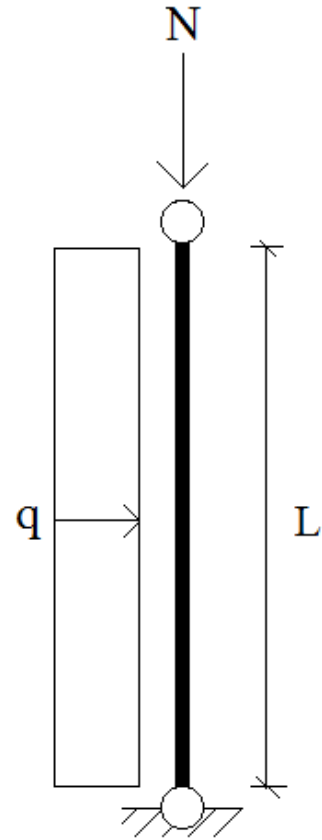
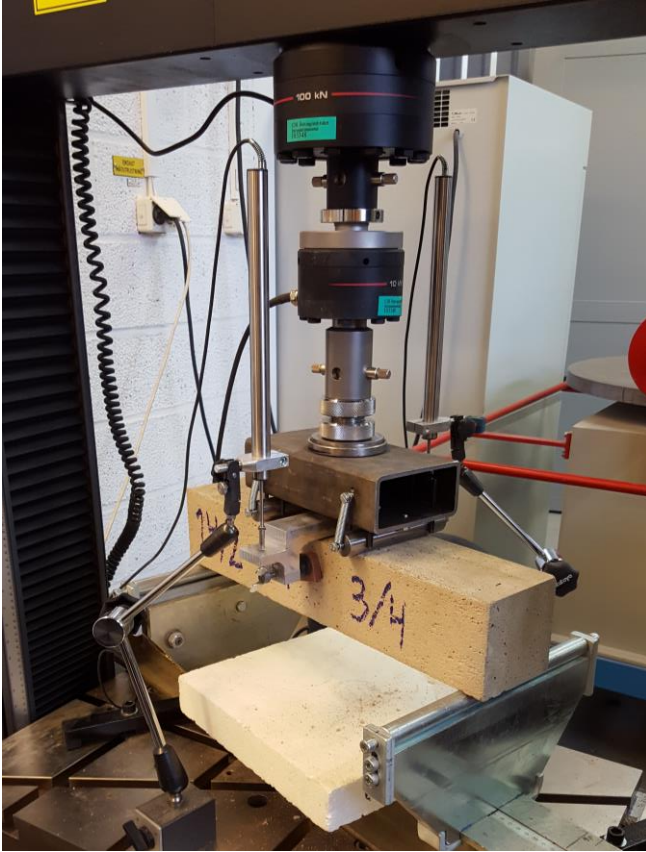




CHALMERS



Fiberarmerad skumbetong

Materialgenskaper och husdimensionering

Examensarbete inom högskoleingenjörspogrammet Byggingenjör

IDA FRISELL
LINNEA THÖRN

EXAMENSARBETE BOMX03-17-28

Fiberarmerad skumbetong

Materialegenskaper och husdimensionering

Examensarbete i högscoleingenjörsprogrammet

Byggingenjör

IDA FRISELL

LINNEA THÖRN

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avdelningen för byggnadsteknologi

Byggnadsmaterial

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2017

Fiberarmerad skumbetong
Materialegenskaper och husdimensionering
Examensarbete i högskoleingenjörsprogrammet
Byggingenjör
IDA FRISELL
LINNEA THÖRN

© IDA FRISELL/LINNEA THÖRN 2017

Examensarbete BOMX03-17-28 / Institutionen för bygg- och miljöteknik,
Chalmers tekniska högskola 2017

Institutionen för bygg och miljöteknik
Avdelningen för byggnadsteknologi
Byggnadsmaterial
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Omslag:
Uppställning av böjdragprovning av balk samt modell för beräkning av verkande laster på väggelement.

Tryckeriets namn till exempel Chalmers reproservice annars ange institutionens namn/Institutionen för bygg- och miljöteknik
Göteborg 2017

Fiberarmerad skumbetong

Materialegenskaper och husdimensionering

Examensarbete i högskoleingenjörsprogrammet

Byggingenjör

IDA FRISELL

LINNEA THÖRN

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avdelningen för byggnadsteknologi

Byggnadsmaterial

Chalmers tekniska högskola

SAMMANDRAG

Arbetet syftar till att utöka kunskaperna om fiberarmerad skumbetong och att analysera om fiberarmerad skumbetong kan användas som bärande material vid byggnation av hus. Analysen har begränsats till att välja ut två olika fibrer som blandats med skumbetong. Dimensioneringen tar enligt gällande standarder enbart hänsyn till egentygder, snölaster och vindlaster.

Arbetet består av tre delar där den första delen omfattar bakgrundsinformation om olika typer av lättbetong och fibrer. Den andra delen består av laborationer och mekaniska provningar där fiberarmerad skumbetong provas med olika blandningar av en lång och en kort fibersort som tillsats. Tredje och sista delen omfattar beräkningar där det analyseras om ett modellhus av en enplansvilla uppförd i Göteborg skulle kunna byggas med enbart fiberarmerad skumbetong som bärande material.

De mekaniska provningarna visar att en blandning av långa och korta fibrer ger en ökning av tryckhållfastheten på ca 50 % medan långa fibrer ger en liten minskning jämfört med prover av bara skumbetong. Böjdraghållfastheten ökar i samtliga fall där fibrer tillsätts och den största ökningen fås vid en blandning av bara korta fibrer och skumbetong, där ökar hållfastheten med ca 530 % i jämförelse med bara skumbetong. En slutsats som kan dras av resultaten är att fiberarmerad skumbetong kan användas som bärande material för modellhuset. Minsta möjliga vägg tjocklek är 44 mm om korta fibrer används som armering i skumbetongen.

Nyckelord: Lättbetong, fibrer, fiberarmerad skumbetong, mikrofibrer av polyvinylalkohol (PVA), makrofibrer av polyolefin, skumbetong, mekanisk provning, tryckprovning, böjdragprovning, husdimensionering.

Fiber Reinforced Foam Concrete

Material properties and structural design

Diploma Thesis in the Engineering Programme

Building and Civil Engineering

IDA FRISELL

LINNEA THÖRN

Department of Civil and Environmental Engineering

Division of Building Technology

Building Materials

Chalmers University of Technology

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to extend the knowledge of fiber reinforced foam concrete and to analyze the properties of the material in structural design. In the study two types of fibers were selected and the loads including self-weight, snow- and wind loads were considered.

This work includes three parts: The first one is a study of different types of fibers and lightweight concrete. Based on the study from first part, synthetic short and long fibers were selected and mixed in the foam concrete in different concentrations. Further mechanical tests was performed. Fibers that have been tested is synthetic short and long fibers in different concentrations. The third part of this work includes a calculation of the capacity of the material based on the result of the mechanical tests. Calculations have been made using a model of a house located in Göteborg in order to see if it is possible to take the actual loads only with fiber reinforced foam concrete as construction material.

Results from the mechanical tests show that a mix of both long and short fibers increased the compressive strength by 50 % and long fibers had a decreasing effect compared with the plain foam concrete. Tensile flexural strength increased in all cases when fibers were added and the biggest gain was achieved when only small fibers were added to foam concrete. In this case the capacity value can be 530 % higher than the plain foam concrete. Based on the results a conclusion can be drawn, that is, fiber reinforced concrete can be used as the structural a conclusion made by the results is that fiber reinforced foam concrete can be used as the structural material alone in the house model if the wall is thicker than 44 mm.

Key words: Lightweight concrete, fiber reinforced foam concrete, micro fibers made of polyvinyl alcohol (PVA), macro fibers made of polyolefin, foam concrete, mechanical test, compressive stress test, flexural bending stress test, structural design of houses.

Innehåll

SAMMANDRAG	I
ABSTRACT	II
INNEHÅLL	III
FÖRORD	V
BETECKNINGAR	VI
1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Metod	2
1.4 Avgränsningar	2
2 TEORI	3
2.1 Lättbetong	3
2.2 Fibrer	4
3 MATERIAL	7
3.1 Skumbetong av Aercell A-7	7
3.2 Mikrofibrer av polyvinylalkohol	8
3.3 Makrofibrer av polyolefin	9
4 METODIK	10
4.1 Laborationer	10
4.2 Mekaniska provningar	11
4.3 Dimensioneringsförutsättningar	14
5 DIMENSIONERING	16
5.1 Laster	16
5.2 Lastkombinationer	18
5.3 Dimensionerande spänning	20
6 RESULTAT	24
6.1 Tryckprovning	24
6.2 Böjdragprovprovning	28
6.3 Snittanalys	33
6.4 Dimensionering	34

7	DISKUSSION OCH SLUTSATSER	37
7.1	Metodanalys	37
7.2	Resultatanalys	39
8	VIDARE STUDIER	42
9	REFERENSLISTA	44
BILAGOR		
1	Recept	
2	Snittanalys	

Förord

Detta examensarbete har genomförts på institutionen för bygg- och miljöteknik vid Chalmers tekniska högskola. Laborationer och mekaniska provningar har genomförts i samarbete med RISE CBI Betonginstitutet AB (CBI) i Borås. CBI ingår i koncernen RISE Research Institutes of Sweden. Arbetet har pågått från januari 2017 till juni 2017.

Vi vill rikta ett speciellt tack till:

Ingemar Löfgren, vår handledare på Chalmers som har bistått med material om fiberarmering, hjälpt oss med beräkningar och svarat på frågor och funderingar genom hela arbetets gång.

Masha Saeidpour, vår första handledare på CBI som hjälpte oss att planera laborationsarbetet och välja material.

Katarina Malaga, vår andra handledare på CBI som kritiskt granskat vårt arbete och gett bra och konstruktiv kritik.

Alexander Oliva Rivera och Ilias Outras, laborationstekniker på CBI som hjälpt oss vid gjutning och provning.

All personal på CBI, som intresserat sig för vårt arbete och svarat på frågor.

Aercrete, som presenterade oss för ämnet och har svarat på frågor kring skumbetong och materialets användningsområde genom arbetets gång.

Tack för all hjälp!

Göteborg juni 2017

Ida Frisell

Linnea Thörn

Beteckningar

b = bredd [m]

h = höjd [m]

A = area [m^2]

ρ = densitet [kg/m^3]

g = tyngdaccelerationen [m/s^2]

s = snölast på tak [kN/m^2]

s_k = karakteristiskt värde av snölast på marken [kN/m^2]

C_e = exponeringskoefficient

C_t = värmekoefficient

μ_i = formfaktor för snölast

q_w = total vindlast [kN/m^2]

w_e = utvändig vindlast [kN/m^2]

w_i = invändig vindlast [kN/m^2]

$q_p(z_e)$ = karakteristiskt hastighetstryck [kN/m^2]

z_e = referenshöjd för utvändig vindlast [m]

$c_{pe,10}$ = formfaktor för utvändig vindlast vid dimensionering av hela bärverket

$q_p(z)$ = karakteristiskt hastighetstryck [kN/m^2]

z = referenshöjd [m]

$c_e(z)$ = formfaktor för vindlast

q_b = referenshastighetstryck

v_b = referensvindhastighet [m/s]

$q_p(z_i)$ = karakteristiskt hastighetstryck [kN/m^2]

z_i = referenshöjd för invändig vindlast [m]

$c_{pi,10}$ = formfaktor för invändig vindlast vid dimensionering av hela bärverket

$c_{pi,10,\delta}$ = formfaktor för invändig vindlast vid dimensionering av hela bärverket vid övertryck

$c_{pi,10,u}$ = formfaktor för invändig vindlast vid dimensionering av hela bärverket vid undertryck

$w_{i\delta}$ = invändig vindlast vid övertryck [kN/m^2]

w_{iu} = invändig vindlast vid undertryck [kN/m^2]

$q_{w\delta}$ = total vindlast vid övertryck [kN/m^2]

q_{wu} = total vindlast vid undertryck $[kN/m^2]$

q_{wd} = total dimensionerande vindlast $[kN/m^2]$

g_{balk} = balkens egentynghet $[kN/m]$

G = egentynghet $[kN]$

q_1 = huvudlast $[kN][kN/m]$

q_i = övriga laster $[kN][kN/m]$

$\psi_{0,i}$ = reduktionskoefficient

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Idag finns det behov av att effektivisera produktionen i byggbranschen. Byggandet ökar men trots det har Sverige bostadsbrist då befolkningen växer i större takt än vad färdigställandet av bostäder gör. Under början av år 2016 uppgav SVT nyheter (Wendick, 2016) att över 85 % av landets kommuner har bostadsbrist. För att lösa bostadsbristen behövs det byggas mer på kortare tid. Att utveckla effektivare material och produktionsmetoder kan vara exempel på lösningar.

Det dominerande materialet vid byggnation av bostadshus är idag betong. År 2014 stod betong för 88,6 % av marknadsandelen medan trä och stål låg på 8,9 % respektive 2,6 % ("Betong dominerar", 2016). Detta innebär att det skulle sparas mycket tid och resurser på att effektivisera metoderna kring byggnation med betong. Idag behövs betong armeras för att klara främst dragkrafter och att placera ut armering i gjutformar är en tidskrävande process. Samtidigt måste betongen kompletteras med isolering för att klara dagens energikrav (Petersson, 2013).

En hypotes är att fiberarmerad skumbetong kan effektivisera produktionen av bostäder genom att ta bort flera arbetsmoment som exempelvis utläggning av armeringsnät och även minska mängden armeringsmaterial. Eftersom skumbetong i sig också är isolerande skulle en vägg i detta material enbart behöva kompletteras med ytbeklädnader för att få samma funktion som en vanlig betongbyggnad. Fiberarmerad skumbetong kan alltså hypotetiskt sett spara resurser både vid produktionen i form av arbetskraft och genom dess materialegenskaper.

Fiberarmerad skumbetong är dock ett obeprövat material inom husbyggnad. För att kunna utvärdera om det är ett material som är lämpligt att använda behövs det först undersökas om det håller för de laster och påfrestningar som ett hus utsätts för.

1.2 Syfte

Syftet med detta arbete är att utöka kunskaperna om fiberarmerad skumbetong och tillämpa dessa kunskaper i konstruktionsberäkningar för husdimensionering. Arbetets fokus är att prova och bestämma materialegenskaper på en specifik fiberarmerad skumbetong som valts. Denna har valts dels efter en mindre kartläggning av olika grupper av lättbetong och fibermaterial och dels efter diskussion med handledare på CBI. Egenskaperna används sedan för att se om det är möjligt att bygga bostäder med rimliga dimensioner med fiberarmerad skumbetong som bärande material.

Om resultaten anses positiva kan denna rapport ligga till grund för vidare undersökningar huruvida fiberarmerad skumbetong utifrån andra perspektiv som till exempel miljö, kostnader och energikrav är lämplig att använda sig av som konstruktionsmaterial vid husbyggnation. Arbetet kan också ligga till grund för utvärdering av om materialet går att använda på samma sätt i andra klimat.

1.3 Metod

En mindre litteraturstudie har gjorts av materialgrupperna lättbetong och fibrer. Övergripande fakta har tagits fram såväl som detaljerad fakta om materialen som används vidare i undersökningen. Studien omfattar tryckta källor som examensarbeten, forskningsrapporter och artiklar som berör ämnet, muntlig kommunikation med handledare och anställda på CBI och Aercrete. Sökning av information har skett på internet i databaser som Libris, E-nav och Google Scholar. Huvudsakliga sökord som använts är: lightweight concrete, foam concrete, fiber reinforced concrete, fiber materials, steel fiber, synthetic fibers och fiberarmering.

Mekanisk provning av fiberarmerad skumbetong med mikro- och makrofibrer i olika sammansättningar har genomförts. Provningsen har dels gjorts utifrån relevanta standarder och dels genom handledning av anställda på CBI. För mer detaljerad beskrivning se kapitel 4 *Metodik*.

De materialvärden som fås från provningen används i beräkningar för husdimensionering. Dimensioneringen följer gällande standarder och dimensioneringskrav i den utsträckning som det var möjligt efter diskussion med handledare.

1.4 Avgränsningar

Litteraturstudien begränsas till att undersöka olika materialgrupper inom lättbetong för att det är det material som är relevant vidare i rapporten. Avsnittet om fibrer behandlar huvudgrupperna stål, glas, syntet och naturligt förekommande fibrer överskådligt för att ha information inför valet av fibrer. Enbart fibrer som finns att tillgå på marknaden idag undersöks då materialundersökningen syftar till att kunna välja en fibertyp som vid positivt resultat ska kunna användas i produktion. Vidare i litteraturstudien beskrivs de valda mikro- och makrofibrerna och den aktuella skumbetongen mer ingående eftersom det är dessa material som arbetet behandlar.

För att resultatet ska bidra till att utöka kunskapen inom ämnet kommer materialsammansättningar vars konstruktionsegenskaper som är kända sedan tidigare inte att provas. Endast fiberarmerad skumbetong där fibrerna blandas med betongen innan gjutning och alltså ger en slumpmässig fördelning av fibrer kommer att studeras. Detta tillvägagångssätt anses lämpligt vid byggnation av platsbyggda hus, vilket är det tänkta användningsområdet. De prover som utförs kommer att utgå från standarden SS-EN 12390 *Provning av hårdnad betong*, vilket innebär tryck- och böjdragprovning. Tester som kräver en härdningstid längre än en månad kommer inte att utföras då arbetet är tidsbegränsat.

Beräkningarna kommer enbart att behandla ett framtaget modellhus uppfört i Göteborg. Däremot kommer frågor kring användning av materialet i andra miljöer att diskuteras i kapitel 7 *Diskussion och slutsatser*. Det kommer endast utföras konstruktions- och hållfasthetsberäkningar kopplade till husdimensionering enligt Eurokod då det är dessa standarder som är gällande i branschen. Brandlaster kommer inte att behandlas. Beräkningsmodeller eller standarder för fiberarmerad skumbetong finns idag inte och arbetet syftar inte till att ta fram detta, därför antas den fiberarmerade skumbetongen följa verkningssättet för vanlig betong.

2 Teori

Innan rapporten går mer in på de specifika material som används vid den mekaniska provningen kommer detta teoriavsnitt kort beskriva vad lättbetong är, vilka olika sorter av lättbetong som finns samt vad dessa sorter består av för material. Skumbetong är en av dessa sorter och även andra sorter kommer beskrivas för att ge relevant bakgrundsinformation. Kapitlet kommer också beskriva kort vilka olika fibermaterial som finns idag och vilka för- och nackdelar de har.

2.1 Lättbetong

Lättbetong definieras som betong med en densitet lägre än 2200 kg/m^3 och där ballasten har en densitet som är lägre än 2000 kg/m^3 (The Concrete Center, 2017). Betongtyper som oftast uppfyller dessa krav och därmed räknas som lättbetong är lättballastbetong, autoklaverad lättbetong och skumbetong.

