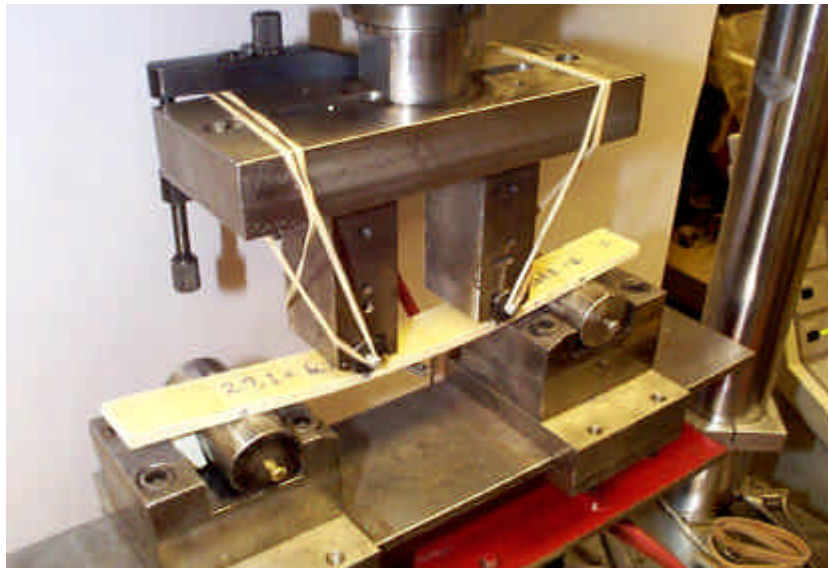




KUNGL
TEKNISKA
HÖGSKOLAN

Ett trä/epoxi - laminats konstitutiva egenskaper

*Projektuppgift i kursen Tillämpad Hållfasthetslära 4C1117 4p
VT 2000*



Av
Thomas Thunvik och Claes Åkerlund

Handledare: Peter Gudmundson



Sammanfattning

Praktiska prov har gjorts i syfte att bestämma ett trä/epoxi-laminats konstitutiva egenskaper. De experimentella metoder, som användes var dragprov samt fyrpunktsböjprov. En gällande materialmodell för de olika ingående materialen i laminatet gjordes, och utifrån den beräknades de teoretiska konstitutiva egenskaperna. Laminatet har sedan jämförts med ett konventionellt bruksmaterial vid kanotkonstruktion. Trälaminatet visade sig ha goda egenskaper i träfiberriktningen i jämförelse med vinylesterplasten, emedan laminatet har betydligt sämre egenskaper 90 grader mot fiberriktningen. Det dimensionerande kriteriet vid konstruktion av kanoten blir alltså krafterna, som laminatet ska ta upp 90 grader från fiberriktningen.

Framtagna materialdata

a= 1 lager väv, b= 2lager väv , t= tvärs fibrerna, m = med fibrerna

Tabell 1. Prov mot fibrernas riktning

Provnamn	$M_{b,max}(Nm)$	$E,böj(GPa)$	$E,drag(GPa)$	$R_m(MPa)$	$S_b(MPa)$	$r_B(mm)$	$e_B(\%)$
at1_4	3,7	5,7	2,1	19	43	267	0,79
at1_6	5,6	5,6	1,5	15	44	331	0,77
bt1_4	11,8	8,4	2,5	32	109	176	1,34
bt1_6	11,3	7,9	2,5	27	59	448	0,7

Tabell 2. Siffrorna avser prov i fibrernas riktning

Provtyp	$M_{b,max}(Nm)$	$E,böj(GPa)$	$E,drag(GPa)$	$R_m(MPa)$	$S_b(MPa)$	$r_B(mm)$	$e_B(\%)$
am1_4	18,6	21,5	12,7	104	205	158	1,36
am1_6	27,5	19,9	15,2	92	187	201	1,37
bm1_4	28,0	19,9	14,2	119	240	156	1,57
bm1_6	39,1	22,9	15,4	124	217	245	1,25

Jämförelse av specifika hållfastheter och styvheter mellan trälaminatet och glasfiber/vinylester-plast, dessa värden ska ses som en ungefärlig uppskattning. Kvoten anger (värdet för trälaminatet / värdet för plasten). Dessa värden kan tolkas, som att plastmaterialet måste vara den angivna kvoten gånger tyngre för att uppnå samma styrka i hållfasthet eller styvhet.

Tabell 2. Specifika hållfastheter och styvheter mellan trälaminatet och glasfiber/vinylester

	Drag-hållfasthet $\left(\frac{s}{r}\right)$	Drag-styvhet $\left(\frac{E}{r}\right)$	Böj-hållfasthet $\left(\frac{s}{r^2}\right)$	Böj-styvhet $\left(\frac{E}{r^3}\right)$
I trätets fiberriktning	Kvot 2	Kvot 3	Kvot 7	Kvot 70
Mot trätets fiberriktning	Kvot 0,5	Kvot 0,5	Kvot 1,5	Kvot 20



Innehållsförteckning

Inledning	4
Bakgrund	4
Problembeskrivning	4
Allmän bakgrund om trä/epoxi – laminat	5
Fördelar med epoxi.....	5
Val av träslag.....	5
Täckväven.....	5
Materialmodell	6
Tillverkningsbeskrivning	7
Data för laminatkomponenter	7
Dragprov	8
Utförande.....	8
Provkroppar.....	9
Utvärdering.....	9
Bestämning av elastiska parametrar.....	9
Fyrpunkts böjprov	10
Utförande.....	10
Utvärdering.....	11
Felkällor och osäkerheter	12
Dragprov.....	12
Böjprov.....	12
Materialet.....	12
Mätutrustningen.....	12
Teoretisk bestämning av E-modulen (drag)	13
Teoretisk bestämning av E-modulen (böj)	15
Provresultat	17
Jämförelse emellan teoretiska och experimentella E-moduler	16
Specifika hållfastheter och styvheter	18
Jämförelse mellan trä/epoxi och glasfiber/vinylesterplast	19
Slutsatser	20
Referenslitteratur	21
Bilagor	
Bilaga 1, Spännings-töjningsdiagram	
Bilaga 2, Jämförelse av specifik böjstyvhet	
Bilaga 3, Jämförelse av specifik böjhållfasthet	
Bilaga 4, Jämförelse av specifik dragstyvhet	
Bilaga 5, Jämförelse av specifik draghållfasthet	



