

Avdelningen för Konstruktionsteknik

Lunds Tekniska Högskola
Box 118
221 00 LUND

Division of Structural Engineering

Faculty of Engineering, LTH
P.O. Box 118
S-221 00 LUND
Sweden

Betong till 3D-printning – egenskaper i färskt och hårdnat tillstånd

Concrete for 3D-printing - properties in fresh and hardened state

August Hamelius & Mikael Ehrensvärd Backebjörk

2015

Rapport TVBK-5247

ISSN: 0349-4969

ISRN: LUTVDG/TVBK-15/5247(89)

Examensarbete

Handledare: Oskar Larsson

Juni 2015

Förord

Denna rapport är utförd som examensarbete på civilingenjörsutbildningen Väg - och vattenbyggnad vid Lunds Tekniska Högskola. Examensarbetet har genomförts under vårterminen 2015 vid institutionen för Bygg- och Miljöteknologi, Avdelningen för Konstruktionsteknik samt avdelningen för Byggnadsmaterial.

Vi vill tacka Eva Frühwald Hansson för den hjälp vi fått med att knyta kontakter som varit nödvändiga för att starta upp projektet samt för det arbete hon lagt ner som examinator. Vi vill även tacka Oskar Larsson vid avdelningen för Konstruktionsteknik och Peter Johansson vid avdelningen för Byggnadsmaterial som har handlett examensarbetet. Till sist vill vi rikta ett stort tack till följande personer för all hjälp med våra laborationer:

Pentti Koski, CEMENTA AB

Niklas Johansson, CEMENTA AB

Bengt Nilsson, Avdelningen för Byggnadsmaterial, LTH

Per- Olof Rosenkvist, Avdelningen för Konstruktionsteknik, LTH

August och Mikael, våren 2015

Sammanfattning

- Titel:** Betong till 3D-printning – egenskaper i färskt och hårdnat tillstånd
- Författare:** August Hamelius
Mikael Ehrensvärd Backebjörk
- Examinator:** Eva Frühwald Hansson, Avdelningen för Konstruktionsteknik, LTH
- Handledare:** Oskar Larsson, Avdelningen för Konstruktionsteknik, LTH
Peter Johansson, Avdelningen för Byggnadsmaterial, LTH
- Problemformulering:** Byggprocessen är idag långsam, kostsam och genererar stora mängder spill och utsläpp. För att kunna möta bostadsbehovet från den snabbt växande befolkningens mängden måste tekniken utvecklas, den måste bli snabbare och mer kostnadseffektiv. Med ny teknik där betongelement tillverkas genom automatiserad och datorstyrd 3D-printning kan eventuellt hela betongbyggnadsprocessen effektiviseras.
- 3D-printning med betong är en lager på lager baserad tillverkningsteknik som följer ett förprogrammerat mönster. Betongen extruderas (matas ut) ur ett munstrycke som är monterat på en robot. Massan trycks, skruvas eller pumpas ut ur munstycket och den måste vara självbärande för att kunna byggas lager på lager. Tillverkningstekniken och en självbärande massa ställer höga krav på betongen i färskt tillstånd. En god balans mellan byggbarhet och arbetbarhet måste fastställas för att betongmassan skall kunna vara användbar. För att kunna dimensionera och bygga element eller hela byggnader med 3D-teknik måste tryckhållfasthet, draghållfasthet och elasticitetsmodul för betongen vara tillräckliga.
- Syfte:** Rapporten avser att bidra till en effektivisering av byggnadsbranschen med hjälp av 3D-printad betong. Målen med detta arbete är att:
- Införskaffa kunskap om 3D-printad betong
 - Jämföra 3D-tillverkning av betong med konventionell betong och sprutbetong
 - Utredda betongens egenskaper i färskt tillstånd
 - Undersöka vilka härdade egenskaper som kan förväntas av 3D-betong
- Metod:** En litteraturstudie gjordes för att utreda de krav som ställs på betong till 3D-printning. Tekniken och betongmassan som används jämfördes med konventionellt gjuten betong och sprutbetong för att erhålla kunskap om betongens beståndsdelar och materialegenskaper.

Laborationsundersökningar utfördes för att redogöra hur materialegenskaper hos betongen förändras vid tillsats av olika tillsatsmedel och tillsatsmaterial, både i färskt och hårdnat tillstånd

Slutsatser:

Studien visade att betongsammansättningen inte bara beror på de konstruktioner som ska byggas utan även på utformningen av robotens munstycke. Ett recept som fungerar med alla typer av munstycken går därför inte att fastställa.

Konsistensen för denna betong kan inte vara för styv, då går den inte att extrudera, och den får inte vara för lös, då uppnås inte rimlig byggbarhet. Rimlig byggbarhet innebär att de undre lagren inte deformeras märkvärdigt av tyngden från de övre lagren. Med munstycket och betongen som använts uppnås god balans, mellan arbetbarhet och byggbarhet, om betongen i färskt tillstånd har en skjuvhållfasthet (konsistens) mellan 0,6-1,0 kPa. För att uppnå god konsistens innehåller recepten bland annat mycket retarder och höga halter av cement. Konsistensen visade sig vara mycket känslig för små variationer i vattenhalt, detta gör att olika typer av blandare/blandningsmetoder också påverkar konsistensen. En styv konsistens gjorde det möjligt att bygga jämna lager. Den tidiga strukturutvecklingen hos betongmassan resulterade i att ett flertal lager kunde byggas ovanpå varandra utan märkbar deformation av de undre lagren.

Receptet som tagits fram ger en betong med hållfastheter i samma storleksordning som högpresterande betong. Inblandningen av plastfiber har inte gett någon verifierbar ökning av betongens hållfasthet, varken efter 1 dygn eller 28 dygn. Den höga tryckhållfastheten är en effekt av det låga vattenbindemedelstal som krävs för att få en extruderbar och byggbar konsistens.

Nyckelord:

Betong till 3D-printning, 3D-printad betong, betong, additiv tillverkning, friformframställning, högpresterande betong

Abstract

- Title:** Concrete for 3D-printing - properties in fresh and hardened state
- Authors:** August Hamelius
Mikael Ehrensvärd Backebjörk
- Examiner:** Eva Frühwald Hansson, Division of Structural Engineering, LTH
- Supervisors:** Oskar Larsson, Division of Structural Engineering, LTH
Peter Johansson, Division of Building Materials, LTH
- Question formulation:** The construction process today is slow, costly and generates large amounts of waste and emissions. In order to meet housing needs of the rapidly growing population in a sustainable way, the technology must evolve; it must be faster and more cost-effective. New technology, where concrete is manufactured by automated and computer-controlled 3D-printing, can possibly streamline the entire concrete building process.
- 3D-printing with concrete is a layer on layer based manufacturing process that follows a pre-programmed pattern. The concrete is extruded (ejected) from a nozzle mounted on a robot. The concrete is pressed, screwed or pumped out of the nozzle, and it must be self-supporting in order to build layer by layer. The manufacturing technology and the need for a self-supporting mass create high demands on the fresh concrete. Good balance between buildability and workability has to be established for the concrete mass to be useful. When designing and building elements or entire structures with 3D technology strength values of the concrete such as compressive strength, tensile strength and modulus of elasticity has to be evaluated.
- Purpose:** The report helps to streamline the construction industry using 3D-printed concrete. The objectives of this work are to:
- Acquire knowledge of 3D printed concrete
 - Comparing production of 3D-concrete with conventional concrete and shotcrete
 - Investigate the properties of the concrete in the fresh state
 - Examine the hardened characteristics that can be expected of 3D-concrete
- Method:** A literature study was made to investigate the demands on the concrete. The technology and the used concrete mass were compared to conventional cast concrete and shotcrete to obtain knowledge of the concrete components and material properties.
- Laboratory investigations were conducted to explain how material properties of concrete changes with the addition of different additives, both in fresh and hardened state

Conclusions:

The study showed that the concrete composition depends not only on the structures to be built, but also on the design of the robot's nozzle. A recipe that works with all types of nozzles is therefore impossible to determine.

The consistency of the concrete cannot be too rigid, then it cannot be extruded, and it should not be too loose, then it does not achieve reasonable buildability. Reasonable buildability means that the lower layers are not noticeably deformed by the weight of the upper layers. With the nozzle and the concrete used a good balance, between workability and buildability, is achieved if the concrete in the fresh state has shear strength (consistency) between 0.6-1.0 kPa. To achieve good texture the recipes include retarder and very high levels of cement.

The consistency proved to be very sensitive to small variations in water content; this allows different types of mixers/mixing methods to also affect the consistency. Stiff texture of the concrete made it possible to build even layers. An early developed stiffness of the concrete mass resulted in that a number of layers could be constructed on top of one another without notable deformation of the lower layers.

The recipe developed provides a concrete strength in the same order of magnitude as high performance concrete. The involvement of plastic fiber has not given any verifiable increase in concrete strength, neither for 1 day or 28 days. The high compressive strength is a result of the low water/binder ratio required to obtain an extrudable and buildable consistency.

Keywords:

Concrete for 3D-printing, 3D-printed concrete, concrete, additive manufacturing, freeform construction, Contour Crafting, high performance concrete

Innehållsförteckning

Förord	I
Sammanfattning	II
Abstract	IV
1 Inledning.....	11
1.1 Bakgrund	11
1.2 Syfte.....	11
1.3 Metod.....	11
1.4 Avgränsningar	11
2 Litteraturstudie	13
2.1 3D-Betong	13
2.1.1 Teknikens utveckling	13
2.1.2 Referensrecept.....	14
2.1.3 Möjligheter	14
2.2 Sprutbetong.....	15
2.2.1 Metod och användningsområde	15
2.2.2 Innehåll.....	15
2.3 Betongens beståndsdelar.....	16
2.3.1 Vatten	16
2.3.2 Cement	16
2.3.3 Ballast.....	17
2.3.4 Tillsatsmedel	17
2.3.5 Tillsatsmaterial	18
2.3.6 Armering	19
2.4 Materialegenskaper.....	20
2.4.1 Konsistens	20
2.4.2 Arbetbarhet.....	20
2.4.3 Byggbarhet	20
2.4.4 Draghållfasthet	21
2.4.5 Tryckhållfasthet.....	21
2.4.6 Elasticitetsmodul	22
2.4.7 Krympning	23
2.4.8 Värmeutveckling	24
2.4.9 Lufthalt	25
3 Laboratorieundersökningar	26

3.1	Recept	26
3.1.1	Vatten	26
3.1.2	Cement	26
3.1.3	Ballast	26
3.1.4	Flygaska	27
3.1.5	Silikastoft	27
3.1.6	Retarder	27
3.1.7	Flytmedel	27
3.1.8	Plastfibrer	27
3.2	Blandningsmetod	28
3.3	Färsk betong	28
3.3.1	Konsistens	28
3.3.2	Arbetbarhet	29
3.3.3	Byggbarhet	30
3.3.4	Värmeutveckling	30
3.3.5	Lufthalt	31
3.3.6	Densitet	31
3.4	Tillverkning av provkroppar och lagring	32
3.5	Hårdnad betong	33
3.5.1	Böjdraghållfasthet	33
3.5.2	Tryckhållfasthet	34
3.5.3	Elasticitetsmodul	35
3.5.4	Krympning	36
3.6	Extrudering med robot	37
4	Resultat och diskussion	40
4.1	Recept	40
4.2	Färsk betong	41
4.2.1	Konsistens	41
4.2.2	Arbetbarhet	42
4.2.3	Byggbarhet	43
4.2.4	Värmeutveckling	44
4.2.5	Lufthalt och densitet	45
4.3	Hårdnad betong	45
4.3.1	Böjdraghållfasthet	45
4.3.2	Tryckhållfasthet	46

4.3.3	Elasticitetsmodul	47
4.3.4	Krympning	48
4.4	Extrudering med robot.....	49
5	Slutsatser	54
5.1	Förslag till vidare studier	54
6	Litteraturförteckning	56
	Bilaga I - Spännings – töjningssamband	58
	Bilaga II – Bascement	60
	Bilaga III – Microsilica Grade 940-U	62
	Bilaga IV – SikaTard-932	64
	Bilaga V – Sikament Evo 26	65
	Bilaga VI – Crackstop	66
	Bilaga VII – Recept.....	67
	Bilaga VIII – Relativ luftfuktighet	87

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Dagens betongbyggnadsteknik är gammal och beprövad, den fungerar. Tillverkningsprocessen är dock kostsam och kräver mycket arbetskraft i jämförelse med andra industriproduktioner. Betongbranschen står även för en stor del av de arbetsrelaterade skadorna i Sverige. Arbetsmiljöverket rapporterade år 2010 att var femte betongarbetare upplever besvär på grund av krävande arbetsställning (Statistiska centralbyrån, 2010).

Utveckling inom maskinteknik och automation har bidragit till att robotsystem idag utför flera komplicerade och fysiskt krävande arbetsuppgifter. Robottekniken har möjliggjort tillverkning av många olika produkter, som tidigare inte var möjligt. Systemens kapacitet och noggrannhet är under ständig utveckling vilket har bidragit till utvecklingen av 3D-printning. 3D-tekniken har revolutionerat tillverkningen inom många olika områden och idag tillverkas allt från musikinstrument till medicinska proteser, framförallt med plast.

Med ny teknik där betongelement tillverkas genom automatiserad och datorstyrd 3D-printning kan eventuellt hela betongbyggnadsprocessen effektiviseras. I dagsläget pågår forskning på olika platser i världen som utreder möjligheterna med 3D-printad betong. Kunskap om materialets egenskaper och verifikation av teknikens fördelar ger förutsättningar till att utveckla tekniken och effektivisera hela betongbyggnadsprocessen. Förhoppningen är att i framtiden kunna tillverka hela byggnader med denna teknik, både billigare och effektivare än i dagsläget.

1.2 Syfte

Rapporten avser att bidra till en effektivisering av byggnadsbranschen med hjälp av 3D-printad betong. Målen med detta arbete är att:

- Införskaffa kunskap om 3D-printad betong
- Jämföra 3D-tillverkning av betong med konventionell betong och sprutbetong
- Utredda betongens egenskaper i färskt tillstånd
- Undersöka vilka härdade egenskaper som kan förväntas av 3D-betong

1.3 Metod

Med hjälp av en litteraturstudie sammanställs nödvändigt underlag för utredning av de krav som ställs på 3D-betongen. Litteraturstudien innehåller information om just 3D-betongen men även information om sprutbetong, konventionell betong samt betongens beståndsdelar och materialegenskaper. Kraven studeras med hjälp av laborationsundersökningar av betongen i färskt och hårdnat tillstånd. Resultaten sammanfattas och diskuteras.

1.4 Avgränsningar

- Eftersom tekniken är under utveckling har inga kostnadskalkyler sammanställts
- Hur mycket effektivare tillverkning som tekniken medför har inte utretts
- Inga etiska överväganden har gjorts
- Endast solida provkroppar testas och därför undersöks inte hur hållfastheten påverkas när betongen extruderas i lager på lager

2 Litteraturstudie

Tillverkning av betongelement med 3D-teknik kräver styv betongmassa som är formbar och självbärande. Arbetbarheten av betongmassan är starkt beroende av konsistensen. Kunskap om de ingående materialen i betong, deras egenskaper och effekterna av olika tillsatsmedel är därför viktig. Litteraturstudien har gjorts för att få djupare insikt om materialen som bygger upp betong samt betongens egenskaper i färskt och hårdnat tillstånd. Litteraturstudien har sedan använts för att ta fram olika betongrecept som kan användas vid gjutning med 3D-teknik.

I litteraturstudien beskrivs först den utveckling och forskning som pågår inom 3D-betong just nu. Därefter görs en jämförelse med konventionell betong och sprutbetong för att kartlägga skillnader mellan tillverkningsmetoderna och till sist beskrivs materialen som används vid tillverkning av betong samt deras egenskaper.

2.1 3D-Betong

3D-printning, även kallat friformsframställning, bygger på additiv tillverkning som har funnits de senaste två decennierna inom exempelvis bil - och flygplansindustrin. Metoden tillämpas även inom tillverkning av medicinsk utrustning (Lim, et al., 2011). Det är först nyligen som betongelement har börjat tillverkas med 3D-printningstekniken. Tillverkningen är baserad på att betongen extruderas lager på lager för att bilda hela element. Med metoden går det att tillverka geometriskt komplexa former utan gjutformar, vilket ger denna teknik stora fördelar mot konventionella tillverkningsmetoder. Betongelementen designas som volymetriska objekt i ett 3D-modelleringsprogram, modellen skivas sedan upp i tvådimensionella lager och därefter exporteras informationen till printern, lager för lager, för att sedan printas. På detta sätt är det enkelt att ändra utseende eller form på elementen som byggs även ute på arbetsplatsen utan att gjutformar behöver tillverkas (Le, et al., 2012).

Printern kan byggas på olika sätt men i grund och botten är det samma teknik. Den byggs upp av en stålram eller ställning med en robotarm som kan förflytta sig i tre dimensioner och minst ett munstycke är monterat på roboten. Betongen extruderas i ett förutbestämt mönster genom att pumpas, skruvas eller tryckas ut ur munstycket (Le, et al., 2012).

Konventionell tillverkning av betongvaror och betongelement görs vanligtvis i fabriksanläggningar eller ute i fält, till exempel när elementen är stora och inte går att transportera från fabriken. Oberoende av var de tillverkas måste gjutformar för alla olika dimensioner och former byggas. Oarmerade betongvaror har förhållandevis små dimensioner, t.ex. beläggningsplattor och rör. Tillverkning kan därför göras i långa serier vilket gör att produktionen kan anordnas rationellt med hög grad av mekanisering och automatik. Balkar, pelare, väggar, trappor eller liknande större armerade betongelement efterfrågas däremot ofta i varierande storlek och med tvärsnittsmått som inte är standardiserade. Elementen ska passa in i byggnader med varierande utseende och användning och därför har dessa en begränsad mekaniserad och automatiserad tillverkning (Bernander, 1982).

2.1.1 Teknikens utveckling

Just nu pågår forskning runt om i världen som utreder möjligheterna med att 3D-printa betong. Nyhetsbyrån ArchDaily (Stott, 2015) rapporterar, den 26:e januari 2015, att det kinesiska byggföretaget WinSun Decoration Design Engineering Company från Shanghai har lyckats 3D-printa ett sex våningar högt hyreshus samt en villa. Företaget ska tidigare ha byggt tio hus med en sammanlagd yta på 200 kvadratmeter på bara 24 timmar. Massan som används ska enligt företaget bestå av spillmaterial från byggarbetsplatser och innehåller bland annat betong,

glasfiber och sand samt någon typ av snabbhärdande medel. Företaget påstår att de kan spara ca 30-60 % material och minska byggtiden med ca 50-70 %, jämfört med traditionella metoder. Metoden ska också minska behovet av arbetskraft med ca 50-80 %, vilket förväntas sänka kostnaderna och minska risken för arbetsplatskador.

Vid University of Southern California utvecklas en teknik som kallas Contour Crafting. Printern består i detta fall av en robotarm med flera munstycken monterade på en travers. Anledningen till att det finns flera munstycken är för att maskinen skall kunna bygga en yttre struktur på var sida om elementen och samtidigt fylla de inre delarna. Detta möjliggör extrudering av varierande material vid samma tidpunkt. Jämfört med konventionella byggmetoder uppskattas tekniken kunna reducera byggkostnaderna avsevärt (Khoshnevis, 2004).

- Finansieringskostnaden av byggprojekt uppskattas minska med 20-25 %
- Materialkostnaden kan minska med 25-30 % på grund av minskat spill
- Reducerat behov av arbetskraft minskar lönekostnader med 45-55 %

Förhoppningen är att kunna tillverka permanenta bostäder i krisdrabbade områden på kort varsel. Med en utveckling av CC-tekniken uppskattas byggtiden för ett hus till endast 1 dygn (Khoshnevis, 2004).

Vid Loughborough University i England har en printer byggts och testats med gips och cementpasta för att undersöka vilka praktiska egenskaper som krävs av maskinen och betongen. Undersökningen inkluderade pumphastighet, form på munstycket, material- och maskinegenskaper (Lim, et al., 2011). Studien visade att extruderbarheten (extrudability) och byggbarheten (buildability) var de mest kritiska egenskaperna för färsk betong. Extruderbarheten definieras av den mängd betong som passerar genom munstycket på roboten. Den är beroende av betongens arbetbarhet, konsistens, vattenbindemedelstal (vbt) och öppethållandetid (Le, et al., 2012).

2.1.2 Referensrecept

Forskningen på Loughborough University har resulterat i en betongsammansättning som går att använda till 3D-printning. De har publicerat ett recept som är optimerat efter deras robot. Betongen har ett 3:2 sand/bindemedel förhållande där bindemedlet består av 70 % cement, 20 % flygaska, 10 % silikastoft samt 1,2 kg/m³ polypropylenfiber. Blandningen har ett vattencementtal (vct) på 0,26 samt en inblandning av 1 % superplasticerare och 0,5 % retarder, baserat på vikt av bindemedlet. Blandningen printades ur ett cirkulärt munstycke, med diameter 9 mm, vilket resulterade i en 61 lager hög struktur utan märkbar deformation av de understa lagren. Storleken på munstycket begränsade ballaststorleken till maximalt 2 mm. Öppethållandetiden för blandningen sträckte sig upp till 100 minuter. Provning av betongen efter 28 dygn gav en tryckhållfasthet på 110 MPa (Le, et al., 2012).

