

Skumglas som ballast i betong

En experimentell studie om hur betongens hållfasthet och värmekonduktivitet påverkas



LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg Institutionen för
Bygg- och miljöteknologi/Avdelningen för Byggnadsmaterial

Examensarbete, 22,5 hp

Diala Chahine

Joel Nilsson

© Copyright Diala Chahine, Joel Nilsson

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg

Lunds Universitet

Box 882 251 08

Helsingborg

LTH School of Engineering Lund University

Box 882 SE-251 08

Helsingborg

Sweden

Lund 2019

Förord

Detta arbete har genomförts vid avdelningen för byggnadsmaterial vid Lunds Tekniska Högskolan Examensarbetet ingår i högskoleingenjörsutbildningen byggteknik, LTH, Helsingborg.

Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare Katja Fridh för all värdefull hjälp och den tid hon lagt på många givande diskussioner och den feedback som gjort att arbetet kan fortskrida. Ett stort tack riktas även till Maiko, Martin och Mark som tillsammans med resten av personalen på Peabs laboratorium i Helsingborg tålmodigt hjälpt oss med blandning och tryckning av betongen.

Sammanfattning

I byggbranschen förekommer ett stort antal material vilka används i 50 000 olika byggvaror. Materialets estetik samt fysiska egenskaper är faktorer som beaktas vid materialval och ett material som till stor del tillfredsställer många krav är betong. Betong består i huvudsak av cement, vatten och ballast men eftersom tillgången på ballast är begränsad finns det ett intresse i att undersöka alternativ. Glas är ett material som har hög insamlingsandel och som man ogärna vill deponera. (Stockholmsregionens Avfallsråd, 2007) En möjlig produkt av insamlat glas är skumglas och alltså ett alternativ till deponering. Därför är syftet med studien att undersöka huruvida skumglas lämpar sig som alternativ ballast i betong.

Frågeställningarna som rapporten försöker svara på är huruvida egenskaperna hos materialet skumglas visar på en potential att kunna ersätta traditionell ballast i betong, med fokus på hur hållfastheten och värmekonduktiviteten ändras.

Arbetet har utförts på Peab Asfalts laboratorium i Helsingborg. Här har betong blandats med vattencementtal 0,53, därefter har kuber på 3,5 liter gjutits. I hälften av kuberna har 35% av ballasten med kornfraktion 8/11 substituerats med skumglas. För att bestämma tryckhållfastheten har dessa sedan tryckprovats med hjälp av laboratoriets utrustning. Utöver detta har värmekonduktiviteten hos samma kuber bestämts på avdelningen för Byggnadsmaterial, LTH i Lund.

Tryckhållfastheten hos betongen med skumglas jämfördes med en traditionell betong och resultatet avvek mindre än förväntat. Provningsen visade att betongen med skumglas istället för sten som högst hade en tryckhållfasthet på 46 MPa medan traditionell stenbetong hade ett motsvarande värde på 58 MPa.

Hållfasthetsmodellen visar sig stämma bra överens med mätningarna. Resultaten från tryckhållfasthetsprovningarna visade på en avvikelse från detta teoretiska värde på enbart ca 1,3 MPa. Detta innebär att den betong som framställts kunnat beskrivas med hjälp av en modell för att kunna förutsäga vilken hållfasthet den kommer att få. Detta kan vara till fördel vid vidare forskning om detta ämne då det finns ett konkret sätt att beskriva materialets egenskaper sett ur hållfasthetsperspektiv.

Värmekonduktiviteten hos skumglasbetongen uppmättes till ca 1,73 W/mK och hos stenbetongen mättes denna till ca 1,71 W/mK. Detta stämde väl överens med värden framtagna med den teoretiska modellen. Det var intressant att skumglasbetongens värmekonduktivitet var högre än den hos traditionell betong, vilket antas bero på en observerad separation i betongen.

Resultaten av hållfasthetsprovningen visar på att skumglasbetong kan vara ett gångbart alternativ till traditionell betong i vissa användningsområden där materialet inte kommer utsättas för hög belastning.

Rapporten har undersökt tryckhållfasthet och värmekonduktivitet. Hållfasthetstillväxten har observerats under en begränsad tid om cirka två månader. Utöver detta har rapportens

innehåll avgränsats till att undersöka de effekter som uppnås då 35 % av den ballast med kornstorlek 8-11 mm byts ut mot skumglas.

Författarna hoppas att rapporten lagt en grund för framtida vidare forskning på området för att hitta lösningar på några av de problem som byggbranschen ställs inför idag.

Summary

In the construction industry there is a large number of materials that are used in 50,000 different construction products. The aesthetics and physical properties of the material are factors that are considered in material selection and a material that largely satisfies many of these requirements is concrete. Concrete mainly consists of cement, water and ballast, but since the supply of ballast is limited, there is an interest in exploring alternatives. Glass is a material that has a high share of collection and the deposition of this material into landfills is something to avoid. (The Stockholm Region's Waste Council, 2007) A possible product of collected glass is foam glass and thus using foam glass as ballast in concrete has been studied as an alternative to deposition.

The issues that the report attempts to answer are whether the properties of the foam glass show a potential to be able to replace traditional ballast in concrete, focusing on how the strength and heat conductivity are affected.

The work has been carried out at Peab Asphalt's laboratory in Helsingborg. Here concrete has been mixed with water-cement ratio of 0.53, then cubes of 3.5 liters have been cast. In half of the cubes, 35% of the ballast with grain fraction 8/11 has been substituted with foam glass. In order to determine the compressive strength, these have then been pressure tested using the laboratory equipment. In addition, the heat conductivity of the cubes has been determined in the Division of Building Materials, LTH in Lund.

The compressive strength of the concrete with foam glass was compared to a traditional concrete and the result deviated less than expected. The test showed the concrete with foam glass instead of stone having a maximum compressive strength of 46 MPa while traditional stone concrete had a corresponding value of 58 MPa.

The strength model proves to be in good agreement with the measurements. The results of the compressive strength tests showed a deviation from this theoretical value of only about 1.3 MPa. This means that the concrete that has been produced can be described by means of a model in order to be able to predict what strength it will have. This can be of benefit in further research on this subject since there is a concrete way to describe the properties of the material from a strength perspective.

The heat conductivity of the foam glass concrete was measured to be about 1.73 W/mK and for the stone concrete it was measured to about 1.71 W/mK. This corresponded well with the values from the theoretical model. It was interesting that the heat conductivity of the foam glass concrete was higher than that of traditional concrete, which is believed to be due to an observed separation in the concrete.

The results of the strength test show that foam glass concrete can be a viable alternative to traditional concrete in certain applications where the material will not be exposed to a high load.

The report has examined compressive strength and heat conductivity. Strength growth has been observed for a limited time of about two months. In addition, the content of the report has been limited to examine the effects achieved when 35% of the ballast with a grain size of 8-11 mm is replaced by foam glass.

The authors hope that the report has laid the groundwork for future further research in the area to find solutions to some of the problems that the construction industry is facing today.

Innehållsförteckning

Förord	3
Sammanfattning	4
Summary	5
1. Inledning	9
1.1 Bakgrund	9
1.2 Syfte och avgränsning	10
2. Teori	11
2.1 Betong - egenskaper och beståndsdelar	11
2.1.1 Cement	11
2.1.2 Vatten	13
2.1.3 Tillsatsmedel	13
2.1.4 Ballast	14
2.2 Betongens utveckling och dess kemiska reaktioner	15
2.2.1 Hydratation	15
2.2.2 Separation	16
2.2.3 Konsistens	17
2.3 Skumglas	18
2.4 Teoretiska modeller	20
2.4.1 Tryckhållfasthet	20
2.4.2 Värmekonduktivitet	20
3. Material och experimentella studier	23
3.1 Material och utrustning	23
3.2 Betongtillverkning	24
3.3 Tryckhållfasthetsprovning	26
3.4 Värmekonduktivetsprovning	29
4. Resultat och analys	31
4.1 Den färska betongens egenskaper	31
4.2 Provkropparnas egenskaper	33
4.3 Tryckhållfasthet	34
4.3.1 Tryckprovning	34
4.3.2 Modell	35
4.4 Värmekonduktivitet	37
4.4.1 Värmekonduktivetsprovning	37
4.4.2 Modell	37

5. Slutsats och diskussion	39
5.1 Hur skiljer sig betongens hållfasthet och värmekonduktivitet vid användning av skumglas som ballast i jämförelse med traditionell stenballast?	39
5.1.1 Hållfasthet	39
5.1.2 Värmekonduktivitet	39
5.2 Gör dessa egenskaper hos materialet att det har potential att vara ett alternativ vid användning av betong som byggnadsmaterial?	40
6. Vidare forskning	41
Referenser	43

Bilaga 1 Provningsrapporter – hållfasthet

Bilaga 2 Produktdatablad Skumglas

Bilaga 3 Provningsrapporter - värmekonduktivitet

1. Inledning

1.1 Bakgrund

I byggbranschen förekommer ett stort antal material vilka används i många olika typer av byggvaror. Bland annat materialets kostnad, estetik samt fysiska egenskaper är faktorer som beaktas vid materialval. Ett material som till stor del tillfredsställer kraven som ställs på byggmaterial vid husbyggnadsprojekt och liknande är betong. Betong är ett av världens viktigaste och äldsta byggnadsmaterial och används i ett stort antal byggnadsverk. Från att ha använts vid konstruktionen av romarnas berömda Pantheon och Colosseum för 2000 år sedan (Mark, Hutchinson 1986) till att förena Sverige och Danmark genom byggandet av Öresundsbron i modern tid har betong spelat en viktig roll i att utveckla bygghkonsten.

Betong består i huvudsak av cement, vatten och ballast. I nuläget utgörs ofta ballasten av naturgrus eller krossberg. Naturgrus har en naturligt rundad kornform vilket är fördelaktigt för betongens konsistens. Eftersom naturgrus är viktigt för grundvattenförsörjningen måste ett alternativ som kan ersätta naturgrus som ballast i betong tas fram (SGU, 2011). Ett alternativ som benämns i rapporten är krossberg (SGU, 2011), det vill säga krossat bergmaterial, som har en kantigare kornform. Det finns ett intresse för att hitta fler alternativa material som kan användas som ballast i betong. Ett exempel på ett sådant material är skumglas.