Inledning

Som examination i kursen Tillämpad Hållfasthetslära ska ett projekt genomföras där ett problem med verklighetsanknytning ska lösas. Projektet ska redovisas i en skriftlig rapport samt genom en muntlig redovisning. Uppgifterna, som är av skiftande karaktär för de olika projektgrupperna tillhandahålls av olika företag.

Bakgrund

Arvika Båtproduktion KB i Arvika tillverkar kanoter av ett granträ laminat. Företaget har lämnat önskemål till institutionen för hållfasthetslära KTH, om att få hjälp med bestämning av materialdata, samt att få en bedömning av om laminatet är jämförbart med ett konventionellt kanotmaterial i plast. Arvika Båtproduktion har tillhandhållit provbitar av trä laminatet med tjocklekarna 4,5 mm och 6 mm.

Problembeskrivning

Problemet går ut på att med hjälp av experiment undersöka materialets egenskaper. Detta kan göras genom utförande av dragprov och fyrpunkts böjprovning. Genom provning kan man undersöka elasticitetsmodul, brottgräns och böjstyvhet.

Trä är anisotrop, vilket innebär att egenskaperna inte är lika i alla riktningar. Störst hållfasthet har träet i fibrernas riktning och klenast är det tvärs fiberriktningen. Därför är det lämpligt att materialet undersöks i båda fiberriktningarna.

De materialdata, som är aktuella att undersöka, är laminatets elasticitetsmoduler och brottspänningar i drag och böjriktning. Dessa parametrar kommer att tas fram med hjälp av dragprov och fyrpunkts böjprov i laboratoriet vid institutionen för hållfasthetslära på KTH.



Allmän bakgrund om trä/epoxi-laminat

Trä är ett material, som har använts för båt och kanotbygge i många år. Det finns flera fördelar med att använda trä. En av de största fördelarna är att trä är mycket starkt i fiberriktningen och därmed väl lämpat för långa smala konstruktioner, samt att det är lätt att forma. Ytterligare fördelar är att det flyter, isolerar mot kyla och värme, och att det är förhållandevis billigt.

Ibland nackdelarna kan nämnas att trä sväller och krymper när fuktigheten ändras, vilket gör det svårt för limfogar och ytbehandling att hålla, samt att mikroorganismer under gynnsamma förhållanden dvs. fukt, värme och gott om syre äter upp träfibren.

Fördelar med epoxi

Träets nackdelar kan till stor del elimineras med hjälp av skyddande skikt av epoxi. Om man täcker ett antal ihoplimmade träribbor med ett skikt av tex. glasfiberväv och epoxi så hindras fukten att tränga in i samma grad och mikroorganismerna dör av syre och vattenbrist. Samtidigt upphör träets rörelser pga. fuktighet, epoxin överlappar eventuella glipor, det blir styvt och slag-tåligt. Vid kontakt med tex. en vass sten så uppstår endast en lokal repa i epoxin. Är ytan däremot av tex. polyester, så uppstår lätt krackeleringssprickor, som med tiden leder in vatten i laminatet. Dock måste väven ha en viss grad av elasticitet för att kunna följa träets rörelser samtidigt som det ska ge en styv konstruktion.

Val av träslag

Gran är det absolut vanligaste träslaget, som används. Anledningen är att det ger störst styrka i förhållande till vikten. Vid tillverkning av träribborna bör kvistar undvikas. Därför används så kallad kvistfri gran, dvs. gran, som har växt upp så tätt att den nedre delen av stammen innehåller inga eller få kvistar.

Täckväven

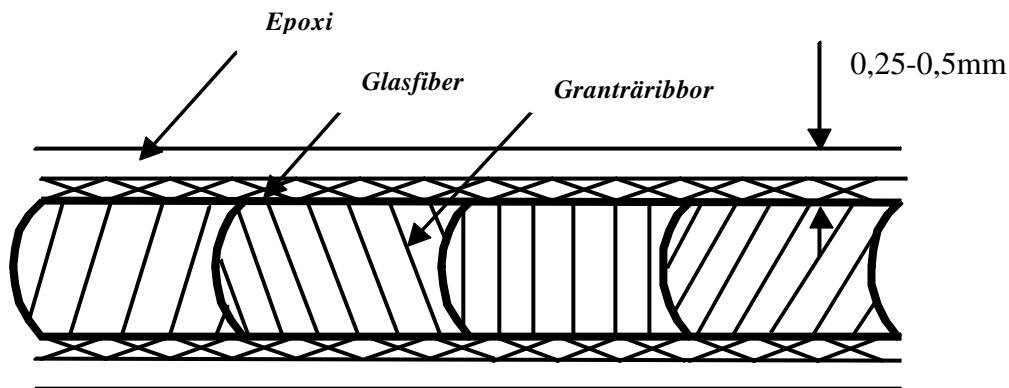
Täckväven som används kan vara av tex. glasfiber, kevlar eller kolfiber. Den ska uppfylla tre syften:

- *Det är den som ger kanoten sin styrka i tvärskeppsled i stället för de spant som traditionellt används.*
- *Den ska bilda ett skal som fördelar ut krafter och skydda träytan mot repor.*
- *Den ska tillsammans med epoxin bilda ett vattentätt skikt.*

