HÖGSKOLAN I BORÅS

INSTITUTIONEN INGENJÖRSHÖGSKOLAN

Fiberförstärkt massivträ

Projekt FoU-kort Avancerat

Slutrapport

2013

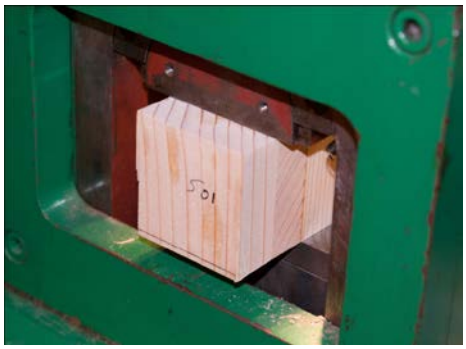
Sammanfattning

Syftet med projektet är att förbättra massivträprodukters mekaniska egenskaper både avseende styrka och töjbarhet genom att förstärka dem med textilmatta.

Del 1 handlar om att hitta en fiber-matris kombination som är både stark och som förhöjer träets hållbarhetsegenskaper. Jute, kolfiber, glasfiber kombinerat med epoxi, polyuretan och sojabönsolja undersöks.

Skjuvprovning och delamineringsförsök av limfogen genomförs på SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut i Borås med ledning av Mats Axelson, SP Trä. Provkropparna framställs i ramen för **Examensarbete 1** [1] på Ingenjörshögskolan, Avdelningen Bygg. Blandning av flerkomponentslim, påstrykning, pressning och härdning sker under handledning av Dan Åkesson från Kompositgruppen från Ingenjörshögskolan.

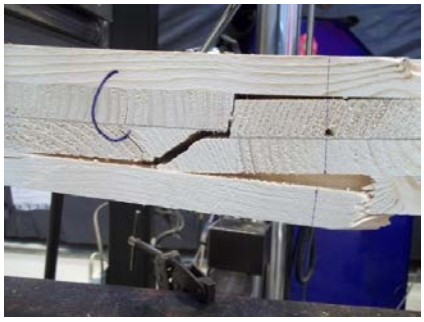
Resultaten visar att PU-lim i kombination med jute är både en stark och hållbar komposit som placerat mellan massivträlameller visar på en tydlig förstärkningseffekt. Massivträfogen förstärkt med denna komposit blir målet för vidare undersökning inom enkla massivträelement.



Del 1: Försök på limfogsnivå.

Del 2 handlar om att undersöka böj- och skjuvegenskaperna i enkla massivträelement som är förstärkta med PU-lim i kombination med jute. Försöken genomförs delvis på Ingenjörshögskolan kompositlabb och på SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut. Provkropparna framställs och försöken genomförs inom ramen för **Examensarbete 2** [2].

Resultaten visar på att förstärkningseffekterna klingar av när provkropparnas storlek är i fullskala. Förstärkningen placerad i underkant av bjälklagselement har dock en positiv effekt på spridningen av mekaniska egenskaper generellt och på böjegenskaperna specifikt. Därmed bör ur seghets- och rotationskapacitetsynpunkt en förstärkning placerat i underkant element att eftersträvas. Förstärkning placerad i mitten av elementen har i princip samma bärförmåga som ett icke förstärkt element. Genom att ersätta en lamell med en textilkomposit i mitten påverkas inte elementets bärighet nämnvärt men minskar egentyngden och därmed transportkostnaderna.



Del 2: Försök på element. Böjprovning på fiberförstärkt bjälklagselement.

Projektet genomförs på beställning och i samarbete med Fristad Bygg ett medelstort byggföretag i Sjuhäradsbygden. VD, Peter Serrander, medverkande handledare Pierre Landel. Sammanfattningsrapporten författades av undertecknad, universitetslektor i bärande konstruktioner på Ingenjörshögskolan, Högskolan i Borås. Försöken genomfördes på SP Sveriges Tekniska forskningsinstitut med medverkan av Mat Axelsson och Magdalena Sterley från SP Trä Borås och Stockholm.

Finansiering av projektet sker genom Västra Götalandsregionens FoU-kort Avancerat.

Agnes Nagy Borås, maj 2013

Innehållsförteckning

1 Inledning 1

2 **Del 1**: Skjuvning och delaminering av fiberförstärkt massivträfog 5

2.1 Skjuvförsök av limfog

2.2 Delaminering av limfog

3 **Del 1:** Diskussion och slutsats

4 **Del 2**: Böj- och skjuvegenskaper i fiberförstärkt massivträelement

4.1 Bestämning av presstid och presstryck

4.2 Böjning och skjuvning av massivträelement

5 **Del 2:** Diskussion och slutsats

6 Fortsatt arbete

7 Referenser

Bilaga 1 Delamineringsförsök

Bilaga 2 Statistiska beräkning för bjälklagselement

Bilaga 3 Statistiska beräkning för väggbalk

1 Inledning

Företaget Fristad Bygg i samarbete med Högskolan i Borås ansökt om forskningsmedel från Västra Götalandsregionen december månad 2011. Ansökan har beviljats medel från programmet FoU-kort Avancerat.

Små och medelstora företag i Västra Götaland har möjlighet att få extra stöd för forskning och utveckling genom så kallade FoU-kort. Stödet ges till projekt och utvecklingsinsatser som bland annat ska stärka företagets internationella konkurrenskraft och bidra till en mer energieffektiv produktion och konsumtion, [3].

FoU-kort Avancerat ger stöd på max 500 000 kr och ska resultera i utveckling av ny kunskap eller i tydliga konkurrensfördelar för företaget. Stödet är en delfinansiering där Västra Götalandsregionen täcker kostnaderna för insatser utförda av forskningsinstitut och högskola med forskningskompetens som företagen valt att samarbeta med. Företaget måste svara för en lika stor del, kontant eller i form av egen arbetstid, [3].

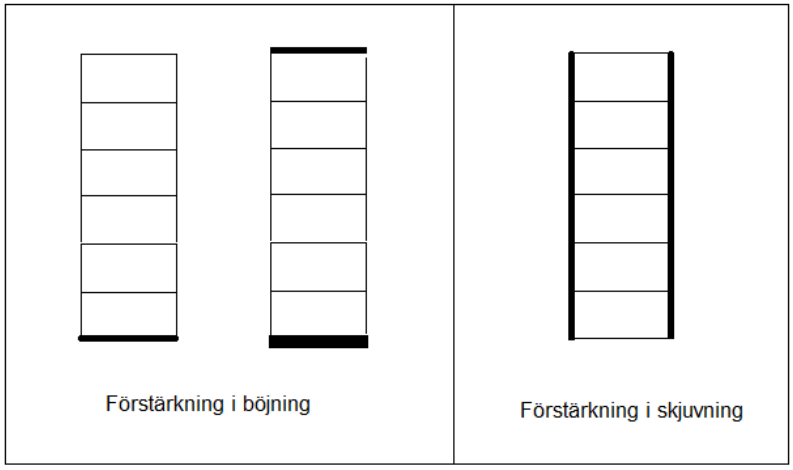
Projektet grundar sig på att Fristad Bygg bygger med korslaminerade skivor, massivträ, ett relativt nytt material på byggmarknaden men på stark frammarsch sista årtiondet. Materialets egenskaper tillåter att massivträ används i konstruktioners bärande stomme såsom balkar, pelare, väggar och bjälklag. Hela den bärande stommen kan därmed konstrueras med ett enda material som kan skräddarsys på fabriken, fig.1.

Figur 1 Montage av massivträelement i en av Fristad Bygg:s projekt.

Massivträmaterial modifierat med en textilmatta av komposit i limfogarna kan förbättra massivträets mekaniska egenskaper med avseende på styrka både när det gäller böj- och skjuvegenskaperna. Den modifierade massivträskivan skulle därmed vara kapabel att fungera tillfredställande vid stora horisontella belastningar. Den främsta påverkan i jordbävningsområden på byggnaderna är just stora, horisontella krafter och därför är stommens globala skjuvegenskaper vid jordbävningslast av ytterst vikt.

När fibrer och matris kombineras i förstärkningsmaterial kallas det för komposit. Kombinerandet av material syftar till att öka styrka och seghet och samtidigt reducera vikten på det förstärkta materialet. Vanligaste förstärkningsmaterialet är FRP (fiber reinforced plastics) för träprodukter. FRP är uppbyggd genom att ett fibermaterial t ex glas, kol, lin eller jute bäddas i en matris av epoxi-, polyester- eller vinylesterlim. Genom att nyttja fogarna mellan lamellerna och placera förstärkningsmatta där kan en modifierad förstärkt massivträskiva framställas med lägre vikt och förhöjda seghetsegenskaper. En sådan skiva skulle kunna nyttjas i katastrofområden för permanenta bostäder med alla fördelar som ett industrialiserat sätt att bygga innebär.

Vanligtvis sker förstärkningen genom att limma kompositen på dragen underkant eller/och tryckt överkant på balk som ska förstärkas i böjning eller längs balken i området för maximal tvärkraft då balkens skjuvegenskaper ska förbättras, se fig 2. Förstärkning har främst utförts på limträbalkar där lamellernas har fibrerna riktade i samma riktning.



Figur 2 Traditionell förstärkning av limträbalkar.

En samling av egenskaperna på de vanligaste fibrerna som används i förstärkning av träelement visas i Tabell 1 och 2.

Tabell 1 Egenskaper på de vanligaste fibrerna, [4].

	E_{axial} GPa	$\sigma_{tensile}$ GPa	$\varepsilon_{elongation}$ %	Densitet g/cm^3	Pris €/kg	Fuktabsorption/ andra egenskaper %
E-glass	76	2	2.6	2.6	1.5-3	-/känslig mot fukt beroende av matris
Kolfiber High modulus	380	2.4	0.6	1.95	20-60	-/resistent mot kemiska lösningar, motståndskraftig mot utmattning, kryper
Kolfiber High strength	230	3.4	1.1	1.75	20-60	
Aramid (kevlar)	130	3	2.3	1.45	20-35	-/känslig mot hög temperatur

Tabell 2 Egenskaper på de vanligaste organiska fibrerna, [5].

Typ	Modulus (GPa)	Draghållf.et (MPa)	Densitet (g/cm^3)	Specifik modulus	Specifik hållfasthet
Lin	50-70	500-900	1.4–1.5	~41	~480
Hampa	30-60	300-800	1.48	~30	~370
Jute	20-55	200-500	1.3–1.5	~27	~250

De europastandarderna som står för klassificering och testning av lim (matriser av fenol och aminoplast) i träkonstruktioner är SS-EN 301 respektive SS-EN 302. Enligt dessa klassas limmer till:

Typ I – limmer som tål utomhusbruk och temperatur över 50°C

Typ II – limmer som kan nyttjas i uppvärmda lokaler och ventilerade byggnader men bör vara klimatskyddade; limmerna tål kortvarigt utomhusbruk men tål inte länger exponering av klimat och temperaturer över 50°C.

Skjuvprovning av limfogar sker enligt europastandard SS-EN 392 och delaminering enligt SS-EN 391.

Böj- och skjuvegenskaperna på limmade träbalkar sker enligt SS-EN 408:2010+A1:20 för Konstruktionsvirke och limträ – Bestämning av vissa fysikaliska och mekaniska egenskaper, bl a. lokal E-modul, global E-modul, böjhållfasthet och skjuvhållfasthet. Notera att alla standarder för provning av konstruktionselement är framtagna för limträelement och tillämpas på massivträ. Specifik standard för provning av massivträelement är under framtagningsarbete.

2 **Del 1**: Skjuvning och delaminering av fiberförstärkt massivträfog

Målet med försöken var att hitta en lämplig komposit för att förstärka massivträskivor. Med lämplig komposit menas ett material som inte bara förstärker träprodukten utan även förädlar dess hållbarhetsegenskaper.

Inom ramen för ett examenasarbete på byggingenjörsprogrammet på Ingenjörshögskolan i Borås undersöktes glas-, kol- och jutefibrer i kombination med de vanligaste matrismaterialen epoxilim, enkomponents polyuretanlim och sojabönsolja, se fig 3.

Figur 3 Glasfiber-, jutefiber- och enkelriktadväv av kolfiber i försöken, [1].

Kombinationen glas-epoxilim är en klassiker i förstärkningssammanhang men pga. glasets miljöpåverkan då den värms till ca 1600°C vid framställning och epoxins allergiframkallande egenskaper har andra kombinationer av fibrer och matriser också provats. Den andra mycket bra fungerade komposit varit kolfiber med polyuretanlim (PU). Ur miljösynpunkt framställs kolfibern genom en högtemperaturprocess på ca 3000°C; PU består av det mycket allergiframkallande beståndsmaterialet isocyanat, [6], [7] som efter att ha kommit i kontakt med fukt under produktionsfasen bildar en kemisk inert produkt. I försöken denna komposit är lättast att applicera och får de bästa förstärkningsegenskaperna men p.g.a. hållbarhetsaskpekterna undersöks en annan komposit också: jutefibrer med sojabönaolja. Mekaniska egenskaperna

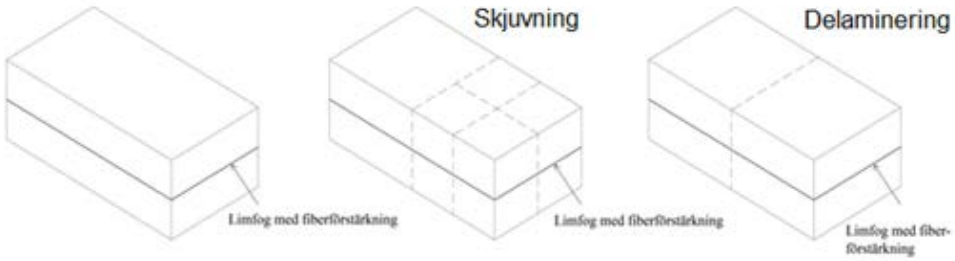
på jute är i paritet med glassfibrerna och den är naturfiber medan sojabönaoljan är en av de mest hållbara matriserna av trekomponentstyp. Även om i försöken visat sig denna komposit inte komma upp i lämpliga förstärkningsvärden det planeras ytterligare undersökningar för att modifiera komponentproportionen i sojabönsolja. Detta planeras i ett framtida examensarbete i samarbete med Resursåtervinningsgruppen och Komposit och polymergruppen på Ingenjörshögskolan.

