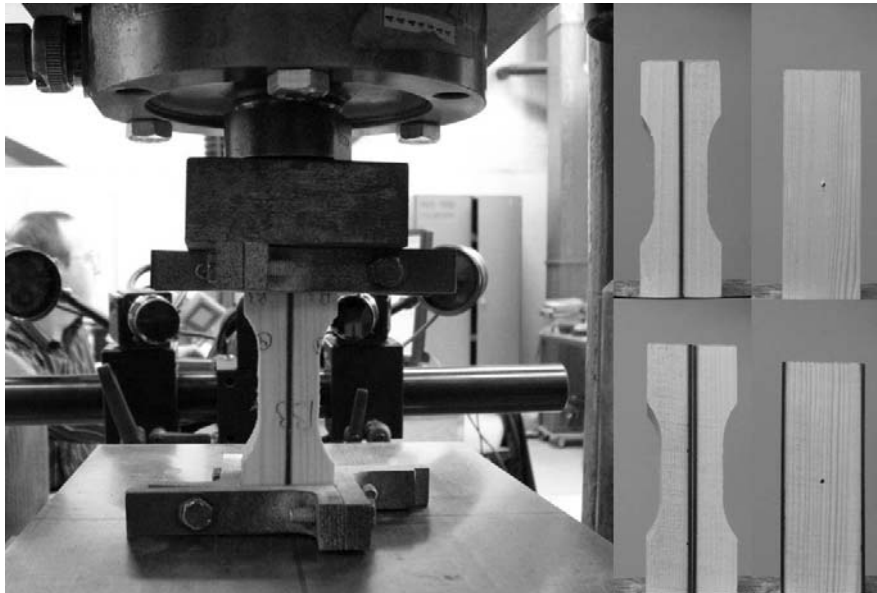


# CHALMERS



## Materialgenskaper för kolfiberförstärkt trä under tryckbelastning

- Försök och utvärdering

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet  
Byggingenjör*

JOHAN BERNDTSON & ALEXANDER FREDÉN

Institutionen för bygg- och miljöteknik  
Avdelningen för konstruktionsteknik  
Stål- och träbyggnad  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg 2010-06-09  
Examensarbete 2010:72

**Comment [mp1]:** The rear of the cover page is left blank

EXAMENSARBETE 2010:72

# Materialgenskaper för kolfiberförstärkt trä under tryckbelastning

- Försök och utvärdering

Examensarbete inom högskoleingenjörprogrammet

Byggingenjör

JOHAN BERNDTSON & ALEXANDER FREDÈN

Institutionen för bygg- och miljöteknik  
*Avdelningen för konstruktionsteknik*  
*Stål- och träbyggnad*

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2010-06-09

Materialens egenskaper för kolfiberförstärkt trä under tryckbelastning  
Försök och utvärdering  
*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet*  
*Byggingenjör*

JOHAN BERNDTSON & ALEXANDER FREDÉN

© JOHAN BERNDTSON & ALEXANDER FREDÉN 2010-06-09

Examensarbete / Institutionen för bygg- och miljöteknik,  
Chalmers tekniska högskola 2010:72

Institutionen för bygg och miljöteknik  
Avdelningen för konstruktionsteknik  
Stål- och träbyggnad  
Chalmers tekniska högskola  
412 96 Göteborg  
Telefon: 031-772 10 00

Omslag:  
Försöksuppställning med tillhörande provkroppar.

Chalmers reproservice  
Göteborg 2010-06-09





Materialegenskaper för kolfiberförstärkt trä under tryckbelastning  
Försök och utvärdering  
*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet*  
*Byggingenjör*

JOHAN BERNDTSON & ALEXANDER FREDÉN  
Institutionen för bygg- och miljöteknik  
Avdelningen för konstruktionsteknik  
Stål- och träbyggnad  
Chalmers tekniska högskola

## SAMMANFATTNING

Denna studie har som syfte att ta fram materialegenskaper för kolfiberförstärkt trä under tryckbelastning. Dessa behövs för att möjliggöra en datormodell av en kolfiberförstärkt limträbalk. De resultat och data som förväntades var: deformationskurvor för kolfiberförstärkt respektive oförstärkt trä, vinkeln av det så kallade stukningsbandet i kolfiberförstärkt respektive oförstärkt trä, densitet för trä, fuktkvot för trä samt mikroskopiska bilder av brottregionen på fibernivå. Resultaten ska uppnås genom provtryckning följt av en utvärdering. Enbart tryckförsök genomfördes, enbart trädslaget gran (*Picea abies*) och enbart en sorts förstärkningsmaterial användes. Tre grupper av provkroppar med olika förstärkningsmetoder användes, vilkas resultat jämfördes mot resultatet från två grupper oförstärkta provkroppar. Slutsatsen att stukningsbandens vinkel var mindre i förstärkt trä än i oförstärkt drogs. Dessutom påvisades att kolfiberförstärkt trä klarar av högre spänningar än oförstärkt trä. På grund av hög spridning på vissa delar av resultatet kan det vara svårt att grunda den tänkta datormodellen på studiens samtliga resultat. I slutändan ger dock resultaten en god inblick i hur materialen fungerar ihop.

Nyckelord: Materialegenskaper, kolfiberförstärkt trä, tryckbelastning, laminat, kolfiber, trä, Aramis, stukningsband, densitet, deformationskurva, fuktkvot.

Material properties of carbon fibre reinforced wood under compressive load

- Tests and evaluation

Diploma Thesis in the Engineering Programme

Building and Civil Engineering

JOHAN BERNDTSON & ALEXANDER FREDÉN

Department of Civil and Environmental Engineering

Division of Structural Engineering

Steel and Timber Structures

Chalmers University of Technology

## ABSTRACT

This study aims to produce material properties of carbon fibre reinforced wood under compressive load. These are needed to enable a computer model of a carbon fibre reinforced glulam beam. The results and data that were expected were: load deformation curves for carbon fiber reinforced and non reinforced wood, the angle of the so called kink band in carbon fibre reinforced and non reinforced wood, density of wood, moisture content of wood and microscopic images of the region of the failure on fibre level. The results will be achieved through compression testing followed by an evaluation. Only compression tests were carried out, only the species spruce (*Picea abies*) and only one kind of reinforcement material were used. Three groups of specimens with different reinforcement methods were used, whose results were compared with results from two groups of non-reinforced specimens. One conclusion was that the kink band angle was smaller in the reinforced wood than it was in the non-reinforced. Furthermore, it was shown that carbon fibre reinforced wood can withstand more tension than non-reinforced wood. Due to scatter in some parts of the results, it may be difficult to establish the proposed computer model based on the results of this study. In the end, however, the results provide a good insight into how these materials work together.

Key words: Material properties, carbon fibre reinforced wood, compressive load, laminates, carbon fibre, wood, Aramis, kink band, density, load deflection curve, moisture content.



# Innehållsförteckning

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	II
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	III
FÖRORD	V
BETECKNINGAR	VI
1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Metod	1
1.4 Avgränsningar	2
2 TRÄ OCH FÖRSTÄRKNINGSMATERIAL	3
2.1 Grundläggande hållfasthetslära	3
2.2 Trä	3
2.2.1 Materialegenskaper för trä	4
2.2.2 Träprodukter	6
2.3 Förstärkningsmaterial	7
2.3.1 Vidhäftning av kompositförstärkningar	7
2.3.2 Stål	8
2.3.3 Kolfiber	8
2.3.4 Glasfiber	8
2.3.5 Aramidfiber	8
2.3.6 Linfiber	9
2.3.7 Jämförelse av förstärkningsmaterial	9
2.4 Förstärkning av trä	9
3 PROVNINGAR MED KOLFIBERFÖRSTÄRKT TRÄ	10
3.1 Balkprovning	10
3.2 Materialprov	10
3.2.1 Indelning av provkroppar	11
3.2.2 Urval av provkroppar	13
3.2.3 Utformning av provkroppar	14
3.2.4 Mätning	15
3.2.5 Mikroskopsstudie	16
3.2.6 Fuktinnehåll	16
3.3 Resultat	18
3.3.1 Fuktkvot	18
3.3.2 Maximala spänningar och stukningsbandens vinkel	19
3.3.3 Densitet	21
<b>CHALMERS, Bygg- och miljöteknik, Examensarbete 2010:72</b>	<b>III</b>

3.3.4	Deformationskurvor	22
3.3.5	Spridning	25
3.3.6	Resultat från Aramis	28
3.3.7	Mikroskopsstudie	31
4	DISKUSSION	32
5	SLUTSATSER	33
6	REFERENSER	34
7	FIGURFÖRTECKNING	35
8	BILAGA A: MÅTT PÅ PROVKROPPAR	1
9	BILAGA B: DEFORMATIONSURVOR OCH BILDDOKUMENTATION	6
10	BILAGA C: EPOXILIM	17
11	BILAGA D: KOLFIBERLAMINAT	19

## Förord

Tillsammans med Bygg och Miljötekniks konstruktionsavdelning på Chalmers har vi genomfört ett examensarbete om kolfiberförstärkt trä under tryckbelastning. Vi har tillsammans med denna avdelning utgjort en liten del i ett större projekt som handlar om kolfiberförstärkning i limträbalkar.

Under våra avslutande månader på högskolenivå har vi fått en tydlig och intressant inblick i hur arbetet i forskarvärlden bedrivs.

Vi har fått mycket välbehövlig hjälp och ett stort stöd under hela examensarbetet, för detta är vi mycket tacksamma.

Vi vill tacka Steve Svensson, Nils Nilsson, Lars Wahlström och Peter Appelqvist samt Cyril Meunier.

Ett särskilt stort tack riktar vi till universitetslektor Rasmus Rempling och doktorand Alann André.

Göteborg, juni 2010

Student Johan Berndtsson och Alexander Fredén, Chalmers tekniska högskola

Kontakt tel: +47730984997, +46734433192 E-mail: [johabern@student.chalmers.se](mailto:johabern@student.chalmers.se),  
[alefre@student.chalmers.se](mailto:alefre@student.chalmers.se)

## Beteckningar

$m_{\text{efter}}$  Beteckning på massan efter torkning

$m_{\text{före}}$  Beteckning på massan före torkning

**Comment [mp2]:** Det kan var användigt att lämna denna sida blank för att huvudtexten ska börja på en högersida. I annat fall kan denna avsnitsbrytning tas bort.



# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

I större konstruktioner, som t.ex. broar och stora hallar, räcker oftast inte vanligt konstruktionsvirke till. Det som försvårar användandet av massivt trä vid längre spännvidder är bland annat de naturliga variationerna som finns i trä. Dessutom styr storleken på det enskilda trädet hur stora balkar som kan tillverkas. Då kan limträ vara lösningen. Eftersom ett limträelement är uppbyggt av ett antal lameller minskar sannolikheten att försvagningar på grund av variationer uppstår på samma ställe i elementet.

För att öka en träbalks hållfasthetsvärden kan en förstärkning av den utföras. Förstärkningsmaterialet har högre värden på de mekaniska egenskaperna jämfört med trä, vilket leder till högre sammanlagda hållfasthetsvärden för den förstärkta balken.

I mars 2010 genomförde Alann André försök med kolfiberförstärkta limträbalkar på institutionen för Stål- och träbyggnad på Chalmers Tekniska Högskola. Målet var bland annat att skapa en datormodell av balkarna med hjälp av finita elementmetoden. Detta är en numerisk metod som används för att hitta approximativa lösningar till partiella differentialekvationer och integralekvationer. Metoden är flitigt använd inom byggnadstekniken för att analysera hållfastheten för konstruktionselement.

För att kunna ändra parametrar i en finit elementmetod behövs materialdata för de ingående materialen. Då området är relativt nytt och utforskat saknades existerande materialdata för kolfiberförstärkt trä.

## 1.2 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att ta fram materialegenskaper för kolfiberförstärkt trä under tryck för vidare arbete med finit elementmodell. Följande resultat och data förväntas av studien:

- Deformationskurva för kolfiberförstärkt respektive oförstärkt trä
- Vinkeln av det så kallade stukningsbandet i kolfiberförstärkt respektive oförstärkt trä
- Densitet av trä
- Fuktkvot av trä
- Mikroskopiska bilder av brottregionen på fibernivå

## 1.3 Metod

En litteraturstudie ska genomföras för att få fram generell information angående egenskaper och användningsområden för trä och kolfiber.

Resultaten ska uppnås genom provtryckning av en serie provkroppar som sågats ut ur sex stycken limträbalkar med olika förstärkningar, följt av en utvärdering. Detta ska alltså vara en kvantitativ studie.

De flesta provkroppar ska förstärkas med kolfiber på olika sätt, men några ska lämnas oförstärkta som referensobjekt. Erfarenheter från liknande projekt har legat till grund för hur provtryckningarna genomförs.

Vid provtryckningarna ska mätresultaten erhållas från mätsystemet Aramis. Dessa mätresultat ligger till grund för slutsatserna.

## 1.4 Avgränsningar

Försöken är begränsade till att omfatta 25 provbitar och tre förstärkningsmetoder. Dessutom genomförs bara tryckförsök. Enbart träslaget gran (*Picea abies*) och enbart en sorts förstärkningsmaterial används.

Resultaten är begränsade till att omfatta:

- Provbitarnas fuktkvot
- Maximala spänningar för provkropparna
- Stukningsbandens vinklar
- Bild på provkropparnas densitet
- Deformationskurvor för respektive provkropp
- Bilder från Aramis (ögonblicksbilder av spänningsutbredningarna i utvalda provkroppar)

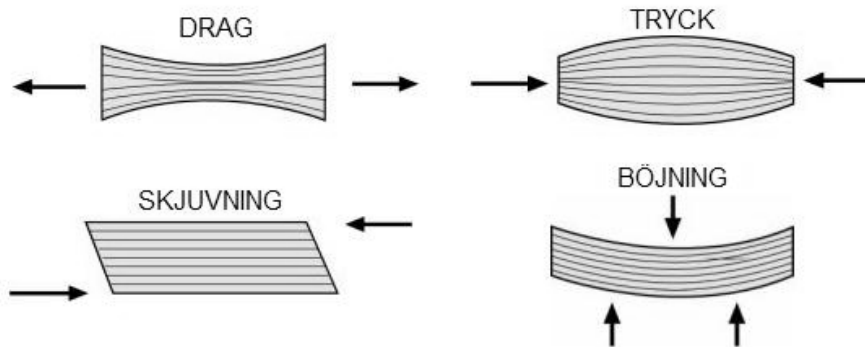
Litteraturstudien avgränsas till enbart trä och förstärkningsmaterial.



## 2 Trä och förstärkningsmaterial

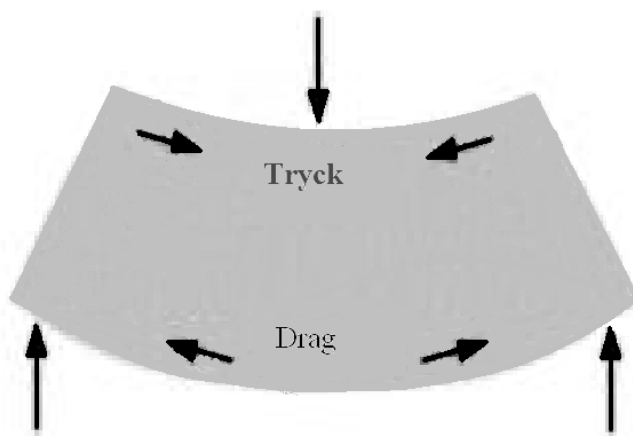
### 2.1 Grundläggande hållfasthetslära

Den grundläggande hållfasthetsläran behandlar de mekaniska egenskaperna för material och strukturer samt sambandet mellan krafter och deformation. Enligt Viebke (2003) finns det fyra grundläggande fall av belastningar som en kropp kan utsättas för. Dessa är drag, tryck, skjuvning och böjning, se Figur 1.



Figur 1 - De fyra grundbelastningsfallen inom hållfasthetsläran (Viebke 2003).

Då en balk böjbelastas påverkas den av både tryck- och dragkrafter. Som Figur 2 visar belastar tryckkrafterna den övre delen, medan dragkrafterna belastar den undre. Även skjuvkrafter uppkommer i balken.



Figur 2 - Tryck- och dragkrafter i en böjbelastad balk (Viebke 2003).

### 2.2 Trä

Sverige är ett av de skogsrikaste länderna i världen där skogsbruket har en lång industriell historia. De vanligaste träsorterna i Sverige är gran, tall, björk och asp och de senaste hundra åren har dessa skogstillgångar fördubblats. Granen är det träslag som lämpar sig bäst som konstruktionsvirke och är även det trä som allt mer

dominerar den svenska skogen. Skogsägare prioriterar granplantage före andra trädslag då efterfrågan på gran är mycket större.

Virkeskvaliteten kan variera beroende på vart i Sverige virket kommer ifrån. I södra Sverige är tillväxten större än i norra vilket leder till snabbare växande träd och bredare årsringar. Trädets geografiska läge påverkar dess egenskaper likväl som skötsel av röjning och gallring.

Intresset för trä har ökat de senaste åren tack vare bättre brandskydd och dess miljövänlighet. Träbyggnaders lätta stomme är en fördel då man bygger på mindre stabila grunder där exempelvis betong är för tungt. Som övriga användningsområden förutom konstruktionsmaterial inom byggindustrin kan möbler, båtar, papper, färg, träkol, och musikinstrument nämnas. (Sternier 2004)

## 2.2.1 Materialegenskaper för trä

Trä är ett naturligt och organiskt material. Variationer i de mekaniska egenskaperna är därmed att förvänta. Dels mellan olika trädslag, men även mellan individer av samma art och till och med inom samma individ. Bland annat är kärnveden starkare och hållfastheten skiljer sig normalt sett även åt i höjdlid inom ett och samma träd.