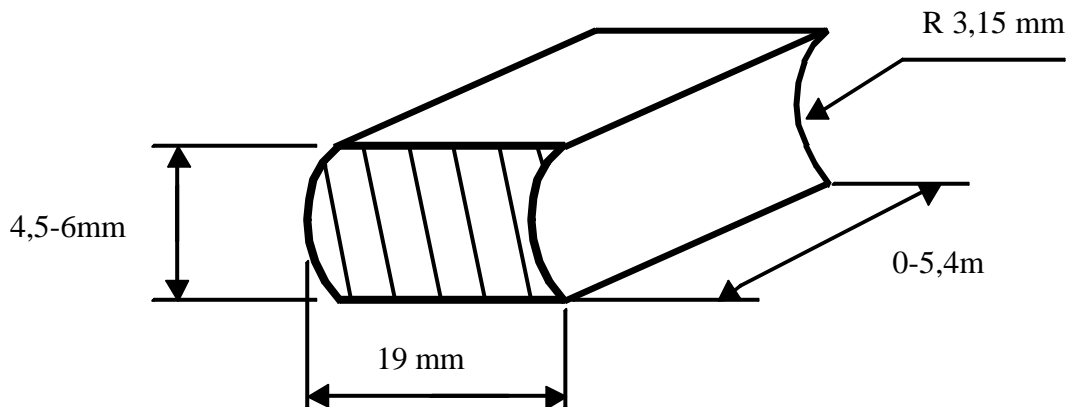
Kevlar och kolfiber är lättare och har bättre fiberstyrka men är svårare att hantera och kostar mer än glasfiber. Kolfiber har dålig slagåtlighet och lämpar sig därför ej för tillverkning av brukskanoter. Om dessutom syftet är att bevara träets färger så är den gula kevlar och den svarta kolfibern knappast aktuella att använda. Därför är glasfiber den vanligaste väven att använda till trälaminatet.

Materialmodell

Laminatet består av en kärna av granträribbor som är ihoplimmade med trälim. Kanterna är rundade så att de passar in i varandra. På varje sida ligger en, alternativt två, glasfibervävar som är fastlimmade med epoxi. Skiktet med glasfiber/epoxi är ca 0,25 mm tjockt på envävsvarianten och ca 0,5 mm på tvåvävsvarianten (se figur 1).



Figur 1. Tvärsnitt av laminatet, mot fibrernas riktning.



Figur 2. Måtten på ribborna som används.

Ribborna kan variera i längd ganska mycket. Detta är en fördel, eftersom då behöver bitarna, som används inte ha samma längd som hela kanoten. De mått som är konstanta för de olika tjocklekarna är bredden (19 mm) och rundningsradien (3,15 mm) i fram och bakkant (se figur 2).



Tillverkningsbeskrivning

Efter det att granträribborna sågats till rätt dimension skarvas de ihop med trälim. Därefter slipas de två ytorna med slippapper 80 så att de blir jämna och lite uppruggade.

På den slipade ytan läggs ett lager glasfiberväv och därefter appliceras epoxin. I och med att den epoxi som används är tunnflytande och har en bearbetningstid på 40 min så går det bra att stryka på epoxin efter det att väven lagts ut. Den hinner helt tränga igenom väven och in i träet. Det finns även en variant där dubbla lager med fiberväv läggs på båda sidor.

Epoxin har en brottöjning på 3,5 % vilket är fördelaktigt eftersom det ger laminatet en viss flexibilitet och smidighet.

Data för ingående laminatkomponenter tillverkat av Arvika Båtproduktion KB

Träslag: Kvistfri gran från Arvikatrakten i längder 0-5,4 m

Bitarnas bredd: 19 mm

Rundningsradie konvex och konkav kant: 3,15 mm

Tjocklek: 4,5 - 6 mm

Lim: Bostic PVA trälim 730

Glasfiberväv: Hexcel 1039 Twillväv 162g/m²

Epoxi: NM275 (Nils Malmgren, Ytterby) ,

Densitet $\rho = 1098 \text{ kg/m}^3$,

Tryckhållfasthet enligt ISO R604 : 90 MPa

Draghållfasthet enligt ISO 527 : 56 Mpa

E-modul drag enligt ISO 527 : 2,35 Gpa

Brottöjning enligt ISO 527 : 3,5 %

Vattenabsorption enligt ISO 6224H : 0,15%

Dragprov

Dragprov utförs för att bestämma närmevärden av parametrar på laminatet. Det är av typen: samband mellan spänningar och töjningar, elasticitetsmodul E , och gränsvärden som brottgräns R_m .

Utförande

En kropp med konstant tvärsnitt förlängs gradvis i sin längdriktning. Förlängningen åstadkoms av homogen normalspänning vid ändytorna. Ändytorna antas vara skjuvspänningsfria. Den resulterande kraften som funktion av förlängningen mäts upp. Eventuellt mäts även tvärsnittens deformation och förlängning efter brott mellan vissa punkter på provkroppen. Töjningen mäts på provkroppen med dubbla extensiometrar.

Dragprovsmaskinen skall medge dragbelastning utan stötar, med varierande hastigheter. Inom försöklängden skall töjningshastigheten ligga mellan 0.025 %/s och 0.25 %/s i det elastiska området. Varje avläsning av den pålagda provkraften skall ligga inom en felmarginal av en procent av den pålagda kraften. Tidigare användes rent mekaniska och mekaniskt-optiska givare. Numera används givare med elektrisk utsignal företrädesvis.