Skumglas, även kallat cellglas, består av krossat, återvunnet glas som värms upp och expanderar. Materialet har beskrivits som "mycket tryckhållfast" i relation till dess ringa densitet av dess leverantör (Hasopor) samt kemiskt stabilt och obrännbart. Det är ett oorganiskt material med god beständighet mot biologiska angrepp. Dess fysiska egenskaper gör materialet intressant som alternativ till traditionell ballast. Tillsammans med den minskade negativa miljöpåverkan som kan uppnås genom förbättrad avfallshantering av glas blir det ett mycket intressant material att testa för detta ändamål. Utöver detta har materialet låg densitet och därmed låg vikt vilket kan skapa en intressant slutprodukt ur viktsynpunkt.

1.2 Syfte och avgränsning

Den här rapporten kommer att försöka ge ett svar på huruvida skumglas kan vara ett gångbart alternativ som ballast i betong. Egenskaperna som studeras är tryckhållfasthet samt värmekonduktivitet. Syftet med rapporten är att studera hur betongens hållfasthet och värmekonduktivitet ändras om 35 % av ballasten med kornstorlek 8-11 ersätts med skumglas.

För att nå syftet måste följande frågor besvaras:

- Hur skiljer sig betongens hållfasthet och värmekonduktivitet vid substitution av 35 % ballast mot skumglas i jämförelse med traditionell stenballast?
- Finns det något i resultaten som tyder på att materialet ej lämpar sig för användning som ballast i betong?

Rapporten kommer att behandla tryckhållfastheten (inklusive tillväxten av denna över tid) samt värmekonduktivitetsegenskaperna hos betongen. Det kommer endast att vara 35 % av den ballast med kornfraktion 8/11 (det vill säga kornstorlek mellan 8 och 11 mm) som byts ut mot skumglas i betongen.

Detta arbete fokuserar på tryckhållfasthet ty detta är mycket intressant för huruvida skumglas lämpar sig för användning som ballast i betong (Burström 2001). Även värmeledningsförmågan hos materialet är relevant då det är rimligt att anta att substitutionen av ballasten kan påverka denna positivt.

2. Teori

I detta avsnitt presenteras den teori som är nödvändig för att förstå studiens resultat.

Då vi studerar tryckhållfasthetens utveckling över tid beskriver vi här betongens egenskaper och beståndsdelar, hydratation, separation och konsistens. I kapitlet presenteras även en teoretisk modell för beräkning av tryckhållfasthet hos blandade material.

Då vi studerar värmekonduktiviteten är det materialets förmåga att leda värme som är i fokus. Här presenteras en modell för hur värmekonduktiviteten hos ett blandat material så som betong med ballast teoretiskt kan beräknas.

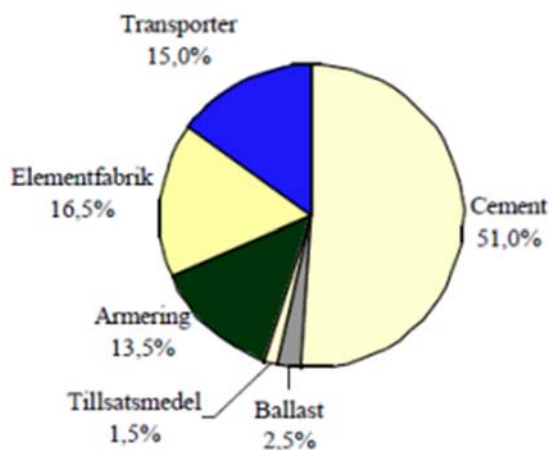
2.1 Betong - egenskaper och beståndsdelar

Betong är ett viktigt byggnadsmaterial som används idag och utmärks av god beständighet, formbarhet och hållfasthet. Betong används i bärande konstruktioner (stommaterial) och där god beständighet krävs exempelvis husgrunder, fasader och broar. En intressant sak som skiljer betong från många andra material är att det ofta levereras i form av råmaterial vilket gör det möjligt att påverka slutproduktens egenskaper såsom formen eller kvaliteten på materialet. (Ljungkrantz et al, 1994)

Huvudbeståndsdelarna i betong är cement, vatten och ballast (sten, grus, sand). Tillsatsmedel och tillsatsmaterial kan även användas för att påverka betongens egenskaper, exempelvis för att förändra betongens konsistens under blandning. Cement och vatten utgör betongens bindemedel, så kallad cementpasta. Denna pasta binder ihop ballastkornen (som ofta bestämmer betongens hållfasthet beroende på partiklarnas egenskaper, sammansättning och kornfördelning). Cementpastans egenskaper bestäms nästan uteslutande av viktförhållandet mellan vatten och cement, så kallat vattencementtal. I vanlig betong utgörs ballast av naturligt stenmaterial men eftersom detta är en resurs som det i framtiden kan bli brist på är det intressant att försöka hitta ett pålitligt, miljövänligt och ekonomiskt gångbart ersättningsmaterial. (Burström 2001)

2.1.1 Cement

Cement är ett s.k hydrauliskt bindemedel, vilket innebär att det hårdnar vid reaktion med vatten till en produkt som sedan inte är löslig i vatten. Den cement som används i störst utsträckning är portlandcement. Namnet på denna tros komma från byggnadsstenen Portlandsten från Portlandhalvön i England. Cementens namn sägs komma från att den är mycket lik denna sten i färgen. Huvudråvaran när cement tillverkas idag är kalksten. Denna finmals innan den bränns i hög temperatur då cementklinker erhålls. Därefter kyls detta ner och mals ner med 5% gips vilket är det vi kallar cement. (Burström 2001)



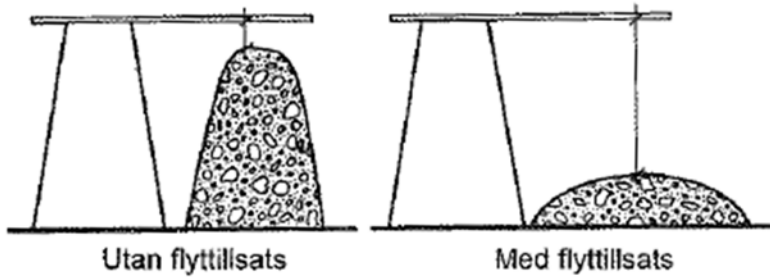
Figur 1. Fördelning av koldioxidutsläpp vid betongtillverkning. *Livscykelanalys betongelement* (Öberg, M. Cementa FOU, 1998)

2.1.2 Vatten

Betongens hållfasthet och beständighet kan försämrans vid bristfällig vattenkvalitet. Det ställs dock inga höga krav på det vatten som skall användas vid betongtillverkning. En riktlinje är att allt naturligt vatten som är drickbart är användbart för betong. (Burström 2001)

2.1.3 Tillsatsmedel

Det vanligaste tillsatsmedlet är ett så kallat flyttillsatsmedel eller superplasticerare. Detta medel har använts som tillsats i betong sedan 1960-talet och ses av många som en milstolpe i betongtillverkning då betongens flytegenskaper kunde förbättras (Papayianni et al, 2005). Cementpastans bearbetbarhet förbättras nämnvärt genom tillsats av detta medel. Denna bearbetbarhet bibehålls endast en kortare tid (mellan 30 och 60 minuter) men förenklar tillverkningsprocessen. Utöver detta minskar den färdiga betongens porositet och krympning i samband med torkning. Då denna effekt kan uppnås med endast 0,4 - 2,0 viktprocents tillsats av superplasticerare kan mängden vatten i blandningen reduceras med 10-30% (Burström, 2001). Sammantaget förbättrar därmed tillsatsmedlet även den färdiga betongens hållbarhet då mindre cement behövs för samma vct och detta resulterar i mindre miljöbelastning och därmed även ökad hållbarhet. Om samma lösa konsistens hos cementpastan skulle uppnås med hjälp av tillsats av vatten skulle negativa egenskaper såsom separation, hållfasthetsförlust samt ökad krympning kunna observeras. (Burström 2001). Figur 2 nedan illustrerar den effekt flyttillsatsmedel har på konsistensen vid betongtillverkning.



Figur 2. Flytillsatsmedlens påverkan på betongens konsistens. *Byggnadsmaterial - Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*. (Burström 2001, s214)

2.1.4 Ballast

Ballast är en benämning på bergartsmaterial som är menade att användas vid betongtillverkning. Den ballast som används till vanlig betong består av naturliga bergarter och används antingen direkt som de utvinns ur grustag eller som kross. Olika beteckningar används beroende på kornstorlek, sand (< 4 mm), fingrus (< 8 mm) eller sten (> 8 mm). Det allra finaste materialet benämns filler och har en kornstorlek på < 0,125 mm. Ballast kan vara makadam eller singel, dvs bestå av olika kornstorlekar. (Burström 2001).

Ballastmaterial bör innehålla olika kornstorlekar i en viss relation till varandra. Hålrum som kan uppstå mellan de största kornen bör fyllas av mindre korn, vars motsvarande hålrum fylls av ännu mindre partiklar etc. Resterande hålrumsvolym fylls av cementpastan som ska omge varje korn med ett skikt så att partiklarna blir "sammanlimmade". (Burström 2001)

Det dominerande sättet för att dela upp materialet i olika fraktioner är i Sverige torrsiktning. De krav som ställs på siktning är i form av högsta tillåtna mängder utanför kornstorleksgränserna. Enligt SS 13 21 01 får endast 10 % vara större än övre storleksgränsen och 25 % mindre än undre storleksgränsen. Beroende på användningsområde kan ännu snävare gränser tillämpas. I vissa grustag kan materialet behöva tvättas för att bli användbart för betongframställning. Materialet tvättas då på en sikt, där vatten under högt tryck sprutas ned på materialet. För betongändamål är slutprodukten från grustag ett grus mellan 0 och 8 mm. Detta kan användas som ett sammansatt material 0-8 mm eller uppdelat i 2-3 fraktioner, ex 0-2, 2-4, 4-8 mm. Från bergtag används makadam i en eller flera av fraktionerna 8-11, 11-16, 16-22 och 16-32 mm. (Ljungkrantz et al, 1992).