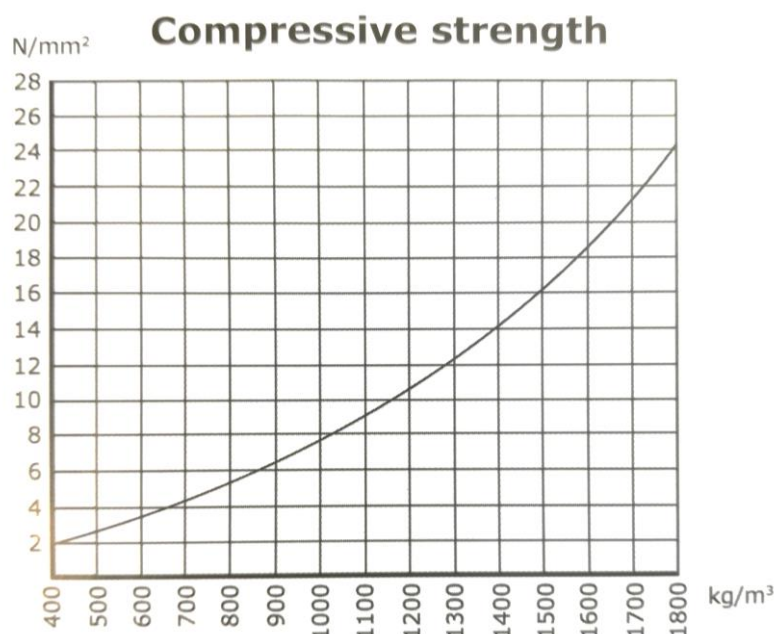
Fördelarna med lättbetong är att egentytngden på element som gjuts är lägre än för vanlig betong, som ofta har en densitet mellan $2300\text{-}2400 \text{ kg/m}^3$ (The Concrete Center, 2017). Lättbetong har en låg värmeledningsförmåga vilket gör att det isolerar bättre och står emot brand bättre än vanlig betong (The Concrete Center, 2017). Nackdelen är främst att E-modulen blir lägre och att lättbetong inte kommer upp i samma hållfasthetsklass som vanlig betong som har en tryck- respektive böjdraghållfasthet på 40 MPa och 4,9 MPa, för betongklass C 40/50 (Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., Johansson, B. 2013). Lättbetong är även mer känslig för krympning och krypning (The Concrete Center, 2017).

Lättballastbetong är betong där ballasten består av stenmaterial med låg densitet. De vanligaste materialen som används är värmebehandlad lera eller skiffer vilka brukar kallas för Leca. Det används också naturliga material som vulkanisk pimpsten och slaggprodukter från industrin som till exempel flygaska (The Concrete Center, 2017).

Autoklaverad lättbetong eller högtrycksångtryckshärdad lättbetong som det också kallas framställs av ett oorganiskt bindemedel till exempel kalk eller cement, ett sandmaterial med hög kiselhalt, ett porbildande medel till exempel aluminiumpulver och vatten (Svensk byggtjänst, 2017). Det porbildande medlet gör att det skapas gasbubblor i betongen under den första härdningsperioden. När betongen härdat tillräckligt skärs den upp i block och placeras i en autoklav, en slags tryckkammare. Där härdas blocken klart under högt tryck med vattenånga som har en temperatur på cirka 200°C och efter det finns endast luft kvar i porerna som bildats tidigare (Xella, 2010).

Skumbetong är betong som innehåller luftporer som genereras genom att skummedel har tillsatts (The Concrete Center, 2017). Skummet tillsätts antingen som färdigt skum till resterande redan ihopblandade komponenter eller som ett aktivt ämne vilket blandas i samtidigt som övriga komponenter. Både torrt och vått skum finns (Ramamurthy, Kunhanandan Nambiar, Indu Siva Ranjani, 2009). Enligt personlig kommunikation med C. Cederqvist från Aercrete (8 mars 2017) kan skummet framställas av biologiska eller syntetiska proteiner. För huskonstruktioner används endast syntetiska tensider av hälsoskäl. C. Cederqvist menar också att skumbetong kan bestå av upp till 90 % luft vilket gör den väldigt lätt. Den stora luftandelen

innebär en lägre densitet vilket i tester har visat sig ha ett samband med tryckhållfastheten (se Figur 1). I figuren visas uppnåbara tryckhållfastheter vid varierande densitet, trolig tryckhållfasthet antas vara 50 % av vad kurvan visar enligt C. Cederqvist (personlig kommunikation 8 mars 2017). Skumbetong går bland annat att använda till väggelement, isoleringsmaterial och är bra lämpad som fyllnadsmaterial i torpargrunder, dockor och kajer (Aercrete, 2017b).



Figur 1 Sambandet mellan densitet och uppnåbar tryckhållfasthet vid ideala förhållanden för skumbetong 90 dagar efter gjutning (Aercrete, 2017b).

2.2 Fibrer

För att fibrer ska fungera och vara effektiva i betong ska de uppfylla fyra stycken villkor (Naaman, 2003). Fibrerna bör ha en mycket större böjdraghållfasthet än betongen de blandas med, vidhäftningen mellan fibrerna och betongen bör vara lika stor eller större än betongens böjdraghållfasthet och elasticitetsmodulen för fibrerna bör vara minst två till tre gånger högre än hos betongen. Fibrerna bör också vara tillräckligt formbara så att de inte går sönder om de böjs eller utsätts för nötning. Fibrernas form påverkar hur väl de överför laster i betongen och hur bra vidhäftningen är. Idag finns det fibrer som är både tvinnade, vågiga, böjda eller har små utbuktningar.

En annan sak som är viktig är hur fibrerna placerar sig i betongen, de kan antingen ha en fri eller en riktad placering (Löfgren, 2005). Fri placering innebär att fibrerna slumpmässigt placeras i betongen medan riktad placering innebär att de läggs ut i speciella mönster till exempel i kontinuerliga nät eller flätor. Fibrer som uppfyller villkoren finns idag i många olika former och material. De fibrer som finns på marknaden kan grupperas i fyra större grupper (Löfgren, 2005). Dessa är metall, glas, syntet och naturligt förekommande fibrer.

Fibrer av metall tillverkas idag nästan bara av stål och enligt eurokod definieras stålfibrer som: *“Straight or deformed pieces of cold-drawn steel wire, straight or deformed cut sheet fibres, melt extracted fibres, shaved cold drawn wire fibres and fibres milled from steel blocks which are suitable to be homogeneously mixed into concrete or mortar”* (SS-EN 14889-1:2006). Stålfibrer kan alltså både klippas från skivor eller vara av stålvaror. En stålfiber har en draghållfasthet mellan 200 MPa och 2600 MPa, en densitet på 7,85 g/cm³, en E-modul på 195-210 GPa och en maximal förlängning på 0,5-5 % (Löfgren, 2005). Speciellt för stålfibrer är att de går lätt att forma. Fibrerna kan ha krokar i ändarna för att minska risken för att fibern dras ut ur betongen och istället går av när hela kapaciteten är uppnådd (Löfgren, 2005). Ett problem med stålfibrer är korrosion. Eftersom fibrerna läggs direkt i den våta betongen kommer de att korrodera men för att undvika detta kan rostfritt stål användas eller så kan fibrerna täckas med ett tunt lager zink (Löfgren, 2005). På stålfibrer har det gjorts många undersökningar och det är det fibermaterial som används mest ute i branschen idag (ACI, 2010). Till exempel används stålfiberarmerad betong som beklädnad i tunnlar, i marina miljöer och i bjälklag.

Ett annat fibermaterial som undersökts i flera studier är glas. Glasfibrer har en draghållfasthet på 1500 - 4000 MPa, en densitet på 2,54–2,70 g/cm³, en E-modul på 72-80 GPa och en maximal förlängning på 2,5–4,8 % (Löfgren, 2005). Det finns flera problem med glasfibrer, till exempel är de känsliga för skjuvning och spricker därmed när de utsätts för skjuvlaster vilket leder till att de förlorar sin kapacitet (ACI, 2010). De påverkas också starkt av pH-miljön vilket är problematiskt när de används i betong som är basiskt. Om glasfibrerna är i en basisk miljö för länge bryts de ner på grund av kemiska reaktioner vilket gör att de över tid får en mycket lägre hållfasthet, den här reaktionen är oberoende av yttre påfrestningar (ACI, 2010).

Syntetfibrer finns i en mängd olika material och enligt eurokod definieras de som *“Straight or deformed pieces of extruded, orientated and cut material which are suitable to be homogeneously mixed into concrete or mortar”* (SS-EN 14889-2). Trots att syntetfibrer är en egen materialgrupp är det svårt att sätta ett värde på dess hållfasthet då den varierar mycket beroende på vilken typ av syntetiskt material som används (Löfgren, 2005), se Tabell 1.

Tabell 1 Olika syntetiska fibertyper och deras egenskaper (Löfgren, 2005).

Fibertyp	Densitet [g/cm ³]	Dragkapacitet [MPa]	E-Modul [GPa]	Maximal förlängning [%]
Acryl (PAN)	1,18	200 - 1000	14,6 - 19,6	7,5 - 50
Aramid	1,4 - 1,5	2000 - 3500	62 - 130	2,0 - 4,6
Kol	1,6 - 1,9	800 - 4000	38 - 800	1,3 - 2,5
Polyeten (PE)	0,96	80 - 600	5	12 - 100
Polypropen (PP)	0,90 - 0,91	310 - 760	3,5 - 4,9	6 - 15
Polyvinylalkohol (PVA)	1,2 - 2,5	800 - 3600	20 - 80	4 - 12

Fördelar med syntetiska fibrer är att de varken korroderar eller bryts ner kemiskt som de tidigare materialgrupperna. De har även en lägre densitet men fortfarande en hög

draghållfasthet (Löfgren, 2005). Problem som finns med vissa syntetfibrer är att de förlorar sin kapacitet vid höga temperaturer och står alltså inte emot brand.

Den fjärde huvudgruppen av fibrer är naturligt förekommande fibrer och det innefattar både organiskt och oorganiskt material. Detta är också en bred materialgrupp med varierande hållfasthetsvärden, se Tabell 2.

Tabell 2 Olika naturligt förekommande fibertyper och deras egenskaper (Löfgren, 2005).

Fibertyp	Densitet [g/cm³]	Dragkapacitet [MPa]	E-Modul [GPa]	Maximal förlängning [%]
<i>Organiskt</i>				
Trä	1,5	300 - 2000	10 - 50	20
Bambu	1,12 - 1,15	350 - 500	33 - 40	-
<i>Oorganiskt</i>				
Asbest	2,55	200 - 1800	164	2 - 3

Ett problem med fibrer av organiskt material är att de kan mögla om de utsätts för fukt vilket de gör när de blandas med den våta betongen men också när betongen är i bruk och det sker fukttransporter genom materialet (ACI, 2010). Med de oorganiska materialen finns andra problem, till exempel asbest har visat sig orsaka sjukdomar som cancer (Arbetsmiljöverket, 2016).

3 Material

Nedan kommer de material som använts i arbetet att presenteras mer ingående. Beståndsdelarna i använd skumbetong kommer att presenteras i den omfattning som är tillåten med hänsyn till skyddad information. Prover har gjorts med både mikro- och makrofibrer och leverantörernas framtagna materialegenskaper och uttryckta användningsområden för dessa fibrer kommer att presenteras. En diskussion om valet av fibrer finns i kapitel 7 *Diskussion och slutsatser*.

3.1 Skumbetong av Aercell A-7

Skumbetongen som använts består av sand, cement, vatten och skum. Receptet och materialen har tillhandahållits av handledare på CBI. För recept se tabell i bilaga 1.



Figur 2 Skum av Aercell A-7 som tillsattes betongen.

Skummet som tillsattes tillverkades av Aercell A-7 i Aercrete FG-6 skumgenerator, en produkt som företaget Aercrete har patent på enligt SE536221 C2 (2013). Det aktiva ämnet som använts i skummet är tensider och de skapar luftbubblor med en diameter på 60-90 μm . Skummets konsistens kan liknas vid diskmedelskum (Aercrete, 2017a). Sanden som använts är en kantrund, tvättad natursand från Brodgårdsand AB med en medelkornstorlek på 0,56 mm. Sanden kallas av leverantören 55 KT (Brodgårdsand AB, 2010). Cementen som använts är byggcement CEM II/A-LL 42,5R (Cementa 2017).

3.2 Mikrofibrer av polyvinylalkohol



Figur 3 Mikrofibrer av polyvinylalkohol.

Mikrofibrerna som använts består av polyvinylalkohol (PVA) och är producerade av Kuraray. Enligt Kuraray (2017) har dessa mikrofibrer en lång hållbarhet i basiska miljöer, en hög E-modul och är stabila. Den använda fibern heter RSC15 och har en densitet på 1300 kg/m^3 . Fibern är 8 mm lång och har en diameter på $40 \text{ }\mu\text{m}$. Draghållfasthet anges vara 1,4 GPa och E-modulen 36 GPa (Kuraray, 2017). Enligt tillverkaren är fibrerna bäst lämpade för kontroll av sprickbildning i betongen. Fibrerna rekommenderas att blandas i med en volymprocent på 0,077 i vanlig betong (Kuraray, 2017), vilket motsvarar en koncentration på 1 kg/m^3 . I studien används en koncentration av dessa fibrer på 2 kg/m^3 då mikro- och makrofibrer blandas och 6 kg/m^3 i provet med endast mikrofibrer, vilket motsvarar en volymprocent på 0,15 respektive 0,46.

3.3 Makrofibrer av polyolefin



Figur 4 Makrofibrer av polyolefin.

I studien används en syntetisk makrofiber bestående av polyolefin som är framtagen av Sika. Polyolefin är ett samlingsnamn för polymerer framställda av olefiner, till exempel ingår polyeten (PE) och polypropen (PP) i gruppen polyolefiner (NE, 2017). Produkten har en densitet på 910 kg/m^3 . Enligt leverantören kan den använda fibern SikaFiber T48s användas i alla cementbaserade material men är särskilt framtagen för att användas vid olika typer av pågjutningar och för sprutbetong (Sika, 2016). Fibern är 48 mm lång och har ett rektangulärt tvärsnitt med en bredd på 0,9 mm. Ytan har en ojämn struktur och är kontinuerligt räfflad, se Figur 4. Själva fibern har en draghållfasthet som är större än 500 MPa och en E-modul som är större än 20 MPa. Fibrerna rekommenderas att i vanlig betong blandas i med en koncentration på $2\text{--}10 \text{ kg/m}^3$ (Sika, 2016). I studien används en koncentration av dessa fibrer på 5 kg/m^3 då mikro- och makrofibrer blandas och 7 kg/m^3 i provet med endast makrofibrer, vilket motsvarar en volymprocent på 0,55 respektive 0,77.

4 Metodik

I detta kapitel beskrivs hur laborationer, mekaniska provningar och beräkningar har genomförts. Resultatet från laborationer, mekaniska provningar och beräkningar presenteras i kapitel 6 *Resultat*. Laborationer och mekaniska provningar har utförts på CBI med hjälp av handledare och laboratoriepersonal.

4.1 Laborationer

Studien har som tidigare nämnts undersökt en innan detta obeprövad blandning av fibrer och skumbetong. För att prover som gjorts på valda fibrer ska gå att analysera utfördes referensprover. I denna undersökning har utöver blandningen av mikro- och makrofibrer oarmerad skumbetong, som i receptet i bilaga 1 kallas Ref, provats. Båda fibrerna har även testats separat med skumbetongen för att se vad de har för individuella egenskaper. De två olika proverna med en sorts fiber kallas i receptet PVA och T48s, vilka motsvarar de tidigare benämningarna mikrofibrer och makrofibrer. De separata provningarna gör att resultatet kan visa på om blandningen av fibrer ger en förhöjd effekt av de båda fibrernas individuella egenskaper eller om det bara är en av fibrerna som har en positiv inverkan.

För att få önskad densitet och lämplig sammansättning följdes receptet i bilaga 1. Blandningen utfördes i flera steg för att få ett önskvärt resultat. Uppmätta mängder cement, sand och eventuella fibrer blandades först separat. Vatten tillsattes och blandades noga in i den torra mixen, sedan fick blandningen stå i cirka 30 minuter med omrörning var tionde till femtonde minut för att säkerställa att cementen inte stelnade. Blandningen fick stå för att minimera risken att cementen reagerar på oönskat sätt med skummet när det senare tillsattes. Enligt handledare på CBI har det under tidigare provningar observerats en tendens till kollaps av prover vilket har inneburit att provet blir oanvändbart. Med kollaps menas att luftbubblor försvinner och betongen blir mer kompakt och förlorar önskade egenskaper.

Till cementblandningen tillsattes beräknad mängd skum enligt receptet i bilaga 1. Skummet blandades varsamt ner i kärlet och densiteten kontrollerades. Kontrollen gjordes genom att ett litermått med färdigblandad skumbetong fylldes och sedan vägdes. Differenser från önskad densitet som var 1200 kg/m^3 motverkades genom att vid för hög densitet blanda i mer skum och vid för låg vispa provet ytterligare. Det observerades att vispningen påverkade densiteten mycket, vispningen gjordes därför varsamt. Toleranser på $\pm 150 \text{ kg/m}^3$ har godkänts i denna provning för att undvika att provet vispas för mycket innan gjutning. Faktisk densitet på de olika provblandningarna ses i Tabell 3.

Tabell 3 Faktiska uppmätta densiteter på provblandningarna.

Uppmätta densiteter										
Sats	Ref	Ref	Ref	Mix	Mix	Mix	PVA	PVA	T48s	T48s
Faktisk densitet [kg/m ³]	1105	1201	1230	1247	1260	1050	1255	1221	1237	1143

Provkroppar till tryck- och böjdragtesterna gjöts i 150x150x150 mm kuber av stålformar samt balkformar av plywood med dimensionerna 500x100x100 mm som båda belagts med ett flytande vax på insidan för att underlätta avformningen. Då ytan på betongen delvis torkat, efter cirka 3 h, lades en tjockare plastfilm över formarna. Ett dygn efter gjutning avlägsnades plasten samt formarna och provkropparna märktes med gjutdatum och littera. Provkropparna lindades separat in i plastfolie och förvarades i klimatkammare på detta sätt i sju dagar. Då denna tid passerat avlägsnades plasten och provkropparna förvarades fortsatt i klimatkammare fram tills provning. Förhållandena i klimatkammaren var en temperatur på 20°C och en luftfuktighet på 65 % RF som hölls konstant under hela lagringstiden.

4.2 Mekaniska provningar

Två typer av mekaniska provningar har utförts. De olika blandningarna har utsatts för tryck- samt böjdraglaster och resultaten från dessa prover har sedan legat till grund för beräkning av kapaciteten hos de olika materialsammansättningarna. Proverna har strävt efter att utföras efter 7, 14 och 28 dagar från att provkropparna gjöts. En avvikelse på 3 dagar har accepterats, Tabell 4 visar på de verkliga härdningstiderna innan provning. Tryckprover på Ref och Mix har utförts vid tre olika härdningstider, övriga prover har endast utförts vid ett tillfälle.

Tabell 4 Verkliga härdningstider innan provning.

	Ref	PVA	T48s	Mix
Tryckprover	7, 14, 27 dagar	25 dagar	25 dagar	7, 15, 28 dagar
Böjdragprover	27 dagar	25 dagar	25 dagar	28 dagar

Vid framtagande av metod har europastandarder tagits i beaktning. Vissa principer från standarder har följts för att proverna ska få en trovärdighet och att de i viss mån ska kunna gå att jämföra med liknande tester. Det har ansetts rimligt att efterlikna standarden SS-EN 12390-5:2009 *Provning av hårdnad betong - Böjdraghållfasthet hos provkroppar* när det gäller provning av böjdraghållfasthet. Gällande tryckprovningen har vissa principer i standarden SS-EN 12390-3 *Provning av hårdnad betong - Tryckhållfasthet hos provkroppar* följts. I och med att standarderna är utvecklade för vanlig betong har standarderna inte kunnat följas helt då provningen utförts på provkroppar av skumbetong. I den här studien har proverna utförts i normal rumstemperatur. Nedan beskrivs mer ingående hur de olika proverna genomförts.

För att säkra värdena på provresultaten har det för varje provning gjorts flera identiska repetitioner med samma materialsammansättning. Vid tryckprovningen gjordes tre identiska repetitioner och på böjdragprovningen gjordes fyra repetitioner enligt rekommendationer från handledare på CBI.

