

# Glasfiberarmering i betong

- Förankringsegenskaper



**LUNDS  
UNIVERSITET**

Lunds Tekniska Högskola

**LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg  
Byggt teknik med Arkitektur  
Avdelningen för Konstruktionsteknik**

Examensarbete:  
Henrik Johansson  
Jonathan Ollar

Handledare:  
Fredrik Carlsson

© Copyright Henrik Johansson, Jonathan Ollar

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg  
Lunds universitet  
Box 882  
251 08 Helsingborg

LTH School of Engineering  
Lund University  
Box 882  
SE-251 08 Helsingborg  
Sweden

Tryckt i Sverige  
Media-Tryck  
Biblioteksdirektionen  
Lunds universitet  
Lund 2009

# Sammanfattning

## Glasfiberarmering i betong - Förankringsegenskaper

Fiberbar AB tillverkar glasfiberarmering som är tänkt att användas i olika typer av konstruktioner, till exempel byggnader och broar. För att armering skall uppfylla sitt syfte krävs att armering och betong samverkar vid belastning. Tidigare försök har visat att förankringen mellan betong och glasfiberarmering är undermålig för Fiberbar ABs produkter. Därför har företaget förändrat ytskiktet på glasfiberstängerna, som ger stängerna sina förankringsegenskaper.

Tidigare har Fiberbar använt ett ytskikt bestående av ett lager vinylester följt av ett sandlager. För att åtgärda problemet med förankringsegenskaperna har Fiberbar ändrat produktionen. Numera läggs ett kompletterande lager vinylester utanpå de två tidigare nämnda lagren.

I detta arbete undersöks förankringsegenskaperna hos de nya stängerna genom förankrings- och böjprov.

Förankringstesten som utfördes påvisar en ojämn produktion, där en del av stängerna som produceras är mycket bra och en del är undermåliga. Problemet ligger i blandningen av vinylestern som binder samman ytlaget med stängerna.

Nyckelord: Armering, Glasfiber, Vidhäftning, Förankring, Utdragsprov, FRP.

## **Abstract**

### Glass-fiber reinforcement in concrete – Anchorage properties

Fiberbar manufactures glass-fiber reinforcement that is intended to be used in different types of structures, such as buildings and bridges. In order for the reinforcement to fulfill its purpose, it's required that the reinforcing and concrete interact under load. Earlier measurements have shown that the anchorage between the concrete and glass fiber reinforcement is not sufficient for Fiberbar AB's products. To improve the anchorage capacity the manufacturer has changed the surface layer of fiberglass bars.

Previously, Fiberbar has been using a surface layer consisting of a layer of vinyl ester followed by a sand layer. To address the problem of anchoring properties, Fiberbar has changed their production. An additional layer vinyl ester is now added on top of the two existing layers.

This thesis examines the bond characteristics of the new bars by pull-out and beam-tests.

Anchorage tests performed show an uneven production, where some of the bars produced are very good and some are substandard. The problem lies in the mixture of the vinyl ester, linking the surface layer with the rod.

Keywords: Reinforcement, Glass-fiber, Adhesion, Anchorage, Pull-out test, FRP.

## **Förord**

Detta examensarbete utfördes under vårterminen 2009 på Avdelningen för Konstruktionsteknik vid Lunds Tekniska Högskola.

Vi vill börja med att rikta ett stort tack till vår handledare Fredrik Carlsson som visat stort engagemang genom arbetets gång. Dessutom vill vi tacka Per Orre på Fiberbar som möjliggjort examensarbetet och bistått med material.

Vidare vill vi tacka Per Olof Rosenqvist i V-labbet för hjälp med samtliga tester.

Tack även till Ulf Ekdahl (PEAB), Tollarps betong samt Optimera.

# Innehållsförteckning

<b>1 Inledning</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Bakgrund</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Syfte</b> .....	<b>1</b>
<b>1.3 Metod</b> .....	<b>1</b>
<b>1.4 Avgränsningar</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Material</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1 Fibrer</b> .....	<b>2</b>
<b>2.2 Matrismaterial</b> .....	<b>3</b>
<b>2.3 Glasfiberarmering som substitut till Kamstänger</b> .....	<b>4</b>
<b>2.4 Fiberbar</b> .....	<b>5</b>
<b>2.5 Problem</b> .....	<b>6</b>
<b>3 E-modulstest</b> .....	<b>7</b>
<b>4 Förankringsprov</b> .....	<b>8</b>
<b>4.1 Syfte</b> .....	<b>8</b>
<b>4.2 Standardiserad testmetod</b> .....	<b>8</b>
<b>4.3 Tillverkning av provkroppar</b> .....	<b>10</b>
<b>4.4 Använd testmetod</b> .....	<b>11</b>
<b>4.5 Felkällor</b> .....	<b>15</b>
<b>4.6 Tidigare försök</b> .....	<b>15</b>
<b>4.7 Resultat</b> .....	<b>16</b>
<b>5 Balk-försök</b> .....	<b>21</b>
<b>5.1 Syfte</b> .....	<b>21</b>
<b>5.2 Tillverkning av provkroppar</b> .....	<b>21</b>
<b>5.3 Testmetod</b> .....	<b>21</b>
<b>5.4 Tidigare försök</b> .....	<b>24</b>
<b>5.5 Resultat</b> .....	<b>24</b>
<b>6 Slutsatser</b> .....	<b>26</b>
<b>7 Diskussion</b> .....	<b>27</b>
<b>8 Källförteckning</b> .....	<b>29</b>

## Bilagor

Bilaga 1: Balkberäkningar

Bilaga 2: Förankringsspänningar

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Glasfiberarmering är ett substitut till konventionell armering. Ett företag som producerar sådan armering är Fiberbar AB. Stängerna består av parallella glasfibertrådar, omslutna av vinylester. På ytan pålimmas ett sandlager som precis som kammarna på ett kamstål ska överföra krafter mellan betong och armering. Den kraftöverföringen kallas förankring.

Fiberbars glasfiberarmering har enligt tillverkaren dubbelt så stor draghållfasthet som konventionella kamstänger av typen B500B. Nyligen utförda tester har visat att den pålimmade sandytan på stängerna släpper vid så låga belastningar att stängernas höga hållfasthet ej kan utnyttjas fullt ut [12].

På grund av detta har ytskiktet som ger stängerna sina förankringsegenskaper förändrats.

Tidigare har Fiberbar använt ett ytskikt bestående av ett lager vinylester följt av ett sandlager. För att åtgärda problemet med förankringsegenskaperna har Fiberbar ändrat produktionen. Numera läggs ett kompletterande lager vinylester utanpå de två tidigare nämnda lagren. [7]

## 1.2 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att undersöka förankringsegenskaperna mellan betong och armering hos Fiberbars nya glasfiberstänger.

## 1.3 Metod

För att undersöka förankringsegenskaperna mellan glasfiberstänger och betong genomförs två olika experiment. Det första är ett förankringsprov där armeringen gjuts in i betongkuber för att sedan dras ut.

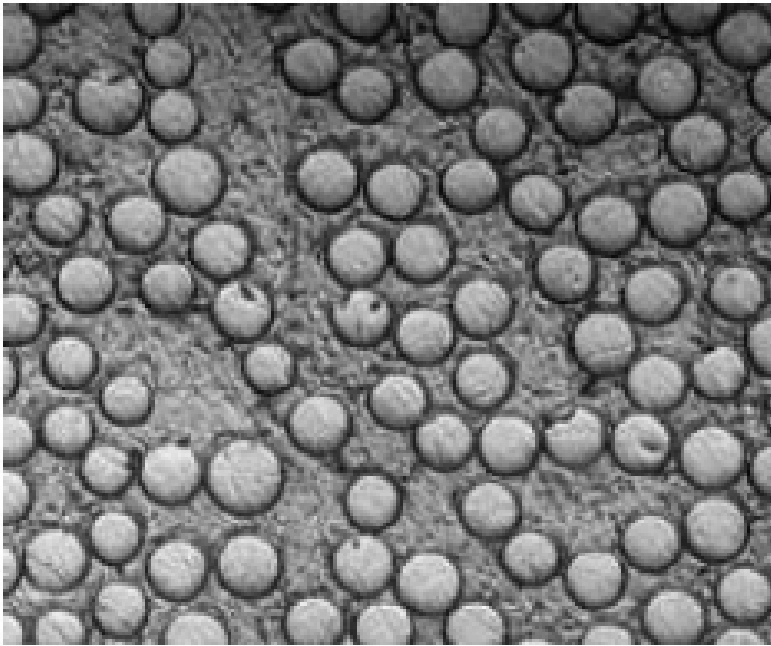
Det andra testet är ett nedböjningstest där testarmeringen placeras i underkant i en betongbalk. I båda testerna provas även konventionella kamstänger av typen B500B som referenser. Längre fram i arbetet finns mer detaljerade metoddelar för de olika experimenten.

## 1.4 Avgränsningar

I examensarbetet kommer endast ett fåtal försök att genomföras. Det innebär att inga kvalitativa hållfasthetsvärden vad avser armeringens förankringkapacitet kan bestämmas. Dock kan man få en uppfattning om hur de olika materialen fungerar tillsammans. Det som är av intresse i detta arbete är att se beteendet hos glasfiberstängerna och jämföra detta med konventionella kamstänger.

## 2 Material

Fiberkompositer finns i ett flertal utföranden. Grundläggande är att materialet består av mikrometertunna fibrer som omges av ett matrismaterial. Det kan liknas vid armerad betong, där fibrerna är armeringen och matrismaterialet är betongen. I figur 2.1 visas en förstoring av ett fiberkompositmaterial. Samspelet mellan fibrerna och matrisen gör att materialens goda egenskaper förenas. [1]



*Fig 2.1 Förstoring av ett fiberkompositmaterial. [2]*

### 2.1 Fibrer

Fibrerna har en diameter på 12-24  $\mu\text{m}$ . Fibrernas uppgift är att ta upp de krafter som uppstår i kompositen. De vanligaste typerna av fibrer som används är Glasfibrer, Kolfibrer och Aramidfibrer. [1]

*Kolfibrer* har goda hållfasthetsegenskaper tack vare att bindningen mellan kolatomer är mycket stark [1]. Beroende på tillverkningsmetod varierar draghållfastheten och E-modulen mellan 780 och 4000MPa respektive mellan 200 och 800GPa. Beständighetsegenskaperna mot syror, baser och organiska lösningsmedel är dessutom mycket goda. Det som talar emot kolfibrer är den kostsamma produktionen. [3]

*Glasfibrer* tillverkas precis som vanligt glas, av kiselsand men sammansättningen är modifierad för att få de egenskaper som eftersträvas. Det finns flera olika typer av glasfibrer, men den som används mest idag är E-glas.



Där E står för den elektriskt isolerande förmågan.[1] Glasfibrer är känsliga mot alkalihaltiga miljöer. Draghållfastheten för E-glas varierar mellan 3500-3600MPa och E-modulen mellan 74-75GPa. [3]

*Aramidfibrer* tillverkas genom att smälta termoplasten som sedan pressas ut genom ett munstycke till trådar [4]. Aramidfibrer används bl.a. i flygplan, skottsäkra västar, sportartiklar och brandskyddstextiler. Ett känt produktnamn är Kevlar [5]. Draghållfastheten varierar mellan 2500-3800MPa och E-modulen 74-130GPa [3].

## 2.2 Matrismaterial

Matrismaterial som omger fibrerna fördelar påkänningarna som fiberkompositen utsätts för till fibrerna. Det skall även skydda fibrerna mot mekanisk åverkan och kemiska angrepp. De tre vanligaste matrismaterialen är epoxi, polyester och vinylester. [1]

*Epoxi* är det starkaste av de tre. Det har högst draghållfasthet, vidhäftningskapacitet samt bäst beständighet mot kemiska ämnen. En stor fördel med epoxi är att det till skillnad från de andra matrismaterialen kan användas i tunna och därmed lätta laminat. Nackdelarna är att Epoxi kräver noggrann blandning för att uppnå god härdning samt att det är allergiframkallande vid kontakt med huden innan härdning. [6] Epoxi har en draghållfasthet mellan 55-130MPa och en E-modul mellan 2,5-4,1GPa. Fukt- samt alkalibeständigheten är god [3].

*Polyester* som är det billigaste alternativet är också det matrismaterial med sämst egenskaper i jämförelse med de andra två. Draghållfastheten varierar mellan 20-100MPa och E-modulen mellan 2,5-4,1GPa [3]. Polyester har i regel sämre beständighet mot alkaliska miljöer och fukt i jämförelse med andra matrismaterial. Dessutom är polyester allergiframkallande vid kontakt med huden innan härdning. Vid härdning avger polyester styren som är skadligt vid långvarig exponering. Därför bör skydd i form av kolfiltermask användas. [6]

*Vinylester* har epoxiliknande egenskaper. Det som skiljer vinylester från epoxi är att vinylester har lite sämre draghållfasthet och kembeständighet. Vinylester är däremot lättare att tillreda och är dessutom mycket billigare. Precis som polyester är vinylester allergiframkallande vid kontakt med huden och avger styren vid härdning. [6] Vinylester har en draghållfasthet på 81MPa och en E-modul på 3,3GPa [3].

Generellt för samtliga tre matrismaterial är att de har en låg beständighet mot höga temperaturer [3].