Naturgrus har länge brutits för användning som ballast vid betongtillverkning samt för konstruktioner av vägar och järnvägar. (Göransson, 2011) Begreppet naturgrus omfattar bland annat isälvs sediment i olika avlagringstyper som exempelvis rullstensåsar och deltan. Dessa har transporterats och avsatts av smältvattenströmmar från en inlandsis eller glaciär. Isälvsavlagringar kännetecknas framförallt av att de huvudsakligen består av sten, grus och sand. Materialet är normalt bildat i rinnande vatten och detta menar Svensson förklarar naturgrusets rundade form. (Svensson, 2012)

De större grundvattentillgångarna för dricksvattenförsörjning i Sverige finns i den sedimentära berggrunden samt i sand- och grusavlagringar från istiden. Beklagligtvis har områden med stora grundvattentillgångar ofta varit utsatta för exempelvis uttag av naturgrus. Att utnyttja dessa geologiska bildningar med värdefullt grundvatten innebär att man minskar möjligheterna att kunna nyttja vattnet som dricksvattenresurs. (Länsstyrelsen) I Sverige används mer än 40% av det uttagna naturgruset till betongändamål och inom vissa områden av betongindustrin är det fortfarande svårt att ersätta naturgrus. (Göransson, 2011).

Ett ersättningsmaterial som benämns av Mattias Göransson är krossat berg. Inom användningsområden som sprutbetong (betong som trycks genom en slang i hög hastighet för att producera en homogen massa) och fabriksbetong (betongmassa som är tillverkade på fabrik och som levereras till byggarbetsplatsen i bilar med roterande behållare) ställs andra krav på proportioneringen än vid traditionell betong, då bergkross vanligtvis innehåller en högre andel finmaterial än naturgrus. Om andelen finmaterial som alstras vid krossning av berg blir för hög separeras denna med hjälp av vindsiktning eller tvättning.

Dessutom måste bergsråvaran hålla en oföränderlig materialkvalitet för att generera en tidsmässigt likvärdig betongproduktion. Bergkross har även en kantig kornform vilket gör den svårare att använda i betong eftersom att betongen får en högre inre friktion. För att behålla betongens goda flyt och bearbetningsegenskaper och möjliggöra pumpning krävs den friktionen i materialet som kan frambringas av runda kornformer. (Göransson, 2011)

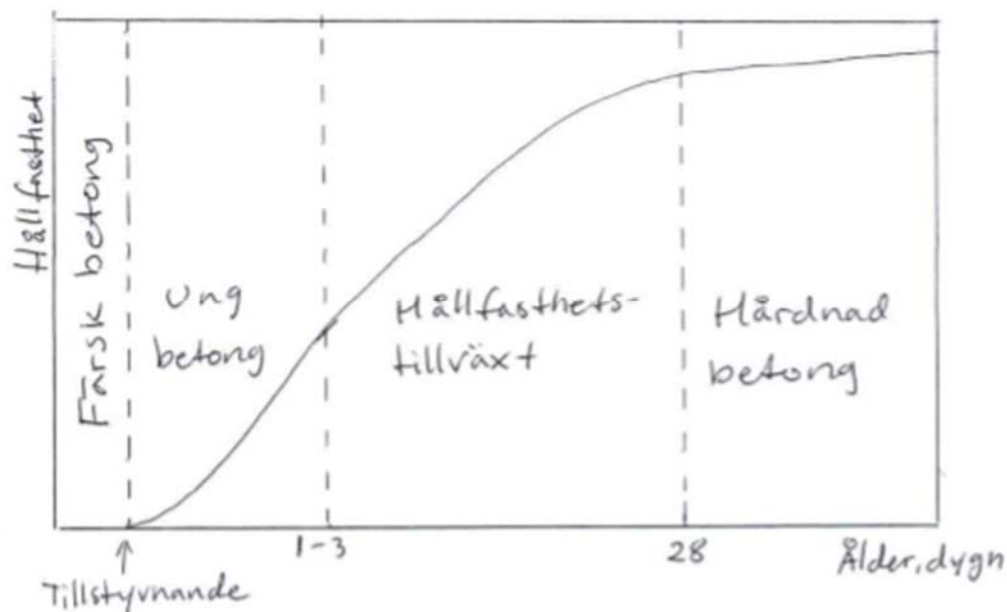
2.2 Betongens utveckling och dess kemiska reaktioner

På vägen från gjutning till färdig betong genomgår materialet en rad processer. Dessa bestäms bland annat av betongmassans sammansättning vilken påverkar hur betongmassans cement och vatten reagerar (hydratiserar), dess konsistens och risk för separation.

2.2.1 Hydratation

När betongens beståndsdelar blandas reagerar cement och vatten kemiskt, s.k hydratation. Dessa reaktioner medför att betongen successivt börjar hårdna. Betongens hårdnande när denna väl startat kan delas upp i 4 faser, se figur 3. Efter fas 1 sker ett märkbart styvnande men betongen kan lätt formas och vibreras. Under fas 2 börjar det faktiska hårdnandet och egenskapsutvecklingen är fortfarande stor. Under denna fas är betongen känslig för uttorkning, temperaturpåverkan och belastning då det finns risk för sprickbildning och bristfällig härdning. Under fas 3 är de yttre betingelserna inte längre så betydelsefulla för betongens utveckling. De mekaniska egenskaperna är inte fullt utvecklade men materialet har ett funktionssätt som är snarlikt den hårdnade betongens (fas 4). (Burström 2001)

Hållfasthetsutvecklingen som beror på detta successiva tillstyvnande illustreras i figur 3.



Figur 3. Hållfasthetsförändring under tillstyvnande.

Reaktionen mellan cement och vatten bildar en finporös cementgel som omger cementkornens yta. Eftersom gelen både är porös och innehåller vatten kommer dess volym att vara större än den volym av cementkornet som reagerat. När cement och vatten reagerar kommer det ursprungliga porutrymmet mellan cementkornen att fyllas av cementgel. Detta resulterar i att cementpastan blir alltmer tätare och därmed starkare. Denna reaktion innan betongen börjat styvna sker under fas 1 i figur 3, färsk betong. Hur denna kurva ser ut för olika betongtyper är viktigt för att kunna bedöma betongens lämplighet för olika tillämpningar. (Burström 2001)

2.2.2 Separation

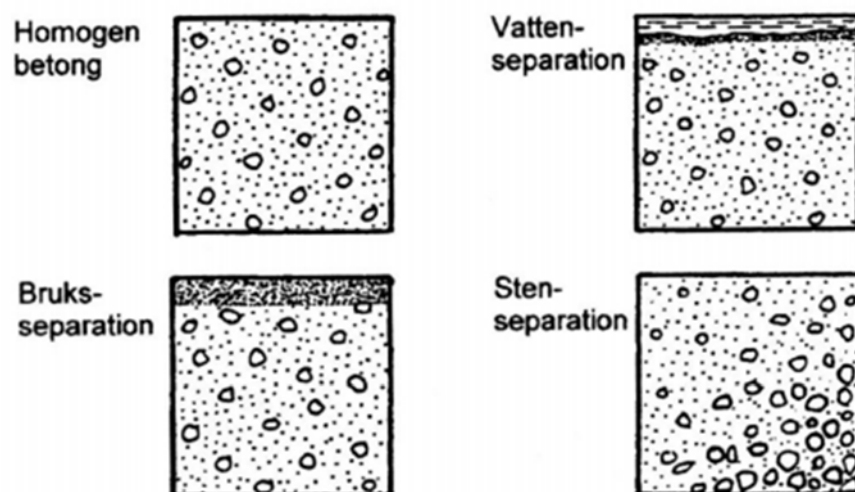
Betongblandningen är sammansatt av ett antal olika komponenter med olika densitet. De tyngre komponenterna strävar efter att sjunka nedåt och de lättare strävar efter att stiga uppåt. Separation mellan delmaterialen kan uppstå i betongen och innebär att stabiliteten är otillräcklig. Konsekvensen blir en inhomogen betong där de övre delarna bl.a får längre hållfasthet och större krympning. Överst kan uppstå ett millimetertjockt lager av utspädd och svag cementpasta, s.k cementhud. Detta har bl.a försämrade vidhäftning mot senare pålagda skikt, t.ex limmade golvmaterial. (Burström 2001)

En mängd olika typer av separation kan ske i betongen:

- Vattenseparation är ett fenomen som uppstår då den totala mängd finmaterial (filler) är så liten att betongen inte kan hålla kvar blandningsvatten. Finmaterialets funktion är bland annat att göra betongen vattentät (Lidberg 2011). Vattnet skiljs då från

cementpastan och koncentreras dels vid ytan och dels under grövre stenar och armering. (Burström 2001)

- Stenseparation uppstår till största del under transport och bearbetning och innebär att ballasten (stenen) i betongen separerar och inte fördelas jämnt i betongen. Lösare konsistens och längre vibrationstid ökar risken för stenseparation. En otillräcklig sammanhållning till följd av en för lite mängd finmaterial kan också ge upphov till stenseparation. (Burström 2001)
- Bruksseparation innebär att det bildas ett cementskikt på ytan medan stenen i betongen sjunker. Detta leder till att man får ett undre skikt av betong med högre stenhalt, dvs det bildas två olika material. Detta kan inträffa om betongen är för lös i konsistensen. (Burström 2001)



Figur 7. Snitt genom olika typer av separation i betong (Burström 2001, s 222)

2.2.3 Konsistens

Betongmassans konsistens kan mätas med hjälp av olika konsistensmätare. I Sverige används ofta sättmått för betong med lös konsistens och vebe-tal för betong med styv konsistens (Burström 2001). Sättmåttet bestäms med hjälp av en sättkon som är en plåtkon som är öppen i båda ändar och har standardiserade dimensioner. Sättkonen placeras på ett jämnt underlag och fylls med betong, som bearbetas på ett standardiserat sätt. Sättkonen lyfts upp försiktigt varvid betongen sjunker ihop. Nedsjunkningen mäts och det uppmätta värdet utgör sättmåttet. Tabell 1 visar gränsvärdena för betongens konsistens enligt äldre och ny standard (SS-EN 206-1)

Tabell 1. Gränsvärden vid sättmått för betongkonsistens enligt äldre och ny standard. (Burström 2001)

Konsistens		Sättmått	Konsistensklass	Sättmått [mm]
Beteckning	Benämning	[mm]	(SS-EN 206-1)	(SS-EN 206-1)
Plastisk	P	10-40	S1	10-40
Trögflytande	T	50-90	S2	50-90
Lättflytande	L	100-150	S3	100-150
Halvflyt	LL	150-210	S4	160-210
Flytbetong	FF	>210	S5	>210

För betong med sättmått större än 210 mm används utbredningsmått. (Svensk Betong) Utbredningsmättet bestäms genom att betongen som ska testas hålls i en kon till en viss höjd. Därefter lyfts konen och diametern på cirkeln som betongen bildar mäts med en tumstock. Utbredningsmått är det som använts för betongen som producerats i detta arbete då den färska betongen hade en lös konsistens.