2.1.3 Möjligheter

En automatiserad process i form av 3D-printad betong möjliggör tillverkning av komplexa strukturer utan gjutformar, vilket skapar designfrihet. Tillverkningsprocessen gör att kostnaden per element blir konstant, den beror endast på materialåtgång, till skillnad från konventionell betong som bl.a. beror på utseende och form. Några potentiella fördelar med denna teknik jämfört med konventionell teknik är: (1) möjligheten att forma håligheter för serviceledningar och mekanik för att på så vis optimera materialåtgången och behovet av arbetskraft; (2) bättre kontroll på placeringen av byggnadsmaterialet kan bidra till bättre ytfinish på både insida och

utsida; (3) genom att skapa integrerade enheter minskar behovet av detaljerade ritningar och därmed sannolikheten för kostsamma ändringsarbeten; (4) kopplingen mellan lagerbaserad konstruktion och en pålitlig tillverkningsteknik gör att inga gjutformar krävs samt större designfrihet (Le, et al., 2012).

2.2 Sprutbetong

Metoden att 3D-printa betong kan i många avseenden liknas vid en teknik som används vid reparation av betongkonstruktioner och bergförstärkningsarbeten. Betongen matas ut ur ett munstycke i hög hastighet, varav namnet sprutbetong. Både 3D-printning och sprutbetong ställer krav på pumpbarhet och byggbarhet av betongen i färskt tillstånd.

Användningen av sprutbetong startade i USA redan i början av 1900-talet. Tekniken kom till Sverige runt 1930-talet och användes till bergförstärkning och reparationer av betongkonstruktioner. Användandet av sprutbetong kan antingen göras med torrmetoden eller med våtmetoden. Torrstrutning används främst vid reparation av betongkonstruktioner då denna teknik är flexibel och kräver förhållandevis enkel utrustning. Våtsprutning använd i huvudsak vid större reparationsarbeten som kräver mer volym (Nordström & Holmgren, 2009).

2.2.1 Metod och användningsområde

Torrmetoden har fått sitt namn genom att det torra materialet trycks fram med luft till munstycket innan vattnet tillsätts där. Till skillnad från 3D-betong tekniken blandas betongen till torrmetoden på väg ut ur munstycket och när det träffar ytan som ska repareras. För att minimera damm används en viss mängd vatten till att förfukta det torra bruket, detta vatten ska tas med i bedömning, men det finns inget specifikt vattencementtal som ska användas. Vid sprutning ska ytan vara lätt blänkande och ha gummiliknande egenskaper. Förutom damning ger denna metod upphov till en hel del spill. Runt 10-50 % spill kan förekomma beroende på sprutriktningen och runt 50-80 % fiberspill kan uppkomma om stålfiber används (Nordström & Holmgren, 2009).

I våtmetoden blandas betongen först för att sedan pumpas, skruvas eller blåses med tryckluft fram till munstycket. För att minska spillet tillsätts en accelerator i munstycket så att betongens vidhäftning mot underlaget förbättras. Andelen spill är för denna metod betydligt mindre, runt 5-20% och för betong med fiberinblandning runt 10-40 % (Nordström & Holmgren, 2009).

Det finns många fördelar med att använda sprutbetong jämfört med konventionell betong. Tekniken kräver väldigt lite formarbete, utrustningen som används är enkel och delmaterialen är väl beprövade. Fördelarna gör att metoderna går att tillämpa på många områden, men inte alla. Sprutbetong är till exempel inte lämplig att använda vid tunna reparationer (<20 mm) eftersom de stora ballastkornen studsar bort vilket gör att krympningen ökar och risken för krympsprickor blir större. Vid konstruktioner som har armering med grova dimensioner och litet mellanrum eller som är armerad i flera lager är det svårt att få en jämnt fördelad massa bakom stängerna. Det är inte heller lämpligt att använda sprutbetong där det finns risk för fuktrinängning som kan leda till frostsprängning (Nordström & Holmgren, 2009).

2.2.2 Innehåll

Materialen som används för att blanda sprutbetong är i grund och botten samma som för tillverkning av konventionella betongkonstruktioner: cement, ballast, vatten, tillsatsmaterial (flygaska och silikastoft) och tillsatsmedel (accelerator och flytmedel). Tillsatsmedlen och tillsatsmaterialen används för att förbättra massans pumpbarhet och sammanhållning.

Ballastsammansättningen bestäms utifrån största möjliga kornstorlek med hänsyn till krympning, slangdiameter och skiktjocklek samt avstånd mellan armering och underliggande betong. Hur stora volymandelar av respektive material som ska användas beror på vilka egenskaper som önskas på den färskta och hårdnade betongen. De tumregler som finns säger att ett förhållande mellan cement och ballast bör ligga på 1:3. Blandningens vct beror på hållfastheten som efterfrågas och den exponering som betongen kommer utsättas för. Vid användning av torrmetoden bestäms vattenmängden som behövs även av vidhäftningen på ytan och av hur mycket damm som bildas. Utförs detta korrekt hamnar vattencementtalet för torrmetoden per automatik runt 0,38–0,45. Våtmetoden bör ha ett vct i samma storleksordning eller lite högre (Nordström & Holmgren, 2009).

Sprutbetongens färskta egenskaper kan förbättras genom användning av tillsatsmaterialen silikastoft och flygaska. Doseringen av tillsatsmaterial beror på blandningens önskade konsistens. För t.ex. silikastoft är 5 % av cementvikten ett vanligt referensvärde. Tillsatsmedel i form av acceleratorer och luftporbildare används också. En addering av acceleratorer i munstycket förbättrar möjligheten att bygga tjockare påslag vid ett och samma tillfälle. Användandet av luftporbildare är inte vanligt då en stor del av luften försvinner vid betongens anslag mot underlaget (Nordström & Holmgren, 2009). Utförligare beskrivning av tillsatsmaterialen och tillsatsmedlen finns under avsnitt 2.3.4 och 2.3.5.

2.3 Betongens beståndsdelar

Ett betongrecept består oftast av vatten, cement, sand, sten och olika tillsatsmedel. Vanligtvis blandas en volymandel vatten, en del cement, två delar sand och tre delar sten. Tillsatsmedel tillsätts för att påverka betongens olika egenskaper, bl.a. betongens konsistens och härdningstid (Nationalencyklopedin, u.d.).

2.3.1 Vatten

Vattnet som används skall vara rent. En tumregel är att vattnet skall vara så rent att det är drickbart. Om vattnet innehåller mycket humus riskeras en kraftig retardation av betongens hydratisering. För hög kloridhalt i vattnet gör att en ojämn härdning av betongen kan äga rum och armeringen riskerar att korrodera snabbare (Nordström & Holmgren, 2009).

Förhållandet mellan andelen vatten och cement kallas "vattencementtal" och förkortas vct. Generellt ökar betongens hållfasthet med lägre andel vatten, dock blir betongen "trög" och svårare att bearbeta. Vattencementtalet måste därför anpassas till de krav som ställs på betongen (Nordström & Holmgren, 2009).

$$vct = \frac{\text{mängd vatten}}{\text{mängd cement}} \quad (\text{Ekv. 1})$$

Förhållandet mellan vatten, cement och tillsatsmaterial kallas "vattenbindemedelstal" och förkortas vbt.

$$vbt = \frac{\text{mängd vatten}}{\text{mängd cement} + \text{mängd tillsatsmaterial}} \quad (\text{Ekv. 2})$$

2.3.2 Cement

I Sverige klassificeras cement enligt standarden SS-EN 197-1 i olika typer. Hyvudtyperna är:

CEM I	Portlandcement
CEM II	Portland-kompositcement
CEM III	Slaggcement

Den vanligaste typen av cement i Sverige benämns Standard Portlandcement eller s.k. "anläggningscement" och klassificeras som CEM I. Den består av rent portlandcement och har en långsam värmeutveckling, den härdar långsamt, och är därför lämplig att användas i medelgrova och grova konstruktioner. Portland-kompositcement, CEM II, består av minst 65 % portlandklinker men kan även innehålla granulerad masugnsslagg, silikastoft, flygaska och kalksten. Av miljöskäl har s.k. "byggcement" blivit allt vanligare. Byggcement klassificeras som CEM II då det innehåller kalkstensfiller. Cement av kvalitet CEM III innehåller 20-65 % portlandklinker och resten masugnsslagg (Burström, 2009).

Bascement benämns enligt standard SS EN 197-1 som ett Portlandflygaskecement av klass CEM II. Vanligtvis komponeras bascement av minst 80 % klinker samt cirka 16 % flygaska och 4 % kalksten (Cementa AB, 2014).

2.3.3 Ballast

Bergmaterial som är avsedda att användas vid betongtillverkning kallas ballast. Ballasten benämns också olika beroende på kornstorleken, sten (> 4 mm), fingrus (≤ 8 mm), sand (≤ 4 mm), eller filler ($\leq 0,125$ mm). För att minska cementåtgången bör kornstorleken väljas så stor som möjligt. Den maximala kornstorleken bör vanligtvis inte överstiga $\frac{1}{4}$ av konstruktionens minsta tvärsnittsmått (Burström, 2009).

2.3.4 Tillsatsmedel

Tillsatsmedel används för att få specifika egenskaper hos betongen både i det färska och i det hårdnade tillståndet. Idag finns det mängder av olika tillsatsmedel och effekterna av tillsatsmedlen beskrivs av tillverkaren. Tillsatsmedel kan även ge andra effekter på betongblandningen som kanske inte är önskade, därför är det bra att testa dessa innan de används i produktion. Tillsatsmedel klassificeras generellt efter effekten som de har på betongblandningen. (Burström, 2009). Det är viktigt att dessa fördelas ut jämt i betongen och blandas med fördel ut i tillsatsvattnet (Neville & Brooks, 1990). Nedan beskrivs de vanligaste typerna av tillsatsmedel.

Accelerator

Acceleratorer påskyndar tillstyvnaden samt hållfasthetstillväxten hos betongen. Vanligast är kalciumklorid som huvudsakligen påskyndar den tidiga hållfastheten hos betongen genom att öka värmeutvecklingen under de första timmarna efter blandning. För att bäst uppnå önskad effekt beräknas acceleratorvolymen till 1-2 % av cementmassan. Vid tillsats av kalciumklorid förbättras även betongens motstånd mot erosion och frätskador. Önskade effekter av kalciumklorid är bland annat ökad krympning och krypning hos betongen. Det har förekommit fall där detta tillsatsmedel har orsakat korrosion på armerade konstruktioner, detta beror troligtvis på en ojämn fördelning av kalciumjoner i betongen. På grund av risken för korrosionsskador finns det restriktioner för användandet av kalciumklorid i armerade konstruktioner, denna typ av acceleratorer används därför primärt inomhus. För att undvika korrosionsrisken går det att använda snabbhärdande betong eller tillsatsmedel som inte innehåller klorider (Neville & Brooks, 1990).

Retarder

Vid användning av retarder fördröjs tillstyvnaden och tiden för hållfasthetsutvecklingen förskjuts. Vid jämförelse med betong utan tillsatsmedel minskar den tidiga hållfastheten vid användandet av retarder men istället ökar hållfasthetstillväxten i ett senare skede vilket gör att

hållfastheten hos betongen efter lång tid i stort blir densamma. Retarder används med fördel i samband med långa transporter eller vid gjutning i höga temperaturer. Användning av retarder ökar den plastiska krympningen eftersom det plastiska stadiet vid härdningen förlängs. Krympningen i härdat tillstånd förblir densamma som för vanlig betong utan retarder (Neville & Brooks, 1990).

Flyttillsatsmedel

Den vanligaste typen av tillsatsmedel som används är flyttillsatsmedel. Huvuduppgiften är att påverka betongens konsistens. Genom att flytmedlet absorberas av cementpartiklarna får dessa en negativ laddning och stöter bort varandra, samtidigt binder cementpartiklarna till sig en hinna av vatten. Tillsammans gör det att de fria partiklarna har större möjlighet att röra sig i det fria vattnet som finns kvar. Inblandning av flyttillsatsmedel gör att betongens vattenhalt kan reduceras med 5-15 % utan att ha betydande påverkan på konsistens och arbetbarhet (Neville & Brooks, 1990).

Den minskade vattenhalten i betongen resulterar i ökad hållfasthet, reducerad krympning och separation. Flyttillsatsmedel används med fördel vid gjutningar där det är svårt att bearbeta betongen och vid kraftigt armerade konstruktioner (Burström, 2009).

2.3.5 Tillsatsmaterial

Silikastoft, granulerad masugnsslagg och flygaska är vanliga tillsatsmaterial i betong. I Sverige används i huvudsak silikastoft. I det recept som tagits fram av Loughborough University (se avsnitt 2.1.2) användes flygaska och silikastoft, därför beskrivs dessa nedan.

Flygaska

Flygaska består till största delen av aluminiumsilikatglas och är en restprodukt vid kolpulvereldning i kraftverk och värmeverk. Produktens reaktivitet kan relateras till glashalten som oftast är mellan 60-90 %. Den kemiska sammansättningen för restprodukten kan dock ha stor variation (Burström, 2009).

Inblandning av flygaska har inverkan på betongen både i färskt tillstånd och när betongen har härdat. I färskt tillstånd gör tillsatsen av flygaska att arbetsbarheten, stabiliteten och pumpbarheten förbättras. Samma konsistens kan uppnås med mindre mängd vatten vilket även minskar vattenseparationen. När cement innehåller flygaska reduceras effekten av de övriga tillsatsmedel som blandas in i betongen förutom retarderande tillsatsmedel. Flygaska fördröjer betongens tillstyvnande och effekten av retarder tilltar redan vid små inblandningsmängder. När delar av cementshalten ersatts med flygaska minskar värmeutvecklingen, däremot blir inte risken för temperatursprickor mindre eftersom draghållasthetens utveckling blir långsammare (Johansson, et al., 1994).

Effekten som flygaska har på hård betong beror på ett flertal faktorer. Precisa effekter som gäller generellt går inte att fastställa, utan måste redas ut för det enskilda fallet. Effekten av flygaskan beror på karaktären hos cementet; reaktivitet och finhet hos flygaskan; temperaturen och åldern på betongen samt mängden flygaska som används (Johansson, et al., 1994).

Silikastoft

Vid tillverkning av legeringsämnen till stål erhålls en restprodukt i pulverform som kallas silikastoft och består av amorf (glasig) kiseldioxid. De små silikakornen är endast en hundradel så stora som cementkorn och har sfärisk form. Silikastoft är ett puzzolant material som är starkt reaktivt och bidrar till att förbättra betongens stabilitet och sammanhållning i färskt tillstånd. I

praktiken måste vattenreducerande tillsatsmedel eller flytmedel användas då vattenbehovet ökar vid användning av silikastoft (Burström, 2009). Det finkorniga materialet gör även att betongen blir tätare och får ökad beständighet (Nordström & Holmgren, 2009).

2.3.6 Armering

I regel måste betong armeras, vanligtvis med stål, för att ta upp de dragkrafter som förväntas påverka konstruktionen. Oarmerad betong är endast lämpligt att använda i tryckta konstruktioner, t.ex. enkla valvkonstruktioner, eftersom betong har låg draghållfasthet i jämförelse med tryckhållfasthet (Olnhausen, 1994).

Armeringsjärn

De vanligaste typerna av armering är armeringsstänger, stänger valsade i ringform, armeringsnät och armeringsenheter tillverkade av stänger och nät. Armeringen utformas olika beroende på önskade egenskaper. Det ställs krav på armeringens hållfasthetsegenskaper, dimension, förankringsegenskaper, svetsbarhet och bockbarhet (Tepfers & Törnwall, 1994).

Armeringens placering beror på vilken konstruktion som skall gjutas och de krav som ställs på konstruktionen. Den placeras i rätt läge före gjutningen med hjälp av distansklossar av antingen betong, plast eller keramiskt material. För att uppnå en fullgod konstruktion skall armeringen täckas med ett lager av betong. Lagrets tjocklek anges som en funktion av stångdiametern och vilken exponeringsklass (eller grad av korrosion) som förväntas påverka konstruktionen (Hjort & Munke, 1982).

Fiberarmering

Ett flertal olika material används för att fiberarmera cementbaserade material. De vanligaste materialen är stål, polymer, glas och cellulosa, i vissa fall används också keramiska fibrer och kolfiber (Skarendahl, 1994). Fibrernas uppgift är att förbättra tøjbarheten, draghållfastheten och minska sprickbildningen i betongen (Burström, 2009).

Stål- och plastfiber tillverkas vanligtvis 25-60 mm långa och 0,5-1 mm i diameter. För att klara kraven som ställs på residualbärförmågan används vanligen fiberarmering av stål. Stålfiber minskar sprickvidderna av de sprickor som uppkommer vid krympning, både när betongen är färsk och hårdnad. Plastfiber bidrar till att minska plastiska krympsprickor (Nordström & Holmgren, 2009).

I fiberarmerade element samverkar den oarmerade betongen och fibrerna på samma sätt som i fiberkompositer. Det sammansatta materialets egenskaper påverkas av mängden, styvheten och orienteringen hos fibrerna. Brottstadierna för böjbelastning av fiberarmerade konstruktioner liknar de brottstadier som uppkommer för konventionellt gjutna betongkonstruktioner. Det första stadiet sträcker sig från belastningens start tills uppsprickning av betongen sker. Det andra stadiet beskriver vad som händer efter att betongen har spruckit (Skarendahl, 1994).

Vid brott blir första steget att betongen spricker eftersom den är mindre tøjbar än fibermaterialet. Det är först efter den elastiska deformationen (vid uppsprickning) som fibrerna börjar verka och dominera deformationsegenskaperna. För fiberbetong med låg andel fibervolym följs den elastiska deformationen av ett uppsprickningsstadium med minskande spänning. Används större andel fibrer följs den elastiska deformationen först av ett stadie med tilltagande spänning innan spänningen börjar avta (Skarendahl, 1994).

Idag används fiberarmering inom ett fåtal områden. Vanligast är att stålfiber används i golv och beläggningar för att minska sprickbildning och öka hållfastheten. Den ökade töjbarheten gör också att fogavstånden kan minskas. Tekniken med fiberarmerad sprutbetong har länge använts vid bergförstärkning och släntstabilisering. Stål- och plastfibrer används även ofta vid tunna reparationer som kräver höga materialegenskaper. Fibrerna skapar en bättre sammanhållning i massan som då blir lättare att applicera och den ökade segheten bidrar till minskad sprickbildning vid härdning (Skarendahl, 1994).

Viktigt att tänka på vid inblandning av fibrer i betong är att konsistensen på cementblandningen påverkar mängden fibrer som kan användas. För stor andel fibrer i blandningen bidrar till bollbildning vilket innebär att fibrerna samlas i bollar istället för att fördela sig i betongen. Fibernmängden påverkar även konsistensen på betongblandningen och hög fiberinblandning kan ge trögflytande betong (Skarendahl, 1994).

2.4 Materialegenskaper

Olika materialegenskaper för betong har studerats och egenskaper som är betydande för 3D-betong sammanfattas i detta kapitel. Det ställs olika krav på konventionell betong och 3D-printad betong vilket har beaktats när egenskaperna har sammanfattats. Skillnaden är störst för betongens färska egenskaper, där det framförallt ställs andra eller högre krav på 3D-printad betong.

2.4.1 Konsistens

Konsistens definieras som möjligheten för vätskor och suspensioner att flöda och kan beskrivas vetenskapligt i reologiska termer. Detta gäller för cementpasta men inte för betong. Betongens konsistens beror inte på rena reologiska värden utan även på andra faktorer, t.ex. maximal kornstorlek. Konsistens för cementpasta bestäms ofta med penetrationstester (Bartos, 1992). Konsistensen för färsk betong bestäms ofta med en Sättkon. För betong med styvare konsistens används en Vebe-mätare och för mycket lättflytande konsistenser används ett fallbord (Burström, 2009).

2.4.2 Arbetbarhet

Med arbetbarhet menas betongens egenskap att fylla ut gjutformar; omsluta armeringsjärn; hur lätt den består homogen under transport och gjutning. Arbetbarheten påverkas av många faktorer men framförallt av betongens vattenhalt, cementhalt, ballastgradering, ballastens finmaterialhalt, kornform, tillsatsmedel och tillsatsmaterial (Burström, 2009). Arbetbarheten är svår att bestämma eftersom den också beror på flera subjektiva parametrar som inte kan mätas, t.ex. skicklighet och erfarenhet hos operatören samt de verktyg som används. För att beskriva arbetbarheten bör därför en subjektiv bedömning (oftast en okulär besiktning) av den färska betongen kombineras med tester (Bartos, 1992).

2.4.3 Byggbarhet

Vanligtvis formgjuts betong och den betraktas som en fluid (färskt tillstånd). Det ställs då inga krav på att betongen skall vara "självbärande", dock är sprutbetong ett undantag. Vid användning av sprutbetong ställs krav på betongens byggbarhet i horisontalled men det är inte passande för 3D-betong. I brist på andra metoder definieras byggbarheten för 3D-betong som det antal lager av färsk betong vilket kan läggas på varandra utan att en märkvärd deformation sker på de undre lagren (Le, et al., 2012).

2.4.4 Draghållfasthet

Betongens draghållfasthet är praktiskt svår att testa. Därför brukar istället ett böjprov utföras på betongen för att sedan teoretiskt beräkna ut draghållfastheten. De teoretiska beräkningarna stämmer dock sällan med de beräknade värdena för draghållfastheten, därför kallas istället resultatet för böjdraghållfasthet. Böjdraghållfastheten brukar vara drygt 50 % högre än draghållfastheten. Vid ett böjprov belastas en balk upplagd på två stöd med en tryckande kraft. Kraften appliceras i mitten av balken och belastar balken till brott (Burström, 2009).

Draghållfastheten kan också bestämmas genom ett spräckprov. Ett betongprov trycks med en linjelast tills en vertikal spricka uppstår i mitten av provkroppen. Sprickan uppstår genom dragspänningar och på så sätt går det att bestämma betongens draghållfasthet men den kallas då för spräckhållfasthet eftersom den inte helt överensstämmer med draghållfastheten (Burström, 2009).