Trälaminaten belastades med en servohydralisk dragprovsmaskin MTS 30 kN i hållflabbet. Som elektronisk styrenhet användes Instron plus 800, fyra kanaler användes för att samla indata. De data som mättes var i respektive kanal:

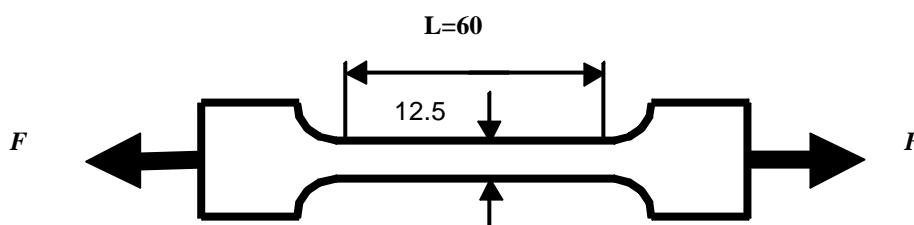
1. Tid
2. Kolförskjutning
3. Töjning
4. Kraft



Figur 3. Servohydralisk dragprovsmaskin MTS 30kN med styrenhet Instron plus 800.

Provkroppar

De ideala randvillkoren kan givetvis inte exakt uppnås i verkligheten. För att komma verkligheten så nära som möjligt, överförs kraften från huvudet via en mjuk övergång (radie) till den mindre delen där mätningen utförs, radien på de aktuella provstavarna var 20 mm. Långa provstavar är att föredra så spänningsvariationer över tvärsnittet utjämnas i möjligaste mån, den aktuella längden var 60 mm. Bredden på provstavarna valdes till 12,5 mm (se fig 4 nedan). Många provkropsutföranden har fastställts i nationella och internationella standarder, se till exempel svensk standard SS 11 21 00.



Figur 4 provstav

Utvärdering

Det uppmätta sambandet mellan kraft och förlängning skalas så att ett spänning-töjnings samband erhålls. Därvid divideras kraften med den ursprungliga tvärarean, S_0 , och teknisk spänning erhålls. Förlängningarna divideras med ursprunglig mätlängd L_0 och teknisk töjning erhålls.

Vid utvärdering av ett standardprov tas ingen hänsyn till att tvärsnittsarean minskar. Den sanna spänningen definieras som resulterande kraften dividerat med tvärarean. Det vill säga att det korrekta medelvärdet av den lokala spänningen i tvärsnittet underskattas. Men den lokala areaförändringen är så pass liten i detta fall, ty materialet är tämligen sprött. En approximation att den tekniska spänningen är lika med den verkliga spänningen kan med lätthet göras och en enklare mätmetod kan användas.

Bestämning av elastiska parametrar

Elasticitetsmodulen E är ett mått på spännings-töjningskurvans lutning i materialets elastiska området.

$$\bar{E} = \frac{\Delta s}{\Delta e}$$

Mätning av den **tekniska spänningen** fås ur den uppmätta ursprungliga tvärsnittsytan, och då detta material, som sagts tidigare, har ett sprött uppträdande med mycket små deformationer innan brott så kan max teknisk spänning sättas lika med **brottspänningen** i detta fall.

$$R_m = \frac{F_{\max}}{A_0}$$

Fyrpunkts böjprov

Böjprov är i jämförelse med drag- och tryckprov, en relativt outnyttjad metod för att bestämma ett materials konstitutiva egenskaper. I svensk standard står till exempel inget nämnt om böjprov i detta sammanhang. Drag och tryckprov ger en mer generell beskrivning av materialets konstitutiva egenskaper, spänning och töjning är direkt givna utan några omskrivningar och antaganden om materialets beteende. Vid böjprov måste spännings- töjningssambandet vara känt för att en analys skall kunna göras på materialet. I korthet kan sägas att böjprov ger material-konstanter, inte det konstitutiva beteendet.

Men det finns ändå anledning att ägna böjprovet en del uppmärksamhet. En sådan anledning är att olika material beter sig annorlunda vid böjbelastning än när de är utsatta för dragbelastning.

Utförande

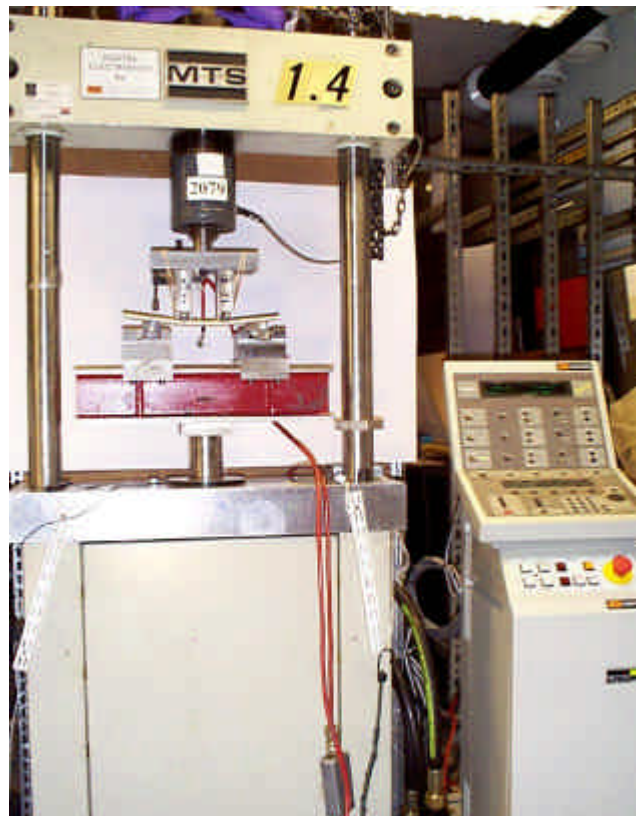
I de genomförda proven har de två mittersta krafterna lagts på med ett mellanrum på 80 mm. De två yttre stöden hade ett inbördes avstånd på 200 mm. Provbiten är fritt upplagd på rullar så inga störande tvärkrafter skall påverka provet.