2.3 Skumglas

Skumglas är ett granulärt material som består av återvunnet glas från olika källor såsom förpackningsglas, glasburkar, glasflaskor, katodstrålerör (som är ett vakuumrör vars syfte är att skapa bild på skärm) mm som tvättas, torkas och mals ner till ett fint pulver (Méar et al, 2006). En aktivator tillsätts och materialet hettas upp varvid pulvret expanderar till ca 5 gånger sin ursprungliga volym (SGI, 2008). I samband med snabb avkylning bryts materialet ner i mindre delar och resultatet blir porösa partiklar av varierande storlek med låg densitet, ca 200 kg/m³ vilket beror på att materialet utgörs av endast ca 8 volymprocent glas medan resterande 92% är luft (Vägverket, 2007) Denna porositet syns tydligt i figur 4, observera också den stora variationen i porstorlek mellan partiklarna.



Figur 4. Partiklar av skumglas

Méar et al (2007) fann att värmekonduktiviteten hos skumglas tillverkat av katodstrålerör varierar mellan 0.08 och 0.43 W/mK beroende på typen av katodstrålerör som använts vid tillverkningen. Hasopor som är leverantör av skumglas till detta projekt har angett en torr värmekonduktivitet på 0,102 W/mK samt en värmekonduktivitet på 0,129 W/mK (se bilaga 2) i vått tillstånd vilka kan jämföras med ett typvärde för betong som ligger på ca 1.7 W/mK. (Burström 2001). Detta kan tolkas som att skumglas har en utmärkt isolerande effekt vilket är eftertraktat vid exempelvis materialval till hus.

Viktigt att ha i åtanke gällande dessa givna värden på värmekonduktiviteten är dock att det kan finnas en viss osäkerhet i dessa. Det ges ingen uppgift kring hur denna är uppmätt. Det kan exempelvis vara skillnad på om värmekonduktivitetmätningen skett i samband med att materialet avkyls och bryts i mindre delar eller om mätningen sker innan det. Dessutom finns inga uppgifter på hur materialets värmekonduktivitet förändras om materialet sönderdelas eller om det påverkas av att blandas med ett annat material vars partiklar kan tränga in i skumglasets porer. Det finns inte heller information om huruvida mätningen har gjorts tillsammans med luft mellan partiklarna eller enbart på dessa.

2.4 Teoretiska modeller

Detta kapitel baseras på kapitel 4, Värme, ur Byggnadsmaterial (2018) av Per Gunnar Burström och Kjell Nilvér, om inte annat anges.

Ett sätt att ställa en hypotes inför ett praktiskt prov kan vara att ställa upp en teoretisk modell för den sökta storheten, beräkna denna och sedan jämföra med erhållet mätresultat för att t.ex. kunna dra en slutsats kring vidare provning på samma område. Nedan presenteras två sådana teoretiska modeller; en för hållfasthet hos material med två komponenter samt en för värmekonduktivitet hos samma material.

2.4.1 Tryckhållfasthet

För beräkning av tryckhållfastheten hos ett material som består av två komponenter görs antagandet att det finns ett proportionerligt samband mellan volymen och tryckhållfastheten hos varje komponent och materialets sammansatta tryckhållfasthet enligt ekv 1:

$$\sigma_{tot} = \sigma_1 * V_1 + \sigma_2 * V_2 + \dots + \sigma_n * V_n \quad (\text{ekv 1})$$

Där

σ_n = Tryckhållfasthet för material n

V_n = Volymandel av material n

2.4.2 Värmekonduktivitet

Värmekonduktivitet sker genom att molekyler med hög rörelseenergi via stötar överför energi till molekyler med lägre rörelseenergi. Värmekonduktivitet som en byggnadsteknisk term innebär den totala värmetransporten genom ett material (som kan ske genom konvektion, strålning och ledning), (Burström, 2001) och är den förklaring som denna rapport avser.

Om ett material med tjockleken d (m) har en värmeflödestäthet q (W/m²) kommer materialets värmekonduktivitet λ (W/m·K) definieras av ekv 2.

$$q = \frac{\lambda * \Delta T}{d} \quad (\text{ekv 2})$$

Där T är temperaturerna i grader Celsius på materialskiktets ytor. Ekvationen förutsätter att stationärt tillstånd råder, d.v.s. att materialskiktets temperaturer T och värmekonduktiviteten λ är konstanta.

Formeln ovan gäller då man hanterar ett enskilt material. För material med flera beståndsdelar krävs det att man justerar för de ingående materialens olika värmekonduktivitet. Porerna i ett material har stor betydelse för dess värmekonduktivitet då luften i porerna har ett λ -värde som är omkring 1/100 av λ -värdet för det kompakta materialet. Principiellt gäller att materialets λ -värde är lägre ju högre dess porositet är.

Värmekonduktiviteten hos ett material som är sammansatt av två faser, t.ex. fast material och luftporer, kan beräknas med hjälp av olika modeller. De enklaste modellerna är parallellmodellen och seriemodellen. Båda modellerna kan uttryckas med ekv 3.

$$\lambda^n = V_1 * \lambda_1^n + V_2 * \lambda_2^n \quad (\text{ekv 3})$$

där n är en variabel som varierar mellan ± 1 .

V_1 och V_2 är volymdelar och utgör tillsammans hela materialet.

Det är viktigt att inse att ingen av modellerna är helt realistisk för ett verkligt material.

Parallellmodellen ger ett övre gränsvärde för λ och seriemodellen ger ett undre gränsvärde.

Parallellmodellen är lämpligast att använda för material med ledande grundmassa och dåligt ledande porer med $n=0,2-0,4$.

Seriemodellen är mest lämplig att använda för ett material som har ledande partiklar i en dåligt ledande grundmassa med $n= -0,2-(-0,4)$. Då kommer värmeflödet söka sig genom partiklarna. Ett exempel på detta är betong där fyllnadsmaterialet (partiklarna) har bättre ledningsförmåga än cementpastan (ledande grundmassa). I denna rapport kommer ett material vars porer har sämre värmeledningsförmåga än pastan att behandlas. Därför används parallellmodellen vid beräkning av skumglasbetongens värmekonduktivitet och seriemodellen för betongen med endast traditionell stenballast.

3. Material och experimentella studier

I detta kapitel presenteras den undersökningsteknik som använts för utförandet av rapporten.

Skumglasets tryckhållfasthet har testas genom standardprocedur för tryckhållfasthetsprovning, se bilaga 1. Peabs laboratorium i Helsingborg är ackrediterat för denna process av Swedac, Styrelsen för ackreditering och teknisk kontroll. Utöver detta provades betongens värmekonduktivitet på avdelningen för Byggnadsmaterial på Lunds Tekniska Högskola.

Med data från tryckhållfasthetsprovningen kommer slutsats delvis kunna dras kring huruvida skumglas lämpar sig rent praktiskt för användning som ballast. Resultatet från värmekonduktivetsprovningen visar om materialet har förbättrade egenskaper jämfört med betong.

3.1 Material och utrustning

Till projektet beställdes 100 liter Hasopor skumglas från Folkes Bygg AB. Vid en okulär besiktning kunde konstateras att materialet var mycket poröst. Det kunde även konstateras att materialet hade en väldigt låg densitet. Materialet har en densitet på 180 kg/m^3 (Bilaga 2) vilket märktes då det hade märkbart låg vikt. En del av partiklarna verkade ha sugit åt sig vatten vilket syntes då de vägde mer och var mörkare i färgen.

På Peab Asphalt laboratorium fanns övriga material tillgängliga, enligt nedan.

- Stenmjöl högbytorp 0/8
- Makadam Harbo 8/11
- Cement CEM II/A-V 52,5 N BASCEMENT
- Kalk LIMUS 40
- Vatten
- Flyttillsatsmedel MASTERGLENIUM SKY 823

Utrustning enligt nedan fanns även att tillgå på laboratoriet.

- Betongformar för gjutning, volym 3,375 liter, 28 st
- Blandare
- Tryckpress
- Klimatrum

Detta utöver diverse laboratorieutrustning såsom vagnar, mindre verktyg, blanketter mm.

3.2 Betongtillverkning

Tillverkning av provkroppar gjordes enligt SS-EN 12390-2:2009 (SIS 2009). 28 st formar torkades av från överskottsvatten och annat, exempelvis rester från tidigare blandningar, som kan störa provningen. Betongformarnas insida fettades rikligt med smörjfett och formarnas ytor kontrollerades så att de var fria från partiklar från tidigare gjutningar. Därefter vägdes alla ingående komponenter upp enligt recept A och B, tabell 2 och 3. Nedan följer en kortfattad redovisning av de båda recept som används vid tillverkningen av betongen.