Böjdraghållfastheten för normala betongsammansättningar brukar variera mellan 2-8 MPa. Högpresterande betong kan uppnå böjdraghållfastheter på ungefär 14 MPa (Möller, et al., 1994). För högpresterande betong uppstår brott genom ballastkornen, till skillnad från normalbetong där brottet uppstår i gränzonen mellan ballasten och cementpastan. Detta bidrar till en planare brottyta och på så vis ett sprödare brott för högpresterande betong. Ökad seghet i betong med lågt vatten/bindemedel förhållande kan uppnås om fiberarmering används. För att uppnå önskad effekt måste styva fibrer användas, t ex stålfibrer (Fagerlund, 1994).

2.4.5 Tryckhållfasthet

Hårdnad betong klassificeras vanligtvis efter dess tryckhållfasthet eftersom andra viktiga egenskaper (t.ex. beständighet och täthet) är starkt kopplade till tryckhållfastheten. Tryckhållfastheten bestäms enligt standard SS EN 12390-3 genom tryckning av kuber med sidan 150 mm eller cylindrar med diametern 150 mm och höjden 300 mm. Cylindrarna har en hållfasthet på cirka 80-90 % av hållfastheten för kuberna, därför anges tryckhållfastheten hos betong antingen som kubhållfasthet eller cylinderhållfasthet (Burström, 2009).

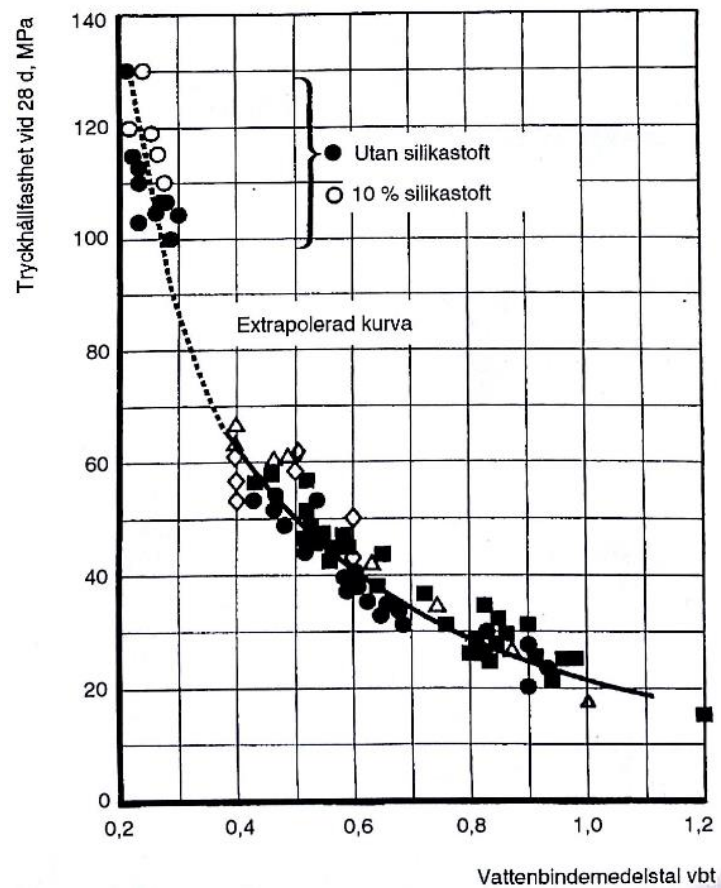
I normal betong är ballasten generellt starkare än cementpastan. Betongens hållfasthet avgörs därför av cementpastans egenskaper som i sin tur beror på blandningens vattencementtal. Relationen mellan betongens hållfasthet och vattencementtal för svenskt Std-cement visas i den nedre delen av Figur 1. För betong utan tillsats av andra bindemedel än cement är $v_{ct} = v_{bt}$.

Användningen av luftporbildare höjer lufthalten i betongen. Ökad lufthalt gör att cementpastan späds ut lika mycket som om motsvarande volym vatten används. För varje procent luft som tillsätts minskar hållfastheten med ca 5 %. Detta gäller för lufthalter över de naturligt förekommande 2 procenten (Burström, 2009).

Normal betong har ett tryckhållfasthetsområde mellan 15-80 MPa. Högpresterande betong har ett tryckhållfasthetsområde mellan 80-150 MPa. Förhållandet mellan vatten och bindemedel (v_{bt}) är lågt för högpresterande betong (0,25 eller något lägre). I *Figur 1* illustreras sambandet mellan tryckhållfasthet och vattenbindemedelstalet. Betong med lågt v_{bt} får högre hållfasthet om silikastoft tillsätts eftersom de små kornen förbättrar sammanhållningen i betongmassan. Används finmalt cement i högpresterande betong med lågt v_{bt} fås också en snabbare hållfasthetsutveckling. Högpresterande betong är därför lämplig att använda i produktion där det ställs höga krav på tidig hållfasthet. Det krävs dock hög dosering av tillsatsmedel för att göra betongen arbetbar, vilket gör att tillväxten av hållfastheten i mycket tidig ålder minskar.

På grund av den starka självuttorkning som sker genom hydratisering av cement så har fuktförhållandena som betongen lagras i liten betydelse (Fagerlund, 1994).

Skillnaden i hållfasthet mellan cementpasta och ballast i betong med lågt vbt är mindre än i betong med högre vbt, därför har ballastens egenskaper större betydelse i högpresterande betong. Den absolut viktigaste egenskapen är ballastens hållfasthet men elasticitetsmodul, ytstruktur och kemiska egenskaper har också stor betydelse (Fagerlund, 1994).



Figur 1 - Samband mellan vbt och tryckhållfasthet Källa: Fagerlund, 1994.

2.4.6 Elasticitetsmodul

Elasticitetsmodulen beskriver förhållandet mellan spänning och töjning och denna måste vara känd för att deformationen ska kunna beräknas. Vid belastning är det initiala beteendet hos betong elastiskt men under långvarig last uppstår krypning. För betong (till skillnad från till exempel stål) uppstår krypning även vid små belastningar och under normala temperaturförhållanden. Krypningen är i samma storleksordning som den elastiska deformationen (Neville & Brooks, 1990).

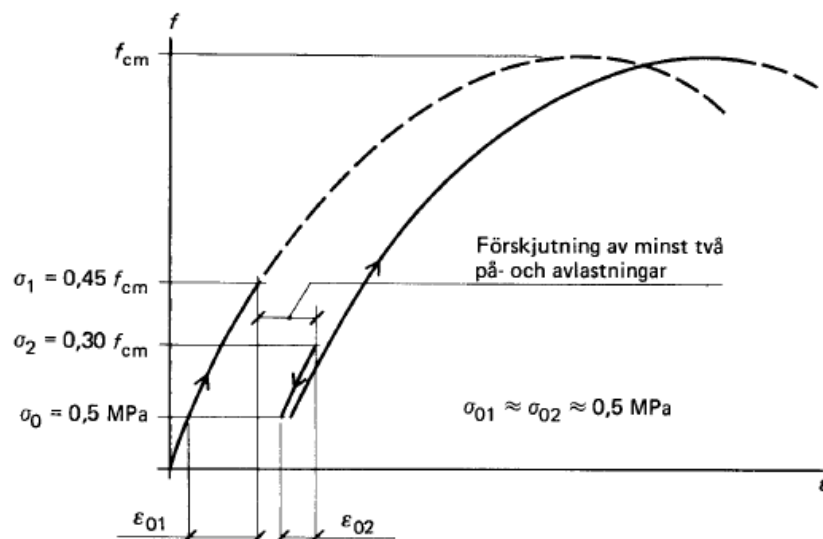
Elasticitetsmodulen kan beräknas från förhållandet mellan spänning och töjning men detta är inte helt lätt då förhållandet beskrivs av en olinjär oelastisk kurva som är beroende av belastningstiden. Anledningen till detta är att deformationen är kopplad till töjningen som i sin tur är tidsberoende. Vid snabb belastning av provkroppen (<0,01sek) blir den uppmätta deformationen liten och förhållandet mellan spänning och töjning är i stort sett linjärt. En belastningstid mellan 5 sekunder och upp till 2 minuter kan ge en ökning av deformationen med

upp till 15 %. För ytterligare belastning mellan 2-10 minuter, vilket vanligtvis krävs för att utföra mätningar på en provkropp, ökar deformationen väldigt lite (Neville & Brooks, 1990).

I Svensk Standard SS 13 72 32:2005 beskrivs metoden för att bestämma den initiala elasticitetsmodulen, E_0 , samt den statiska elasticitetsmodulen, E_c , genom tryckbelastning, se *Figur 2*. Där f_{cm} är medelvärde av tryckhållfastheten för betongen. Med hjälp av de uppmätta töjningarna och tillhörande spänningar kan respektive elasticitetsmodul beräknas utifrån följande formler:

$$E_0 = \frac{(\sigma_1 - \sigma_{01})}{\varepsilon_{01}} \quad (\text{Ekv. 3})$$

$$E_c = \frac{(\sigma_2 - \sigma_{02})}{\varepsilon_{02}} \quad (\text{Ekv. 4})$$



Figur 2 - Spännings-/töjningsdiagram för tryckprovning av kuber (Källa: SS 13 72 32, 2005)

Elasticitetsmodulen för vanlig husbyggnadsbetong är ca 25 GPa (Burstrom, 2009). Elasticitetsmodulen hos betong är en kombination av ballastens och cementpastans elasticitetsmoduler och volymförhållandet mellan dessa. För normal betong går brottninjen genom cementpastan men då högpresterande betong har en mer hållfast cementpasta går brottet istället genom både cementpastan och ballastkornen. Elasticitetsmodulen för högpresterande betong är därför endast något lägre än ballastens, som är av storleksordningen 50-80 GPa. Önskas en högre elasticitetsmodul hos betongen måste en ballast med högre elasticitetsmodul användas (Fagerlund, 1994).

2.4.7 Krympning

Med krympning avses i huvudsak deformationen som uppstår när betongmassan hydratiserar och torkar, den så kallade plastiska krympningen. Plastisk krympning uppstår när vatten avdunstar, från betongens fria ytor, till luften eller ner i underliggande betonglager. De

volymändringar som sker vid uppfuktning och uttorkning av betong är små i jämförelse med krympningen vid första uttorkningen. (Burström, 2009).

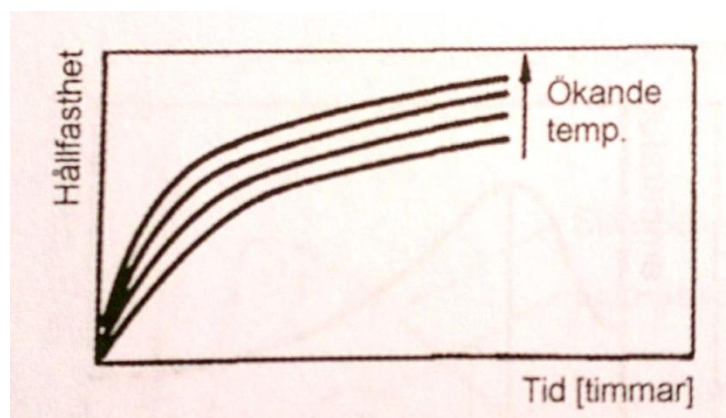
Förutom vid avdunstning sker även krympning på grund av hydratisering och karbonatisering av cementet men dessa är betydligt mindre än den plastiska krympningen. Sammandragningen som sker under den plastiska krympningen orsakar dragspänningar i betongens yta. Eftersom betongen är svag vid första uttorkningen uppstår det lätt plastiska sprickor. Förekomsten av plastiska sprickor ökar med vattenavdunstningen som i sin tur beror av, temperaturen hos betongen och den omgivande luften, den relativa luftfuktigheten i omgivande luft samt vindhastigheten (Neville & Brooks, 1990).

Volymen vatten som tillsätts vid blandning av betong har absolut störst betydelse för krympningen. En variation av cementhalten påverkar krympningen hos betongen eftersom hydratiseringen kräver vatten. Vid användning av luftporbildare skall effekten beaktas i beräkningen för krympningen. Den extra luftvolym som tillsätts i betongen har lika stor påverkan på krympningen som motsvarande volym vatten (Burström, 2009). Trots att högpresterande betong har lågt vatteninnehåll, lågt vbt samt hög elasticitetsmodul är uttorkningskrympningen i stort sätt lika stor som för normal betong (Fagerlund, 1994).

2.4.8 Värmeutveckling

När cement blandas med vatten startar kemiska hydratiseringsprocesser. Hur mycket värme som frigörs vid hydratiseringen och hur snabb värmeutvecklingen blir beror på mängden cement och vilken typ av cement som används. Det finns både positiva och negativa sidor med en stark värmeutveckling. På vintern kan reaktionsvärmen från cementen förhindra att betongen fryser innan den har härdat tillräckligt. Vid gjutning av grova konstruktioner kan värmen som frigörs bidra till stora temperaturskillnader som under avsvälningsskedet skapar risk för sprickbildning. Sprickbildning i grova konstruktioner kan förhindras genom att använda cement med låg reaktionshastighet, låg cementhalt och låg starttemperatur.

Hydratiseringen sker snabbare om temperaturen är högre vilket till exempel påverkar hållfasthetsutvecklingen hos betongen, se *Figur 3*. Temperaturer som är högre än 30-40 grader ger dock en försämring av kvaliteten (Burström, 2009).



Figur 3- Hållfasthetsutvecklingen som funktion av tiden vid olika temperaturer. Källa: Burström 2009.

Hållfasthetsutvecklingen för betong beskrivs som en funktion av tid och temperatur. Med hjälp av matematiska uttryck går det att beräkna hur mycket betongen har härdat vid en viss tid och

temperatur. Funktionerna ger ett mått på vad som kallas för betongens mognadsgrad (Burström, 2009).

Temperaturutvecklingen hos betong går att mäta med kalorimeter. Nedan listas tillfällen då temperaturutvecklingen och mognadsgraden hos betong kan vara bra att känna till (Fagerlund, 1999).

- Vid beräkning av hållfasthetsutvecklingen
- Vid kontroll av frysrisk
- Vid kontroll av rasrisk vid formrivning
- Vid beräkning av lämplig tidpunkt för efterspanning av spännstål i betongkonstruktioner
- Vid beräkning av temperaturspänningar och risk för sprickbildning

2.4.9 Lufthalt

Luftinnehållet i betong består av naturligt förekommande luftporer och luft som med avsikt fördelats i betongen med olika tillsatsmedel eller luftporbildare. Det finns olika metoder för att bestämma luftinnehållet men alla metoder mäter det totala luftinnehållet, ingen skillnad görs på naturligt förekommande luftporer och avsiktligt förekommande luftporer. De vanligaste metoderna för att bestämma lufthalten är olika tryckmetoder, gravimetriska metoder och volymetriska metoder (Bartos, 1992).

Luftbubblorna i färsk betong skall vara så små som möjligt och jämt fördelade i betongen. Luftbubblornas storlek är inte konstant, den varierar vanligtvis mellan 0,01-1,25 mm. Avståndet mellan luftbubblorna utgörs ofta av ett tunt lager cement. Detta lager bör vara minst 200 μm för att uppnå maximal frostbeständighet och hållfasthet av hårdnad betong. Vanligtvis varierar lufthalten i färsk betong mellan 3-6 % och efter kompaktering kvarstår vanligtvis 0,5-2 % luft (Bartos, 1992).

Vid användning av tryckmetoden är det viktigt att betongen kompakteras ordentligt. För mycket kompaktering kan dock leda till att massan segregerar och lufthalten i betongen minskar. Fördelarna med denna metod är att det inte är nödvändigt att veta sammansättningen hos betongen som testas för att få fram lufthalten. Metoden ger ett pålitligt värde oavsett vilken altitud testet utförs på och utrustningen är lätt att använda i fält dock är utförandet komplicerat med hänsyn till kalibreringen och erfarenhet krävs av operatören (Bartos, 1992).

3 Laboratorieundersökningar

För att undersöka massans byggbarhet och extruderbarhet testades väsentliga egenskaper för den färska betongen i ett laboratorium på Gotland i samarbete med Cementa. Där testades även den hårdnade betongens egenskaper, framförallt för att möjliggöra konstruktionsberäkningar på 3D-printad betong. Först testades ett referensrecept och därefter modifierades receptet för att bilda en uppfattning om hur betongen fungerar och påverkas av olika förändringar. För att bestämma betongens hårda egenskaper gjöts provkroppar utifrån det recept som erhöll bäst balans mellan arbetbarhet och byggbarhet. För att verifiera om betongen som tagits fram uppfyller kraven på konsistens, arbetbarhet och byggbarhet testades även betongens förmåga att printas i betonglaboratoriet på LTH.

3.1 Recept

Grundreceptet som användes baseras på undersökningen som gjorts på Loughborough University (se *avsnitt 2.1.2*). Grundreceptet benämns 1a (se *Bilaga VII*) och innehåller följande material:

- Vatten: 214,5 kg/m³
- Bascement: 750 kg/m³
- Silikastoft: 75 kg/m³
- Finsand: 1206 kg/m³
- Plastfibrer: 1,2 kg/m³
- Flytmedel: 7,5 kg/m³ (1 % av bascementet)
- Retarder: 3,75 kg/m³ (0,5 % av bascementet)

3.1.1 Vatten

Till blandningarna användes rumstemperaturerat kranvatten (ca 20°C).

3.1.2 Cement

Cementet som användes till blandningarna kallas Bascement och tillhör klassificeringen CEM II. Det består av 84 % klinker, 12 % flygaska och 4 % kalkstensfiller, för produktblad se *Bilaga II*.

3.1.3 Ballast

I nästan alla blandningar bestod ballasten av 20 % grovsand (<4 mm) och 80 % finsand (<0,5 mm). Den använda finsanden benämns Baskarp 15 och grovsanden benämns Baskarp 95. Siktcurvan för sanden kan ses i *Tabell I* Tabell 1- Siktcurva för vanliga typer av ballast.

Tabell 1- Siktkurva för vanliga typer av ballast

Sikt [mm]	Baskarp 95	Baskarp 15
4	100	
2	92,5	
1	53,4	
0,5	18,1	100
0,25	0,4	99,8
0,125		46,1
0,063		0,8

3.1.4 Flygaska

Till några blandningar tillsattes extra flygaska för att förbättra arbetsbarheten och stabiliteten. Flygaskan är importerad från Hamburg, ytterligare information är okänt.

3.1.5 Silikastoft

Silikastoftet som användes heter Elkem Microsilica – Grade 940 (U). Silikastoft används för att få en bättre sammanhållning i massan. För produktdatablad se *Bilaga III*.

3.1.6 Retarder

I samtliga blandningar användes SikaTard -932 som är ett ländtidsretarderande betongtillsatsmedel. Medlet tillverkas av SIKA Sverige AB och används för att förlänga öppethållandetiden för färsk betong. För produktblad se *Bilaga IV*.

3.1.7 Flytmedel

Till samtliga blandningar användes flytmedlet Sikament EVO-26. Det är tillverkat av SIKA Sverige AB och är ett effektivt vattenreducerande medel som ger betongen god arbetbarhet och god styrkeutveckling. För produktblad se *Bilaga V*.

3.1.8 Plastfibrer

Plastfiber av typen Crackstop från SIKA Sverige AB användes i ett antal blandningar för att få en bättre sammanhållning i den färska betongmassan samt för att utvärdera om fibrerna ger ett bidrag till draghållfastheten. Crackstop består av 12 mm långa polypropylenfibrer. För produktblad se *Bilaga VI*. Vilka blandningar som innehåller fibrer kan ses i *Bilaga VII*.

3.2 Blandningsmetod

Ett antal blandningar i storleksordning 1-1,5 liter blandades i en mindre blandare av typen Hobart N-50 (max 3 liter). Det är essentiellt att de ingående materialen blandas ordentligt. Först tillsattes de torra materialen i följande ordning:

1. Finsand
2. Silikastoft
3. Flygaska
4. Plastfiber
5. Cement
6. Grovsand

De tyngre materialen (grovsand och cement) tillsattes sist för att minska damm och spill vid blandning. De torra materialen blandas en kort stund innan de flytande materialen tillsattes i följande ordning:

1. Nästan allt vatten
2. Flytmedel + en liten del vatten
3. Retarder + en liten del vatten

Betongen blandades i ca 5 minuter innan maskinen stoppades och massan granskades. Fallkonstest samt extrudering kontrollerades. När en blandning bedömdes för styv hälldes betongen tillbaka i blandaren och en modifiering av receptet gjordes, antingen genom att tillsätta mer vatten eller mer flytmedel. Blandningen trycktes ut (extruderades) ur en specialtillverkad handspruta. När ett godtagbart värde på konsistensen uppmättes och extruderingen gick bra mättes densiteten och lufthalten. En liten mängd av massan sparades till fallkonstester efter förutbestämda tidpunkter. De olika delrecepten redovisas under *Bilaga VII* och har tagits fram systematiskt. För att urskilja inverkan av olika material har endast en modifiering gjorts mellan varje recept. Recepten som blandades klassificerades först med en siffra och sedan med en bokstav. Siffran betecknar vilken blandning det är och bokstaven betecknar om receptet har modifierats. Exempelvis blandades recept 1a men konsistensen var alldeles för styv. Mer vatten tillsattes i blandningen som nu har namnet 1b.