### 2.3 Glasfiberarmering som substitut till Kamstänger

Glasfiberarmering är ett substitut till de traditionella kamstängerna i stål. Figur 2.2 visar en glasfiberstång och en kamstång. Glasfiberarmering har en karakteristisk draghållfasthet på  $\sim 1000\text{MPa}$ , en elasticitetsmodul på  $\sim 50\text{GPa}$  och en densitet på  $1950\text{kg/m}^3$  [7]. Karakteristiska värden definieras som den nedre 5 % -fraktilen. Motsvarande egenskaper hos det konventionella kamstålet B500B är  $\sim 500\text{MPa}$ ,  $7850\text{kg/m}^3$  respektive  $\sim 200\text{GPa}$  [8]. Det innebär att glasfiberstänger har dubbelt så hög draghållfasthet samt väger en fjärdedel av konventionell armering, men töjer sig fyra gånger mer än kamstänger.



*Fig 2.2 Glasfiberarmering överst, kamstång i stål nederst [9].*

Glasfiberstänger är helt elastiska. Detta innebär att spänningen är proportionell mot töjningen upp till brott. Det innebär att det är en stor skillnad mellan materialen eftersom att konventionella kamstänger har stor möjlighet att plasticera. Dragbrottet i glasfiberstänger är sprött till skillnad från kamstängerna som går till ett segt brott. [1] I figur 2.3 visas arbetskurvorna för de båda materialen.

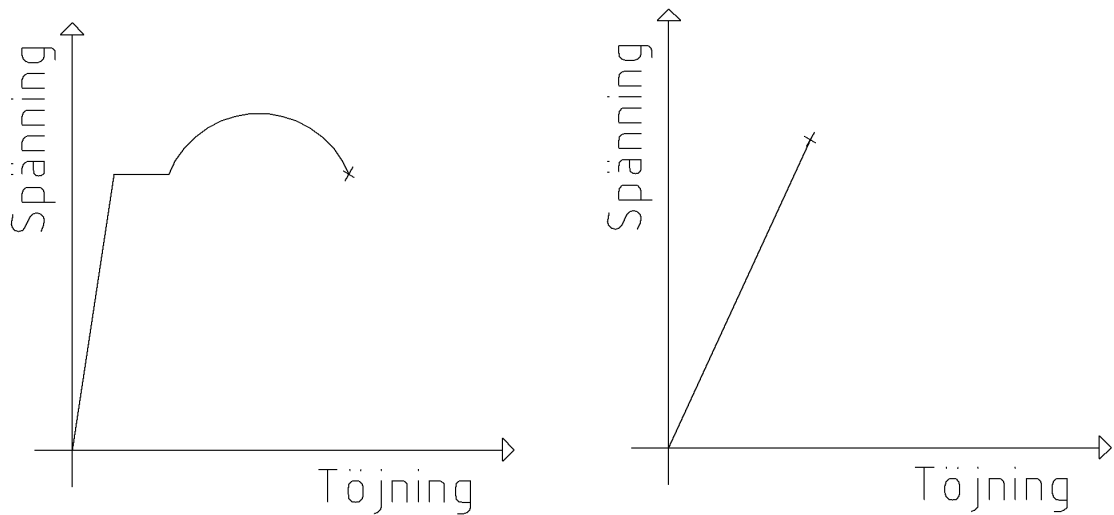


Fig 2.3 Principskiss, Arbetskurvor för stålarmering (till vänster) och för glasfiberarmering (till höger).

## 2.4 Fiberbar

Detta examensarbete behandlar glasfiberarmering från Fiberbar. Dessa stänger tillverkas av glasfibrer med en vinylestermatris.

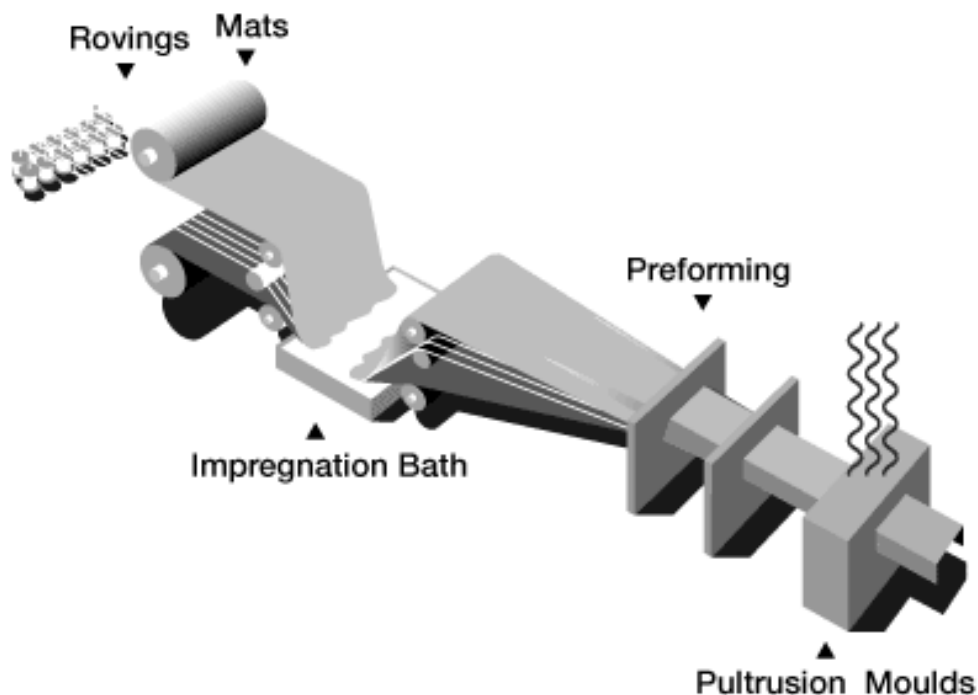
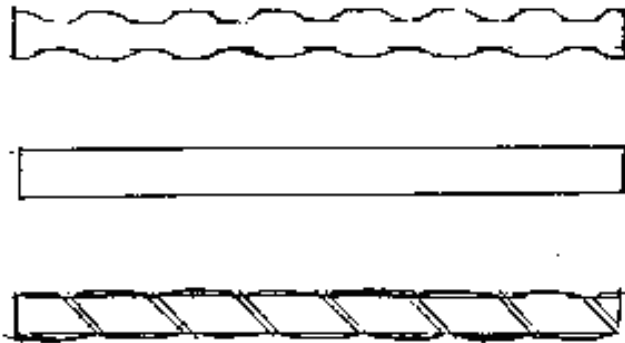


Fig 2.4 Tillverkningsprocessen [10]. Vid tillverkning av fiberkompositarmering används ej mattorna.

Fiberbar tillverkar sina glasfiberstänger i en s.k. pultrusionsprocess enligt figur 2.4. Processen fungerar på så vis att kontinuerliga glasfibrer på spole dras

igenom ett impregneringsbad av vinylester. Därefter formas de av ett uppvärmt munstycke till dess färdiga form. Stängerna är i sitt grundutförande helt släta. [7]

För att öka förankringskapaciteten mellan betong och armering används olika metoder för att skapa ytstruktur på stängerna. Bland annat klämda stänger, virade stänger och släta stänger med pålimmad sand. Dessa illustreras i figur 2.5. [11]. Det sistnämnda alternativet används på Fiberbars produkter.



*Fig 2.5 Principskiss på klämd, slät samt virad stång. [11]*

## 2.5 Problem

I praktiken har ytstrukturen på Fiberbars stänger inte klarat av att föra över de skjuvspänningar som uppstår vid belastning mellan armering och betong. Istället har stängerna glidit inne i betongtvärsnittet och på så vis tappat sin funktion. [12]

Tidigare har Fiberbar använt ett ytskikt bestående av ett lager vinylester följt av ett sandlager. För att åtgärda problemet har Fiberbar ändrat produktionen. Numera läggs ett kompletterande lager vinylester utanpå de två tidigare nämnda lagren. [7]

### 3 E-modulstest

För att kunna göra beräkningar i ett senare skede gjordes försök för att kontrollera glasfiberstängernas elasticitetsmodul. Dessa försök utfördes som rena dragprov. Av proven kan draghållfastheten ej bestämmas eftersom att brotten som uppstod inte var rena dragbrott. Brotten som uppstod berodde på att stängerna krossades vid infästningen i provmaskinen. I rapporten *Glasfiberkomposit som spännarmering i slippers* [4] beskrivs en metod för att fästa in glasfiberarmering med hjälp av nylonkilar. Dessa fanns dock ej att tillgå under testperioden. Mätvärdena kan dock användas för att bestämma E-modulen. Resultaten från dragförsöken redovisas i Tabell 3.1.

*Tab 3.1 E-modulstest.*

Stångdiameter (mm)	E-Modul (GPa)
8	51,93
8	52,02
15	49,77
15	52,61
15	52,33

Samtliga värden ligger runt 50GPa, vilket är i samma nivå som tillverkarens angivelser. Detta värde på elasticitetsmodulen kommer att användas vid beräkningar senare i detta examensarbete.

## 4 Förankringsprov

I detta försök genomfördes 21 förankringsprov. 18 betongkuber med ingjuten glasfiberarmering och tre med ingjutna kamstänger i stål testades.

Betongkuberna göts med olika ingjutningsdjup och betongkvalitet. I samtliga fall användes stänger med diametern 8mm. Proven gick ut på att fästa in betongkuberna i en anordning och dra testarmeringen ur kuberna.

### 4.1 Syfte

Syftet med försöken var att undersöka glasfiberarmeringens förankringsegenskaper.

### 4.2 Standardiserad testmetod

Det finns ingen svensk standard för förankringsprov av fiberarmering. I Japan har man däremot tagit fram en standardmetod som i anpassad form även används i USA. [13]

Enligt den japanska standarden [14] är testmetoden beroende av stängernas diameter.

Enligt standarden används kuber med dimensionen 10x10x10cm för stänger upp till 17mm. För stänger över 17mm i diameter används kuber med dimensionen 15x15x15. Formen som kuberna tillverkas i ska ha ett centriskt hål på två motstående sidor. Hålet används för att trä igenom innan gjutning. Testarmeringen skall sticka ut 10mm på undersidan. Se figur 4.1. Detta görs för att kunna mäta testarmeringens glidning i förhållande till testkubens undersida vid provning. På ovansidan ska stängen sticka ut tillräckligt för att fästa in stängen i testmaskinen.

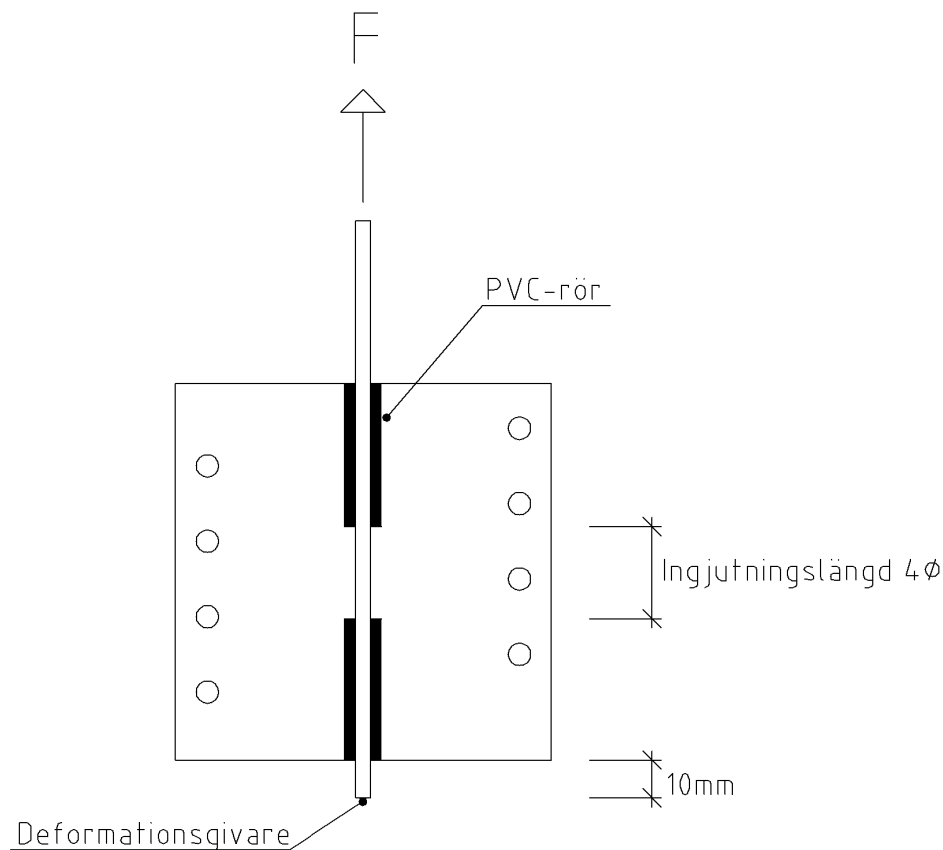


Fig 4.1 Illustration av standardkubtest, där  $\phi$  är armeringens diameter.

Ingjutningslängden skall vara fyra gånger stångens diameter. Utanför ingjutningslängden är armeringen inte sammangjuten med betongen. Detta kan göras genom att ett PVC-rör träas över armeringen. Se figur 4.1.

För att undvika brott i betongen ska kuben armeras med  $\phi 6$  spiralarmering. Betongen ska vara i klass C32/40. Efter två dagars härdning ska formen rivs och därefter ska kuben härda i ytterligare 26 dagar i  $20^{\circ}$  temperatur.