Tabell 2. Recept för blandning A, avser 13 kuber á 3,5 l samt 25 l för sättmått och eventuellt spill

Beståndsdel	Volym (l)	Vikt (kg)	Volymandel (%)	Viktandel (%)
0/8 Högbytorp, Stenmjöl	25,3	67	36	42
8/11 Harbo, makadam	13,6	36	19	22,5*
Cement CEM II/A-V 52,5 N BASCEMENT	9,3	28	13	17,5
Kalk LIMUS 40	4,9	13,3	7	8
Kallvatten	15,1	15,1	22	9,5
Flyttillsatsmedel MASTER-GLENIUM SKY 823	0,35	0,42	0,5	0,26
Totalt	70	159,72	-	-

Tabell 3. Recept för blandning B, avser 13 kuber á 3,5 l samt 25 l för sättmått och ev. spill.

Beståndsdel	Volym (l)	Vikt (kg)	Volymandel (%)	Viktandel (%)
0/8 Högbytorp, Stenmjöl	25,3	67	36	53
Hasopor Skumglas 8/16	13,6	2,5	19	2*
Cement CEM II/A-V 52,5 N BASCEMENT	9,3	28	13	22
Kalk LIMUS 40	4,9	13,3	7	10,5
Kallvatten	15,1	15,1	22	12
Flyttillsatsmedel MASTER-GLENIUM SKY 823	0,35	0,42	0,5	0,33
Totalt	70	126,32	-	-

*Observera: trots konstant volymandel syns en märkbar skillnad i viktandel.

Skumglaset levererades med en kornfraktion som varierade mellan ca 10 och 60 mm. Då det är kornfraktionen 8/11 som är intressant för substitution måste skumglaset siktas i mindre kornstorlekar. Ett flertal metoder för att krossa ner materialet till mindre storlekar och ta fram kornfraktionen 8/11 diskuterades, exempelvis att placera materialet i torr betongblandare eller asfaltsblandare. Bedömningen gjordes dock att dessa metoder medför för stor risk att endast mala ner materialet till stoft då en mindre sådan effekt kunde observeras vid endast siktning i maskin.

Därmed togs beslutet att materialet skall sönderdelas för hand, vilket gjordes med hjälp av hammare. Det var svårt att konsekvent få rätt kornstorlek på skumglaset då materialet på grund av sina fysiska egenskaper tenderar att sönderdelas i mindre storlekar än önskat. Materialet började i vissa fall mer likna 0/8 än 8/11 (se figur 5) och för att kunna framställa en konsekvent kornkurva togs beslutet att ändra fraktionsstorleken till 8/16 istället för den optimala storleken 8/11, vilket inte borde påverka den färdiga betongens egenskaper nämnvärt, utan göra detta försök mer rimligt att reproducera. Därefter följde siktning av materialet för att uppnå en tillfredsställande kornkurva.



Figur 5. Skumglas i olika kornfraktioner under krossning för hand. Notera stoftet av skumglas som uppstått vid krossning.

De torra ingredienserna blandades i 10 sekunder och därefter tillsattes vatten och cement i betongblandaren som tillsammans blandades under 3 minuter. Formarna fylldes med betong och täcktes med plastfolie för att undvika uttorkning i klimatrumsrummet (+20 °C, 55 % RF), där de sedan placerades. Dagen därpå avformades provkropparna från formerna och kuberna plastades in. De ställdes återigen i klimatrumsrummet i väntan på tryckprovning.

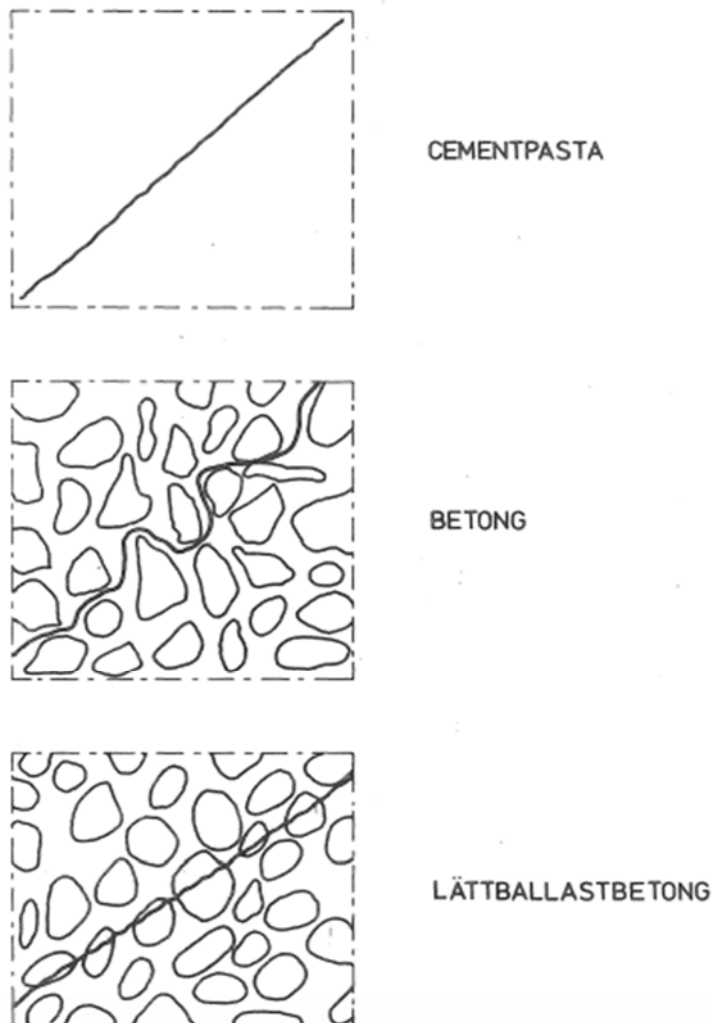
3.3 Tryckhållfasthetsprovning

Provning av tryckhållfasthet hos betongkuber görs enligt SS EN 12390-3:2009 (SIS 2009). För att få ett statistiskt trovärdigt resultat innefattar provningen enligt standard 3 kuber per trycktillfälle och betongtyp. För att få en uppfattning över betongens tryckhållfasthet över tid tryckprovas provkropparna efter 7 dygn, 14 dygn, 21 samt 28 dygn. Utöver detta har en extra provkropp per betongtyp gjutits för provning efter 106 dygn för att ge en bild av hur betongen beter sig över längre tid.

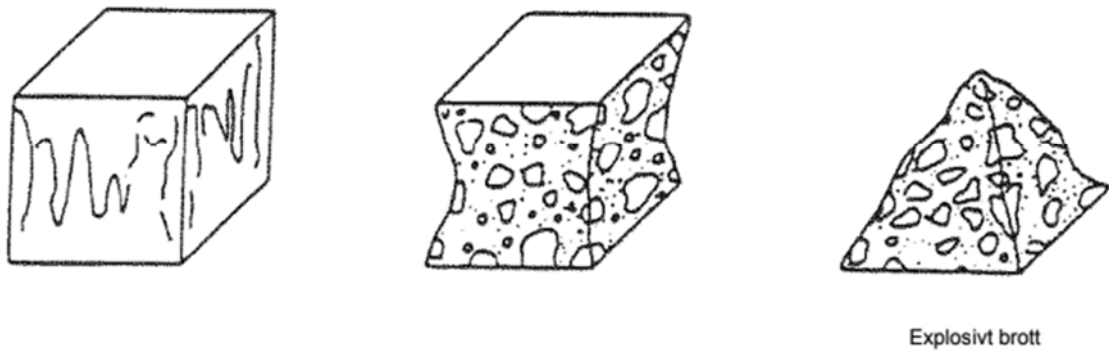
Provkropparna kontrollerades med hänsyn till vinkelräthet och planhet med hjälp av vinkelhake samt bladmått. Planheten hos en provkropp kontrolleras genom att en skiva placeras på olika punkter på kubens yta och bladmättet förs emellan betongen och skivan. Betongkuben är då plan om bladmättet ej kan passera. Kalibrerad våg och skjutmått användes för att notera vikt samt dimensioner hos provkropparna. Provkroppen placerades på tryckpressen och maskinen startades. Tryckpressen påförde då en förinställd last som ökade successivt tills kuben gav efter och denna maxlast noterades då i kN för varje provkropp. Efter detta skedde en okulär besiktning av varje skadad provkropp. Brottmönstret bedömdes vara tillfredsställande eller icke tillfredsställande. Ett exempel på ett otillfredsställande

brottmönster i sprickorna hos en provkropp är den då dragsprickor tydligt kan urskiljas. För en illustration av tillfredsställande respektive otillfredsställande brottbilder, se figur 7 och 8.

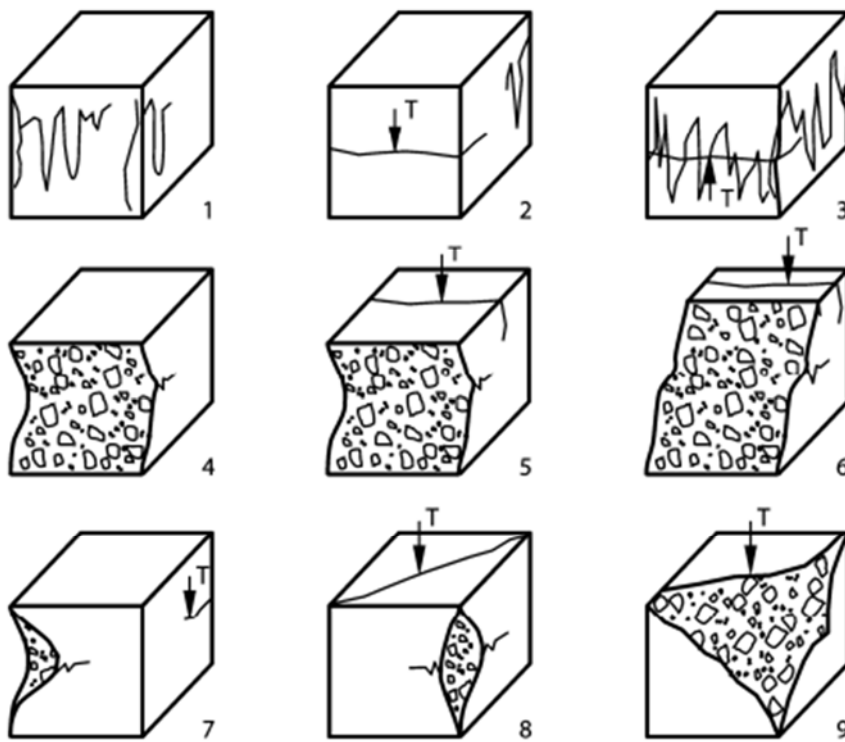
Brottenergi är den energi som krävs för att en deformation i form av ett brott ska kunna föregås. Hos betong kan brottsprickan tvingas ta omvägar kring ballastkornen vilket ökar brottenergin i materialet. Om ballastkornen är svaga kommer sprickan att kunna gå genom ballasten vilket ger en mindre sprickyta. Se figur 6. (Hilleborg, 1977) Detta vill säga att brottbilden beror på förhållandet mellan hållfastheten i ballasten och betongen.