3.3 Färsk betong

3.3.1 Konsistens

Betongens konsistens bestämdes med hjälp av fallkontester enligt standard SS 02 71 25. Metoden är egentligen avsedd att tillämpas vid geotekniska laboriearbeten för bestämning av skjuvhållfastheten hos kohesionsjord men den fungerade bra som metod för att urskilja de olika receptens konsistens. I ett fallkonstförsök fästs en solid kon av metall ovanför en behållare med betong. Konens spets skall tangera betongens yta och konen får falla fritt ner i betongen, Se *Figur 4*. Penetrationsdjupet mäts och motsvarar skjuvhållfasteten för betongprovet som avläses ur en tabell.



Figur 4 - Fallkontest

3.3.2 Arbetbarhet

Arbetbarheten bestämdes genom att betongen extruderades (trycktes ut) för hand med en specialtillverkad spruta, se *Figur 5*. Om betongen var svår att trycka ut bedömdes arbetbarheten som dålig och om det gick lätt bedömdes arbetbarheten som god. De olika blandningarnas arbetbarhet betygsattes med skalan 1 till 6, där 6 motsvarar mycket god arbetbarhet och 1 motsvarar mycket dålig arbetbarhet. Om betongen var så styv att den inte gick att extrudera betygsattes inte arbetbarheten.



Figur 5 - Handspruta

3.3.3 Byggbarhet

När betongen extruderades i lager på lager avgjordes byggbarheten. Om betongen behöll sin form efter gjutning utan att deformeras av ytterligare lager bedömdes byggbarheten som god. Om betongen vid extrudering inte behöll samma form som munstycket eller deformeras (flöt ut) bedömdes blandningen ha dålig byggbarhet, se *Figur 6*. Blandningarnas byggbarhet bedömdes på samma sätt som för arbetbarheten. De betygsattes på en skala mellan 1 till 6, där 6 motsvarar mycket god byggbarhet och 1 motsvarar mycket dålig byggbarhet. Om betongen var så styv att den inte gick att extrudera betygsattes inte byggbarheten.



Figur 6 – Dålig byggbarhet (vänster) respektive bra byggbarhet (höger)

3.3.4 Värmeutveckling

Värmeutvecklingen för betongblandningarna bestämdes med hjälp av en kalorimeter av typen TAM Air från TA instruments. Cirka 5 gram från blandning 8b fylldes i små glasbehållare och placerades sedan i kalorimetern. Värmeutvecklingen för betongmassan mättes under 24 timmar.



Figur 7 - Prover till TAM

3.3.5 Lufthalt

Lufthalten för de olika blandningarna bestämdes med tryckmätningssmetoden, förfarandet beskrivs i SS-EN 12350-7. Mätningen utförs på följande sätt: betong fylls i en behållare och vibreras succesivt genom skakningar mot marken tills behållaren är fylld. Mätinstrumentet placeras ovanpå behållaren och låses fast, luftventilen sluts och ventilerna för vattnet öppnas. Vattnet fylls i den ena ventilöppningen tills vatten kommer ut ur den andra ventilöppningen. Luftblödaren stängs och luft pumpas in i tryckkammaren tills startvärdet registrerats. Luft pumpas in i kammaren till angivet värde innan lufthalten läses av.



Figur 8 - Lufthaltsmätare

3.3.6 Densitet

Densiteten mättes i samband med lufthalten. Behållaren till luftmätningarna rymmer 1 liter. Det strukna provets vikt noterades innan mätningarna av lufthalten startades.

3.4 Tillverkning av provkroppar och lagring

Avsnittet beskriver gjutningsprocessen och lagringen av de provkroppar som användes till provning av betongens hårdnade egenskaper. Det recept som visade bäst färskas egenskaper användes för att göra två större blandningar på 15 liter, en med och en utan plastfiber och blandades i en större blandare (40 l) av märket Eirich R05T. Materialen tillsattes i samma ordning som för de mindre blandningarna (se *avsnitt 3.2*). När betongen var blandad fylldes den i stålformar. Formarna placerades fyllda till hälften och vibrerades på ett vibratorbord innan de fylldes helt och vibrerades igen. Rågen ströks av och proverna placerades sedan i en klimatkammare.

Följande provkroppar gjöts av vardera blandning:

- 3 st kuber med dimensionerna 150 x 150 mm
- 6 st normprismor med dimensioner 40 x 40 x 160 mm (B x H x L)
- 3 st krympprismor med dimensionerna 25 x 25 x 280 mm (B x H x L)

Normprismorna användes till att ta fram böjdraghållfastheten och tryckhållfastheten. Krympprismorna användes till att utvärdera krympningen och kuberna användes till att ta fram elasticitetsmodulen. Det visade sig dock efter gjutning och lagring att provkropparna för bestämning av elasticitetsmodulen inte kan vara kubiska. Istället sågades en cylinder, med diameter 95 mm, ut ur vardera kub, se *Figur 9*.



Figur 9 - Provkroppar till elasticitetsmodul

Alla provkroppar lagrades 1 dygn i en klimatkammare med 100 % RH och temperaturen 20 °C. Normprismorna förvarades sedan 27 dygn i vattenbad med temperatur 20 °C. Krympprismorna förvarades mellan mätningarna i klimatrut med 50 ± 5 % RH och temperatur 20 ± 2 °C. Det visade sig senare att relativa luftfuktigheten inte hölls inom önskat intervall. Larmet till klimatkammaren gick sönder och därför upptäcktes ingen avvikelser av den relativa luftfuktigheten. Hur den relativa luftfuktigheten varierade går att se i *Bilaga VIII*. Efter första dygnet packades kuberna in i våta trasor och plastades in för att sedan transporteras till

laboratoriet på LTH. Transporten tog ett dygn och därefter lagrades de ytterligare 33 dygn i vattenbad.

3.5 Hårdnad betong

I detta avsnitt beskrivs de provningsmetoder som använts vid framtagningen av den härdade betongens egenskaper. De egenskaper som tagits fram är tryck- och böjdraghållfasthet samt elasticitetsmodul och krympning. Kraven på hårdnad betong är i princip samma för 3D-betong som för konventionell betong, de beror framförallt på avsikten med konstruktionen. Endast solida provkroppar har utvärderats och därför innehåller undersökningen ingen utvärdering av vad som händer med de härdnade egenskaperna när betongmassan byggs i flera lager, t.ex. vidhäftning mellan lagren.

3.5.1 Böjdraghållfasthet

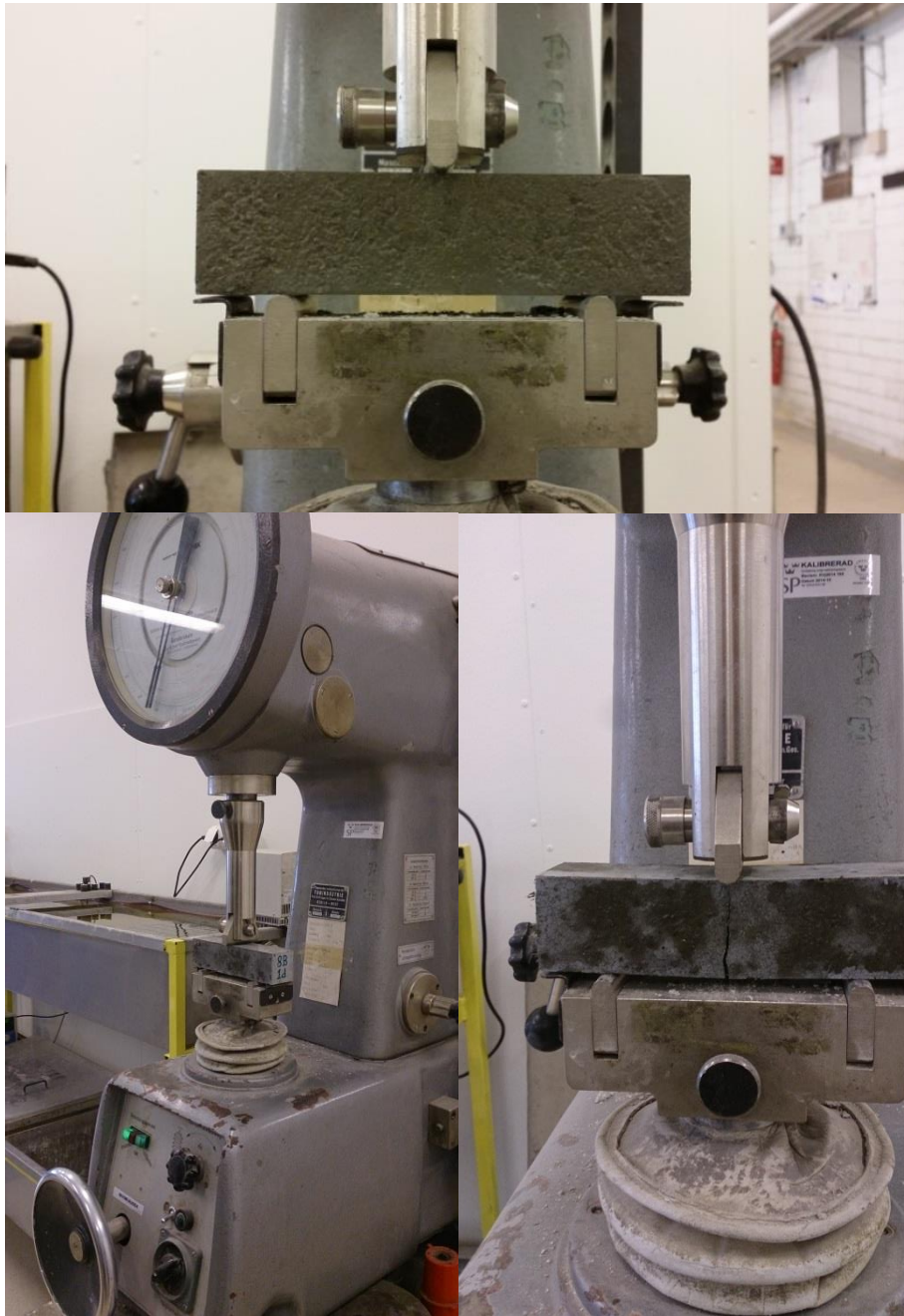
För att bestämma böjdraghållfastheten tryckbelastades prismor av betong upplagda på två stöd (trepunktsbelastning) i en böjdragmaskin från Tonindustrie (Baujahr 1962, Masch nr. 12704). Avståndet mellan upplagen uppmättes till 100 mm och prismornas dimension var 40 x 40 x 160 mm (B x H x L). Den tryckande kraften avlästes på maskinen med en analog visare.

Enligt standard SS-EN 12390-5:2009 skall böjdraghållfastheten beräknas på ett specifikt sätt. Standarden beskriver två olika metoder, trepunktsbelastning respektive fyrapunktsbelastning. Proverna har belastats enligt trepunktsbelastning (se *Figur 10*), vilket ger ett normativt värde. Värdet skall enligt standarden vara konstant 13 % högre än värdet vid fyrapunktsbelastning. För att bestämma böjdraghållfastheten skall lasten som registreras vid brott multipliceras med konstanter som beror på lastförhållandet och prismornas dimension. Förhållandet beskrivs med formeln:

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (\text{Ekv. 5})$$

f_{cf}	är böjdraghållfastheten (MPa)
F	är kraften (N)
l	avståndet mellan upplagen (mm)
b och h	motsvarar prismornas bredd och höjd (mm)

Enligt standarden skall böjdraghållfastheten avrundas till närmaste 0,1 MPa och avståndet mellan upplagen skall vara tre gånger kortsidan ($l = 3 \times b$), prismorna skall vara kvadratiska ($b = h$). Upplagskravet uppfylls inte ($l = 2,5 \times b$) vilket betyder att dessa värden kan avvika från andra mätningar men vid en inbördes jämförelse har detta ingen betydelse. Belastningen sker 1 respektive 28 dygn efter gjutning.



Figur 10 - Trepunktsbelastning för bestämning av böjdraghållfasthet

3.5.2 Tryckhållfasthet

Tryckhållfastheten har bestämts enligt standard SS EN 12390-3. De kvarvarande provkropparna efter böjbelastningen (se *avsnitt 3.5.1*) centrerades i provuppställningen och belastades med en tryckande kraft, se *Figur 11*. Maskinen som användes heter ToniComp III och kraften registreras med en digital mätare. Tryckhållfastheten beräknades genom sambandet nedan och skall avrundas till närmast 0,1 MPa:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (\text{Ekv. 6})$$

f_c	är tryckhållfastheten (MPa)
F	är den maximala lasten vid brott (N)
A_c	är provkroppens tvärsnittsytta (mm^2)

Dock används inte de provkroppsdimensioner som föreskrivs vid bestämning av tryckhållfasthet i standard SS-EN 12390-1:2012. De använda provkropparna har varierande längd, beroende på brottet vid böjprovningen, men de har en konstant höjd och bredd (40 x 40 mm) och den tryckande kraften appliceras över en yta med samma area som provkropparnas tvärsnitt.



Figur 11 - Tryckbelastning för bestämning av tryckhållfasthet

3.5.3 Elasticitetsmodul

Elasticitetsmodulen för betongblandningarna bestäms för att kontrollera fiberns inverkan och om blandningen är likvärdig med högpresterande betong. Elasticitetsmodulen, E_0 , som erhålls vid den första pålastningen bestäms enligt standard SS 13 72 32:2005. Provkropparnas dimensioner uppfyller dock inte kravet $h = 2d$, de är något mindre vilket kan ses i *Tabell 12*, *avsnitt 4.3.3*.

Provkropparna belastas med en tryckande kraft på minst 300 kN (ca 43 MPa) vilket är ungefär halva brottlasten, se *Figur 12*. Innan proverna belastas med tryck har tre deformationsgivare, jämnt fördelat, fästs vid sidan av betongcylindern. Givarna anger deformationen i mm och därefter beräknas töjningen enligt:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{Ekv. 7})$$

Ett medelvärde för varje provkropps töjning beräknas och därefter approximeras en linjär linje till medelvärdet (se *Bilaga I*). Lutningen för linjen anger provkroppens E-modul. De olika blandningarnas elasticitetsmodul beräknas och kan ses i *Tabell 11, avsnitt 4.3.3* där medelvärdet har avrundats till närmaste 0,5 GPa.



Figur 12 - Framtagning av elasticitetsmodul

3.5.4 Krympning

Krympningen bestäms enligt standard SS 13 72 15:2000. Efter ett dygn avformades proverna och en referensmätning av längden gjordes. Därefter mättes och registrerades krympningen vid 7, 14, 21, 28, 35, 42 dygns ålder. Vid mätning placerades provkropparna i mätdonet som registrerade längden med en noggrannhet på $\pm 0,005$ mm.

Måtten på provkropparna är 25 x 25 x 280 mm och avviker från standarden som föreskriver måtten 100 x 100 x 400 (B x H x L). Även lagringen av provkropparna avviker (för aktuell lagring se *avsnitt 3.4*), standarden förespråkar följande lagring: 1 dygn i 100 % RF och temperaturen 20 ± 2 °C följt av 6 dygns lagring i vatten med temperaturen 20 ± 2 °C och därefter förvaring i klimatrum med 50 ± 5 % RF och temperaturen 20 ± 2 °C.

Längförändringen beräknas som:

$$\frac{(m_n - L_n) - (m_0 - L_0)}{B - D} \cdot 1000 [\text{‰}] \quad (\text{Ekv. 8})$$

där

m_n	Mätvärdet vid åldern n dygn
L_n	Längden vid åldern n dygn
m_0	Första mätvärdet eller referensvärdet (7 dygn för SS 13 72 15)
L_0	Längden vid referensåldern
B	Provkroppens längd, mm
D	Ingjutningslängden för en mät dubb, mm

Negativt värde anger en krympning.

3.6 Extrudering med robot

I samarbete med två studenter som läser civilingenjörsprogrammet maskinteknik på LTH gjordes ytterligare tester av betongens färskas egenskaper och potential. Dessa utfördes med ett mekaniskt munstycke och en enarmsrobot. Framförallt testades betongens extruderbarhet (arbetbarhet) och byggbarhet.

Munstycket är tillverkat av studenterna från maskinteknik och trycker ut betongen med hjälp av en skruv. Skruven är omsluten av ett PVC-rör med förgrening (45°) och en konisk tratt vid munstyckets mynning, se *Figur 13*. Vid mynningen sitter även två plastbitar monterat, dessa fungerar i princip som två små murslevar. Plastbitarna gör att lagren blir lika breda och slätar ut ytan. Murslevarna kan ses i *Figur 14*. En eldriven motor får skruven att rotera och betongen matas in för hand i PVC-rörets förgrening. Skruven fungerar på samma sätt som "Arkimedes skruv" men istället för att transportera vatten uppåt skall den trycka betongen neråt (betongen är så pass fast att den med svårighet faller fritt genom ett rör). Munstyckets kapacitet testades genom extrudering av recept 2b och 4b (utan robot), se *Figur 14*. Recept 4b har något fastare konsistens än recept 2b.

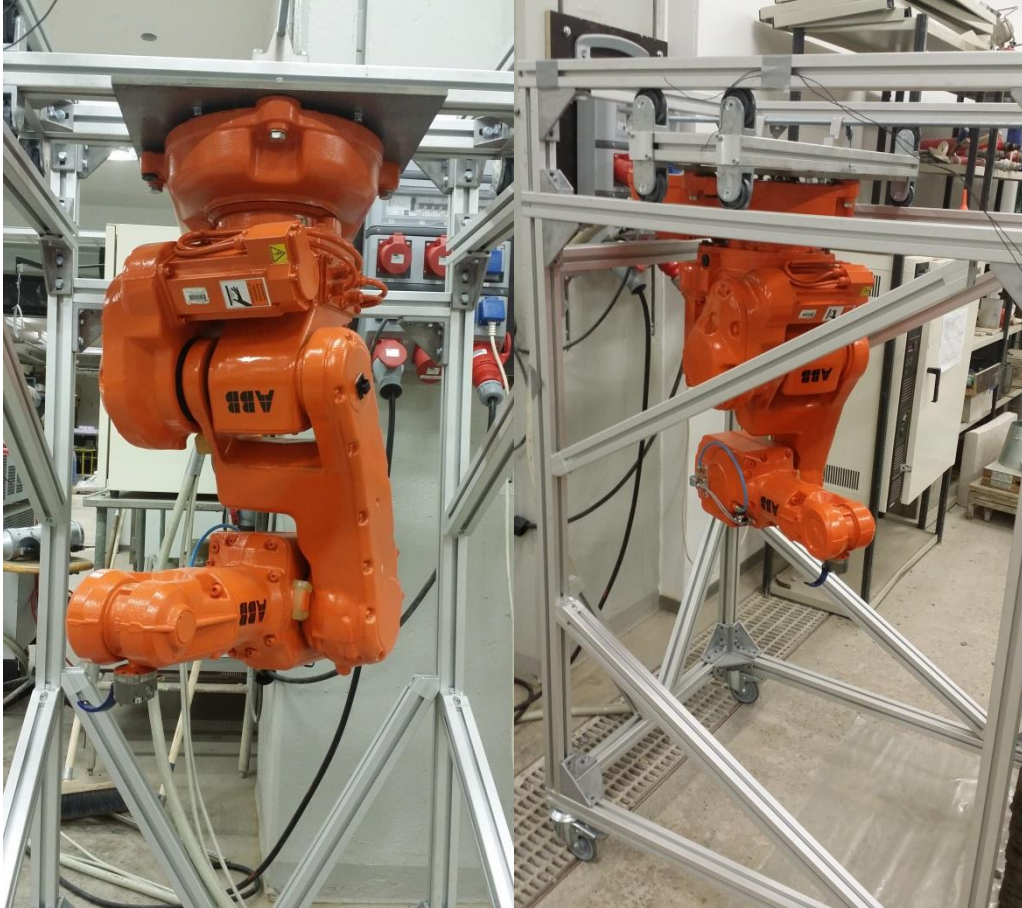


Figur 13 - Munstycke utan murslevar



Figur 14 - Extrudering med munstycke

Roboten är tillverkad av ABB (se *Figur 15*) och kan förflytta sig i tre dimensioner (x, y, z). Extruderingen av recept 2b testades med konstant förflyttningshastighet längs ett förprogrammerat rörelsemönster. Robotens rörelse reglerades sedan för hand och en förflyttningssdimension låstes, dvs. betongmassan extruderades, lager på lager, längs en rak linje där robotens hastighet och lagrens höjd samt längd reglerades för hand. För att kontrollera möjligheten att göra skarpa svängar extruderades betongen också längs ett rektangulärt mönster, se *Figur 23* i avsnitt 4.4.



Figur 15 - Robot

4 Resultat och diskussion

Det ”perfekta receptet” för 3D-printning av betong är svårt att specificera eftersom det finns oerhört många kombinationer av material och olika metoder/tekniker att extrudera betongen med. I studien har två recept, 2b och 4b, med god potential framtagits. Det bekräftades att recept 2b fungerar att 3D-printa men troligtvis går även recept 4b att printa, det kräver dock en modifiering av munstycket som extruderar betongen. Betongens materialegenskaper i härdat tillstånd är framtagna med solida provkroppar och resultaten tar därför ingen hänsyn till vidhäftningen mellan lagren och kaviteter som uppstår mellan lagren. Med solida provkroppar kan resultaten jämföras med konventionell och högpresterande betong.

4.1 Recept

De recept som visade bäst färsk egenskaper var 2b och 4b (se *Figur 16*), recept 2b har något bättre arbetbarhet men sämre byggbarhet än 4b. I *Tabell 2* redovisas innehållet i de båda recepten.