Vid testtillfället hängs kuben in i dragmaskinen. Som mothåll placeras två plattor ovanpå varandra med centriska hål, vilka testarmeringen löper igenom. Den övre plattan är plan med ett hål på med diametern två till tre gånger testarmeringens diameter. Den undre plattan är sfärisk med ett mindre hål. Syftet med den sfäriska plattan är att tillse att testarmeringen och kraften  $F$  är i linje. Efter kuben har placerats i testutrustningen skall armeringen dras ut kuben. Under försöket mäts utdragskraften  $F$  som funktion av deformationen, dvs. glidningen mellan testarmeringen och undersida provkub.

Resultatet redovisas som förankringsspänningen som funktion av deformationen. Förankringsspänningen definieras som  $\tau = \frac{F}{A}$  där  $A$  är stångens mantelarea mot betongen  $4\pi \cdot \phi^2$ .

### 4.3 Tillverkning av provkroppar

Vid tillverkningen av kuberna fanns det inget tillfälle att påverka tillverkningsmetoden. Därför tillverkades kuberna på annat vis än vad standarden föreskriver.

De 21 kuberna tillverkades enligt tabell 4.1 och figur 4.2 med olika ingjutningslängder, armeringstyper och betongklasser. Kuberna fick sedan härda i 28 dagar för att uppnå full hållfasthet. Samtliga testarmeringsstänger är av diametern 8mm.

Tab. 4.1 Förteckning över betongklass, armeringstyp och ingjutningslängd för kuberna.

Kub nr.	Betongklass	Testarmering	Ingjutningslängd (cm)
1-3	C30/37	Glasfiberstång	5
4-6	C30/37	Glasfiberstång	10
7-9	C30/37	Glasfiberstång	15
10-12	C50/60	Glasfiberstång	5
13-15	C50/60	Glasfiberstång	10
16-18	C50/60	Glasfiberstång	15
19-21	C50/60	Kamstål	15

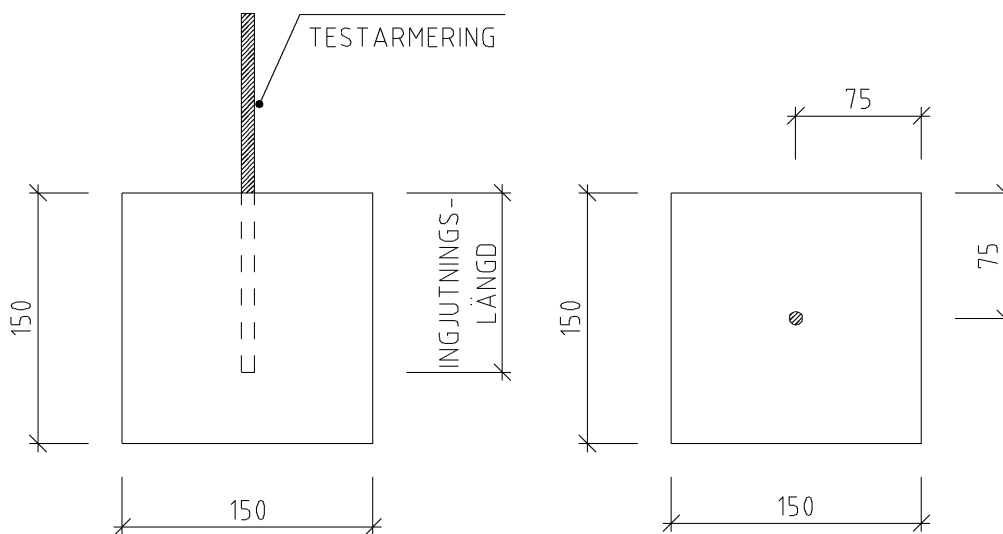


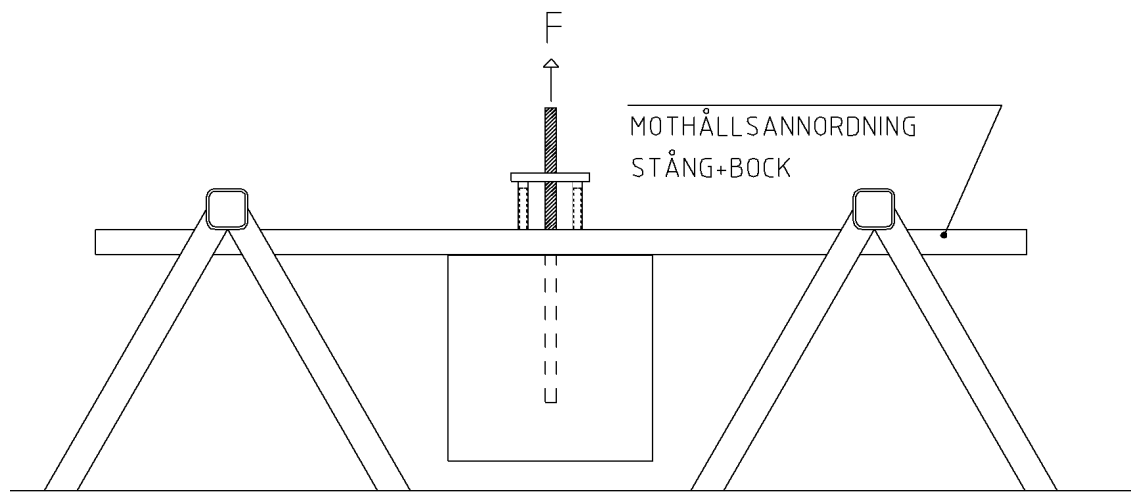
Fig. 4.2 Ritning på provkropparna.



Då betongkuberna tillverkades användes inget stativ för att hålla armeringsstångarna i rätt läge vid ingjutning. Det resulterade i att den verkliga ingjutningslängden i flera fall skiljde sig från den föreskrivna samt att stängerna inte blev helt lodrätt ingjutna.

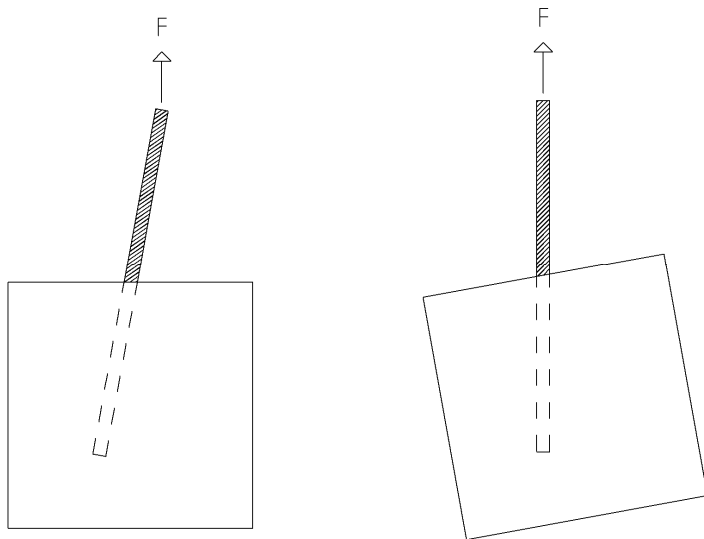
#### 4.4 Använd testmetod

För att genomföra utdragsförsöken användes en provningsmaskin av fabrikatet MTS. Maskinen är utrustad med en gripkolv som greppar om testarmeringen och drar den lodrätt uppåt. Som mothåll för provkropparna användes två massiva stångstänger, en på ömse sidor om testarmeringen, som placerades under två fastbultade bockar. Se figur 4.3.



*Fig 4.3 Uppställningsfigur 1*

I testet eftersträvades en lodrät utdragning av testarmeringen. Detta för att minimera den extrafriktion som uppstår om testarmeringen böjs under testets gång. För att testarmeringen skulle hamna i ett lodrätt läge vid utdragsprovet kilades plåtar in mellan mothållsstänger och bockar. Detta snedställde mothållsstängerna och därmed hamnade testarmeringen i linje med kraften  $F$ . Se figur 4.4.



*Fig 4.4 Överdriven principskiss. Fig till vänster visar kub med snedställd ingjuten armering. Fig. till höger visar kubens läge efter justering med kilar.*

MTS-maskinen registrerar kraft som funktion av deformation. I testet användes ej maskinens mätvärden för deformation. Eftersom att förutom glidningen i betongen innehöll även maskinens mätvärde mothållsstängernas deformation, eventuell glidning mellan stång och infästning i provmaskinen samt teststängernas töjning. Istället användes två deformationsgivare. Dessa monterades på testarmeringen och mätte utdragsdeformationen i förhållande till betongkubens ovankant. Se figur 4.5.

På detta sätt mättes stängernas glidning i förhållande till betongkubens ovansida men även töjningen i testarmeringen mellan deformationsgivarnas fästpunkt på testarmeringen och betongens ovansida. Med hjälp av E-modulen som beräknades i kapitel 3 räknades töjningen bort ifrån slutresultatet.

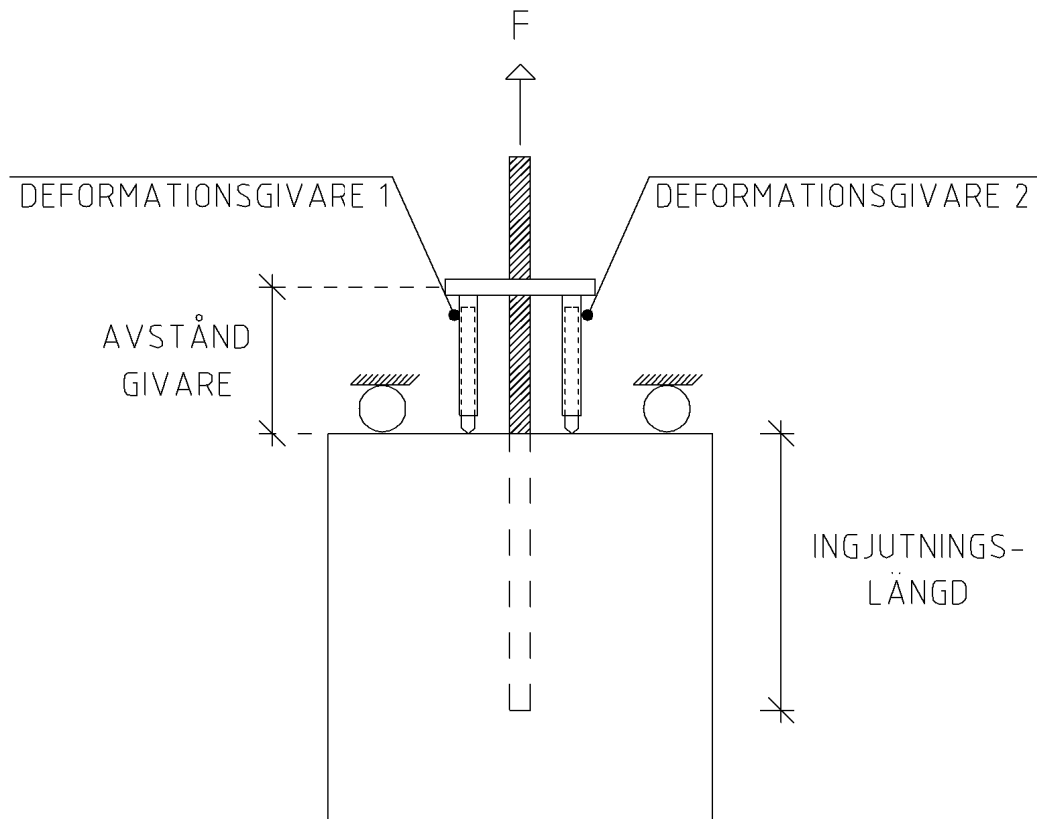


Fig 4.5 Uppställningsfigur 2

MTS:ens mätvärden nollställdes efter montering av kuben. Det innebär att varken kubens, mothållsstängernas eller kilarnas vikt registrerades av MTS:en. Därför vägdes dessa delar och adderades till utdragskraften.

Vid provning av testmetod inför testen drogs stänger till brott. Brottet uppstod på grund av att infästningen i MTS:en inte var den optimala. Greppet om stängerna fick spännas så hårt att stängerna krossades. När stängerna sedan drogs, gick de till brott vid  $\sim 30\text{kN}$  vilket motsvarar en dragspänning på  $\sim 597\text{MPa}$ . Brottet uppstod på grund av inspänningen. Brottet var häftigt och glasfibrer yrde runt testutrustningen. Med anledning av detta togs beslutet att avsluta samtliga tester vid  $25\text{kN}$ .

Figur 4.6 visar en testkub inhängd i MTS-maskinen tillsammans med all testutrustning.



*Fig 4.6 Foto från kubförsök*

## 4.5 Felkällor

Trots justering av stängernas läge kan det ändå ha funnits en viss snedställning kvar. Detta innebär att mätvärdena för utdragskraften kan ha blivit högre än vad de annars skulle ha varit.

Att stängerna vid ingjutning haft en skillnad i ingjutningslängd mot den tänkta bör ha påverkat testresultatet. Mindre ingjutningslängd innebär mindre mantelarea på den del av stången som vidhäftar mot betongen. Vilket i sin tur kan påverka utdragskraften negativt, och vice versa. Skillnaden mellan föreskriven och verklig ingjutningslängd var som mest 16mm.