Nedan visas upplägg av provkroppar och kombinationer fibrer-matriser som ingår i försöken, se Tabell 4 och figur 4, 5:

Tabell 4 Provningsplan med notation

Fiber/Matris	**Sojabönsolja**		**PU**		**Epoxi**	
Jutefiber	4st skjuv 3st delam	**SL**	4st skjuv 3st delam	**PL**	4st skjuv 3st delam	**EL**
Glasfiber	4st skjuv 3st delam	**SG**	4st skjuv 3st delam	**PG**	4st skjuv 3st delam	**EG**
Kolfiber	4st skjuv 3st delam	**SK**	4st skjuv 3st delam	**PK**	4st skjuv 3st delam	**EK**
Ingen fiber	4st skjuv 1st delam	**S**	4st skjuv 1st delam	**P**	4st skjuv 1st delam	**E**
Totalt 48 st kroppar för skjuvprovning (SS-EN 392) & 30 st för delaminering enligt (SS-EN 391)	Totalt: 16 skjuv 10 delam		16 skjuv 10 delam		16 skjuv 10 delam	
KLH:s egen limfog	3 st skjuv					

Figur 4 Massivträprovkroppar med måtten 100x75x190 mm. Fyra lameller där i mittersta fogen läggs förstärkningsmaterialet, [1].



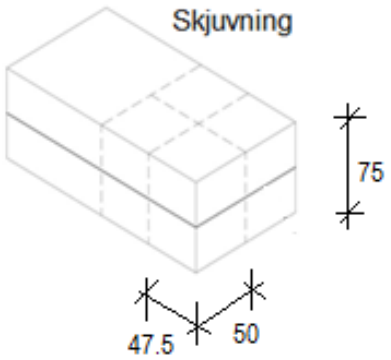
Figur 5 För varje fiber-matriskombination provas 4 skjuvprover och 3 delamineringsprover.

För att utvärdera de olika kompositernas förstärkning i limfogen skjuvprovning och delaminering genomfördes enligt europastandard SS-EN 392 respektive SS-EN 391. Dessa standarder används för limfogars provning i limträ. Utöver skjuv- och delamineringsprovningar genomfördes tre försök på massivträmaterialet som användes i mätningarna. Man undersökte m.a.o. fabrikslimfogarnas styrka i skjuvning och delaminering.

Antal provkroppar av varje kompositförstärkning ger inte resultat som är statistiskt säkerställd. Målet var istället att få fram tendenser och hitta en lämplig/hållbar komposit som fungerar bra ihop med massivträ.

2.1 Skjuvförsök av limfog

På varje kombination fiber-matris har 4 skjuvprover utförts, med måtten 47,5x50x75, se figur 6. Provkropparna producerades på Ingenjörshögskolan med massivträ levererat av Fristad Bygg.



Figur 6 Provkroppen i skjuvförsöken.

För varje provkropp följdes en genomarbetad rutin: sprayning av ytor med vatten för PU, blandning av lim för epoxi (tvåkomponents lim) och sojabönsolja (trekomponents lim), påstrykning på träets kontaktytor, fiberväven läggs på och ytterligare lim påstrykes så att fibern är genomvätt. Provkroppen placeras i pressen och trycks med 0.6 MPa på 60°C. För sojabönsojan och epoxilimmet hölls trycket i 1h medan för PU 10 minuter. Provkropparna efterhärdas i 7 dygn, [1].

Provkropparna efterhärdades i klimatrum med 65% fuktighet och 20°C temperatur. Testerna genomfördes på SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut i Borås. Testerna kördes på en Instron 1253 maskin där lasten påfördes i jämn takt så att brott inträffade inom 20 s i enlighet med standarden. Det åstadkoms med deformationsstyrning och deformationen mättes mellan maskinens skjuvdon. Efter skjuvprovningen slipades träytorna och vikt, volym, densitet och fuktkvot mättes för att försöka hitta samband mellan brottyp och egenskaper på träet.

I Tabell 5, 6 och 7 presenteras de medelvärden på hållfasthet, densitet och fuktkvot för provkropparna. Detaljerat försöksresultat presenteras i bilaga 2.

Tabell 5 Medelvärden på skjuvhållfastheten, [1].

Fiber/Matris	Sojabönsolja (MPa)	PU (MPa)	Epoxi (MPa)
Jutefiber	0,26	3,2	2,9
Glasfiber	0,95	1,3	2,1
Kolfiber	1,28	2,5	1,7
Ingen fiber	0,3	2,2	2,1
KLH:s egen limfog	1,6		

Tabell 6 Medelvärden för densiteten hos provkropparna, [1].

Fiber/Matris	Sojabönsolja (kg/m^3)	PU (kg/m^3)	Epoxi (kg/m^3)
Jutefiber	450	497	437
Glasfiber	459	434	432
Kolfiber	478	501	421
Ingen fiber	425	528	428

Tabell 7 Medelvärden på fuktkvoten hos provkropparna, [1].

Fiber/Matris	Sojabönsolja (%)	PU (%)	Epoxi (%)
Jutefiber	12,6	11,9	12,6
Glasfiber	13,7	12,6	12,6
Kolfiber	12,5	11,9	11,8
Ingen fiber	12,0	12,1	11,9

Av tabell 5 framkommer att PU limmet är överlägset starkast tätt följt av epoxilimmet för de flesta fibertyperna. Jämfört med KLH:s egen limfog är kompositer baserade på PU lim därmed lämpliga att användas i

förstärkningssyfte. Detta understryks både av densitets- och fuktkvotsmätningen i trämaterialet som syftar på ett starkt trämaterial. Densiteten visar sig vara högst och fuktkvoten lägst för provkroppar tillverkade med PU lim. Detta kan väl förklara de övervägande limbrotten som inträffade i dessa provkroppar, se tabell 8.

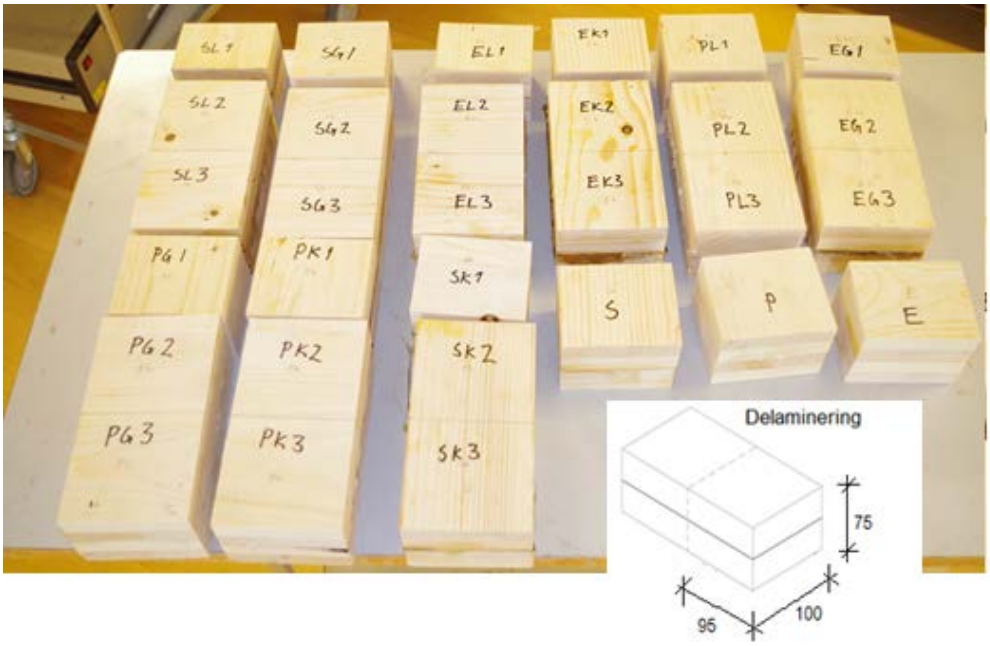
Tabell 8 Brottyper i provkropparna, [1].

Fiber/Matris	Sojabönsolja	PU	Epoxi
Jutefiber	Enbart limbrott	Övervägande limbrott	Övervägande limbrott
Glasfiber	Enbart limbrott	Delvis limbrott Delvis träbrott	Delvis limbrott Delvis träbrott
Kolfiber	Delvis limbrott Delvis träbrott	Delvis limbrott Delvis träbrott	Enbart limbrott
Ingen fiber	Enbart limbrott	Övervägande limbrott	Delvis limbrott Delvis träbrott

2.2 Delaminering av limfog

På varje kombination fiber-matris har 3 delamineringsprover utförts med måtten 95x100x75 mm, se figur 7. Dessutom har provkroppar utan fibrer också provas för att undersöka enbart matrisens beskaffenhet under delamineringsförhållanden. Standarden SS-EN 391 används, metod B som avser klimatklass 1 och 2 samt limtyp I som är fuktbeständigt.
Enligt provmetoden genomgår kropparna en eller två testcykler. Delamineringen mäts som delamineringslängd i förhållande till total limfog i tvärsnittet.

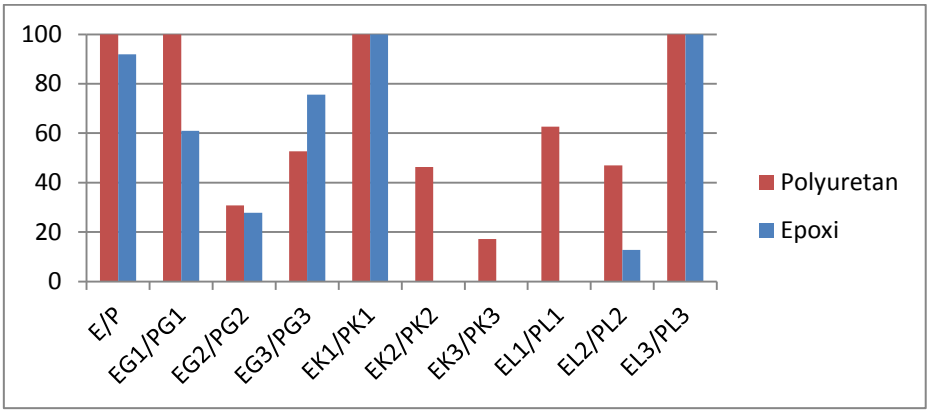
Varje testcykel består av uppfuktning i vatten, tryck i tryckkärl och torkning vid hög temperatur; en slags åldringsprocess som ger spänningar i limfogarna eller i träet. Tillåten delaminering är 4 % efter första cykeln och 8 % efter en eventuell andra cykel, som genomförs om inte kravet för den första uppfylls. Utvärdering av försöksresultaten sker enligt SS-EN 386 enligt funktions- och produktionskrav för limträkonstruktioner.



Figur 7 Delamineringsprov.

Resultaten för provkroppar med epoxi och PU visas i figur 8. Provkroppar med sojabönsoljan delaminerades helt, troligen beroende på icke fullständig härdningsprocess. Kravet för delaminering på 4 % klaras av bara av fåtal provkroppar förstärkta med kolfibrer och linfiber dränkt i epoximatris. Bilder på provkropparna före och efter delaminering presenteras i bilaga 1.

Limfogars notationer:E – epoxi utan fibrer, P - PU-lim utan fibrer, EG – epoxi med glasfiber, PG – PU-lim med glasfiber, EK – epoxi med kolfiber, PK – PU-lim med kolfiber, EL - epoxi med jutefibrer, PK – PU lim med jutefiber.



Figur 8 Resultat för delamineringsförsök.

3 **Del 1** Diskussion och slutsats

PU-limmet visar sig i kombination med jute- och kolfiber vara den starkaste kompositen i försöken. Skjuvhållfasthetsvärdena tyder på att limmet vidhäftar bra gentemot träytan och delamineringsresultaten tyder på att det tål rätt bra ´åldringsprocessen ´motsvarande utomhusmiljö. Arbetsrutinerna är också enkla då det är en enkomponents lim. PU i kombination med juteväv kan vara förstärkningskompositen som kan ge det mervärde som eftersöktes i projektets frågeställning i form av massivträets hållbarhet. Några förbättringsidéer dock som uppkom under arbetets gång presenteras i det följande.

Proportionering och härdningsproceduren för sojabönsoljan måste undersökas i mer detalj. Det var det mest hållbara alternativet bland försökets lim men det förutsätter att den uppnår ett visst hållfasthetsvärde och utstår med delamineringsprocessen enligt standardens krav. Ett nytt examensarbete föreslås med målet att hitta lämplig sammansättning på sojabönsoljan i kombination med jutefibrer för just förstärkning av massivträprodukter.

Påförning av lim ska ske nästintill omedelbart efter träetytans beredning, sågning, slipning. En av orsakerna att provkropparna inte stod pall för det tuffa delamineringsprovet kan vara just denna tidförskjutning mellan träets bearbetning och limpåföring. Mängd påfört lim på mm^2 ska mätas upp för att säkerställa att limfogen inte blir för tunn.

Delaminering enligt metod A kanske vore mer rimligt att användas för massivträprodukter då dem sällan placeras i utomhusmiljö utan isolering eller/och fasadmaterial. Metod A visserligen har flera cykler jämfört med B men delamineringskraven är mildare; detta om utomhusbruk förutses. För utpräglat inomhusbruk metod C kan tillämpas.

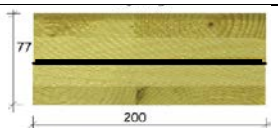
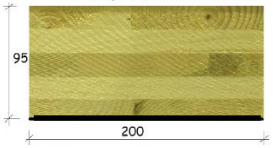
4 **Del 2**: Böj- och skjuvegenskaper i fiberförstärkt massivträelement

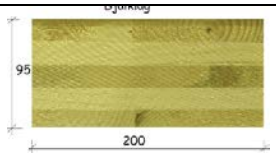
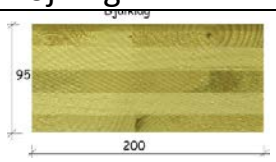
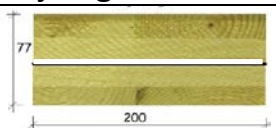
Massivträelement har fördelen att kunna utformas som pelare, balkar, väggskivor och bjälklagselement och därmed kunna bygga upp hela stommen i en byggnad. Vid planering av försöken för böj- och skjuvegenskaperna i fiberförstärkta massivträelement beaktades två typer av element: ett s.k. bjälklagselement som representerar bjälklag och balkar och där belastningen sker vinkelrätt fibrerna och ett väggbalkselement som representerar väggskivor och som belastas parallellt med yttre fibrerna i massivträelementets plan.

Eftersom de två typen av element jobbar principiellt på åtskilda sätt har detta föranlett placering av förstärkningskompositen i olika läge i tvärsnitten. De undersökta elementen tvärsnitt och mått, förstärkningens placering i tvärsnittet visas i tabell 9.

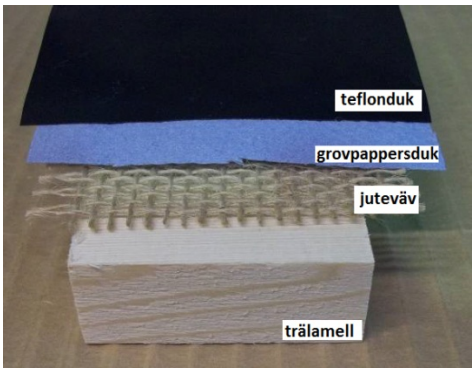
Del 2 av rapporten handlar om förstärkta massivträelement med jutefiber kombinerat med PU-lim (Purbond HB S709), kompositen som visade goda förstärkningseffekter i limfogen. Försöken utfördes på bjälklagselement och väggbalkar enligt följande sammanfattningstabell.