Tabell 2 - Recept 2b och recept 4b

Vct=0,275	Recept 2b [kg/m ³]	Recept 4b [kg/m ³]
Vatten	228	228
Bascement	659	746,5
Silikastoft	83	83
Flygaska	87	-
Finsand	912	931
Grovsand	228	233
Plastfibrer	1,2	1,2
Flytmedel	(1,26 %)* 8,3	(1,11 %)* 8,29
Retarder	(0,5 %)* 3,3	(0,5 %)* 3,73

* Procent av bascement



Figur 16 - Recept 2b (vänster) och 4b (höger)

Recept 2b valdes framför 4b för att säkerställa möjligheten att extrudera blandningen maskinellt. Arbetbarheten bedömdes (i detta fall) alltså vara viktigare än byggbarheten. De större blandningarna 8a och 9a (som baseras på recept 2b) blev vid blandning styvare än väntat. Det visade sig att den större blandaren inte var lika effektiv som den mindre. Ytterligare vatten tillsattes i blandningarna som då fick benämningarna 8b respektive 9b. Tillsatsen av mer vatten och ytterligare blandning gav för lös konsistens. Med anledning till den varierande konsistensen på betongmassan poängteras vikten av att blanda de ingående materialen noga.

4.2 Färsk betong

4.2.1 Konsistens

Konventionella metoder som används för att bestämma konsistensen på betong är inte applicerbara på betong för 3D-printning. Betongmassa är så trögflytande och styv att den inte flyter ut av sig själv, därför kan inget värde registreras med konventionella mätmetoder. 3D-betongen liknar en cementpasta då ballasten består av mycket små kornfraktioner och hög andel cement. Ett bra sätt att bestämma konsistensen för 3D-betongen har därför varit att använda Fallkontest vilket är ett penetrationstest.

Skjuvhållfastheten för de olika recepten kan ses i *Tabell 3*. Test 1 motsvarar en mätning direkt efter att receptet blandats, provet är alltså aggregerat. Test 2 motsvarar mätning 5 minuter efter blandning. Test 3 motsvarar mätning ca 50 minuter efter blandning. Test 4 motsvarar mätning av ett aggregerat prov, ca 50 minuter efter blandning. Test 5 motsvarar en mätning av ett prov som fått vila 5 minuter efter Test 4. Om betongen bedömdes vara för styv efter första fallkontestet (Test 1) gjordes inga fler mätningar och receptet modifierades. Betongens beteende var i början osäkert vilket också resulterade i att färre mätningar gjordes.

Tabell 3 - Konsistensmätning med fallkon

Recept	Test 1 [kPa] (0 min)	Test 2 [kPa] (5 min)	Test 3 [kPa] (50 min)	Test 4 [kPa] (0 min)	Test 5 [kPa] (5 min)
1b	0,98	-	-	-	-
1c	0,2	-	-	-	-
2a	4,1	-	-	-	-
2b	0,68	-	-	0,5	-
3a	1,8	-	-	-	-
3b	0,59	-	0,68	0,27	-
4a	2,3	-	-	-	-
4b	0,81	1,4	3,8	0,7	1,8
5a	0,94	-	-	-	-
5b	1	-	-	-	-
5c	0,84	-	4,1	0,48	0,61
6a	0,87	-	-	-	-
6b	0,7	0,87	3,5	0,5	0,81
7a	0,5	1,3	4,1	0,38	0,51
7b	0,38	0,45	1,2*	0,44	0,61
8b	0,49	0,53	2,03	0,30	-
9b	0,35	0,55	0,85	0,10	0,19

* fallkonen tippade då den föll ner i betongen

Betongen bygger snabbt upp en tidig struktur och blir relativt fast efter bara några minuter. Materialet är tixotropiskt och därför återfås en lägre skjuvhållfasthet vid omrörning. Både Test 1 och Test 4 motsvarar mätning av ett aggregerat prov men Test 4 gav regelbundet lägre skjuvhållfasthet än Test 1. Detta beror troligtvis på den korta tiden det tar att förflytta betongen från blandaren till mätkonen (vid mätning av Test 1). Inför Test 4 aggregerades betongen för hand vilket minimerade tiden mellan aggregering och mätning. Betongen bygger alltså upp en tidig hållfasthet så snabbt att den korta tiden det tar att förflytta massan från blandaren till mätinstrumentet har betydelse för resultatet.

Slutsatserna som går att se utifrån försöken är följande:

- Ersätts finsand med högre andel grovsand blir konsistensen lösare
- Högre vbt gav en lösare konsistens
- Större inblandning av flytmedel påverkade inte konsistensen nämnvärt
- Ersattes bascement med högre andel flygaska blev konsistensen lösare
- De recept som innehöll fibrer har vid konstant vbt styvare konsistens

Blandningarna utan fibrer och högre andel grovsand fick troligtvis en lösare konsistens p.g.a. att den fina sanden och fibrerna binder mer vatten.

4.2.2 Arbetbarhet

Betongen som används till 3D-printning har dålig arbetbarhet jämfört med konventionell betong. Det är inte rimligt att ställa samma krav på denna betong som på konventionell betong eftersom den inte hanteras på samma sätt och inte skall fylla ut gjutformar. Betongens arbetbarhet bedöms istället med praktiska försök genom att trycka ut (extrudera) betongen ur

en ”handspruta”. Arbetbarheten visade sig vara starkt relaterad till dess konsistens, se *avsnitt 3.3.1*. Betongen var nästan omöjlig att extrudera om blandningens skjuvhållfasthet var över ca 1 kPa. Generellt var de flesta blandningar svåra att extrudera och det krävdes mycket kraft för att pressa ut betongen. De fåtal som gick lättare att trycka ut hade en väldigt flytande konsistens. I brist på tid och resurser har ingen utredning av 3D-betongens förmåga att förbli homogen vid transport och gjutning gjorts. I *Tabell 4* redovisas de olika receptens arbetbarhet. Betygsättningen tar inte hänsyn till arbetbarheten för konventionell betong. Den gjordes enbart för att jämföra de olika receptens arbetbarhet med varandra. Betygsättningen har gjorts på skalan 1-6, där 1 är dåligt för att massan är styv och 6 är bra. När det var uppenbart att massan var för styv eller lös gjordes ingen extrudering, vilket bidrar till att inget värde registrerades i den subjektiva bedömningen.

Tabell 4 - Bedömning av arbetbarhet

Recept	1a	1b	1c	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a
Arbetbarhet	1	2	6	-	5	5	5	1	3	-
Recept	5b	5c	6a	6b	7a	7b	8a	8b	9a	9b
Arbetbarhet	-	4	-	4	5	4	-	5	-	-

Utifrån försöksresultaten noterades följande:

- Ersattes finsand med högre andel grovsand påverkades inte arbetbarheten nämnvärt
- Ökning av vbt gav bättre arbetbarhet
- Ökad mängd flytmedel förbättrade arbetbarheten
- Ersattes bascement med högre andel flygaska blev arbetbarheten vid konstant vattenbindemedelstal bättre
- Fiberarmering i blandningen gav sämre arbetbarhet

Trots att högre andel grovsand inte påverkade arbetbarheten i detta fall är det möjligt att ännu högre andel grovsand eller större ballast kan påverka arbetbarheten.

4.2.3 Byggbarhet

De olika recepten blandades endast i små mängder (1-1,5 l) och därför kunde inte byggbarheten bestämmas enligt definitionen ”antal lager av färsk betong vilka kan läggas på varandra utan att en märkvärd deformation sker på de undre lagren”. Byggbarheten avgjordes istället som en okulär bedömning av lagerutbredning och deformation. Enligt bedömningen erhåller blandningen en god byggbarhet om skjuvhållfastheten är minst 0,6-0,7 kN. Med blandning 4b kunde nio lager (h=16,7 cm) byggas innan betongmassan tog slut. Med blandning 5c kunde 11 lager (h=18 cm) byggas innan massan tog slut. Lagrens tjocklek och utseende varierade beroende på noggrannhet och möjligheten att extrudera massan. Det var svårt att trycka ut jämna och fina lager med konstant hastighet. Betygsättningen för byggbarheten har gjorts på samma sätt som för arbetbarheten och redovisas i *Tabell 5*. Värdet 1 är dåligt, då går inte massan bygga med. Har blandningen fått värdet 6 bygger den bra utan att lagren deformeras. Om massan inte visade någon förmåga att vara självbärande eller om den var så styv att den inte gick att extrudera angavs inget mätvärden.

Tabell 5 - Bedömning av byggbarhet

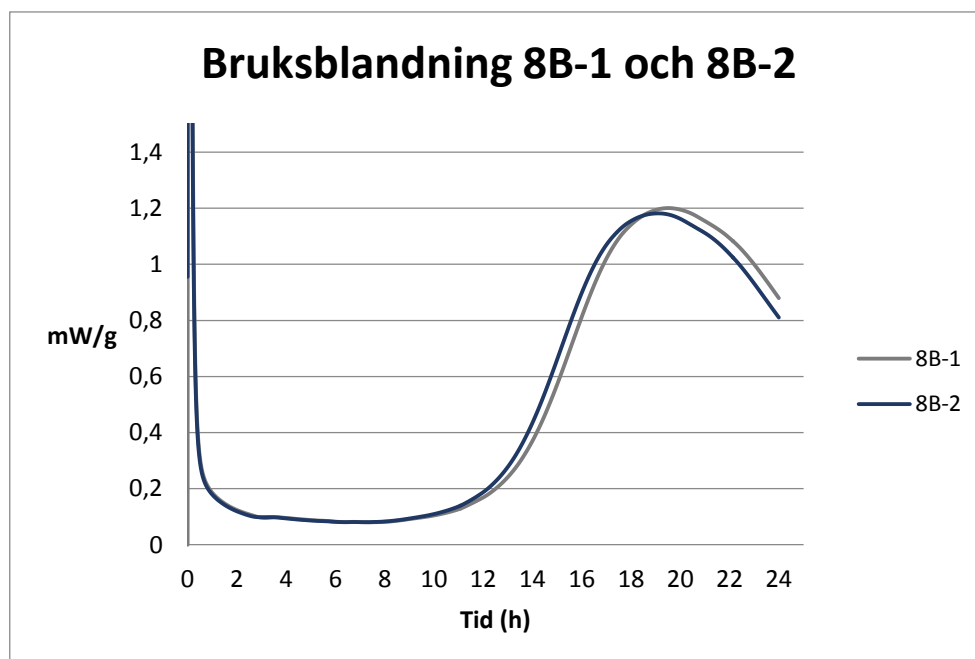
Recept	1a	1b	1c	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a
Byggbarhet	-	-	1	-	5	3	2	-	6	-
Recept	5b	5c	6a	6b	7a	7b	8a	8b	9a	9b
Byggbarhet	-	4	-	4	3	4	-	3	-	-

Utvärderingen av byggbarheten gav följande slutsatser:

- Ersattes finsand med större andel grovsand blev byggbarheten sämre
- Lägre vbt gav bättre byggbarhet
- Inblandning av flytmedel gav sämre byggbarhet
- Ersattes bascement med högre andel flygaska blev byggbarheten sämre
- Fiberarmering i blandningen gav bättre byggbarhet

4.2.4 Värmeutveckling

Värmeutvecklingen för recept 8b startade efter 12 timmar, se *Figur 17*. Det är möjligt att mängden retarder kan minskas eftersom värmeutvecklingen startar sent, dock kan detta påverka konsistensen, arbetbarheten och byggbarheten. Receptet som togs fram vid Loughborough University innehöll förutom retarder även superplasticerare. Både retarder och superplasticerare bidrar till en massa som är smidigare och mer arbetbar. I övrigt har de motsatt effekt i den mening att retarder ökar tiden innan hydratationen startar och superplasticeraren reducerar vattenbehovet vilket ger högre kort- och långtidshållfasthet. Kombinationen ger troligtvis en betong som är mer arbetbar, har bra öppethållandetid och snabbt bygger upp tidig hållfasthet.



Figur 17 – Värmeutveckling

Betongens konsistens gjorde att provmassan inte riktigt fyllde ut botten på glasbehållarna (se *Figur 18*). Detta bidrar till en viss osäkerhet i resultatet, men då båda proverna har väldigt liknande värmeutveckling anses det inte ha haft någon inverkan på resultatet.



Figur 18 - Prover till TAM

4.2.5 Lufthalt och densitet

Blandningarnas uppmätta densitet och lufthalt kan ses i *Tabell 6*. En beskrivning av mätningarna finns under *avsnitt 3.4.10* och *3.4.11*. Trots att inget luftporbildande tillsatsmedel används överstiger lufthalten ibland 3-6 % (som normalt förekommer utan kompaktering).

Tabell 6 - Densitet och Lufthalt

Prov	Densitet [kg/m ³]	Lufthalt [%]
1c	2200	4,1
3b	-	5,7
4b	2183	6,4
5c	2150	7,3
6b	2160	5,8
7a	2128	7
8b	2100	8,2
9b	2095	7,9
9b*	2147	5,9

Lufthalten för de olika blandningarna har stor spridning. Troligtvis beror detta på hur väl proverna kompakterades innan mätning. Blandning 9b har lufthalten 7,9 %, vilket är högt. Kompakteringens inverkan kontrollerades med en ny mätning av lufthalten på samma blandning. Denna mätning (9b*) kompakterades noggrannare och visade då 5,9 % i lufthalt vilket är hela 2 procentenheter lägre än mätningen innan (9b). Det är viktigt att poängtera att vid tillverkning av betongelement med 3D-teknik kan inte massan vibreras efter extrudering och den metod som används påverkar därför luftinnehållet i betongen. Den höga lufthaltens inverkan på hållfasthet och beständighet måste tas i beaktning.

4.3 Hårdnad betong

4.3.1 Böjdraghållfasthet

I *Tabell 7* och *Tabell 8* redovisas böjdraghållfastheten vid 1 respektive 28 dygn för blandningar med respektive utan fibrer. Resultaten visar en böjdraghållfasthet som är i samma storleksordning som för högpresterande betong, 8-14 MPa (Möller, et al., 1994). Böjdraghållfastheten efter 1 dygn för blandning 8b (med fibrer) är mer än 1 MPa högre än för blandning 9b (utan fibrer). Efter 28 dygn är skillnaden lite mindre men utvecklingen i hållfastheten är i princip lika stor för båda blandningarna.

Anledningen till att böjdraghållfastheterna är så pass lika efter 28 dygn beror troligtvis på att plastfibrerna inte är styva nog att uppta dragspänningarna som uppstår när betongen går till

brott. Hade styvare fibrer använts, av till exempel stål, bör skillnaden bli större. Skillnaden i tidig hållfasthet kan bero på att fibrerna binder en viss mängd vatten vilket resulterar i att betongen får ett lägre vattencementtal än betongen som inte innehåller fibrer. Det kan också bero på att härdningen för de olika blandningarna inte startat samtidigt.

Tabell 7 - Böjdraghållfasthet med fibrer

Blandning 8b	Ålder 1 dygn		Ålder 28 dygn	
	Last [N]	Böjdragh. [MPa]	Last [N]	Böjdragh. [MPa]
1	1800	4,2	5600	13,1
2	1980	4,6	5175	12,1
3	2070	4,9	5650	13,2
Standardav.	140	0,4	260	0,6
Medelvärde	1950	4,6	5480	12,8

Tabell 8 - Böjdraghållfasthet utan fibrer

Blandning 9b	Ålder 1 dygn		Ålder 28 dygn	
	Last [N]	Böjdragh. [MPa]	Last [N]	Böjdragh. [MPa]
1	1330	3,1	4650	10,9
2	1380	3,2	5200	12,2
3	1520	3,6	5430	12,7
Standardav.	100	0,3	400	0,9
Medelvärde	1410	3,3	5090	11,9

Vid tillverkning av konstruktioner som belastas med stora dragkrafter behöver även betongen som används till 3D-printning armeras. Detta kan eventuellt göras med stålfibrer men ytterligare utredning av detta krävs. Ett annat alternativ är att lämna hålrum i elementen där armering kan monteras i efterhand. Slutligen bör dessa hålrum fyllas med betong och på så sätt skapas solida armerade element.

4.3.2 Tryckhållfasthet

I Tabell 9 och Tabell 10 redovisas tryckhållfastheten för blandningarna 8b och 9b. Betongen kan utan tvekan klassificeras som högpresterande betong då tryckhållfastheten är betydligt högre än 80 MPa, vilket är den undre gränsen för högpresterande betong (Fagerlund, 1994). Vid 28 dygns ålder har de båda blandningarna relativt lika tryckhållfasthet. Vid 1 dygns ålder skiljer de sig avsevärt från varandra och blandningen med fibrer har nästan dubbelt så hög tryckhållfasthet som den utan.

Blandningen med fibrer bygger alltså upp en tidig tryckhållfasthet mycket snabbare än blandningen utan fibrer. Att betongen får denna tryckhållfasthet tidigt är bra med tanke på att betongen skall användas i ändamål där det ställs krav på att den skall vara självbärande, utan stöd av gjutformar eller liknande. Orsaken till den tidiga hållfasthetsutvecklingen beror troligtvis inte på fibrerna. Antagligen har retarden för blandningarna reagerat vid olika tillfällen. Hur stor inverkan retarden har är dock svårt att säga och ytterligare forskning kring detta krävs.

Det är möjligt att den tidiga tryckhållfastheten som erhålls med recept 9b räcker för att betongen skall vara självbärande. Självklart beror detta också på vilka konstruktioner som skall byggas.

Tabell 9 - Tryckhållfasthet med fibrer

Blandning 8b	Ålder 1 dygn		Ålder 28 dygn	
	Last [kN]	Tryckh. [MPa]	Last [kN]	Tryckh. [MPa]
1	49,25	30,8	178,7	111,7
2	47,69	29,8	171,4	107,1
3	47,85	29,9	163,5	102,2
4	48,01	30	171,2	107
5	49,53	31	177,7	111,1
6	48,39	30,2	169	105,6
Standardav.	0,77	0,5	5,65	3,5
Medelvärde	48,45	30,3	171,9	107,5

Tabell 10 - Tryckhållfasthet utan fibrer

Blandning 9b	Ålder 1 dygn		Ålder 28 dygn	
	Last [kN]	Tryckh. [MPa]	Last [kN]	Tryckh. [MPa]
1	26,22	16,4	170,6	106,6
2	27,48	17,2	168,6	105,4
3	27,70	17,3	169,6	106
4	25,90	16,2	175,7	109,8
5	28,64	17,9	164,3	102,7
6	30,77	19,2	171,2	107
Standardav.	1,77	1,1	3,71	2,3
Medelvärde	27,79	17,4	170	106,3

4.3.3 Elasticitetsmodul

Elasticitetsmodulen för blandning 8b och 9b redovisas i *Tabell 11*. Båda blandningarna har relativt lika elasticitetsmodul. Elasticitetsmodulen för blandningarna är ungefär 50 MPa, vilket är typiskt för högpresterande betong (Fagerlund, 1994). Fibrerna har alltså inte haft någon märkbar inverkan på betongens elasticitetsmodul.

Tabell 11 - Elasticitetsmodul med fibrer (8b) och utan fibrer (9b)

E-modul [Gpa]		
Provkropp	8b	9b
1	48	56
2	48,5	52
3	51	49,5
Standardav.	1,5	3,5
Medel	49,0	52,5

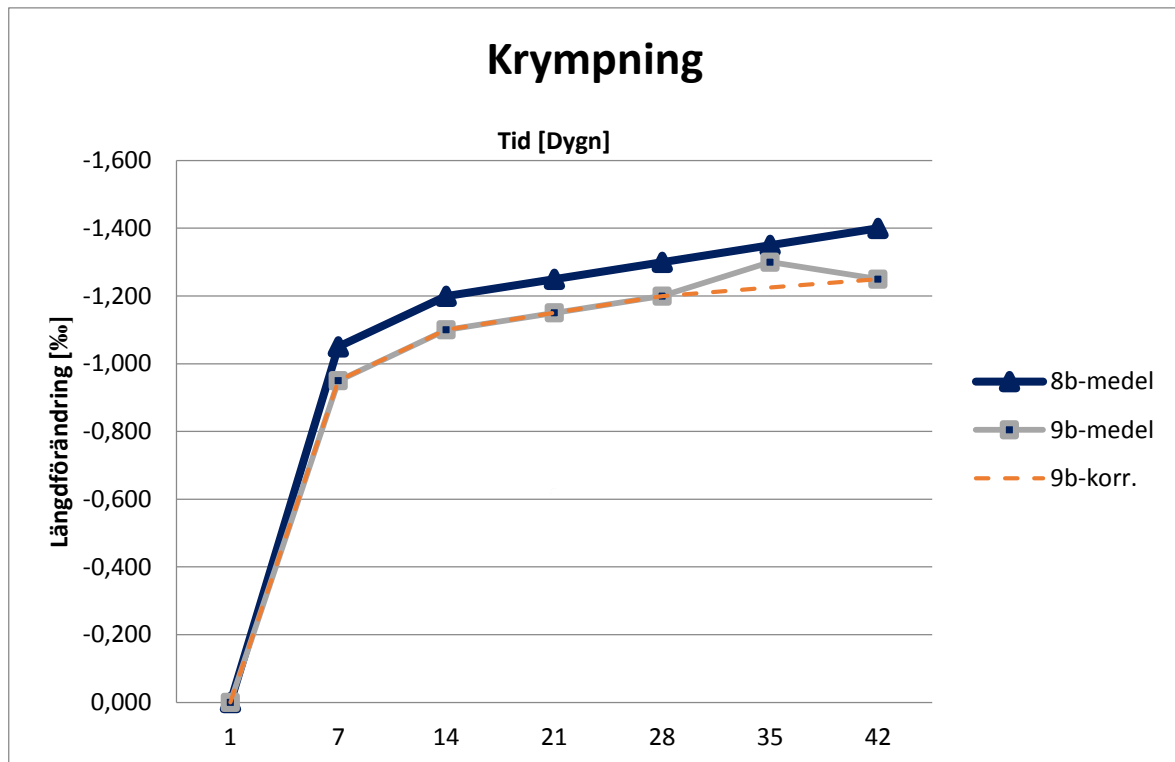
Provkropparna som användes för att bestämma elasticitetsmodulen sågades ut ur kuber (med sidan 150 mm) vilket påverkade provkropparnas storlek och mått. Två av provkropparna (8B-3 och 9B-3) blev skrovliga i botten efter ursågning. Botten jämnades ut och därför blev dessa provkroppar något kortare än resterande provkroppar. Ursågningen blev inte helt rak och därför uppmättes provkropparnas höjd på fyra jämnt fördelade platser. Diametern mättes också på två ställen. Dimensionerna redovisas i *Tabell 12*.