Figur 6. Sprickutbredning i cementpasta, betong och lättballastbetong. I betong tar sprickan en omväg runt ballasten som är starkare än cementpastan och den ballast som förekommer i lättballastbetong



Figur 7. Några tillfredsställande brottmönster hos betongkuber, SS-EN 12390-3:2009, SIS 2009



T = dragspricka.

Figur 8. Några icke tillfredsställande brottmönster på betongkuber, SS-EN 12390-3:2009, SIS 2009

3.4 Värmekonduktivetsprovning

För mätning av värmekonduktiviteten eller värmeledningsförmågan hos materialet användes en HotDisk. Processen för användandet av detta instrument innebär att det ovanpå provkroppen, i detta fall en itusågad betongkub, placeras en sensor med ett isolerande material ovanpå, till vilket användes en kub av cellplast. Maskinen gör sen en mätning vilket tar cirka 3 timmar. Maskinen mäter då hur väl värme transporteras genom materialet. Efter varje mätning flyttas sensorn några centimeter och mätningen görs om 3 gånger för att ett mer tillförlitligt resultat ska erhållas. Efter varje mätning fås ett diagram samt tabell över ett antal intressanta värden, inklusive värmekonduktiviteten vilket är det värde denna rapport kommer behandla.

4. Resultat och analys

4.1 Den färska betongens egenskaper

Under blandningens gång kunde egenskaper hos massan för de 2 olika typerna av betong jämföras med varandra innan den härdat. I princip identiska utbredningsmått för de olika materialen noterades. Utbredningsmålet hos stenbetongen uppmättes till 79 cm medan motsvarande utbredningsmått hos skumglasbetongen mättes till 82,5 cm, se figur 9 och figur 10.



Figur 9. Utbredningsmått hos skumglasbetong, mätt till 82,5 cm i diameter.



Figur 10. Utbredningsmått hos stenbetong, mätt till 79 cm i diameter.

Den färska betongens konsistens påverkas inte nämnvärt då 35% av vanlig ballast ersätts med skumglas.

Däremot visade sig skumglasballastens låga densitet utgöra ett visst problem då denna visade en tendens att till viss del flyta till ytan snarare än att fördela sig jämnt i massan under blandningen. Exempel på detta ses i figur 10 och 11 där mängden och storleken på ballasten skiljer sig stort mellan de två typerna av betong. Innan detta upptäckts hade ett antal former hunnit fyllas med materialet, varefter tekniken justerades för att kompensera för detta. Med djupa skoptag i blandaren förbättrades förhållandet mellan ballast och cement+vatten i formerna.

Man kan generellt säga att skumglasbetongen upplevdes svår att arbeta med. Den var svår att blanda och hantera på grund av separationen som berodde på skumglasets låga densitet. På grund av detta förväntades ojämn kvalitet hos provkropparna vid tryckning.

4.2 Provkropparnas egenskaper

Resultatet av blandningen blev 28 stycken betongkuber à 3,375 l. Efter att dessa avlägsnats från sina formar inspekterades de och flera intressanta anmärkningar kunde göras angående skillnader mellan sten- och skumglaskuber. Överytan hos skumglaskuberna var märkbart “stenigare”, med synliga ballastkorn på ytan, se figur 11. Detta ledde till misstankar om att delar av skumglaset möjligtvis flutit upp till ytan under gjutningen och därmed orsakat en ojämn fördelning av ballast i provkropparna. För att få ett svar på om så var fallet sågades en skumglaskub itu efter tryckprovningen. Hypotesen visade sig stämma till viss del, se figur 11. En separation av typen stenseparation kan tydligt ses, dock inte av den vanligt observerade typen som innebär att ballastkornen sjunker till botten av formen utan snarare att dessa skumglaskorn, då de har en lägre densitet än resterande ballast, flutit till ytan i viss utsträckning.



Figur 11. Tvärsnitt av en trycktestad kub av typen skumglasbetong. Tydlig avsaknad av stenballast i övre skiktet kan observeras

Då en total utvärdering av alla kuber i detta avseende inte är möjlig att utföra kan ingen slutsats dras kring huruvida detta gäller alla kuber. Den tidigare noterade “stenigheten” hos kubens yta kan dock inte uppfattas som generell då flera skumglaskuber hade en märkbart slätare yta. Därmed behöver det inte vara så att denna separation återfinns hos samtliga provkroppar.

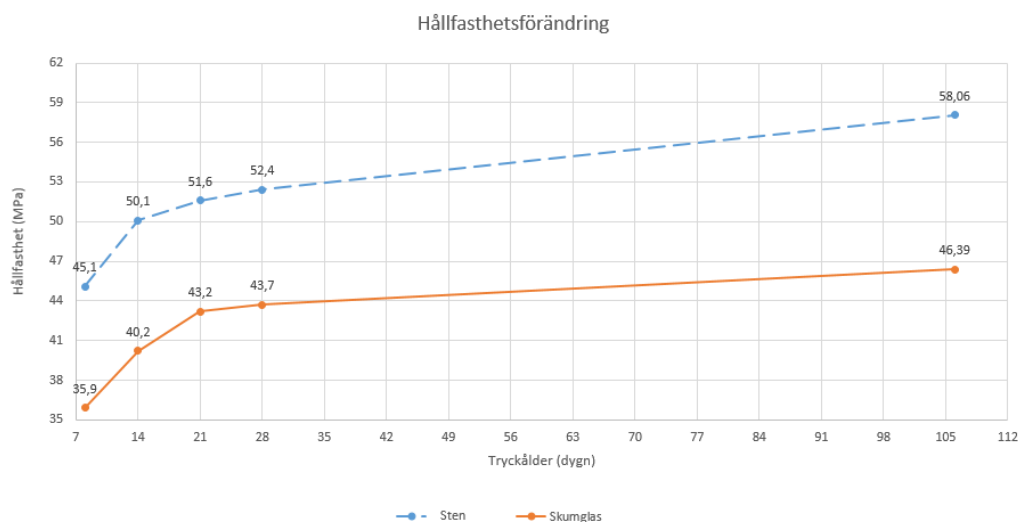
Skumglasbetongen hade en genomsnittsvikt på 7237.4 g per kub vilket kan jämföras med genomsnittsvikten hos stenbetongen som låg på 7925.9 g per kub. Samtliga kuber hade en vinkelavvikelse på <0,5 mm samt en planavvikelse på <0,06 % av bredden vilket visar på att kubernas form var konsekvent med förväntningarna.

4.3 Tryckhållfasthet

4.3.1 Tryckprovning

Inför tryckhållfasthetsprovningen delades provkropparna upp för att få en spridning i kvaliteten på de kuber som provas varje tillfälle. Varje tillfälle skulle 3 provkroppar provtryckas per betongtyp. Skumglaskuberna delades upp så att två stycken med "bättre utseende" dvs de som gav ett intryck av att vara homogena, tryckprovades tillsammans med en kub som såg mer stenig ut och därmed bedömdes ha ökad risk att vara mer heterogen. För den sista tryckprovningen valdes de kuber ut som såg allra bäst och mest homogena ut.

Resultatet av tryckhållfasthetsprovningarna blev en serie värden på brottlasten i kN som uppmätts vid provning av varje kub, se figur 12. Med hjälp av mått och vikt sammanställdes även en densitet för varje provkropp. Efter omräkning av dessa värden erhöles även ett hållfasthetsvärde i MPa för varje enskilt prov, vilka kan jämföras mellan olika de olika betongtyperna vid samma ålder för att fastställa ett samband mellan ballasttypen som använts och hållfastheten. Resultatet för tryckprovningarna presenteras i figur 12 nedan, se bilaga 1.



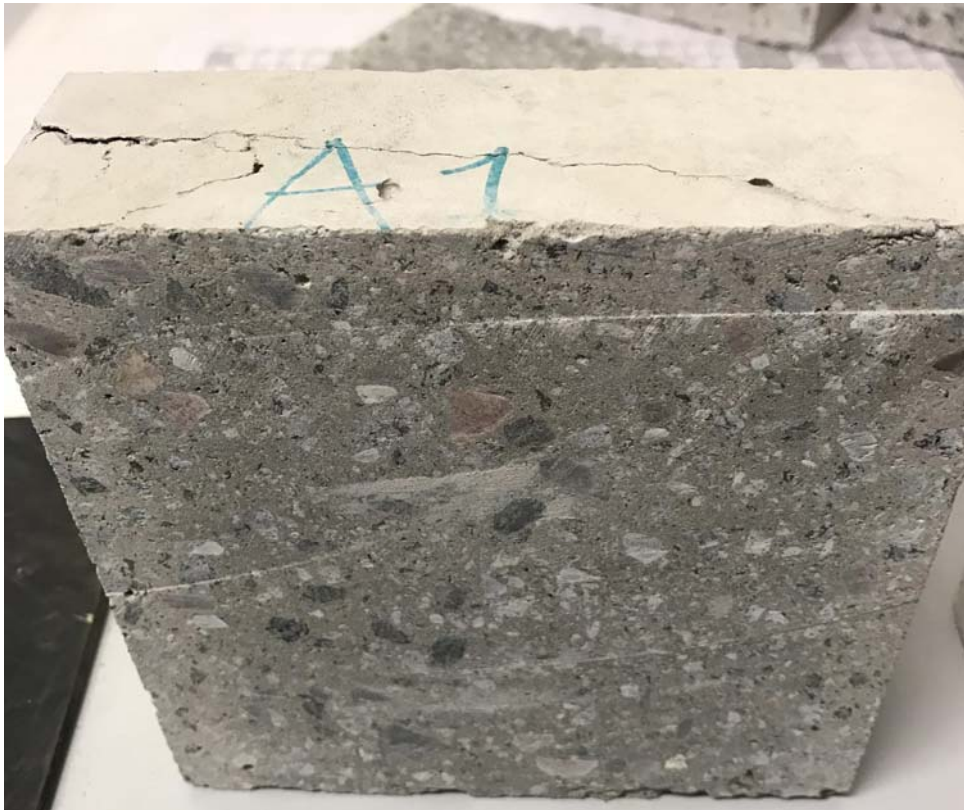
Figur 12. Den genomsnittliga hållfastheten (MPa) vid olika ålder för båda materialen.