Tabell 9 Massivträelementtyp och förstärkningens placering.

Förstärkningens läge / Referens	**Bjälklag**	**Väggbalk**
I förstärkning i mitten	 L=1332 mm,6 st bxh 200x77 mm^2 Böjning	 L=500 mm, 6 st bxh 77x200 mm^2 Skjuvning
II förstärkning utanpå	 L=1510 mm, 6 st bxh 200x95 mm^2 Böjning	 L=3104 mm, 6 st bxh 95x200 mm^2 Böjning

Förstärkningens läge / Referens	**Bjälklag**	**Väggbalk**
III referens ej tryckta	 L=1510 mm, 5 st bxh 200x95 mm^2 Böjning	 L=3104 mm, 5 st bxh 95x200 mm^2 Böjning
IV referens tryckta (förtrycks med 0,8 MPa i 150 min)	 L=1510 mm, 5 st bxh 200x95 mm^2 Böjning	 L=3104 mm, 6 st bxh 95x200 mm^2 Böjning
V referens tryckta (sågas och limmas utan väv med PUR-lim med 0,8 MPa i 150 min)	 L=1332 mm, 5 st bxh 200x77 mm^2 Böjning	 L=500 mm, 6 st bxh 77x200 mm^2 Skjuvning

För att skydda på pressmaskinen under limmets härdning användes en teflonduk. Denna teflonduk fördröjde härdningsprocessen när förstärkningen applicerades på utsidan av tvärsnittet, detta på grund av den ensidiga härdningen. För att ha samma härdningstid även på dessa provkroppar appliceras en grovpappersduk, se figur 9, [2].



Figur 9 Uppställning vid utanpåliggande förstärkning, [2].

4.1 Bestämning av presstid och presstryck

Förstärkningen på elementen föregicks av en pilotstudie för att bestämma presstryck och presstid för praktisk användning i fullskalaförsöken. Av pilotstudien framkom att presstid på 150 minuter och presstryck på 0.8 MPa är lämpligt att använda i försöken. Resultaten är i linje med PU-limmets datablad där det rekommenderas presstryck mellan 0.6-1.0 MPa och presstid på 170 minuter. Anpassning av tid och tryck sker därmed med hänsyn till förstärkningens närvaro.

Effekten av presstid och presstryck på hållfastheten undersöktes med destruktiva skjuvprovningar enligt SS-EN 391 och med icke destruktiv mikroskopiundersökning. Presstrycken (0,6 MPa och 0,3 MPa) och presstiderna (170, 150 och 60 min) som testades framgår av tabell 4.1.

Tabell 10: Provkroppar för undersökning av presstider och presstryck, [2].

Antal provkroppar i skjuvning					
		Presstryck A 0,6 MPa		Presstryck B 0,3 MPa	
Provkropps nr	Presstid [min]	Antal	Benämning	Antal	Benämning
1	170	8	A1	8	B1
2	150	8	A2	8	B2
3	60	8	A3	8	B3
4	150 (utan textil)	8	A4	8	B4
5	60 (utan textil)	8	A5	-	-

Skjuvprovning utfördes på tre provkroppar för varje presstid/presstryck kombination. Det finns indikationer på att presstiden för provkropparna: A3, B3 och A5 (presstid 60 min) är för kort.

Tabell 11 Brottlast för olika presstider och presstryck, [2].

Skjuvprovning längs fibrerna						
Prov	**Brottlast**	**Hållfasthet**		**Prov**	**Brottlast**	**Hållfasthet**
(nr)	**(kN)**	**(MPa)**		**(nr)**	**(kN)**	**(MPa)**
A1.2	19,01	8,10		B1.1	8,51	3,74
A1.3	18,15	7,93		B1.2	15,23	6,53
A1.4	13,39	5,64		B1.3	10,99	4,64
Medelvärde	**16,85**	**7,23**		**Medelvärde**	**11,58**	**4,97**
A2.1	17,76	7,78		B2.1	6,07	2,63
A2.2	11,87	5,07		B2.2	5,92	2,52
A2.3	11,16	4,64		B2.3	11,88	5,24
Medelvärde	**13,60**	**5,83**		**Medelvärde**	**7,96**	**3,47**
A3.1	3,49	1,45		B3.1	7,98	3,44
A3.2	2,51	1,05		B3.2	5,72	2,42
A3.3	8,10	3,35		B3.3	6,69	2,82
Medelvärde	**4,70**	**1,95**		**Medelvärde**	**6,80**	**2,89**
A4.1	20,08	8,94		B4.1	22,39	9,58
A4.2	20,26	8,91		B4.2	13,15	5,67
A4.3	20,37	8,95		B4.3	20,14	9,15
Medelvärde	**20,24**	**8,94**		**Medelvärde**	**18,56**	**8,14**
A5.1	2,93	1,24				
A5.2	1,49	0,65				
A5.3	2,91	1,22				
Medelvärde	**2,44**	**1,03**				

Mikroskopiundersökning

I undersökningen ingick 9 olika fogar numrerade A1 till A5 och B1 till B4. Ingen statistiskt signifikans går det att utläsa men väl riktlinjer till val av presstid och presstryck. Meningen med mikroskopiundersökningen var att hitta ett verktyg för att bestämma limfogens kvalitet och kraftöverföringsförmåga, dvs. att hitta ett kvantifierbart mått på limfogens kvalitet med en icke förstörande provning. Mikroskopiundersökningen och skjuvprovningen utfördes på SP Trä i Borås och i Stockholm. Följande iakttagelser kunde noteras i jämförelse mellan mikroskopi och skjuvning, se tabell 12.

Tabell 12 Jämförelse av mikroskopiundersökning och skjuvprovning.

Limfog	**Mikroskopi**	**Brottlast** **kN**	**Skjuvhåll-fasthet MPa**
A1 170/0.6 textil	Fogen har **tjocklek** 500-650 µm. **Kaviteter** i limmet är många och stora. Bra penetration av limmet i träet syns. Tunna fiber syns (förstärkning) mindre än 300 µm	**16,85**	**7,23**
A2 150/0.6 textil	Fogen har **tjocklek** 700-950 µm. **Porositeten** i fogen är större än i A1	**13,60**	**5,83**
A3 60/0.6 textil	**Limfogstjocklek** varierande 550-800 µm, mycket lim i träet syns, många mindre kaviteter i limmet, jämfört med A1 och även A2, stora **kaviteter** finns också. Fiber syns i mitten 300-400 µm	**4,70**	**1,95**
A4 150/0.6 Utan textil	Det här är den tunnaste fogen av alla i undersökningen 100-150 µm, mycket lim syns i träet, **djup penetration av limmet** upp till 10 cellrader. Stor limmängd, och **högt presstryck**. **Kaviteter** syns, men mindre pga. den tunna limfogen.	**20,24**	**8,94**
A5 60/0.6 Utan textil	Limfog med **tjocklek** 400-500 µm, fogen är tunnare än A1, A2 och A3. Stora, **långa kaviteter** finns, större än A1, A2, A3 och A4	**2,44**	**1,03**

Limfog	Mikroskopi	Brottlast kN	Skjuvhåll-fasthet MPa
B1 170/0.3 textil	Limfog med **tjocklek** 650-720 µm, Fibrerna syns tydligt med tjocklek ca 400 µm, många **små kaviteter** utanför fibern.	**11,58**	**4,97**
B2 150/0.3 textil	**Tjockare** limfog än B1 800-1000 µm, tjockare än någon av A fogar**, stora långa kavitete**r, större än i A gruppen, lim i träet på 10 cellers djup. **Lågt presstryck**.	**7,96**	**3,47**
B3 60/0.3 textil	Det här är den **tjockaste** fogen med tjocklek större än 1 mm. Liknar fogen B3 men är tjockare.	**6,80**	**2,89**
B4 150/0.3 Utan textil	Limfog är tunn, liknar A4 men upp till 150 µm, **långa kaviteter** lite större än A4 mindre lim i träet än A4, ingen matta	**18,56**	**8,14**

Slutsatser

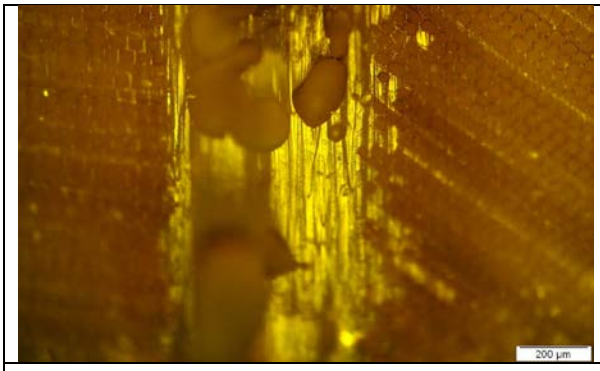
Av skjuvprovningen framkommer att starkast blir A4, A1 och B4, B1 i var sin grupp, dvs. oavsett presstryck en lång presstid utan och med textilförstärkning leder till goda mekaniska egenskaper i limfogen. Limfogens mekaniska egenskaper verkar vara mer känsliga för presstid än presstryck. Minskas presstiden från 170´till 60´ (A1, A3) återstår 30% av fogens kapacitet, (4.7/16.85=0.27, dvs. 30%); halveras presstrycket (A1, B1) så är det ca 70% av fogens kapacitet kvar (11.58/16.85=0.68, dvs. 70%).

Presstidens längd kan vara särskild viktig vid förstärkta limfogar där fogarna är tjockare och kombination med ett lämpligt presstryck är nödvändig för en jämn kvalitet i limfogen. Det går inte att dra statistiskt signifikanta slutsatser men limfogarna med förstärkning visar tendens för att vara svagare vid kort presstid än vid lågt tryck, (A3 jmf B3). Mikroskopistudien visar att vid kort presstid hade proverna i grupp B störst tjocklek och största kaviteter. Denna morfologi av fog kan indikera dålig mekanisk prestanda och sämre långtidsegenskaper som krypning och beständighet.

Båda presstrycken 0.6 och 0.3 MPa var lägre än det trycket på 0.8 MPa, som gav bästa fogarna och som användes i försöken. I litteraturen finns redovisad ett rekommenderat presstryck mellan 0.6-1 MPa. Högt presstryck och kort presstid kan leda till lägre kraftöverföringskapacitet i fogen i kombination med svagt virke. I våtlimmade fogar nämns dessa processparametrar i kombination med låg densitet och med hög fuktkvot att leda till lägre styrka, [8]. Fenomenet förklaras med att för högt presstryck trycker ut limmet ur limfogen medan för kort presstid gör inte limfogen tillräcklig tunn m.h.t PU-limmets krav på högst 0,3 mm tjocklek. Dessa parametrar ska tillämpas och optimeras på adekvat sätt på fiberförstärkta limfogar.

Av mikroskopiundersökningen framkommer att:

-limfogtjockleken har en bra korrelation med mekaniska egenskaper då tunnaste limfogen A4, B4 var också starkast: ju tunnare limfog desto bättre kraftöverföring i limfogen. Detta gäller även för textilförstärkta prover: A1, B1 tunnast och starkast.

	
Limfog A1-tjocklek 500-650 µm	**Limfog B1**- tjocklek 650-720 µm

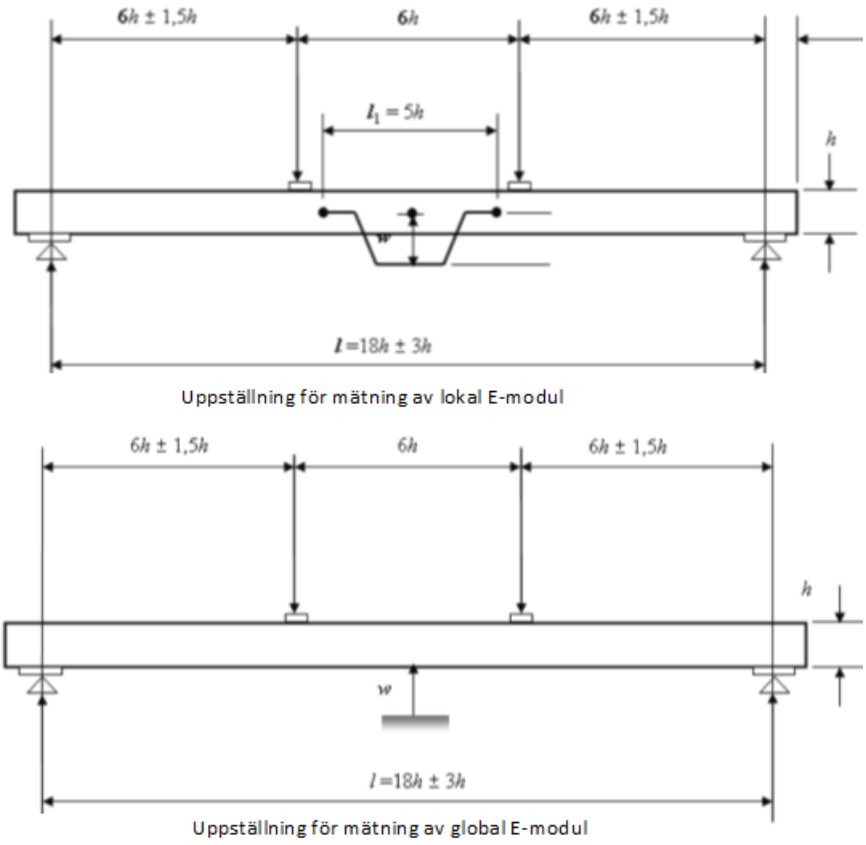
-observationer om stora och långa kaviteter kopplas till kort presstid och lågt presstryck (som i fogen B3 och till en viss del A3 och A5) och tyder på låg kraftöverföringsförmåga i fogen. Fogarna B3 och A3 hade lägsta hållfasthet som tyder på att i båda fallen kort presstid ger sämre fogar oavsett presstryck.

-djup penetration av limmet på 10 cellraders djup noteras för B2 och A4 dvs. prover med samma presstid, 150´.

4.2 Böjning och skjuvning av massivträelement

Statiska försök görs för att bestämma förstärkningens effekt enligt SS-EN 408:2010+A1:20. Utöver böj-, och skjuvhållfastheten bestäms lokala och globala E-modul på elementen, enligt försöksuppställningen i figur 9.

För global E-modul mäts den totala mittnedböjningen på balkens hela spännvidd och innehåller därmed inverkan av skjuvdeformationer och ihoptryckning vid upplagen; dess värde förväntas vara lägre än lokala E-modulens. Vid lokal E-modul mäter man mittnedböjningen på ömse sidan av balken inom ett område på 5 gånger balkens höjd, se figur 10, [2]. Försöken utförs deformationsstyrda med en hastighet som medförde att max last uppnådes inom 300 s, [9], [10].



