten är låg. Från tabellen fås dock en god överblick av prisklasskillnaderna de olika materialen emellan. Flygaska och mald granulerad masugnsslugg (GGBS) är betydligt billigare än portlandcement, medan risskalsaskans och silikastoftets pris överstiger det vanliga cementets avsevärt.

Ämne:	Portlandcement	Flygaska	GGBS	Silikastoft	Risskalsaska
Lägsta pris per ton:	\$53	\$40	\$38	\$100	\$80

Tabell 2. De olika cementmaterialens lägsta pris på grossistplattformen alibaba.com.

Återanvändning av avfallsprodukter som ballast är ännu inte vanligt, men allteftersom grön betong blir mer eftertraktad kommer avfallsmaterial att ta en större roll i ballasttillverkningen. De material arbetet behandlar som ballastersättande är alla brukbara i betong, dock medför de egenskaper som på varierande sätt begränsar betongens användningsändamål. Genom att kombinera olika avfallsballast med de i arbetet behandlade cementersättande materialen kan synergifördelar framkomma som ger betongen en bättre helhet.

I arbetet presenteras redan några kombinationer av avfallsmaterial i betong som ger fördelaktiga resultat, d.v.s. flygaska med återanvänd betongballast och flygaska med stenhöj från stenbrott. Förutom dessa två synergier skulle också keramikavfall som både grov och fin ballast tillsammans med silikastoft kunna resultera i en mycket användbar betong. I en sådan blandning skulle det fina silikastoftet gottgöra för de försämrade hållfasthets- och kapillaritetsegenskaperna som keramikballasten medför. Även en kombination av risskalsaska och däckgummiballast i samma betongblandning skulle kunna ge fördelaktiga resultat, då risskalsaskan delvis kompenserar för den försänkta hållfastheten som däckgummit förorsakar. Dessutom ökar däckgummit betongens luftbestånd, vilket motverkar det ökade behovet av luftporbildare som betong med risskalsaska har.

För att man i framtiden ska kunna producera ännu miljövänligare betong än idag, vilket ofrånkomligen är nödvändigt, så behövs ytterligare forskning inom ballast- och cementersättning. Nya ersättande material upptäcks hela tiden, men förutom detta bör också synergifördelar mellan kombinationer av avfallsmaterial undersökas. Det är värt att poängtera att den betong man i dagens läge kan producera inte är miljövänlig, oberoende av hur grön den än försöker göras, utan den är endast miljövänligare än traditionell betong. För att kunna göra en faktisk miljövänlig betong borde hela sammansättningen bestå av återanvända och återanvändbara material, vars preparering för betongbruk inte avsevärt belastar miljön. Dagens utveckling är ännu en god bit ifrån detta, men förhoppningsvis uppnås en dylik betong hellre förr än senare.

Överlag lyckades kandidatarbetet väl. Syftet var att undersöka metoder för att framställa en miljövänligare betong, vilket gjorts i form av en litteraturstudie där ersättande material för portlandcement och traditionell ballast analyserats. Det finns rikligt med litteratur och undersökningar inom området, vilket underlättade informationssökandet markant. Som följd av den stora mängden undersökningar uppstod dock problemet att deras resultat ibland inte var enhetliga. Orsaken till denna variation beror dock antagligen på skillnader i materialkvalitet eller avvikelser i laboreringsförhållanden. Vid de fall som olikheter i resultaten fanns var emellertid skiljaktigheterna oftast små eller enskilda, och kunde därför avskrivas.