Figur 12 visar att hållfastheten mellan de olika betongkuberna skiljer sig med ca 8-11 MPa. Dessutom visar det sig att lutningen på kurvan för stenbetong är högre, vilket innebär att hållfasthetstillväxten hos stenbetongen är större än hos skumglasbetongen. Detta kan visa sig vara intressant på längre sikt.

På grund av att första trycktillfället blev på en helgdag (1 maj) sköts detta upp till den 2 maj vilket ledde till att provkropparna som tryckprovats vid första tillfället blev testade efter 8 dygn istället för 7.

De brottbilder som kunde observeras efter tryckning av varje kub upplevdes generellt som tillfredsställande i förhållande till vad som förväntats och vad standard uppger. Det fanns

dock en kub som uppvisade dragsprickor, se figur 13. Anledningen till detta och vad det innebär är oklart. En möjlig förklaring är betongens heterogenitet (som också syns i figuren).



Figur 13. Horisontell dragspricka på en provtryckt betongkub utan tillsatt skumglas

4.3.2 Modell

Enligt modellen som beskrivits kan den förväntade hållfastheten hos materialet beräknas enligt ekvation 1. De värden som används som förutsättningar för modellens riktighet ses i tabell 4.

Tabell 4. Hållfasthet hos några material. Medelvärden från tabell 6.1 har använts för stenballast (granit) (Burström 2001, s 123). Hållfasthetsvärdet för skumglas är hämtat från Pittsburgh Corning USA (Hämtad 18-06-01). Hållfasthetsvärdet för betong är från tryckprovningen av de äldsta kuberna, dvs efter 106 dagar

Material	Hållfasthet (MPa)
Skumglas	0,8
Stenballast	185
Betong	58,06

Skumglasbetongens hållfasthet räknas ut med hjälp av ekv 1:

$$\sigma_{skumglasbetong} = 0,19 * 0,8 + 0,81 * 58,06 = 47,2 \text{ MPa}$$

Följande beräkning görs för alla mätningstillfällen för att kunna sammanställa ett resultat på om hållfasthetsmodellen lämpar sig för beskrivning av det material som framställts och i så fall om det gäller för de åldrar som provats.

Tabell 5. Hållfasthetsvärden med standardavvikelse (MPa) hos stenbetong och skumglasbetong över tid enligt utförd tryckprovning samt hållfasthetsvärde med standardavvikelse för skumglasbetong över tid enligt modell. Ingen standardavvikelse beräknades för prov efter 106 dygn pga att endast 2 provkroppar tryckprovats.

	8 dygn	σ 8 dygn	14 dygn	σ 14 dygn	21 dygn	σ 21 dygn	28 dygn	σ 28 dygn	106 dygn
Stenbetong	45,1	0,64	50,1	0,34	51,6	0,69	52,4	1,18	58,1
Skumglasbetong	35,9	3,79	40,2	2,17	43,2	1,4	43,7	1,80	46,4
Modell skumglasbetong	36,7	-	40,7	-	41,9	-	42,6	-	47,2

Standardavvikelsen σ (MPa) är beräknad enligt ekv 4:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x-m)^2}{n}} \quad (\text{ekv 4})$$

Där

x = ett enskilt observationsvärde

m = medelvärdet

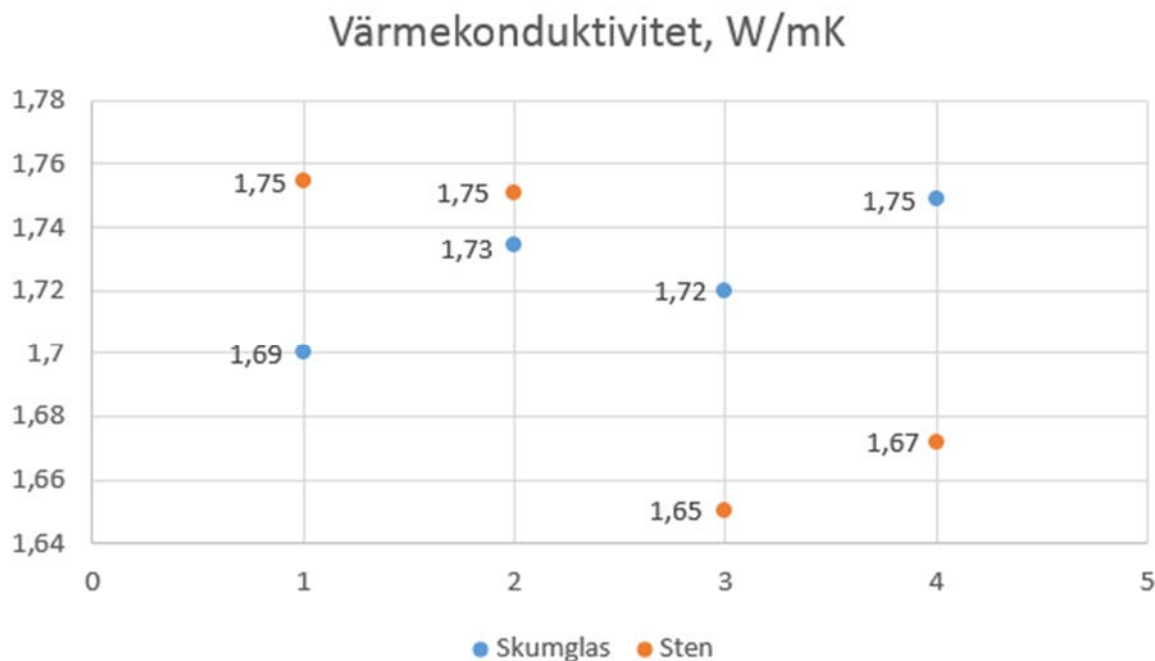
n = antalet utförda prover

Tabell 5 visar att modellen kan beskriva hållfastheten hos skumglasbetong. Som tabellen visar ger hållfasthetsmodellen snarlika värden som de uppmätta hållfastheterna över tid och har en maximal avvikelse från teoretiskt värde på 1,3 MPa. En intressant observation är det faktum att standardavvikelsen hos de uppmätta tryckhållfastheterna är större hos skumglasbetongen.

4.4 Värmekonduktivitet

4.4.1 Värmekonduktivetsprovning

Resultatet av värmekonduktivetsprovningarna var en serie värden i W/mK som beskriver värmeledningsförmågan hos materialen. Dessa värden presenteras i figur 14 nedan. Se bilaga 3 för rådata.



Figur 14. Uppmätt värmekonduktivitet i W/mK för varje prov av respektive betongtyp. Varje punkt är medelvärdet av 3 mätningar på samma provkropp

Figur 14 visar en skillnad med varierande storlek och riktning mellan materialen, det vill säga i vissa fall visar skumglasbetongen på högre värmekonduktivitet än stenbetongen och ibland tvärtom. Mellan prov 1 och 2 är värmekonduktiviteten större hos stenbetongen än för skumglasbetongen medan det motsatta är sant för prov 3 och 4. Om ett medelvärde för materialen ska tas fram kan stenbetongen sägas ha en genomsnittlig värmekonduktivitet på 1,71 och skumglasbetongens genomsnittliga värmekonduktivitet hamnar då på 1,73. Enligt mätningarna har alltså skumglasbetongen en i snitt högre värmekonduktivitet vilket innebär att den leder värme bättre, om än med mycket liten marginal, vilket får anses förvånande då ballasten bytts ut mot sämre ledande material.

4.4.2 Modell

Modellen för värmekonduktivitet används på följande sätt:

λ för skumglasbetongen räknas ut med hjälp av ekv 1:

$$\lambda_{skumglasbetong} = 0,19 * 0,129 + 0,81 * 1,707 = 1,41 \text{ W/mK}$$

Där n = 1.

Detta resultat skiljer sig från det uppmätta värdet på 1,73 med 0,32 W/mK, eller 18,5%. Teoretiskt sett ska alltså skumglasbetongen ha en lägre värmekonduktivitet än stenbetongen men enligt resultaten är så inte fallet. Detta kan till exempel bero på separation i betongen, att skumglasets porer eventuellt fyllts med vatten eller betong eller att skumglasleverantörens angivna λ – värde eventuellt inte gäller då skumglaset används som ballast i betong.

5. Slutsats och diskussion

5.1 Hur skiljer sig betongens hållfasthet och värmekonduktivitet vid användning av skumglas som ballast i jämförelse med traditionell stenballast?

5.1.1 Hållfasthet

Hållfastheten i den traditionella betongen var betydligt högre än i skumglasbetongen. Den största bidragande faktorn är naturligtvis skumglasets lägre hållfasthet. En annan anledning till detta skulle tänkas vara att skumglasbetongkuberna inte var lika homogena och att det därför uppstod en instabilitet i de övre ballastpartiklarna i kuberna.