Töjningsgivarna låg vid testen an mot betongkubernas ojämna yta. Därför kan mätfel ha uppstått vid mätning av avståndet mellan töjningsgivarens infästning i stången och betongen. För att minska mätfelet användes medelvärdet mellan två värden, mätta på var sida om stången.

## 4.6 Tidigare försök

Endast ett liknande försök på Fiberbars sandade stänger finns redovisat. Försöket finns i rapporten *Glasfiberkomposit som spännarmering i slipers* [4]. I testet redovisas utdragskraft för  $\phi 8$  stänger, men tyvärr varken ingjutningslängd eller förankringsspänning. Därför kan vi inte jämföra våra resultat med detta test.

Ett flertal test behandlar dock utdragsprov på andra typer av fiberkompositstänger.

Rapporten *Fiberkompositarmering* [11] innehåller liknande utdragsprover av virade och klämda glasfiberstänger, även dessa tillverkade av Fiberbar. De virade stängerna kom upp i förankringsspänningar på 20,42MPa samt 10,88MPa medan den klämda kom upp i 7,43MPa.

I en rapport från Chalmers [15] görs liknande tester på kolfiberarmering med virad glasfiberyta. För dessa stänger varierar förankringsspänningen mellan 6,5 och 16,1MPa.

Houghes Brothers [2], en annan tillverkare av fiberkompositmaterial, har testat sina virade armeringsstänger. Testen visar att dessa stänger kommer upp i förankringsspänningar på  $\sim 11,6$ MPa vid kubtest.

## 4.7 Resultat

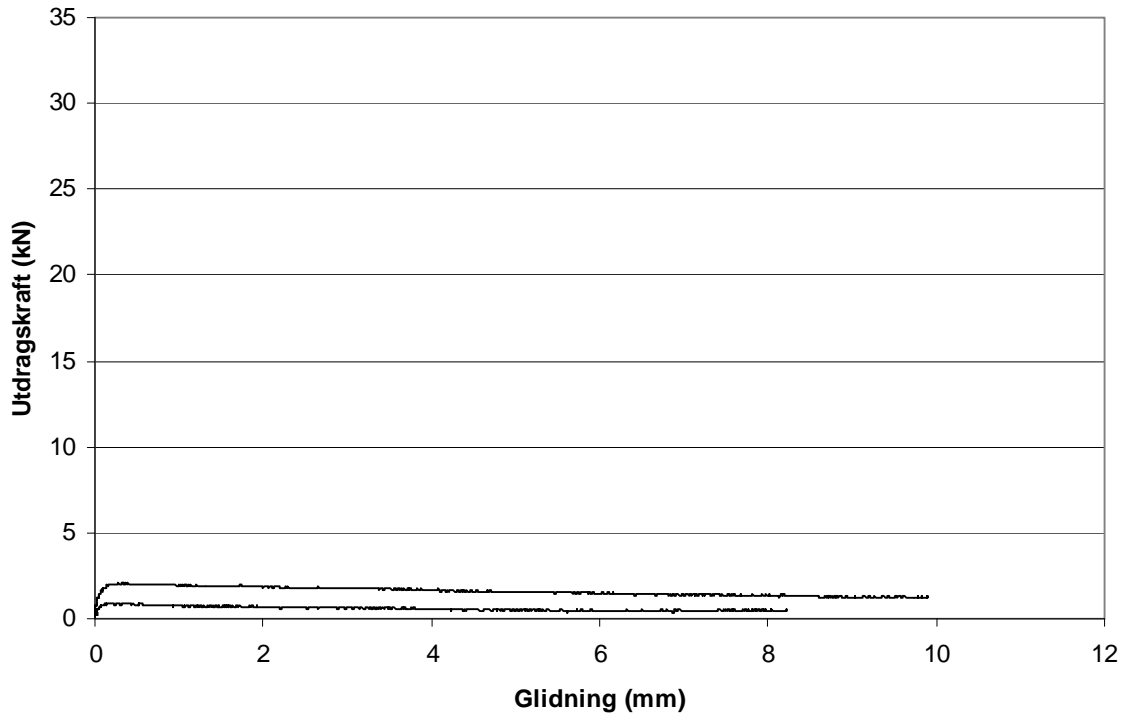
Redan innan försöken kunde det avgöras vilka stänger som skulle ge goda resultat och vilka som skulle ge sämre. På en del av stängerna hade vinylesterlagret inte härdat ordentligt. Dessa stänger upplevdes som kladdiga och man kunde utan någon större möda rispa bort delar av ytstrukturen med fingrarna. Efter utdrag såg dessa stänger ut som figur 4.7 visar. De stänger som däremot hade härdat ordentligt uppvisade goda resultat vid försökstillfället.



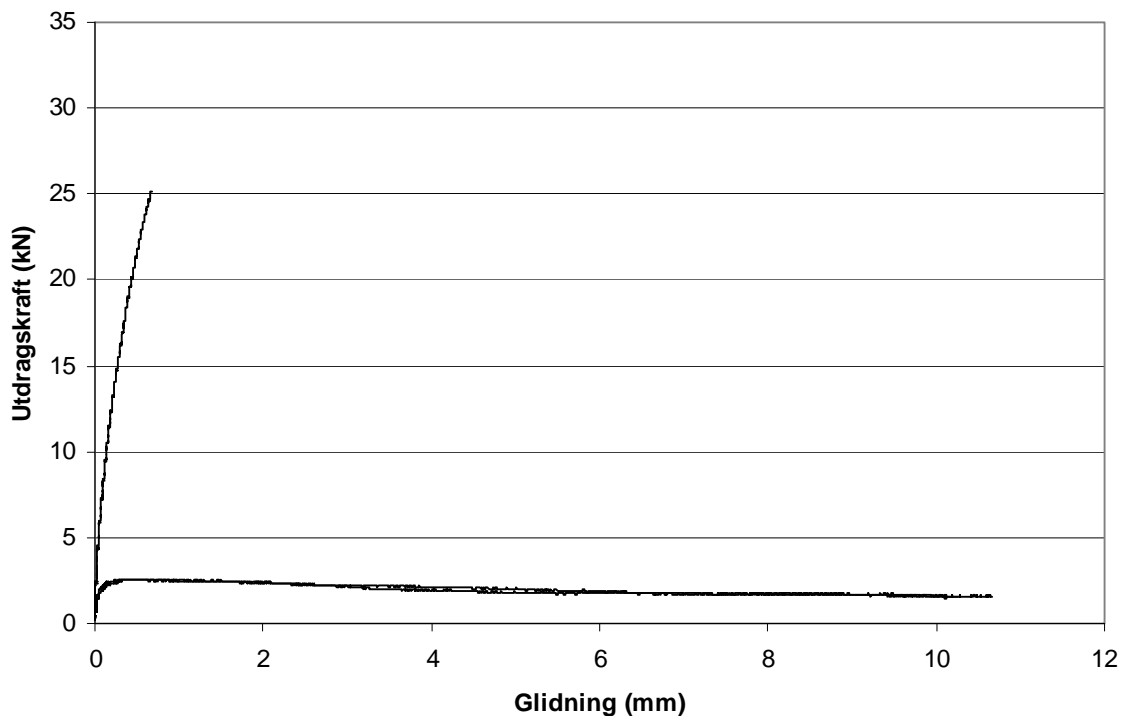
*Fig 4.7 Bild på avskalad glasfiberstång. Ytskiktet upplevdes som kladdigt inför testet.*

Förankringskapaciteten på glasfiberstängerna varierade mellan 0,72 och 19,7MPa enligt bilaga 2. Med hänsyn till att flera tester avslutades vid 25kN finns anledning att misstänka att högre värden på förankringskapacitet kan påträffas med bättre försöksutrustning.

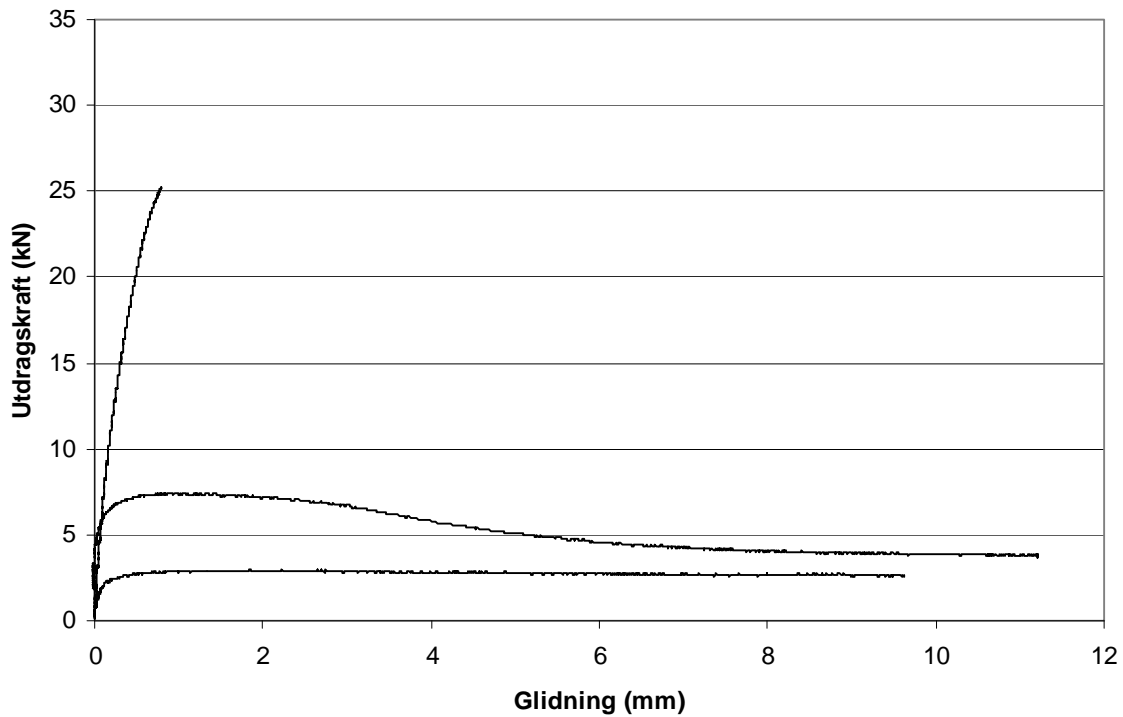
Figur 4.8 till 4.14 redovisar samtliga diagram från utdragsproven. Diagrammen visar utdragskraft som funktion av stängernas glidning i förhållande till betongens ovansida.



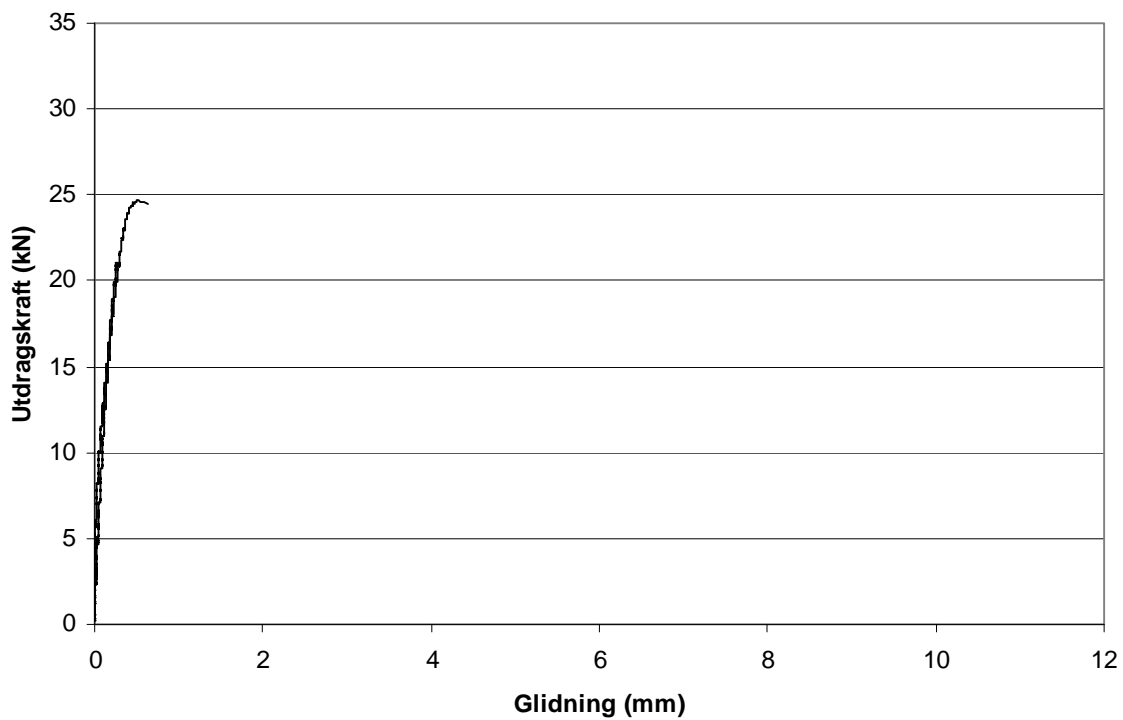
*Fig 4.8 Kub nr 2-3. Glasfiberarmering, 5cm ingjutning, C30/37 betong. I båda fallen kändes ytan kladdig.*