Figur 10 Testuppställning enligt SS EN 408:2010+A1:20.

I tabell 13, 14 och 15 presenteras resultaten för bjälklagselement förstärkta i underkant och ej tryckta och förtryckta referensprovkroppar. I tabell 16 och 17 presenteras resultaten för bjälklagselement förstärkta i mitten och förtryckta referensprovkroppar. I tabell 18, 19, och 20 presenteras resultaten för väggbalkar förstärkta i under- och överkant och ej tryckta och förtryckta referensprovkroppar.

Bjälklagselementen och dessa väggbalkar belastades i böjning med två punktlaster på balkens sjättedelspunkt, enligt SS-EN 408:2010+A1:20: M_{max}=FL/6.

I tabell 21 och 22 presenteras resultaten för väggbalkar förstärkta i mitten och förtryckta referensprovkroppar. Dessa väggbalkar testades med en punktlast i mitten av balken med målet att få skjuvbrott i balken: M_{max}=FL/4, V=F/2.

Tabell 13 Resultat för bjälklagselement förstärkta i underkant.

Provkropp	F_{MAX}	Lokal nedböjning	Mittnedböjning	Densitet	Global E-modul	Lokal E-modul	Böjspänning	Brottyp
	kN	mm	mm	kg/m^3	MPa	MPa	MPa	
M	34,26	0,87	8,92	406	7 053	8 668	28,13	Drag
N	41,30	0,96	9,87	391	7 039	8 789	33,77	Drag
O	35,27	0,87	9,24	383	6 930	8 780	28,75	Drag
P	32,84	0,85	9,17	394	6 436	8 346	26,68	Drag
Q	38,42	1,06	10,71	387	6 408	8 761	31,31	Drag
R	42,96	0,80	8,15	410	8 706	10 161	25,21	Drag
Medel	37,51	0,90	9,34	395	7 095	8 918	28,98	
			Standardavvikelse		840	632	3	
			CoV		0,12	0,07	0,11	

Tabell 14 Resultat för referenskroppar till bjälklagselement förstärkta i underkant – ej tryckta.

Provkropp	F_{MAX}	Lokal nedböjning	Mittnedböjning	Densitet	Global E-modul	Lokal E-modul	Böjspänning	Brottyp
	kN	mm	mm	kg/m^3	MPa	MPa	MPa	
R11	35,26	0,54	5,62	399	7 802	9 868	28,83	Drag
R12	49,25	0,51	4,99	432	8 689	10 462	39,79	Drag
R13	31,64	0,62	6,49	398	6 714	8 713	25,89	Drag
R14	35,02	0,63	6,67	387	6 738	8 790	28,26	Drag
R15	35,62	0,57	5,64	408	7 518	9 068	28,83	Drag
Medel	37,36	0,57	5,88	405	7 492	9 380	30,32	
			Standardavvikelse		822	758	5	
			CoV		0,11	0,08	0,18	

Tabell 15 Resultat för referenskroppar till bjälklagselement förstärkta i underkant – tryckta.

Provkropp	F_{MAX}	Lokal nedböjning	Mittnedböjning	Densitet	Global E-modul	Lokal E-modul	Böjspänning	Brottyp
	kN	mm	mm	kg/m^3	MPa	MPa	MPa	
18	39,34	0,8283	9,4600	405	7333	9901	31,80	Drag
19	40,19	0,9158	9,4900	388	7463	9325	32,74	Drag
20	40,60	0,8987	8,9900	409	8019	9619	32,75	Drag
21	41,41	0,9556	9,9900	406	7239	9193	33,52	Drag
22	35,75	0,7547	7,7800	425	8155	9899	29,04	Drag
Medel	39,46	0,8706	9,1420		407	7642	9587	31,97
			Standardavvikelse		417	324	2	
			CoV		0,05	0,03	0,05	

Tabell 16 Resultat för bjälklagselment förstärkta i mitten.

Provkropp	F_{MAX}	Lokal nedböjning	Mittnedböjning	Densitet	Global E-modul	Lokal E-modul	Böjspänning	Brottyp
	kN	mm	mm	kg/m^3	MPa	MPa	MPa	
A	31,00	0,53	8,47	422	7 760	10 183	38,33	Tryck/drag
B	20,52	0,65	8,72	364	6 114	6 631	26,39	Drag
C	18,84	0,54	7,06	396	6 847	7 254	22,73	Drag
D	20,21	0,55	7,73	405	6 828	7 737	26,33	Drag
E	19,75	0,47	6,93	388	7 452	8 795	24,92	Drag
F	27,40	0,66	9,72	407	6 809	7 850	35,54	Drag
Medel	22,95	0,57	8,11	397	6 968	8 075	29,04	
			Standardavvikelse		575	1 256	6	
				CoV	0,08	0,16	0,22	

Tabell 17 Resultat för referenskroppar till bjälklagselment förstärkta i mitten - tryckta.

Provkrop	F_{MAX}	Lokal	Mittnedböjn	Densite	Global E-	Lokal E-	Böjspänni	Brotty
	kN	mm	mm	kg/m^3	MPa	MPa	MP	
1	26,23	0,6998	9,0300	399	7025	7321	31,25	Drag
2	23,52	0,5836	8,5700	417	6753	7931	28,07	Drag
3	28,00	0,6662	9,6400	383	7131	8402	33,63	Drag
4	26,92	0,6018	9,0400	353	7248	8845	32,25	Drag
5	31,47	0,7682	10,7600	396	7090	8072	37,46	Drag
Medel	27,23	0,6639	9,4080	390	7050	8114	32,53	
			Standardavvikelse		184	566	3	
				CoV	0,03	0,07	0,11	

Tabell 18 Resultat för väggbalkar förstärkta i under- och överkant.

Provkropp	F_{MAX}	Lokal nedböjning	Mittnedböjning	Densitet	Global E-modul	Lokal E-modul	Böjspänning	Brottyp
	kN	mm	mm	kg/m^3	MPa	MPa	MPa	
S	23,77	1,62	15,55	435	4 904	5 695	19,52	Drag
T	13,29	1,24	12,24	393	4 016	4 769	10,92	Drag
U	27,17	1,68	16,22	451	4 639	5 380	22,27	Drag
V	19,82	1,80	18,04	367	3 952	4 812	16,17	Drag
W	17,14	2,10	20,78	400	4 500	5 397	13,94	Drag
X	20,79	2,02	17,98	412	4 278	4 661	17,19	Drag
Medel	20,33	1,74	16,80	410	4 382	5 119	16,67	
			Standardavvikelse		369	425	4	4
			CoV		0,08	0,08	0,24	0,24

Tabell 19 Resultat för referenskroppar till väggbalkar förstärkta i underkant – ej tryckta.

Provkropp	F_{MAX}	Lokal nedböjning	Mittnedböjning	Densitet	Global E-modul	Lokal E-modul	Böjspänning	Brottyp
	kN	mm	mm	kg/m^3	MPa	MPa	MPa	
R1	17,23	1,58	14,61	411	4 248	4 743	13,67	Drag
R2	20,72	1,84	17,78	400	4 282	4 894	16,55	Drag
R3	21,25	1,78	16,26	404	4 735	5 253	17,03	Drag
R4	24,80	2,15	20,77	373	4 324	5 039	19,90	Tryck/Drag
R5	26,96	2,09	19,94	386	4 514	5 211	21,72	Drag
Medel	22,19	1,89	17,87	395	4 421	5 028	17,77	
			Standardavvikelse		204	214	3	7
			CoV		0,05	0,04	0,18	0,18

Tabell 20 Resultat för referenskroppar till väggbalkar förstärkta i underkant – tryckta.

Provkropp	F_{MAX}	Lokal nedböjning	Mittnedböjning	Densitet	Global E-modul	Lokal E-	Böjspänning	Brottyp
	kN	mm	mm	kg/m^3	MPa	MPa	MPa	
12	23,3	1,7125	16,4300	453	5128	5991	18,77	Drag
13	15,8	1,5436	14,0200	391	4052	4472	12,70	Drag
14	20,8	2,0559	19,2600	412	3880	4455	16,83	Drag
15	23,2	2,1685	19,8300	432	4222	4725	18,75	Drag
16	24,3	1,9552	18,6600	427	4761	5482	19,53	Drag
17	22,7	1,8257	17,0100	414	4871	5505	18,37	Drag
Medel	21,7	1,8769	17,5350	422	4486	5105	17,49	
			Standardavvikelse		438	527	3	
			CoV		0,10	0,10	0,16	

Tabell 21 Resultat för väggbalkar förstärkta i mitten.

Provkropp	F_{MAX}	Böjspänning	Skjuvspänning	Densitet
	kN	MPa	MPa	kg/m³
YG	100,18	24,78	4,95	420
YH	106,20	26,11	5,22	405
YI	124,64	30,55	6,12	458
YJ	91,62	22,72	4,54	401
YK	103,11	25,43	5,1	446
YL	102,27	25,41	5,07	394
Medel	104,67	25,83	5,16	421
	Standardavvikelse	3	1	1
	Cov	0,10	0,10	0,10

Tabell 22 Resultat för referenskroppar till väggbalkar förstärkta i mitten - tryckta.

Provkropp	F_{MAX}	Böjspänning	Skjuvspänning	Densitet
	kN	Mpa	Mpa	kg/m³
6	78,30	22,05	4,17	430
7	102,90	28,66	5,44	416
8	104,70	29,22	5,54	438
9	92,90	26,01	4,93	415
10	91,70	25,70	4,85	473
11	97,70	27,28	5,17	459
Medel	94,70	26,49	5,02	438
	Standardavvikelse	2	1	1
	CoV	0,06	0,06	0,06

Resultaten i tabell 11 och 12 är för referenskroppar till bjälklagselement förstärkta i underkant. I tabell 11 presenteras icke tryckta referenskroppar medan i tabell 12 presenteras resultaten för referenskroppar som är utsatta för samma presstryck och presstid som bjälklagselementen.

På liknande sätt redovisas resultaten i tabell 16 och 17 för ej tryckta respektive tryckta referenskroppar till väggbalkar förstärkta i underkant. Tanken med dessa referenskroppar är att de ska utsättas för samma krypprocess som ordinarie elementen.

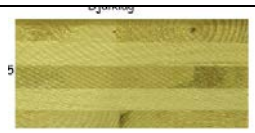
5 **Del 2** Diskussion och slutsats

En statistisk utvärdering/jämförelse av försöksresultaten görs för att undersöka effekten av förstärkningens läge i tvärsnittet samt att jämföra bjälklagselement och väggbalkar. I tabellen nedan sammanfattas försöksserien där alla element som utfördes med förstärkning i mitten kallas grupp I och deras referenser för grupp V, balkar med förstärkning utanpå grupp II och ej förtryckta referensbalkar kallas grupp III, förtryckta referensbalkar kallas grupp IV. Bjälklagselement prövades i böjning medan en del av väggbalkarna i skjuvning i enlighet med deras karakteristiska verkningssätt i verkligheten.

Försöksserien sammanfattas i tabell 23. Längden L i tabell 20 står för spännvidden vid försöksuppställning och är mindre än balkens totala längd. Tvärsnittsmåtten på elementen är 95x200 respektive 77x200 från fabriken. Efter förstärkning har tvärsnitten hyvlats för utstickande förstärkningsmaterial och utrunnen lim. I_{max} och I_{min} har beräknats med de aktuella måtten i tabell 23, där ingen hänsyn har tagits till lamellernas fiberriktning och förstärkningen.

Tabell 23 Försöksserie, sammanfattning.

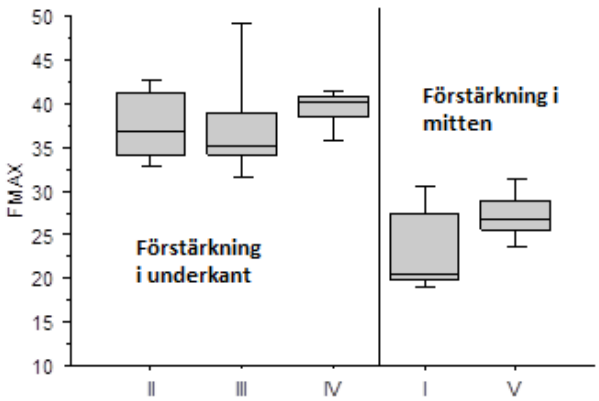
Förstärkningens läge / Referenser	**Bjälklag**	**Väggbalk**
I förstärkning i mitten	 L=1332 mm, 6 st Böjning, M=FL/6 bxh 190x74 mm^2 I_{min}=6,4▪10^6 mm^4 Provkropp A-F Resultat i tabell 16	 L=500 mm, 6 st Skjuvning bxh 76x200 mm^2 M=FL/4 I_{max}=50,6▪10^6 mm^4 Provkropp YG-YL Resultat i tabell 21

Förstärkningens läge / Referenser	**Bjälklag**	**Väggbalk**
II förstärkning utanpå	 L=1510 mm, 6 st Böjning, M=FL/6 bxh 200x96 mm^2 I_{min}=14,7▪10^6 mm^4 Provkropp M-R Resultat i tabell 13	 L=3104 mm, 6 st Böjning, M=FL/6 bxh 97x198 mm^2 I_{max}=62,7▪10^6 mm^4 Provkropp S-X Resultat i tabell 18
III referens ej tryckta	 L=1510 mm, 5 st Böjning, M=FL/6 bxh 200x96 mm^2 I_{min}=14,7▪10^6 mm^4 Provkropp R11-R15 Resultat i tabell 14	 L=3104 mm, 5 st Böjning, M=FL/6 bxh 97x200 mm^2 I_{max}=64,6▪10^6 mm^4 Provkropp R1-R5 Resultat i tabell 19
IV referens tryckta (förtrycks med 0,8 MPa i 150 min)	 L=1510 mm, 5 st Böjning, M=FL/6 bxh 200x96,5 mm^2 I_{min}=14,9▪10^6 mm^4 Provkropp 18-22 Resultat i tabell 15	 L=3104 mm, 6 st Böjning, M=FL/6 bxh 96,5x200 mm^2 I_{max}=64,3▪10^6 mm^4 Provkropp 12-17 Resultat i tabell 20
V referens tryckta (sågas och limmas utan väv med PUR-lim med 0,8 MPa i 150 min)	 L=1332 mm, 5 st Böjning, M=FL/6 bxh 200x75 mm^2 I_{min}=7,03▪10^6 mm^4 Provkropp 1-5 Resultat i tabell 17	 L=500 mm, 6 st Skjuvning bxh 75x190mm^2 M=FL/4 I_{max}=42,8▪10^6 mm^4 Provkropp 6-11 Resultat i tabell 22

Grupp II med förstärkning i underkant har referenskroppar i grupp III – ej tryckta och grupp IV – tryckta. **Grupp I med förstärkning i mitten** har bara tryckta referenskroppar i grupp V. Statistisk behandling av försöksresultaten och jämförelse mellan grupperna inom bjälklags- och väggbalkselement utfördes med Statview programmet, genom nonparametric och 't-test unpaired' analys och presenteras detaljerad i bilaga 2 respektive 3.

