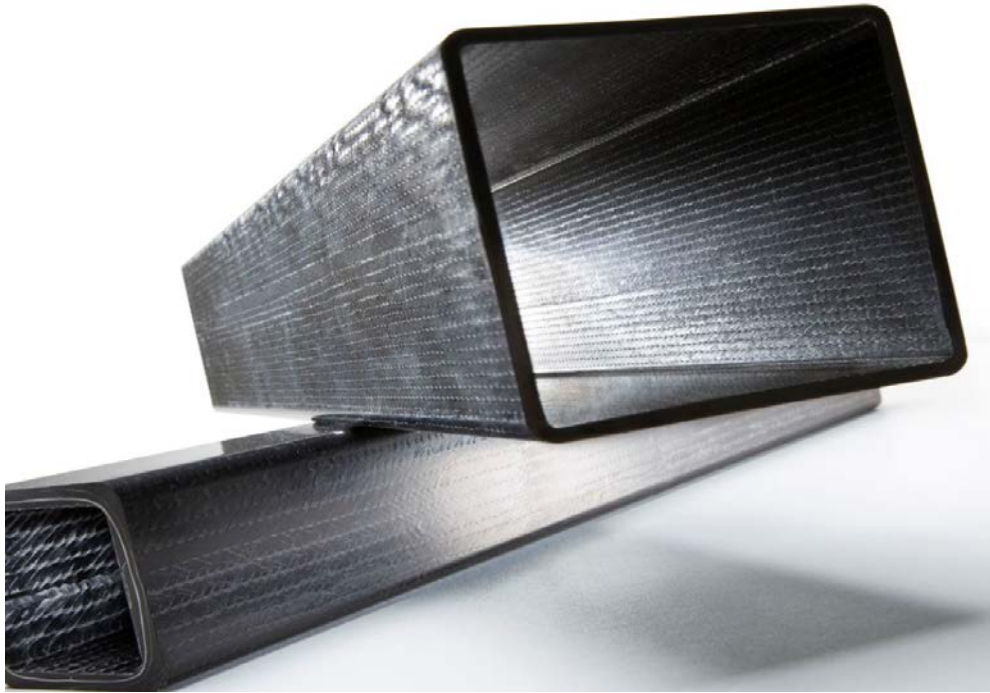


CHALMERS



Beräkningsverktyg för dimensionering av fiberarmerade plaster

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Byggingenjör*

CHRISTIAN BRIX ROED & PHILIP THORESSON

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för konstruktionsteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2014
Examensarbete 2014:47

EXAMENSARBETE 2014:47

Beräkningsverktyg för dimensionering av fiberarmerade plaster

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Byggingenjör

CHRISTIAN BRIX ROED & PHILIP THORESSON

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för konstruktionsteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2014

Beräkningsverktyg för dimensionering av fiberarmerade plaster
Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Byggingenjör

CHRISTIAN BRIX ROED & PHILIP THORESSON

© CHRISTIAN BRIX ROED & PHILIP THORESSON 2014

Institutionen för bygg- och miljöteknik,
Chalmers tekniska högskola 2014:47

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

Omslag:
Profildragen kolfiberrör.
Exel Composites (2014), *Pultruded CRP composite profile (carbon fiber plastics)*

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Göteborg 2014

Beräkningsverktyg för dimensionering av fiberarmerade plaster
Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Byggingenjör

CHRISTIAN BRIX ROED & PHILIP THORESSON

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för konstruktionsteknik
Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Trä, stål och betong dominerar inom byggbranschen som konstruktionsmaterial. På grund av många års användning har kunskap och tradition med dessa som konstruktionsmaterial utvecklats. Detta har lett till en trygghet och vana som inte är fördelaktig för utveckling och utbredning av nya material.

Syftet med projektet var att underlätta dimensioneringen av balkar av fiberarmerad plast. Projektet syftade dels på att undersöka och informera kring materialet *fiberarmerad plast* som är ett av flera alternativa material inom byggbranschen. En annan del var att beskriva teoretiska metoder kring dimensioneringen av fiberarmerade plastlaminat. På bakgrund av dessa teorier har ett beräkningsverktyg utformats i form av en matchcad-fil. Beräkningsverktyget används till att undersöka laminats egenskaper med hänsyn till dess ingående material och uppbyggnad.

Fiberarmerade plastkompositer har ett flertal fördelar i användning som konstruktionsmaterial. Dock finns inga allmänna dimensioneringsstandarder vilket behövs för att materialet ska få en större användning som konstruktionsmaterial inom byggbranschen.

Rapporten innehåller en beskrivning om materialet och dess relevanta egenskaper, uppbyggnad och tillverkningsmetoder samt genomgång av beräkningsteorier. Rapporten innehåller också en genomgång av beräkningsverktyget med kommentarer.

Nyckelord:

Fiberarmerad plast, Komposit, Materialegenskaper, Tillverkningsprocess, Fiber, Plastmatris, Klassiska laminatteorin, Laminat, Skikt, Konstruktionsteknik.

Structural Calculations for Fiber Reinforced Polymers
Diploma Thesis in the Engineering Programme
Building and Civil Engineering
CHRISTIAN BRIX ROED & PHILLIP THORESSON
Department of Civil and Environmental Engineering
Division of Structural Engineering
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

The building sector is dominated by tree, steel and concrete in terms of structural engineering. Due to the long tradition, knowledge and comfort in these materials, application and innovation in new materials is blocked or very low.