Tabell 12 - Provkropsdimensioner för bestämning av elasticitetsmodul

Dimensioner [mm]						
Provkropp	8b-1	8b-2	8b-3	9b-1	9b-2	9b-3
Höjd	150,33	150,36	145,71	150,12	150,91	144,9
	150,44	151,31	144,82	150	150,93	144,56
	150,46	150,34	145,02	150,17	150,86	145,05
	150,54	150,42	146,29	150,18	150,84	145,45
Medel	150,4	150,6	145,5	150,1	150,9	145,0
Diameter	94,41	94,41	94,41	94,52	94,53	94,45
	94,41	94,44	94,44	94,43	94,45	94,47
Medel	94,4	94,4	94,4	94,5	94,5	94,5

4.3.4 Krympning

Krympningen över tid redovisas i *Figur 19*. Krympningen är i samma storleksordning som för normal betong med lågt vbt (Fagerlund, 1994). Den största krympningen sker vid tidig ålder (under de första sju dagarna). Detta är som väntat då den plastiska krympningen som först uppstår brukar ha störst betydelse. Efter ungefär två veckor förändras krympningen inte lika mycket och den fortsätter relativt linjärt. De båda blandningarna, 8b (med fibrer) och 9b (utan fibrer), har nästan lika stor krympning. De skiljer sig framförallt under den första veckan då blandningen med fibrer krymper något mer än den utan. Under resterande veckor förändras krympningen ungefär lika mycket. Blandning 9b ser dock ut att svälla något under sista mätveckan. Detta kan bero på att den relativa luftfuktigheten i klimatkammaren ändrades men det är osäkert hur stor inverkan en liten variation i relativ luftfuktighet har på krympningen. Hur den relativa luftfuktigheten varierade i klimatkammaren kan ses i *Bilaga VIII*. Krympningsbeteendet hos provkropp 9b kan även vara orsakat av ett mätfel. Genom att bortse från mätvärdet efter 35 dygn för provkropp 9b och ersätta det med en rät linje (9b-korr.) mellan mätvärdena efter 28 respektive 42 dygn fås en mätserie som mer överensstämmer med mätningen för provkropp 8b.



Figur 19 - Krympning

4.4 Extrudering med robot

I laboratoriet testades extrudering av recept 2b och 4b med munstycket (utan robot). Recept 2b gick att extrudera men inte 4b. Recept 4b var för styv, istället för att betongen trycktes neråt trycktes den tillbaka upp i förgreningen. Recept 4b var alltså för styv för detta munstycke men det behöver inte betyda att den är för styv för att använda med ett annat munstycke. Som kan ses i *Figur 20* placeras lagren (med recept 2b) inte helt perfekt och de blir ganska ojämna men extruderingen var möjlig.

Recept 2b extruderades med samma munstycke monterat på en robot och extrudering gick förvånansvärt bra. När roboten fixerade munstycket påverkades inte byggbarheten av att lagren placerades snett eller fel. Det visade sig dock att munstycket matade ut betongen med ojämnt flöde och därför var hastigheten tvungen att regleras manuellt. Detta gjorde också att lagren inte blev lika tjocka och därför fick även höjden styras manuellt. För att helt automatisera extruderingen är det alltså viktigt att munstycket optimeras för ett konstant flöde av betong. Alternativt måste munstycket kunna känna av hur mycket betong som extruderas och därefter reglera hastigheten.



Figur 20 - Extrudering med munstycke

Vid extrudering med robot av recept 2b kunde 22,5 lager ($h=45$ cm) byggas innan robotens räckvidd var nådd, se *Figur 21* och *Figur 22*. Under denna extrudering är det också viktigt att munstycket är helt fyllt med betong för att lagren skall bli så homogena som möjligt. Som kan ses i *Figur 21* är några av de undre lagren deformerade och betongmassan har tryckts ut på sidan. Detta beror inte på att betongen deformerades av de övre lagrens tyngd. I början av extruderingen var robotens rörelsemönster helt förprogrammerat och processen var automatiserat (utom tillförseln av ny betong i munstycket). Munstycket matade ut betongen snabbare än robotens rörelse och på så sätt blev lagren tjockare än hålet på munstycket. När nästa lager sedan skulle tillföras mosade munstycket det undre lagren. Munstyckets höjdläge var fel relativt lagertjockleken. Roboten och munstycket stoppades. Höjden, hastigheten samt lagerlängden fick regleras för hand. Det sista (översta) lagret blev inhomogent, detta beror på att massan i munstycket tog slut. De undre lagren var betydligt jämnare och ytan var slät, se *Figur 23* som jämförelse.

Möjligheten att extrudera betong i ett vinkelrätt hörn testades och resultaten kan ses i *Figur 23*. När roboten roterade munstycket påverkade murslevarna hörnets utformning. Om murslevarna tas bort eller optimeras kan troligtvis ett bättre resultat uppnås.



Figur 21 - Extrudering med robot, olika vyer



Figur 22 - Extrudering med robot



Figur 23 - Extrudering med robot, vinkelräta hörn

5 Slutsatser

3D-printning av betong är en lager på lager baserad tillverkningsteknik som följer ett förprogrammerat mönster. Betongen extruderas ur ett munstycke som är monterat på en robot. Massan trycks, skruvas eller pumpas ut ur munstycket. Betongsammansättningen beror inte bara på de konstruktioner som ska byggas utan även på utformningen av munstycket. Ett recept som fungerar med alla typer av munstycken går därför inte att fastställa.

Konsistensen för denna betong kan inte vara för styv, då går den inte att extrudera, och den får inte vara för lös, då uppnås inte rimlig byggbarhet. Rimlig byggbarhet innebär att de undre lagren inte deformeras märkvärt av de övre lagren. Med munstycket och betongen som använts i denna studie uppnås god balans, mellan arbetbarhet och byggbarhet, om betongen i färskt tillstånd har en skjuvhållfasthet (konsistens) mellan 0,6-1,0 kPa. För att uppnå god konsistens innehåller recepten bland annat mycket retarder och höga halter av cement. Betongens höga cementhalten bidrar till höga koldioxidutsläpp vilket är dåligt för miljön. Det är osäkert om mängden retarder är nödvändig, ytterligare utredningar av detta krävs. Om retardern minskas förändras konsistensen vilket gör att receptet måste optimeras på nytt. Konsistensen visade sig även vara mycket känslig för små variationer i vattenhalt, detta gör att olika typer av blandare/blandningsmetoder också påverkar konsistensen. En styv konsistens gjorde det möjligt att bygga jämna lager. Den tidiga strukturutvecklingen hos betongmassan resulterade i att ett flertal lager kunde byggas ovanpå varandra utan märkbar deformation av de undre lagren. Lufthalten och därmed beständigheten hos betongen är beroende av metoden som används för att extrudera massan eftersom det inte är möjligt att kompaktera betongen efter extrudering.

Receptet som tagits fram ger en betong med hållfastheter i samma storleksordning som högpresterande betong. Inblandningen av plastfiber har inte gett någon verifierbar ökning av betongens hållfasthet, varken efter 1 dygn eller 28 dygn. Den höga tryckhållfastheten är en effekt av det låga vbt som krävs för att få en extruderbar och byggbar konsistens. Om hållfastheten behöver vara så hög behöver undersökas vidare.

5.1 Förslag till vidare studier

- Användningen av cement bidrar till att mycket koldioxid frigörs, därför är det intressant om det finns andra material som kan ersätta en viss mängd av cementet
- Hur påverkar den höga lufthalten betongens beständighet?
- Hur påverkar vidhäftningen mellan lagren hållfastheten?
- Går det att tillverka betong med samma arbetbarhet och byggbarhet med högre vbt och/eller vct?
- Hur och med vad armeras dragna konstruktioner?
- Ytterligare optimering av betongmassa med robot
- Hur och med vad isoleras betongelement?

En utveckling av 3D-print-tekniken och betongen har otvivelaktigt stor potential att effektivisera byggnadsbranschen. Inte bara inom automatiserad tillverkning av betongelement

utan även med andra byggnadsmaterial, t.ex. trä och plast. Förslagsvis kan en massa av plast eller sågspån och lim också 3D-printas. Möjligheterna är många men det krävs forskning och resurser för att utveckla tekniken. I framtiden kanske 3D-printning av byggnader eller element är vanligare än tillverkning med konventionella metoder.

6 Litteraturförteckning

12390-1, S.-E., 2012. *Provning av hårdnad betong - Del 1: Form, dimensioner och övriga krav på provkroppar och formar*, Stockholm: Swedish Standards Institute.

Bartos, P., 1992. *Fresh Concrete Properties and Tests*. Paisley: Elsevier Science Publisher B.V.

Bernander, K. G., 1982. Betongelement. i: I. Börtemark, G. Möller & N. Petersons, red. *Betonghandbok Arbetsutförande, Andra upplagan*. Stockholm: AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, pp. 386-447.

Burström, P. G., 2009. *Byggnadsmaterial - Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*. 2 red. Lund: Studentlitteratur AB.

Cementa AB, 2014. *Basement - TEKNISK BESKRIVNING*, Stockholm: Cementa AB.

Fagerlund, G., 1994. Högrepresterande betong. i: C. Ljungkrantz, G. Möller & N. Petersons, red. *Betonghandbok Material, utgåva 2*. Stockholm: AB Svensk betong och Cementa AB, pp. 925-963.

Fagerlund, G., 1999. Kapitel 8 - Temperaturutveckling hos betong. i: *Kurskompendium - Betong i ett LivsCykelPerspektiv, VBMN10*. Lund: Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola, pp. 1-13.

Hjort, B. & Munke, J.-E., 1982. Armeringsarbeten. i: I. Börtemark, G. Möller & N. Petersons, red. *Betonghandbok Arbetsutförande, Andra upplagan*. Stockholm: AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, pp. 72-130.

Johansson, S.-E., Ljungkrantz, C., Möller, G. & Petersons, N., 1994. Tillsatsmaterial. i: C. Ljungkrantz, G. Möller & N. Petersons, red. *Betonghandbok Material, utgåva 2*. Stockholm: AB Svensk byggtjänst och Cementa AB, pp. 123-145.

Khoshnevis, B., 2004. *Houses of the Future- Construction by Contour Crafting- Building huses for everyone*, Los Angeles: University of Southern California.

Le, T. T. et al, 2012. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*, 45(8), pp. 1221-1232.

Lim, S. et al, 2011. *DEVELOPMENT OF A VIABLE CONCRETE PRINTING PROCESS*. Seoul, International Association for Automation and Robotics in Construction (I.A.A.R.C.).

Möller, G., Petersons, N. & Elfgrén, L., 1994. Hållfasthet. i: C. Ljungkrantz, G. Möller & N. Petersons, red. *Betonghandbok Material, utgåva 2*. Stockholm: AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, pp. 333-347.

Nationalencyklopedin, u.d. *betong*. [Online]

Available at: <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/betong>

[Använd 15 05 2015].

Neville, A. M. & Brooks, J. J., 1990. *Concrete Technology*. 2 red. Harlow: Longman Scientific & Technical.

Nordström, E. & Holmgren, J., 2009. *Sprutbetonghandboken - reparation*, Stockholm: Elforsk.

Olnhausen, W. v., 1994. Betongbyggnadsteknikens nuläge och framtid. i: C. Ljungkrantz, G. Möller & N. Petersons, red. *Betonghandbok Material, utgåva 2*. Stockholm: AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, pp. 17-32.

Skarendahl, Å., 1994. Fiberbetong. i: C. Ljungkrantz, G. Möller & N. Petersons, red. *Betonghandbok Material, utgåva 2*. Stockholm: AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, pp. 965-976.

SS 02 71 25, 1991. *Geotekniska provningsmetoder - Skjuvhållfasthet - Fallkonförsök - Kohesionsjord*, Stockholm: SIS - Standardiseringskommisionen i Sverige.

SS 13 72 32, 2005. *Betongprovning - Hårdnad betong - Elasticitetsmodul vid tryckprovning*, Stockholm: Swedish Standards Institute.

SS-EN 12350-7, 2009. *Provning av färsk betong - Del 7: Lufthalt - Tryckmetoder*, Stockholm: Swedish Standards Institute.

SS-EN 12390-3, 2009. *Provning av hårdnad betong - Del 3: Tryckhållfasthet hos provkroppar*, Stockholm: Swedish Standards Institute.

SS-EN 12390-5, 2009. *Provning av hårdnad betong - Del 5: Böjdraghållfasthet*, Stockholm: Swedish Standards Institute.

Statistiska centralbyrån, 2010. *Arbetsorsakade besvär 2010*, u.o.: Arbetsmiljöverket.

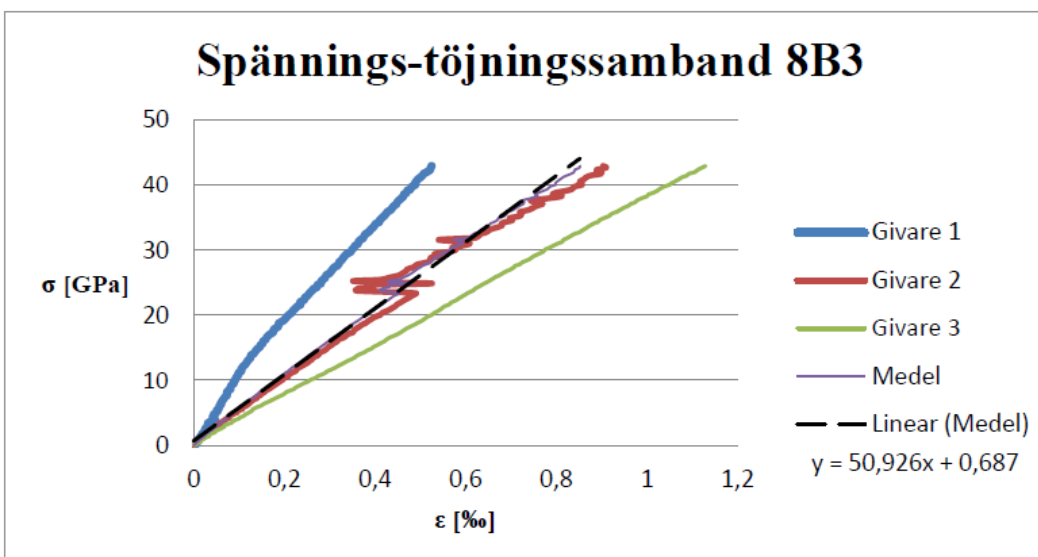
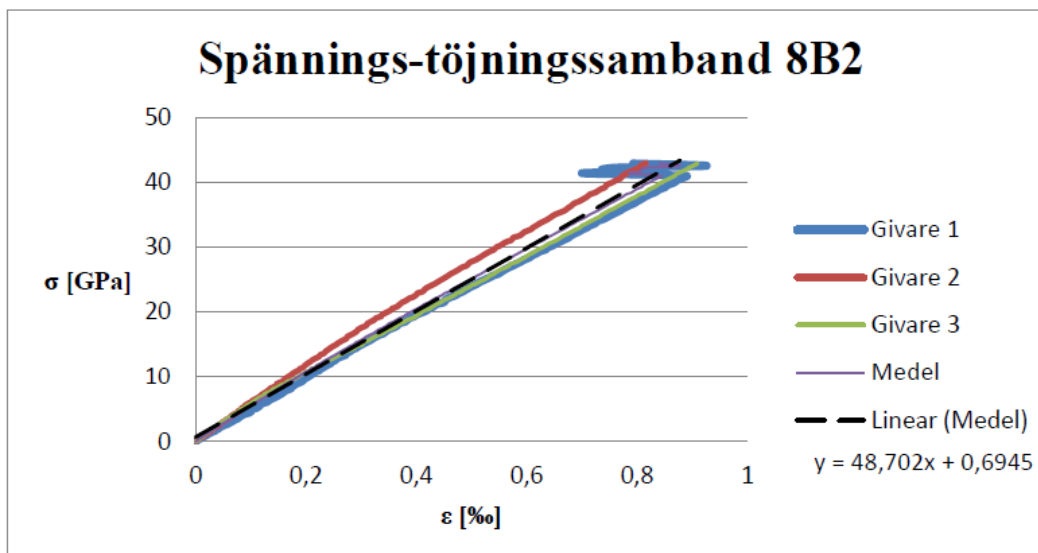
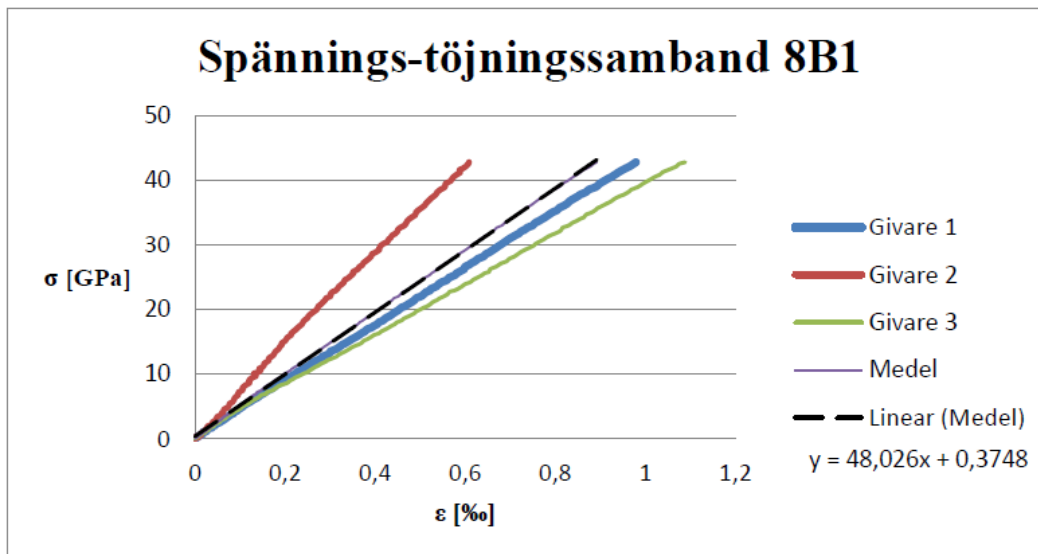
Stott, R., 2015. *ArchDaily*. [Online]

Available at: <http://www.archdaily.com/591331/chinese-company-creates-the-world-s-tallest-3d-printed-building/>

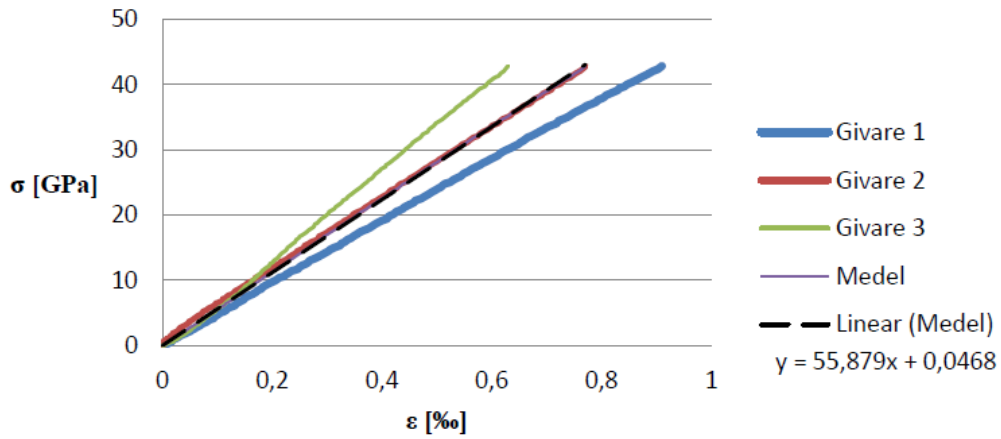
[Använd 30 03 2015].

Tepfers, R. & Törnwall, B., 1994. Armering. i: C. Ljungkrantz, G. Möller & N. Petersons, red. *Betonghandbok Material, utgåva 2*. Stockholm: AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, pp. 147-173.