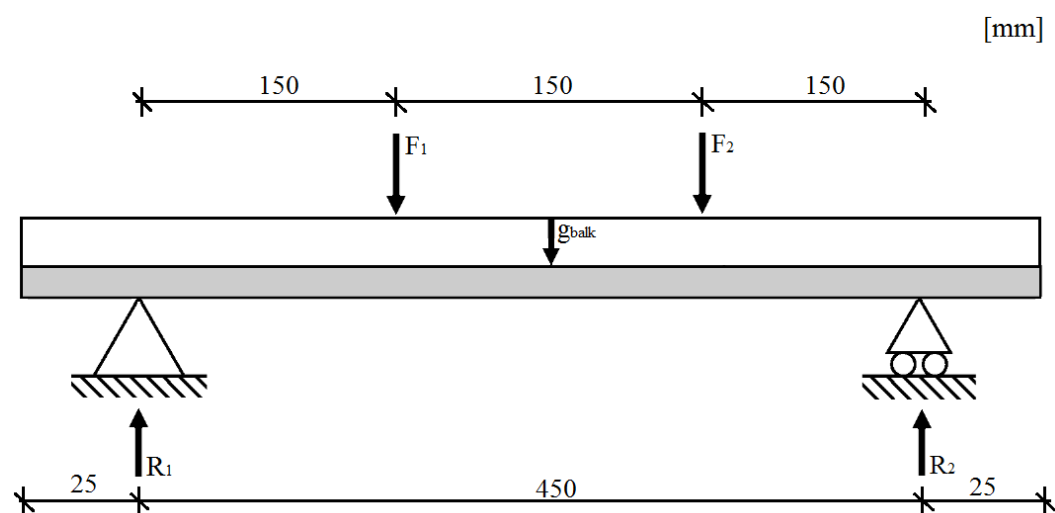
Tryckproverna gjordes på de gjutna kuberna i en standardiserad maskin, *Instron 1195*. Provkropparna vägdes och i enlighet med standarden SS-EN 12390-3:2009 *Provning av hårdnad betong - Tryckhållfasthet hos provkroppar* rengjordes ytorna på testutrustningen innan kuberna placerades under lastpunkten vinkelrätt gjutriktningen.

Maskinen programmerades att belasta samtliga prover med en belastningshastighet av 250 N/s och programmet kördes tills proverna uppnått maxlast och gått sönder.

Innan balkarna provades filades ojämna kanter bort och alla provkroppar vägdes innan de placerades i testanordningen. Maskinen som användes var *Instron 1253* och samma inställningar användes under alla provningar. Balkarna utsattes för en ökande nedböjning med en belastningshastighet av 0,66 mm/min och lasten registrerades. Balken belastades i två punkter och hade två upplagspunkter. Avståndet mellan belastningspunkterna var 150 mm och avståndet från belastningspunkterna till upplagen var också 150 mm, se Figur 5. Över balkens mittsnitt placerades två avläsare för nedböjning. Vid provning vändes balkarna så att de belastades vinkelrätt gjutriktningen för att få en jämn belastningsyta. Balkarna belastades och då de inte knäcktes i två delar avbröts provningen när maxlast uppnåts och en tydlig spricka bildats. Vissa prover kördes längre för att se hur brotten utvecklades, proven kördes max 30 min.

Efter att balkarna provats och därmed spruckit upp analyserades makrofibrernas placering i brottsnittet. Balken bröts av i det uppspruckna snittet och de fibrer som stack ut knipsades av och markerades. Snitten fotograferades och analyserades digitalt för att kunna studera hur fibrerna fördelat sig. Snittanalysen gjordes på tre horisontella zoner och två vertikala för att undersöka om det kan påvisas något samband med placeringen av fibrer och gjutriktning. Förklarande bilder och resultat av analysen presenteras i kapitel 6 *Resultat*.

För att sedan ta fram värden på hållfastheten för proverna gjordes flera beräkningar. För tryckprovningen anses presentationen av indata och resultat som visas i Tabell 5-8 i kapitel 6 *Resultat* räcka medan beräkningarna som leder fram till momentet som behövs för att ta fram böjdraghållfastheten presenteras nedan. Resultatet och indata för böjdraghållfastheten presenteras i Tabell 9-12 i kapitel 6 *Resultat*.



Figur 5 Modell över försöksupställningen för böjdragprovning.

Balkarna belastades enligt modellen i Figur 5.

Följande villkor gäller:

$$F_1 = F_2 = \frac{F_{max}}{2} = F \quad (1)$$

$$R_1 = R_2 = R \text{ (Symetri)} \quad (2)$$

$$\uparrow: R + R - g_b - F - F = 0 \quad (3)$$

$$2R = g_b + 2F$$

$$R = \frac{g_b + 2F}{2}$$

$$R = F + \frac{g_b}{2}$$

$$g_{balk} = \rho * b * h * g \quad (4)$$

$\rho =$ varierar enligt tabell 3 i kapitel 4 Metodik

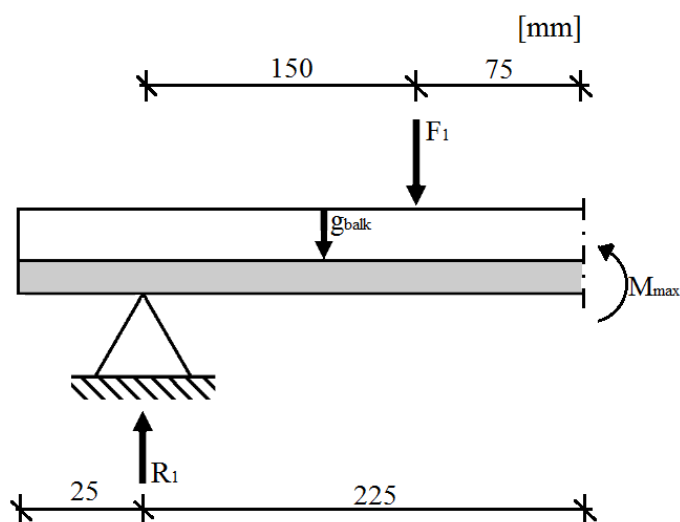
$$b = 0,100 \text{ m}$$

$$h = 0,100 \text{ m}$$

$$g = 9,82 \text{ m/s}^2$$

$$g_{balk} = \rho * 0,100 * 0,100 * 9,82 = 0,0982 * 10^{-3} * \rho \text{ kN/m}$$

Genom att titta på ett snitt i mitten av balken och ställa upp momentjämvikt runt snittet togs ett uttryck av maximala momentet fram.



Figur 6 Modell över försöksupställningen för böjdragprovning snittad i mitten av balken.

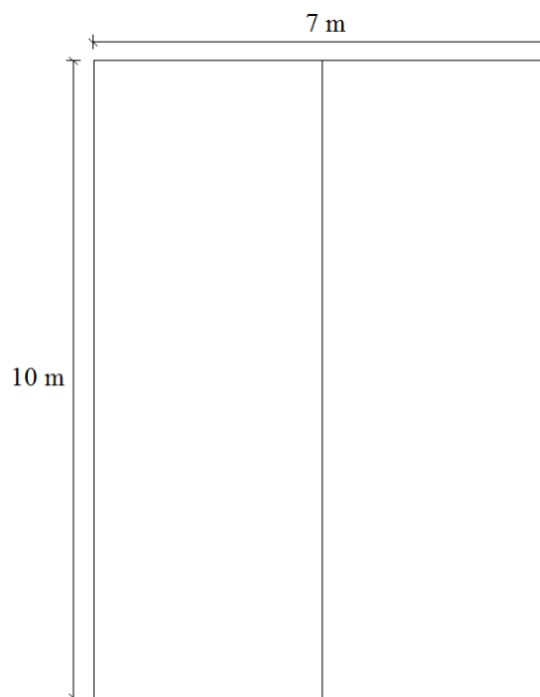
$$\curvearrowleft: -g_b * 0,250 * \frac{0,250}{2} - F_1 * 0,075 + R_1 * 0,225 - M_{max} = 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
M_{max} &= -0,0313g_{balk} - 0,075F + 0,225\left(F + \frac{g_{balk}}{2}\right) \\
M_{max} &= -0,0313g_{balk} - 0,075F + 0,225F + 0,1125g_{balk} \\
M_{max} &= -0,0812g_{balk} + 0,150F \\
\Rightarrow M_{max} &= -0,0812g_{balk} + 0,075F_{max}
\end{aligned}$$

4.3 Dimensioneringsförutsättningar

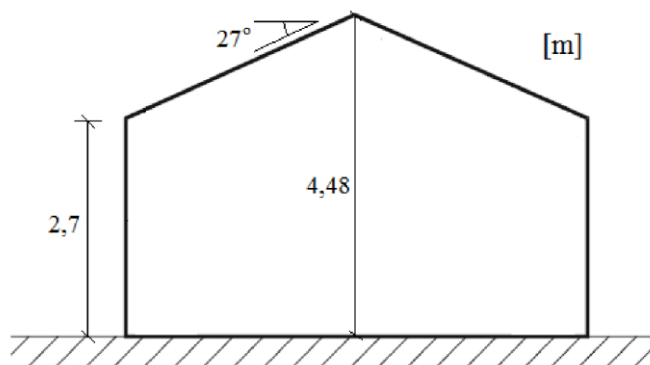
För att undersöka om materialsammansättningarna är lämpliga som konstruktionsmaterial i byggnader kontrolleras lasteffekten enligt standarden SS-EN 1991-1 *Laster på bärverk*, mot kapaciteten i brott- och bruksgränsstadiet.

Beräkningarna genomförs på ett modellhus. Modellhuset är en rektangulär enplansvilla med dimensionerna 7x10 m (yttermått) och byggnadshöjd 2,7 m. Huset har ett sadeltak med ytterbeklädnad av tegelpannor och en lutning på 27° vilket ger en totalnockhöjd på 4,48 m. Takkonstruktionen är ett kalltak med 9 st takstolar av trä med ett centrumavstånd på 1 m, taket har alltså inte takstolar i gavlarna. Taket isolerades med ett 0,6 m tjock lager lösull. Innertaket består av gipsskivor och väggarna består endast av fiberarmerad skumbetong. Modellhuset antas vara uppfört i



Figur 6 Takplan över modellhuset.

Göteborg.



Figur 7 Sektion av modellhuset.

Lasteffekten beräknas genom att ta fram egentyngd, snölast och vindlast vilka är de laster som ska beaktas vid dimensionering av bostäder enligt standard SS-EN 1991-1 *Laster på bärverk*. Lasterna används för att ta fram tre stycken lastkombinationer, enligt standard SS-EN 1990 *Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk*, vilka är:

- Fall 1 snölast som huvudlast
- Fall 2 vindlast som huvudlast
- Fall 3 vindlast som huvudlast utan snölast

Vid beräkningarna dimensioneras ett väggelement som är en meter långt och för att enklare kunna se vilket av lastfallen som är dimensionerande antas väggen till en början ha en tjocklek på 0,4 m. Lastkombinationerna resulterar i en horisontell och en vertikal totallast som sedan räknas om till en total spänning som verkar på väggen. De lastfall med störst drag- respektive tryckspänning blir dimensionerande.

5 Dimensionering

För att få fram dimensionerande spänning på väggelementet beräknas först de aktuella lasterna egentygnd, snö- och vindlast var för sig. Dessa kombineras på tre olika sätt och resulterar i en ekvation beroende av väggens tjocklek vid dimensionerande lastfall.

5.1 Laster

Nedan beräknas de vertikala lasterna som verkar på väggelementet samt horisontell last. Lasterna ges i ett uttryck med enhet kN/m^2 . Förklaringar till respektive beteckning finns i förteckningen på sida VI.

- **Takets egentygnd, g_k**

Egentygnder uppskattas genom information hos tillverkare av de olika materialen som ingår i takkonstruktionen i enlighet med standard SS-EN 1991-1-1 *Allmänna laster - Tunghet, egentygnd, nyttig last för byggnader*. De lättare materialen, till exempel ångspärr och glespanel, har försumrats.

$$g_k = g_{tegel} + g_{råspont} + g_{takstolar} + g_{isolering} + g_{gips} \quad (6)$$

$$g_{tegel} = 0,34 \text{ kN/m}^2$$

$$g_{takstolar} = 0,081 \text{ kN/m}^2$$

$$g_{isolering} = 0,15 \text{ kN/m}^2$$

$$g_{gips} = 0,10 \text{ kN/m}^2$$

$$g_k = 0,34 + 0,081 + 0,15 + 0,10 = 0,67 \text{ kN/m}^2$$

- **Snölast, s**

Beräknas enligt standard SS-EN 1991-1-3 *Allmänna laster - Snölast* med nationella värden enligt tillägg.

$$s = s_k * C_e * C_t * \mu_i \quad (7)$$

$$s_k\{\text{Göteborg}\} = 1,5$$

$$C_e = 1,0$$

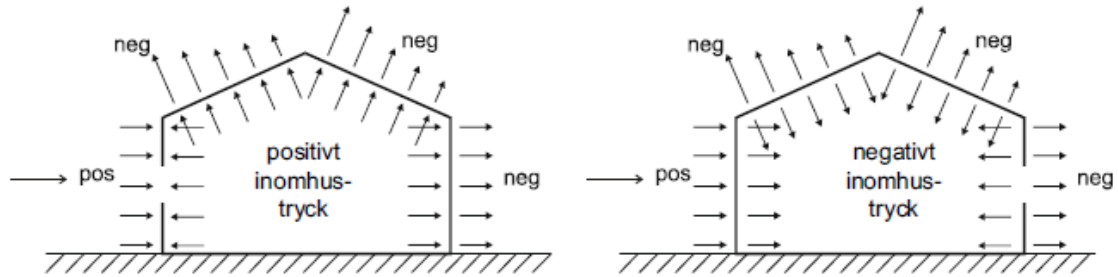
$$C_t = 1,0$$

$$\mu_i = 0,8$$

$$s = 1,5 * 1,0 * 1,0 * 0,8 = 1,2 \text{ kN/m}^2$$

- **Vindlast, q_w**

Beräknas enligt standard SS-EN 1991-1-4 *Allmänna laster - Vindlast* med nationella värden och tillägg.



Figur 8 Modell över vindlaster (SS-EN 1991-1-5). Positivt inomhus kallas även övertryck och negativt inomhus-tryck kallas undertryck, dessa betecknas med index ϕ respektive u i beräkningarna.

$$q_w = w_e + w_i \quad (8)$$

$$w_e = q_p(z_e) * c_{pe,10} \quad (9)$$

$$q_p(z_e)\{h \leq b\} = q_p(z) = c_e(z) * q_b \quad (10)$$

$$c_e(z) \left\{ \begin{array}{l} \text{Terrängtyp III} \\ z = 2,7 \text{ m} \end{array} \right\} = 1,3$$

$$q_b = \frac{1}{2} * \rho * v_b^2 \quad (11)$$

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

$$v_b\{\text{Göteborg}\} = 25 \text{ m/s}$$

$$q_b = \frac{1}{2} * 1,25 * 25^2 = 0,391 \text{ kN/m}^2$$

$$q_p(z) = 1,3 * 391 = 0,508 \text{ kN/m}^2$$

$$c_{pe,10} = 1,2$$

Vid val av formfaktor antas enbart zon A vara gällande för förenkling av beräkningar. Antagandet anses riktigt då detta fall har störst säkerhetsmarginal.

$$w_e = 0,508 * 1,2 = 0,609 \text{ kN/m}^2$$

$$w_i = q_p(z_i) * c_{pi,10} \quad (12)$$

$$q_p(z_i) = q_p(z_e) = 0,508 \text{ kN/m}^2$$

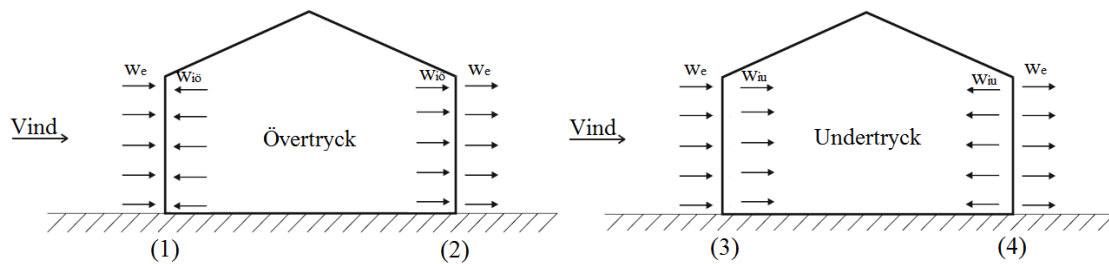
$$c_{pi,10,\phi} = 0,2 \text{ (övertryck)}$$

$$c_{pi,10,u} = 0,3 \text{ (undertryck)}$$

Den relativa öppningsarean anses irrelevant att uppskatta därför används ovanstående värden för $c_{pi,10}$ enligt ANM.2 i aktuell standard.

$$w_{i\phi} = 0,508 * 0,2 = 0,102 \text{ kN/m}^2$$

$$w_{iu} = 0,508 * 0,3 = 0,152 \text{ kN/m}^2$$



Figur 9 Modell över aktuella vindlastfall på väggelement. Positiv riktning i vindens riktning.

$$(1) q_{w\ddot{o}} = 0,609 - 0,102 = 0,507 \text{ kN/m}^2$$

$$(2) q_{w\ddot{o}} = 0,609 + 0,102 = 0,711 \text{ kN/m}^2$$

$$(3) q_{wu} = 0,609 + 0,152 = 0,761 \text{ kN/m}^2$$

$$(4) q_{wu} = 0,609 - 0,152 = 0,457 \text{ kN/m}^2$$

Störst vindlast ges av fall 3, se Figur 9.

$$q_w = 0,761 \text{ kN/m}^2$$

5.2 Lastkombinationer

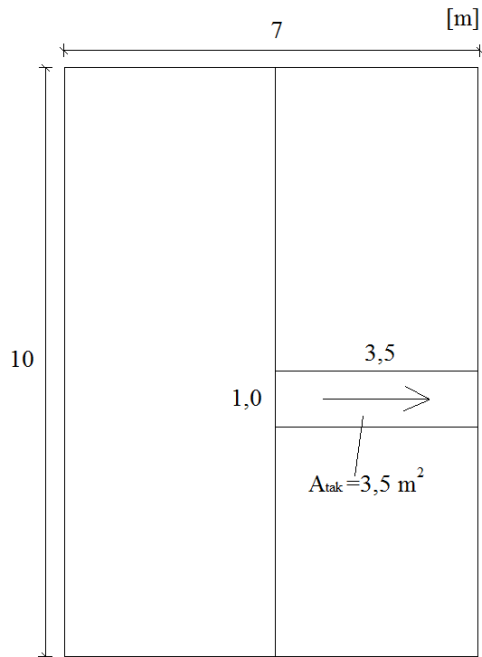
Lasterna kommer nedan kombineras för att sedan få fram det dimensionerande fallet. Både brott- och bruksgräns kommer att undersökas.