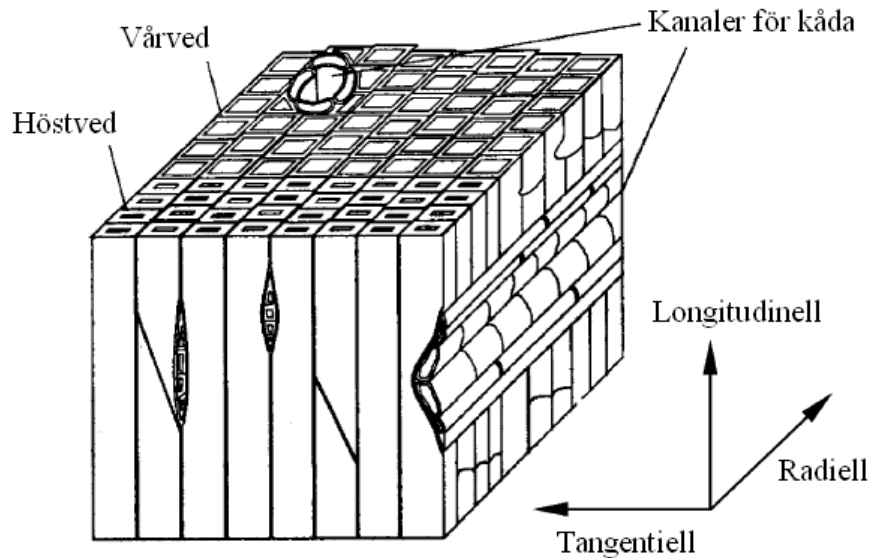
Även fukttinnehållet i virket är av betydelse. Styvheten och hållfastheten minskar då fukttinnehållet ökar. Ett av de vanligaste sätten att mäta fukttinnehåll i trä är att mäta fuktkvoten. Fuktkvoten är definierad som vattnets massa i en bit trä dividerat med den torra träbitens massa. Fuktkvoten i konstruktionsvirke ska ligga på mellan 12 och 22 %. Detta för att anpassa virkets fukttinnehåll till omgivande klimat vid användning (Skogsindustrierna 2010).

Dessutom har årsringarna varierande egenskaper. Tätare årsringar betyder högre densitet, vilket i sin tur leder till högre hållfasthetsvärden. Det trä som bildas tidigt på året kallas vårved och dess fiber har svagare väggar än de i det trä som bildas senare, höstveden. Kvistar och lokala imperfektioner, såsom hartskanaler där kådan bildas, leder också till varierande egenskaper inom en individ. (Byskov et al. 2002)

Slutligen är det också viktigt att beakta att trä är ett anisotropt material. Detta betyder att dess egenskaper skiljer sig i olika riktningar. I trä finns tre viktiga riktningar att känna till:

- Radiell riktning: Från stammens mitt ut mot barken.
- Tangentiell riktning: Längs med årsringarna.
- Longitudinell riktning: Längs med fibrerna, dvs. i höjdlid i trädet.

Strukturen i trä kan ses i Figur 3.

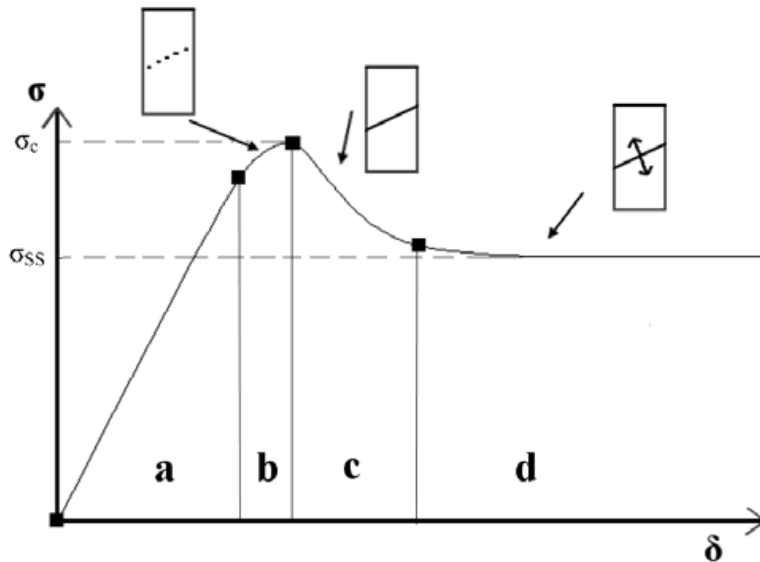


Figur 3 - Träets uppbyggnad (Poulsen 1998).

Av dessa tre är det den longitudinella riktningen som ger de högsta hållfasthetsvärdena. Draghållfastheten i fiberriktningen är högre än tryckhållfastheten. Dragbrott i trä är spröda, medan tryckbrott är sega. Ett segt brott föregås alltid av deformation av materialet, vilket är att föredra. Ett sprött brott sker till synes "utan förvarning".

Händelseförloppet för hur trä deformeras då det utsätts för rent tryck beskrivs nedan och i Figur 4 (André 2009).

- Då virket belastas till en början sker elastisk deformation, vilket betyder att om det belastade virket avlastas kommer det att återgå till sin ursprungliga form.
- Vid tillräckligt höga spänningar börjar fibrerna att plasticeras och stukas. Detta sker längs ett band längs med årsringarna i träkroppen. Vinkeln för stukningsbandet ligger i genomsnitt på  $23^\circ$  för gran (*Picea abies*) (Poulsen 1998).
- Då stukningsbandet har spridit sig tillräckligt för att sträcka sig över hela träkroppens bredd minskar hållfastheten och maxspänningen är därmed nådd. Spänningen minskar nu samtidigt som fibrerna i stukningsbandet roterar.
- Fibrerna kan inte rotera oändligt, utan når snart en fas då de slutar rotera. Spänningarna stabiliseras då, samtidigt som stukningsbandet breddas till att innefatta en större region.



Figur 4 - Teoretisk deformationskurva för trä under tryckbelastning. a) elastisk deformation, b) plasticering och stukning, c) maxspänning nådd och ett helt utbrett stukningsband och d) stabiliserad stukningsfas (André 2009).

### 2.2.2 Träprodukter

I större konstruktioner, som t.ex. broar och stora hallar, räcker oftast inte vanligt konstruktionsvirke till. Det som försvårar användandet av massivt trä vid längre spännvidder är bland annat de naturliga variationerna som finns i trä. Dessutom styr storleken på det enskilda trädet hur stora balkar som kan tillverkas. Då kan limträ vara lösningen. Eftersom ett limträelement är uppbyggt av ett antal lameller (minst fyra) minskar sannolikheten att försvagningar på grund av variationer uppstår på samma ställe i elementet. Detta kallas ibland för lamelleringseffekten.

Limträkonstruktioners spännvidder kan variera beroende på laster och dimensioner, men det är sällan som limträ används när spännvidden är över 30 meter. Dock finns det möjligheter att kröka limträ och konstruera stora bågar som kan uppnå extremt stora spännvidder. Den största spännvidden som uppmätts i Sverige ligger på 89 meter. Utomlands ligger rekordet på över 100 meter. (Svenskt Limträ AB 2007)

Men även om balkarna kröks blir det väldigt materialkrävande att använda limträ vid så stora spännvidder. Fackverksbalkar kan då vara lämpliga att använda. Att använda sig av fler stöd är också en åtgärd som leder till mindre materialåtgång. (Svenskt Limträ AB 2007)

En annan produkt som börjat användas mer och mer på senare år är lättbalken. Balkens utseende är precis lik en I-balk. Balkens fläns består av LVL, vilket står för Laminated Veneer Lumber, eller konstruktionsvirke. Livet kan bestå av antingen plywoodskivor eller andra skivmaterial. Därmed är de olika balkdelarna optimerade för de krafter de utsätts för. Flänsarna är lämpade för att ta upp drag- och tryckkrafter, medan livet är lämpat för att klara av skjuvspänningar. En annan fördel är att lättbalken även kan göras mycket högre än massiva träbalkar (Skogsindustrierna 2010). Figur 5 visar principerna för fackverksbalkar och lättbalkar.



Figur 5 - Bild på fackverksbalk till vänster och en lättbalk till höger (Skogsindustrierna 2010).

## 2.3 Förstärkningsmaterial

Vid förstärkningar av träkonstruktioner används oftast stål eller någon typ av fiberlaminat. Ett fiberlaminat är en enkel komposit som är uppbyggt av två material, fibrer och en matris. De vanligaste fibrerna i fiberlaminat är:

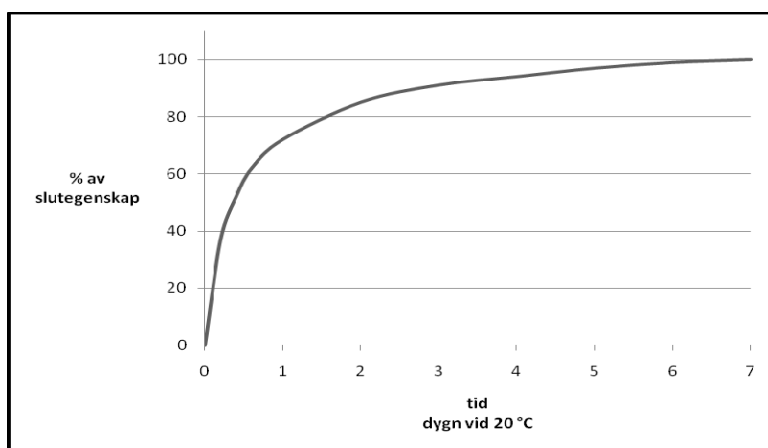
- Kolfiber
- Glasfiber
- Aramidfiber
- Linfiber

Matrisen är vanligen en härdplast. En härdplast karakteriseras av att den inte kan omformas när den väl härdad. Den fungerar som ett bindemedel vars uppgift är att binda samman fibrerna till en struktur. Utan matrisen kan fibrerna enbart ta upp dragkrafter. Tillsammans bildar de en komposit som kan ta upp laster i alla riktningar. De tre vanligaste härdplasterna är:

- Epoxi
- Polyester
- Vinylester

### 2.3.1 Vidhäftning av kompositförstärkningar

Epoxi kan även användas till att fästa laminatet på träkonstruktionen. Epoxi har låg krympningsgrad vilket leder till att det inte uppstår några stora variationer i komponenten efter det att limmet härdad. Härdningstiden för epoxilim varierar, men det går inte att påskynda härdningen som det går med vissa esterplaster. Beroende på vad epoxi ska användas till härdar det under olika temperaturer, och därmed i varierande hastighet. Härdningstiden i den här undersökningen ligger på ca 7 dagar. 75 % av slutegenskaperna har däremot uppnåtts redan inom ett dygn, se Figur 6. (Viebke 2003)



Figur 6 - Schematiskt härdningsdiagram för epoxilim (Viebke 2003).

### 2.3.2 Stål

Stål är klart bäst bland de förstärkningsmaterial som nämns i Kapitel 2.3 när det gäller att ta stora dragkrafter, men har däremot en mycket högre egentyngd och densitet än de övriga. Att använda stål som förstärkning i en träbalk skulle göra hela balken betydligt tyngre än med till exempel kolfiber som förstärkning. Detta går emot en av de stora fördelarna med trä, vilket är dess låga egentyngd. Priset är dock fördelaktigt då det är relativt lågt i jämförelse med kompositmaterial. Materialet har emellertid en benägenhet att börja rosta om man inte använder sig av den dyrare rostfria varianten.

### 2.3.3 Kolfiber

Kolfiber används främst inom båt- och flygindustrin där dess lätta vikt, höga hållfasthet och höga styvhet är gynnsamma i de påfrestningar som de utsätts för. Kolfiber är det styvaste materialet som finns i förhållande till sin vikt bland samtliga förstärkningsmaterial som nämns i Kapitel 2.3. Ett brott i kolfiberlaminat är alltid sprött. (Viebke 2003)

### 2.3.4 Glasfiber

Glasfiber har en större tøjbarhet än vad kolfiber har och lämpar sig mer som armeringsmaterial i konstruktioner där krav på högre tøjbarhet efterfrågas. Plaster är ett av de material där glasfiber passar mest för användning. I tillverkningsprocessen smälts glas ner i formar och dras sedan ut till långa fibrer som sedan vävs ihop. (Viebke 2003)

### 2.3.5 Aramidfiber

Aramidfiber (kevlar) används mestadels i kompositer som ska ge skydd mot slag, hugg eller skott. Till exempel kevlarvästar som används av både polis och militär. Om det kombineras med kolfiber eller glasfiber gör det materialet starkare då laminatet inte spricker trots att de andra fibrerna spricker. Den är mer känslig för dragkrafter än både kol- och glasfiber. (Viebke 2003)

### 2.3.6 Linfiber

Det finns även helt organiska fibertyper, bl.a. bomull, lin och hampa. Av dessa är linfiber de som har högst hållfasthet. Linfiber utvinns ur linväxten. Det har gjorts försök med linfiber som förstärkningsmaterial till träbalkar. Dessa har enligt Larsson (2007) dock ännu inte gett fullgoda resultat.

### 2.3.7 Jämförelse av förstärkningsmaterial

Vid en närmare titt på materialens lämplighet som förstärkning i träkonstruktioner är kolfiber det mest intressanta materialet. Visserligen har stål en högre E-modul och är därmed styvare än kolfiber, men dess egentyngd blir till en nackdel då hela konstruktionen blir betydligt tyngre. Fördelen med trästommens lätta vikt försvinner.

De övriga förstärkningsmaterialen når inte upp till samma nivåer gällande mekaniska egenskaper. Glasfiber kan endast komma upp i samma nivåer som billigare kolfiber av lägre kvalitet. Dock är kolfibrer ett betydligt dyrare material än glasfibrer. Aramid- och linfibers dåliga egenskaper vid dragkrafter gör dem mindre lämpliga än både glas- och kolfiber.

## 2.4 Förstärkning av trä

Ett brott i en böjbelastad träbalk kan bero på alla grundbelastningsfallen som beskrivs i Kapitel 2.1. Det skiljer sig från fall till fall beroende på främst tvärsnittets utformning, virkets kvalitet och fukttinnehåll.

För att öka en träbalks hållfasthetsvärden kan en förstärkning av den utföras. Förstärkningsmaterialet (i den här studiens fall är det kolfiber) har högre värden på de mekaniska egenskaperna jämfört med trä, vilket leder till högre sammanlagda hållfasthetsvärden för den förstärkta balken. Enligt Svecova och Eden (2004) behövs endast små mängder av fiberarmering för att producera betydande vinster i styrka.

Att balkens lastkapacitet ökar på detta sätt har givetvis sina fördelar. Dels skulle virke med sämre kvalitet kunna användas till samma uppgift som högkvalitativt virke används till idag. Virke som annars skulle gått till ett annat användningsområde än som konstruktionsmaterial och förmodligen är billigare vid inköp. Dagens pris på fiberlaminat är förmodligen för högt för att minska den totala kostnaden. Detta kan kanske komma att ändras i framtiden dock.

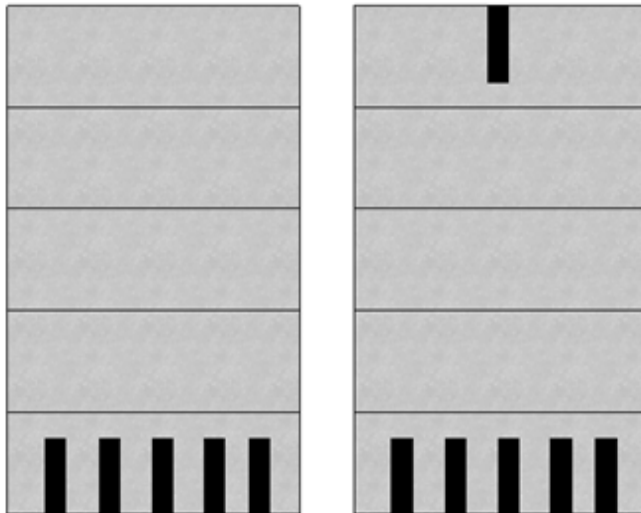
Förstärkning med fiberlaminat medför även att variationerna (se Kapitel 2.2.1 för beskrivning av dessa) av de mekaniska egenskaperna minskar. Denna effekt kan liknas vid lamellerings effekten i limträ. Dessutom ökar virkets förmåga att utsättas för plastisk deformation (Larsson 2007).

För övrigt kan en mindre mängd virke användas till samma hållfasthetsegenskaper och därmed hålla nere både egenvikten och höjden på balken om denna är förstärkt. Dessutom påpekar Svecova och Eden (2004) att förstärkning av redan existerande konstruktioner kan vara en lösning som är fördelaktigare än att byta ut dem.

## 3 Provningar med kolfiberförstärkt trä

### 3.1 Balkprovning

Den här studien föregicks av en rad försök av Alann André på avdelningen för konstruktionsteknik på Chalmers Tekniska Högskola, i vilka limträbalkar bøjprovades. Försöken omfattade sex stycken limträbalkar förstärkta med kolfiberlaminat. Dessa balkars benämningar gav upphov till namngivningen av provkropparna som beskrivs i Kapitel 3.2. De benämndes balk 1-3 och förspänd balk 1-3.



Figur 7 - Förstärkningsmetoderna för balk 1 (vänster) och balk 2 (höger) i tvärsnitt. De svarta rektanglarna representerar kolfiberlaminat.