*Fig 4.9 Kub nr 4-6. Glasfiberarmering, 10cm ingjutning, C30/37 betong. I två av fallen kändes ytan kladdig. I ett av fallen avbröts försöket vid 25kN utdragskraft.*



*Fig 4.10 Kub nr 7-9. Glasfiberarmering, 15cm ingjutning, C30/37 betong. I två av fallen kändes ytan kladdig. I ett av fallen avbröts försöket vid 25kN utdragskraft.*



*Fig 4.11 Kub nr 11-12. Glasfiberarmering, 5cm ingjutning, C50/60 betong. I ett av fallen sprack betongen i ovankant vid testarmeringen.*



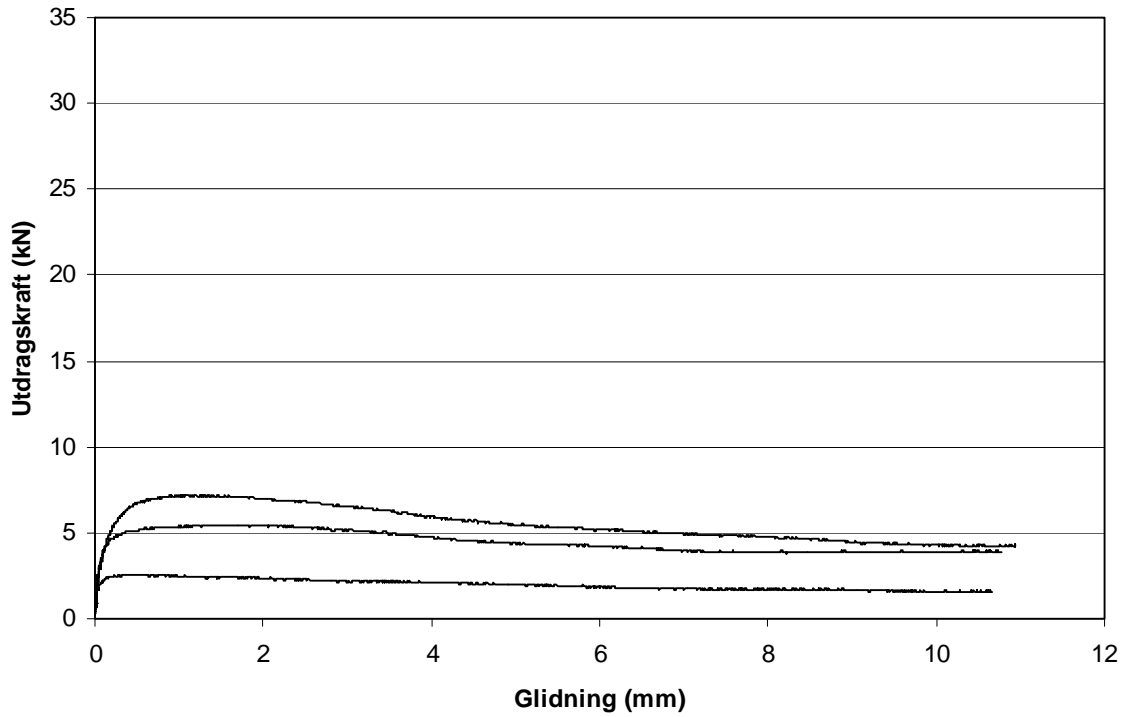


Fig 4.12 Kub nr 13-15. Glasfiberarmering, 10cm ingjutning, C50/60 betong. Ytan kändes klibbig på samtliga stänger.

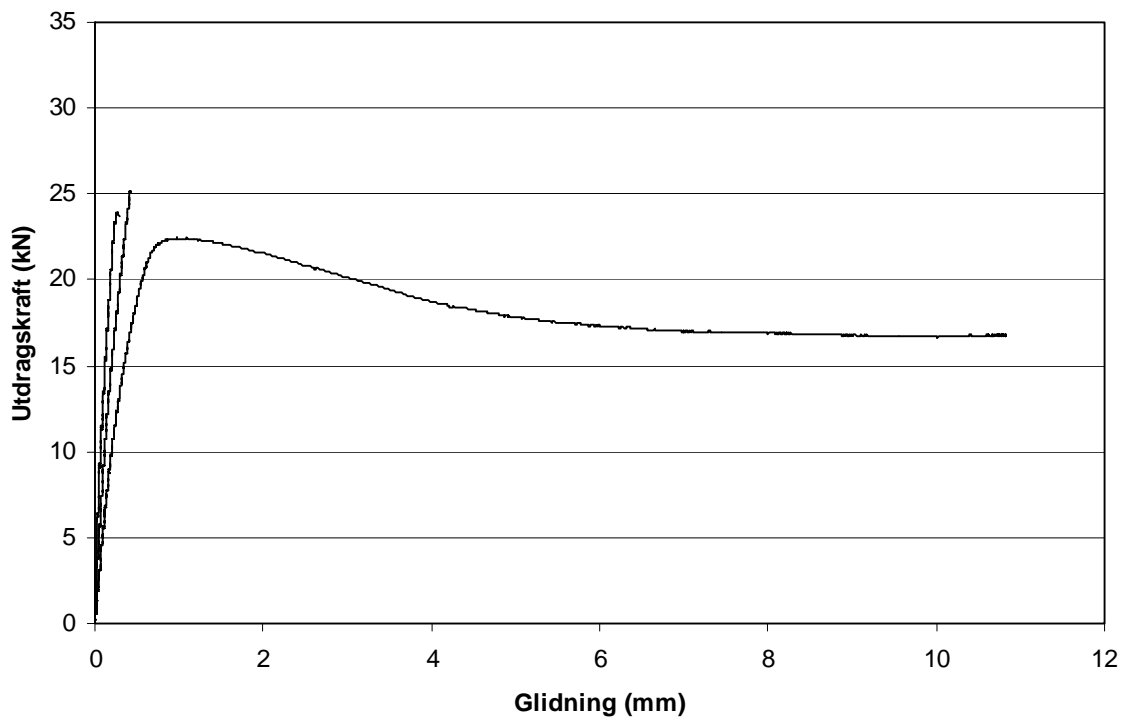
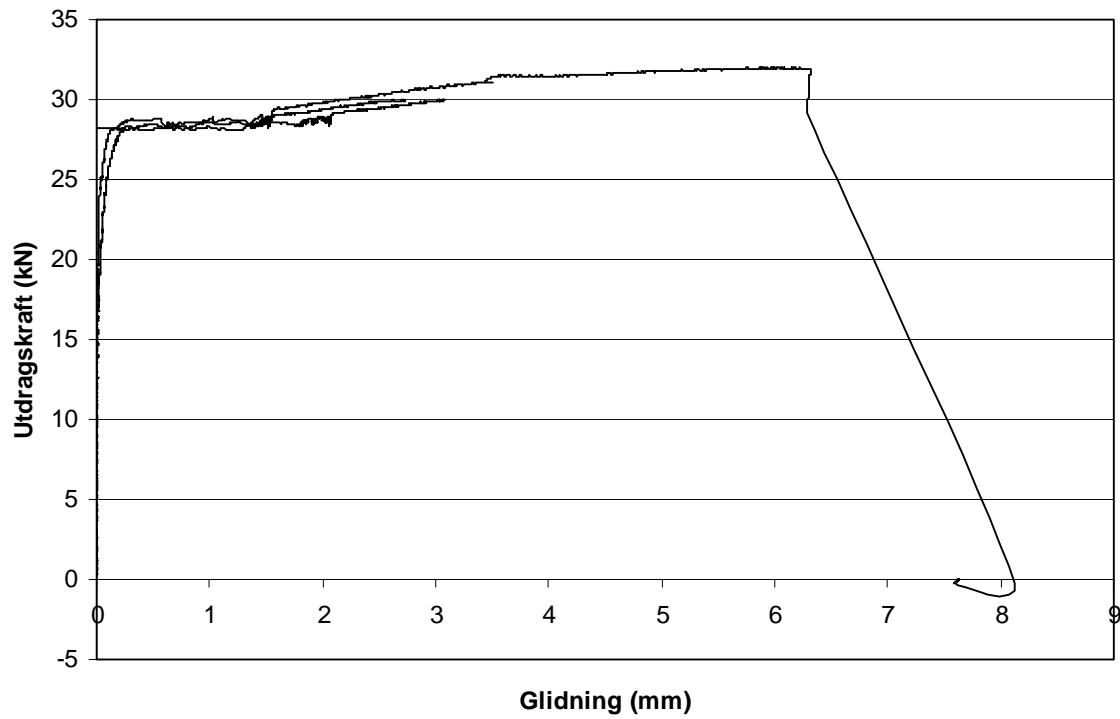


Fig 4.13 Kub nr 16-18. Glasfiberarmering, 15cm ingjutning, C50/60 betong. Ytlaget på en av stängerna verkade innehålla för mycket sand.



*Fig 4.14 Kub nr 19-21. Kamstål, 15cm ingjutning, C50/60 betong. I samtliga fall gick stängerna sönder och drogs alltså inte ut ur betongen.*

## 5 Balk-försök

Dessa försök gick ut på att böjbelasta sex armerade betongbalkar. Fyra av balkarna var armerade med glasfiberarmering och två med konventionella kamstänger i stål.

### 5.1 Syfte

Syftet med försöken var att undersöka hur glasfiberarmerade betongbalkar fungerar. Framförallt kontrollera hur eventuell glidning mellan armering och betong påverkar balkarnas momentkapacitet.

### 5.2 Tillverkning av provkroppar

För att undersöka detta tillverkades sex balkar. Fyra av dessa med glasfiberarmering ( $\emptyset 15$ ) som testarmering och två med vanliga kamstänger (B500B  $\emptyset 10$ ) som referensbalkar. Balkarna göts med C30/37 betong och tvärkraftsarmeras med byglar (B500B  $\emptyset 8$ ) för att undvika tvärkraftsbrott vid försöket. En balk av var sort göts utan tvärkraftsarmering för att kontrollera hur stor inverkan byglarna har på resultatet. Eftersom testarmeringen böjdes ner av sin egenvikt, hängdes de upp av en ståltråd i balkmitt innan gjutning. Därefter härdade de i 28 dagar för att uppnå full hållfasthet.

I bilaga 1 redovisas beräkningar på ovan beskriven balk. Beräkningarna visar att balken är överarmerad. Detta innebär att balken kommer gå till brott i tryckzonen innan armeringens fulla kapacitet är utnyttjad. Detta var inte avsiktligt och egentligen borde normalarmerade tvärsnitt användas vid denna typ av test.

### 5.3 Testmetod

Balkarna placerades och belastades enligt figur 5.1 och figur 5.3. Den valda metoden fungerar väl för sådana här försök pga. att momentet blir konstant i balkens mittparti. Detta gör att balken kommer att gå till brott vid svagaste punkt i mittpartiet. Det innebär att lokalt starkare partier på balken har mindre inverkan på resultatet.

Även för dessa försök användes en provningsmaskinen av fabrikat MTS. Provningsmaskinen registrerar kraft och deformation. MTS:ens mätvärden för deformation är nedböjningen rakt under punktlasterna och alltså inte balkens mittnedböjning. För examensarbetets syfte är detta ett tillräckligt användbart mätvärde.

Det var även av intresse att mäta om stängerna gled in i betongtvärsnittet vid nedböjning. Detta mättes med hjälp av fyra givare som fästes i balken och mätte mot armeringsändarna. Se figur 5.2.