För bruksgräns (ULS) gäller:

$$ULS = 1,35 * G + 1,5 * q_1 + 1,5 * \psi_{0,2} * q_2 \quad (13)$$

För brottgräns (SLS) gäller:

$$SLS = G + q_1 + \psi_{0,2} * q_2 \quad (14)$$



Figur 10 Takplan över modellhuset där takarean visas. Vid beräkningarna av egentynngd och snölast är det laster på denna area som väggelementet ska dimensioneras för.

$$G = g_k * A_{tak} = 0,67 * 3,5 = 2,35 \text{ kN (Vertikal } \downarrow) \quad (15)$$

- **Fall 1 snölast som huvudlast**

$$q_1 = s * A_{tak} = 1,2 * 3,5 = 4,2 \text{ kN (Vertikal } \downarrow) \quad (16)$$

$$\psi_{0,2} = 0,3$$

$$q_2 = q_w * 1 = 0,761 * 1 = 0,761 \text{ kN/m (Horisontell } \rightarrow) \quad (17)$$

$$ULS = 1,35 * 2,35 + 1,5 * 4,2 + 1,5 * 0,3 * 0,761$$

$$\downarrow = 9,47 \text{ kN}$$

$$\rightarrow = 0,342 \text{ kN/m}$$

$$SLS = 2,35 + 4,2 + 0,3 * 0,761$$

$$\downarrow = 6,55 \text{ kN}$$

$$\rightarrow = 0,228 \text{ kN/m}$$

- **Fall 2 vindlast som huvudlast**

$$q_1 = q_w * 1 = 0,761 * 1 = 0,761 \text{ kN/m (Horisontell } \rightarrow) \quad (18)$$

$$\psi_{0,2} = 0,6$$

$$q_2 = s * A_{tak} = 1,2 * 3,5 = 4,2 \text{ kN (Vertikal } \downarrow) \quad (19)$$

$$ULS = 1,35 * 2,35 + 1,5 * 0,761 + 1,5 * 0,6 * 4,2$$

$$\downarrow = 6,95 \text{ kN}$$

$$\rightarrow = 1,14 \text{ kN/m}$$

$$SLS = 2,35 + 0,761 + 0,6 * 4,2$$

$$\downarrow = 4,87 \text{ kN}$$

$$\rightarrow = 0,761 \text{ kN/m}$$

- **Fall 3 vindlast som huvudlast utan snölast**

$$q_1 = q_w * 1 = 0,761 * 1 = 0,761 \text{ kN/m (Horisontell } \rightarrow) \text{ (20)}$$

$$ULS = 1,35 * 2,35 + 1,5 * 0,761$$

$$\downarrow = 3,17 \text{ kN}$$

$$\rightarrow = 1,14 \text{ kN/m}$$

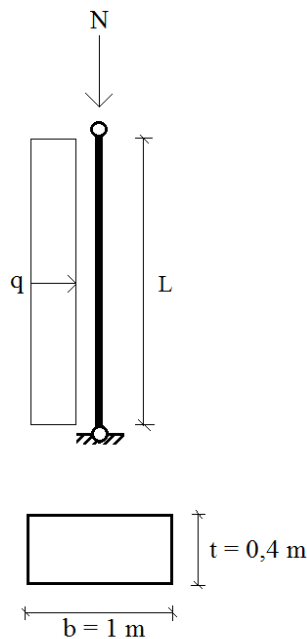
$$SLS = 2,35 + 0,761$$

$$\downarrow = 2,35 \text{ kN}$$

$$\rightarrow = 0,761 \text{ kN/m}$$

5.3 Dimensionerande spänning

För att ta fram dimensionerande lastfallet beräknas spänningen för alla tre fallen i både brott- och bruksgränstillstånd. Spänningen sätts som en funktion av väggens tjocklek som antas vara 0,4 m. Enligt Naviers formel betecknas tryckkrafter negativt.



Figur 11 Modell av verkande laster på väggelement.

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} \quad (21)$$

$$A = b * t = 1 * 0,4 = 0,4 \text{ m}^2 \quad (22)$$

$$W = \frac{b*t^2}{6} = \frac{1*0,4^2}{6} = 0,0267 \text{ m}^4 \quad (23)$$

$$M_d = \frac{q*L^2}{8} = \frac{q*2,7^2}{8} = 0,911 * q \quad (24)$$

Böjdragspänning:

- Fall 1 snölast som huvudlast**

ULS:

$$N = -9,47 * 10^3 \text{ N}$$

$$q = 0,342 * 10^3 \text{ N/m}$$

$$\sigma = \frac{-9,47 * 10^3}{0,4} + \frac{0,911 * 0,342 * 10^3}{0,0267} = -0,0120 \text{ MPa}$$

SLS:

$$N = -6,55 * 10^3 \text{ N}$$

$$q = 0,228 * 10^3 \text{ N/m}$$

$$\sigma = \frac{-6,55 * 10^3}{0,4} + \frac{0,911 * 0,228 * 10^3}{0,0267} = -0,00860 \text{ MPa}$$

- Fall 2 vindlast som huvudlast**

ULS:

$$N = -6,95 * 10^3 \text{ N}$$

$$q = 1,14 * 10^3 \text{ N/m}$$

$$\sigma = \frac{-6,95 * 10^3}{0,4} + \frac{0,911 * 1,14 * 10^3}{0,0267} = 0,0215 \text{ MPa}$$

SLS:

$$N = -4,87 * 10^3 \text{ N}$$

$$q = 0,761 * 10^3 \text{ N/m}$$

$$\sigma = \frac{-4,87 * 10^3}{0,4} + \frac{0,911 * 0,761 * 10^3}{0,0267} = 0,0138 \text{ MPa}$$

- **Fall 3 vindlast som huvudlast utan snö**

ULS:

$$N = -3,17 * 10^3 \text{ N}$$

$$q = 1,14 * 10^3 \text{ N/m}$$

$$\sigma = \frac{-3,17 * 10^3}{0,4} + \frac{0,911 * 1,14 * 10^3}{0,0267} = 0,0310 \text{ MPa}$$

SLS:

$$N = -2,35 * 10^3 \text{ N}$$

$$q = 0,761 * 10^3 \text{ N/m}$$

$$\sigma = \frac{-2,35 * 10^3}{0,4} + \frac{0,911 * 0,761 * 10^3}{0,0267} = 0,0201 \text{ MPa}$$

Tryckspänning:

- **Fall 1 snölast som huvudlast**

ULS:

$$N = -9,47 * 10^3 \text{ N}$$

$$q = -0,342 * 10^3 \text{ N/m}$$

$$\sigma = \frac{-9,47 * 10^3}{0,4} - \frac{0,911 * 0,342 * 10^3}{0,0267} = -0,0353 \text{ MPa}$$

SLS:

$$N = -6,55 * 10^3 \text{ N}$$

$$q = -0,228 * 10^3 \text{ N/m}$$

$$\sigma = \frac{-6,55 * 10^3}{0,4} - \frac{0,911 * 0,228 * 10^3}{0,0267} = -0,0242 \text{ MPa}$$

- **Fall 2 vindlast som huvudlast**

ULS:

$$N = -6,95 * 10^3 \text{ N}$$

$$q = -1,14 * 10^3 \text{ N/m}$$

$$\sigma = \frac{-6,95 * 10^3}{0,4} - \frac{0,911 * 1,14 * 10^3}{0,0267} = -0,0563 \text{ MPa}$$

SLS:

$$N = -4,87 * 10^3 \text{ N}$$

$$q = -0,761 * 10^3 \text{ N/m}$$

$$\sigma = \frac{-4,87 * 10^3}{0,4} - \frac{0,911 * 0,761 * 10^3}{0,0267} = -0,0381 \text{ MPa}$$

- **Fall 3 vindlast som huvudlast utan snö**

ULS:

$$N = -3,17 * 10^3 \text{ N}$$

$$q = -1,14 * 10^3 \text{ N/m}$$

$$\sigma = \frac{-3,17 * 10^3}{0,4} - \frac{0,911 * 1,14 * 10^3}{0,0267} = -0,468 \text{ MPa}$$

SLS:

$$N = -2,35 * 10^3 \text{ N}$$

$$q = -0,761 * 10^3 \text{ N/m}$$

$$\sigma = \frac{-2,35 * 10^3}{0,4} - \frac{0,911 * 0,761 * 10^3}{0,0267} = -0,0318 \text{ MPa}$$

Fallet som ger den största dragspänningen är när vindlast är huvudlast och ingen snölast finns, alltså fall 3.

Fallet som ger den största tryckspänningen är när vindlast är huvudlast, alltså fall 2.

Detta ger att ekvationen för maximala dragspänningen är:

$$\sigma_d = \frac{-3,17 * 10^3}{t} + \frac{0,911 * 1,14 * 10^3}{\frac{t^2}{6}}$$

Och ekvationen för maximala tryckspänningen är:

$$\sigma_d = \frac{-6,95 * 10^3}{t} - \frac{0,911 * 1,14 * 10^3}{\frac{t^2}{6}}$$

6 Resultat

Detta kapitel kommer redovisa alla resultat från mekaniska provningar och beräkningar. Hur resultaten har tagits fram beskrivs i kapitel 4 *Metodik* och kapitel 5 *Dimensionering*. Felkällor och andra kommentarer på resultaten beskrivs och diskuteras vidare i kapitel 7 *Diskussion och slutsats*.

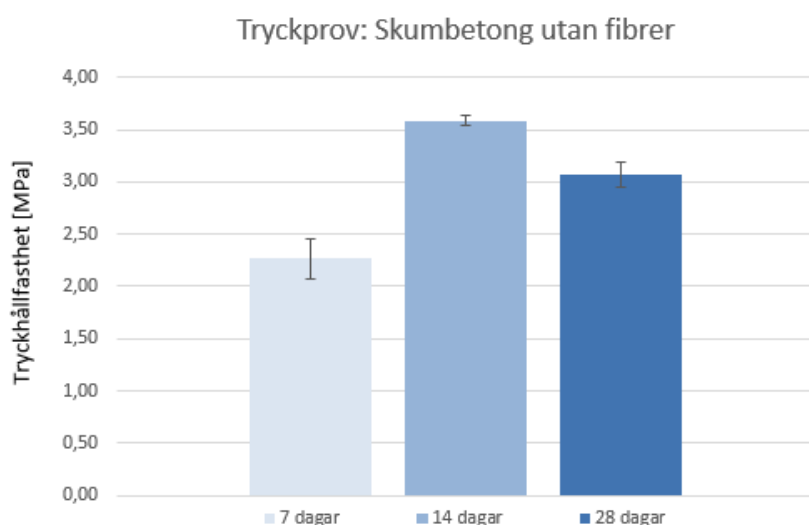
Vid de mekaniska provningarna har vissa resultat skiljt sig mycket från övriga identiska provningar. Där detta sker kommer resultaten inte räknas med i medelvärdena men presenteras i tabellerna. Diagram som visar upp medelvärdena är alltså justerade för att visa ett representativt medelvärde.

6.1 Tryckprovning

Nedan presenteras resultatet av tryckprovningen som utförts. Först presenteras varje materialblandning var för sig i tabeller. Där kan ingångsdata, den uppmätta maximala kraften och den framräknade tryckspänningen utläsas. För proverna med skumbetong utan fibrer och en mix av mikro- och makrofibrer presenteras data från provningar efter 7, 14 och 28 dagar och dessa visas även i stapeldiagram. Slutligen presenteras också en sammanställning av medelvärdena efter 28 dagar i stapeldiagram.

Tabell 5 Ingångsdata och resultat från tryckprovning av provkroppar i skumbetong utan fibrer.

Skumbetong utan fibrer						
Tryckprovning efter 7 dagar						
Provnamn	Vikt [g]	Volym [m ³]	Densitet [kg/m ³]	Area [m ²]	F _{max} [kN]	Tryckhållfasthet [MPa]
Ref 5/9	4132	0,00338	1224	0,0225	50,2	2,23
Ref 7/9	4102	0,00338	1215	0,0225	56,7	2,52
Ref 9/9	4048	0,00338	1199	0,0225	45,9	2,04
Medelvärde:						2,26
Standardavvikelse:						0,198
Tryckprovning efter 14 dagar						
Provnamn	Vikt [g]	Volym [m ³]	Densitet [kg/m ³]	Area [m ²]	F _{max} [kN]	Tryckhållfasthet [MPa]
Ref 4/9	4036	0,00338	1196	0,0225	79,4	3,53
Ref 6/9	4065	0,00338	1204	0,0225	81,4	3,62
Ref 8/9	4161	0,00338	1233	0,0225	81,5	3,62
Medelvärde:						3,59
Standardavvikelse:						0,043
Tryckprovning efter 28 dagar						
Provnamn	Vikt [g]	Volym [m ³]	Densitet [kg/m ³]	Area [m ²]	F _{max} [kN]	Tryckhållfasthet [MPa]
Ref 1/9	3795	0,00338	1124	0,0225	66,8	2,97
Ref 2/9	3795	0,00338	1124	0,0225	67,4	3,00
Ref 3/9	3768	0,00338	1116	0,0225	72,7	3,23
Medelvärde:						3,07
Standardavvikelse:						0,117



Figur 12 Sammanställning av medelvärdena från tryckprovning av provkroppar i skumbetong utan fibrer.

Tabell 6 *Ingångsdata och resultat från tryckprovning av provkroppar med mikrofibrer.*

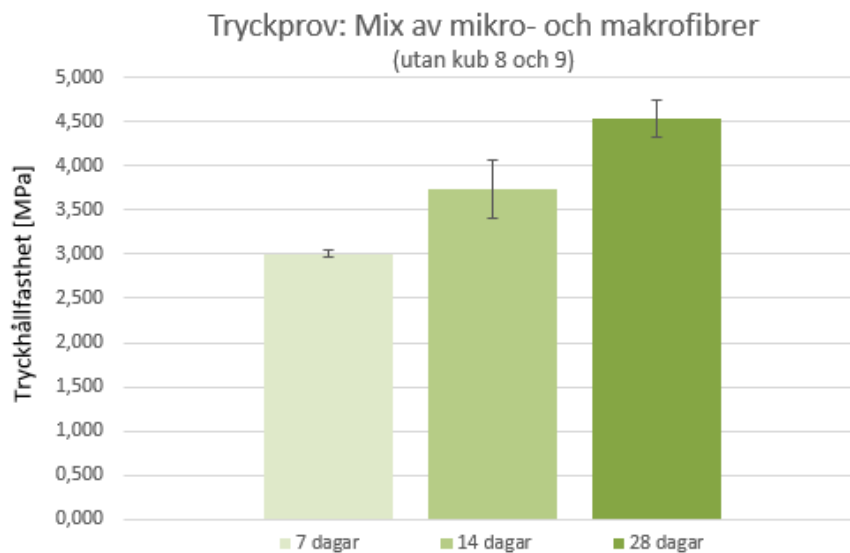
Mikrofibrer						
Tryckprovning efter 28 dagar						
Provnamn	Vikt [g]	Volym [m ³]	Densitet [kg/m ³]	Area [m ²]	F _{max} [kN]	Tryckhållfasthet [MPa]
PVA 1/9	3842	0,003375	1138	0,0225	75,4	3,35
PVA 2/9	3778	0,003375	1119	0,0225	69,4	3,09
PVA 3/9	3881	0,003375	1150	0,0225	72,6	3,23
Medelvärde:						3,22
Standardavvikelse:						0,109

Tabell 7 *Ingångsdata och resultat från tryckprovning av provkroppar med makrofiber.*

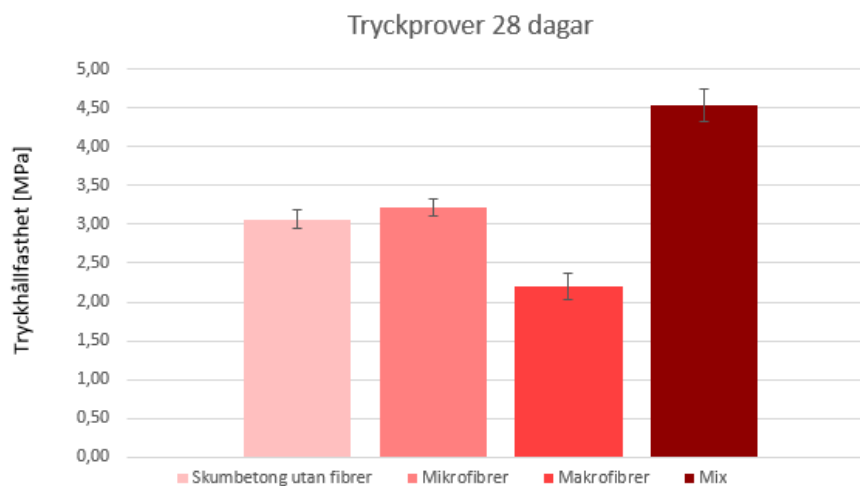
Makrofibrer						
Tryckprovning efter 28 dagar						
Provnamn	Vikt [g]	Volym [m ³]	Densitet [kg/m ³]	Area [m ²]	F _{max} [kN]	Tryckhållfasthet [MPa]
T48s 1/9	3578	0,00338	1060	0,0225	54,6	2,43
T48s 2/9	3494	0,00338	1035	0,0225	48,6	2,16
T48s 3/9	4571	0,00338	1354	0,0225	45,5	2,02
Medelvärde:						2,20
Standardavvikelse:						0,168

Tabell 8 *Ingångsdata och resultat från tryckprovning av provkroppar med en mix av mikro- och makrofibrer. Kub 8 och kub 9 är inte medräknade i medelvärdena då deras resultat avviker mycket från medelvärdet.*

Mix av mikro- och makrofibrer						
Tryckprovning efter 7 dagar						
Provnamn	Vikt [g]	Volym [m ³]	Densitet [kg/m ³]	Area [m ²]	F _{max} [kN]	Tryckhållfasthet [MPa]
Mix 1/9	4141	0,00338	1227	0,0225	66,9	2,97
Mix 2/9	4199	0,00338	1244	0,0225	68,5	3,04
Mix 9/9	3361	0,00338	996	0,0225	11,7	0,52
Medelvärde:						3,01
Standardavvikelse:						0,035
Tryckprovning efter 14 dagar						
Provnamn	Vikt [g]	Volym [m ³]	Densitet [kg/m ³]	Area [m ²]	F _{max} [kN]	Tryckhållfasthet [MPa]
Mix 6/9	4035	0,00338	1196	0,0225	76,6	3,40
Mix 7/9	4220	0,00338	1250	0,0225	91,4	4,06
Mix 8/9	3130	0,00338	927	0,0225	16,4	0,73
Medelvärde:						3,73
Standardavvikelse:						0,331
Tryckprovning efter 28 dagar						
Provnamn	Vikt [g]	Volym [m ³]	Densitet [kg/m ³]	Area [m ²]	F _{max} [kN]	Tryckhållfasthet [MPa]
Mix 3/9	4014	0,00338	1189	0,0225	106	4,71
Mix 4/9	4034	0,00338	1195	0,0225	95,6	4,25
Mix 5/9	4068	0,00338	1205	0,0225	105	4,67
Medelvärde:						4,54
Standardavvikelse:						0,208



Figur 13 Sammanställning av medelvärdena från tryckprovning av provkroppar med en mix av mikro- och makrofibrer.



Figur 14 Jämförelse av medelvärdena från tryckprovresultaten efter 28 dagar på samtliga blandningar.

6.2 Böjdragprovprovning

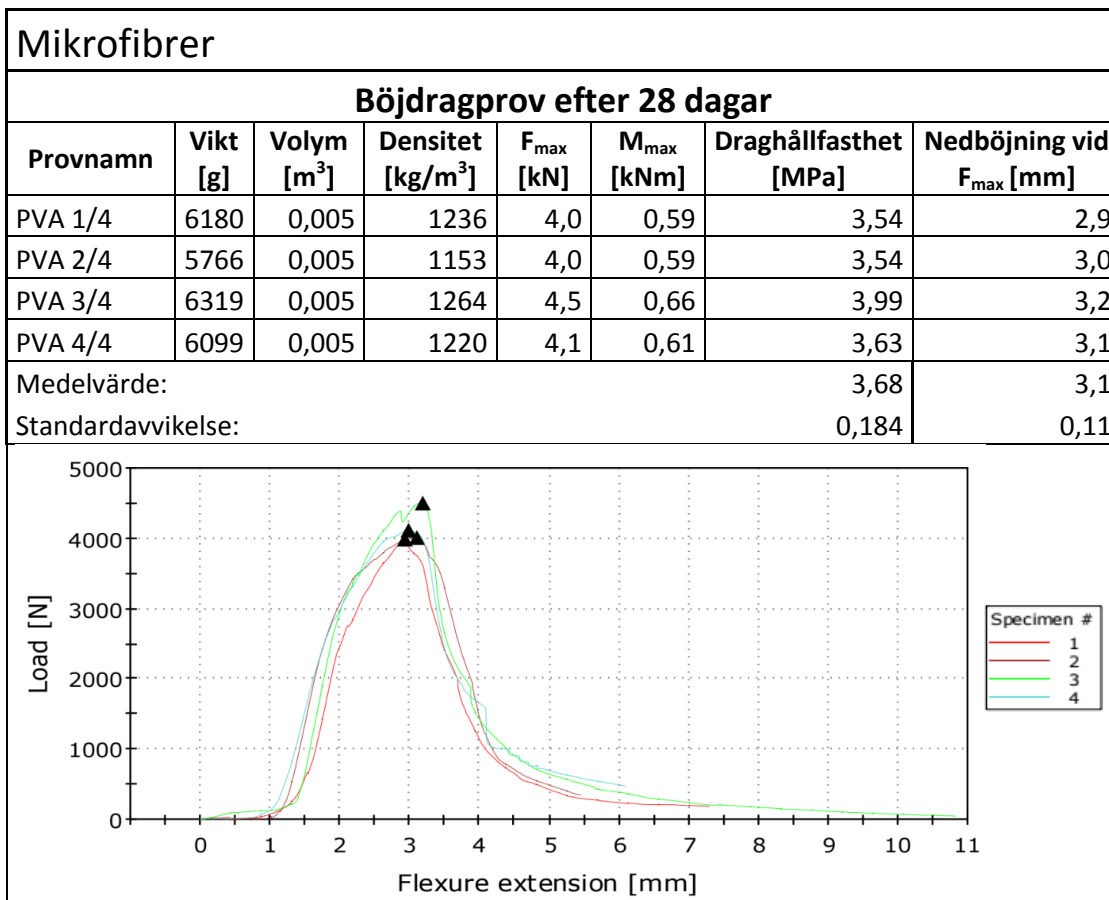
Nedan presenteras resultatet av böjdragprovningen som utfördes efter 28 dagar. Först presenteras resultat för varje materialblandning var för sig i tabeller och i grafer. Tabellerna visar ingångsdata, uppmätt maximal kraft, framräknat momentet, framräknad böjdraghållfasthet och uppmätt nedböjning vid maximal last. Graferna visar lasten som funktion av nedböjningen. En sammanställning av medelvärdena för böjdraghållfastheten och en över medelnedböjningen presenteras även som stapeldiagram.