Figur 7 visar hur balkarna 1 och 2 förstärktes med kolfiberlaminat. Limträet i försöken bestod av gran (*Picea abies*), vilket de flesta limträbalkar gör.

Målet med studien var bland annat att skapa en datormodell av balkarna med hjälp av finita elementmetoden. Detta är en numerisk metod som används för att hitta approximativa lösningar till partiella differentialekvationer och integralekvationer. Metoden är flitigt använd inom byggnadstekniken för att analysera hållfastheten för konstruktionselement.

För att kunna ändra parametrar i en finit elementmodell behövs materialdata för de medverkande materialen. Då området är relativt nytt och utforskat saknades existerande materialdata för kolfiberförstärkt trä.

### 3.2 Materialprov

Den här studien syftar till att undersöka materialegenskaper för kolfiberförstärkt trä under tryckbelastning. Dessa materialegenskaper behövs för att möjliggöra den finita elementmodellen som nämns i Kapitel 3.1. Detta skulle ske genom provtryckningar av kolfiberförstärkta träkroppar. Följande resultat och data skulle tas fram i studien:



- Deformationskurva för kolfiberförstärkt respektive oförstärkt trä
- Vinkeln av det så kallade stukningsbandet i kolfiberförstärkt respektive oförstärkt trä
- Densitet av trä
- Fuktkvot av trä

Dessutom skulle en studie mikroskopisk studie av brottregionen genomföras för att se vad som händer på fibernivå.

### 3.2.1 Indelning av provkroppar

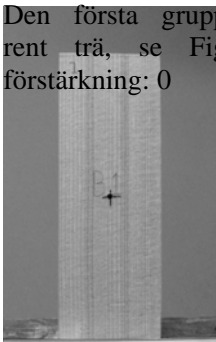
Benämningen på varje enskild provkropp, se Tabell 1, är en kod som avslöjar provbitens ursprung och förstärkningssätt. De två första tecknen i koden talar om vilken balk provkroppen är hämtad från, dvs. B1, B3 eller F3, se Kapitel 3.1. Det tredje tecknet är en siffra som beskriver på vilket sätt provkroppen är förstärkt. Därefter är ett bindestreck som följs av en siffra för att skilja de individuella provkropparna i varje grupp åt.

*Tabell 1 - Benämning med nummer på varje enskild provkropp. Se figur 8-12 för vidare förklaring av förstärkningsmetoderna. Asterisk betyder att provkroppen inte provtrycktes för att bevaras i ursprungligt skick som referensobjekt.*

Förstärkning 1	Förstärkning 2	Förstärkning 3	Förstärkning 4	Förstärkning 0
F31-1	F32-1	B33-1	B14-1	B10-1
F31-2	F32-2	B33-2	B14-2	B10-2
F31-3	F32-3	B33-3	B14-3	B10-3
F31-4*	F32-4	B33-4	B14-4	B10-4
F31-5	F32-5*	B33-5*	B14-5*	B10-5*

Totalt 25 provkroppar har använts. De är indelade i fem grupper om fem provbitar vardera. För en provkropp i varje grupp genomfördes inte försöket, för att bevaras i ursprungligt skick som referensobjekt. Varje grupp har en bestämd förstärkningsmetod enligt följande:

- Den första gruppen är rent trä, se Figur 8. förstärkning: 0



Figur 8 - B10

helt oförstärkt, dvs.  
Benämningsskod för

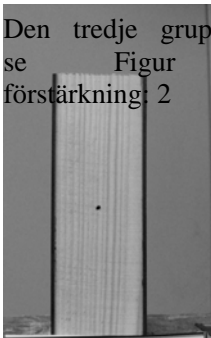
- Den andra gruppen är dubbla laminat, se Figur 9. förstärkning: 1



Figur 9 - F31

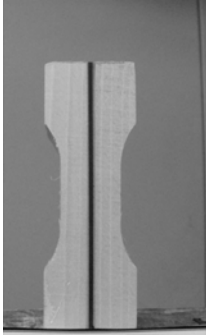
förstärkt i mitten med  
9. Benämningsskod för

- Den tredje gruppen är se Figur 10. förstärkning: 2



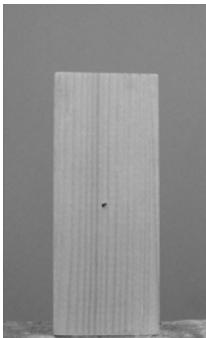
Figur 10 - F32

förstärkt på två sidor,  
Benämningsskod för



Figur 11 - B33

- Den fjärde gruppen är förstärkt i mitten med ett laminat, se Figur 11. Benämningsskod för förstärkning: 3

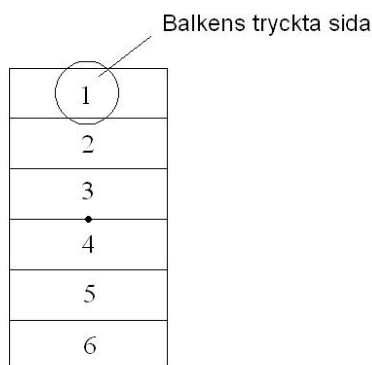


Figur 12 - B14

- Den femte gruppen är oförstärkt, men innehåller en limfog från den ursprungliga limträbalken, se Figur 12. Benämningsskod för förstärkning:4

### 3.2.2 Urval av provkroppar

Provkropparna som använts i försöken har erhållits från balkarna i Kapitel 3.1. Vid valet av provkroppar har defekter, såsom kvistar och sprickor, undvikits. Enbart delar av balkarna där de naturliga variationerna i virket är låg har använts. Positionen i balkens fiberriktning hade ingen påverkan på valet av provkroppar. Däremot valdes enbart bitar från den yttersta lamellen på trycksidan av balken, se Figur 13. Limfogar i balken har undvikits i alla provgrupper utom B14.



Figur 13 - Tvärsnitt av en limträbalk och dess lameller.

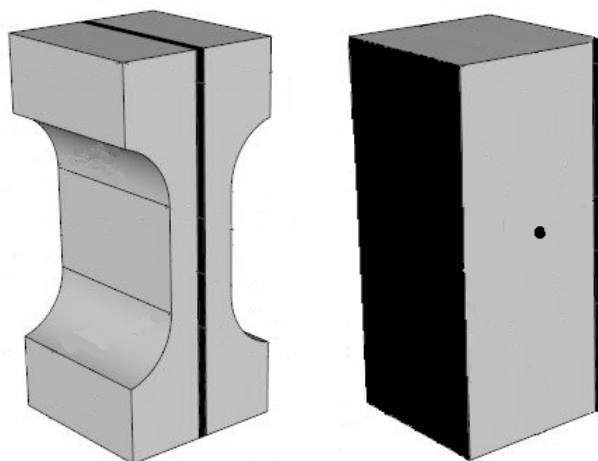
### 3.2.3 Utformning av provkroppar

Det ungefärliga måttet på samtliga provkroppar förutom de i grupp B14 var 35x35x99 mm<sup>3</sup>, där den kvadratiska ytan fungerar som tryckyta. De i grupp B14 var ungefär 40x40x100mm<sup>3</sup>. Tryckytorna är slipade planparallellt med motsatt yta för att undvika ojämna trycklastar på tryckytan vid provningen. De exakta måtten för varje enskild provkropp finns i Bilaga A.

Kolfiberlaminatens dimensioner var 1,4x35x98 mm<sup>3</sup>. Kolfiberlaminaten som användes i försöken var av typen Sika® CarboDur. Mer information om detta finns i Bilaga D.

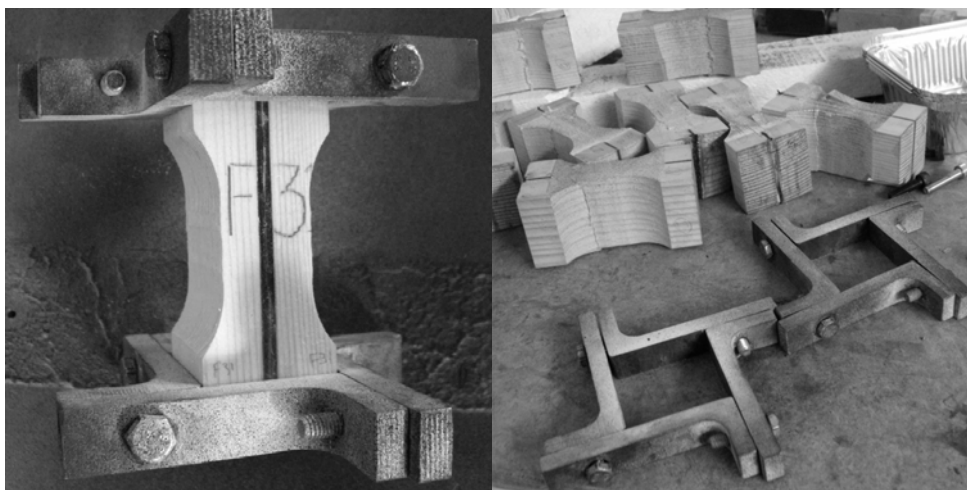
Kolfiberlaminaten limmades mot provkropparna med hjälp av epoxin Sikadur®-330, se Bilaga C. Samtliga limfogar var 0,5 mm tjocka förutom den mellan kolfiberlaminaten i grupp F31, som gjordes så tunn som var möjligt. Det fick sedan härda i sju dygn i rumstemperatur.

Vid provtryckningen utsätts provbitarna för tryck parallellt med fiberriktningen tills ett brott uppstår. Alpha-maskinen i forskarhallen på Chalmers Tekniska Högskola användes. Dess hastighet är sådan att brotten sker inom fem minuter. För att tvinga fram brottet i mitten av provbitarna borrades ett 2 mm stort hål i mittpunkten, vilket André (2009) menar har fungerat väl i tidigare projekt. För de provkroppar som var förstärkta i mitten behövdes en annan lösning. Dessa bitar gjordes smalare i mittenpartiet, se Figur 14. Avsmalningen och de borrarade hålen tas sedan med i beräkningen av den maximala spänningen.



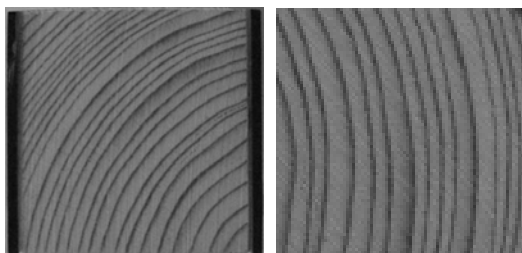
Figur 14 - Utformningen av de mittenförstärkta provkropparna (B33 och F31) till vänster och de sidoförstärkta provkropparna (F32) till höger.

Kolfiberlaminaten i grupp F32 (se Figur 14) förutsågs vara under risk att böjas ut från provkroppen under provtryckningen om de inte stadgades i ändarna. På grund av detta anordnades ett stöd av stål, se Figur 15. Stöden användes dock för samtliga provkroppar för att uppnå liknande förhållanden vid alla försök och de var 15 mm höga. Provkropparna i grupp B-14 var för stora för stöden och fick genomgå försöken utan dessa.



Figur 15 – Stöd monterade på provkropp till vänster och lösa till höger. Provkroppen till vänster hörde inte till den gruppen som antogs behöva stöd, men fick ändå dessa monterade för att uppnå liknande förhållanden vid provningen.

Årsringarnas utbredning i tryckytan har betydelse för stukningsbandet utformning. Kapitel 2.2.1 innehåller mer information om stukningsband. I den här studien är årsringarna långt ifrån parallella med någon av sidorna av provkropparna, vilket leder till att stukningsbanden riskerar att ske invärtes och kan bli svåra att studera. Om årsringarna däremot är parallella med sidorna syns stukningsbanden tydligt. Figur 16 ger en representativ bild av hur tryckytorna ser ut.

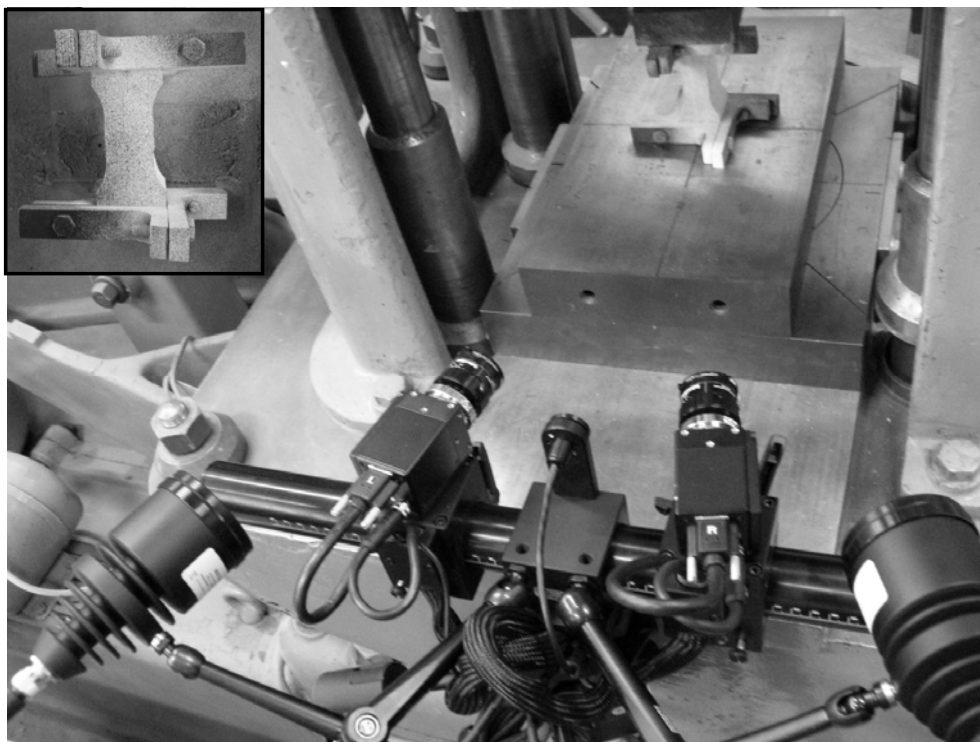


Figur 16 - Representativ bild av årsringarnas utbredning i tryckytan. I bilden till vänster visas att årsringarna inte är parallella med någon av sidorna av provkroppen (risk för svårstuderat stukningsband). Bilden till höger visar årsringar som är parallella med sidorna (mer lättstuderat stukningsband).

### 3.2.4 Mätning

I försöket används Aramis HS som är ett optiskt mätinstrument som används för att övervaka ytans deformationer. Den har en hög precision i mätningen. Ytan som ska mätas sprejmålas med vita och svarta prickar som är slumpmässigt placerade, se Figur 17. Förskjutningen och deformation av prickarna under den experimentella undersökningen övervakas genom att ta en serie synkroniserade bilder på olika belastningssteg med hjälp av två digitalkameror som är placerade framför provkroppen, se Figur 17. Bilderna bearbetas med en speciell programvara som automatiskt beräknar 3D-koordinater förskjutningar och deformationer i provkroppen.

För att mäta lasterna används en så kallad lastcell som är en typ av censor. En LVDT, som är en typ av elektrisk transformator, användes för att mäta deformationen.



Figur 17 - Aramis två kameror är placerade framför provkroppen för att fotografera det mekaniska händelseförloppet under provtryckningen. Infälld bild visar en provkropp som sprejats med färg för att Aramis kameror ska kunna registrera deformationsförloppet.

### 3.2.5 Mikroskopsstudie

En mikroskopsstudie av en provkropp efter provtryckningarna genomfördes av en tredje part på företaget Sicomp. Provkroppen som undersöktes var B33-3.

### 3.2.6 Fuktinnehåll

Då allt material lagrades i samma rum som provtryckningen skedde i, antogs fuktkvoten vara densamma i provbitarna som vid balkarnas böjprovning. Därmed behövdes ingen konditionering av de enskilda provkropparna utföras. Efter provtryckningen avlägsnades mindre bitar ur vissa av provkropparna, för att sedan vägas och torkas. När biten var torkad vägdes den igen. I och med det kunde fuktkvoten räknas ut enligt ekvation (1) från Dinwoodie (2000). Enbart åtta provkroppar fick sin fuktkvot uppmätt. Resten sparades i befintligt skick för att bevara brottområdena.

$$Fuktkvot = \frac{m_{före} - m_{efter}}{m_{före}} * 100 \quad (1)$$

Dock utfördes ett test för att säkerställa att fuktkvoten i provkropparna låg på en rimlig nivå innan provtryckningen ägde rum. Fem stycken träbitar av samma art som provkropparna som senare skulle provtryckas förvarades i samma rum och därmed i

samma relativa fuktighet som dessa provkroppar. De kunde därmed antas ge en representativ bild av fuktkvoten i provkropparna innan försöken genomfördes. Dessa träbitar vägdes först för att sedan förvaras i en ugn med temperaturen 105 °C. De togs ut efter 24 timmar för att vägas. Fuktkvoten beräknades även här med hjälp av ekvation (1).

### 3.3 Resultat

#### 3.3.1 Fuktkvot

Massan före och efter torkning, samt beräknad fuktkvot som uppmättes för fem träbitar innan försöken återfinns i Tabell 2.

Tabell 2 - Fem träbitars fuktkvot innan provtryckningarna. Träbitarna har förvarats i samma rum som provkropparna. Massa i gram.

Träbit	Massa före torkning	Massa efter torkning	Beräknad fuktkvot
1	14,008	13,072	6,7 %
2	13,923	12,987	6,7 %
3	18,819	17,579	6,6 %
4	13,197	12,332	6,6 %
5	6,469	6,048	6,5 %

Massan före och efter torkning, samt beräknad fuktkvot för åtta utvalda provkroppar återfinns i Tabell 3.