Resultatet för bjälklag presenteras nedan för grupp II (förstärkning i underkant) och dess referenskroppar III och IV och grupp I (förstärkning i mitten) och dess referenskropp grupp V. Eftersom balkarnas upplagslängd är av samma storleksordning (1332 och 1510 mm) presenteras resultaten till alla grupper i samma diagram och räknas jämförbara.

Resultaten visar på att maximal last som bärs av grupp II och III, IV är statistiskt likvärdiga likasom i grupp I och V sinsemellan. Statistiskt signifikant skillnad påvisas mellan provkroppar förstärkta i underkant och i tvärsnittets mitt (grupp I och II), se fig. 11. Största spridningen ser man i grupp III. Tryckta referenskroppar, grupp IV och V är både starka och uppvisar minsta spridning.

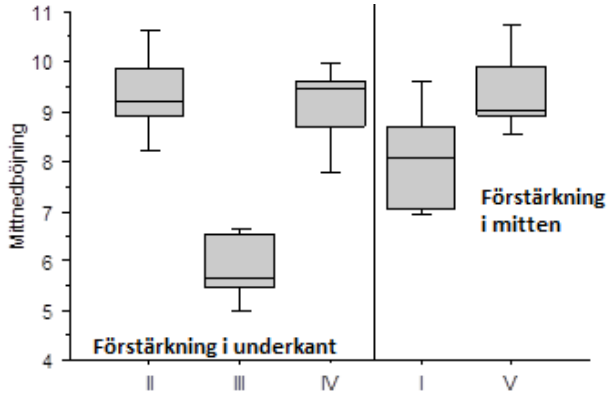


P-värde<0.05 tyder på statistiskt signifikant skillnad

Box plot
Nivåer som redovisas är 10%, 25%, 50% (median), 75% och 90%

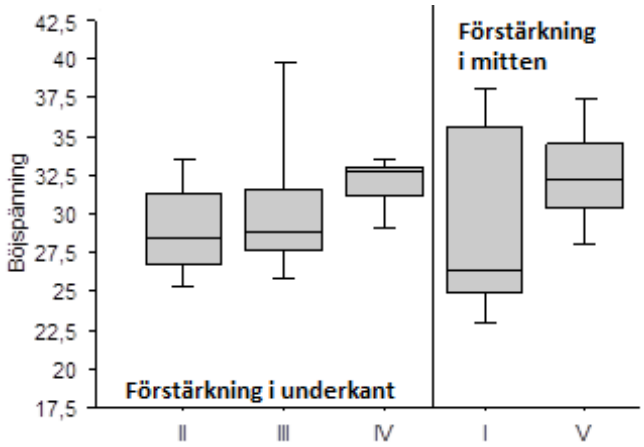
Figur 11 Bjälklag, statistisk jämförelse av max uppburen last F_{max} [kN].

Liknande analys för mätt mittnedböjning visar på signifikanta skillnader mellan grupp I och II (P=0.05). Nedböjningen i grupp I är mindre än i grupp II med medelvärde 8.1 respektive 9.3 mm. Grupp II visar på största nedböjning och därmed största rotationskapaciteten (segheten), se fig.12. Signifikanta skillnader påvisas mellan förstärkta provkroppar och deras referenser inom varje förstärkningsgrupp (mellan grupp II och III P=0.0001 och mellan grupp I och V P=0.05).



Figur 12 Bjälklag mätt mittnedböjning, [mm].

Böjspänningsresultaten i fig. 13 visar att i grupp II förstärkningen i underkant bjälklag har en positiv effekt på spridningen i böjspänning. Tryckta referenskroppar, grupp IV och V är både starka och uppvisar minsta spridning. Ej tryckt referenskropp III uppvisar stor spridning. Inga signifikanta skillnader mellan förstärkta kroppar och referenser inom varje förstärkningstyp och förstärkningar emellan.

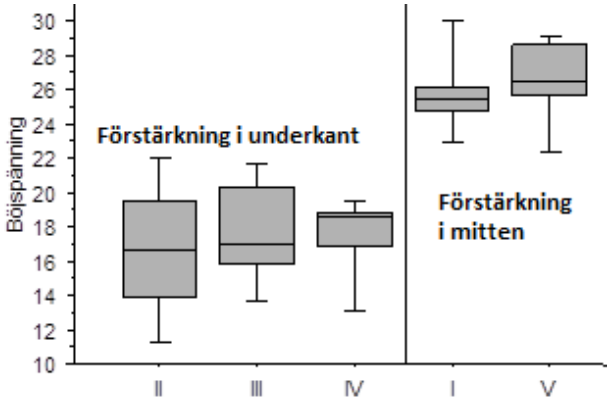


Figur 13 Bjälklag, jämförelse av böjspänning, [MPa].

Slutsats: inga signifikanta förstärkningseffekter påvisas i grupp II men ökad rotationskapacitet och en positiv effekt på böjspänningens spridning. Tvärsnittet i grupp I är en lamell tunnare men böjspänningen, storhet som är relaterat till tvärsnittsmåtten, har ingen signifikant skillnad gentemot referensgrupp II, (medelböjspänning grupp I 29 MPa och referensgrupp V 32.5 MPa, II 29 MPa, och referenser III 30 MPa, IV 31.9 MPa). Ersättning av en lamell med kompositförstärkning baserat på juteväv leder till ett tunnare CLT element med bibehållen hållfasthet. Tydlig minskad spridning visas upp i tryckta referenskroppar, grupp IV och V.

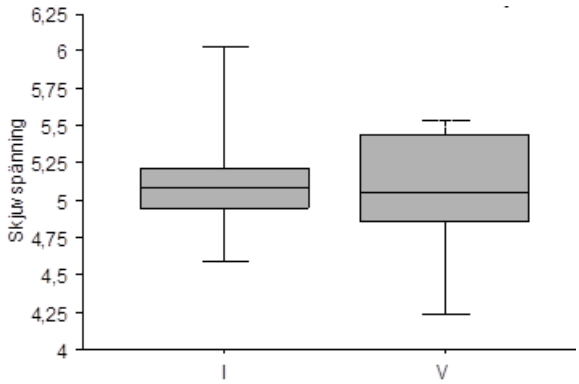
Utebliven förstärkningseffekt i grupp II kan bero på osäkerheter i limningsprocessen. Vidhäftning sker bara på ena sidan juteväven och detta försvårar även utsättning av presstrycket och härdningsprocessen. Möjligen behövs mer härdningstid i detta fall eller annan typ av matrismaterial än PU-lim.

Resultatet för väggbalk visar på inga statistiskt signifikant skillnader mellan provkroppar och referenser inom olika förstärkningstyper när det gäller böjspänning, se fig.14. Balkarnas upplagslängd är av olika storleksordning (i grupp I och V 500mm och i grupp II, III och IV 3104 mm); resultaten bör ej jämföras förstärkningstyp emellan även om det presenteras i samma diagram.

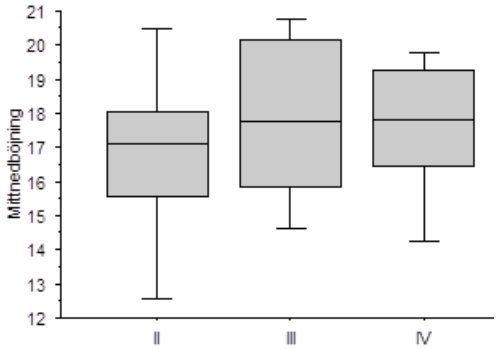


Figur 14 Väggbalk, statistisk jämförelse av böjspänning, [MPa].

Inga signifikanta skillnader i skjuvspänning visas upp i provkroppar (grupp I) och deras referenser (grupp V) med förstärkning i mitten, se figur 15. Mittnedböjningen i grupp II och dess referenser i grupp III och IV är statistiskt sett likvärdiga, se fig. 16.



Figur 15 Väggbalk, statistisk jämförelse av skjuvspänning, [MPa] för grupp I och V, förstärkning i mitten.



Figur 16 Väggbalk, statistisk jämförelse av mittnedböjning, [mm] för grupp II, III och IV, förstärkning i under- och överkant.

Slutsats: inga signifikanta förstärkningseffekter påvisas mellan provkroppar och deras referenser när det gäller väggbalkar oavsett förstärkningstyp. Väggbalkar i grupp I med förstärkning i mitten är starkast men då hade de designats så korta att det var möjligt att åstadkomma skjuvbrott i försöken. Detta kan vara orsaken till de höga böjspänningarna.

6. Fortsatt arbete

-Jutefibrer har använts i försöken av hållbarhets och produktionstekniska skäl då varpen på den var glesare än på kommersiellt tillgängliga lin väv; limmet penetrerade bättre och trängde djupare i trästycken. Lin är dock starkare, särskilt långfibrig lin, vilket gör att försöken borde upprepas med en för ändamålet speciellt framställd gles lin väv. Förväntningarna är att tydliga förstärkningseffekter kan påvisas i fullskaleförsök.

-Sojabönsolja var det mest hållbara alternativet bland försökets lim men det ska uppnå ett visst hållfasthetsvärde och klarar av delamineringsprocessen enligt standardens krav. Ett nytt examensarbete föreslås med målet att hitta lämplig sammansättning på sojabönsoljan i kombination med jutefibrer för just förstärkning av massivträprodukter.

-Vid beräkning av böjspänningarna ingen hänsyn har tagits till lamellernas fiberriktning, dvs. det räknades med att alla lamellerna var belastade parallellt fibrerna. CLT element är korsvislimmade och trä har olika egenskaper parallellt och vinkelrätt fibrerna; genom att beakta antal lameller och deras fiberriktning kan ges en noggrannare och statiskt sätt korrekt bild till kapaciteten i CLT element.

-Antal balkar i försökserierna i projektet begränsades av produktionstekniska och ekonomiska skäl. Framtida försök ska planeras enligt reglerna för statistisk försöksplanering för att resultaten ska kunna utvärderas ur statistisk signifikans synpunkt på ett bättre sätt.

-Doktorandprojekt planeras startas på Ingenjörshögskolan i Borås där CLT materialet ska skräddarsys på ett sätt så att dess tekniska egenskaper uppfyller bärighetskrav med bibehållen hållbarhet. Projekt syftar till att studera materialet ur ett systemperspektiv genom att undersöka bärande egenskaperna i massivträ framställt med andra lim än dagens PU-lim (sojabönsolja) och studera vad som händer med materialet efter att det har byggts med, under byggnadens livstid och efter att det har hamnat i avfallshanteringssystem.

7. Referenser

[1] **Examensarbete 1** Alsterhem N., Enenge J.: Fiberarmerat massivträ. Examensarbeterapport, Högskolan i Borås, Borås 2012.

[2] **Examensarbete 2** Halitaj R., Kihlberg A.: Böj- och skjuvegenskaper i balkar av förstärkt massivträ, Examensarbeterapport, Högskolan i Borås, Borås 2013.

[3] Västra Götalandsregionen FoU-kortet, Program för forskning och utveckling i små och medelstora företag. http://www.vgregion.se/fou-kortet, 2012-08-14

[4] André Alann: Strengthening of timber structures with flax fibres. Licentiat rapport, Luleå tekniska högskolan, Luleå 2007.

[5] Spārniņš E.: Mechanical properties of flax fibers and their composites. Licentiat rapport, Luleå tekniska högskolan, Luleå 2006.

[6] Net Composites: hemsida för kompositindustrin med information om forskning, konferenser, utbildning och konsulttjänster i UK. http://www.netcomposites.com/Content/Show/78, 2012-08-14

[7] Raknes E.: Adhesives, Timber Engineering STEP 1, 1995.

[8] Sterley M.: Characterisation of green-glued wood adhesive bonds. Linnaeus University Dissertations, No 85, Växjö 2012.

[9] Van der Heiden F., Mahshid T.: Provtryckning och bestämning av elasticitetsmodul och böjhållfasthet för limträbalkar. Examensarbeterapport Chalmers tekniska högskola, 2008.

[10] Anderson D., Odén J.: Träs skjuvhållfasthet och limträbalkars tvärkraftkapacitet, Examensarbeterapport, Lunds tekniska högskola, 2009.

Bilaga 1 Delamineringsförsök

Epoxi (E), PU (P)och sojabönaolja (S)

Jutefiberväv (L), kolfiberväv (K), glasfiberväv (G)

Försöksprotokoll

PX23852

Ingenjörshögskolan i Borås — Delaminering enl EN391 metod B

Agnes Nagy

Utförd 2012-06-13 - 14 av Anders Clang, TRk

	Provkropp (nr)	Foglängd (mm)	Massa före torkning (g)	Massa efter torkning (g)	Procent (krav: 100-110 %) (%)	Delaminering före (mm)	Delaminering efter (mm)	Delaminering (%)	
1	E	99,5	301,9	306,6	101,6	0	91,5	92	
2	EG1	98,5	296,0	302,2	102,1	0	60,0	61	
3	EG2	100,5	318,3	341,1	107,2	0	28,0	28	
4	EG3	100,5	307,3	315,3	102,6	0	76,0	76	
5	EK1	98,5	264,9	272,6	102,9	0	98,5	100	
6	EK2	102,0	325,5	337,6	103,7	0	0	0	
7	EK3	102,0	335,9	349,0	103,9	0	0	0	
8	EL1	98,5	227,9	235,8	103,5	0	0	0	
9	EL2	101,0	311,4	336,7	108,1	0	13,0	13	
10	EL3	101,0	323,1	331,5	102,6	0	101,0	100	
11	P	100,0	294,9	313,9	106,4	48,5	100,0	100	
12	PG1	100,0	275,8	298,3	108,2	84,0	100,0	100	
13	PG2	100,5	324,6	332,7	102,5	6,0	31,0	31	
14	PG3	100,5	318,1	338,9	106,5	11,0	53,0	53	
15	PK1	101,5	296,8	303,3	102,2	13,0	101,5	100	
16	PK2	101,5	315,4	326,6	103,6	0	47,0	46	
17	PK3	101,5	312,0	329,6	105,6	0	17,5	17	
18	PL1	100,5	310,9	319,0	102,6	0	63,0	63	
19	PL2	101,0	308,4	325,8	105,6	0	47,5	47	
20	PL3	101,0	308,0	316,1	102,6	0	101,0	100	
21	S	100,5	294,9	316,2	107,2	0	100,5	100	Separerade i trycktube
22	SG1	95,5	272,4	276,6	101,5	6,0	95,5	100	
23	SG2	101,0	337,5	361,3	107,1	0	101,0	100	Separerade i trycktube
24	SG3	101,0	333,9	363,5	108,9	0	101,0	100	
25	SK1	99,5	286,9	300,1	104,6	0	99,5	100	
26	SK2	100,5	323,7	347,1	107,2	0	100,5	100	
27	SK3	100,5	348,3	380,1	109,1	0	100,5	100	
28	SL1	100,0	239,6	250,1	104,4	0	100,0	100	
29	SL2	101,0	338,2	370,4	109,5	0	101,0	100	
30	SL3	101,0	328,5	344,2	104,8	0	101,0	100	Separerade i trycktube

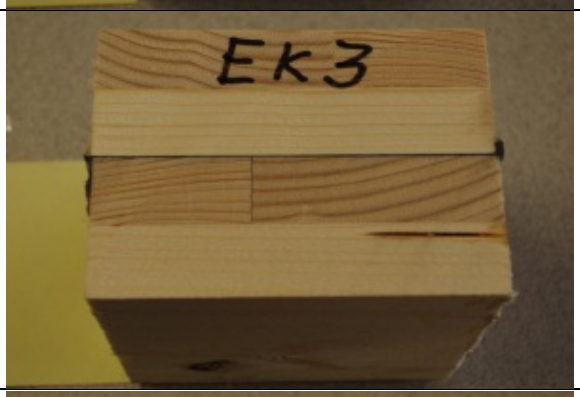
Provkroppar före och efter delaminering, Epoxi, PU, Sojabönsolja.