Hållfasthetstillväxten i de olika betongerna skiljde sig också åt. Stenbetongens hållfasthet ökade mer från 28 dagars ålder till 106 dagars ålder än skumglasbetongens hållfasthet gjorde. Detta visar att skumglasbetongen härdar mindre än stenbetong över tid vilket kan bero på att skumglasets påverkar hydratationen. Detta kan eventuellt ha betydelse vid konstruktion.

Hållfasthetsmodellen visar sig stämma bra överens med mätningarna. Detta innebär att den betong som framställts kunnat beskrivas med hjälp av en modell för att kunna förutsäga vilken hållfasthet den kommer att få. Detta kan vara till fördel vid vidare forskning om detta ämne då det finns ett konkret sätt att beskriva materialets egenskaper sett ur hållfasthetsperspektiv.

5.1.2 Värmekonduktivitet

Värmekonduktiviteten hos skumglasbetongen var 0,32 W/mK högre. Anledningen till detta resultat är svår att bedöma med stor säkerhet. En möjlighet är att skumglasets porer fyllts med betong eller vatten och att dessa hjälper till att leda värme genom materialet. En annan teori är att skumglaspartiklarna sönderdelats till för små kornstorlekar under blandningen av betongen. En tredje möjlighet är att heterogeniteten och den typ av materialskikt som uppstått i materialet har lett till resultatet.

Dessutom kan det vara lämpligt att diskutera hur skumglasleverantörerna bestämt skumglasets värmekonduktivitet. Har det haft någon inverkan på λ att materialet har behövts sönderdelas för att få rätt kornfraktion? Har materialets porositet lett till att betong trängt in i porerna och därmed lett värme bättre än det borde? Dessa frågor går inte att besvara i detta skede men är intressanta att beakta och viktiga att ha i åtanke vid vidare forskning.

5.2 Gör dessa egenskaper hos materialet att det har potential att vara ett alternativ vid användning av betong som byggnadsmaterial?

Den lägre hållfastheten hos skumglasbetongen gör att materialet eventuellt inte lämpar sig då hållfastheten är avgörande, men i de fall då lägre vikt prioriteras högre kan det eventuellt finnas användningsområden för skumglasbetong. En skillnad på 25% i hållfasthet mellan betong som enbart innehåller sten och betong där den traditionella stenballasten ersatts med skumglas är absolut något som gör att skumglasbetongen kräver mer eftertanke vid dimensionering och projektering än motsvarande “vanlig” betong, men det finns flera tillämpningar där hållfastheten inte är avgörande som till exempel platta på mark.

Det faktum att värmekonduktiviteten inte skiljer så mycket mellan materialen kan antas bero på exempelvis att den producerade betongen varit heterogen till följd av problemen som stötts på under tillverkningen. Skumglasballastens låga densitet gjorde den svårarbetad. En annan möjlig bidragande orsak är att större kornfraktioner användes för skumglasballasten då materialet hade en tendens att pulveriseras. Dessutom byttes inte all ballast ut till skumglas vilket gör att betongen kan tänkas ha en värmekonduktivitet som är mer lik stenbetongens än exempelvis lättballastbetong. Att värmekonduktiviteten hos materialet inte är så lågt som förväntat kan tyda på att materialet inte verkar leva upp till de miljömässiga förväntningar som fanns, men det krävs vidare studier för att dra en slutsats kring detta. Däremot har skumglaset fortfarande högre återvinningsgrad än sten och är dessutom en resurs som kommer vara mer lättillgängligt i framtiden än till exempel naturgrus.

Ett antal användningsområden för materialet skumglas kan övervägas. Kantelement, som är en slags gjutform med isolerande förmåga vars primära syfte därmed inte är att ta någon primär last, kan eventuellt vara ett möjligt sådant. Kantelementets funktion kräver heller inte ett estetiskt tilltalande utseende på samma sätt som exempelvis en betongvägg. Att kuberna som gjöts blev ojämna behöver därmed inte diskvalificera materialet från användning inom detta.

6. Vidare forskning

Att använda denna studies resultat som en utgångspunkt för vidare studier är något som skulle kunna vara av värde i framtiden då betong är ett av världens mest använda byggnadsmaterial. Detta skulle leda till ett mer hållbart sätt att tillverka byggnadsmaterialet vilket är viktigt för byggnadsbranschen. För att basera sådan betongtillverkning på denna studie krävs också resultat från mer långsiktigt provande för att observera hur denna betong ter sig över tid.

Dessutom krävs undersökningar av i vilken del av byggnaden som denna betong bäst lämpar sig samt om den betongen då uppfyller de krav som ställs på exempelvis ljud och isoleringsförmåga.

Något annat som skulle kunna utvecklas utifrån denna studie är huruvida skumglas lämpar sig vid tillverkning av betong. Är det ekonomiskt möjligt att använda skumglas istället för ballast? Är tillgången på skumglas tillräckligt stor och om inte- kan man på något sätt tillgodose den svenska betongindustrin med mer skumglas, exempelvis genom import från utlandet? En annan intressant aspekt är om olika glasrester ger upphov till olika egenskaper hos skumglaset och om leverantörerna kan tänka sig leverera det skumglaset med de mest fördelaktiga egenskaper.

En annan faktor är produktionen av materialet. Skumglas som ballast upplevdes som svårarbetat och andra produktionsmetoder kan krävas för att möjliggöra storskalig produktion och användning av denna betong. De egenskaper som materialet uppvisade vid blandning med cement+vatten gör att skumglasbetongen kan behöva exempelvis tillsatsmedel (flytmedel) för att förbättra förmågan att blanda sig jämnt i massan den ska blandas med.

Det kan även vara intressant att utforska möjligheterna för skumglasbetong med förstärkning, exempelvis armeringsnät. Dessutom är det mycket fördelaktigt om skumglaset kan tillverkas i den storlek som önskas vid betongtillverkning.

Referenser

- Aronsson, Ulf. (2006) Beräkning av byggnaders energiprestanda med anledning av energideklarationerna. Examensarbete.
- Burström, P. G. (2001) Byggnadsmaterial: uppbyggnad, tillverkning och egenskaper (2: a uppl.). Studentlitteratur AB.
- Cementa FOU. Så här tillverkas cement. (Hämtad 181216)
<https://www.cementa.se/sv/tillverkning-av-cement>
- Eriksson, L., Hägglund, J. Statens Geotekniska Institut. (SGI) (2008) Handbok Skumglas i mark- och vägbyggnad. <http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i18-1.pdf>
- Hasopor. Projektera med Skumglas. <http://www.hasopor.se/produkter/projektera-med-skumglas/> (Hämtad 181216)
- Hilleborg, A. Lunds Tekniska Högskola. (1977) Materialbrott
- Jernkontorets Energihandbok. (Hämtad 181216).
<http://www.energihandbok.se/varmeoverforing/>
- Jernkontorets Energihandbok. (Hämtad 18-11-17).
<http://www.energihandbok.se/konstanter/varmeledningsformaga-och-u-varden-for-olika-material>
- Lidberg, F. (2011). Utprovning av nytt betong-proportioneringsprogram anpassat för krossballast. Lund Tekniska Högskola avd Byggnadsmaterial
- Ljungkrantz, C., & Möller, G. och Petersons, N.(1994). Betonghandbok, Arbetsutförande: projektering och byggande, 2, s 200-208.
- Länsstyrelsen, 9. Grundvatten av god kvalitet (Hämtad 181216)
<http://www.lansstyrelsen.se/orebro/SiteCollectionDocuments/Sv/miljo-och-klimat/miljomal/9Grundvattenavgodkvalitet.pdf>
- Mark, R., & Hutchinson, P. (1986). On the structure of the Roman Pantheon. The Art Bulletin, 68(1), 24-34.
- Méar, F., Yot, P., & Ribes, M. (2006). Effects of temperature, reaction time and reducing agent content on the synthesis of macroporous foam glasses from waste funnel glasses. Materials Letters, 60(7), 929-934.
- Méar, F., Yot, P., Viennois, R., & Ribes, M. (2007). Mechanical behaviour and thermal and electrical properties of foam glass. Ceramics international, 33(4), 543-550.

Papayianni, I., Tsohos, G., Oikonomou, N., & Mavria, P. (2005). Influence of superplasticizer type and mix design parameters on the performance of them in concrete mixtures. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 217-222.

Paroc (2007) Grundläggning - Varma konstruktioner. Produktblad.

Pittsburgh Corning USA Foamglas Insulation Systems. Hämtad 2018-06-01.

Statens Institutionsstyrelse SIS (2009) SVENSK STANDARD SS EN 12390-3:2009
Provning av hårdnad betong – Del 3: Tryckhållfasthet hos provkroppar.

Statens Institutionsstyrelse SIS (2009) SVENSK STANDARD SS-EN 12390-2:2009
Provning av hårdnad betong – Del 2: Tillverkning och härdning av provkroppar för hållfasthetsbestämning

Stockholmsregionens Avfallsråd (2007) Glas
<http://www.atervinningscentralen.se/web/page.aspx?refid=82>

Svensk Betong. (Hämtad 2018-12-16). Betongkvalite och exponeringsklass

<https://www.svenskbetong.se/bygga-med-betong/bygga-med-platsgjutet/statik/flerbostadshus/bjalklag/betongkvalitet-och-exponeringsklass>

Svensson, Conny. (2012) Kompendium i teknisk geologi AK. KFS i Lund AB

Sveriges Geologiska Undersökning. (SGU) (2011) Ersättningsmaterial för naturgrus – kunskapssammanställning och rekommendationer för användningen av naturgrus.
<http://www.lansstyrelsen.se/uppsala/SiteCollectionDocuments/Sv/miljo-och-klimat/verksamheter-med-miljopaverkan/tillstandsprovning/sgu-rapport-2011-10-ersattning-naturgrus.pdf>

Vägverket (2007) Alternativa material i väg- och järnvägsbyggnad. ISSN: 1401-9612

Öberg, M. Cementa FOU (1998) Livscykelanalys betongelement.
https://www.strangbetong.se/wp-content/uploads/2011/10/Livscykelanalys_betongelement.pdf