Trälaminatet böjdes med 1.4 MTS 100 kN pressen i hållflabbet, se fig 5 nedan. Pressen har följande data :

Maximal statisk last: +/- 100 kN
Maximal dynamisk last: +/- 100 kN
Maximal kolvrörelse: +/- 25 mm
Maximal provhöjd: ca 1 000 mm

Som elektronisk styrenhet användes Instron plus 800, fyra kanaler användes för att samla in data. De data som mättes var i respektive kanal:

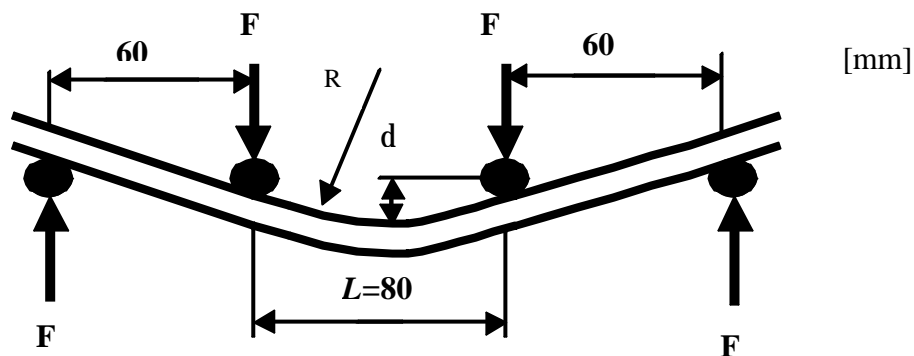
1. Tid
2. Kolförskjutning
3. Utböjning
4. Kraft



Figur 5. Fyrpunkts böjprov

Utvärdering

I de genomförda proven har det antagits att det råder ett konstant böjmoment mellan de två mittersta punktlasterna. Samt att tvärkraften är noll inom samma område. Förskjutningsradien mellan stöden är också konstant vid elastisk deformation. Förskjutningen δ i figuren nedan mäts och kallas för pilhöjden. Ur kända elementarfall och geometriska samband kan materialdata räknas fram.



Figur6 . Principskiss av fyrapunktsböjprov

Max böjmoment: M_{\max}

Fås ur moment-töjningsdiagrammets maxvärde.

Maxböjradie: R

$$d(2R - d) = 40^2 \Rightarrow R = \frac{40^2 + d^2}{2d}$$

Brottöjning: e_{brott}

$$e_{\text{brott}} = \frac{h}{2R}$$

E-modul, E :

Fås ur hållfens elementarfall för böjda balkar

$$d = \frac{M \cdot L^2}{2 \cdot E \cdot I} \cdot \frac{1}{4} \Rightarrow E = \frac{M \cdot L^2}{2 \cdot d \cdot I} \cdot \frac{1}{4} = \frac{3 \cdot M \cdot L^2}{2 \cdot d \cdot b \cdot h^3}$$

Brottspänning: S_{brott}

Fås ur teknisk balkteori



$$s_{brott} = \frac{M_b}{W_b} = \frac{M_b \cdot 6}{b \cdot h^2}$$

Felkällor och osäkerheter

Dragprov

Vid dragprov finns en mängd felkällor, de enklaste och mest påfallande är viktiga att vara vaksam mot. Provstaven kan glida i infästningen vid påläggning av lasten. Extensiometrarna som mäter förlängningen hos provbiten är fästa med eggarna mot materialet. Eggarna kan glida lite vid stora töjningar hos provkroppen. Om dragkraften anbringas med en förskjutning e från symmetrilinjen fås ett böjmoment $M=eF$ i ändytorna. Detta påverkar till exempel bestämningen av elasticitetsmodulen med upp till 10% i ogynnsamma fall. Vinkelfel vid inspänningen av provkroppen kan tänkas införa en rotation θ vid ändytorna, som förblir konstant. Rotation ger upphov till ett böjmoment och böjspänningar som kröker provkroppen. När axialkrafter läggs på kommer krökningen att minska och detta påverkar uppskattningen av elasticitetsmodulen, om än ej så kraftigt.

Böjprov

Vid Böjprov finns det både mätosäker och modellbrister. Att mäta pilhöjden exakt på mitten är inte helt trivialt, och viss osäkerhet föreligger därmed i beräkningen av elasticitetsmodulen. I upplagringen av provbiten fås även små förskjutningar vid rullarna som krävs för att få "balken" fritt upplagd. Då dessa förskjuter sig något i längsled ändras den totala längden, vilket påverkar det sanna momentet i provbiten. Vid relativt stora axiella förskjutningar, som i detta fall, glider även provbiten ner något från sitt ursprungliga läge på rullarna, detta får som följd att även här en längre längd av provbiten än den ursprungliga fås. Vissa deformationer i provbiten sker då rullarna trycker mot provbiten, detta leder till att den sanna pilhöjden påverkas något negativt.

Materialet

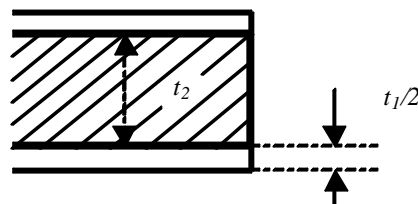
Vissa stokastiska avvikelser finns i materialet självt. Trä i sig är ett anisotropt material som har variationer i sin struktur, lokalt kan materialet uppvisa helt andra egenskaper än provbitens medelgenskaper. Även sammansättningen av glasfiberväven och epoxin har vissa variationer i förhållande till varandra i volym över provbitens längd, detta kan i ogynnsamma kombinationer med träets avvikelser få allvarliga konsekvenser beträffande laminatets konstitutiva egenskaper. Toleranserna hos provbitarnas tjocklek är mycket grova och tjockleken varierar kraftigt över provlängden hos vissa bitar, detta får som konsekvens att ett medelvärde och ett antagande om provkroppens tvärsnitts area måste tas fram. Detta påverkar naturligtvis de beräknade materialegenskaperna, som blir något konservativa. Materialet går som bekant sönder och karaktäriseras av provbitens vekaste ställe, inte nödvändigtvis vid samma tvärsnittsytta som använts i beräkningen.