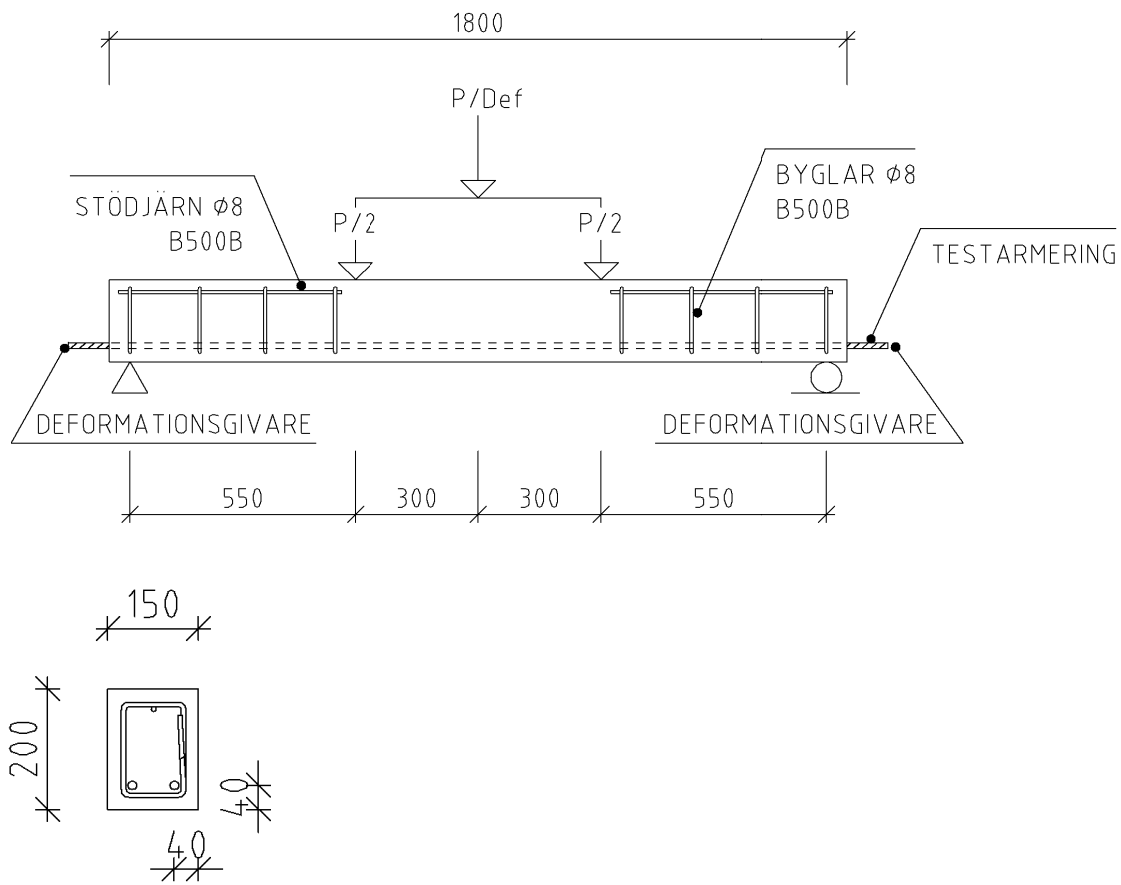
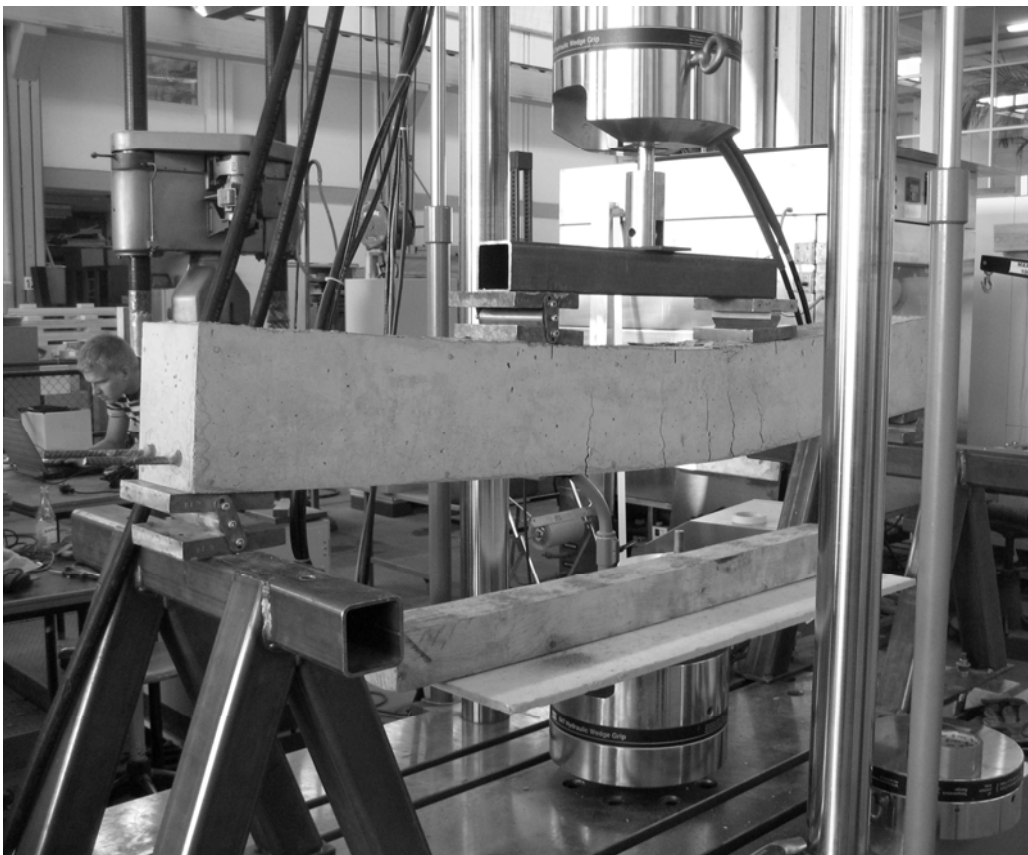


Fig 5.1 Uppställnings- och tillverkningsfigur.



*Fig 5.2 Foto från balkförsök som visar glidningsgivarnas placering.*



*Fig 5.3 Foto från balkförsök.*

## 5.4 Tidigare försök

Tidigare liknande försök har utförts med Fiberbars gamla ytbeläggning. Dessa försök utfördes med dubbelarmerade tvärsnitt samt stålfiberförstärkt betong. Försöken visade att den pålimmade ytbeläggningen inte klarade de påfrestningar som uppstår då balken böjs. Ytbeläggningen släpper ifrån stängerna och lämnar kvar släta stänger som glider i betongen. Detta innebär att armeringen mister sin förmåga att ta upp dragkrafter i betongbalkens underkant. [12]

## 5.5 Resultat

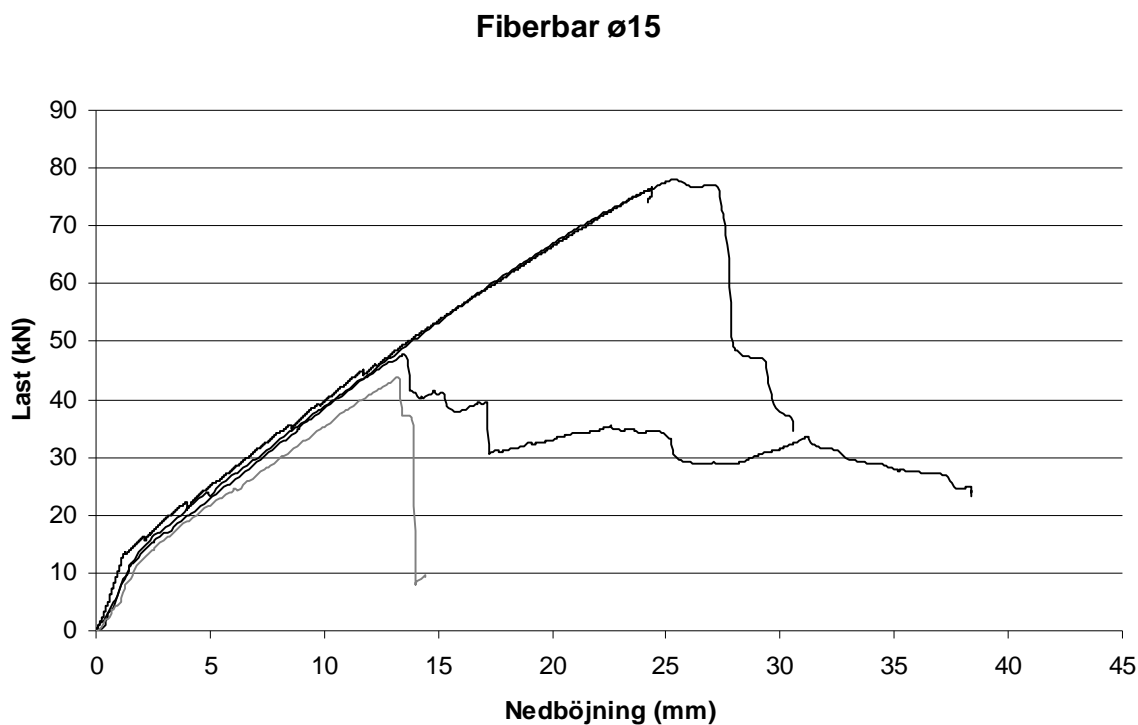
Det vi kan säga om våra värden är väldigt lite. Detta på grund av att balkarna med glasfiberarmering var överarmerade och gick till tvärkraftsbrott i samtliga fall utom ett som avbröts innan brott. Värt att notera var att på samtliga glasfiberstänger verkade det som att vinylestern hade härdat ordentligt. Ingen av de fyra deformationsgivarna gav något utslag vid testerna. Med andra ord gled ingen av stängerna in i betongen. Det är dock svårt att dra några slutsatser av detta då armeringen inte utsattes för så höga krafter som de är dimensionerade för.

Figur 5.4 nedan visar glasfiberarmeringen i en av balkarna efter tvärkraftsbrott. Ytstrukturen var intakt.

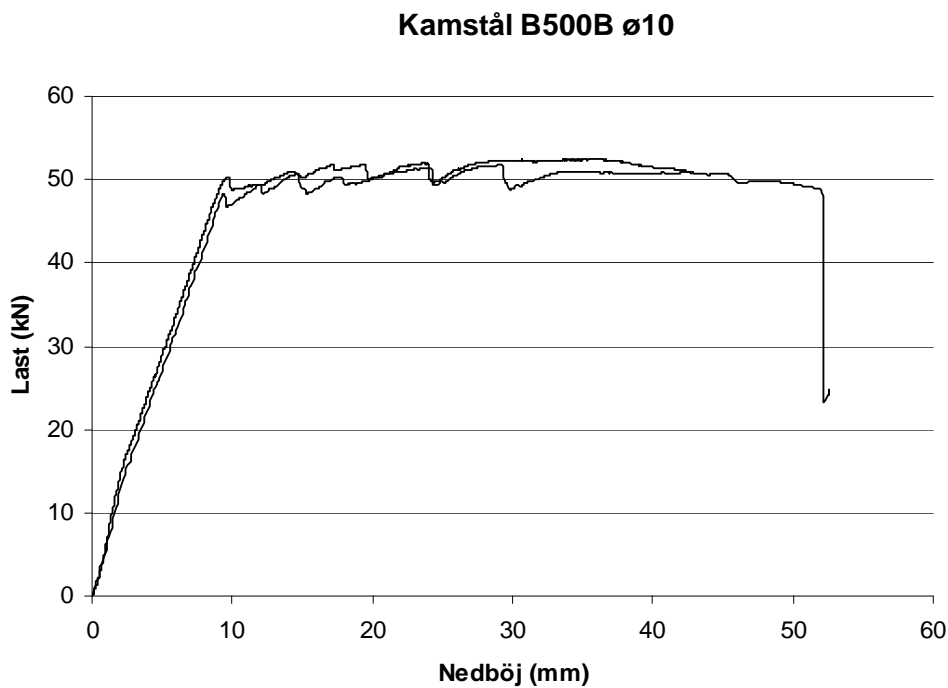


*Fig 5.4 Glasfiberarmering i balk efter test. Ytstrukturen är fortfarande intakt.*

I figur 5.5 och 5.6 redovisas samtliga balkförsök. Diagrammen visar lasten P som funktion av nedböjningen Def (enligt figur 5.1).



*Fig 5.5 Balkar med glasfiberarmering. Grå linje visar balk utan tvärkraftsarmering.*



*Fig 5.6 Balkar med kamstänger.*

## 6 Slutsatser

De uppmätta förankringskapaciteterna från kubförsöken varierar mellan 0,72-19,7MPa, enligt bilaga 2. Försöken i examensarbetet kan dock inte användas till att bestämma några hållfasthetsvärden. Detta på grund av osäkra testmetoder som beskrivs i kapitel 4.5 och kapitel 5.5, samt att för få försök har utförts.

Vid undersökning av vidhäftningsförmågan hos Fiberbars glasfiberarmering med den nya ytbeläggningen har vi kunnat påvisa en ojämnhet i produktionen. I vissa fall har inte vinylestern i ytlagret härdats ordentligt. Detta har i sin tur lett till att ytlagret har starkt försämrade funktion.

Per Orre på Fiberbar meddelar att de har köpt in en maskin som på ett bättre sätt ska blanda samt applicera ytskiktet.

Om nya försök ska utföras för att undersöka förankringsegenskaperna mellan glasfiberarmering och betong bör kubtest utföras enligt den japanska standarden beskriven i kapitel 4.2. Hänsyn bör tas till svårigheterna att fästa in glasfiberarmeringen i dragmaskinens käftar utan att skada armeringen. Exempel på hur detta kan utföras med nylonkilar finns i *Glasfiberkomposit som spännarmering i slippers*[4].

Balktesterna kan utföras med samma metod som använts i detta examensarbete. Dock bör testbalkarna utformas på så vis att de blir normalarmerade och klarar tvärkrafterna. Detta kan exempelvis uppnås genom att byta armeringsdimension till  $\varnothing 8$ .



## 7 Diskussion

Det är svårt att få grepp om vad som är ett bra respektive dåligt värde på förankringsspänning. I ett försök att reda ut det använder vi följande tankegång.

För att kunna utnyttja armeringen maximalt bör förankringen mellan armering och betong vara så stark att stången går till brott innan förankringen släpper.

Förankringsspänningen definieras som  $\tau = \frac{F}{A_{Mantel}}$  där  $F$  är utdragskraften och  $A_{Mantel}$  är mantelarean på avsedd förankringslängd. Förankringsspänningen uttrycks som  $\tau = \frac{F}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot h}$  där  $r$  är radien och  $h$  är förankringslängden.

Eftersom att brott i stången eftersträvas ställs följande villkor upp  $\sigma \leq \frac{F}{A_{Tvärsnitt}}$  där  $\sigma$  är draghållfastheten,  $F$  är utdragskraften och  $A_{Tvärsnitt}$  är tvärsnittsarean  $\pi \cdot r^2$ .

Om uttrycket för förankringsspänningen sätts in i brottvillkoret fås:

$$\tau \geq \frac{\sigma \cdot r}{2 \cdot h}.$$

Villkoret visar att det är variablerna  $\sigma$ ,  $r$  och  $h$  som bestämmer önskad förankringsspänning.