Ek1

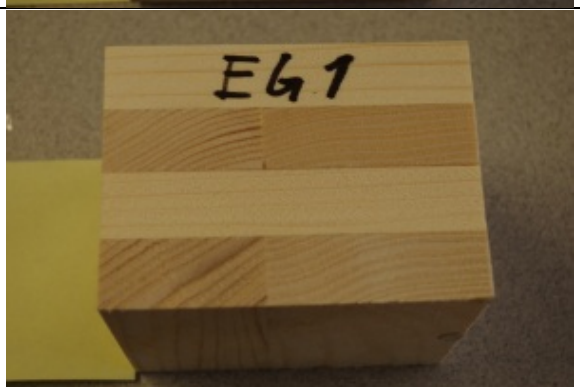
Ek1

Ek2

Ek2


Ek3

Ek3


EG1

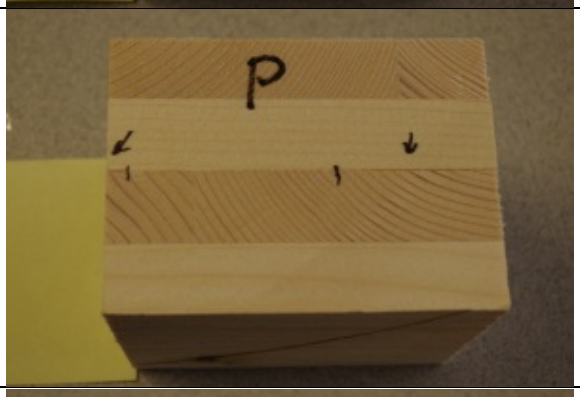
EG1

EG 2

EG 2

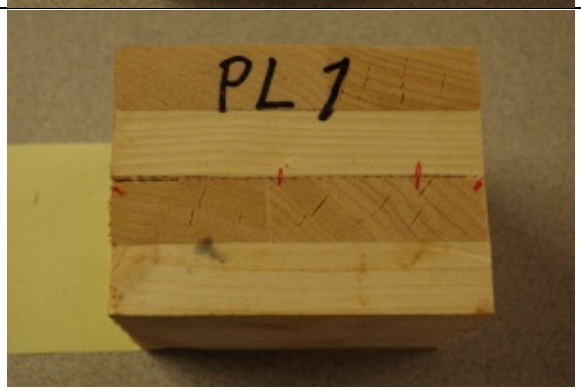
EG 3

EG 3

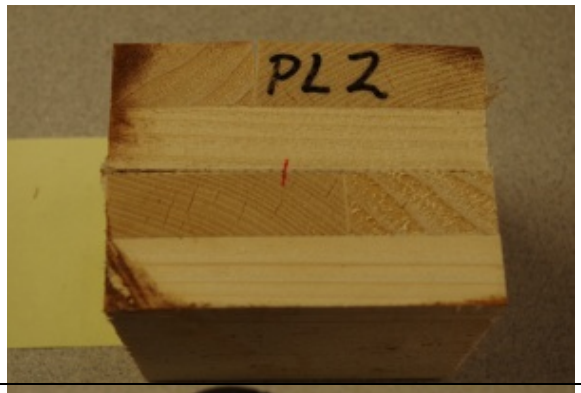

P

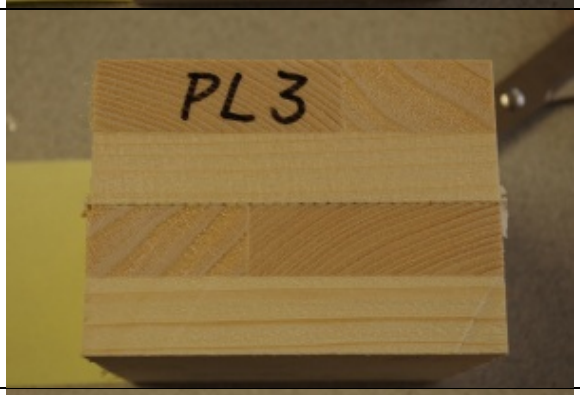
P

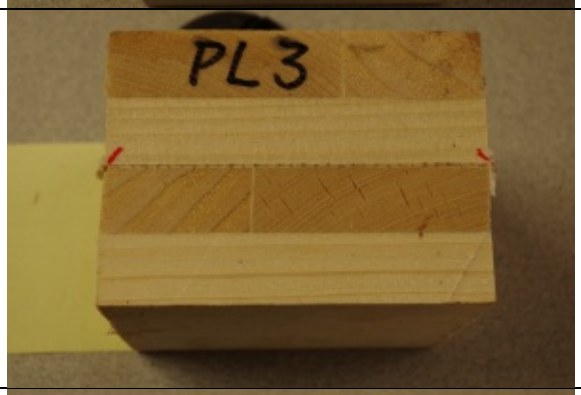
PL 1


PL 1

PL2


PL2


PL3


PL3

PK 1

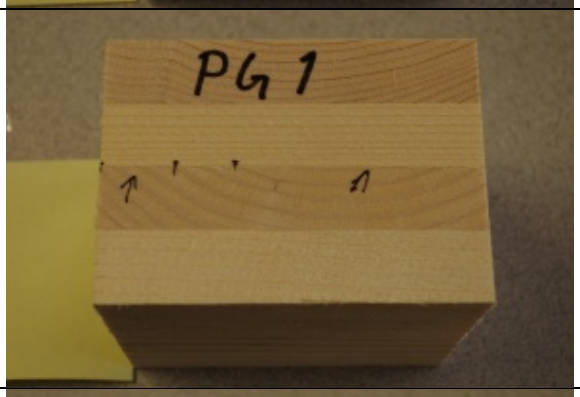
PK 1

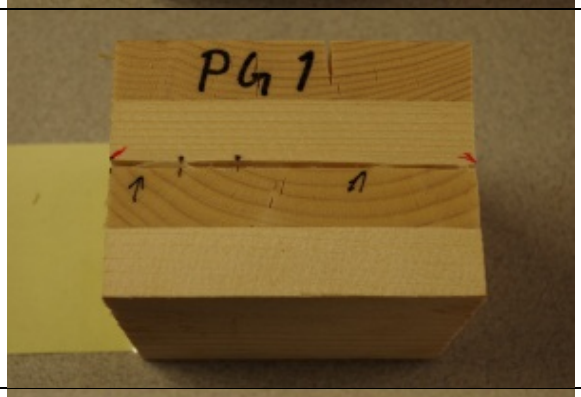
PK2

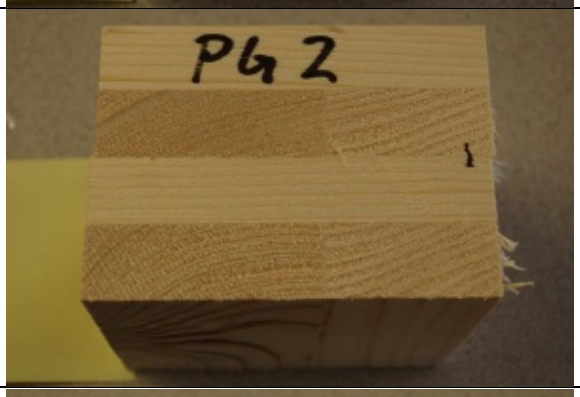
PK2

PK3

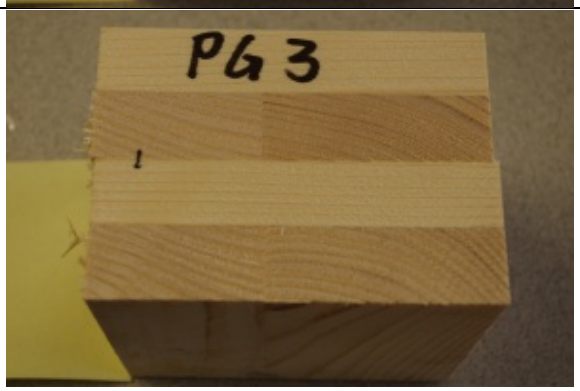
PK3

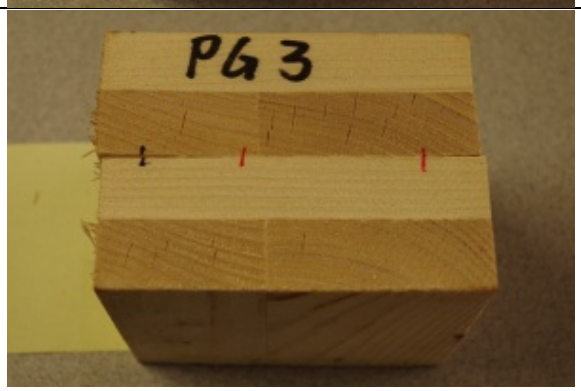

PG 1


PG 1

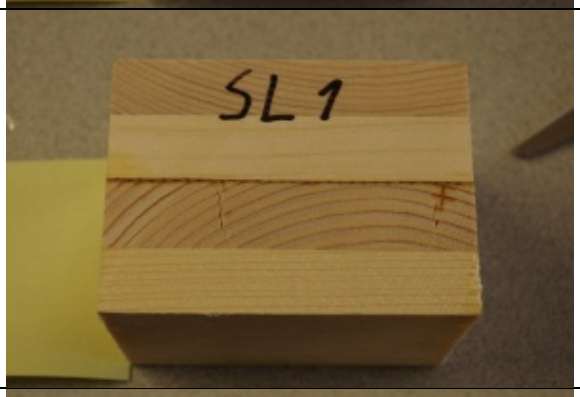

PG 2

PG 2


PG 3

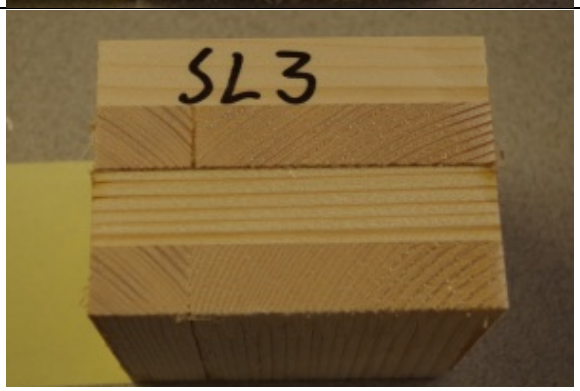

PG 3

S

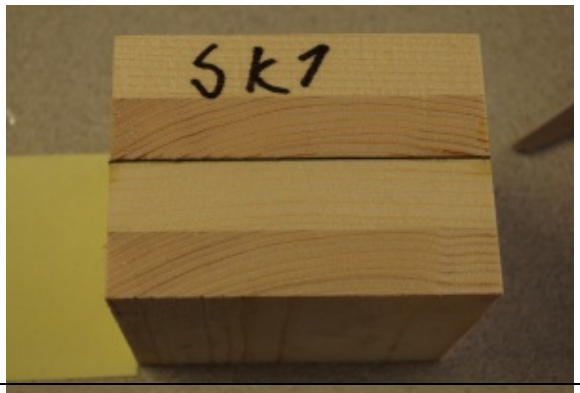
S

SL 1

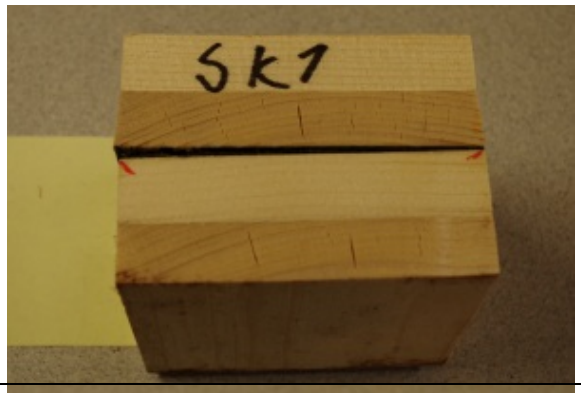
SL 1

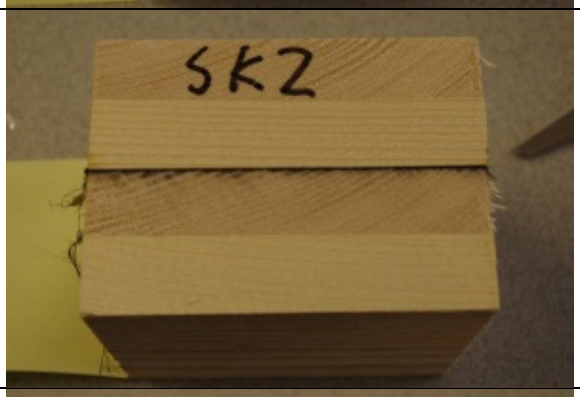
SL 2

SL 2

SL 3

SL 3


SK1


SK1


SK2

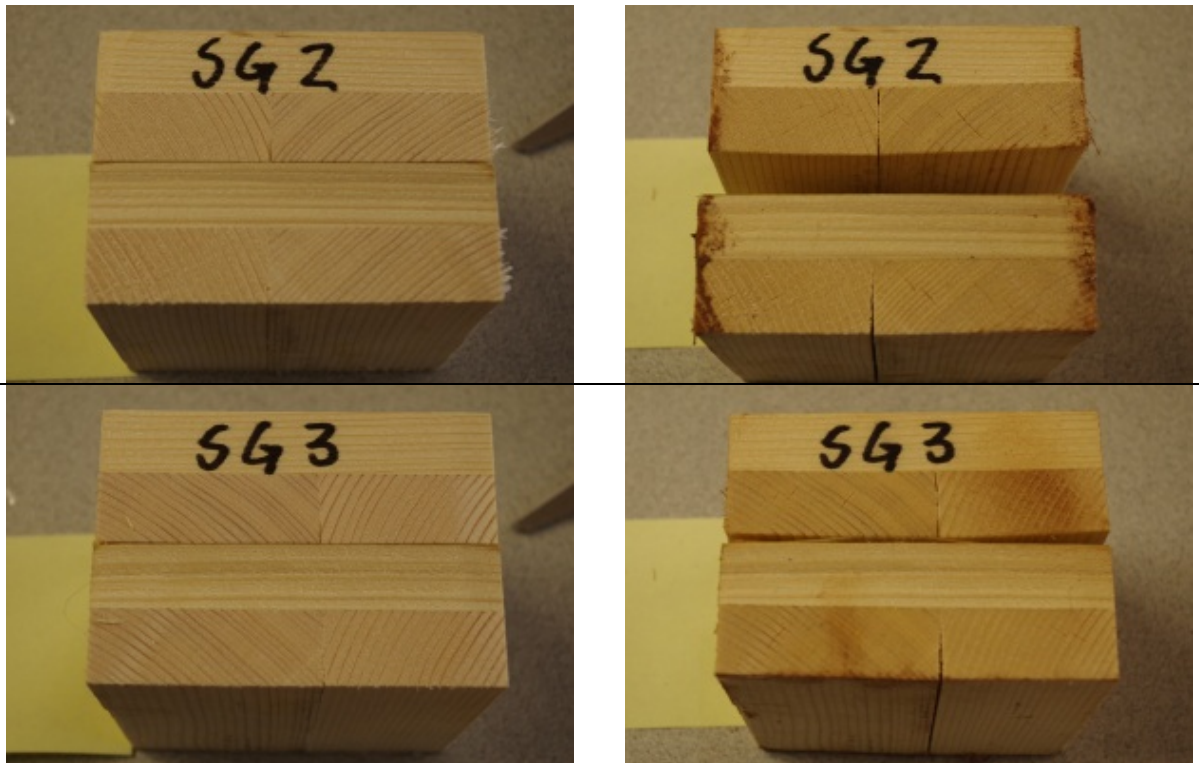
SK2

SK3

SK3

SG1

SG1


SG2
SG2
SG3
SG3

Bilaga 2 Statistiska beräkning för bjälklagselement

Tabell 13 Resultat för bjälklagselement förstärkta i underkant, grupp II

Provkropp	F_{MAX}	Lokal nedböjning	Mittnedböjning	Densitet	Global E-modul	Lokal E-modul	Böjspänning	Brottyp
	kN	mm	mm	kg/m^3	MPa	MPa	MPa	
M	34,26	0,87	8,92	406	7 053	8 668	28,13	Drag
N	41,30	0,96	9,87	391	7 039	8 789	33,77	Drag
O	35,27	0,87	9,24	383	6 930	8 780	28,75	Drag
P	32,84	0,85	9,17	394	6 436	8 346	26,68	Drag
Q	38,42	1,06	10,71	387	6 408	8 761	31,31	Drag
R	42,96	0,80	8,15	410	8 706	10 161	25,21	Drag
Medel	37,51	0,90	9,34	395	7 095	8 918	28,98	
			Standardavvikelse		840	632	3	
				CoV	0,12	0,07	0,11	

Tabell 14 Resultat för referenskroppar till bjälklagselement förstärkta i underkant – ej tryckta, grupp III.

Provkropp	F_{MAX}	Lokal nedböjning	Mittnedböjning	Densitet	Global E-modul	Lokal E-modul	Böjspänning	Brottyp
	kN	mm	mm	kg/m^3	MPa	MPa	MPa	
R11	35,26	0,54	5,62	399	7 802	9 868	28,83	Drag
R12	49,25	0,51	4,99	432	8 689	10 462	39,79	Drag
R13	31,64	0,62	6,49	398	6 714	8 713	25,89	Drag
R14	35,02	0,63	6,67	387	6 738	8 790	28,26	Drag
R15	35,62	0,57	5,64	408	7 518	9 068	28,83	Drag
Medel	37,36	0,57	5,88	405	7 492	9 380	30,32	
			Standardavvikelse		822	758	5	
				CoV	0,11	0,08	0,18	

Tabell 15 Resultat för referenskroppar till bjälklagselement förstärkta i underkant – tryckta, grupp IV.

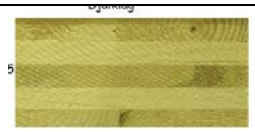
Provkropp	F_{MAX}	Lokal nedböjning	Mittnedböjning	Densitet	Global E-modul	Lokal E-modul	Böjspänning	Brottyp
	kN	mm	mm	kg/m^3	MPa	MPa	MPa	
18	39,34	0,8283	9,4600	405	7333	9901	31,80	Drag
19	40,19	0,9158	9,4900	388	7463	9325	32,74	Drag
20	40,60	0,8987	8,9900	409	8019	9619	32,75	Drag
21	41,41	0,9556	9,9900	406	7239	9193	33,52	Drag
22	35,75	0,7547	7,7800	425	8155	9899	29,04	Drag
Medel	39,46	0,8706		9,1420	407	7642	9587	31,97
			Standardavvikelse		417	324	2	
				CoV	0,05	0,03	0,05	

Tabell 16 Resultat för bjälklagselment förstärkta i mitten, grupp I.

Provkropp	F_{MAX}	Lokal nedböjning	Mittnedböjning	Densitet	Global E-modul	Lokal E-modul	Böjspänning	Brottyp
	kN	mm	mm	kg/m^3	MPa	MPa	MPa	
A	31,00	0,53	8,47	422	7 760	10 183	38,33	Tryck/drag
B	20,52	0,65	8,72	364	6 114	6 631	26,39	Drag
C	18,84	0,54	7,06	396	6 847	7 254	22,73	Drag
D	20,21	0,55	7,73	405	6 828	7 737	26,33	Drag
E	19,75	0,47	6,93	388	7 452	8 795	24,92	Drag
F	27,40	0,66	9,72	407	6 809	7 850	35,54	Drag
Medel	22,95	0,57	8,11	397	6 968	8 075	29,04	
			Standardavvikelse		575	1 256	6	
				CoV	0,08	0,16	0,22	

Tabell 17 Resultat för referenskroppar till bjälklagselment förstärkta i mitten – tryckta, grupp V.

Provkrop	F_{MAX}	Lokal	Mittnedböjn	Densite	Global E-	Lokal E-	Böjspänni	Brotty
	kN	mm	mm	kg/m^3	MPa	MPa	MP	
1	26,23	0,6998	9,0300	399	7025	7321	31,25	Drag
2	23,52	0,5836	8,5700	417	6753	7931	28,07	Drag
3	28,00	0,6662	9,6400	383	7131	8402	33,63	Drag
4	26,92	0,6018	9,0400	353	7248	8845	32,25	Drag
5	31,47	0,7682	10,7600	396	7090	8072	37,46	Drag
Medel	27,23	0,6639	9,4080	390	7050	8114	32,53	
			Standardavvikelse		184	566	3	
				CoV	0,03	0,07	0,11	

Förstärkningens läge / Referenser	**Bjälklag**	
I förstärkning i mitten	 L=1332 mm, 6 st Böjning, M=FL/6 bxh 190x74 mm^2 I_{min}=6,4▪10^6 mm^4 Provkropp A-F Resultat i tabell 16	