Mätutrustning

De mätinstrument som använts har naturligtvis också vissa osäkerheter, men dessa är i detta sammanhang så små jämfört med materialets och handhavandets inverkan. Genom att använda dubbla motstående extensiometrar och medelvärdesbilda töjningen, nås mycket små mätfel vid dragprovet.

Teoretisk bestämning av E-modulen (drag)

För att få en jämförelse till de experimentellt framtagna E-modulerna görs en uppskattning av materialets elasticitetsmodul (E-modul). Vid beräkningen görs ett antal antaganden. Andelen epoxi och glasfiberväv är ungefär 50/50. Då vävens trådar är flätade med en vinkel på 90 grader i förhållande till varandra så innebär det att 50 procent av fibrerna kommer att ta upp last, dvs. de fibrer som är i drag eller böjriktningen. Med dessa antaganden samt med vetskap om glasfiber/epoxi-lagrets tjocklek så kan en uppskattning av laminatets E-modul enkelt göras.



Figur 7. Principskiss av de olika laminatskikten.

Om träs tjocklek är t_2 och glasfiber/epoxi-skiktets totala tjocklek är t_1 kan totala spänningen (s) i laminatet skrivas:

$$s = \frac{s_1 \cdot t_1 + s_2 \cdot t_2}{t_1 + t_2} \quad (1)$$

där s_1 är spänningen i glasfiber/epoxi-skiktet och s_2 är spänningen i träkärnan.

Hookes lag :

$$s = \bar{E} \cdot e \quad (2)$$

där \bar{E} är laminatets elasticitetsmodul och e töjningen.

Om töjningen (e) antas vara lika i de olika laminatskikten så kan man med Hookes lag och genom insättning av de olika skiktens E-moduler skriva :

$$s = \frac{s_1 \cdot t_1 + s_2 \cdot t_2}{t_1 + t_2} = \frac{E_1 \cdot t_1 + E_2 \cdot t_2}{t_1 + t_2} \cdot e \quad (3)$$

där laminatets E-modul :

$$\bar{E} = \frac{E_1 \cdot t_1 + E_2 \cdot t_2}{t_1 + t_2} \quad (4)$$

Glasfiber/epoxi-laminatets E-modul (E_1) delas i sin tur upp i två delar, en för epoxin (E_{epoxi}) och en för glasfiber (E_{glas}).

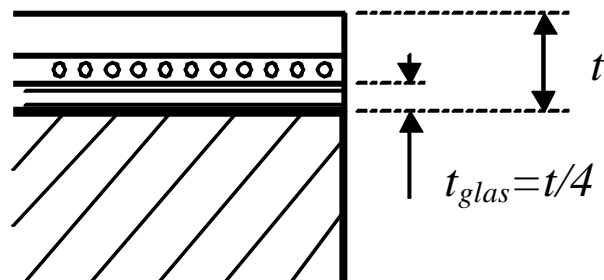
Insättning i formel (4) ger:

$$\bar{E} = \frac{E_{glas} \cdot t_{glas} + E_{epoxy} \cdot t_{epoxy} + E_{trä} \cdot t_{trä}}{t_{glas} + t_{epoxy} + t_{trä}} \quad (5)$$

Med vetskap om E -modulerna och tjocklekarna för laminatets komponenter kan en teoretisk E -modul för laminatet bestämmas.

Följande värden används: $E_{glas} = 70 \text{ GPa}$ $E_{epoxi} = 2,35 \text{ GPa}$ $E_{trä,med} = 11 \text{ GPa}$

Tjockleken på epoxin antas vara $3/4$ av glasfiber/epoxi-skiktets totala tjocklek. Glasfibrerna som tar upp last utgör en fjärdedel av skiktets tjocklek d.v.s. de fibrer som ligger i dragriktningen.



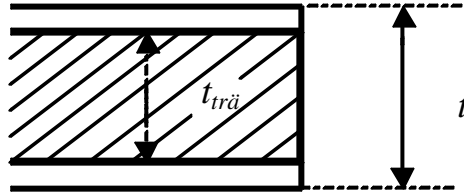
Figur 8. Principskiss av glasfiber/epoxi- skiktet. Glasfiberväven är flätat med en vinkel på 90 grader vilket innebär att 50% av glaset tar upp last.

Teoretisk bestämning av E-modul (böj)

För bestämning av E-modulen i ett laminat som utsätts för böjning används följande samband:

$$E = \left(E_{glas} \cdot \frac{1}{4} + E_{epoxy} \cdot \frac{3}{4} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{t_{trä}}{t} \right)^3 \right] + E_{trä,med} \cdot \left(\frac{t_{trä}}{t} \right)^3 \quad (6)$$

där $t_{trä}$ är träets tjocklek och t är totala tjockleken för laminatet.



Figur 9. Tjocklekarna som används i formel (6)

Vid beräkningarna sätts $E_{glas} = 70 \text{ GPa}$, $E_{epoxi} = 2,35 \text{ GPa}$, $E_{trä,med} = 11 \text{ GPa}$



Provresultat

Vid analys av data från drag- och böjprov kan ett antal parametrar bestämmas (se tabell 1 & 2), dock måste det beaktas att avvikelser kan ske. Dels på grund av osäkerheter i mätningarna men även variationer i träet. Det har inte gjorts tillräckligt många prov för att statistiska variationer i träet har kunnat undersökas. Därför ska de framtagna värdena endast ses som någon form av riktvärden.