Tabell 3. Utvalda provkroppars fuktkvot efter provtryckningarna. Massa i gram.

Provkropp	Massa före torkning	Massa efter torkning	Beräknad fuktkvot
B10-1	1,800	1,678	6,8 %
B10-2	0,497	0,464	6,6 %
B33-1	1,076	1,007	6,4 %
B33-2	0,817	0,762	6,7 %
F31-1	0,473	0,442	6,6 %
F31-2	0,446	0,416	6,7 %
F32-1	1,174	1,097	6,6 %
F32-3	1,193	1,114	6,6 %

Vid det första mättillfället låg fuktkvoten på 6,5–6,7 % och vid det andra var motsvarande resultat på 6,4–6,8 %. Att variationerna mellan de båda tillfällena var så små tyder på att växlingen av luftfuktigheten i förvaringsrummet var mycket liten.



Detta tyder i sin tur på att fuktkvoten i provkropparna och de ursprungliga balkarna förmodligen stämmer överens.

De träbitar som användes för fuktberäkning var mycket små - de vägde inte mer än några gram. Helst ska större bitar användas för att få ett säkrare resultat.

### 3.3.2 Maximala spänningar och stukningsbandens vinkel

Maximala spänningar, vinkel av stukningsbanden och andel kolfiber i tvärsnitt vid brottpunkt har sammanställts i Tabell 4.

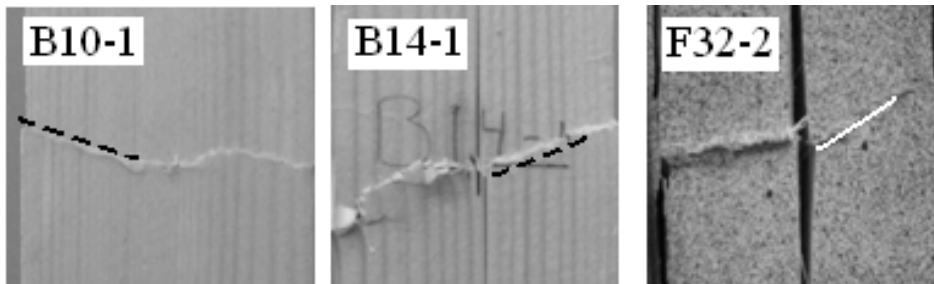
Tabell 4 - Sammanställning på provkropparnas stukningsvinkel, maxspänning och andel kolfiber i tvärsnitt vid brottpunkt.

Provkropp	Stukningsbandets vinkel (°)				Genomsnittlig vinkel (°)	Maxspänning (MPa)	Andel kolfiber i tvärsnitt vid brottpunkt (%)
	Sida 1		Sida 2				
	1	2	1	2			
B10-1	27	10	16	14	16,75	61,8	0
B10-2	-	-	29	20	24,50	64,5	0
B10-3	33	11	24	-	22,66	57,1	0
B10-4	22	34	19	17	23,00	56,6	0
B14-1	20	-	21	28	23,00	62,1	0
B14-2	23	30	20	11	21,00	61,8	0
B14-3	24	33	29	-	28,66	59,8	0
B14-4	20	-	18	22	20,00	63,8	0
B33-1	25	-	12	-	18,50	88,6	6,6
B33-2	-	-	15	-	15,00	96,1	6,6
B33-3	-	-	13	-	13,00	95,5	6,6
B33-4	15	-	-	-	15,00	85,3	6,8
F31-1	12	8	13	-	11,00	118,0	12,1
F31-2	9	-	20	-	14,50	118,9	12,2
F31-3	16	-	15	-	15,50	120,9	11,9
F31-5	-	-	-	-	-	120,8	12,1

F32-1	13	-	-	-	13,00	92,7	8,5
F32-2	12	22	-	11	15,00	110,9	8,5
F32-3	10	-	21	-	15,50	102,8	8,4
F32-5	30	-	9	-	19,50	102,4	8,5

Maximal spänning avser den högsta spänningen i det tvärsnitt där brottet skedde. De avsmalningar och borrarade hål som nämns i Kapitel 3.2.3 subtraheras alltså från arean av provkroppens tvärsnitt innan spänningarna beräknas.

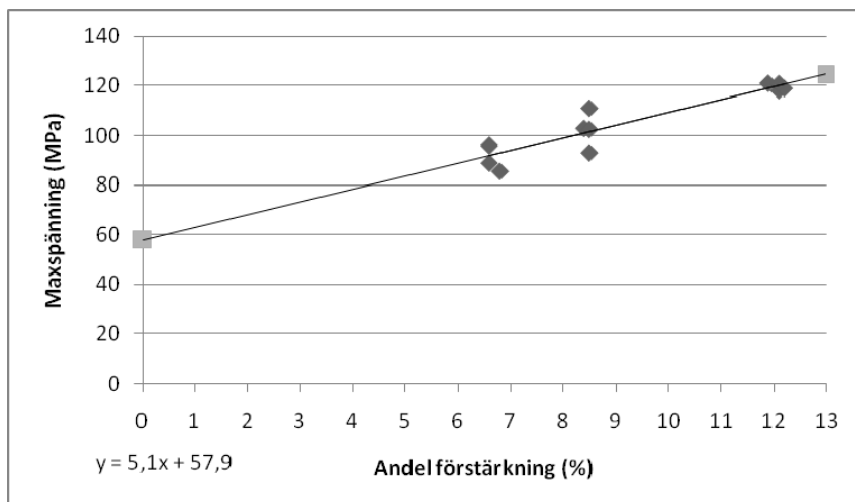
Stukningsbandens vinklar kan vara något osäkra eftersom årsringarnas beskaffenhet (se Kapitel 3.2.3) får stukningsbanden att ske huvudsakligen invärtes. Exempel på hur vinkeln av stukningsbanden mättes återfinns i Figur 18.



Figur 18 - Några exempel på stukningsbandets vinkel i provkropparna

De förstärkta provkropparna hade generellt sett en lägre vinkel av stukningsbanden än de oförstärkta.

De högsta spänningarna uppnåddes i provkropparna i grupp F31 och dessa hade också störst andel förstärkning. De lägsta maxspänningarna var som förväntat i de oförstärkta provkropparna, B10 och B14. Ett antagande att hållfastheten ökar linjärt med andel förstärkning ger med dessa testresultat ett oförstärkt värde på 57,9 MPa, se Figur 19. Detta värde stämmer bra överens med de oförstärkta provkropparna i den här studien.

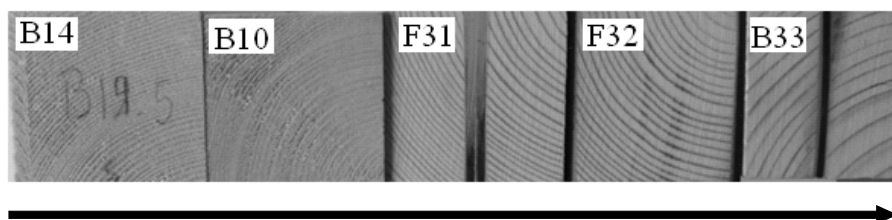


Figur 19 – Förhållande mellan andel förstärkning och maximal spänning. De mörkare prickarna är faktiska mätvärden.

### 3.3.3 Densitet

Någon exakt mätning av densiteten har inte genomförts utan endast en visuell studie av årsringarnas täthet.

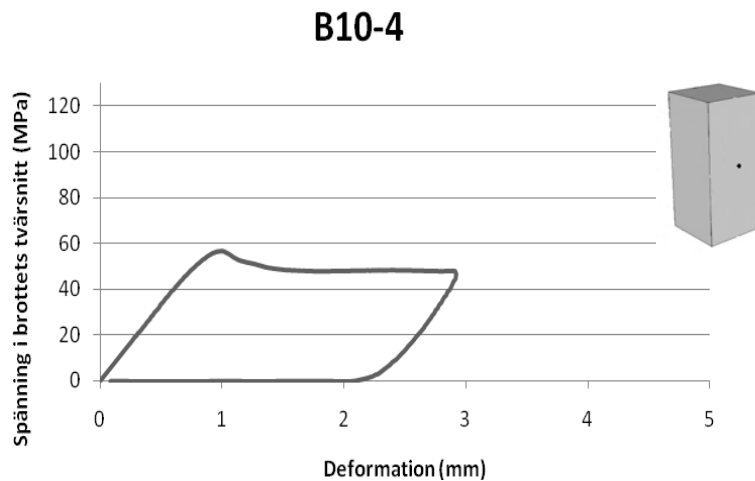
Provkropparnas densitet är i stort sett samma inom den egna provgruppen eftersom de är från samma träd, men däremot skiljer de sig något då man jämför provgrupperna med varandra, dock inte mycket, se Figur 20.



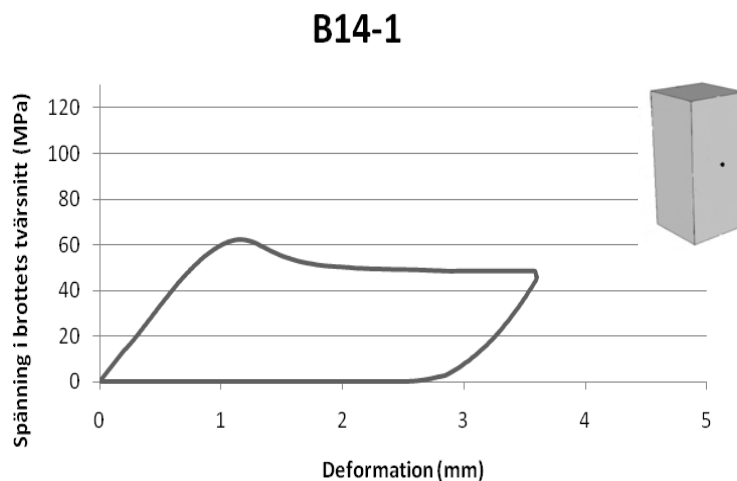
Figur 20 - En jämförelse av provkropparnas densitet, med den högsta densiteten till vänster och den lägsta densiteten till höger.

### 3.3.4 Deformationskurvor

Figur 21-25 innehåller ett exempel på en deformationskurva från varje grupp. Det kan vara viktigt att begrunda att de sega brotten förmodligen inträffar i trä, medan de spröda förmodligen inträffar i kolfiber (se Kapitel 2.2.1 och 2.3.3).

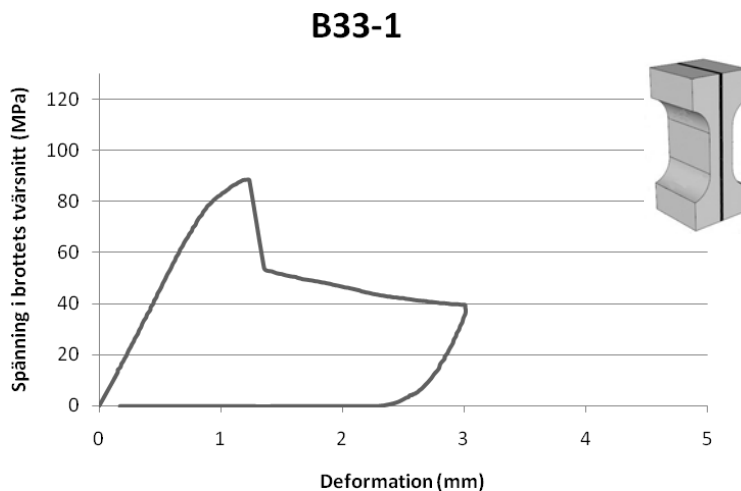


Figur 21 - Deformationskurva för B10-4. Oförstärkt. Stämmer väl överens med den teoretiska deformationskurvan för trä.



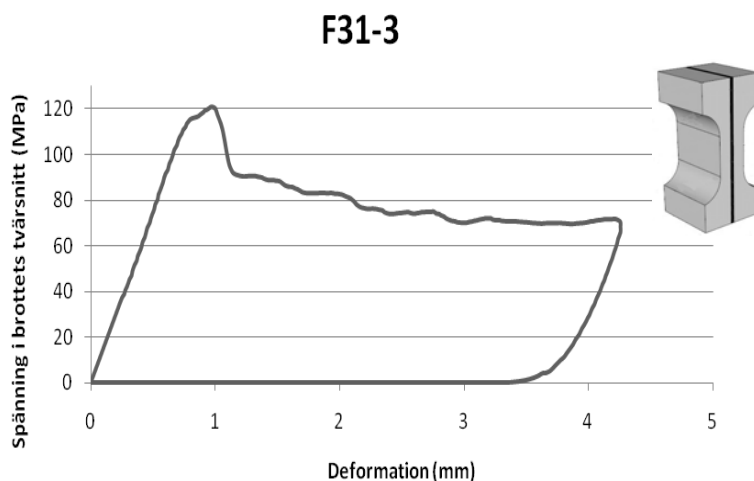
Figur 22 - Deformationskurva för B14-1. Oförstärkt. Stämmer väl överens med den teoretiska deformationskurvan för trä.

De oförstärkta provkropparnas kurvor, som syns i Figur 21 och 22, fick samtliga ett väldigt mjukt utseende med sega brott, väldigt nära den teoretiska kurvan för trä, se Kapitel 2.2.1. Limfogen verkar alltså inte ha någon större inverkan på hållfastheten.



Figur 23 - Deformationskurva för B33-1. Förstärkt i mitten med ett laminat. Brottet är väldigt sprött.

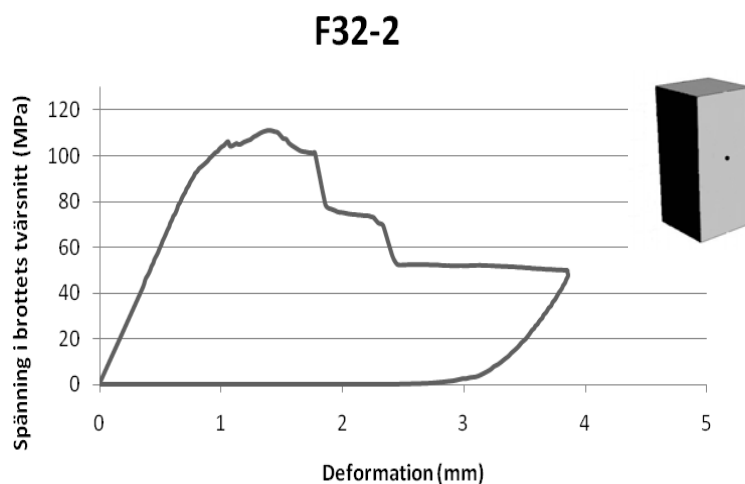
Figur 23 visar deformationskurvan för B33-1. Provkroppen genomgår en plasticering som är typisk för oförstärkt trä. Brottet som sker då den maximala spänningen är uppnådd är däremot väldigt sprött, illustrerat av den nästan vertikala linjen i diagrammet. Detta tyder på att det är kolfiberlaminatet som går av. B33-3 hade en liknande deformationskurva, medan de andra två provkropparna hade deformationskurvor med ett helt annat utseende.



Figur 24 - Deformationskurva för F31-3. Förstärkt i mitten med två laminat. Påminner om en deformationskurva för rent trä, trots att den är förstärkt med kolfiber. Brottet är dock sprödare än vid rent trä.

Figur 24 visar deformationskurvan för F31-3. Provkroppen klarar av ungefär dubbelt så hög spänning som den oförstärkta, men kurvan är utseendemässigt förhållandevis lik dessa. Skillnaden är att kurvan är mer oregelbunden och brottet som följer efter den maximala spänningen är sprödare än i rent trä, dock inte så sprött som för B33-1. Detta kan tyda på att materialen agerar mer som ett homogent material i den här

gruppen än i B33. Likheten med kurvorna i grupp B10 och B14 är något som är genomgående för grupp F31.



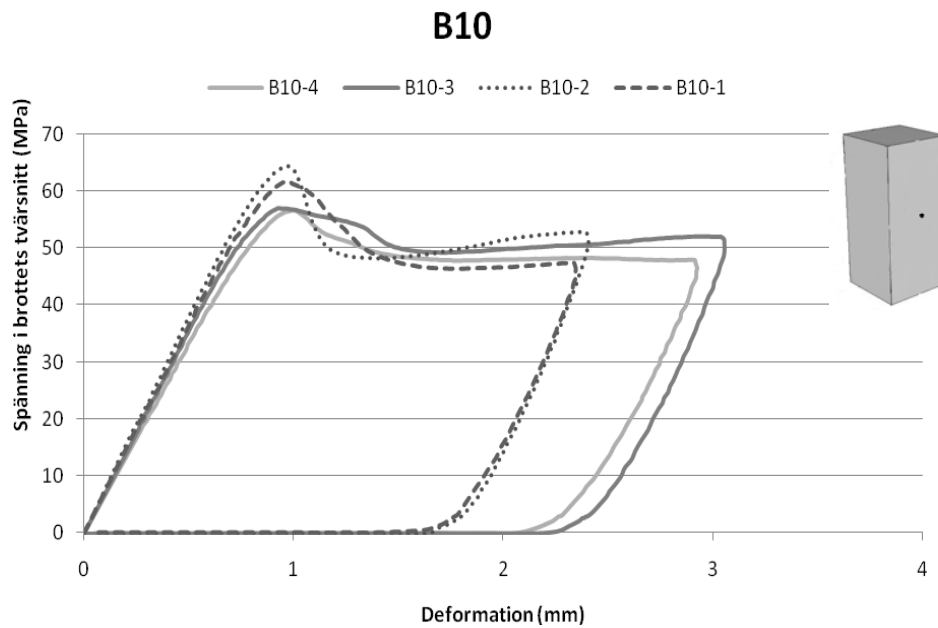
Figur 25- Deformationskurva för F32-2. Förstärkt på sidorna. En utdragen plasticeringsfas med ett segt inledande brott, slutligen följt av två väldigt spröda brott.