Tabell 9 Resultat och ingångsdata från böjdragprovning av provkroppar av skumbetong utan fibrer. Grafen visar last och nedböjning under provningsförloppet. Nedböjning för balk 1 är inte medräknat i medelvärdet då resultatet avviker mycket från medelvärdet.

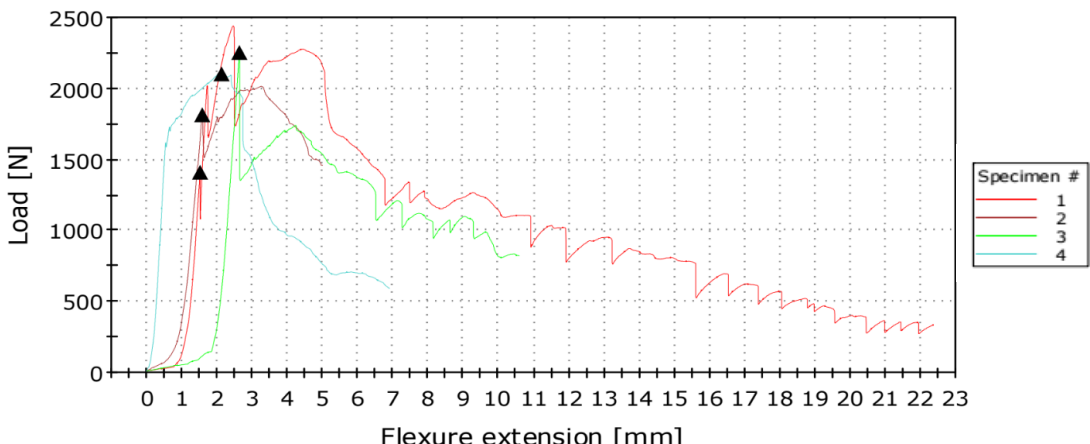
Skumbetong utan fibrer							
Böjdragprov efter 28 dagar							
Provnamn	Vikt [g]	Volym [m ³]	Densitet [kg/m ³]	F _{max} [kN]	M _{max} [kNm]	Draghållfasthet [MPa]	Nedböjning vid F _{max} [mm]
Ref 1/4	5539	0,005	1108	1	0,14	0,85	1,24
Ref 2/4	5160	0,005	1032	0,9	0,13	0,76	0,59
Ref 3/4	5479	0,005	1096	0,7	0,10	0,58	0,50
Ref 4/4	5585	0,005	1117	0,9	0,13	0,76	0,55
Medelvärde:						0,7	0,55
Standardavvikelse:						0,098	0,30

The graph plots Load [N] on the y-axis (0 to 1200) against Flexure extension [mm] on the x-axis (0.0 to 1.3). Four curves are shown: Specimen 1 (red), Specimen 2 (green), Specimen 3 (blue), and Specimen 4 (cyan). Specimens 2, 3, and 4 show a similar trend, peaking at approximately 700-900 N between 0.5 and 0.6 mm extension before failing. Specimen 1 is an outlier, showing a much lower initial load, peaking at about 100 N around 0.6 mm, and then continuing to rise to a final peak of approximately 1050 N at 1.25 mm extension.

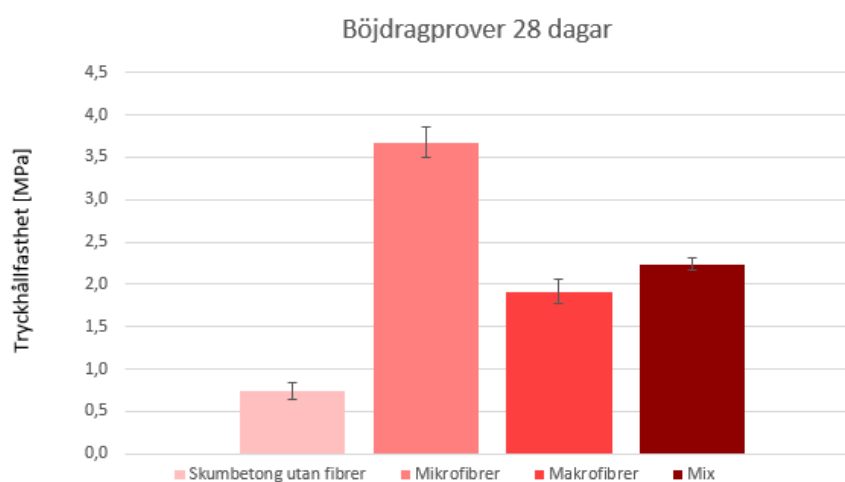
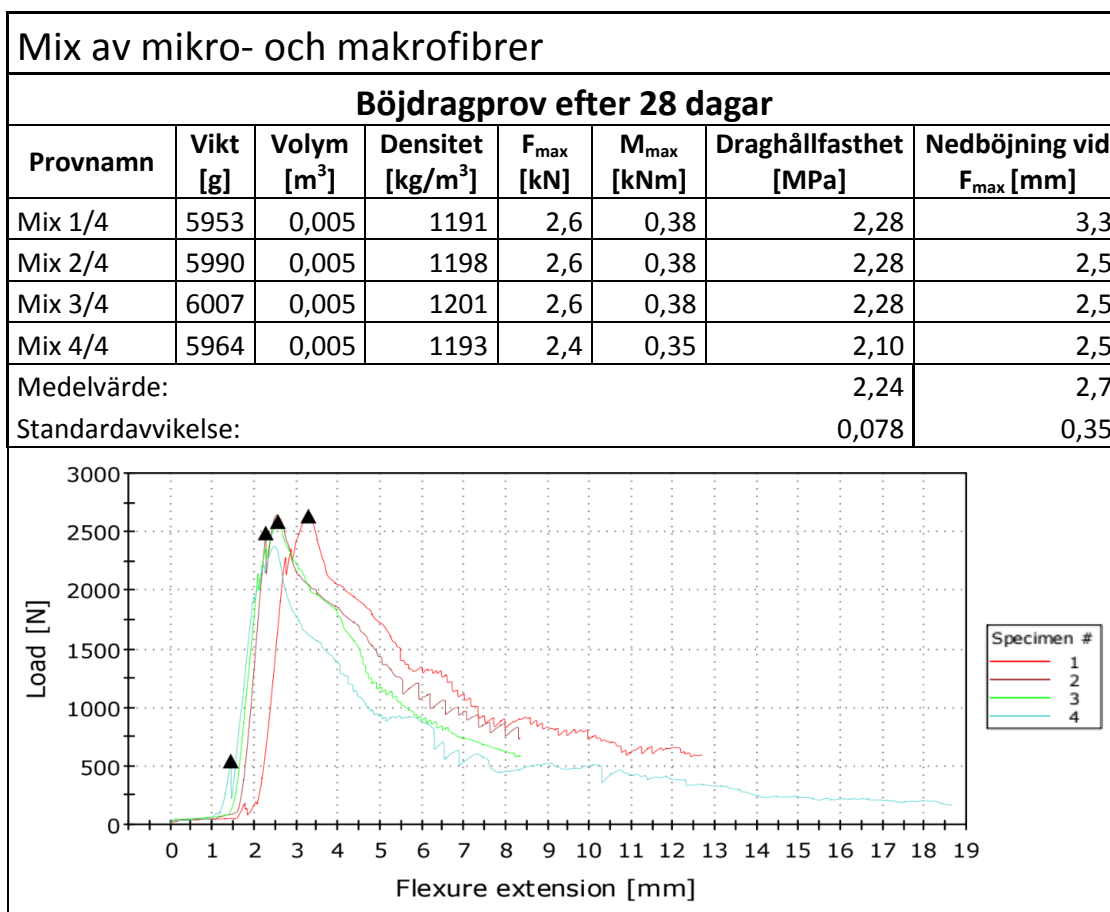
Tabell 10 Resultat och ingångsdata från böjdragprovning av provkroppar med mikrofibrer. Grafen visar last och nedböjning under provningsförloppet.



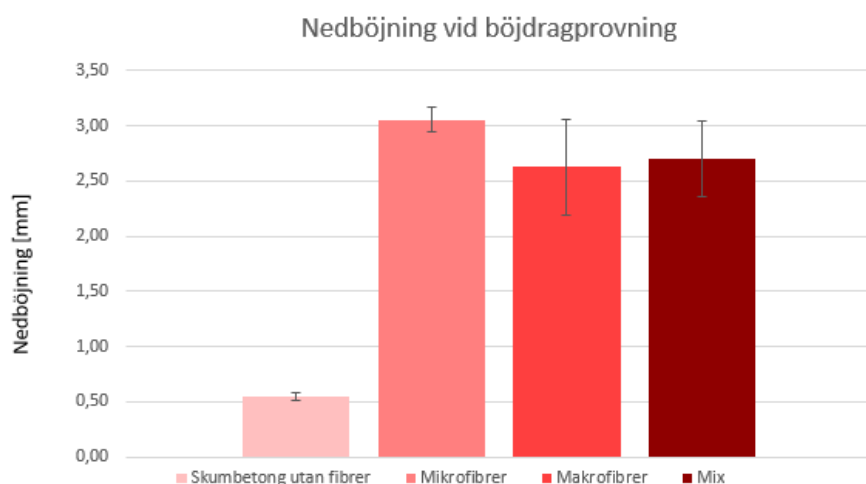
Tabell 11 Resultat och ingångsdata från böjdragprovning av provkroppar med makrofibrer. Grafen visar last och nedböjning under provningsförloppet.

Makrofibrer							
Böjdragprov efter 28 dagar							
Provnamn	Vikt [g]	Volym [m ³]	Densitet [kg/m ³]	F _{max} [kN]	M _{max} [kNm]	Draghållfasthet [MPa]	Nedböjning vid F _{max} [mm]
T48s 1/4	6909	0,005	1382	2,4	0,35	2,09	2,5
T48s 2/4	6601	0,005	1320	2,0	0,29	1,74	3,3
T48s 3/4	6621	0,005	1324	2,3	0,33	2,01	2,6
T48s 4/4	6358	0,005	1272	2,1	0,30	1,83	2,1
Medelvärde:						1,92	2,6
Standardavvikelse:						0,141	0,43
							

Tabell 12 Resultat och ingångsdata från böjdragprovning av provkroppar med en blandning av mikro- och makrofibrer. Grafen visar last och nedböjning under provningsförloppet.



Figur 15 Jämförelse av medelvärdena från böjdragprovningens resultaten.



Figur 16 Jämförelse av medelvärdena från nedböjningen vid böjdragprovning.

6.3 Snittanalys

Hur makrofibrernas placering analyserats beskrivs i kapitel 4 *Metodik*. I Tabell 13 visas med pilar i vilken riktning tvärsnittet belastats samt gjutriktning. Tvärsnittet har delats upp i zoner A - F och ett exempel på hur analysen gjorts visas på provkropp Mix 1/4 i Tabell 13 och övriga analyser presenteras i bilaga 2 *Snittanalys*. Sammanslagning av samtliga snittanalyser där placeringen av makrofibrer analyserats visas i Tabell 14 nedan.

Tabell 13 Exempel på resultat från snittanalys av balkar med makrofibrer.

Last
↓

Provkropp: Mix 1/4 Vänster

A: 3 st

B: 2 st

C: 2 st

D: 2 st

E: 4 st

F: 5 st

Last
↓

Provkropp: Mix 1/4 Höger

B: 0 st

A: 1 st

D: 6 st

C: 6 st

F: 5 st

E: 1 st

Sammanlagda fibrer i
brottyta: Mix 1/4

A: 4 st

B: 2 st

C: 8 st

D: 8 st

E: 5 st

F: 10 st

Tabell 14 Sammanställning av resultatet från snittanalysen av balkar med makrofibrer.

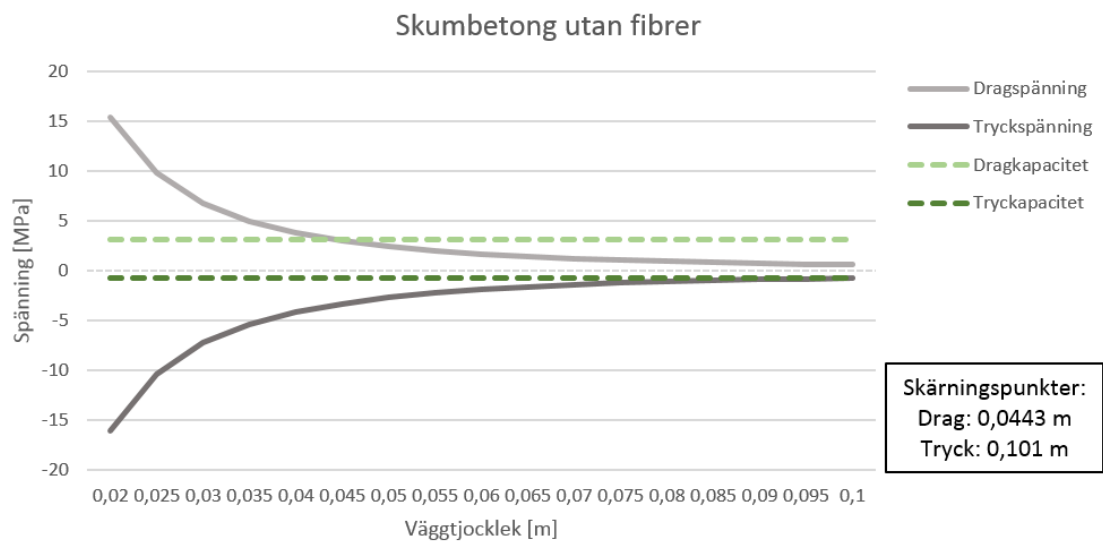
Resultat av snittanalys								
Prov - littera	Mix 1/4	Mix 2/4	Mix 3/4	Mix 4/4	T48s 1/4	T48s 2/4	T48s 3/4	T48s 4/4
Zon: A+C+E [st]	17	29	21	24	35	41	37	35
Zon: B+D+F [st]	20	25	20	12	29	26	27	39

6.4 Dimensionering

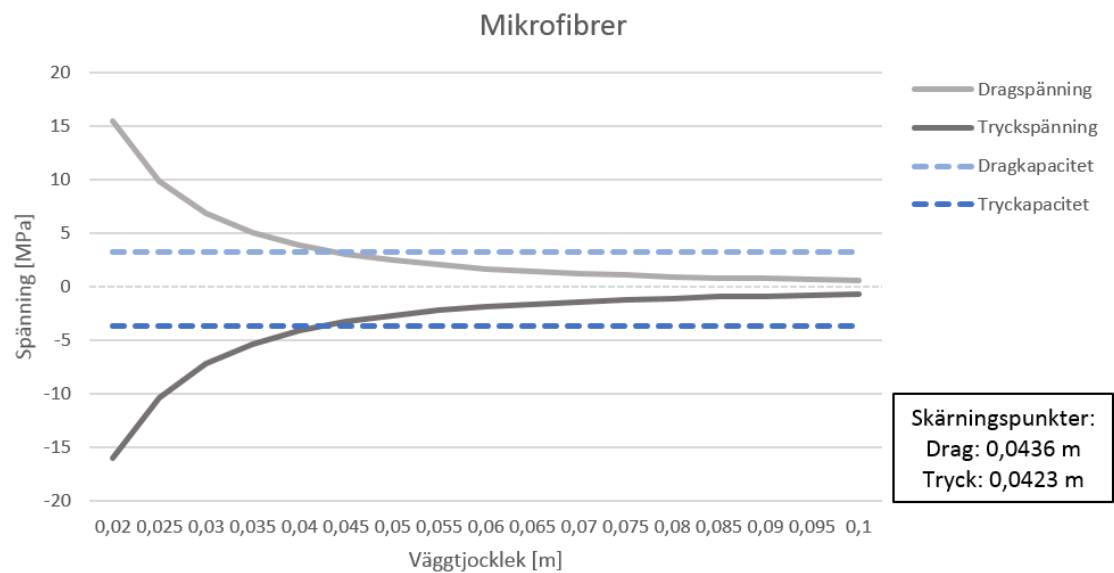
För att kontrollera om en vägg i modellhuset klarar av att bära lasterna som räknats fram måste kapaciteten för materialet vara större än lasteffekten. Kapaciteten presenteras nedan i Tabell 15 för de olika materialsammansättningarna i tryck- och böjdraghållfasthet. Efter det presenteras fyra olika diagram med kapaciteten samt de dimensionerade spänningarna beroende på väggens tjocklek för varje materialsammansättning. Av graferna och beräkningar presenteras i Tabell 16 minsta vägg tjocklek som uppfyller dimensioneringskraven för de olika materialen.

Tabell 15 Tryck- och böjdragskapaciteten för de olika blandningarna.