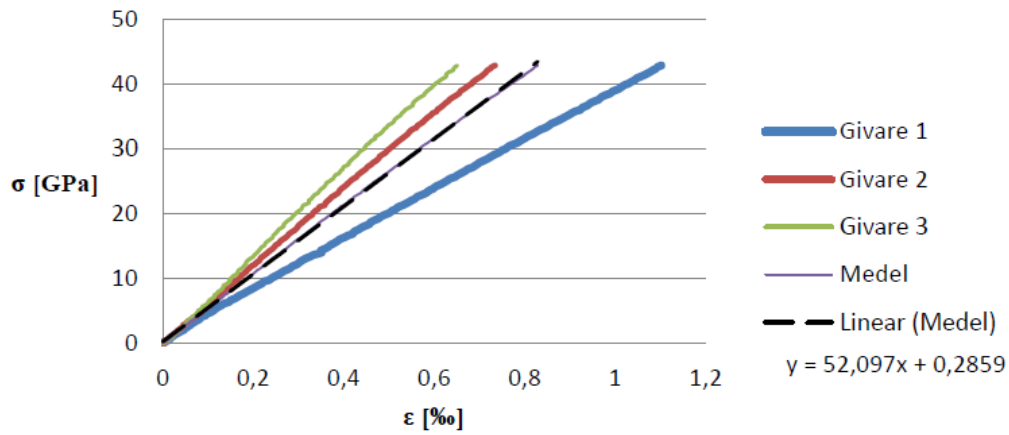
Bilaga I - Spännings – töjnings samband



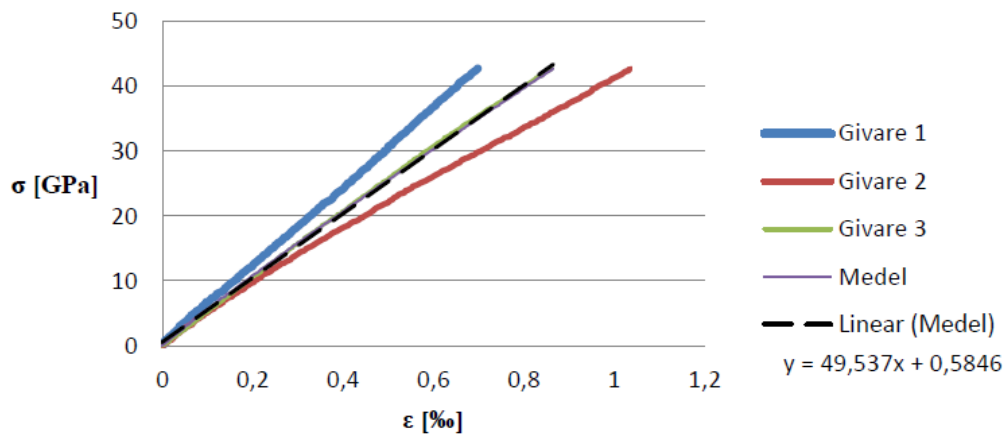
Spännings-töjnings samband 9B1



Spännings-töjnings samband 9B2



Spännings-töjnings samband 9B3



Bascement

CEM II/A-V 52,5 N



CEMENTTYP OCH CEMENTKLASS

Bascement är ett Portland-flygaskcement som tillverkas i Slite. Det har ordinär hållfasthetsutveckling i tidig ålder och hög normaltidshållfasthet. Det kan användas vid alla vanliga betongarbeten, t.ex. husbyggnad. Tekniska data återfinns på sidan 2 i detta produktblad.

NORMER OCH KONTROLL

Bascement uppfyller kraven enl. SS-EN 197-1 Cement-Del 1: Sammansättning och fordringar för ordinära cement.

Bascement är CE-märkt med certifikatnummer 0402-CPD-SC0784-09.

FÖRPACKNING, DISTRIBUTION OCH LAGRING

Leverans sker i lös vikt (bulk). Bascement ska lagras i torr och tät silo då fukt skadar cementet. Lagringstiden begränsas till högst 6 månader efter leverans då den utförda kromatreduktionen successivt förlorar sin effekt. Det åligger alltid köparen att tillse och kunna visa att lagringsplatsen är torr och tät samt att lagringstiden iakttas.

ALLMÄNNA LEVERANSBESTÄMMELSER

För leverans av Bascement gäller ABM 07 och Cementas tillägg och förtydliganden med bilagor.

SÄKERHET VID HANTERING

All cement skall förvaras oåtkomlig för barn och är farlig att förtära. Cement i ögonen ger risk för allvarliga ögonskador. Fuktig cement bildar kalciumhydroxid som verkar irriterande på hud och andningsorgan. För fullständig information och skyddsanvisningar se Säkerhetsdatablad.

PRODUKTINFORMATION

För senaste uppdatering av Produktblad och Säkerhetsdatablad - se vår hemsida www.cementa.se.

Teknisk data

Basement CEM II/A-V 52,5 N

Basement uppfyller kraven för Portland-flygaskecement enligt SS-EN 197-1.
Nedan redovisas typvärden för Basement samt gällande krav enligt standarden.

Fysikaliska och kemiska data

Egenskap	Typvärde	Sort	Krav	Gällande Standard
Specifik yta, Blaine	450	m ² /kg		
Bindetid	150	min	≥ 45	EN 197-1
Tryckhållfasthet 1d *	21	MPa		
Tryckhållfasthet 2d *	31	MPa	≥ 20,0	EN 197-1
Tryckhållfasthet 28d *	58	MPa	≥ 52,5	EN 197-1
Kompaktdensitet	3000	kg/m ³		
Skrymdensitet	1250	kg/m ³		
Ljushet	28	%		
Total alkali	1,1	%		
Sulfathalt som SO ³	3,5	%	≤ 4,0	EN 197-1
Klorid, Cl-	0,08	%	≤ 0,10	EN 197-1
Vattenlöslig Cr ⁺⁶	< 2	ppm	≤ 2	EG 2003/53 KIFS 2004:6

* Mätt på normbruk

CEMENTA
HEIDELBERGCEMENT Group

Box 47210, 100 74 Stockholm
Telefon 08-625 68 00
Telefax 08-753 36 20
E-post info@cementa.se
www.cementa.se

Bilaga III – Microsilica Grade 940-U



Grade 940 for Concrete

Product details

Elkem Microsilica® Grade 940 is a dry silica fume powder. It is available in two forms: Undensified (U) and Densified (D). In use, Elkem Microsilica® Grade 940 improves the properties and performance of high performance concrete and specialist mortar formulations. It acts physically to optimise particle packing of the mixture, and chemically as a highly reactive pozzolan.

Packing

Available in a range of packaging options:

- 25 kg paper bags
- Big bags in various designs & sizes
- Bulk road tanker

Please contact our representative for more details.

Storage & handling

Elkem Microsilica® Grade 940 should be stored in dry conditions and not exposed to moisture.

Quality assurance & Quality control

Elkem Silicon Materials' Management System for development, processing and supply of Elkem Microsilica® is certified to ISO 9001:2000. The chemical and physical properties of Elkem Microsilica® are regularly tested.

Specification

Chemical and physical properties

Property	Value
SiO ₂	Minimum 90 %
Loss on Ignition	Maximum 3 %
Coarse particles >45µm	Maximum 1.5 %*
Bulk Density (U)	200 – 350 kg/m ³
Bulk Density (D)	500 – 700 kg/m ³

* Tested on Undersifted.
Test methods are available on request.

Bilaga IV – SikaTard-932

Construction

Tekniskt datablad
Version 2014-11-10
SikaTard®-932

SikaTard®-932

Långtidsretarderande betongtillsatsmedel

Användning	
Beskrivning	SikaTard®-932 levereras som bruksfärdig lösning och kan kombineras med Sikas flyttillsatsmedel. Egenskaper: SikaTard®-932 förlänger lagringstiden för färsk betong upp till 24 timmar och påverkar inte nämnvärt betongens tillstyvnadstid, tryckhållfasthet, brottseghet eller vidhäftning efter sprutning. För vissa blandningar kan konsistensförlust förekomma. Blandningen kan behöva röras om med vissa intervall. Förprovning rekommenderas. SikaTard®-932 är CE-märkt i enlighet med: EN 934-2 CE-certifikat nr: 1274-CPR-704. Produkten uppfyller kriterierna för kemiska produkter i BASTA.
Användningsområde	SikaTard®-932 är ett långtidsretarderande betongtillsatsmedel som möjliggör förlängd lagringstid av den färska betongen (upp till 24 timmar). Medlet är främst avsett för våtsprutad betong.
Tekniska Data	
Färg och form	Gulaktig vätska
Densitet	1,16 ± 0,03 kg/dm ³
pH	3,5 ± 1
Alkaliinnehåll, ekv Na₂O	<6,0 % av medlets vikt
Kloridhalt	<0,10 vikts-%
Torrhalt	27 ± 1 vikt-%
Förpackning	Dunk20, Fat 220 kg, IBC 1100 kg samt tankbil
Lagringstid	Minst 9 månader från leveransdatum.
Bruksanvisning	Som en grundregel rekommenderas en dosering av 0,25-1,2 % av cementvikten. Som ett riktvärde ger 0,6 % dosering ca 8 timmars retardation. Doseringsbehovet varierar med bl a cementsort och temperatur. Förprov med aktuella material och aktuella förhållanden rekommenderas. SikaTard®-932 tillsätts tidigast med betongens blandningsvattnet. Medlet får inte tillsättas direkt på det torra cementet. I stationär blandare krävs normalt en blandningstid av 1,5-3 minuter. I roterbil krävs blandning i 5-7 minuter med högsta roterande hastighet. Automatisk doseringsutrustning för vikt-dosering rekommenderas. Undvik korrosionsbenägna material i direkt kontakt med SikaTard®-932. Utrustning rengöres med vatten.
Normer, bestämmelser och kontroll	Egenkontroll utförs på varje tillverkad sats enligt skriftliga instruktioner i Sikas certifierade kvalitetssäkringssystem enligt ISO 9001.
Hälsa & Miljö	
Hälsa & Miljö	Se separat säkerhetsdatablad.
Lagstiftning	Informationen och i synnerhet rekommendationerna avseende applikation och slutanvändning av Sika-produkterna lämnas i god tro baserat på Sikas nuvarande kunskap och erfarenhet av produkterna när dessa lagras, hanteras och används under normala förhållanden på ett korrekt sätt. I praktiken kan differenser i material, underlag och den aktuella platsen variera på sådant sätt att ingen garanti vad gäller användbarhet eller lämplighet för ett visst ändamål kan lämnas. Med hänsyn härtill kan något rättsligt ansvar av vad slag det må vara varken härledas från denna information eller från någon skriftlig rekommendation eller i övrigt beträffande produkten lämnade råd. Hänsyn måste vid användningen även tas till tredje mans ägande och andra eventuella rättigheter. Alla order accepteras under förutsättningen av att Sikas aktuella försäljnings- och leveransbestämmelser är gällande. Användaren skall alltid använda sig av den senaste utgåvan av den aktuella produktens tekniska datablad, vilket kan erhållas vid förfrågan eller på hemsidan www.sika.se .



Sika Sverige AB
Domnarvsgatan 15
Box 8061
SE-163 08 Spånga
Sverige

Tel. +46 8 621 89 00
Fax +46 8 621 89 89
www.sika.se



Bilaga V – Sikament Evo 26

Construction

Tekniskt datablad
Version 2014-10-29
Sikament® EVO-26

Sikament® EVO-26

Flyt/HRWR tillsatsmedel till betong

Användning

Beskrivning Sikament EVO 26 är ett supereffektivt vattenreducerande flyttillsatsmedel av den tredje generationen som ger betongen god arbetbarhet och god styrkeutveckling. Sikament EVO 26 är CE- märkt i enlighet med: EN 934-2. CE-certifikat nr: 1274-CPR-704. Produkten uppfyller kriterierna för kemiska produkter i BASTA.

Användning Sikament EVO 26 kan användas till alla typer av betongkvaliteter särskilt inom:

- Självkompakterande
- Sprutbetong
- Betong med högt krav på vattenreduktion (upp till 40 %)
- Höghållfast betong
- Självtorkande betong

samt där förlängt öppethållande hos betongen är önskvärt.

Tekniska Data

Färg och form Blå vätska
Densitet 1,08 ± 0,02 kg/dm³
pH-värde 4,5 ± 1
Kloridhalt <0,10 % av medlets vikt
Alkaliinnehåll, ekv Na₂O <0,8 % av medlets vikt
Korrosionsegenskaper Icke relevant när bruksanvisning följs
Torrhalt 40 ± 1 vikt-%
Viskositet Lättflytande
Dosering 0,1-1,5 % av cementvikten

Tillverkningsplats Sika Sverige AB
Domnarvsgatan 15
163 08 Spånga
SVERIGE

Förpackning Dunk 20 kg, fat 220 kg, IBC 1080 kg samt tankbil.

Lagringstid Minst 9 månader från leveransdatum (tankbil 16 månader). Förvaras frostfritt i täckta kärl. Eventuell omröring skall ske mekanisk alt. med "rundpumpning". Undvik luftinblåsning.

Farliga ämnen Se separat säkerhetsdatablad.

Bruksanvisning

- Automatisk doseringsutrustning för vikt- eller volymdosering rekommenderas, beakta densitet och torrhalt.
- Tillsätt Sikament EVO 26 tidigast i samband med blandningsvattnet. Genom att fördröja tillsättandet 20-30 sekunder ökar medlets effekt och kan därigenom bättre utnyttjas. För optimal effekt kan tillsättningsordningen vara annorlunda än ovanstående, detta skall dock provas för varje enskilt fall.
- Inverkan av överdosering kan förorsaka stenseparation vid flytkonsistenser och felproportionerad betong. Liten retarderande effekt.
- Sikament EVO 26 kan även kombineras med Sikas övriga tillsatsmedel, varvid varje medel tillsätts separat.
- Rekommenderad blandningstid är 30-180 sek beroende på blandartyp.
- Rekommenderad dosering är ca 0,1-1,2 % av cementvikten.
- Inverkan av detta tillsatsmedel kan variera beroende på vilket cement som används.
- Rengör utrustningen med vatten.
- Förprov skall utföras med de aktuella delmaterialen till betongen enligt gällande betongbestämmelser för klarläggande att avsedd effekt uppnås.
- Använd plast, glasfiber eller rostfria tankar vid hantering av Sikament EVO 26



Bilaga VI – Crackstop

Construction

Tekniskt datablad
Version 2014-03-28
Crackstop

Crackstop

Polypropylenfiber till betong och bruk

Användning
Beskrivning Crackstop är framställd av förädlad polypropylen och är beständig mot betongens alkalitet. Crackstop har under framställningen genomgått processer som ger goda dispersionsegenskaper i färsk betongmassa samt optimal förankring i den härdnade betongen/bruket. Crackstop uppfyller kraven enligt EN 14889-2. Produkten uppfyller kriterierna för kemiska produkter i BASTA.

Användningsområde Crackstop används i alla cementbundna material såsom betong och cementbruk.

- Crackstop har två huvudsakliga användningsområden:
- Förhindra bildandet av plastiska krympsprickor
 - Förhindra brandspjälkning

Crackstop förbättrar även den färska betongens sammanhållning i den färska blandningen. Crackstop används till alla slag av betongbeläggningar och reparationsbruk samt till sprutbetong där Crackstop bl a reducerar spill pga återstudsande material. Vid användning för att förhindra brandspjälkning skall förprovning utföras.

Produktdata

Färg Vit
Typ Polypropylenfiber
Lagring Obegränsad i öppnad originalförpackning.
Förpackning Crackstop finns i tre olika dimensioner och levereras i följande förpackningar:
Ø: 18 µm ; L: 6 mm Förpackning: 0,5 kg
Ø: 18 µm ; L: 6 mm Förpackning: 0,6 kg eller 10 kg
Ø: 18 µm ; L: 12 mm Förpackning: 0,6 kg eller 10 kg
Ø: 32 µm ; L: 6 mm Förpackning: 20 kg

Tekniska Data

Densitet (vid +20°C) 0,9 kg/dm³
Fibertäckning 6 mm och 12 mm
Specifik yta 225 m²/kg
Användningstemp. Max +145°C

Utförande

Allmänt Tillsätt Crackstop i betongen eller bruksblandningen samtidigt med övriga delmaterial eller så tidigt som möjligt i blandningsprocessen för att säkra effektiv dispergering utan att den normala blandningstiden förlängs väsentligt. Transportbetong för leverans till byggarbetsplats kan tillsättas Crackstop på betongfabriken eller direkt i roterande transportbehållare (roterbilsaggregat). Normal dosering för Crackstop är 0,6-2,0 kg/m³ betong. I betongbjälklag alt. platta på mark rekommenderas 0,6 kg/m² betong. Iblandning av 0,6 kg Crackstop/m² betong reducerar betongens sättmått med ca 10%. Ex: 12 cm sättmått reduceras till 11 cm. Arbetbarheten påverkas dock inte. För cementbruk/betong med stenmaterial mindre än 8 mm rekommenderas Crackstop 6 mm. För betong med större stenmax rekommenderas Crackstop 12 mm.

Hälsa & Miljö

Hälsa & Miljö Se separat säkerhetsdatablad.

Lagstiftning

Informationen och i synnerhet rekommendationerna avseende applikation och slutanvändning av Sika-produkterna lämnas i god tro baserat på Sikas nuvarande kunskap och erfarenhet av produkterna när dessa lagras, hanteras och används under normala förhållanden på ett korrekt sätt. I praktiken kan differenserna i material, underlag och den aktuella platsen variera på sådant sätt att ingen garanti vad gäller användbarhet eller lämplighet för ett visst ändamål kan lämnas. Med hänsyn härtill kan något rättsligt ansvar av vad slag det må vara värken härledas från denna information eller från någon skriftlig rekommendation eller i övrigt beträffande produkten lämnade råd. Hänsyn måste vid användningen även tas till tredje mans ägande och andra eventuella rättigheter. Alla order accepteras under förutsättningen av att Sikas aktuella försäljnings- och leveransbestämmelser är gällande. Användaren skall alltid använda sig av den senaste utgåvan av den aktuella produktens tekniska datablad, vilket kan erhållas vid förfrågan eller på hemsidan www.sika.se.



Sika Sverige AB
Domnarvsgatan 15
Box 8061
SE-163 08 Spånga
Sverige

Tel. +46 8 621 89 00
Fax: +46 8 621 89 89
www.sika.se



Bilaga VII – Recept

Receptnamn	1a	$v_{ct,sv}$	0,260	Satsstorlek (L)			
Betongkvalitet		Densitet (kg/m ³)	2258				
K-värde	Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Densitet (kg/m ³)	Volym (m ³)	Torrhalt (%)	Labrecept (kg)
	Vatten		214,5	1000	0,2145		0,315
	Basement		750,0	3000	0,2500		1,125
	Cement		75,0	2800	0,0288		0,113
1	Silikastoft						
	Tillsatsmaterial						
	Sika Crackstop 12 mm		1,2	900	0,0013		0,002
	Övriga Material						
	Sikament Evo 26	1,00%	7,50	1080	0,0069	40,00%	0,0113
	Sika Tard 932	0,50%	3,75	1160	0,0032	27,00%	0,0056
	Tillsatsmedel						
	Lufthalt	4,0%			0,0400		
						Fuktkvot (%)	
	Sand 15	100,0%	1206	2650	0,4551		1,81
	Ballast < 8mm						
	Ballast < 8mm						
	Ballast < 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						

CEMENTA
HEIDELBERGCEMENT Group

AVA indata	
Mortar < 6mm	96,0%
Paste	50,5%

Summa Ballast	100,0%
Volym Pasta	54,5%
Volym Ballast	45,5%
Sand/Bindemedel	1,462

Receptnamn	1b		vc _{sv}	0,323			
Betongkvalitet			Densitet (kg/m ³)	2197			
K-värde	Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Densitet (kg/m ³)	Volym (m ³)	Torrhalt (%)	Satsstorlek (L)
	Vatten		253,0	1000	0,2530		1,5823
	Basement		711,0	3000	0,2370		0,386
	Cement						1,125
1	Silikastoft		71,5	2600	0,0275		0,113
	Tillsatsmaterial						
	Sika Crackstop 12 mm		1,2	900	0,0013		0,002
	Övriga Material						
	Sikament Evo 26	2,01%	14,29	1080	0,0132	40,00%	0,0226
	Sika Tard 932	0,50%	3,56	1160	0,0031	27,00%	0,0056
	Tillsatsmedel						
	Lufthalt	4,0%			0,0400	Fuktkvot (%)	
	Sand 15	101,5%	1143	2650	0,4312		1,81
	Ballast < 8mm						
	Ballast < 8mm						
	Ballast < 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						

Summa Ballast	101,5%
Volym Pasta	57,5%
Volym Ballast	42,5%
Sand/Bindemedel	1,460

AVA indata	
Mortar < 6mm	96,0%
Paste	53,5%

CEMENTA
HEIDELBERGCEMENTGroup

Receptnamn	1c			vc _{gsv}	0,348		
Betongkvalitet				Densitet (kg/m ³)	2173		
K-värde	Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Densitet (kg/m ³)	Volym (m ³)	Torrhalt (%)	Labrecept (kg)
	Vatten		267,0	1000	0,2670		0,417
	Basement		697,5	3000	0,2325		1,125
	Cement						
1	Silikastoft		70,0	2600	0,0269		0,113
	Tillsatsmaterial						
	Sika Crackstop 12 mm		1,2	900	0,0013		0,002
	Övriga Material						
	Sikament Evo 26	2,01%	14,02	1080	0,0130	40,00%	0,0226
	Sika Tard 932	0,50%	3,49	1160	0,0030	27,00%	0,0056
	Tillsatsmedel						
	Lufthalt	4,0%			0,0400		
	Sand 15	101,5%	1120	2650	0,4225		1,81
	Ballast < 8mm						
	Ballast < 8mm						
	Ballast < 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Summa Ballast	101,5%					
	Volym Pasta	58,4%					
	Volym Ballast	41,6%					
	Sand/Bindemedel	1,459					
	AVA indata						
	Mortar < 6mm				96,0%		
	Paste				54,4%		

CEMENTA
HEIDELBERGCEMENT Group

Receptnamn	2a		$v_{ct,sv}$	0,260			
Betongkvalitet			Densitet (kg/m ³)	2227			
K-värde	Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Densitet (kg/m ³)	Voly m (m ³)	Torrhalt (%)	Labrecept (kg)
	Vatten		218,0	1000	0,2180		0,213
	Basement		667,8	3000	0,2226		0,668
	Cement						
1	Siikastoft		84,0	2600	0,0323		0,084
1	Flygaska		88,2	2280	0,0387		0,088
	Sika Crackstop 12 mm		1,2	900	0,0013		0,001
	Övriga Material						
	Sikament Evo 26	1,26%	8,41	1080	0,0078	40,00%	0,0084
	Sika Tard 932	0,50%	3,34	1160	0,0029	27,00%	0,0033
	Tillsatsmedel						
	Lufthalt	4,0%			0,0400		
						Fuktkvot (%)	
	Sand 15	80,0%	925	2650	0,3491		0,93
	Baskarp 95	20,0%	231	2650	0,0873		0,23
	Ballast < 8mm						
	Ballast < 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						