Figur 25 visar deformeringskurvan för F32-2. Plasticeringsfasen är mer utdragen för rent trä, vilket illustreras av den stora deformationen som sker mellan övergången från elastisk till plastisk deformation och det slutliga brottet. Brottet är segt till en början, vilket betyder att det är i träet brottet sker inledningsvis. Detta följs sedan av ett sprött brott, som i sin tur följs av ännu ett sprött brott. Detta är kolfiberlaminaten som böjs ut för att slutligen brista, ett i taget.

I stort är de förstärkta provkropparnas kurvor mer oförutsägbara. De flesta delar dock utseendet på deformeringskurvan med någon annan provkropp i gruppen. Se Bilaga B för samtliga deformeringskurvor.

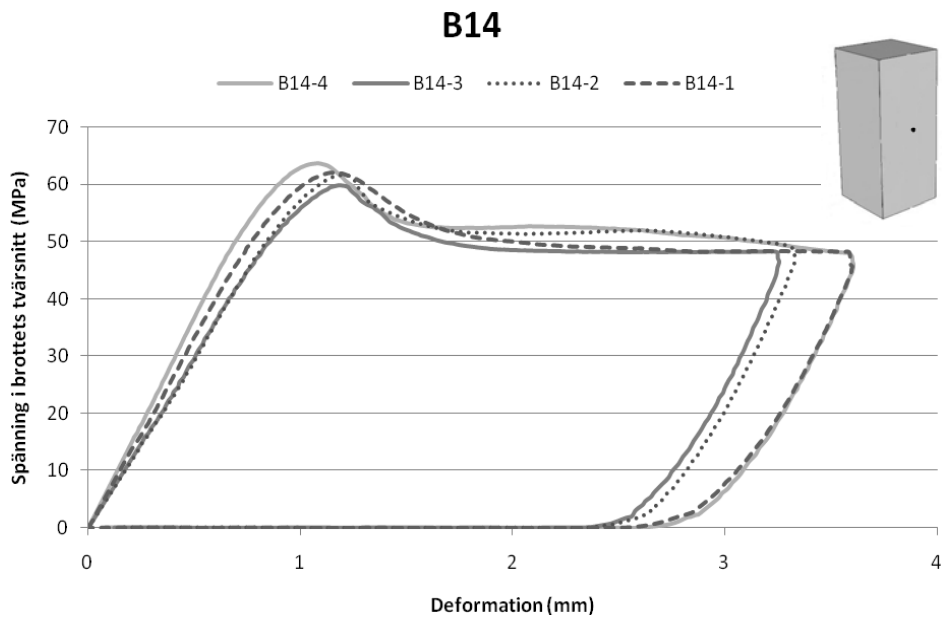
Provkropparnas styrka i den stabiliserade stukningsfasen skiljde sig åt. I den här aspekten betedde sig grupp F32, som var förstärkt på sidorna, i likhet med de oförstärkta. De hade alla en avslutande styrka på cirka 50 MPa. B33 däremot, som var förstärkt med ett laminat i mitten, hade ett lägre motsvarande värde. F31, som var förstärkt i mitten med två laminat, hade ett högre värde.

### 3.3.5 Spridning



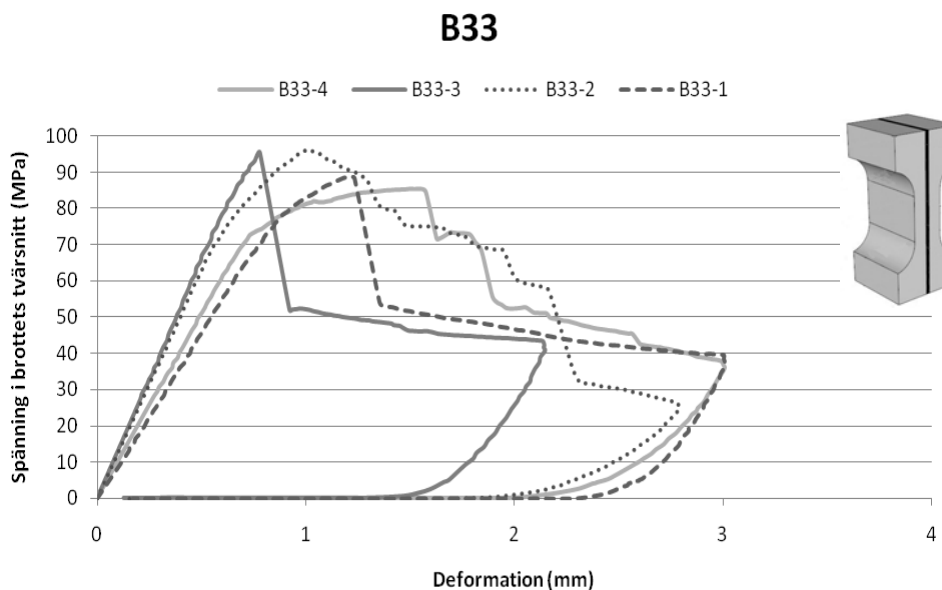
Figur 26 - Sammanställning av deformationskurvor för grupp B10.

Grupp B10 uppvisar analoga resultat, se Figur 26. Den maximala spänningen och spänningen i den stabiliserade stukningsfasen skiljer sig åt i viss omfattning, men samtidigt har samtliga kurvor likartat utseende. Att B10-1 och B10-2 inte går lika långt till höger på x-axeln beror bara på att försöken avbröts tidigare jämfört med B10-3 och B10-4.



Figur 27 - Sammanställning av deformationskurvor för grupp B14.

Kurvorna i grupp B14 är mycket sammanfallande i samtliga aspekter, se Figur 27.

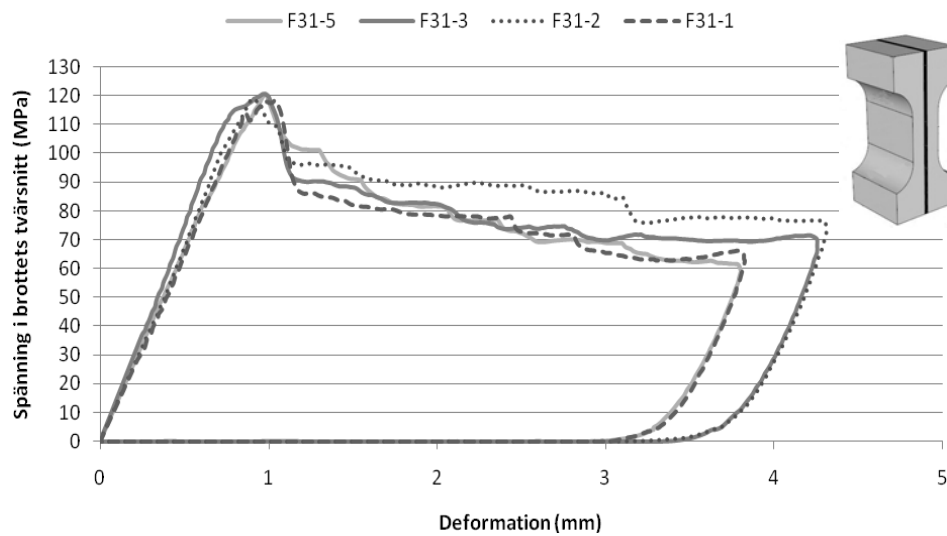


Figur 28 - Sammanställning av deformationskurvor för grupp B33.

Den maximala spänningen och spänningen i den stabiliserade stukningsfasen för grupp B33 har en relativt låg spridning, se Figur 28. Sättet brotten sker på och varaktigheten av plasticeringsfasen skiljer sig däremot åt ganska dramatiskt.



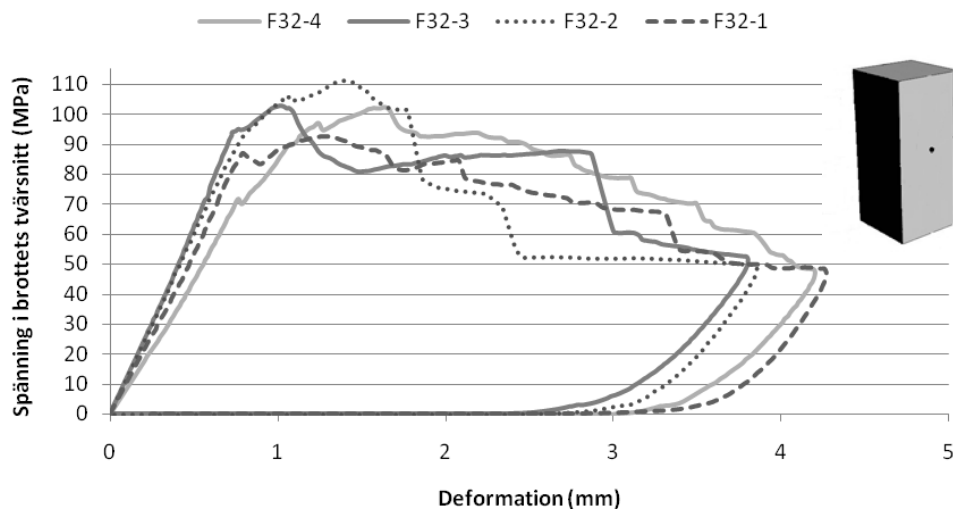
## F31



Figur 29 - Sammanställning av deformationskurvor för grupp F31.

Deformationskurvorna i grupp F31 är väldigt likartade, se Figur 29. Den stabiliserade stukningsfasen för F31-2 är egentligen den enda aspekten som avviker från de övriga.

## F32

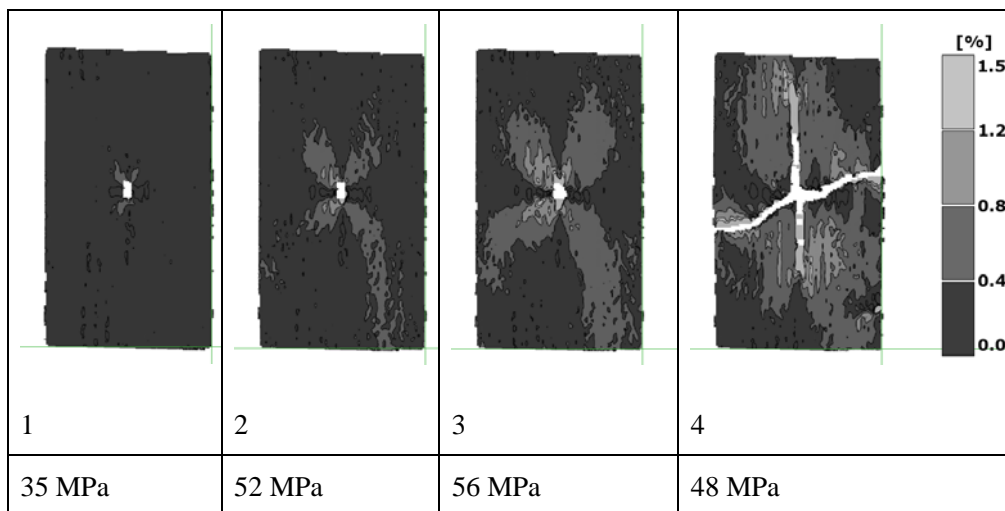
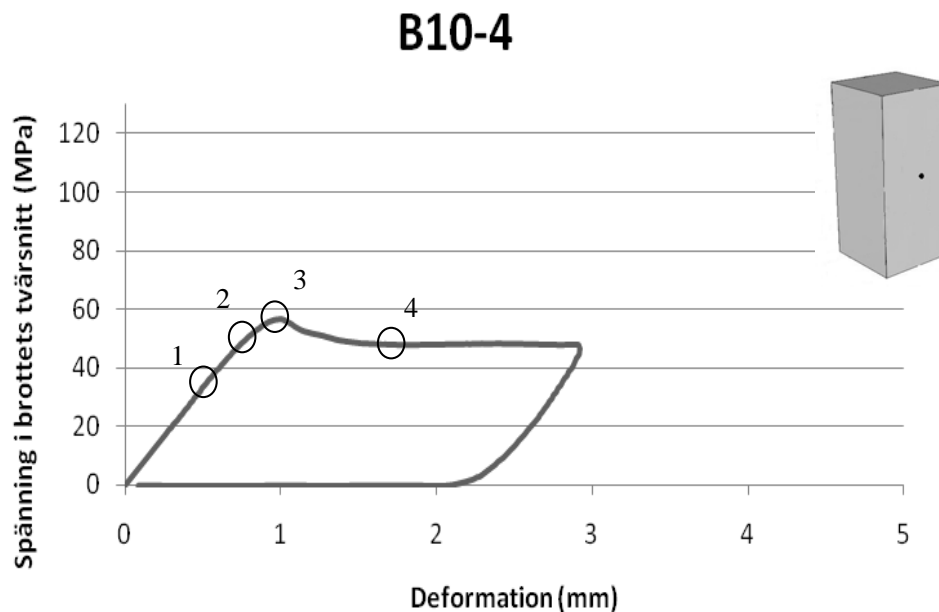


Figur 30 - Sammanställning av deformationskurvor för grupp F32.

Det är stor spridning på resultaten i grupp F32, se Figur 30. Spänningen i den stabiliserade stukningsfasen verkar dock sammanfalla väldigt väl.

### 3.3.6 Resultat från Aramis

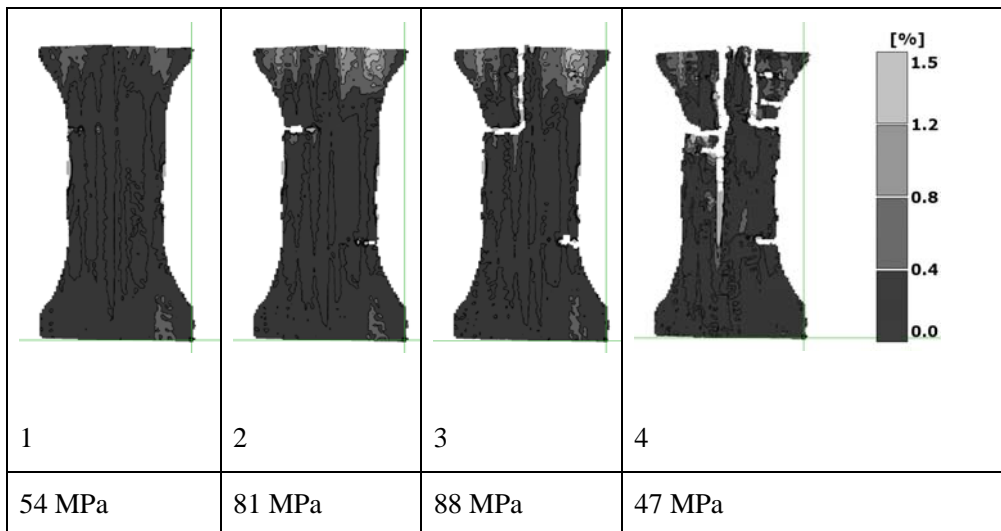
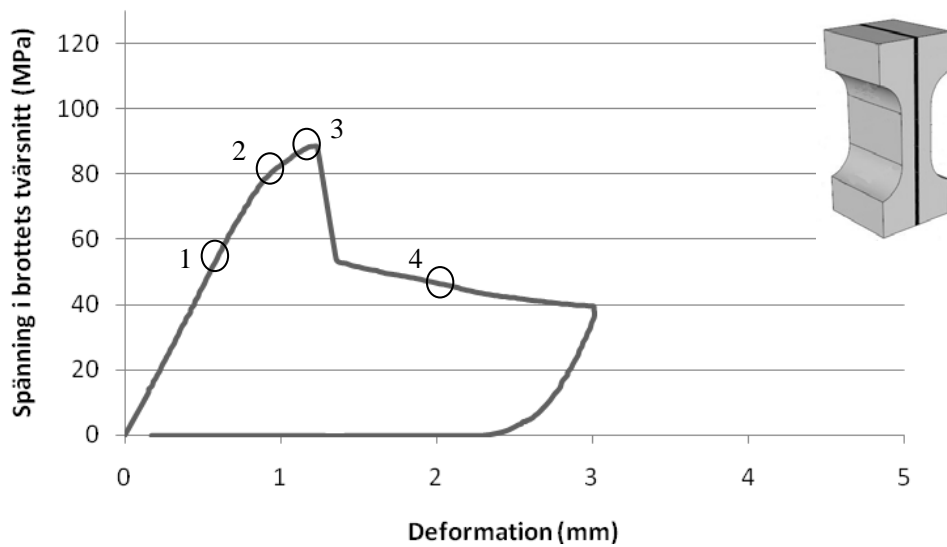
Mätssystemet Aramis följde det mekaniska förloppet vid försöken. Figur 25-27 visar ögonblicksbilder av töjningen i utvalda provbitar. Ljusare färg betyder större töjning och ringarna i diagrammen åskådliggör när i förloppet bilderna är tagna.



Figur 31 - Töjning för B10-4.

Figur 31 visar tydligt hur deformationerna i B10-4 påbörjas vid och sprids ut från det hål som har borrats i mitten. Det är även där som stuktionsbandet uppstår, utefter vilket brottet slutligen sker.