Tabellen visar sammanställning av värden för:

Max böjmoment	$M_{b,max}$ [Nm]
E-modul,bøj	$E,bøj$ [GPa]
E-modul,drag	$E,drag$ [GPa]
brottspänning,drag	R_m [MPa]
brottspänning böj.	S_b [MPa]
brotrradie	r_B [mm]
brottöjning	e_B [%]

Tabell 1. Prov mot fibrernas riktning, $a = 1$ väv, $b=2$ väv, 4 och 6 anger tjockleken

Provnamn	$M_{b,max}(Nm)$	$E,bøj(GPa)$	$E,drag(GPa)$	$R_m(MPa)$	$S_b(MPa)$	$r_B(mm)$	$e_B(\%)$
at1_4	3,7	5,7	2,1	19	43	267	0,79
at1_6	5,6	5,6	1,5	15	44	331	0,77
bt1_4	11,8	8,4	2,5	32	109	176	1,34
bt1_6	11,3	7,9	2,5	27	59	448	0,7

Tabell 2. Prov i fibrernas riktning, $a = 1$ väv, $b=2$ väv, 4 och 6 anger tjockleken

Provtyp	$M_{b,max}(Nm)$	$E,bøj(GPa)$	$E,drag(GPa)$	$R_m(MPa)$	$S_b(MPa)$	$r_B(mm)$	$e_B(\%)$
am1_4	18,6	21,5	12,7	104	205	158	1,36
am1_6	27,5	19,9	15,2	92	187	201	1,37
bm1_4	28,0	19,9	14,2	119	240	156	1,57
bm1_6	39,1	22,9	15,4	124	217	245	1,25



Jämförelse mellan teoretiska och experimentella E-moduler

De teoretiska E-modulerna är beräknade för bitar i träets fiberriktning. Därför är det bara aktuellt att göra jämförelser med motsvarande provbitar. Anledningen till att de skiljer kan bero bl a på osäkerheter i mätningarna, ojämnheter i träet och osäkerheter i uppskattningarna som gjorts i de teoretiska beräkningarna.

Tabell 3. E-modul, drag i fiberriktningen

Provnamn	$E_{teoretisk,drag}$ (GPa)	$E_{experimentell,drag}$ (GPa)	Skilnad (%)
Am1_4	12.0	12.7	6
Am1_6	11.7	15.7	23
Bm1_4	12.7	14.2	11
Bm1_6	12.2	15.4	21

Tabell 4. E-modul, böj i fiberriktningen

Provnamn	$E_{teoretisk,böj}$ (GPa)	$E_{experimentell,böj}$ (GPa)	Skilnad (%)
Am1_4	13,4	21,5	38
Am1_6	12,9	19,9	35
Bm1_4	14,8	19,9	26
Bm1_6	14,2	22,9	38

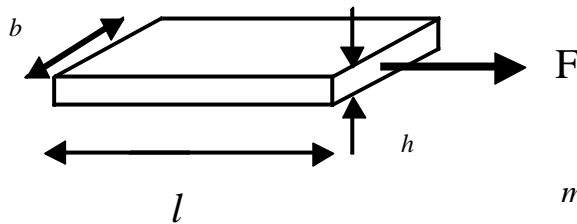
Avvikelserna mellan de framräknade och uppmätta E-moduler är störst i böjriktningen. Det kan troligtvis bero på att det vid fyrpunkts böjprovning är svårt att få mätningarna exakta. Dels kan rullarna tryckas ner lite i materialet vilket ger en mindre nedböjningen än den verkliga, vilket i så fall ger en högre E-modul. Sedan kan man få en felaktig nedböjning om pilspetsen (givaren som mäter nedböjning) sitter lite snett. Då blir konsekvensen också att man får en högre E-modul än den verkliga.

Specifika hållfastheter och styvheter

För att få en uppfattning om granträlaminatets egenskaper jämfört med ett konventionellt kanotmaterial så är det lämpligt att jämföra materialens specifika hållfastheter och styvheter.

Materialiet som trälaminatet jämförs med är en kontinuerlig matta glasfiber 26,7 % (volym) och vinylester.

Drag



$$F = s_b \cdot b \cdot h \Rightarrow h = \frac{F}{s_b \cdot b}$$

$$m = r \cdot b \cdot h \cdot l = r \cdot \frac{F}{s_b \cdot b} \cdot b \cdot l = \left(\frac{r}{s} \right) \cdot F \cdot l$$

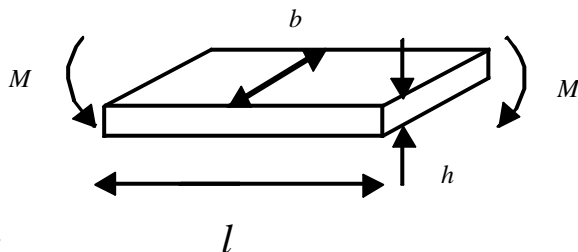
figur 10.