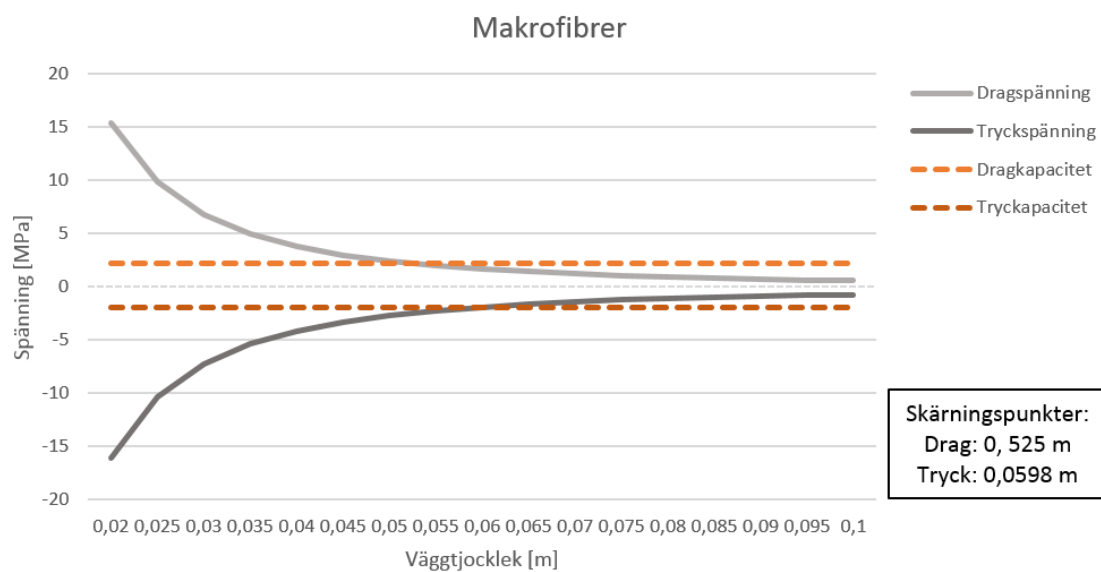
Kapacitet		
	Tryckhållfasthet [MPa]	Böjdraghållfasthet [MPa]
Skumbetong utan fibrer	3,1	0,7
Mikrofibrer	3,2	3,7
Makrofibrer	2,2	1,9
Mix av mikro- och makrofibrer	4,5	2,2



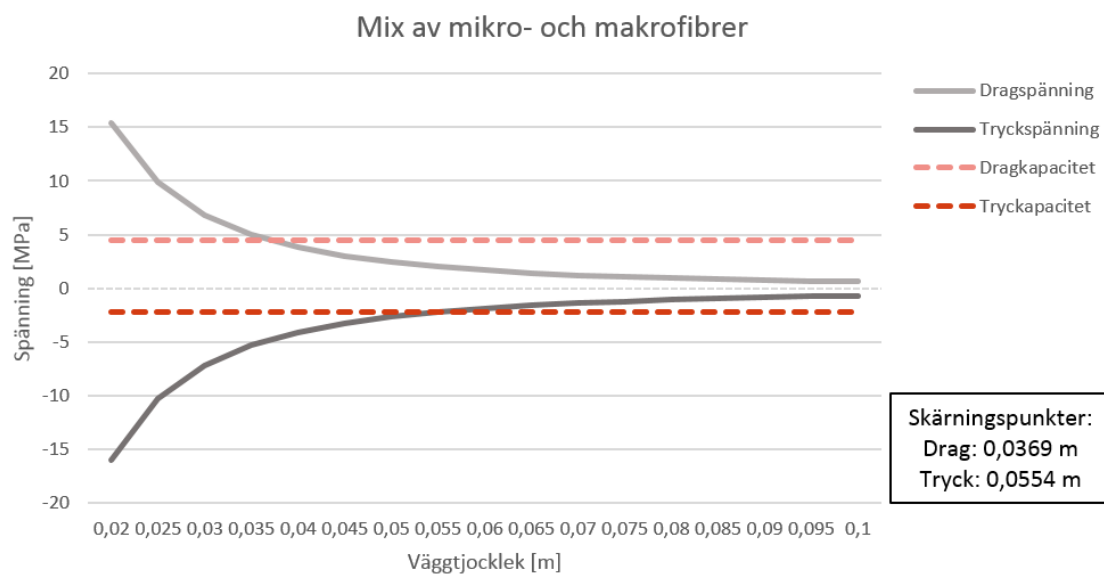
Figur 17 Linjediagram med tryck- och böjdragspänningen samt kapaciteten för skumbetong utan fibrer.



Figur 18 Linjediagram med tryck- och böjdragspänningen samt kapaciteten för mikrofibrer.



Figur 19 Linjediagram med tryck- och böjdragspänningen samt kapaciteten för makrofibrer.



Figur 20 Linjediagram med tryck- och böjdragspänningen samt kapaciteten för en mixa av mikro- och makrofibrer.

Tabell 16 Minsta möjliga vägg tjocklek för de olika materialsammansättningarna.

Materialsammansättning	Skumbetong utan fibrer	Mikrofibrer	Makrofibrer	Mix av mikro- och makrofibrer
Vägg tjocklek [m]	0,101	0,0436	0,0598	0,0554

7 Diskussion och slutsatser

I detta kapitel analyseras metoderna som använts och resultaten som presenteras tidigare. Val och metoder försvaras och förklaras och deras påverkan på resultatet kommer att analyseras. Även fibrerna och valda materialsammansättningar diskuteras. Felkällor och andra faktorer som kan ha påverkat resultatet lyfts fram.

7.1 Metodanalys

I arbetets början valdes två typer av syntetiska fibrer som sedan har ingått i de materialsammansättningar som projektet använt. När fibrerna skulle väljas ansågs syntetiska fibrer bäst lämpade bland annat för att de inte provats i stor utsträckning tidigare. Syntetiska fibrer påverkas inte heller av korrosion eller av de kemiska förhållandena som råder i betongen vilket andra fibermaterial gör. Fibrerna kan tillverkas av återvunnet material vilket sågs som en fördel ur miljöperspektiv. En annan fördel ansågs vara att fibrerna har en låg densitet i jämförelse med huvudgrupperna stål och glas. Glasfibrer valdes bort för att det inte fanns några fungerande recept att använda sig av där glasfibrerna inte bryts ner i de basiska förhållandena i betongen. På grund av begränsad tid ansågs inte heller alternativet att arbeta fram ett lämpligt recept rimligt. Naturligt förekommande fibrer valdes bort då de kan ge problem med reaktioner på fukt. Arbetet syftar till att ta fram nya arbetssätt och metoder för betongbyggnader vilket gjorde att stålfibrer valdes bort då det är dessa som används mest frekvent idag. Inom materialgruppen syntetiska fibrer finns flera olika material och dimensioner att välja mellan och många ansågs lämpliga. De använda fibrerna av polyvinylalkohol och polyolefin valdes i samråd med handledare från Chalmers och CBI. Anledningen till att en mikro- och en makrofiber valdes var att det ansågs intressant att undersöka om dessa två kunde samverka.

Ett annat val som påverkar resultatet är receptets sammansättning. Där regleras bland annat koncentrationer av fibrer och densiteten på den färdigblandade betongen. I studien används en högre koncentration av mikrofibrer än vad tillverkaren rekommenderar i sitt produktblad. Detta frångicks efter diskussion med handledare och ansågs okej eftersom att rekommendationen från tillverkaren är baserad på vanlig betong och för att de specifika egenskaperna är att motverka sprickbildning inte är de huvudsakliga egenskaperna som söks i arbetet. CBI har även tidigare gjort liknande prover med fiberarmerad skumbetong med liknande recept.

När receptet togs fram valdes också antalet provningsrepetitioner som skulle utföras på varje blandning. Vid tryck- och böjdragprovningarna utfördes tre respektive fyra identiska prover av varje materialsammansättning. Flera repetitioner har gjorts för att kunna ta fram ett representativt medelvärde på hållfastheterna. De flesta provningarna har gett liknande resultat med en liten spridning och därmed ett tillförlitligt resultat. Dock har vissa resultat haft en stor spridning, till exempel vid mätning av nedböjningen under böjdragprovningen varierar resultatet vilket gör att säkerheten på resultatet är låg. Om ett större antal prover gjorts skulle resultaten vara mer precisa och ha en större säkerhet. Anledningen till att det inte gjordes fler repetitioner var främst arbetets tidsbegränsning. Gällande nedböjningen har ingen hänsyn i mätningen tagits till att registrera och räkna bort den deformationen som sker vid upplagspunkterna. Skulle detta göras fås ett lägre värde på nedböjningen.

Under laborationen där betongblandningarna bereddes och gjöts gjordes metodval som kan ha påverkat resultatet. När skumbetongen blandades fick cementen tillsammans med sand och eventuella fibrer stå i vatten i cirka 30 minuter. Detta gjordes för att undvika kollaps som tidigare nämnts skett vid liknande undersökningar. Kollapsen tros ha berott på att cementen reagerade med skummet istället för vattnet. Tanken var att cementen skulle reagera med vattnet innan skummet tillsattes och på så vis undvika kollaps. Detta gjordes på rekommendation av handledare på CBI. Resultaten visar på att denna metod var lyckad då inget av proverna kollapsade om inga andra faktorer spelade in. Metodvalet tros dock ha bidragit till lägre hållfasthetsvärden än om skummet blandats i direkt då andra liknande provningar har gett högre resultat.

Varje materialblandning har under laborationerna beretts i flera olika omgångar för att göra mängden betong hanterlig vid gjutning. Detta har gjort att samma materialblandning inte har exakt samma innehåll. Samma recept har följts men på grund av uppdelningen fås en naturlig variation i betongens sammansättning då det omöjligt kan bli exakt samma proportioner. Till exempel har skummet blandats i med målet att ge en densitet på 1200 kg/m^3 på alla blandningar men med den metod som valts har en variation uppstått då det var svårt att styra mängden skum exakt. Att blandningarna har en viss skillnad i sammansättning har troligtvis påverkat resultatet, beroende på vad som skiljer de olika satserna åt kan resultaten för materialens hållfasthet ha blivit både lägre och högre.

De metodval som gjorts tros ligga bakom flera avvikande resultat. Ett av dessa är resultatet för tryckhållfastheten på provet med skumbetong utan fibrer efter 28 dagar. Detta resultat visar en lägre hållfasthet än samma blandning efter 14 dagar vilket är oväntat då hållfastheten i regel ökar med härdningstiden. Anledningen att resultatet blir lägre efter 28 dagar än 14 dagar kan ha ett samband med att dessa prover har en lite lägre densitet än resterande. I samband med uttorkningen av proverna sker en naturlig minskning av densiteten, men skillnaden på proverna efter 14 dagar och 28 dagar ser i jämförelse med proverna med en blandning av mikro- och makrofibrer efter 14 och 28 dagar för stor ut för att bero på endast uttorkning. En möjlig orsak till skillnad i densitet kan vara att samtliga prover med skumbetong utan fibrer som provas efter 28 dagar blandades i samma omgång och som det presenteras i Tabell 3 skiljer densiteten sig med 95 kg/m^3 från önskat värde i en av satserna. Om det är så att satsen med lägre densitet blev den som testades vid 28 dagar kan det förklara varför dessa prover får en lägre tryckhållfasthet.

Ett annat avvikande resultat fås för provkropparna markerade med Mix 8/9 och Mix 9/9. Där uppnår tryckhållfastheten endast 18 % av övriga provers kapacitet under samma testförhållanden. Den mycket lägre kapaciteten som uppmätts anses ha ett samband med hur Mix 8/9 och Mix 9/9 bereddes. Då mixen av mikro- och makrofibrer gjöts fick sista satsen först en densitet över toleransnivån och när mer skum tillsattes blev densiteten för låg. Efter att betongen vispats ett tag men fortfarande hade väldigt låg densitet togs beslutet att trots detta fortsätta med gjutningen. Risker för kollaps ansågs för stora för att fortsätta vispa betongen och kuberna Mix 8/9 och Mix 9/9 gjöts med denna betong. Att proverna har en väldigt låg tryckhållfasthet tyder på att bearbetningen under vispningen gav en negativ effekt på hållfastheten. Den lägre densiteten kan också antas vara en bidragande faktor till det

avvikande resultatet. För att få ett representativt resultat på tryckhållfastheten har de två avvikande värdena bortsetts från då medelvärdena på tryckhållfastheten beräknats.

Liknande resonemang vid beräkning av medelvärdet har förts för nedböjningen vid böjdragprovning av provkroppen med littera Ref 1. Detta värde skiljer sig från övriga prover av skumbetong utan fibrer. Orsaken till att värdet skiljer sig skulle dels kunna vara felaktig montering av avläsningsinstrumentet eller att testanordningen inte nollställts innan provningen påbörjats. En annan orsak kan också vara att balken inte slipats tillräckligt jämnt och därmed haft en ojämn kant som störde avläsningen.

Vid beräkningarna har vissa antaganden och metodval gjorts som kan ha påverkat resultatet. Till exempel vid beräkning av takets egentygnd används tabellvärden från tillverkare av respektive takkomponent. Värden som valts antas vara rimliga för modellhuset och egentygnden antas inte variera med några större skillnader tillverkare emellan. Det finns många typer av tak som gör att egentygnden och därmed påkänningarna i betongväggen varierar. Eventuellt hade andra taktyper påverkat resultatet av beräkningarna och därmed gett en annan spänningsfördelning. Även att vissa takdelar valts att uteslutas på grund av deras låga vikt kan ha påverkat resultatet. Om alla komponenter tagits med skulle takets egentygnd blivit större vilket hade gett en större lasteffekt. Dock anses detta inte påverka resultatet i betydlig utsträckning. Andra faktorer som val av takkonstruktion skulle ha gett större påverkan på egentygnden för taket.

7.2 Resultatanalys

Arbetet syftar till att utreda om fiberarmerad skumbetong går att använda som bärande material i bostäder med rimliga dimensioner. De presenterade resultaten säger att en enplansvilla uppförd i Göteborg med en vägg som är gjord av skumbetong armerad med mikrofibrer klarar de laster som beräknats om den är minst 44 mm tjock. En bärande yttervägg kan idag ha varierande tjocklek där allt från väggar som är en tegelsten tjock, ca 100 mm, till passivhus med väggar tjockare än 500 mm finns. Den framräknade tjockleken är utanför detta intervall och kan låta liten i jämförelse med dagens vanliga dimensioner. De beräkningar som gjorts anses riktiga och tillförlitliga då de följer standarder för framtagning av dimensionerande spänningsförhållanden. Därför anses fiberarmerad skumbetong vara lämpligt som bärande material baserat på beräkningarna. Målet är inte att nå en tjocklek som ligger inom intervallet, men gissningsvis blir väggens tjocklek större då andra krav såsom stabilitet och isoleringsförmåga tas hänsyn till. Uppfyller väggen alla krav som finns och samtidigt har en mindre tjocklek än vad som vanligtvis används i bostäder anses detta vara positivt då material kan sparas.

Tryckhållfastheten 3,1 MPa som uppnås i prover med skumbetong utan fibrer skiljer sig stort från maximal uppnåbar tryckhållfasthet vid ideala förhållanden för skumbetong 90 dagar efter gjutning. Enligt Figur 1 kan skumbetong anta en tryckhållfasthet på 11 MPa vid optimala förhållanden. För att kunna jämföra detta med framtagen tryckhållfasthet efter 28 dagar kan det antas att tryckhållfastheten istället är 70 % av hållfastheten som visas i figuren vilket motsvarar 7,7 MPa. Beräknas den troliga tryckhållfastheten som är hälften så stort som värdet vid ideala förhållanden borde tryckhållfastheten ha ett värde på 3,9 MPa enligt Figur 1.

Resultatet på tryckhållfastheten i arbetet är 3,1 MPa och ligger därmed nära väntad kapacitet.

Då provresultaten analyseras och de olika blandningarna jämförs syns det att skumbetong har en mycket lägre tryckhållfasthet än vanlig betong som tidigare nämnts ligger på ca 40 MPa. Resultaten visar att en tillsättning av 0,46 vol% mikrofibrer ger en mycket liten ökning på 0,1 MPa av tryckhållfastheten medan en tillsättning av 0,77 vol% makrofibrer sänker tryckhållfastheten med 0,9 MPa. Slutsatsen som kan dras av detta är att mikrofibrerna bidrar till ökad tryckhållfasthet medan makrofibrer ger en reducering. Att mikrofibrer ökar tryckhållfastheten kan tänkas bero på att de håller ihop de mikrosprickor som uppstår i betongen när den utsätts för tryck. Att ökningen inte är så stor kan bero på att fibrerna inte är tillräckligt styva utan deformeras med betongen när större sprickor bildas. Makrofibrernas reducering av tryckhållfastheten tros bero på att de sprickor som bildas i betongen letar sig in längs med fibrerna vilket gör att betongen spricker lättare och därmed har en lägre hållfasthet. Resultatet av prover med inblandning av 0,15 respektive 0,55 vol% mikro- och makrofibrer visar en ökning av tryckhållfastheten från 3,1 MPa till 4,5 MPa. Att koncentrationen av makrofibrer är lägre i mixen än i prover med endast makrofibrer kan vara av betydelse, en lägre koncentration kan göra att betongsprickorna inte letar sig längs fibrerna på samma sätt. Det är också en lägre koncentration av mikrofibrer och en slutsats som dras av detta är att en lägre koncentration av mikrofibrer kan innebära en bättre tryckhållfasthet. För att stärka denna teori behövs dock fler provningar med fler provkroppar och med en variation av fiberkoncentrationer genomföras.

Om böjdraghållfastheten analyseras visar den att skumbetong utan fibrer som har en hållfasthet på 0,7 MPa, ligger långt under vanlig betong som tidigare nämnts har en böjdraghållfasthet på 4,9 MPa. Sedan visar resultatet att en tillsättning av fibrer ger en stor ökning. Den största ökningen fås av mikrofibrerna som gav 3,7 MPa vilket är relativt nära värdet för vanlig betong. Detta kan förklaras precis som innan med att dessa fibrer håller ihop mikrosprickorna. När synliga sprickor bildas och balken spricker upp fortsätter fibrerna att hålla ihop betongen vilket ger ett segt brott. Detta visas tydligt i graferna över böjdragprovningensförloppet. Graferna visar också att brottet för balkar av bara skumbetong är sprött. Den minsta ökningen av böjdraghållfasthet ges av enbart makrofibrer vilket kan förklaras med samma resonemang som innan, att sprickorna bildas genom att leta sig längs med fibrerna. Provningsförloppet för denna blandning ger en väldigt ojämn kurva vilket förklaras med att lasten fördelas efter hand i de långa fibrerna i snittet då de går av efter en viss belastning och nya fibrer tar vid, vilket fortlöper tills det att balken är helt uppsprucken eller att provningen avbryts. Resultatet på böjdraghållfastheten av blandningen bestående av mikro- och makrofibrer ligger på 2,2 MPa vilket är lägre än mikrofibrerna men lite högre än makrofibrerna. Detta tros bero på att mikrofibrerna förhindrar uppkomsten av de stora sprickorna medan makrofibrerna påskyndar dessa. Dock har mikrofibrerna en större inverkan vilket gör att resultatet för mixen är närmare resultatet för mikrofibrerna än makrofibrerna. Provningsförloppet för en mix av fibrer påminner om den ojämna kurva som makrofibrer ger. Detta orsakas troligtvis av makrofibrer men att kurvan blir jämnare för att mikrofibrerna också håller ihop det uppspruckna snittet.

Resultatet av brottsnittanalysen som genomförts kan ge vissa indikationer på hur fibrerna lägger sig i förhållande till gjutriktning. Vid analysen av betongen med bara makrofibrer är en majoritet av fibrerna fördelade i övre halvan mot gjutriktningen i tre av fyra prov. I prov 4/4 ligger fler fibrer i nedre halvan mot gjutriktningen men antalet är nära jämnt fördelat. I betongen med blandade mikro- och makrofibrer kan ingen märkbar skillnad i placering av makrofibrer noteras utan de fördelar sig likvärdigt i övre och undre skiktet mot gjutriktningen. Troligtvis har inblandningen av mikrofibrer en inverkan då de hindrar makrofibrerna att förflytta sig i betongen.

Sammanfattningsvis gav mixen av mikro- och makrofibrer störst tryckhållfasthet och mikrofibrerna störst böjdraghållfasthet. Detta resultat anses ha ett samband med koncentrationen av fibrer samt hur de olika fibrerna fördelar laster. I arbetet har avvikande värden och felkällor identifierats, resultatet anses ändå vara aktuellt då detta tas i beaktning när slutsatser dras.

8 Vidare studier

De resultat som presenteras och de slutsatser som dragits visar att fiberarmerad skumbetong är ett material med potential. Därför kommer detta avsnitt att lyfta fram vissa aspekter och områden som anses viktiga och intressanta att undersöka vidare.

För att kunna använda materialet i hållbart byggande bör en livscykelanalys göras som tar hänsyn till hela produktionskedjan från utvinning av råmaterial till demontering och återvinning. Detta inkluderar att undersöka hur materialet kan återvinnas och separeras efter förbrukning. Återvinningen kan vara aktuellt att kolla närmare på om fiberarmerad skumbetong vill användas i exempelvis jordbävningsdrabbade områden där livslängden på byggnaden kan vara kortare än annars. Vi ser en utmaning med återvinningen av betong armerad med fibrer i jämförelse med vanlig armering. Orsaken ligger i att arbetet med att separera betongen från fibrerna kan antas vara mer omfattande än att separera betongen från vanliga armeringsjärn och om fibrerna inte separeras är det svårt att återvinna eller återanvända materialet.