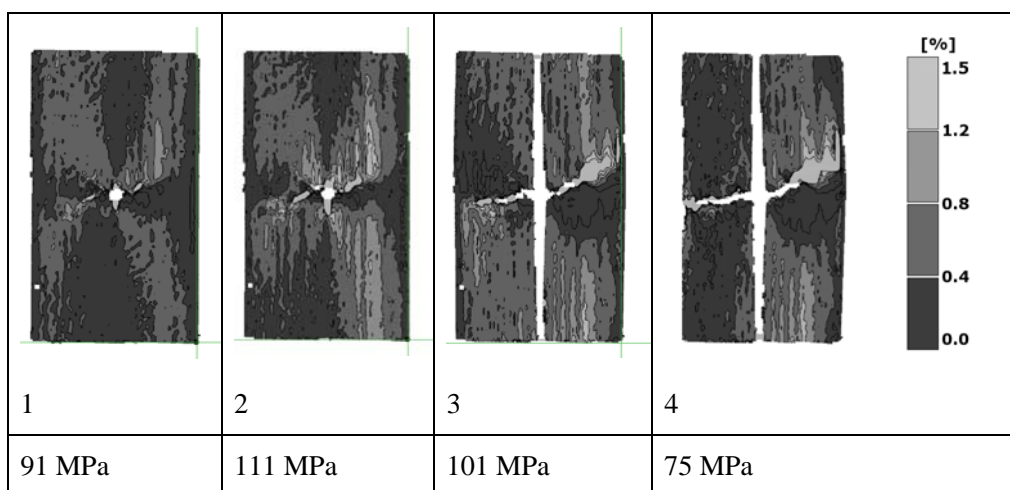
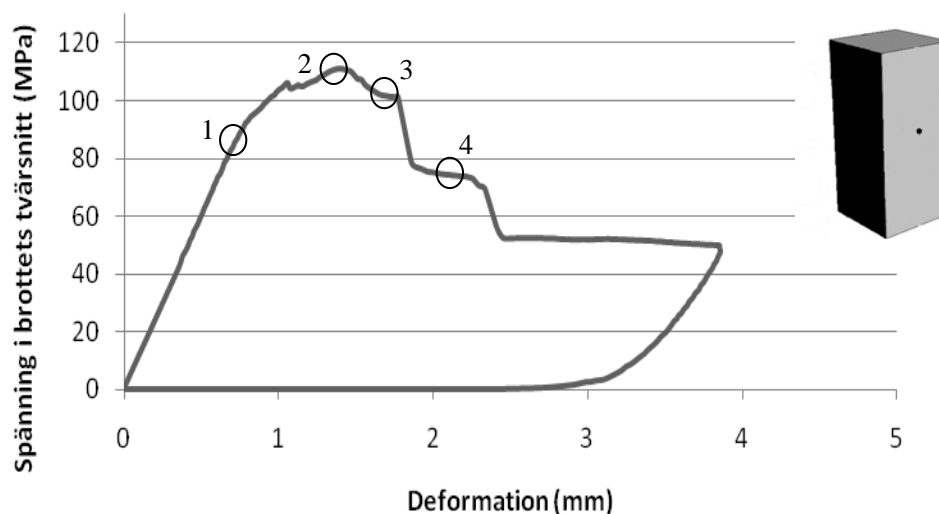
## B33-1



Figur 32 - Töjning för B33-1.

För B33-1 sker inte deformationen på samma sätt. Den inledande sprickan uppstår vid avslutningen av avsmalningen. Detta syns tydligt i bild 2 i Figur 32. Sprickan propagerar sedan inåt tills det når kolfiberlaminatet, varefter en anslutande spricka uppstår i vertikalled, vilket kan ses i bild 3. Detta förlopp ger inte upphov till ett traditionellt stukningsband. Följt av detta brister laminatet. Materialen i provkroppen agerar till synes var för sig.

## F32-2



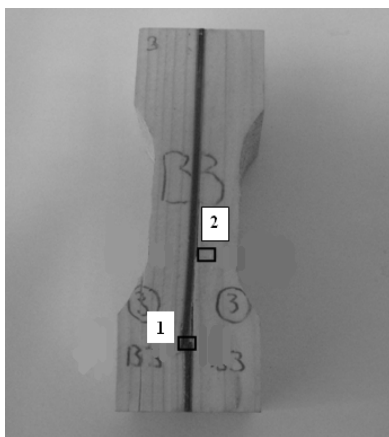
Figur 33 - Töjning för F32-2.

Också F32-2 har en deformation som skiljer sig från de tidigare nämnda i detta kapitel, se Figur 33. Töjningarna sprider sig från det borrade hålet, liksom det gjorde för B10-4, och ett stukningsband uppstår. Brottet är också segt till en början, vilket stämmer överens med uppkomsten av ett stukningsband. Mellan bild 3 och 4 i Figur 26 brister dock det vänstra av provkroppens två laminat. Noterbart är att töjningarna i det närmaste försvinner från den vänstra delen av provkroppen efter dess laminat har brutit.

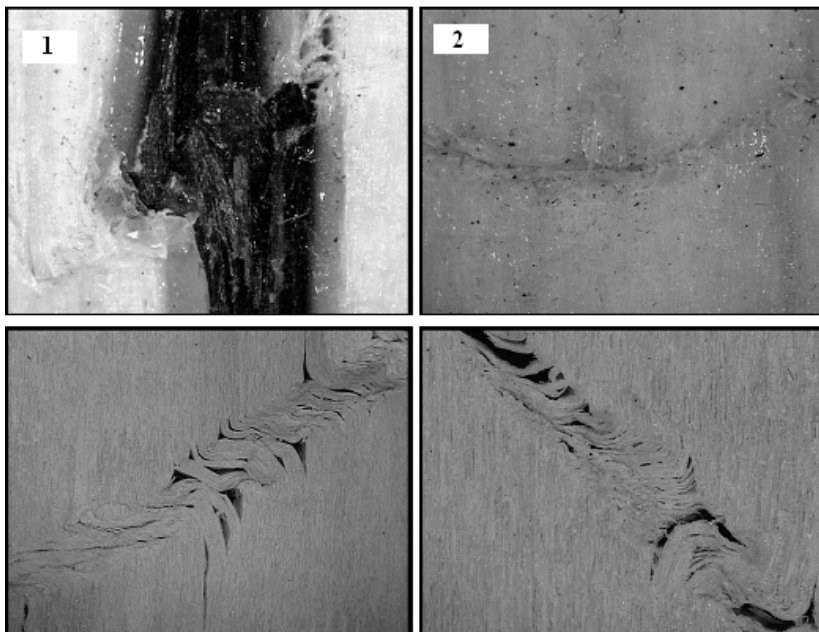
Aramis är mycket exakt i sin mätning av töjning och kan därmed anses tillförlitliga. Mätssystemet är ett värdefullt verktyg för att utreda töjning och det är svårt att få likartat resultat utan det.

### 3.3.7 Mikroskopsstudie

För att ta reda på fibrernas beskaffenhet i brottrationen genomfördes en mikroskopsstudie. Provkroppen som undersöktes var B33-3, vilken var förstärkt i mitten med ett laminat. Figur 34 visar var på provkroppen studien genomfördes. Figur 35 visar hur fibrerna i laminatet har bucklats likt de gör i trä. I det här fallet har epoxin hållit samman kolfiberlaminatet med träet även efter brott i laminatet och samverkan mellan de tre materialen har alltså inte störts. Figur 35 visar också en bild från ett brott i trädelen av provkroppen, men då ett tunt lager epoxi täcker provkroppens yta är den mycket svårstuderad. De undre bilderna i Figur 35 visar fibrernas struktur efter ett brott i rent trä från en annan studie.



Figur 34 - Bild över var mikroskopsstudien genomförts.



Figur 35- Mikroskopsstudie av provkropparna som visar deformationen i laminatet (1) och träet (2). Notera att epoxin inte släpper från varken träet eller laminatet i bild 1. Träytan är täckt av ett tunt lager epoxi, vilket gör bilden svårstuderad. De nedre bilderna illustrerar hur det hade sett ut om provkroppen varit oförstärkt och dess yta inte varit täckt av epoxi.

## 4 Diskussion

Tvårsnittets storlek där brott sker varierar beroende på vilken grupp provkropparna tillhör. T.ex. sker brottet i de mittenförstärkta provkropparna i avsmalningen i mitten. Det gör att tryckresultaten inte kan jämföras direkt. Hänsyn måste först tas till tvårsnittsarean vid brottet för varje grupp. Därmed kan en felmarginal uppstå vid mätning av tvårsnittet.

Metoden som använts i försöken är inte del av någon fastställd standard. Utformningen av provkroppar är således helt unik och obeprövad, vilket kan påverka resultatens gångbarhet. Dessutom är det osäkert till vilken grad de stålstöd som nämns i Kapitel 3.2.3 påverkar resultaten genom att påverka randvillkoren för försöken.

Kapitel 3.3.6 beskriver hur brottet uppkom och spreds i de mittenförstärkta provkropparna. På grund av provkroppens utformning uppstod den första sprickan inte i mitten av provkroppen, som var tänkt, utan i avslutningen av avsmalningen. Detta betyder att provkroppens form inte är optimal för ändamålet och bör förbättras i framtida studier.

Spridningen av resultaten som beskrivs i Kapitel 3.3.5 kan bero på defekter och variationer i träet. Materialet som valdes till provkropparna innehöll dock mycket få visuella defekter, vilket tyder på att spridningen beror på något annat. Den mer komplexa formen på de mittenförstärkta provkropparna kan ha gett upphov till denna spridning, men detta verkar osannolikt då grupp F31, som var mittenförstärkt, hade mycket låg spridning. En möjlig orsak kan vara att laminatens fiber inte är helt parallella med virkets fiber. Resultaten från grupperna B10, B14 och F31 har mycket liten spridning. Fastän antalet försök per grupp är få kan resultaten från dessa grupper anses vara i stort sett statistiskt säkerställda. De övriga grupperna, B33 och F32, har större spridning och osäkerheten i resultatens giltighet är därmed större.

Mikroskopsstudien gav endast svar på hur kolfiberlaminatet såg ut på fibernivå och inte hur träfiberna såg ut. Att provkroppens yta var täckt med ett tunt lager epoxi gjorde den svårstuderad. Det är känt sedan innan hur träfiber ser ut efter ett tryckbrott, men det går inte att säkerställa att detta sker på samma sätt för kolfiberförstärkt trä. Därför vore det lämpligt att utföra ytterligare en mikroskopsstudie med provkroppar vars ytor är fria från epoxi.

## 5 Slutsatser

Syftet med detta examensarbete var att ta fram materialegenskaper för kolfiberförstärkt trä under tryck för vidare arbete med finit elementmodell. Följande resultat och data förväntades av studien:

- Deformationskurva för kolfiberförstärkt respektive oförstärkt trä
- Vinkeln av det så kallade stukningsbandet i kolfiberförstärkt respektive oförstärkt trä
- Densitet av trä
- Fuktkvot av trä
- Mikroskopiska bilder av brotregionen på fibernivå

Nedan följer de slutsatser som dras:

1. Den mest uppenbara slutsatsen som kan dras från deformationskurvorna är att kolfiberförstärkt trä klarar av högre spänningar än de oförstärkta. Vidare var deformationskurvorna för de förstärkta provkropparna mer oförutsägbara och har större spridning än de oförstärkta. I grupp F31 är dock spridningen låg. I grupp F32 och B33 är spridningen högre. På grund av den höga spridningen inom dessa grupper kan det vara svårt att grunda en finit elementmodell på studiens samtliga resultat. I slutändan ger de dock en god inblick i hur materialen fungerar ihop.
2. Stukningsbandens vinkel verkar bli mindre i kolfiberförstärkt trä än oförstärkt. Vidare kan det konstateras att den lösning som tillämpas i den här studien för att tvinga fram stukningsbandet i mitten av de mittenförstärkta provkropparna, dvs. en avsmalning i mitten, inte är lämplig.
3. Det är redan känt att densiteten av trä påverkar hållfastheten, men det är svårt att dra några slutsatser angående densitetens inverkan på kolfiberförstärkt trä. Detta på grund av att de oförstärkta referensobjekten alla har liknande densitet.
4. Då fuktkvoten skiljde sig minimalt mellan provkropparna kan inga slutsatser dras angående fuktkvotens inverkan på de mekaniska egenskaperna för kolfiberförstärkt trä.
5. Mikroskopsstudien visade att vidhäftningsförmågan mellan kolfiberlaminat, epoxi och trä är fullgod. Denna slutsats dras av att epoxin fortsatte att vara vidhäftad mot de andra materialen även efter brott. Däremot gav studien inget svar på hur träfibrens struktur ser ut i ett brott då virket är förstärkt med kolfiber. För att utreda detta krävs ytterligare en mikroskopsstudie med provkroppar vars ytor är fria från epoxi.

## 6 Referenser

- André, A., (2009) *Compressive Failure in Small Clear Spruce Specimens: Experimental investigation*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.
- Byskov E., et al. (2002) Kinkband formation in wood and fiber composites – morphology and analysis. *International Journal of Solids and Structures*, vol. 39, sid. 3649-3673.
- Dinwoodie J.M. (2000) *Timber: Its nature and behavior*. London: E & FN Spon
- Larsson, Tomas (2007), *Förstärkning av trä med linfiber*. Luleå: Luleå tekniska högskola. (Examensarbete inom Institutionen för Samhällsbyggnad. Byggkonstruktion.)
- Poulsen, J. S., (1998) *Compression in Clear Wood*. Lyngby: Technical University of Denmark. (Doktorsavhandling inom Dept. of Structural Engineering and Materials.)
- Skogsindustrierna (2010) *TräGuiden*. <http://www.traguiden.se> (24 Feb. 2010)
- Sterner, B. (2004) *Att välja trä*. Katrineholm: Sörmlands Grafiska Quebecor AB.
- Svecova, D., Eden, R.J. (2004), Flexural and shear strengthening of timber beams using glass fibre reinforced polymer bars – an experimental investigation. *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 31, sid. 45-55.
- Svenskt Limträ AB (2007), *Limträ Guide*, Svenskt Limträ AB
- Viebke L., (2003), *Fiberkompositlaminering - Handbok kring konstruktion med fiberarmerade härdplaster*. <http://fiber.info.se> (27 Apr. 2010)