## Källor

1. Ahmaruzzaman, M. 2010. A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*. vol 36: 3. S 327-363. [Hämtad 19.10.2014]  
DOI:10.1016/j.peccs.2009.11.003 Tillgänglig:  
<http://www.sciencedirect.com.libproxy.aalto.fi/science/article/pii/S0360128509000604>
2. Alibaba. Priser för portlandcement, flygaska, mald granulerad masugnsslagg, silika-stoft och risskalsaska. [Hämtad 28.10.2014] [www.alibaba.com](http://www.alibaba.com)
3. Arivalagan, S. 2014. Sustainable Studies on Concrete with GGBS as a Replacement Material in Cement. *Jordan Journal of Civil Engineering*. vol 8:3. S 263-270. [Hämtad 7.11.2014] Tillgänglig: <https://elearning.just.edu.jo/jjce/issues/paper.php?p=2751.pdf>
4. Betoniteollisuus määrinä ja euroina. [hämtad 17.10.2014]  
<http://www.betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoniteollisuus-maarina-ja-euroina>
5. Cervantes, V. Roesler, J. 2007. Ground Granulated Blast Furnace Slag. TECHNICAL NOTE NO: 35. University of Illinois. Dept. of Civil and Environmental Engineering. Urbana, IL. [Hämtad 6.11.2014] Tillgänglig:  
[http://www.ceat.uiuc.edu/PUBLICATIONS/technotes/TN35%20GGBFS\\_technote%20\(2\).pdf](http://www.ceat.uiuc.edu/PUBLICATIONS/technotes/TN35%20GGBFS_technote%20(2).pdf)
6. Correia, J. R. De Brito, J. Pereira, A. S. 2006. Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates. *Materials and Structures*. vol 39:2. s 169-177. [Hämtad 12.11.2014] Tillgänglig:  
[http://download.springer.com.libproxy.aalto.fi/static/pdf/225/art%253A10.1617%252Fs11527-005-9014-7.pdf?auth66=1415740496\\_cdf8a2fa1dea525e28c1b179b564d10b&ext=.pdf](http://download.springer.com.libproxy.aalto.fi/static/pdf/225/art%253A10.1617%252Fs11527-005-9014-7.pdf?auth66=1415740496_cdf8a2fa1dea525e28c1b179b564d10b&ext=.pdf)
7. Eldin, N. N. Senouci, A. B. 1993. Rubber-tire particles as concrete aggregate. *Journal of materials in civil engineering*. vol 5:4. s 478-496. [Hämtad 13.11.2014] Tillgänglig:  
<http://ascelibrary.org.libproxy.aalto.fi/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%290899-1561%281993%295%3A4%28478%29>
8. Fagerlund, G. 2010. Mineraliska tillsatsmaterial i cement. Lunds tekniska högskola. Avdelningen byggnadsmaterial. Tillgänglig:  
<http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordOid=1971263&fileOid=4113107>
9. Finnsementti. Masuunikuona tehokkaampaan käyttöön. [Hämtad 26.11.2014]  
<http://www.finnsementti.fi/yritys/historia/masuunikuona-tehokkaampaan-kayttoon>
10. Günçan, N. F. 1995. Using waste concrete as aggregate. *Cement and Concrete Research*. vol 25:7. s 1385-1390. [Hämtad 11.11.2014] Tillgänglig:  
<http://www.sciencedirect.com.libproxy.aalto.fi/science/article/pii/000888469500131U#>
11. Heidrich C. Feuerborn, H. Weir, A. 2013 World of Coal Ash (WOCA) Conference. Coal Combustion Products: a Global Perspective. Tillgänglig:  
<http://www.flyash.info/2013/171-Heidrich-Plenary-2013.pdf>
12. Hwang, C. L. Chandra, S. 1996. The use of rice husk ash in concrete. *Waste materials used in concrete manufacturing*. ISBN: 978-0-8155-1393-3. E-Book ISBN: 978-0-8155-1951-5 s. 184-234
13. Ilangovana, R. Mahendrana, N. Nagamanib, K. 2008. Strength and durability properties of concrete containing quarry rock dust as fine aggregate. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. vol 3:5. s 20-26. [Hämtad 13.11.2014] Tillgänglig:  
[http://www.arnpjournals.com/jeas/research\\_papers/rp\\_2008/jeas\\_1008\\_125.pdf](http://www.arnpjournals.com/jeas/research_papers/rp_2008/jeas_1008_125.pdf)