Specifik draghållfasthet : $\left(\frac{s}{r} \right)$

$$e = \frac{F}{b \cdot h} \cdot \frac{1}{E} ; h = \frac{F}{b} \cdot \frac{1}{E}$$

Specifik dragstyvhet : $\left(\frac{E}{r} \right)$

Böjning



$$s = \frac{6 \cdot M}{b \cdot h^2} ; h = \left(\frac{6 \cdot M}{b \cdot s} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Figur 11.

$$m = r \cdot b \cdot h \cdot l = r \cdot \left(\frac{6 \cdot M}{b \cdot s} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot l = \left(\frac{r}{\sqrt{s}} \right) \cdot \left(\frac{6 \cdot M}{b} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot l$$

Specifik böjhållfasthet : $\left(\frac{s}{r^2} \right)$

Specifik styvhet: $d = \frac{P \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I} = \frac{P \cdot l^3}{E \cdot \frac{b \cdot h^3}{4}} \Rightarrow h \propto \left(\frac{1}{E} \right)^{\frac{1}{3}} \quad m \propto r \cdot b \cdot l \cdot \left(\frac{1}{E} \right)^{\frac{1}{3}}$

Specifik böjstyvhet: $\left(\frac{E}{r^3} \right)$



Jämförelse mellan trä/epoxi och glasfiber/vinylesterplast

För att få en uppfattning hur bra trälaminatet är jämfört med ett kanotmaterial av plast kan dess specifika hållfastheter och styvheter jämföras.

En kontinuerlig matta glasfiber 26,7% (volym) och vinylester har följande materialdata:

Tabell 5. Materialdata för glasfiber/vinylesterplast.

Glas/Vinyl	Drag	4Punkts-Böj
<i>E</i> -modul	13,7 GPa	12,8 GPa
<i>S</i> brott	206 MPa	360 MPa
<i>e</i> brott	2,17%	3,85%
<i>r</i>	1600 kg / m ³	1600 kg / m ³

Vid jämförelsen används en uppskattad densitet för trälaminatet på 460 kg/m³.

Jämförelse av specifika hållfastheter och styvheter mellan trälaminatet och glasfiber/vinylesterplast. Dessa värden ska ses som en ungefärlig uppskattning. Kvoten anger (värdet för trälaminatet / värdet för plasten). Dessa värden kan tolkas som att plastmaterialet måste vara den angivna kvoten gånger tyngre för att uppnå samma styrka i hållfasthet eller styvhet.

Tabell 6. Jämförelsekvoter mellan trälaminatets och glasfiber/vinylesterplastens specifika hållfastheter och styvheter.

	Drag-hållfasthet $\left(\frac{s}{r}\right)$	Drag-styvhet $\left(\frac{E}{r}\right)$	Böj-hållfasthet $\left(\frac{s}{r^2}\right)$	Böj-styvhet $\left(\frac{E}{r^3}\right)$
<i>I träets fiberriktning</i>	Kvot 2	Kvot 3	Kvot 7	Kvot 70
<i>Mot träets fiberriktning</i>	Kvot 0,5	Kvot 0,5	Kvot 1,5	Kvot 20



Slutsatser

Trälaminatet har goda egenskaper i fiberriktningen och står sig mycket väl, om inte bättre, än konventionella material. I fiberriktningen uppvisade materialet mycket goda egenskaper både i drag- och böjproven. I dragproven uppvisade träet en tendens att skapa mikrosprickor som fortplantade sig och till slut, efter tillräckligt hög last, fick laminatet ett uppträdande som enbart liknade glasfiber/epoxi skiktets förväntade egenskaper. Träkärnan spricker alltså gradvis och kollapsar till slut. Tvärs fiberriktningen har detta uppträdande ett särskilt tydligt förlopp, då träets fibrer delar på sig. Ur spänningstöjningsdiagrammet ses att materialet har två linjära områden med olika lutning. Detta beror av ovanstående fenomen med sprickbildning under påläggning av lasten. Den intressanta elasticitetsmodulen för dimensionering torde vara den första av de två, vilket representerar hela laminatet, medan den senare lutningen vid högre last representerar glasfiber/epoxi skiktets egenskaper (se bilaga 1). Genom dimensionering mot den första elasticitetsmodulen fås även en säkerhet mot haveri.

Genom en optimal orientering och dimensionering av materialet kan förmodligen stora viktbesparingar göras gentemot konventionella material. För att uppnå samma egenskaper som laminatet med ett konventionellt material, kommer till exempel konstruktionen att väga cirka sjuttio gånger mer med avseende på specifik böjstyvhet (E/ρ^3)-m i träets fiberriktning, respektive tjugofem gånger mer vid nittio grader från träfiberriktningen (se bilaga 2). Vid en studie av den specifika böjhållfastheten (σ/ρ^2)-m så kommer konstruktionen att vara sju gånger, eller 700% tyngre med fiberriktningen, och cirka 150% mer massa tvärs fiberriktningen (se bilaga 3). Jämförelser vid drag visade på mer jämbördiga förhållanden mellan de båda materialen. Vid studie av den specifika dragstyvheten i förhållande till massan (E/ρ)-m, visade sig laminatet vara cirka fyra gånger lättare i fiberriktningen. Medan tvärs fibrerna var glasfiber/vinylester blandningen lättare, cirka 50% lättare (se bilaga 4). Specifika draghållfastheten (σ/ρ)-m jämfördes också med avseende på massan. Glasfiber/vinylester var nästan dubbel så tungt som laminatet i laminatets fiberriktning, men tvärs fiberriktningen krävs endast cirka 50% av laminatets massa för glasfiber/vinylester att uppnå samma egenskaper.

Av detta ses att laminatet som tidigare sagts har goda egenskaper i vissa avseenden, och om konstruktörerna arbetar medvetet med dessa kunskaper kan mycket goda resultat förmodligen nås. Genom att förstärka de delar till exempel sittbrunnen som utsätts för större punkt krafter, i tvärsled för fibrerna, vid i och ur stigning ur kajaken.



Referenslitteratur

Sundström B "Enaxliga problem Teknisk balkteori"
Hållfasthetslära KTH, (1992).

Roland F. Gibson "Principles of composite Material mechanics"
McGraw-Hill, (1994).

Sundström B "Handbok och formelsamling i hållfasthetslära"
Institutionen för hållfasthetslära, (1998).