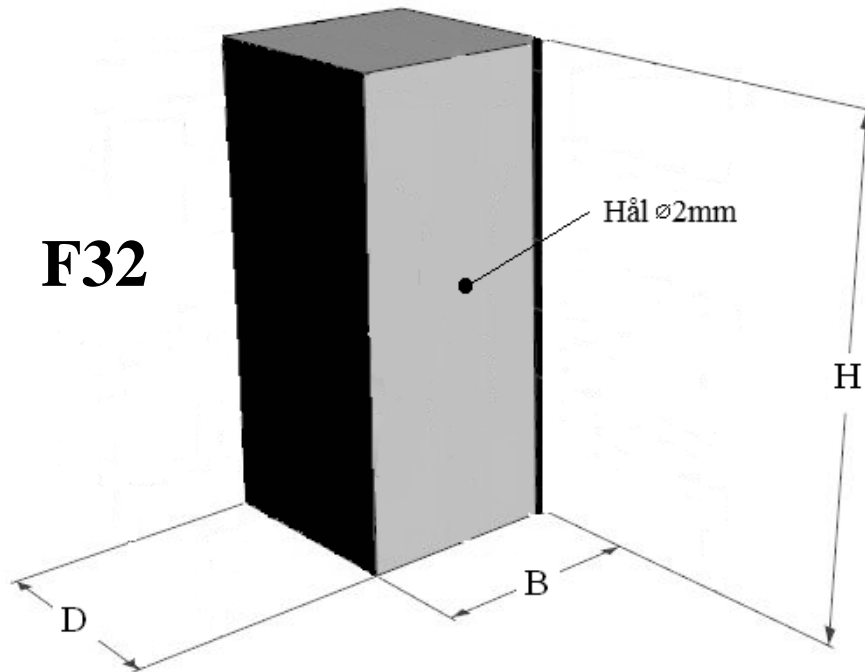


## 7 Figurförteckning

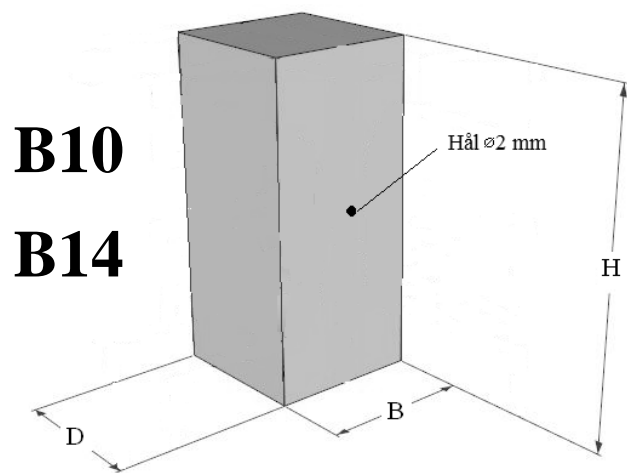
Figur 1 - De fyra grundbelastningsfallen inom hållfasthetsläran (Viebke 2003).	3
Figur 2 - Tryck- och dragkrafter i en böjbelastad balk (Viebke 2003).	3
Figur 3 - Träets uppbyggnad (Poulsen 1998).	5
Figur 4 - Teoretisk deformationskurva för trä under tryckbelastning. a) elastisk deformation, b) plasticering och stukning, c) maxspänning nådd och ett helt utbrett stukningsband och d) stabiliserad stukningsfas (André 2009).	6
Figur 5 - Bild på fackverksbalk till vänster och en lättbalk till höger (Skogsindustrierna 2010).	7
Figur 6 - Schematiskt härdningsdiagram för epoxilim (Viebke 2003).	8
Figur 7 - Förstärkningsmetoderna för balk 1 (vänster) och balk 2 (höger) i tvärsnitt. De svarta rektanglarna representerar kolfiberlaminat.	10
Figur 8 - B10	1
Figur 9 - F31	1
Figur 10 - F32	1
Figur 13 - Tvärsnitt av en limträbalk och dess lameller.	13
Figur 11 - B33	1
Figur 12 - B14	1
Figur 14 - Utformningen av de mittenförstärkta provkropparna (B33 och F31) till vänster och de sidoförstärkta provkropparna (F32) till höger .	14
Figur 15 – Stöd monterade på provkropp till vänster och lösa till höger. Provkroppen till vänster hörde inte till den gruppen som antogs behöva stöd, men fick ändå dessa monterade för att uppnå liknande förhållanden vid provningen.	15
Figur 16 - Representativ bild av årsringarnas utbredning i tryckytan. I bilden till vänster visas att årsringarna inte är parallella med någon av sidorna av provkroppen (risk för svårstuderat stukningsband). Bilden till höger visar årsringar som är parallella med sidorna (mer lättstuderat stukningsband).	15
Figur 17 - Aramis två kameror är placerade framför provkroppen för att fotografera det mekaniska händelseförloppet under provtryckningen. Infälld bild visar en provkropp som sprejats med färg för att Aramis kameror ska kunna registrera deformationsförloppet.	16
Figur 18 - Några exempel på stukningsbandets vinkel i provkropparna	20
Figur 19 – Förhållande mellan andel förstärkning och maximal spänning. De mörkare prickarna är faktiska mätvärden.	21
Figur 20 - En jämförelse av provkropparnas densitet, med den högsta densiteten till vänster och den lägsta densiteten till höger.	21
Figur 21 - Deformationskurva för B10-4. Oförstärkt. Stämmer väl överens med den teoretiska deformationskurvan för trä.	22
Figur 22 - Deformationskurva för B14-1. Oförstärkt. Stämmer väl överens med den teoretiska deformationskurvan för trä.	22
Figur 23 - Deformationskurva för B33-1. Förstärkt i mitten med ett laminat. Brottet är väldigt sprött.	23
Figur 24 - Deformationskurva för F31-3. Förstärkt i mitten med två laminat. Påminner om en deformationskurva för rent trä, trots att den är förstärkt med kolfiber. Brottet är dock sprödare än vid rent trä.	23
Figur 25- Deformationskurva för F32-2. Förstärkt på sidorna. En utdragen plasticeringsfas med ett segt inledande brott, slutligen följt av två väldigt spröda brott.	24
Figur 26 - Sammanställning av deformationskurvor för grupp B10.	25
Figur 27 - Sammanställning av deformationskurvor för grupp B14.	26
Figur 28 - Sammanställning av deformationskurvor för grupp B33.	26
Figur 29 - Sammanställning av deformationskurvor för grupp F31.	27
Figur 30 - Sammanställning av deformationskurvor för grupp F32.	27
Figur 31 - Töjning för B10-4.	28
Figur 32 - Töjning för B33-1.	29
Figur 33 - Töjning för F32-2.	30
Figur 34 - Bild över var mikroskopstudien genomförts.	31
<b>CHALMERS</b> Bygg- och miljöteknik, Examensarbete 2010:72	35

**Figur 35- Mikroskopsstudie av provkropparna som visar deformationen i laminatet (1) och träet (2).  
Notera att epoxin inte släpper från varken träet eller laminatet i bild 1. Träytan är täckt av ett tunt lager epoxi, vilket gör bilden svårstuderad. De nedre bilderna illustrerar hur det hade sett ut om provkroppen varit oförstärkt och dess yta inte varit täckt av epoxi. 31**

## 8 Bilaga A: Mått på provkroppar

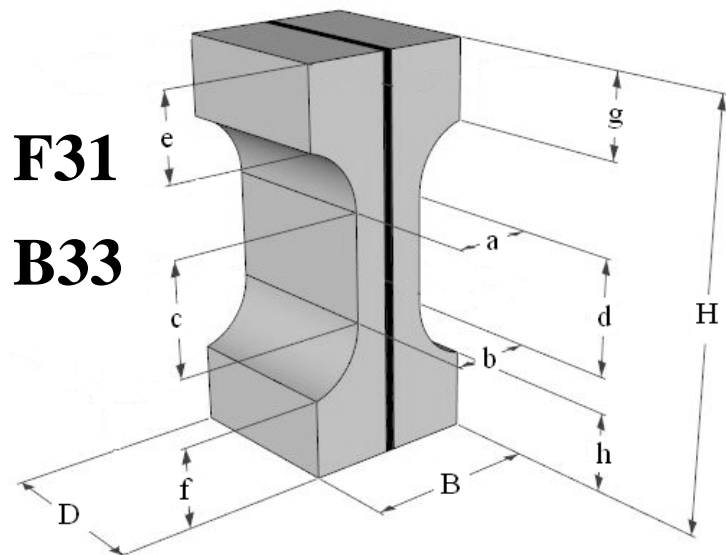


F32					
	F32-1	F32-2	F32-3	F32-4	F32-5
H	98,2	98,5	98,0	98,3	98,1
B	35,1	35,1	35,6	35,1	35,0
D	34,9	34,7	34,9	34,9	34,9
Tvårsnittetsarea vid brottpunkt (mm <sup>2</sup> )	1155	1149	1173	1155	-



<b>B10</b>					
	<b>B10-1</b>	<b>B10-2</b>	<b>B10-3</b>	<b>B10-4</b>	<b>B10-5</b>
<b>H</b>	99,8	99,9	99,8	99,9	99,8
<b>B</b>	34,9	34,9	34,9	34,9	34,9
<b>D</b>	34,9	34,9	34,9	35,0	34,9
<b>Tvårsnittarean vid brottpunkt (mm<sup>2</sup>)</b>	1148	1148	1148	1152	-

<b>B14</b>					
	<b>B14-1</b>	<b>B14-2</b>	<b>B14-3</b>	<b>B14-4</b>	<b>B14-5</b>
<b>H</b>	99,9	99,8	99,8	99,9	99,8
<b>B</b>	39,7	39,8	39,7	39,9	39,7
<b>D</b>	39,8	39,7	39,7	39,9	39,6
<b>Tvårsnittarean vid brottpunkt (mm<sup>2</sup>)</b>	1500	1501	1497	1512	-



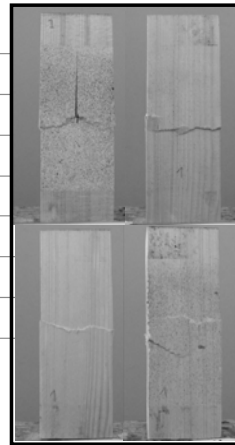
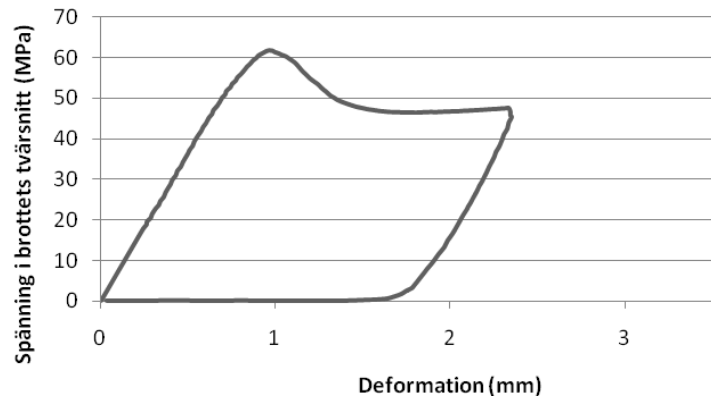
F31					
	F31-1	F31-2	F31-3	F31-4	F31-5
a	23,5	23,8	23,7	23,2	23,6
b	23,9	23,4	23,4	23,5	23,5
c	29,1	27,5	26,8	27,2	27,3
d	27,1	28,7	27,5	26,1	26,7
e	23,9	22,9	23,5	23,4	23,1
f	22,8	22,4	22,5	22,9	22,6
g	22,6	23,0	22,3	22,5	22,2
h	23,8	23,3	23,2	23,2	23,1
H	98,1	98,5	98,6	98,6	98,5
B	34,9	34,8	35,1	35,3	35,0
D	34,5	34,3	34,7	34,7	34,4
Tvårsnittarea vid brottpunkt (mm <sup>2</sup> )	811	803	822	-	812

<b>B33</b>					
	<b>B33-1</b>	<b>B33-2</b>	<b>B33-3</b>	<b>B33-4</b>	<b>B33-5</b>
<b>a</b>	21,2	21,4	21,3	21,0	21,9
<b>b</b>	21,7	21,6	21,7	20,9	21,7
<b>c</b>	26,4	26,6	29,2	26,7	27,8
<b>d</b>	27,1	27,2	27,8	29,8	29,7
<b>e</b>	23,7	22,8	23,5	23,5	22,9
<b>f</b>	23,3	22,8	22,5	23,2	22,6
<b>g</b>	22,9	22,9	22,3	23,2	22,7
<b>h</b>	23,1	23,3	23,3	23,6	23,4
<b>H</b>	98,8	98,7	98,5	99,2	99,1
<b>B</b>	32,8	32,8	32,6	32,9	32,8
<b>D</b>	34,3	34,6	34,2	34,5	34,4
<b>Tvårsnittsårea vid brottpunkt (mm<sup>2</sup>)</b>	744	740	742	724	-

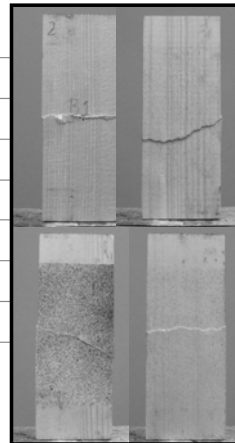
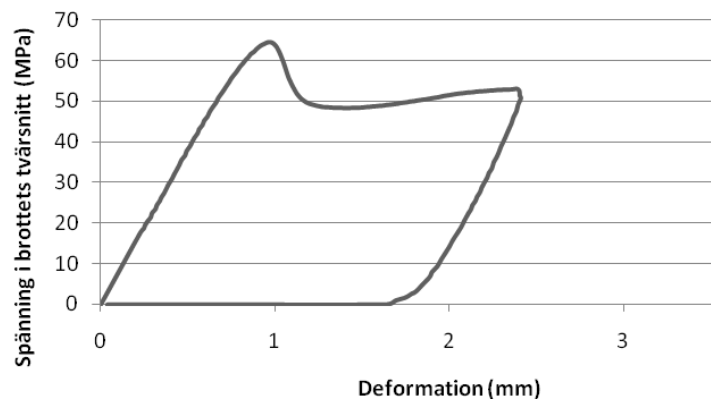


# 9 Bilaga B: Deformationskurvor och bildokumentation

## B10-1

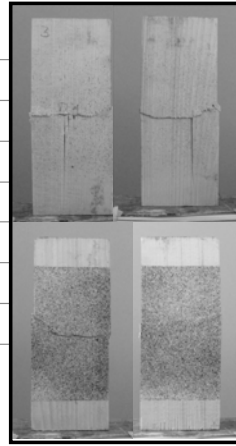
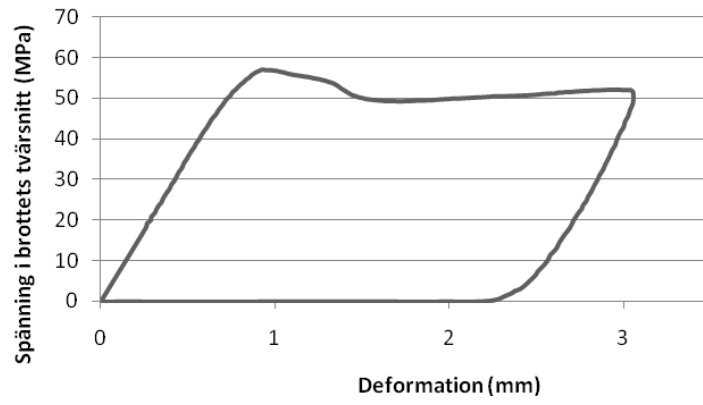


## B10-2

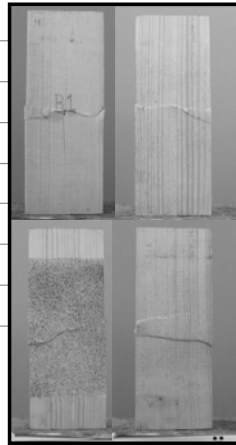
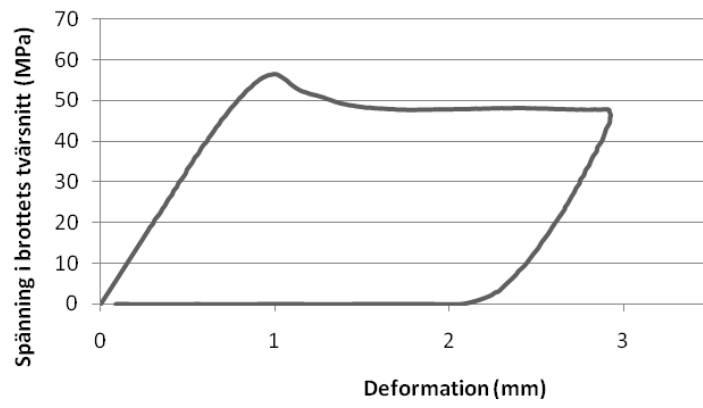




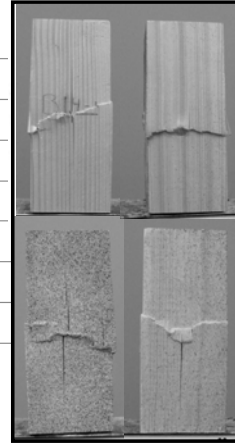
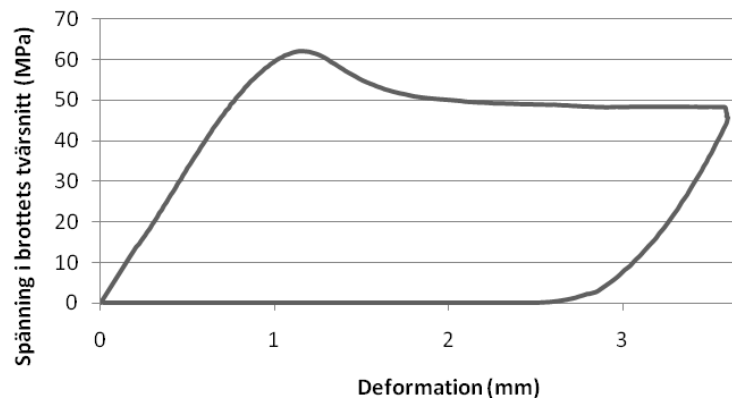
### B10-3



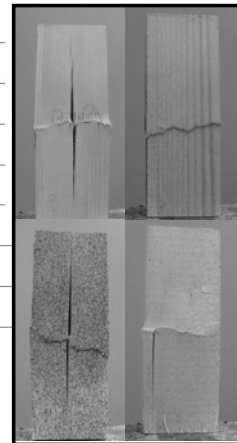
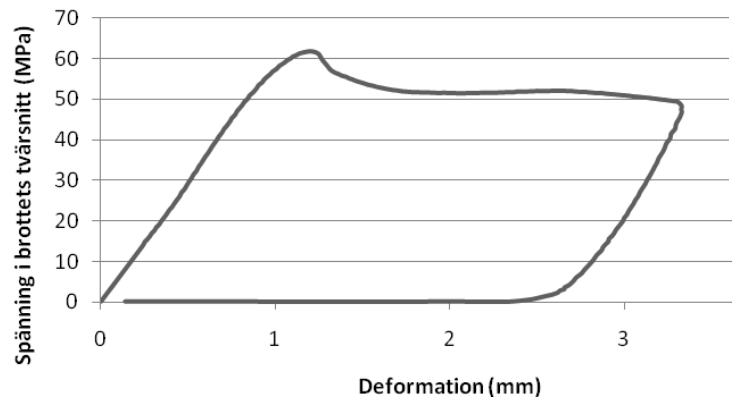
### B10-4



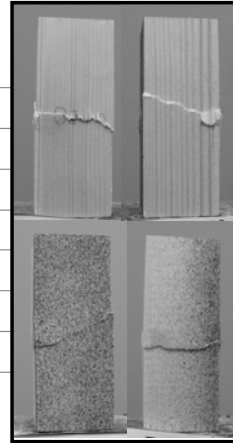
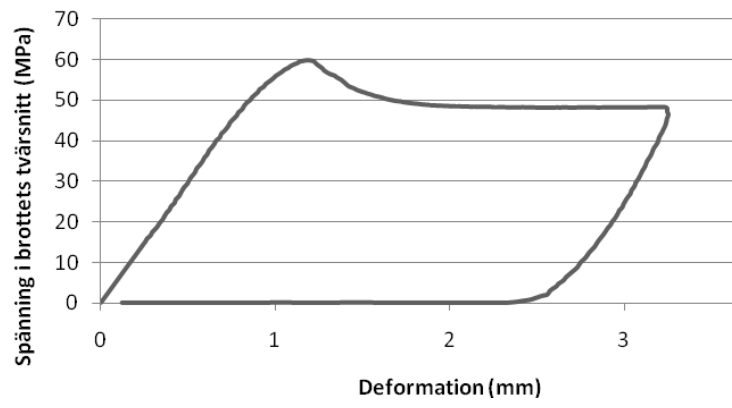
### B14-1