II förstärkning utanpå	 L=1510 mm, 6 st Böjning, M=FL/6 bxh 200x96 mm^2 I_{min}=14,7▪10^6 mm^4 Provkropp M-R Resultat i tabell 13	
III referens ej tryckta	 L=1510 mm, 5 st Böjning, M=FL/6 bxh 200x96 mm^2 I_{min}=14,7▪10^6 mm^4 Provkropp R11-R15 Resultat i tabell 14	
IV referens tryckta (förtrycks med 0,8 MPa i 150 min)	 L=1510 mm, 5 st Böjning, M=FL/6 bxh 200x96,5 mm^2 I_{min}=14,9▪10^6 mm^4 Provkropp 18-22 Resultat i tabell 15	

Förstärkningens läge / Referenser	**Bjälklag**	
V referens tryckta (sågas och limmas utan väv med PUR-lim med 0,8 MPa i 150 min)	 L=1332 mm, 5 st Böjning, M=FL/6 bxh 200x75 mm^2 I_{min}=7,03▪10^6 mm^4 Provkropp 1-5 Resultat i tabell 17	

Utvärdering: P-värde < 0.05 – statistiskt signifikant skillnad

Box plot: nivåer som redovisas är 10%, 25%, 50% (median med en hel linje), 75% och 90%.

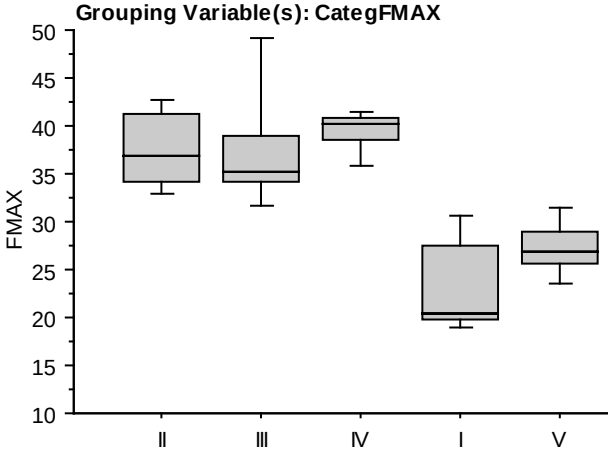
Jämförelse av mätta storheter i försöken redovisas i samma diagram för alla grupper då provkropparna har närliggande storlekar: 1332 och 1510 mm.

Uppburen last Fmax, [kN]

Kruskal-Wallis Rank Info for FMAX
Grouping Variable: CategFMAX

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
II	6	114,000	19,000
III	5	88,000	17,600
IV	5	110,000	22,000
I	6	28,000	4,667
V	5	38,000	7,600

Box Plot
Grouping Variable(s): CategFMAX



Bjälklagselement

Unpaired t-test for FMAX
Grouping Variable: CategFMAX
Hypothesized Difference = 0

	Mean Diff.	DF	t-Value	P-Value
II, III	,150	9	,045	,9648
II, IV	-1,950	9	-,958	,3632
II, I	14,555	10	5,535	,0002
II, V	10,280	9	4,735	,0011
III, IV	-2,100	8	-,654	,5317
III, I	14,405	9	4,039	,0029
III, V	10,130	8	3,051	,0158
IV, I	16,505	9	6,801	<,0001
IV, V	12,230	8	7,524	<,0001
I, V	-4,275	9	-1,682	,1269

Group Info for FMAX
Grouping Variable: CategFMAX

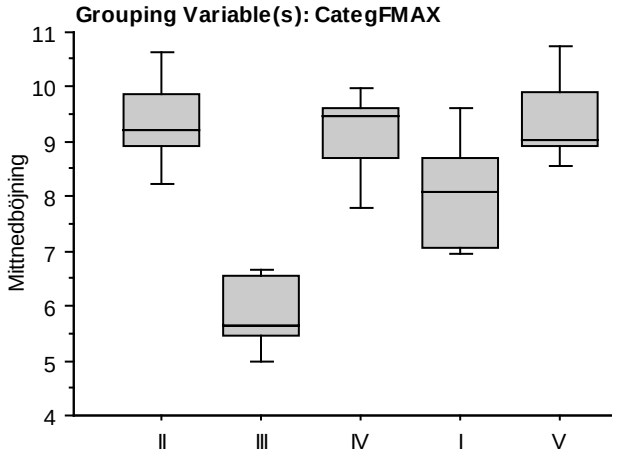
	Count	Mean	Variance	Std. Dev.	Std. Err
II	6	37,508	16,457	4,057	1,656
III	5	37,358	46,751	6,837	3,058
IV	5	39,458	4,853	2,203	,985
I	6	22,953	25,030	5,003	2,042
V	5	27,228	8,358	2,891	1,293

Mittnedböjning, [mm]

Kruskal-Wallis Rank Info for Mittnedböjning
Grouping Variable: CategFMAX

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
II	6	111,000	18,500
III	5	15,000	3,000
IV	5	90,000	18,000
I	6	68,000	11,333
V	5	94,000	18,800

Box Plot
Grouping Variable(s): CategFMAX



Bjälklagselement

Unpaired t-test for Mittnedböjning
Grouping Variable: CategFMAX
Hypothesized Difference = 0

	Mean Diff.	DF	t-Value	P-Value
II, III	3,461	9	7,181	<,0001
II, IV	,201	9	,388	,7070
II, I	1,238	10	2,198	,0526
II, V	-,065	9	-,124	,9039
III, IV	-3,260	8	-6,701	,0002
III, I	-2,223	9	-3,983	,0032
III, V	-3,526	8	-7,216	<,0001
IV, I	1,037	9	1,757	,1128
IV, V	-,266	8	-,499	,6312
I, V	-1,303	9	-2,202	,0552

Group Info for Mittnedböjning
Grouping Variable: CategFMAX

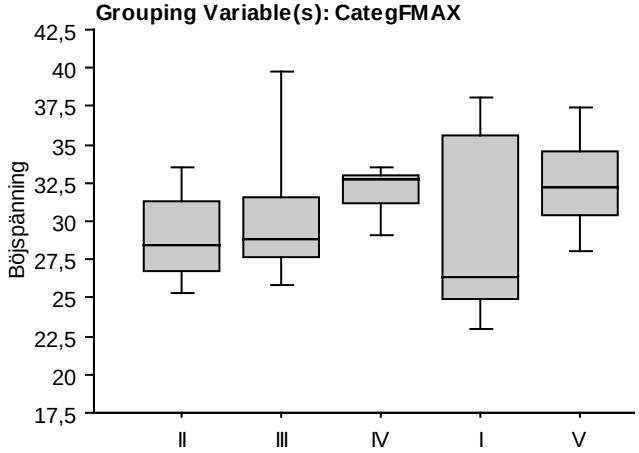
	Count	Mean	Variance	Std. Dev.	Std. Err
II	6	9,343	,758	,871	,355
III	5	5,882	,478	,692	,309
IV	5	9,142	,705	,840	,375
I	6	8,105	1,147	1,071	,437
V	5	9,408	,716	,846	,378

Böjspänning [MPa]

Kruskal-Wallis Rank Info for Böjspänning
Grouping Variable: CategFMAX

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
II	6	69,000	11,500
III	5	66,000	13,200
IV	5	91,000	18,200
I	6	64,000	10,667
V	5	88,000	17,600

Box Plot
Grouping Variable(s): CategFMAX



Bjälklagselement

Unpaired t-test for Böjspänning
Grouping Variable: CategFMAX
Hypothesized Difference = 0

	Mean Diff.	DF	t-Value	P-Value
II, III	-1,345	9	-,516	,6182
II, IV	-2,995	9	-1,902	,0896
II, I	-,065	10	-,023	,9824
II, V	-3,557	9	-1,801	,1053
III, IV	-1,650	8	-,647	,5360
III, I	1,280	9	,356	,7302
III, V	-2,212	8	-,770	,4635
IV, I	2,930	9	,997	,3447
IV, V	-,562	8	-,326	,7526
I, V	-3,492	9	-1,101	,2994

Group Info for Böjspänning
Grouping Variable: CategFMAX

	Count	Mean	Variance	Std. Dev.	Std. Err
II	6	28,975	9,730	3,119	1,273
III	5	30,320	29,497	5,431	2,429
IV	5	31,970	3,054	1,748	,782
I	6	29,040	39,942	6,320	2,580
V	5	32,532	11,781	3,432	1,535

Bilaga 3 Statistiska beräkning för väggbalk

Tabell 18 Resultat för väggbalkar förstärkta i under- och överkant, grupp II.