För glasfiberarmeringen är den karakteristiska draghållfastheten  $\sigma = 1000 \text{ MPa}$ . Alltså beror förankringsspänningen på radien och förankringslängden. En högre förankringsspänning eller en längre förankringslängd krävs alltså för en stång med större radie för att kunna utnyttja glasfiberstångens fulla kapacitet.

Om förankringskapaciteterna uppmätta i denna rapport sätts in i brottvillkoret fås minsta förankringslängden  $h$  som funktion av stångradien  $r$ . Enligt formeln

$$h \geq \frac{\sigma \cdot r}{2 \cdot \tau} = \frac{\sigma \cdot d}{4 \cdot \tau} \text{ där } d \text{ är stångdiametern.}$$

I figur 7.1 och 7.2 redovisas villkoret för förankringslängden med minsta uppmätta förankringskapaciteten 0,72MPa respektive den högst uppmätta 19,66MPa.

### Förankringsspänningen 0,72MPa

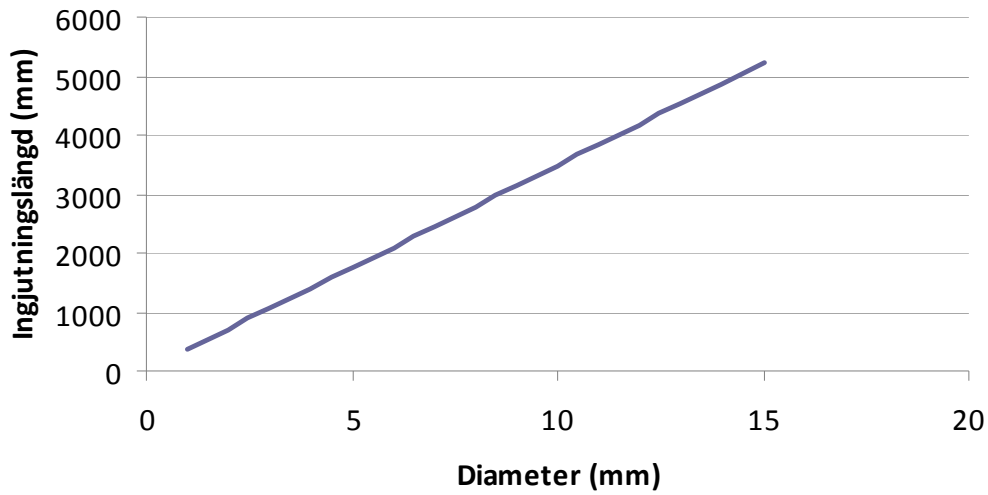


Fig 7.1 Minsta ingjutningslängd som funktion av stångdiametern för förankringsspänningen 0,72MPa.

### Förankringsspänningen 19,66MPa

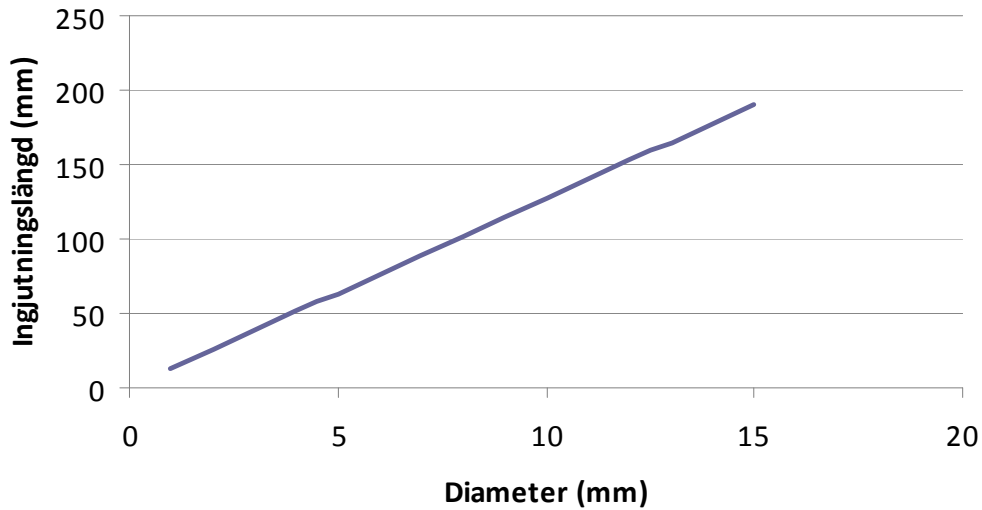


Fig 7.2 Minsta ingjutningslängd som funktion av stångdiametern för förankringsspänningen 20MPa.

## 8 Källförteckning

### 8.1 Litteratur

- [1] Fiberkompositter som armering – Materialegenskaper  
Lars Sentler  
Byggeforskningsrådet R10:1992
  
- [3] Durability of FRP reinforcement in concrete – Literature review and experiments  
Valter Dejke  
Department of Building Materials, Chalmers University of Technology  
2001
  
- [4] Glasfiberkomposit som spännarmering i slipers  
Hans Carlsson, Ola Johansson, Lars Paulsson  
Lunds Tekniska Högskola, Rapport TVBK-5065 1993
  
- [8] Byggkonstruktion  
Tord Isaksson, Annika Mårtensson, Sven Thelandersson  
Studentlitteratur 2005
  
- [11] Fiberkompositarmering – En teoretisk och experimentell analys av fiberkompositarmering som böjarmering i balkar  
Ewa Andersson, Lars Netzell, Tore Nilsson  
Lunds Tekniska Högskola, Rapport TVBK-5044 1990
  
- [15] Pull-out, flexural rotation capacity and creep tests using hybrid composite rods and CFCC rods for reinforcement in concrete  
Ralejs Tapfers, Vitauts Tamuzs, Roberts Apinis, Janis Modniks  
Division of Building Technology, Chalmers University of Technology  
1999

### 8.2 Internet

- [2] Houghes Brothers  
[www.hughesbros.com/Aslan100/Aslan100\\_GFRP\\_rebar.html](http://www.hughesbros.com/Aslan100/Aslan100_GFRP_rebar.html)  
Hämtad 2009-05-15
  
- [5] Nationalencyklopedin  
[www.ne.se](http://www.ne.se) sökord: aramid  
Hämtad 2009-05-15

- [6] Kompositfabriken  
[www.kompositfabriken.com/dokument/Skillnad\\_mellan\\_plaster.php](http://www.kompositfabriken.com/dokument/Skillnad_mellan_plaster.php)  
Hämtad 2009-05-15
- [9] K-Rauta  
[http://www.k-rauta.se/bygg\\_3300.htm](http://www.k-rauta.se/bygg_3300.htm)  
Hämtad 2009-05-15
- [10] Fiberbar  
[www.fiberbar.se](http://www.fiberbar.se)  
Hämtad 2009-03-10
- [13] American Concrete Institute  
[www.concrete.org/BookstoreNet/ProductDetail.aspx?SEARCH\\_TYPE=ALL&keywords=ACI+440&ItemID=440304](http://www.concrete.org/BookstoreNet/ProductDetail.aspx?SEARCH_TYPE=ALL&keywords=ACI+440&ItemID=440304)  
Hämtad 2009-05-15
- [14] Japanese Society of Civil Engineering  
[www.jsce.or.jp/committee/concrete/e/newsletter/newsletter01/recommendation/recommendation/31-1.pdf](http://www.jsce.or.jp/committee/concrete/e/newsletter/newsletter01/recommendation/recommendation/31-1.pdf)  
Hämtad 2009-05-15

### **8.3 Muntliga källor**

- [7] Samtal med Per Orre kontinuerligt genom arbetets gång  
VD Fiberbar AB
- [12] Telefonintervju med Ulf Ekdahl, PEAB Grundteknik  
2009-05-12

# Bilagor

## Bilaga 1: Balkberäkningar

### Kamstänger

Spännvidd  $L = 1,7m$

Avstånd upplag till punktlast  $a = 0,55$

Tvärsnittsbredd  $b = 0,15m$

Tvärsnittshöjd  $h = 0,2m$

Effektiv höjd  $d = 0,16m$

Elasticitets modul stål  $E_s = 200GPa$

Sträckgräns stål  $f_{st} = 500MPa$

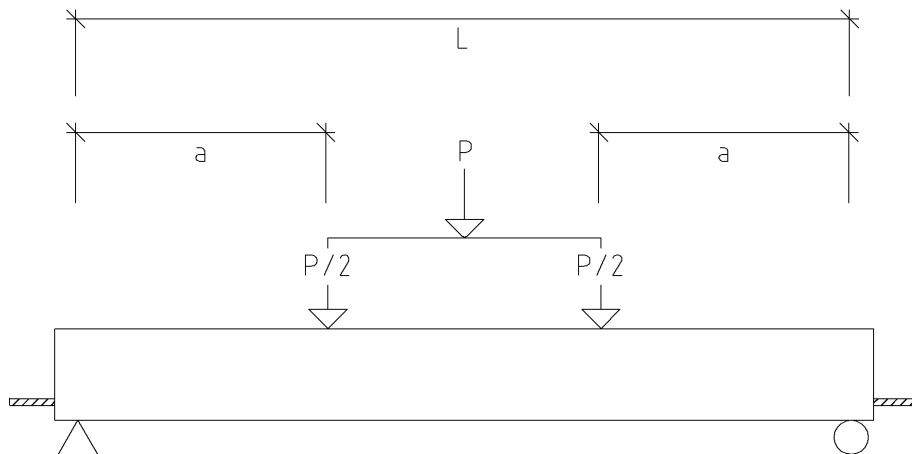
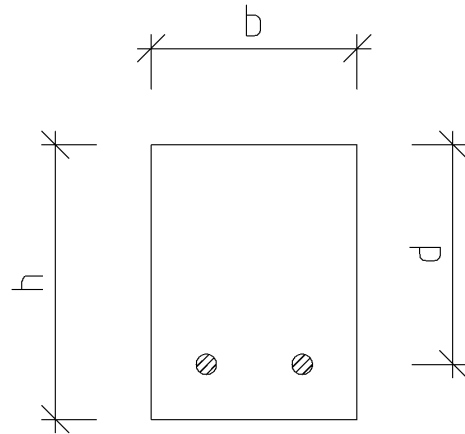
Elasticitets modul betong  $E_c = 33GPa$

Tryckhållfasthet betong  $f_{cc} = 29MPa$

Draghållfasthet betong  $f_{ct} = 1,9MPa$

Armeringsarea  $A_s = 1,57 \cdot 10^{-4} m^2$

Stuktöjning  $\epsilon_{cu} = 3,5 \cdot 10^{-3}$



Antag normalarmerad

$$(\rightarrow) : F_c = F_s = A_s \cdot \sigma_s = f_{cc} \cdot 0,8x \cdot b \rightarrow x = \frac{A_s \cdot \sigma_s}{f_{cc} \cdot 0,8 \cdot b} = \frac{1,57 \cdot 10^{-4} \cdot 500 \cdot 10^6}{29 \cdot 10^6 \cdot 0,8 \cdot 0,15} \approx 0,02256$$

Kontroll normalarmerad

$$\frac{\epsilon_{cu}}{x} = \frac{\epsilon_s}{d-x} \rightarrow \epsilon_s = \frac{d-x}{x} \cdot \epsilon_{cu} = \frac{0,16-0,02256}{0,02256} \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} = 0,0213$$

$$\epsilon_{sy} = \frac{f_{st}}{E_s} = \frac{500}{200 \cdot 10^3} = 2,5 \cdot 10^{-3}$$

$$\epsilon_s > \epsilon_{sy} \rightarrow \text{Normalarmerad} \rightarrow \sigma_s = f_{st}$$

## Bruksgränstillstånd

### Stadie 1

$$(EI_I) = E_{\text{Eff}} \cdot I_{\text{tot}} = 33 \cdot 10^9 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 33 \cdot 10^5 \text{ Nm}^2$$

$$E_{\text{Eff}} = E_c \quad (\varphi_{\text{eff}} = 0, \text{Korttidslast})$$

$$I_{\text{tot}} = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0,15 \cdot 0,2^3}{12} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

### Stadie 2

$$(EI_{II}) = 0,5 \cdot b \cdot d^3 \cdot \xi^2 \cdot E_{\text{Eff}} \cdot \left(1 - \frac{\xi}{3}\right) = 0,5 \cdot 0,15 \cdot 0,16^3 \cdot 0,141^2 \cdot 33 \cdot 10^9 \cdot \left(1 - \frac{0,141}{3}\right) = 1,92 \cdot 10^5 \text{ Nm}^2$$

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{0,02256}{0,16} = 0,141$$

### Nedböjning

$$v_{x=0,55} = 2 \frac{P \cdot L \cdot b \cdot x}{6(EI)} \left(1 - \frac{b^2}{L^2} - \frac{x^2}{L^2}\right) = 2 \frac{P \cdot 1,7 \cdot 1,15 \cdot 0,55}{6(EI)} \left(1 - \frac{1,15^2}{1,7^2} - \frac{0,55^2}{1,7^2}\right) = 0,157 \cdot \frac{P}{(EI)}$$

### Sprickbildning

$$M = \frac{P \cdot a}{2}$$

$$M = f_{ct} \cdot W \rightarrow P = \frac{2 \cdot f_{ct} \cdot W}{a} = \frac{2 \cdot 1,9 \cdot 10^6 \cdot 0,001}{0,55} = 6,9 \text{ kN}$$