14. Khatib, J.M. Hibbert, J.J. 2005. Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin. *Construction and Building Materials*. vol 19:6 s. 460-472 [Hämtad 7.11.2014] Tillgänglig:  
<http://www.sciencedirect.com.libproxy.aalto.fi/science/article/pii/S0950061804001680>
15. Knutsson, A. 2010. Freeze/Thaw Durability of Concrete with Fly Ash. Master's Thesis. Chalmers university of technology. Department of Civil and Environmental Engineering. Göteborg. [Hämtad 19.10.2014] Tillgänglig:  
<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/135847.pdf>
16. Limbachiya, M., Meddah, M. S., & Ouchagour, Y. 2012. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. *Construction and Building Materials*. vol 27:1. s 439-449. [Hämtad 11.11.2014] Tillgänglig:  
<http://www.sciencedirect.com.libproxy.aalto.fi/science/article/pii/S0950061811003771>
17. Mavroulidou, M. Figueiredo, J. 2010. Discarded tyre rubber as concrete aggregate: a possible outlet for used tyres. *Global NEST Journal*. vol 12:4. s 359-367. [Hämtad 12.11.2014] Tillgänglig:  
[http://journal.gnest.org/sites/default/files/Journal%20Papers/359-367\\_617\\_MAVROULIDOU\\_12-4.pdf](http://journal.gnest.org/sites/default/files/Journal%20Papers/359-367_617_MAVROULIDOU_12-4.pdf)
18. Mazloom, M. Ramezaniapoui, A.A. Brooks, J.J. 2004. Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites*. vol. 25:4 s. 347-357 [Hämtad 7.11.2014] Tillgänglig:  
<http://www.sciencedirect.com.libproxy.aalto.fi/science/article/pii/S0958946503000179>
19. Pacheco-Torgal, F. Jalali, S. 2010. Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and Building Materials*. vol 24:5. s 832-838. [Hämtad 12.11.2014] Tillgänglig:  
<http://www.sciencedirect.com.libproxy.aalto.fi/science/article/pii/S0950061809003602>
20. Safiuddin, M., Raman, S. N., & Zain, M. F. M. 2007. Utilization of quarry waste fine aggregate in concrete mixtures. *Journal of Applied Sciences Research*. vol 3:3. s 202-208. [Hämtad 13.11.2014] Tillgänglig:  
<http://www.aensiweb.com/old/jasr/jasr/2007/202-208.pdf>
21. Senthamarai, R. M., & Devadas Manoharan, P. 2005. Concrete with ceramic waste aggregate. *Cement and Concrete composites*. vol 27:9. s 910-913. [Hämtad 11.11.2014] Tillgänglig:  
<http://www.sciencedirect.com.libproxy.aalto.fi/science/article/pii/S0958946505000557>
22. SFS-EN 197-1. 2012. Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. European Standard.
23. Siddique, R. Khan, M. 2011. *Supplementary Cementing Materials*. Heidelberg; New York: Springer. E-Book ISBN: 9783642178665/3642178669 s. 4, 10-12, 67-68, 73-74, 81, 121, 129-130, 133, 231
24. Siddique, R. Naik, T. R. 2004. Properties of concrete containing scrap-tire rubber—an overview. *Waste management*. vol 24:6. s 563-569. [Hämtad 13.11.2014] Tillgänglig:  
<http://www.sciencedirect.com.libproxy.aalto.fi/science/article/pii/S0956053X04000212>

25. Sukesh, C. Krishna, K. B. Teja, P. S. L. S. Rao, S. K. 2013. Partial replacement of sand with quarry dust in concrete. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. vol 2:6 s 254-258. [Hämtad 13.11.2014] Tillgänglig: <http://www.ijitee.org/attachments/File/v2i6/F0846052613.pdf>
26. Suomen Rengaskierratys Oy [Hämtad 12.11.2014] Tillgänglig: <http://www.rengaskierratys.com/tilastot>
27. The European cement association. Key facts and figures. *World Cement Production 2013 by region and main countries*. [hämtad 17.10.2014] Tillgänglig: <http://www.cembureau.be/about-cement/key-facts-figures>
28. Topcu, I. B. Şengel, S. 2004. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*. vol 34:8. s 1307-1312. [Hämtad 11.11.2014] Tillgänglig: <http://www.sciencedirect.com.libproxy.aalto.fi/science/article/pii/S0008884603004435>
29. Ympäristöministeriö. 2005. *Finlands Byggbestämmelsesamling. Betongkonstruktioner B; 4*. ISBN: 951-37-4221-0. s. 61
30. Zhang, M. H., & Malhotra, V. M. 1996. High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material. *ACI Materials Journal*. vol 93:6 s 629-636