Om fiberarmerad skumbetong ska komma att användas i produktion är det viktigt att undersöka hur spill och rester kan hanteras. Under laborationerna som genomförts har det noterats att fibrerna lätt samlas och täpper till filter och annan utrustning. Fibrerna bör hanteras så att de inte släpps ut i vattendrag och kringliggande natur, särskilt för mikrofibrerna kan detta bli en utmaning då de är små. Ska byggnadsmaterialet användas i u-länder är det viktigt att förmedla kunskap om hur eventuella utsläpp påverkar kringliggande natur och biologiska system om denna kunskap inte redan finns.

Angående användning av fiberarmerad skumbetong som konstruktionsmaterial i andra länder bör beräkningar göras med andra förutsättningar än de som använts vid dimensioneringen av väggarna i det framtagna modellhuset. Andra klimatförhållanden kan råda än de som råder i Göteborg och därför borde dessa förhållanden undersökas. Exempelvis kan större vind- och snölaster införas i beräkningarna. Att använda materialet för beräkningar på byggnader i monsun- och jordbävningsdrabbade områden är också en aspekt att studera vidare. För beräkningar i både Sverige och andra länder är det relevant att kolla på materialets frostbeständighet och hur fukt vandrar i materialet.

Arbetet har resulterat i en minsta tjocklek på en bärande yttervägg i modellhuset som klarar de dimensionerande lasterna. Denna tjocklek borde öka då stabilitet, brandlast och långtidslaster tas med i beräkningarna. Om det även undersöks vad skumbetong har för isoleringsförmåga och ställer detta mot de energikrav som finns kan det ge ett mer korrekt värde på väggens minsta möjliga tjocklek. Därför anses det att dessa laster bör undersökas vidare. Att undersöka kapaciteten hos materialet i större dimensioner är också något för vidare studier. Förslagsvis kan undersökningar göras på bredare och högre väggelement och på byggnader i flera våningar. För att komplettera beräkningarna på modellhuset bör också infästningar och övriga konstruktionsdetaljer undersökas.

Något mer som bör undersökas vidare är materialsammansättningen. Arbetet analyserar enbart två olika fibertyper och att undersöka andra fibergrupper anses vara

intressant. Till exempel har glasfibrer en högre E-modul och en större draghållfasthet än vad syntetiska fibrer har. Att ta fram en sammansättning av betongen där dessa fibrer inte bryts ner vore intressant då dessa fibrer tros ge högre hållfasthetsvärden. Även andra syntetiska fibrer borde undersökas vidare. Till exempel kolfibrer har en ungefär lika stor dragkapacitet som fibrerna av polyvinylalkohol. Kolfibrer har också värden på E-modulen som är nästan 100 gånger högre än vad fibrer av polyvinylalkohol har. Att se hur detta påverkar tryck- och böjdraghållfastheten vore intressant. Att undersöka hur mängden fibrer påverkar hållfastheten såväl som hur densiteten på skumbetongen påverkar hållfastheten ses också som en viktig aspekt.

En sista viktig punkt att analysera vidare innan materialet börjar användas ute i branschen är de ekonomiska aspekterna. För att fiberarmerad skumbetong ska börja användas i praktiken behöver det vara ekonomiskt lönsamt. Det borde alltså göras analyser på material- såväl som produktions- och gjutningskostnader vid fiberarmerad skumbetong jämfört med vanlig armerad betong. En hypotes är att det är ekonomiskt lönsamt då det till exempel krävs mindre arbete med dimensionering och utplacering av armering innan gjutning. Om detta stämmer bör materialet och dess produktionsmetod spara tid vilket skulle kunna vara en lösning till att bygga fortare och då även bygga fler byggnader och bostäder med samma arbetsresurser. För att koppla tillbaka till bakgrunden skulle det med andra ord kunna vara ett steg på vägen att lösa bostadsbristen.

Sammanfattningsvis ser vi många utvecklingsområden där materialet kan undersökas vidare. Störst fokus bör ligga på att undersöka ekonomiska aspekter, miljöaspekter samt andra dimensioner och förutsättningar.

9 Referenslista

- Aercrete. (2017b). *The Aercrete System: Mobile production of foam concrete* [Produktblad]. Bankeryd: Aercrete
- Aercrete. (2017a). *CLC: Foaming Agent*. Hämtad från <http://aercrete.se/20-2/>
- Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., Johansson, B. (2013). *Bärande konstruktioner: Del 1* (Rapport 2013:1). Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola.
- American Concrete Institute. (2010). *Report on the Physical Properties and Durability of Fibre-Reinforced Concrete* (ACI 544.5R-10). Farmington Hills: American Concrete Institute
- Appelberg, C., Cederqvist, C. (2013). SE536221 C2. was.prv.se
- Arbetsmiljöverket. (2016). *Asbest*. Hämtad från <http://guides.lib.chalmers.se/c.php?g=402047&p=2735528>
- Brodgårdsand AB. (2013). *55 KT: Teknisk data* [Produktblad]. Habo: Brodgårdsand AB.
- Byggvärlden. (2016). *Betong dominerar som stommaterial*. Hämtad från <http://www.byggvarlden.se/betong-dominerar-som-stommaterial-94316/nyhet.html>
- Cementa. (2017). *Byggcement: CEM II/A-LL 42,5R* [Produktblad]. Stockholm: Cementa Heidelberg Cement Group.
- Kim, D.J., Park, S.H., Ryu, G.S., Koh, K.T. (2011). Comparative flexural behavior of Hybrid Ultra High Performance Reinforced Concrete with different macro fibers. *Construction and Building Materials*, 25, 4144-4155. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.04.051
- Kuraray. (2017). *Kuralon (PVA fiber): Better solution for concrete* [Produktblad]. Tokyo: Kuraray.
- Löfgren, I. (2004). *Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction: a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis* (Doktorsavhandling, Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för bygg- och miljöteknik). Hämtad från <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/8627/8627.pdf>
- Naaman, A. (2003). Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Volym. 1 (No. 3), 241-252. Hämtad från http://www.j-act.org/headers/1_241.pdf
- Petersson, B.-Å. (2013). *Tillämpad byggnadsfysik*. Stockholm: Studentlitteratur AB.
- Polyolefin. (2017). *Nationalencyklopedin*. Hämtad från <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/polyolefin>
- Ramamurthy, K., Kunhanandan Nambiar, E.K., Indu Siva Ranjani, G. (2009). A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*, 31(6), 388-396. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006 (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946509000638>)
- Sika. (2016). *Sikafiber T-48s: Syntetiska makrofibrer för konstruktionsbetong* [Produktblad]. Sverige: Sika Sverige AB.
- Svensk byggtjänst. (2017). *Konstruktioner av element av autoklaverad lättbetong i hus*. Hämtad från <https://ama.byggtjanst.se/visa-kod/hus-11/gse/konstruktioner-av-element-av-autoklaverad-lattbetong-i-hus>
- Swedish Standards Institute. SS-EN 1990. *Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk*. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från <https://enav.sis.se/>

Swedish Standards Institute. SS-EN 1991-1. Laster på bärverk. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från <https://enav.sis.se/>

Swedish Standards Institute. (2009). SS-EN 12390. Provning av hårdnad betong. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från <https://enav.sis.se/>

Swedish Standards Institute. SS-EN 12390-3:2009. Provning av hårdnad betong - tryckhållfasthet hos provkroppar. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från <https://enav.sis.se/>

Swedish Standards Institute. SS-EN 12390-5:2009. Provning av hårdnad betong - böjdraghållfasthet hos provkroppar. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från <https://enav.sis.se/>

Swedish Standards Institute. SS-EN 14889-1:2006. Fibrer för betong - Del 1: Stålfibrer - Definitioner, specifikationer och överensstämmelse. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från <https://enav.sis.se/>

Swedish Standards Institute. SS-EN 14889-2. Fibrer för betong - Del 2: Polymerfibrer - Definitioner, specifikationer och överensstämmelse. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från <https://enav.sis.se/>

The Concrete Center. (2017). *Lightweight Concrete*. Hämtad från [http://www.concretecentre.com/Performance-Sustainability-\(1\)/Special-Concrete/lightweight-concrete.aspx](http://www.concretecentre.com/Performance-Sustainability-(1)/Special-Concrete/lightweight-concrete.aspx)

The Constructor. (Hämtad 04-05-2017). *Fiber Reinforced Concrete - Types, Properties & Advantages of Fiber Reinforced Concrete*. Hämtad från <https://theconstructor.org/concrete/fiber-reinforced-concrete/150/>

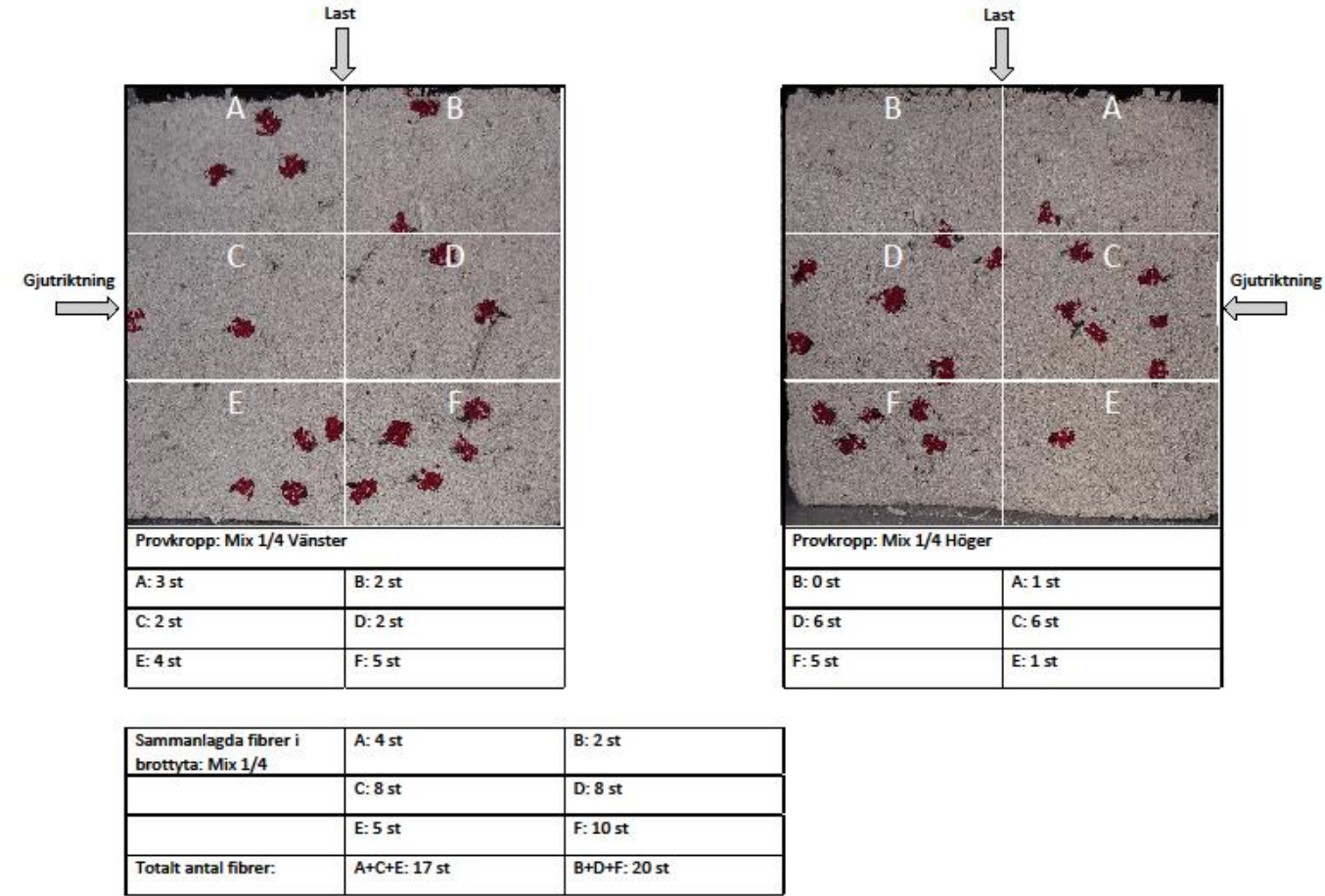
Wendick, C. (2016, 22 februari). *Kommunerna: Bostadsbristen är rekordstor*. Svt nyheter. Hämtad från <https://www.svt.se/nyheter/>

Xella Sverige AB. (2010). *Projekteringshandbok Lättbetong och kalksandsten* [Produktblad]. Malmö: Xella Sverige AB. Hämtad från https://www.xella.se/se/docs/102328_PROJEKTERINGSHANDBOK_SE_WEB.pdf

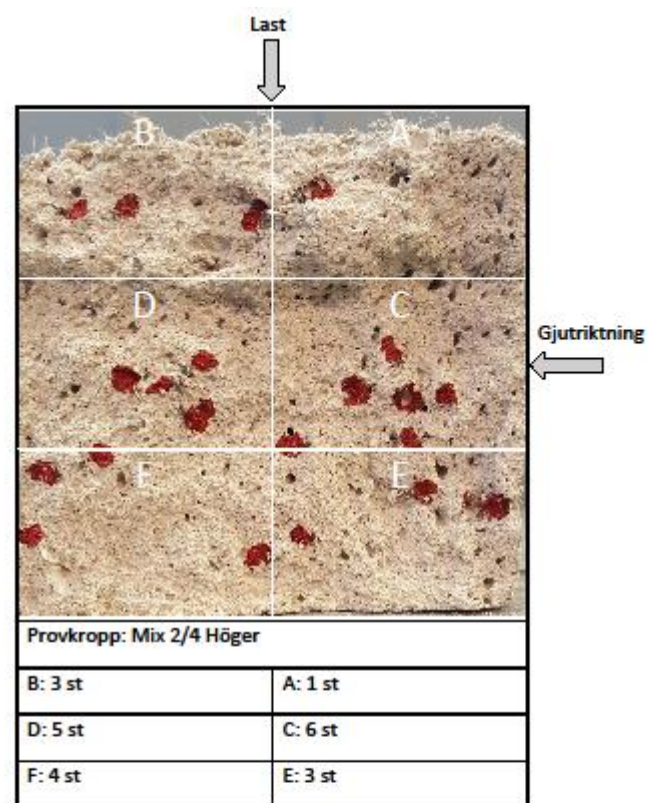
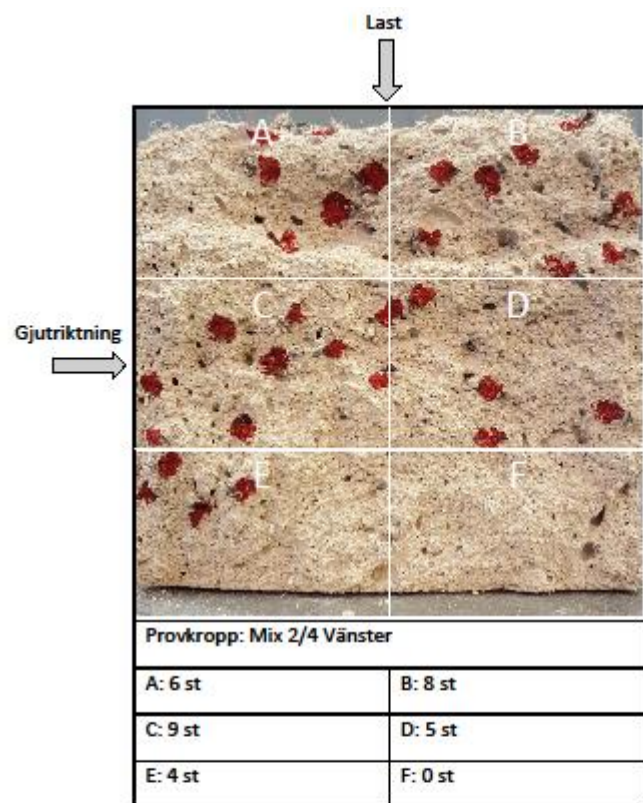
Bilaga 1: Recept

Recept												
Sats	Densitet [kg/m ³]	Cement [kg]	Vatten [kg]	Sand [kg]	Skum [liter]	Fibrer [g]	Koncen- tration PVA [kg/m ³]	Koncen- tration T48s [kg/m ³]	Vol% (PVA)	Vol% (T48s)	Vikt% (PVA)	Vikt% (T48s)
Ref	1200	10,8	5,4	24,3	18	x	x		x	x	x	
Ref	1200	10,8	5,4	24,3	18	x	x		x	x	x	
Ref	1200	10,8	5,4	24,3	18	x	x		x	x	x	
Mix	1200	10,8	5,4	24,3	18	T48s 150 + PVA 60	2	5	0,15	0,55	0,17	0,42
Mix	1200	10,8	5,4	24,3	18	T48s 150 + PVA 60	2	5	0,15	0,55	0,17	0,42
Mix	1200	10,8	5,4	24,3	18	T48s 150 + PVA 60	2	5	0,15	0,55	0,17	0,42
PVA	1200	10,8	5,4	24,3	18	PVA 180	6	x	0,46	x	0,50	x
PVA	1200	7,2	3,6	16,2	14	PVA 120	6	x	0,46	x	0,50	x
T48s	1200	10,8	5,4	24,3	18	T48s 210	x	7	x	0,77	x	0,58
T48s	1200	7,2	3,6	16,2	14	T48s 140	x	7	x	0,77	x	0,58

Bilaga 2: Snittanalys



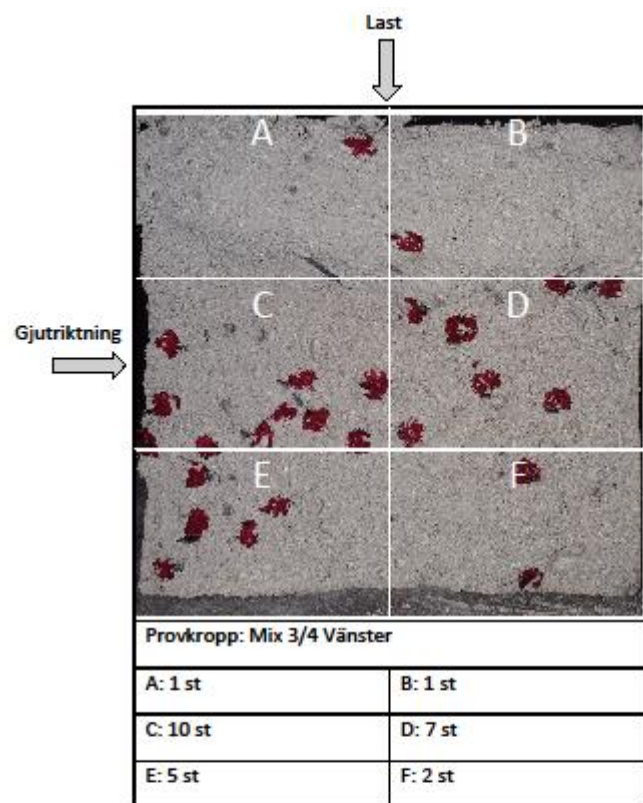
Bilaga 2: Snittanalys



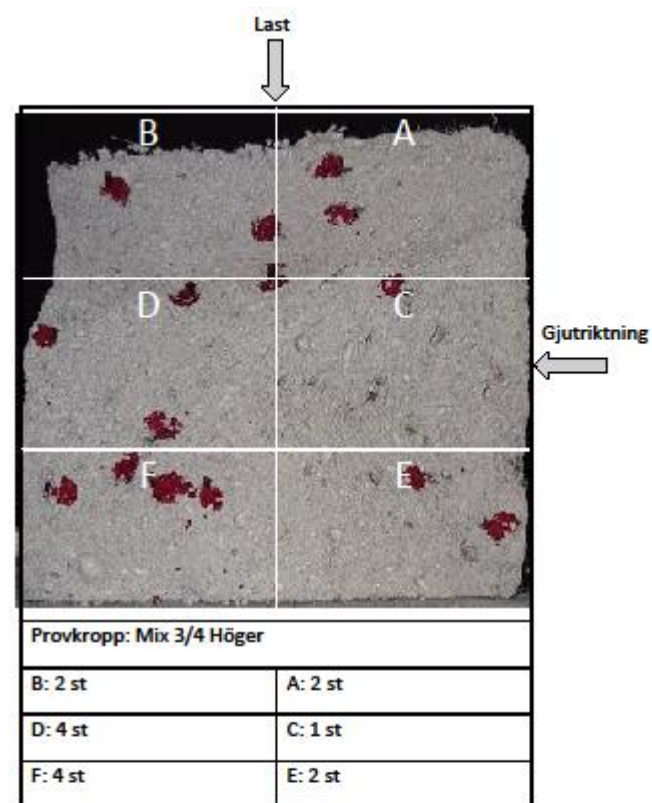
Sammanlagda fibrer i brottyta: Mix 2/4	A: 7 st	B: 11 st
	C: 15 st	D: 10 st
	E: 7 st	F: 4 st
Totalt antal fibrer:	A+C+E: 29 st	B+D+F: 25 st