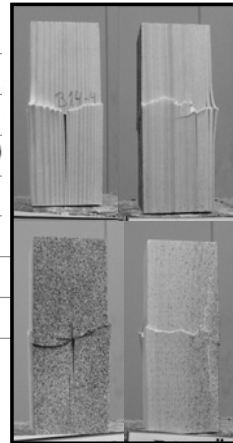
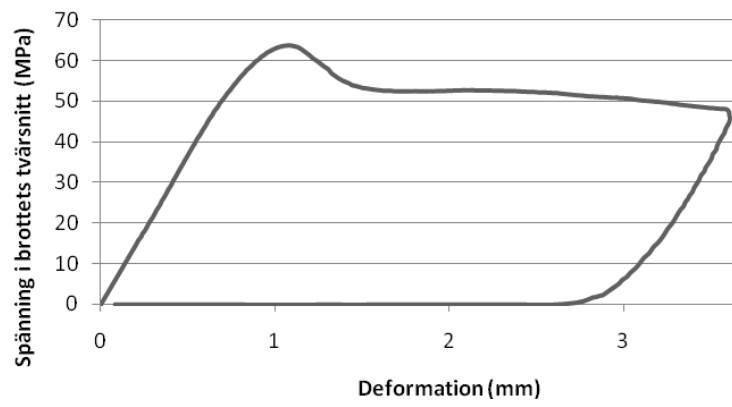
### B14-2



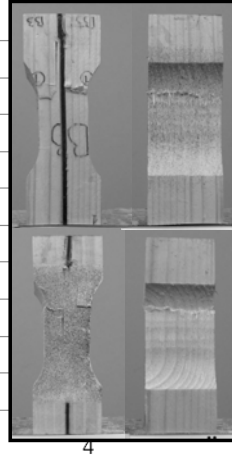
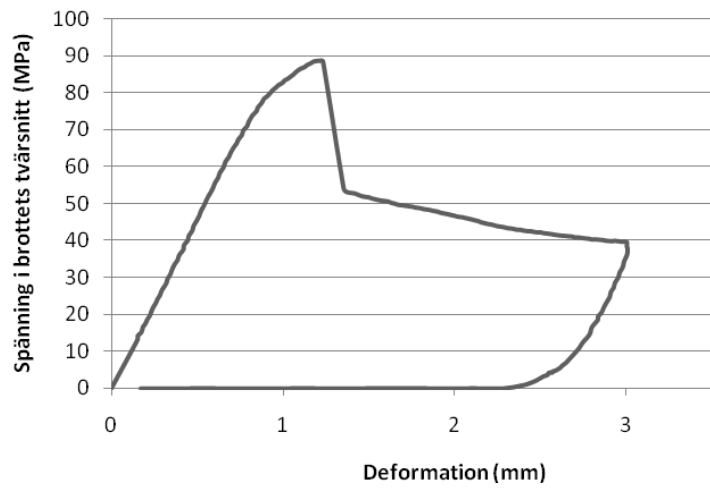
### B14-3



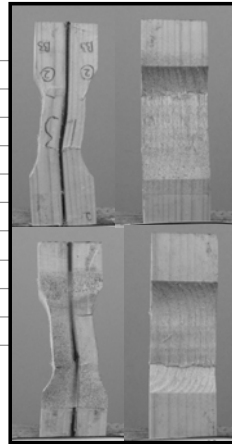
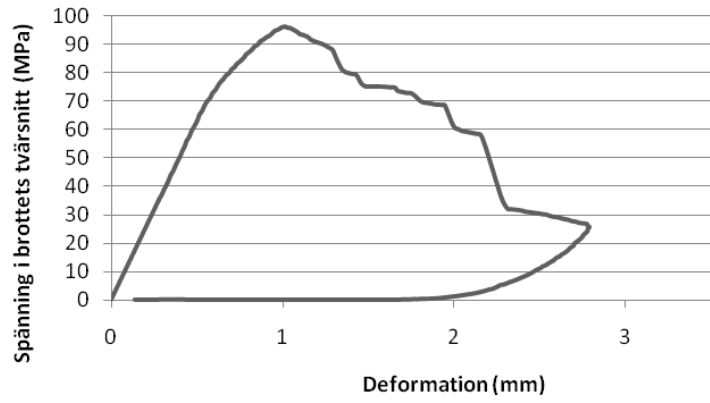
### B14-4



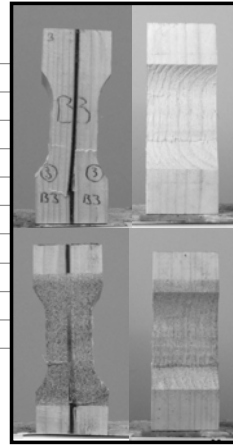
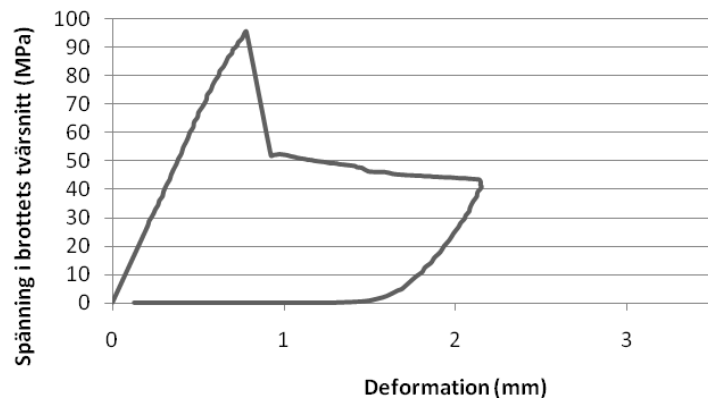
### B33-1



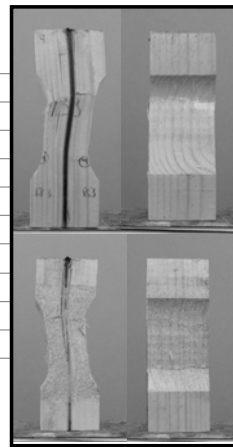
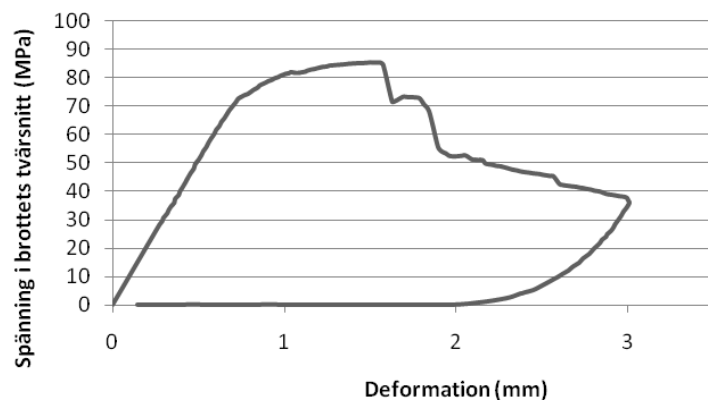
### B33-2



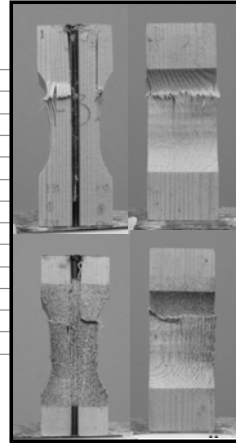
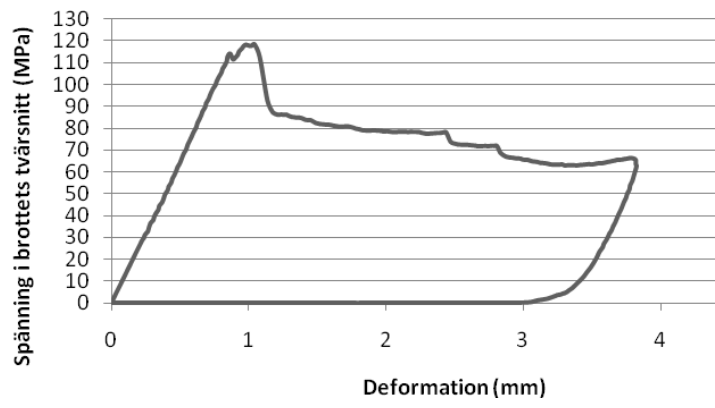
### B33-3



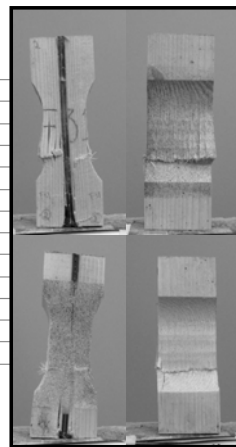
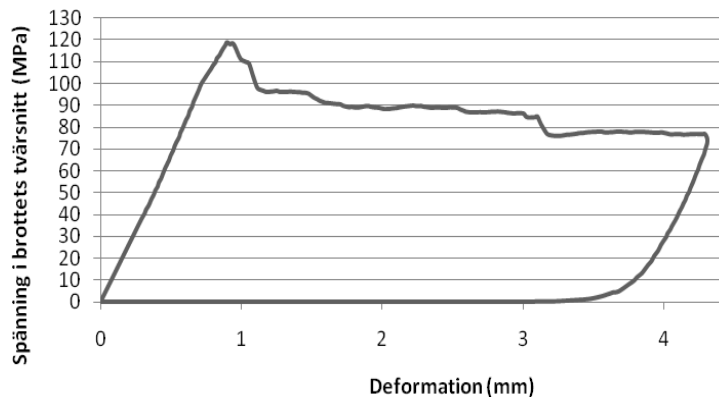
### B33-4



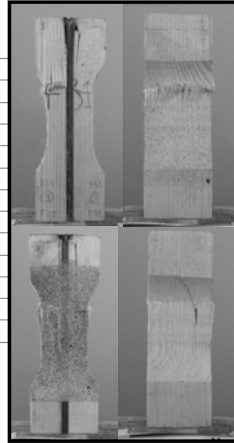
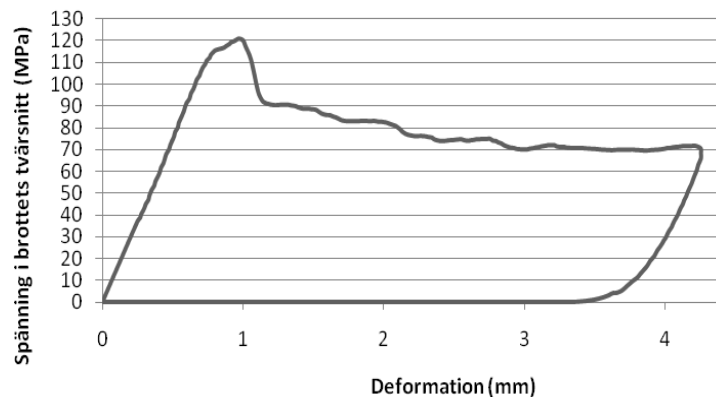
### F31-1



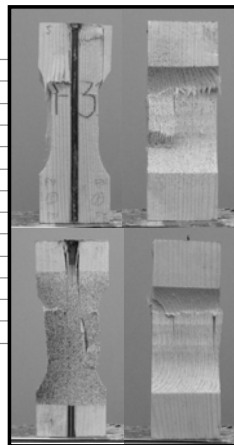
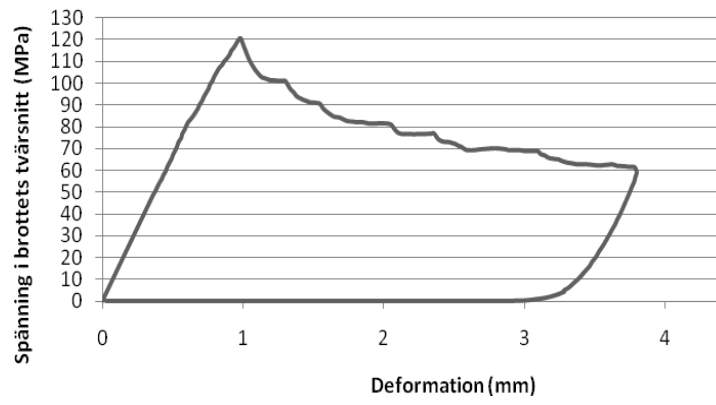
### F31-2



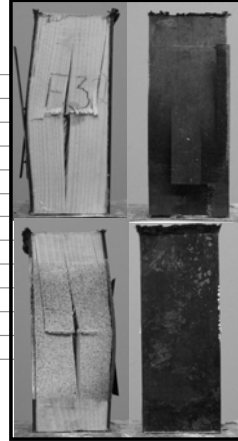
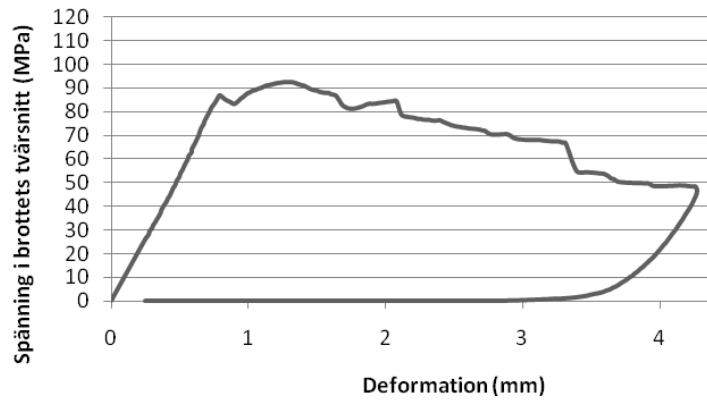
### F31-3



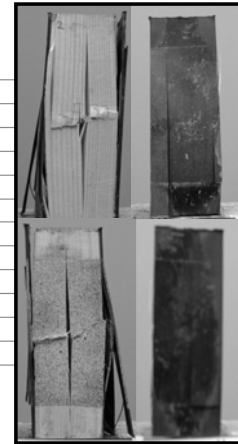
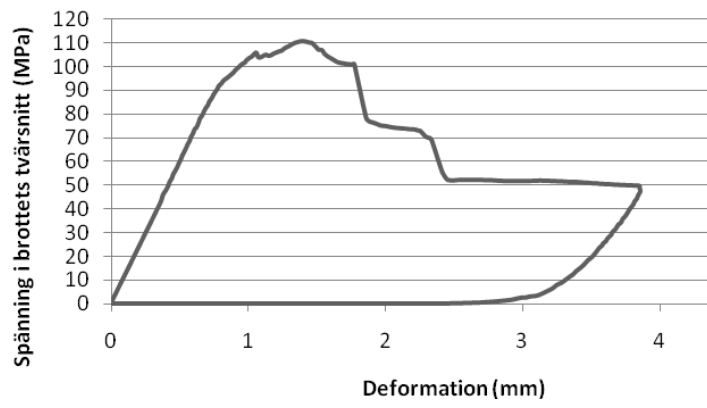
### F31-5



### F32-1

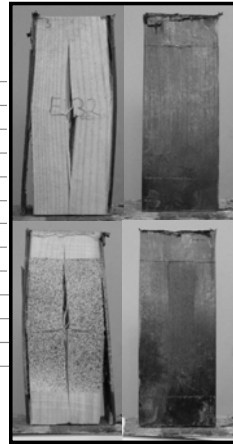
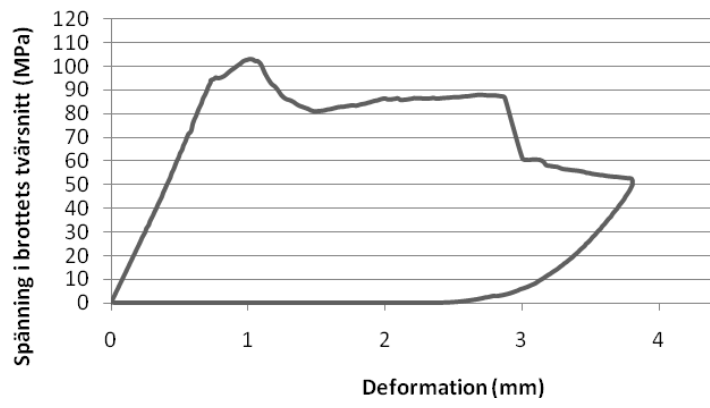


### F32-2

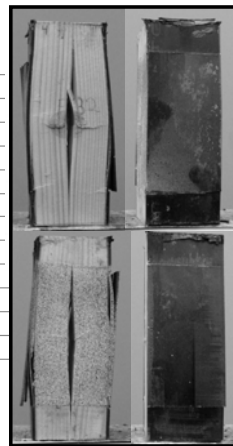
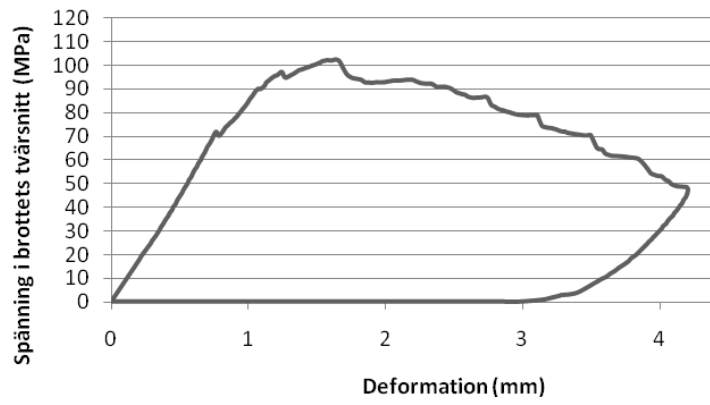




### F32-3



### F32-4





## **10 Bilaga C: Epoxilim**



## **11 Bilaga D: Kolfiberlaminat**