Provkropp	F_{MAX}	Lokal nedböjning	Mittnedböjning	Densitet	Global E-modul	Lokal E-modul	Böjspänning	Brottyp
	kN	mm	mm	kg/m^3	MPa	MPa	MPa	
S	23,77	1,62	15,55	435	4 904	5 695	19,52	Drag
T	13,29	1,24	12,24	393	4 016	4 769	10,92	Drag
U	27,17	1,68	16,22	451	4 639	5 380	22,27	Drag
V	19,82	1,80	18,04	367	3 952	4 812	16,17	Drag
W	17,14	2,10	20,78	400	4 500	5 397	13,94	Drag
X	20,79	2,02	17,98	412	4 278	4 661	17,19	Drag
Medel	20,33	1,74	16,80	410	4 382	5 119	16,67	
			Standardavvikelse		369	425	8	4
			CoV		0,08	0,08	0,24	0,24

Tabell 19 Resultat för referenskroppar till väggbalkar förstärkta i under- och överkant – ej tryckta, grupp III.

Provkropp	F_{MAX}	Lokal nedböjning	Mittnedböjning	Densitet	Global E-modul	Lokal E-modul	Böjspänning	Brottyp
	kN	mm	mm	kg/m^3	MPa	MPa	MPa	
R1	17,23	1,58	14,61	411	4 248	4 743	13,67	Drag
R2	20,72	1,84	17,78	400	4 282	4 894	16,55	Drag
R3	21,25	1,78	16,26	404	4 735	5 253	17,03	Drag
R4	24,80	2,15	20,77	373	4 324	5 039	19,90	Tryck/Drag
R5	26,96	2,09	19,94	386	4 514	5 211	21,72	Drag
Medel	22,19	1,89	17,87	395	4 421	5 028	17,77	
			Standardavvikelse		204	214	7	3
			CoV		0,05	0,04	0,18	0,18

Tabell 20 Resultat för referenskroppar till väggbalkar förstärkta i underkant – tryckta, grupp IV.

Provkropp	F_{MAX}	Lokal nedböjning	Mittnedböjning	Densitet	Global E-modul	Lokal E-	Böjspänning	Brottyp
	kN	mm	mm	kg/m^3	MPa	MPa	MPa	
12	23,3	1,7125	16,4300	453	5128	5991	18,77	Drag
13	15,8	1,5436	14,0200	391	4052	4472	12,70	Drag
14	20,8	2,0559	19,2600	412	3880	4455	16,83	Drag
15	23,2	2,1685	19,8300	432	4222	4725	18,75	Drag
16	24,3	1,9552	18,6600	427	4761	5482	19,53	Drag
17	22,7	1,8257	17,0100	414	4871	5505	18,37	Drag
Medel	21,7	1,8769	17,5350	422	4486	5105	17,49	
			Standardavvikelse		438	527	3	
			CoV		0,10	0,10	0,16	

Tabell 21 Resultat för väggbalkar förstärkta i mitten, grupp I.

Provkropp	F_{MAX}	Böjspänning	Skjuvspänning	Densitet
	kN	MPa	MPa	kg/m³
YG	100,18	24,78	4,95	420
YH	106,20	26,11	5,22	405
YI	124,64	30,55	6,12	458
YJ	91,62	22,72	4,54	401
YK	103,11	25,43	5,1	446
YL	102,27	25,41	5,07	394
Medel	104,67	25,83	5,16	421
	Standardavvikelse	3	1	26
	Cov	0,10	0,10	0,06

Tabell 22 Resultat för referenskroppar till väggbalkar förstärkta i mitten – tryckta, gruppV.

Provkropp	F_{MAX}	Böjspänning	Skjuvspänning	Densitet
	kN	Mpa	Mpa	kg/m³
6	78,30	22,05	4,17	430
7	102,90	28,66	5,44	416
8	104,70	29,22	5,54	438
9	92,90	26,01	4,93	415
10	91,70	25,70	4,85	473
11	97,70	27,28	5,17	459
Medel	94,70	26,49	5,02	438
	Standardavvikelse	2	1	26
	CoV	0,06	0,06	0,06

Förstärkningens läge / Referenser		**Väggbalk**
I förstärkning i mitten		L=500 mm, 6 st Skjuvning bxh 76x200 mm^2 M=FL/4 I_{max}=50,6▪10^6 mm^4 Provkropp YG-YL Resultat i tabell 21

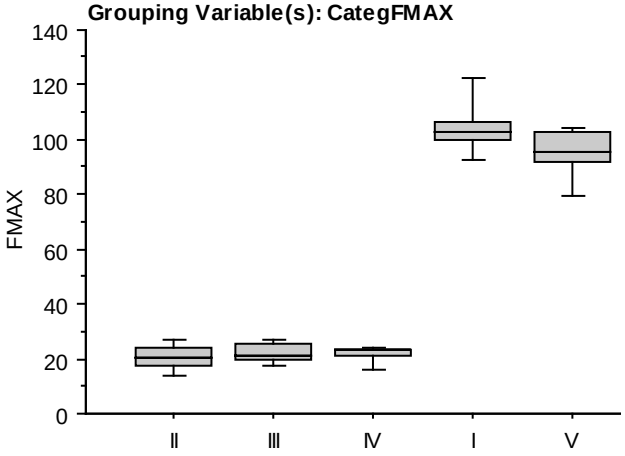
Förstärkningens läge / Referenser		**Väggbalk**
II förstärkning utanpå		L=3104 mm, 6 st Böjning, M=FL/6 bxh 97x198 mm^2 I_{max}=62,7▪10^6 mm^4 Provkropp S-X Resultat i tabell 18
III referens ej tryckta		L=3104 mm, 5 st Böjning, M=FL/6 bxh 97x200 mm^2 I_{max}=64,6▪10^6 mm^4 Provkropp R1-R5 Resultat i tabell 19
IV referens tryckta (förtrycks med 0,8 MPa i 150 min)		L=3104 mm, 6 st Böjning, M=FL/6 bxh 96,5x200 mm^2 I_{max}=64,3▪10^6 mm^4 Provkropp 12-17 Resultat i tabell 20
V referens tryckta (sågas och limmas utan väv med PUR-lim med 0,8 MPa i 150 min)		L=500 mm, 6 st Skjuvning bxh 75x190mm^2 M=FL/4 I_{max}=42,8▪10^6 mm^4 Provkropp 6-11 Resultat i tabell 22

Uppburen last Fmax, [kN]

Kruskal-Wallis Rank Info for FMAX
Grouping Variable: CategFMAX

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
II	6	46,000	7,667
III	5	50,000	10,000
IV	6	57,000	9,500
I	6	149,000	24,833
V	6	133,000	22,167

Box Plot
Grouping Variable(s): CategFMAX



Väggbalk

Unpaired t-test for FMAX
Grouping Variable: CategFMAX
Hypothesized Difference = 0

	Mean Diff.	DF	t-Value	P-Value
II, III	-1,862	9	-,695	,5044
II, IV	-1,400	10	-,592	,5669
II, I	-84,340	10	-17,232	<,0001
II, V	-74,370	10	-16,969	<,0001
III, IV	,462	9	,222	,8291
III, I	-82,478	9	-15,942	<,0001
III, V	-72,508	9	-15,835	<,0001
IV, I	-82,940	10	-17,837	<,0001
IV, V	-72,970	10	-17,762	<,0001
I, V	9,970	10	1,679	,1240

Group Info for FMAX
Grouping Variable: CategFMAX

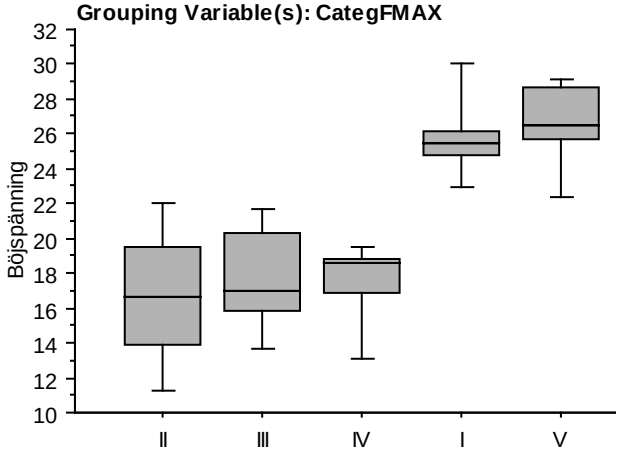
	Count	Mean	Variance	Std. Dev.	Std. Err
II	6	20,330	23,766	4,875	1,990
III	5	22,192	14,303	3,782	1,691
IV	6	21,730	9,772	3,126	1,276
I	6	104,670	119,960	10,953	4,471
V	6	94,700	91,488	9,565	3,905

Böjspänning, [MPa]

Kruskal-Wallis Rank Info for Böjspänning
Grouping Variable: CategFMAX

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
II	6	50,000	8,333
III	5	48,000	9,600
IV	6	56,000	9,333
I	6	136,000	22,667
V	6	145,000	24,167

Box Plot
Grouping Variable(s): CategFMAX



Väggbalk

Unpaired t-test for Böjspänning
Grouping Variable: CategFMAX
Hypothesized Difference = 0

	Mean Diff.	DF	t-Value	P-Value
II, III	-1,106	9	-,501	,6283
II, IV	-,823	10	-,426	,6791
II, I	-9,165	10	-4,702	,0008
II, V	-9,780	10	-5,027	,0005
III, IV	,282	9	,167	,8714
III, I	-8,059	9	-4,691	,0011
III, V	-8,674	9	-5,064	,0007
IV, I	-8,342	10	-5,667	,0002
IV, V	-8,957	10	-6,105	,0001
I, V	-,615	10	-,413	,6883

Group Info for Böjspänning
Grouping Variable: CategFMAX

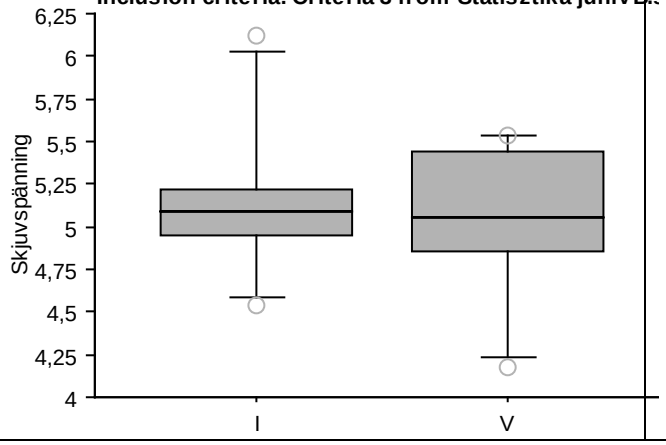
	Count	Mean	Variance	Std. Dev.	Std. Err
II	6	16,668	16,104	4,013	1,638
III	5	17,774	9,746	3,122	1,396
IV	6	17,492	6,308	2,512	1,025
I	6	25,833	6,694	2,587	1,056
V	6	26,448	6,607	2,570	1,049

Skjuvspänning, [MPa] för grupp I och V

Mann-Whitney Rank Info for Skjuvspänning
Grouping Variable: CategFMAX
Inclusion criteria: Criteria 3 from Statisztika juniVB.ssd

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
I	6	41,000	6,833
V	6	37,000	6,167

Box Plot
Grouping Variable(s): CategFMAX
Inclusion criteria: Criteria 3 from Statisztika juniVB.s



Väggbalk

Unpaired t-test for Skjuvspänning
Grouping Variable: CategFMAX
Hypothesized Difference = 0
Inclusion criteria: Criteria 3 from Statisztika juniVB.s

	Mean Diff.	DF	t-Value	P-Value
I, V	,150	10	,510	,6210

Group Info for Skjuvspänning
Grouping Variable: CategFMAX
Inclusion criteria: Criteria 3 from Statisztika juniVB.s

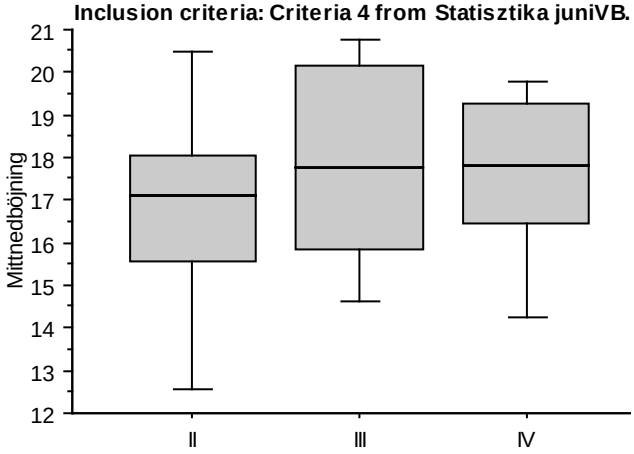
	Count	Mean	Variance	Std. Dev.	Std. Err
I	6	5,167	,273	,523	,213
V	6	5,017	,246	,496	,202

Mittnedböjning, [mm] för grupp II, III, IV

Kruskal-Wallis Rank Info for Mittnedböjning
Grouping Variable: CategFMAX
Inclusion criteria: Criteria 4 from Statisztika juniVB.ssd

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
II	6	48,000	8,000
III	5	49,000	9,800
IV	6	56,000	9,333

Box Plot
Grouping Variable(s): CategFMAX
Inclusion criteria: Criteria 4 from Statisztika juniVB.



Väggbalk

Unpaired t-test for Mittnedböjning
Grouping Variable: CategFMAX
Hypothesized Difference = 0
Inclusion criteria: Criteria 4 from Statisztika juniVB.s

	Mean Diff.	DF	t-Value	P-Value
II, III	-1,070	9	-,646	,5344
II, IV	-,733	10	-,499	,6287
III, IV	,337	9	,238	,8173

Group Info for Mittnedböjning
Grouping Variable: CategFMAX
Inclusion criteria: Criteria 4 from Statisztika juniVB.s

	Count	Mean	Variance	Std. Dev.	Std. Err
II	6	16,802	8,293	2,880	1,176
III	5	17,872	6,481	2,546	1,138
IV	6	17,535	4,672	2,161	,882