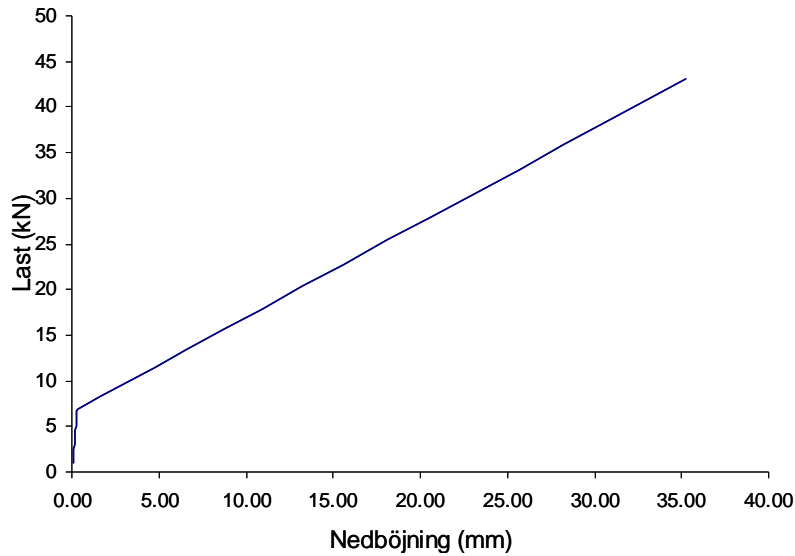
$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{0,15 \cdot 0,2^2}{6} = 0,001 \text{ m}^3$$

### Brott

$$P_{\text{Max}} = \frac{2 \cdot M}{a} = \frac{2 \cdot 11,85}{0,55} = 43,1 \text{ kN}$$

$$M = f_{st} \cdot A_s \cdot (d - 0,4x) = 500 \cdot 10^6 \cdot 1,57 \cdot 10^{-4} \cdot (0,16 - 0,4 \cdot 0,02256) = 11,85 \text{ kNm}$$

Kurvan nedan illustrerar en grov förenkling av den tänkta last/nedböjningskurva som förväntas. Självklart plasticerar stålet. Detta har ej tagits hänsyn till i beräkningsmodellen.



## Glasfiberstänger

Spännvidd  $L = 1,7m$

Avstånd upplag till punktlast  $a = 0,55$

Tvärsnittsbredd  $b = 0,15m$

Tvärsnittshöjd  $h = 0,2m$

Effektiv höjd  $d = 0,16m$

Elasticitets modul stål  $E_s = 50GPa$

Sträckgräns stål  $f_{st} = 1000MPa$

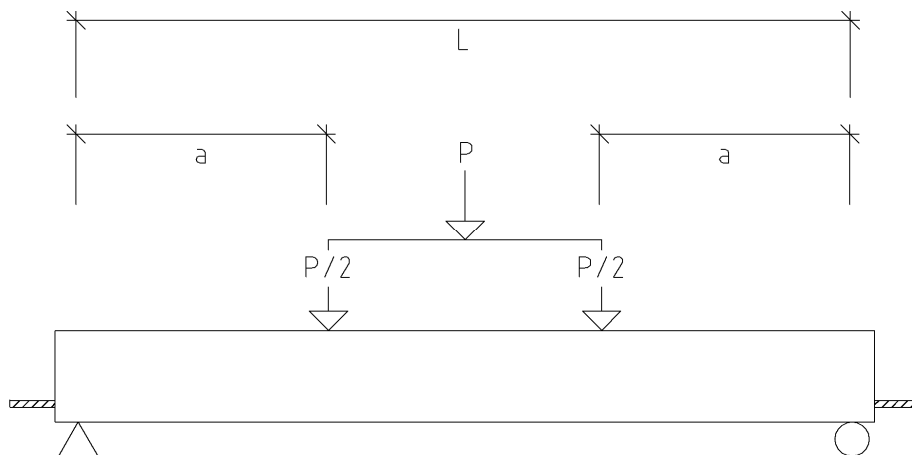
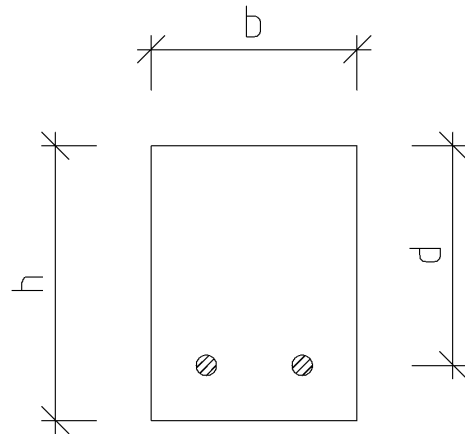
Elasticitets modul betong  $E_c = 33GPa$

Tryckhållfasthet betong  $f_{cc} = 29MPa$

Draghållfasthet betong  $f_{ct} = 1,9MPa$

Armeringsarea  $A_s = 3,53 \cdot 10^{-4} m^2$

Stuktöjning  $\varepsilon_{cu} = 3,5 \cdot 10^{-3}$



Antag normalmerad

$$(\rightarrow) : F_c = F_g = A_g \cdot \sigma_g = f_{cc} \cdot 0,8x \cdot b \rightarrow x = \frac{A_g \cdot \sigma_g}{f_{cc} \cdot 0,8 \cdot b} = \frac{3,53 \cdot 10^{-4} \cdot 1000 \cdot 10^6}{29 \cdot 10^6 \cdot 0,8 \cdot 0,15} \approx 0,1016$$

Kontroll normalmerad

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{x} = \frac{\varepsilon_g}{d-x} \rightarrow \varepsilon_g = \frac{d-x}{x} \cdot \varepsilon_{cu} = \frac{0,16-0,1016}{0,1016} \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} = 0,00201$$

$$\varepsilon_{gy} = \frac{f_{gt}}{E_g} = \frac{1000}{50 \cdot 10^3} = 20 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_g < \varepsilon_{gy} \rightarrow \text{Överarmerad} \rightarrow \sigma_g = \varepsilon_g \cdot E_g = \frac{d-x}{x} \cdot \varepsilon_{cu} \cdot E_g$$

Överarmerat tvärsnitt

$$x = \frac{A_g \cdot \sigma_g}{f_{cc} \cdot 0,8 \cdot b} = \frac{A_g \cdot \frac{d-x}{x} \cdot \varepsilon_{cu} \cdot E_g}{f_{cc} \cdot 0,8 \cdot b} \rightarrow x^2 + \frac{A_g \cdot \varepsilon_{cu} \cdot E_g}{f_{cc} \cdot 0,8 \cdot b} \cdot x - \frac{A_g \cdot \varepsilon_{cu} \cdot E_g \cdot d}{f_{cc} \cdot 0,8 \cdot b} \rightarrow$$

$$\rightarrow x_{1,2} = -\frac{A_g \cdot \varepsilon_{cu} \cdot E_g}{2 \cdot f_{cc} \cdot 0,8 \cdot b} \pm \sqrt{\left(\frac{A_g \cdot \varepsilon_{cu} \cdot E_g}{2 \cdot f_{cc} \cdot 0,8 \cdot b}\right)^2 + \frac{A_g \cdot \varepsilon_{cu} \cdot E_g \cdot d}{f_{cc} \cdot 0,8 \cdot b}} \rightarrow$$

$$x_1 = 0,04515$$

( $x_2 = -0,0629$ ) Förkastas

$$\sigma_g = E_g \cdot \varepsilon_g = E_g \cdot \frac{d-x}{x} \cdot \varepsilon_{cu} = 50 \cdot 10^9 \frac{0,16-0,04515}{0,04515} \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} = 445 \text{ MPa}$$

Bruksgränstillstånd

Stadie 1

$$(EI_I) = E_{\text{Eff}} \cdot I_{\text{tot}} = 33 \cdot 10^9 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 33 \cdot 10^5 \text{ Nm}^2$$

$$E_{\text{Eff}} = E_c \quad (\varphi_{\text{eff}} = 0, \text{ Korttidslast})$$

$$I_{\text{tot}} = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0,15 \cdot 0,2^3}{12} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

Stadie 2

$$(EI_{II}) = 0,5 \cdot b \cdot d^3 \cdot \xi^2 \cdot E_{\text{Eff}} \cdot \left(1 - \frac{\xi}{3}\right) = 0,5 \cdot 0,15 \cdot 0,16^3 \cdot 0,282^2 \cdot 33 \cdot 10^9 \cdot \left(1 - \frac{0,282}{3}\right) = 7,31 \cdot 10^5 \text{ Nm}^2$$

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{0,04515}{0,16} = 0,282$$

Nedböj

$$v_{x=0,55} = 2 \frac{P \cdot L \cdot b \cdot x}{6(EI)} \left(1 - \frac{b^2}{L^2} - \frac{x^2}{L^2}\right) = 2 \frac{P \cdot 1,7 \cdot 1,15 \cdot 0,55}{6(EI)} \left(1 - \frac{1,15^2}{1,7^2} - \frac{0,55^2}{1,7^2}\right) = 0,157 \cdot \frac{P}{(EI)}$$

Sprickbildning



$$M = \frac{P \cdot a}{2}$$

$$M = f_{ct} \cdot W \rightarrow P = \frac{2 \cdot f_{ct} \cdot W}{a} = \frac{2 \cdot 1,9 \cdot 10^6 \cdot 0,001}{0,55} = 6,9 \text{ kN}$$

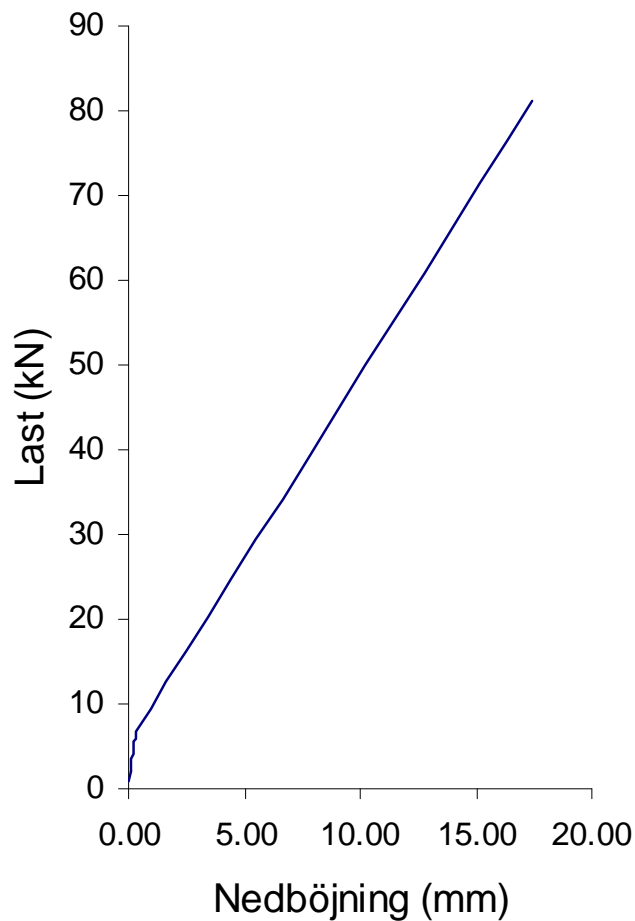
$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{0,15 \cdot 0,2^2}{6} = 0,001 \text{ m}^3$$

Brott

$$P_{Max} = \frac{2 \cdot M}{a} = \frac{2 \cdot 22,3}{0,55} = 81,1 \text{ kN}$$

$$M = \sigma_g \cdot A_g \cdot (d - 0,4x) = 445 \cdot 10^6 \cdot 3,53 \cdot 10^{-4} \cdot (0,16 - 0,4 \cdot 0,04515) = 22,3 \text{ kNm}$$

Kurvan nedan illustrerar en grov förenkling av den tänkta last/nedböjningskurva som förväntas.



## Bilaga 2: Förankringsspänningar

I nedanstående tabell redovisas utdragskraft samt förankringsspänning för testade kuber med glasfiberarmering. Utdragskraften är det högsta uppmätta lastvärdet vid testtillfället. Förankringsspänningen är uträknad genom formeln

$\tau = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot h}$  där F är utdragskraften, d är stångdiametern 8mm och h är ingjutningslängden.

Kub nr	Ingjutningslängd (cm)	Betongklass	Utdragskraft (kN)	Förankringsspänning (MPa)	Anm.
1	-	-	-	-	-
2	5	C30/37	0.9	0.72	
3	5	C30/37	2.2	1.65	
4	10	C30/37	2.6	1.03	
5	10	C30/37	25.2	10.03	Avslutades
6	10	C30/37	2.6	1.02	
7	15	C30/37	3	0.80	
8	15	C30/37	7.4	1.97	
9	15	C30/37	25.2	6.68	Avslutades
10	-	-	-	-	-
11	5	C50/60	24.7	19.66	
12	5	C50/60	21.1	16.79	Betongen sprack
13	10	C50/60	7.2	2.86	
14	10	C50/60	5.5	2.18	
15	10	C50/60	2.6	1.02	
16	15	C50/60	25.2	6.68	Avslutades
17	15	C50/60	22.4	5.94	
18	15	C50/60	23.9	6.34	Avslutades