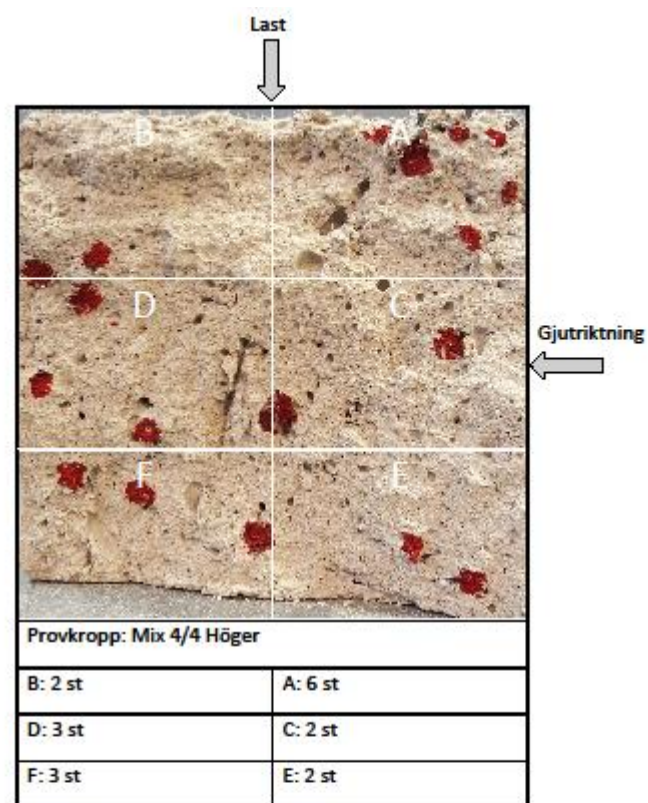
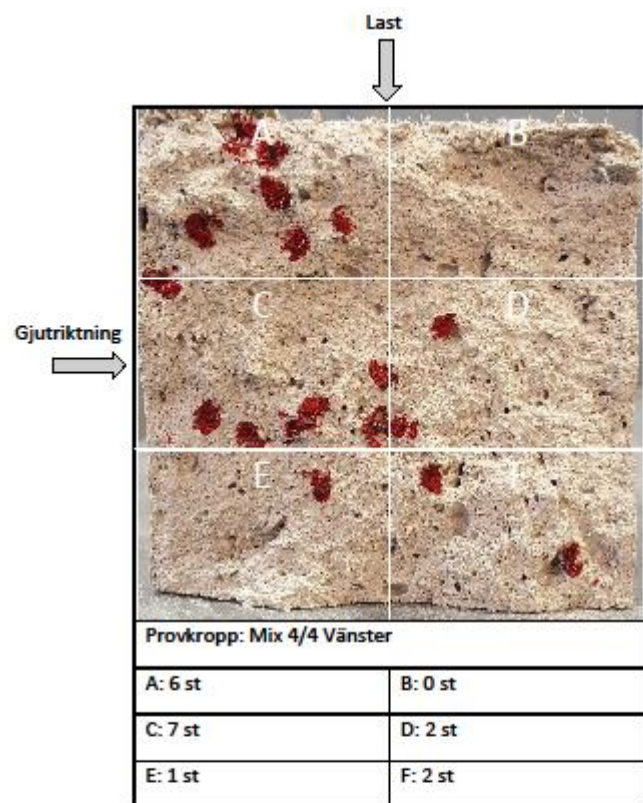
Bilaga 2: Snittanalys

2(8)



Sammanlagda fibrer i brottyta: Mix 3/4	A: 3 st	B: 3 st
	C: 11 st	D: 11 st
	E: 7 st	F: 6 st
Totalt antal fibrer:	A+C+E: 21 st	B+D+F: 20 st

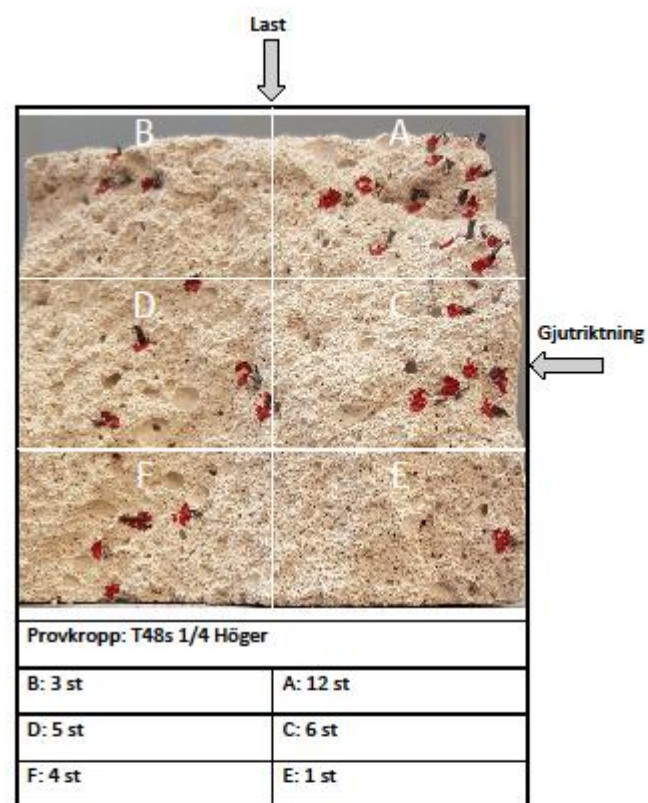
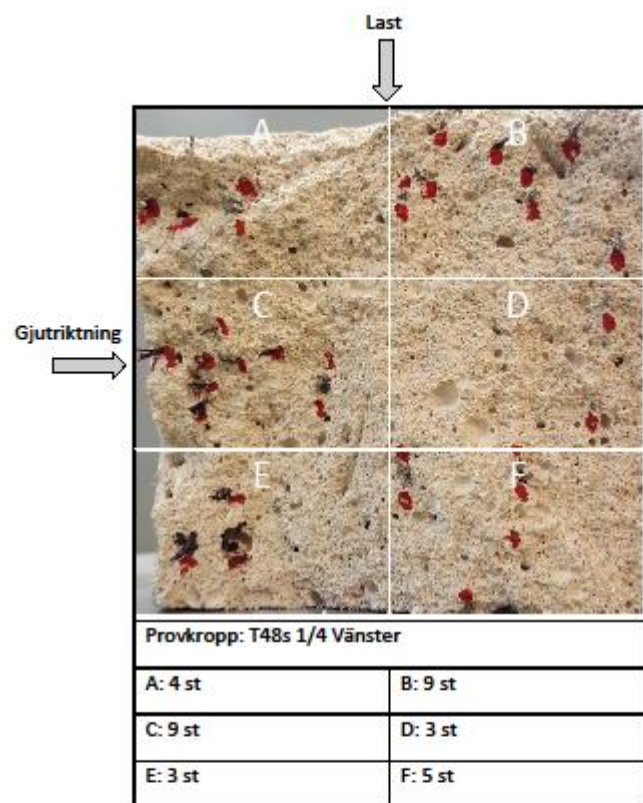




Sammanlagda fibrer i brottyta: Mix 4/4	A: 12 st	B: 2 st
	C: 9 st	D: 5 st
	E: 3 st	F: 5 st
Totalt antal fibrer:	A+C+E: 24 st	B+D+F: 12 st

Bilaga 2: Snittanalys

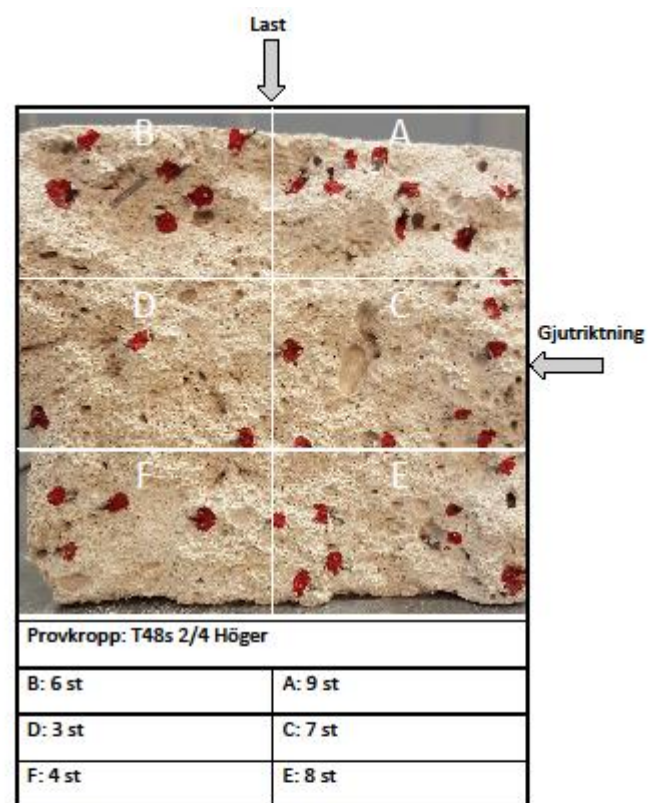
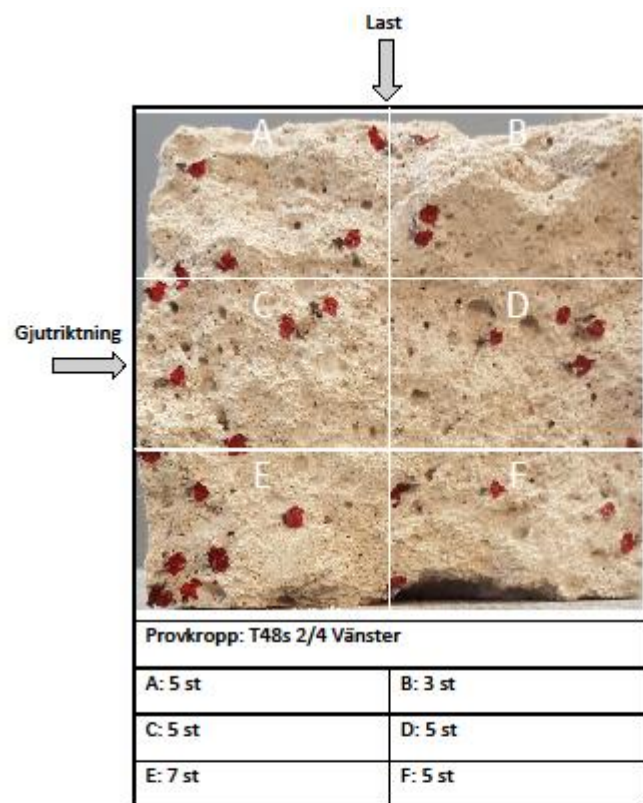
4(8)



Sammanlagda fibrer i brottyta: T48s 1/4	A: 16 st	B: 12 st
	C: 15 st	D: 8 st
	E: 4 st	F: 9 st
Totalt antal fibrer:	A+C+E: 35 st	B+D+F: 29 st

Bilaga 2: Snittanalys

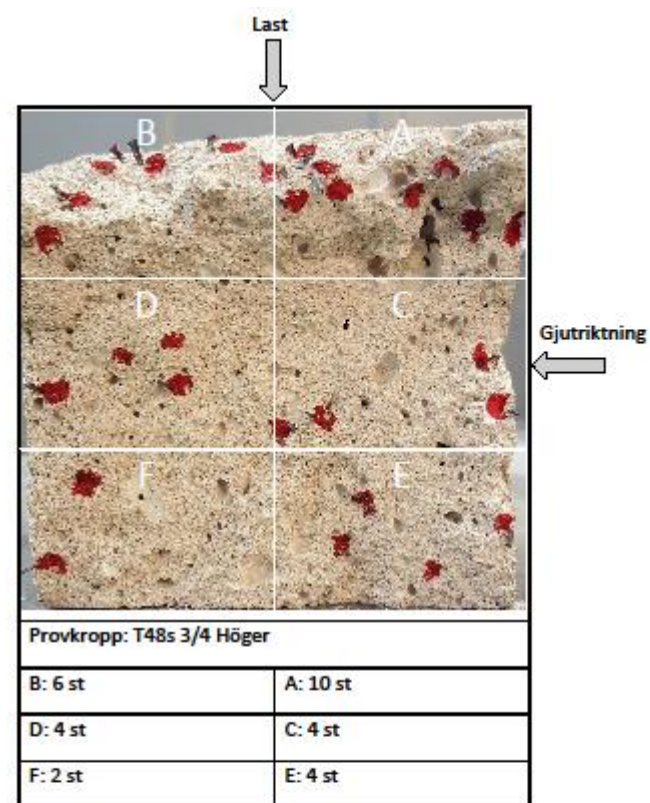
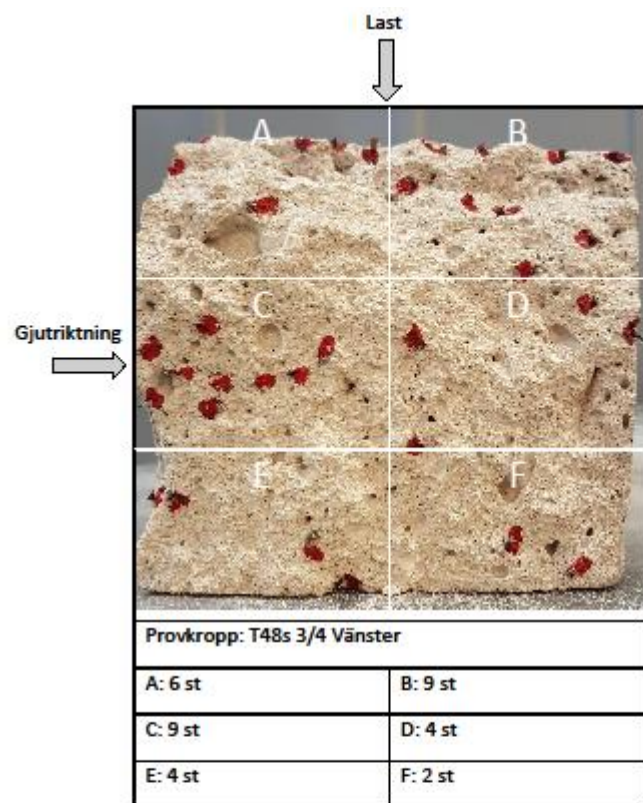
5(8)



Sammanlagda fibrer i brottyta: T48s 2/4	A: 14 st	B: 9 st
	C: 12 st	D: 8 st
	E: 15 st	F: 9 st
Totalt antal fibrer:	A+C+E: 41 st	B+D+F: 26 st

Bilaga 2: Snittanalys

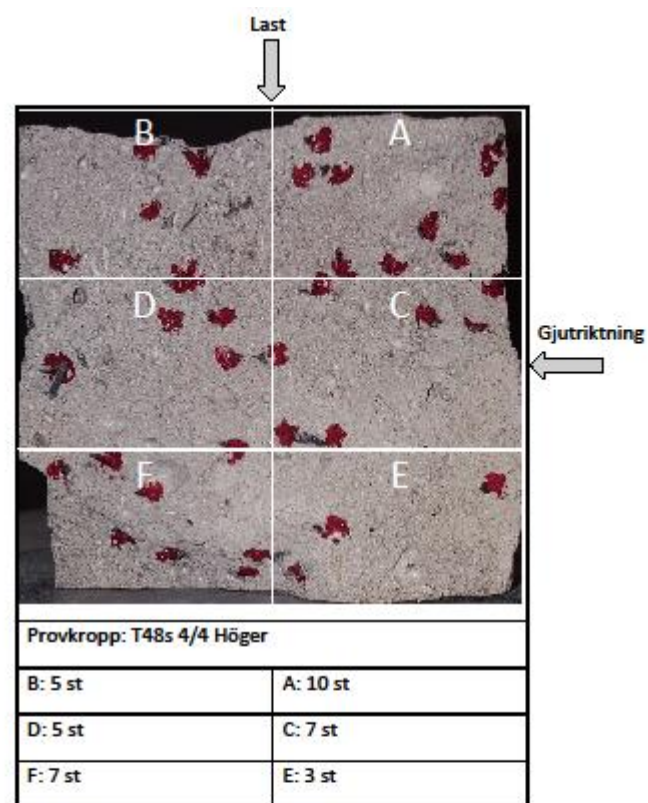
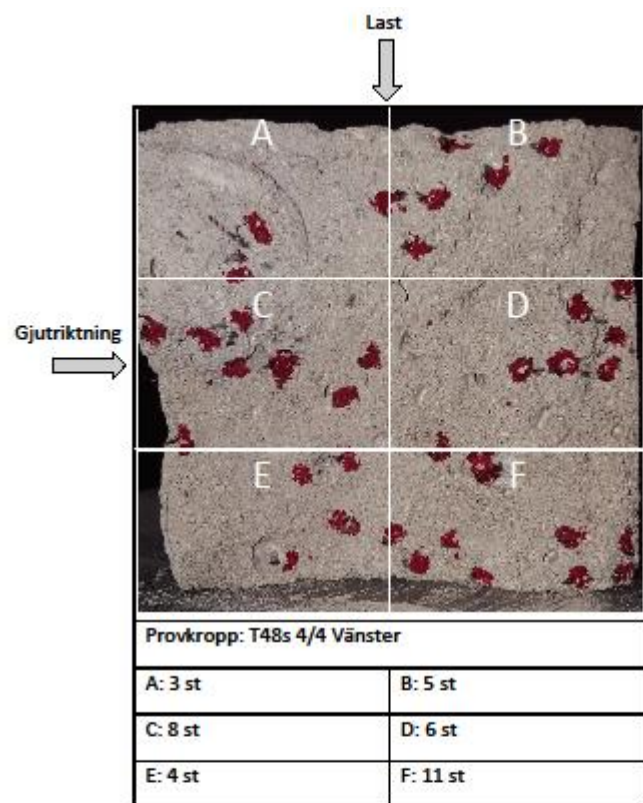
6(8)



Sammanlagda fibrer i brottyta: T48s 3/4	A: 16 st	B: 15 st
	C: 13 st	D: 8 st
	E: 8 st	F: 4 st
Totalt antal fibrer:	A+C+E: 37 st	B+D+F: 27 st

Bilaga 2: Snittanalys

7(8)



Sammanlagda fibrer i brottyta: T48s 4/4	A: 13 st	B: 10 st
	C: 15 st	D: 11 st
	E: 7 st	F: 18 st
Totalt antal fibrer:	A+C+E: 35 st	B+D+F: 39 st

Bilaga 2: Snittanalys

8(8)