Summa Ballast	100,0%
Voly m Pasta	56,4%
Voly m Ballast	43,6%
Sand/Bindemedel	1,377

AVA indata	
Mortar < 6mm	96,0%
Paste	52,4%

CEMENTA
HEIDELBERGCEMENT Group

Receptnamn	2b		vct _{av}	0,275	Satsstorlek (L)		
Betongkvalitet			Densitet (kg/m ³)	2210	1,013		
K-värde	Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Densitet (kg/m ³)	Volym (m ³)	Torrhalt (%)	L.ubrecept (kg)
	Vatten		228,0	1000	0,2280		0,226
	Basement		659,0	3000	0,2197		0,668
	Cement						
1	Silikastoft		83,0	2600	0,0319		0,084
1	Flygaska		87,0	2280	0,0382		0,088
	Sika Crackstop 12 mm		1,2	900	0,0013		0,001
	Övriga Material						
	Sikament Evo 26	1,26%	8,30	1080	0,0077	40,00%	0,0084
	Sika Tard 932	0,50%	3,30	1160	0,0028	27,00%	0,0033
	Tillsatsmedel						
	Lufthalt	4,0%			0,0400		
						Fuktkvot (%)	
	Sand 15	80,0%	912	2650	0,3443		0,92
	Baskarp 95	20,0%	228	2650	0,0861		0,23
	Ballast < 8mm						
	Ballast < 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						

Summa Ballast	100,0%
Volym Pasta	57,0%
Volym Ballast	43,0%
Sand/Bindemedel	1,376

AVA indata	
Mortar < 6mm	96,0%
Paste	53,0%

CEMENTA
HEIDELBERGCEMENT Group

Receptnamn	3a		$v_{ct,sv}$	0,260		
Betongkvalitet			Densitet (kg/m ³)	2227		
K-värde	Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Volym (m ³)	Torrhalt (%)	Labrecept (kg)
	Vatten		218,0	0,2180		0,213
	Basement		667,8	0,2226		0,668
	Cement					
1	Silikastoft		84,0	0,0323		0,084
1	Flygaska		88,2	0,0387		0,088
	Sika Crackstop 12 mm		1,2	0,0013		0,001
	Övriga Material					
	Sikament Evo 26	1,26%	8,41	0,0078	40,00%	0,0084
	Sika Tard 932	0,50%	3,34	0,0029	27,00%	0,0033
	Tillsatsmedel					
	Lufthalt	4,0%		0,0400		
					Fuktkvot (%)	
	Sand 15	65,0%	752	0,2837		0,75
	Bas karp 95	35,0%	405	0,1527		0,40
	Ballast < 8mm					
	Ballast < 8mm					
	Ballast > 8mm					
	Ballast > 8mm					
	Ballast > 8mm					

Summa Ballast	100,0%
Volym Pasta	56,4%
Volym Ballast	43,6%
Sand/Bindemedel	1,377

AVA indata	
Mortar < 6mm	96,0%
Paste	52,4%

CEMENTA
HEIDELBERGCEMENT Group

Receptnamn	3b	vc _{av}	0,275	Satsstorlek (L)	1,013		
Betongkvalitet		Densitet (kg/m ³)	2210	Labrecept (kg)			
K-värde	Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Densitet (kg/m ³)	Volym (m ³)	Torrhalt (%)	Fuktkvot (%)
	Vatten		228,0	1000	0,2280		
	Basement		659,0	3000	0,2197		
	Cement						
1	Silikastoft		83,0	2600	0,0319		
1	Flygaska		87,0	2280	0,0382		
	Sika Crackstop 12 mm		1,2	900	0,0013		
	Övriga Material						
	Sikament Evo 26	1,26%	8,30	1080	0,0077	40,00%	0,0084
	Sika Tard 932	0,50%	3,30	1160	0,0028	27,00%	0,0033
	Tillsatsmedel						
	Lufthalt	4,0%			0,0400		
	Sand 15	65,0%	741	2650	0,2798		0,75
	Baskarp 95	35,0%	399	2650	0,1506		0,40
	Ballast < 8mm						
	Ballast < 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Summa Ballast	100,0%					
	Volym Pasta	57,0%					
	Volym Ballast	43,0%					
	Sand/Bindemedel	1,376					
	AVA indata						
	Mortar < 6mm				96,0%		
	Paste				53,0%		

CEMENTA
HEIDELBERGCEMENTGroup

Receptnamn	4a		vct _{gav}	0,260			
Betongkvalitet			Densitet (kg/m ³)	2251			
K-värde	Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Densitet (kg/m ³)	Volym (m ³)	Torrhalt (%)	Labrecept (kg)
	Vatten		218,0	1000	0,2180		0,276
	Basement		756,0	3000	0,2520		0,983
	Cement						
1	Silikastoft		84,0	2600	0,0323		0,109
1	Flygaska			2280			
	Sika Crackstop 12 mm		1,2	900	0,0013		0,002
	Övriga Material						
	Sikament Evo 26	1,11%	8,39	1080	0,0078	40,00%	0,0109
	Sika Tard 932	0,50%	3,78	1160	0,0033	27,00%	0,0049
	Tillsatsmedel						
	Lufthalt	4,0%			0,0400		
						Fuktkvot (%)	
	Sand 15	80,0%	944	2650	0,3563		1,23
	Baskarp 95	20,0%	236	2650	0,0891		0,31
	Ballast < 8mm						
	Ballast < 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						

Summa Ballast	100,0%
Volym Pasta	55,5%
Volym Ballast	44,5%
Sand/Bindemedel	1,405

AVA indata	
Mortar < 6mm	96,0%
Paste	51,5%

CEMENTA
HEIDELBERGCEMENT Group

Receptnamn	4b		vc _{kv}	0,275		
Betongkvalitet			Densitet (kg/m ³)	2234		
K-värde	Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Volym (m ³)	Torrhalt (%)	Labrecept (kg)
	Vatten		228,0	0,2280		0,293
	Basement		746,5	0,2488		0,983
	Cement					
1	Silikastoft		83,0	0,0319		0,109
1	Flygaska					
	Sika Crackstop 12 mm		1,2	0,0013		0,002
	Övriga Material					
	Sikament Evo 26	1,11%	8,29	0,0077	40,00%	0,0109
	Sika Tard 932	0,50%	3,73	0,0032	27,00%	0,0049
	Tillsatemedel					
	Lufthalt	4,0%		0,0400		
					Fuktkvot (%)	
	Sand 15	80,0%	931	0,3512		1,23
	Baskarp 95	20,0%	233	0,0878		0,31
	Ballast < 8mm					
	Ballast < 8mm					
	Ballast > 8mm					
	Ballast > 8mm					
	Ballast > 8mm					

Summa Ballast	100,0%
Volym Pasta	56,1%
Volym Ballast	43,9%
Sand/Bindemedel	1,403

AVA indata	
Mortar < 6mm	96,0%
Paste	52,1%

CEMENTA
HEIDELBERGCEMENT Group

Receptnamn	5a	vct _{av}	0,275	Satsstorlek (L)			
Betongkvalitet		Densitet (kg/m ³)	2233	1,317			
K-värde	Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Densitet (kg/m ³)	Volym (m ³)	Torrhalt (%)	Labrecept (kg)
	Vatten		228,0	1000	0,2280		0,293
	Basement		746,5	3000	0,2488		0,983
	Cement						
1	Silikastoft		83,0	2600	0,0319		0,109
1	Flygaska			2280			
	Sika Crackstop 12 mm		1,2	900	0,0013		0,002
	Övriga Material						
	Sikament Evo 26	1,21%	9,00	1080	0,0083	40,00%	0,0118
	Sika Tard 932	0,50%	3,73	1160	0,0032	27,00%	0,0049
	Tillsatsmedel						
	Lufthalt	4,0%			0,0400		
						Fuktkvot (%)	
	Sand 15	80,0%	929	2650	0,3507		1,22
	Baskarp 95	20,0%	232	2650	0,0877		0,31
	Ballast < 8mm						
	Ballast < 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						

Summa Ballast	100,0%
Volym Pasta	56,2%
Volym Ballast	43,8%
Sand/Bindemedel	1,400

AVA indata	
Mortar < 6mm	96,0%
Paste	52,2%

CEMENTA
HEIDELBERGCEMENTGroup

Receptnamn	5b	vct _{av}	0,275	Satsstorlek (L)	1,317		
Betongkvalitet		Densitet (kg/m ³)	2232	L.ubrecept (kg)			
K-värde	Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Densitet (kg/m ³)	Volym (m ³)	Torrhalt (%)	Fuktkvot (%)
	Vatten		228,0	1000	0,2280		
	Basement		746,5	3000	0,2488		
	Cement						
1	Silikastoft		83,0	2600	0,0319		
1	Flygaska			2280			
	Sika Crackstop 12 mm		1,2	900	0,0013		
	Övriga Material						
	Sikament Evo 26	1,27%	9,48	1080	0,0088	40,00%	0,0125
	Sika Tard 932	0,50%	3,73	1160	0,0032	27,00%	0,0049
	Tillsatsmedel						
	Lufthalt	4,0%			0,0400		
	Sand 15	80,0%	928	2650	0,3503		1,22
	Baskarp 95	20,0%	232	2650	0,0876		0,31
	Ballast < 8mm						
	Ballast < 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						

Summa Ballast	100,0%
Volym Pasta	56,2%
Volym Ballast	43,8%
Sand/Bindemedel	1,399

AVA indata	96,0%
Mortar < 6mm	52,2%
Paste	

CEMENTA
HEIDELBERGCEMENT Group

Receptnamn	5c		vct _{av}	0,275	Satsstorlek (L)		
Betongkvalitet			Densitet (kg/m ³)	2231	1,317		
K-värde	Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Densitet (kg/m ³)	Volym (m ³)	Torrhalt (%)	L.ubrecept (kg)
	Vatten		228,0	1000	0,2280		0,292
	Basement		746,5	3000	0,2488		0,983
	Cement						
1	Silikastoff		83,0	2600	0,0319		0,109
1	Flygaska			2280			
	Sika Crackstop 12 mm		1,2	900	0,0013		0,002
	Övriga Material						
	Sikament Evo 26	1,39%	10,38	1080	0,0096	40,00%	0,0437
	Sika Tard 932	0,50%	3,73	1160	0,0032	27,00%	0,0049
	Tillsatsmedel						
	Lufthalt	4,0%			0,0400		
						Fuktkvot (%)	
	Sand 15	80,0%	927	2650	0,3497		1,22
	Baskarp 95	20,0%	232	2650	0,0874		0,31
	Ballast < 8mm						
	Ballast < 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						

Summa Ballast	100,0%
Volym Pasta	56,3%
Volym Ballast	43,7%
Sand/Bindemedel	1,396

AVA indata	
Mortar < 6mm	96,0%
Paste	52,3%

CEMENTA
HEIDELBERGCEMENT Group

Receptnamn	6a	vct _{sv}	0,284	Satsstorlek (L)	1,327	
Betongkvalitet		Densitet (kg/m ³)	2225	Labrecept (kg)		
K-värde	Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Densitet (kg/m ³)	Volym (m ³)	Torrhalt (%)
	Vatten		233,5	1000	0,2335	
	Basement		741,0	3000	0,2470	
	Cement					
1	Silikastoft		82,0	2600	0,0315	
1	Flygaska			2280		
	Sika Crackstop 12 mm		1,2	900	0,0013	
	Övriga Material					
	Sikament Evo 26	1,11%	8,23	1080	0,0076	40,00%
	Sika Tard 932	0,50%	3,71	1160	0,0032	27,00%
	Tillsatsmedel					
	Lufthalt	4,0%			0,0400	
						Fuktkvot (%)
	Sand 15	80,0%	924	2650	0,3487	
	Baskarp 95	20,0%	231	2650	0,0872	
	Ballast < 8mm					
	Ballast < 8mm					
	Ballast > 8mm					
	Ballast > 8mm					
	Ballast > 8mm					

Summa Ballast	100,0%
Volym Pasta	56,4%
Volym Ballast	43,6%
Sand/Bindemedel	1,403

AVA Indata	
Mortar < 6mm	96,0%
Paste	52,4%

CEMENTA
HEIDELBERGCEMENT Group

Receptnamn	6b	vc _{t,sv}	0,290	Satsstorlek (L)	1,327		
Betongkvalitet		Densitet (kg/m ³)	2215	Labrecept (kg)			
K-värde	Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Densitet (kg/m ³)	Volym (m ³)	Torrhalt (%)	Fuktkvot (%)
	Vatten		239,0	1000	0,2390		
	Basement		741,0	3000	0,2470		
	Cement						
1	Silikastoft		82,0	2600	0,0315		
1	Flygaska			2280			
	Sika Crackstop 12 mm		1,2	900	0,0013		
	Övriga Material						
	Sikament Evo 26	1,11%	8,23	1080	0,0076	40,00%	0,0109
	Sika Tard 932	0,50%	3,71	1160	0,0032	27,00%	0,0049
	Tillsatsmedel						
	Lufthalt	4,0%			0,0400		
	Sand 15	80,0%	912	2650	0,3443		1,21
	Baskarp 95	20,0%	228	2650	0,0861		0,30
	Ballast < 8mm						
	Ballast < 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						

Summa Ballast	100,0%
Volym Pasta	57,0%
Volym Ballast	43,0%
Sand/Bindemedel	1,386

AVA indata	
Mortar < 6mm	96,0%
Paste	53,0%

CEMENTA
HEIDELBERGCEMENT Group

Receptnamn	7a		vc _{f,sv}	0,275			
Betongkvalitet			Densitet (kg/m ³)	2213			
K-värde	Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Densitet (kg/m ³)	Volym (m ³)	Torrhalt (%)	Labrecept (kg)
	Vatten		228,0	1000	0,2280		0,290
	Basement		659,0	3000	0,2197		0,857
	Cement						
1	Silikastoft		83,0	2600	0,0319		0,108
1	Flygaska		87,0	2280	0,0382		0,113
	Sika Crackstop 12 mm			900			
	Övriga Material						
	Sikament Evo 26	1,26%	8,30	1080	0,0077	40,00%	0,0408
	Sika Tard 932	0,50%	3,30	1160	0,0028	27,00%	0,0043
	Tillsatsmedel						
	Lufthalt	4,0%			0,0400		
						Fuktkvot (%)	
	Sand 15	80,0%	915	2650	0,3454		1,19
	Baskarp 95	20,0%	229	2650	0,0863		0,30
	Ballast < 8mm						
	Ballast < 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						

Summa Ballast	100,0%
Volym Pasta	56,8%
Volym Ballast	43,2%
Sand/Bindemedel	1,380

AVA indata	
Mortar < 6mm	96,0%
Paste	52,8%

CEMENTA
HEIDELBERGCEMENT Group

Receptnamn	7b		vct _{av}	0,275			
Betongkvalitet			Densitet (kg/m ³)	2211			
K-värde	Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Densitet (kg/m ³)	Volym (m ³)	Torrhalt (%)	L.ubrecept (kg)
	Vatten		228,0	1000	0,2280		0,263
	Basement		659,0	3000	0,2197		0,779
	Cement						
1	Silikastoft		83,0	2600	0,0319		0,098
1	Flygaska		87,0	2280	0,0382		0,103
	Sika Crackstop 12 mm		0,7	900	0,0008		0,001
	Övriga Material						
	Sikament Evo 26	1,26%	8,30	1080	0,0077	40,00%	0,0098
	Sika Tard 932	0,50%	3,30	1160	0,0028	27,00%	0,0039
	Tillsatsmedel						
	Lufthalt	4,0%			0,0400		
						Fuktkvot (%)	
	Sand 15	80,0%	914	2650	0,3448		1,08
	Baskarp 95	20,0%	228	2650	0,0862		0,27
	Ballast < 8mm						
	Ballast < 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						

Summa Ballast	100,0%
Volym Pasta	56,9%
Volym Ballast	43,1%
Sand/Bindemedel	1,378

AVA indata	
Mortar < 6mm	96,0%
Paste	52,9%

CEMENTA
HEIDELBERGCEMENT Group

Receptnamn	8a	$v_{cl_{sav}}$	0,275	Satsstorlek (L)	15		
Betongkvalitet		Densitet (kg/m ³)	2210				
K-värde	Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Densitet (kg/m ³)	Volym (m ³)	Torrhalt (%)	Labrecept (kg)
	Vatten		228,0	1000	0,2280		3,343
	Basement		659,0	3000	0,2197		9,885
	Cement						
1	Silikastoft		83,0	2600	0,0319		1,245
1	Flygaska		87,0	2280	0,0382		1,305
	Sika Crackstop 12 mm		1,2	900	0,0013		0,018
	Övriga Material						
	Sikament Evo 26	1,26%	8,30	1080	0,0077	40,00%	0,1246
	Sika Tard 932	0,50%	3,30	1160	0,0028	27,00%	0,0494
	Tillsatsmedel						
	Lufthalt	4,0%			0,0400		
						Fuktkvot (%)	
	Sand 15	80,0%	912	2650	0,3443		13,69
	Baskarp 95	20,0%	228	2650	0,0861		3,42
	Ballast < 8mm						
	Ballast < 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						

Summa Ballast	100,0%
Volym Pasta	57,0%
Volym Ballast	43,0%
Sand/Bindemedel	1,376

AVA indata	
Mortar < 6mm	96,0%
Paste	53,0%

CEMENTA
HEIDELBERGCEMENTGroup

Receptnamn	8b		vc _{t,av}	0,291			
Betongkvalitet			Densitet (kg/m ³)	2193			
K-värde	Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Densitet (kg/m ³)	Volym (m ³)	Torrhalt (%)	Labrecept (kg)
	Vatten		238,2	1000	0,2382		3,543
	Basement		650,4	3000	0,2168		9,885
	Cement						
1	Silikastoft		81,9	2600	0,0315		1,245
1	Flygaska		85,9	2280	0,0377		1,305
	Sika Crackstop 12 mm		1,2	900	0,0013		0,018
	Övriga Material						
	Sikament Evo 26	1,26%	8,19	1080	0,0076	40,00%	0,1246
	Sika Tard 932	0,50%	3,25	1160	0,0028	27,00%	0,0494
	Tillsatsmedel						
	Lufthalt	4,0%			0,0400		
						Fuktkvot (%)	
	Sand 15	80,0%	899	2650	0,3394		13,67
	Baskarp 95	20,0%	225	2650	0,0848		3,42
	Ballast < 8mm						
	Ballast < 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						

Summa Ballast	100,0%
Volym Pasta	57,6%
Volym Ballast	42,4%
Sand/Bindemedel	1,374

AVA indata	
Mortar < 6mm	96,0%
Paste	53,6%

CEMENTA
HEIDELBERGCEMENT Group

Receptnamn	9a		vct _{av}	0,275	Satsstorlek (L)		
Betongkvalitet			Densitet (kg/m ³)	2213	15		
K-värde	Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Densitet (kg/m ³)	Volym (m ³)	Torrhalt (%)	Labrecept (kg)
	Vatten		228,0	1000	0,2280		3,344
	Basement		659,0	3000	0,2197		9,885
	Cement						
1	Silikastoft		83,0	2600	0,0319		1,245
1	Flygaska		87,0	2280	0,0382		1,305
	Sika Crackstop 12 mm			900			
	Övriga Material						
	Sikament Evo 26	1,26%	8,30	1080	0,0077	40,00%	0,1246
	Sika Tard 932	0,50%	3,30	1160	0,0028	27,00%	0,0494
	Tillsatsmedel						
	Lufthalt	4,0%			0,0400		
						Fuktkvot (%)	
	Sand 15	80,0%	915	2650	0,3454		13,73
	Baskarp 95	20,0%	229	2650	0,0863		3,43
	Ballast < 8mm						
	Ballast < 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						

Summa Ballast	100,0%
Volym Pasta	56,8%
Volym Ballast	43,2%
Sand/Bindemedel	1,380

AVA indata	
Mortar < 6mm	96,0%
Paste	52,8%

CEMENTA
HEIDELBERGCEMENT Group

Receptnamn	9b	$v_{ct,av}$	0,291				
Betongkvalitet		Densitet (kg/m ³)	2195				
K-värde	Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Densitet (kg/m ³)	Volym (m ³)	Torrhalt (%)	Labrecept (kg)
	Vatten		238,2	1000	0,2382		3,543
	Basement		650,4	3000	0,2168		9,885
	Cement						
1	Silikastoft		81,9	2600	0,0315		1,245
1	Flygaska		85,9	2280	0,0377		1,305
	Sika Crackstop 12 mm			900			
	Övriga Material						
	Sikament Evo 26	1,26%	8,19	1080	0,0076	40,00%	0,1246
	Sika Tard 932	0,50%	3,25	1160	0,0028	27,00%	0,0494
	Tillsatsmedel						
	Lufthalt	4,0%			0,0400		
						Fuktkvot (%)	
	Sand 15	80,0%	902	2650	0,3404		13,71
	Baskarp 95	20,0%	226	2650	0,0851		3,43
	Ballast < 8mm						
	Ballast < 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						
	Ballast > 8mm						

Summa Ballast	100,0%
Volym Pasta	57,4%
Volym Ballast	42,6%
Sand/Bindemedel	1,378

AVA indata	
Mortar < 6mm	96,0%
Paste	53,4%

CEMENTA
HEIDELBERGCEMENT Group

Bilaga VIII – Relativ luftfuktighet