The aim of this project was to ease the designing of beams made by fiber reinforced polymer. The study intends to investigate and state the use of *fiber reinforced polymers* according to structural engineering in terms of properties and manufacturing. The project also intends to exhibit the theoretical methods of structural calculation of lamina composites. On behalf of these calculations a computer model, which examines laminate properties according to materials and ply stack up, was developed.

Composites of fiber reinforced polymers have several advantages in terms of use in structural engineering, but calculation standards needs to be defined in order to reach a wider application.

This report consists of a presentation and explanation of relevant literature about material properties, manufacturing and structural calculation theories. The report also includes an example and guidance of the computer model.

The Computer model calculates equivalent mechanical properties due to materials and lamina stack up. The modell cannot be used for designing FRP-beams but is used for additional understanding of the FRP-material.

Key words:

Fiber Reinforced Polymer, Composites, Material Properties, Manufacturing, Fiber, Plast, Matrix, Classical Lamination Theory, Lamina, Laminate, Structural Engineering.

Innehåll

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	II
INNEHÅLL	III
FÖRORD	V
BETECKNINGAR	VI
1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Avgränsningar	1
1.4 Metod	2
2 FIBERKOMPOSITENS MATERIAL	3
2.1 Fiber	3
2.1.1 Glasfiber	3
2.1.2 Kolfiber	3
2.1.3 Aramidfiber	4
2.1.4 Polyetenfiber	4
2.1.5 Naturfiber	4
2.2 Plastmatris	5
2.2.1 Härdplaster	5
2.2.2 Termoplaster	6
3 FIBERKOMPOSITENS UPPBYGGNAD	8
3.1 Fibernas riktning och längd	8
3.2 Vidhäftning	8
3.3 Materialval	9
3.4 Armeringstyper	9
3.5 Laminattyper	11
3.5.1 Enkelriktat laminat	12
3.5.2 Flerriktat laminat	12
4 TILLVERKNINGSPROCESSER	14
4.1 Tillverkning av härdplastkompositer	14
4.1.1 Profildragning	14
4.1.2 Öppna metoder	14
4.1.3 Pressmetoder	15
4.1.4 Injicering	17
4.2 Tillverkning av termoplastkompositer	18
CHALMERS , <i>Bygg- och miljöteknik</i> , Examensarbete 2014:47	III

4.2.1	Formpressning	18
4.2.2	Formsprutning	18
4.2.3	Extrudering	18
5	DELSAMMANFATTNING	20
5.1	Tillverkning	20
5.2	Material	20
5.3	Kombination av fiber och plastmatris	21
6	BERÄKNINGSKAPITEL	23
6.1	Generellt om dimensionering av laminat	23
6.2	Mikromekaniska modeller	23
6.3	Laminatteorin	24
6.3.1	Spänning-töjningssamband	24
6.3.2	Deformationssamband	27
6.3.3	Hållfasthetskriterier	30
7	NUMERISKA BERÄKNINGAR	32
7.1	Mathcad-filens beräkningsgång	32
7.2	Rekommendationer	32
8	DISKUSSION	34
9	SLUTSATS	35
10	REFERENSER	36
11	FIGURFÖRTECKNING	38
	BILAGA A: TABELLER ÖVER FIBEREGENSKAPER	39
	BILAGA B: TABELLER ÖVER PLASTMATRISEGENSKAPER	42
	BILAGA C: ANVÄNDNING AV BERÄKNINGSVERKTYG	43

Förord

Tillsammans med Norconsult, avdelningen för byggkonstruktion, och Bygg och Miljötekniks konstruktionsavdelning på Chalmers tekniska högskola har vi genomfört detta examensarbete kring fiberarmerade plaster. Arbetet ska bidra till en större och bredare kunskap om fiberarmerade plaster som konstruktionsmaterial inom byggbranschen.

Vi har under arbetet fått kontinuerlig hjälp av teknikkonsulter från Norconsult samt forskarassistenter och masterstudenter på Chalmers tekniska högskola. Till dessa personer vill vi ge ett stort tack. Vi vill även tacka Norconsult för samarbetet i detta projekt vilket har gett en inblick i arbetet som ingenjör.

Speciellt stort tack riktar vi till vår handledare: Niklas Johansson, examinator: Rasmus Rempling och forskarassistent: Reza Hanghani.

Göteborg juni 2014

Christan Brix Roed, Philip Thoresson

Beteckningar

Latinska versaler

$[A]$	Laminatets styvhetsmatris för membrantillstånd
A_{ij}	Element i laminatets styvhetsmatris vid membrantillstånd
$[B]$	Laminatets styvhetsmatris vid koppling mellan membran- och böjtillstånd
B_{ij}	Element i laminatets styvhetsmatris vid koppling
$[D]$	Laminatets styvhetsmatris vid böjtillstånd
D_{ij}	Element i laminatens styvhetsmatris vid böjtillstånd
E_{11}	Elasticitetsmodul i skiktens fiberriktning
E_{22}	Elasticitetsmodul tvärs skiktens fiberriktning
E_L	Elasticitetsmodul i skiktens fiberriktning
E_T	Elasticitetsmodul tvärs skiktens fiberriktning
E_f	Fibermaterialets elasticitetsmodul
E_m	Plastmatrisens elasticitetsmodul
E_{xx}^M	Laminatets ekvivalenta elasticitetsmodul vid böjtillstånd
E_{xx}^N	Laminatets ekvivalenta elasticitetsmodul vid membrantillstånd
E_{yy}^M	Laminatets ekvivalenta elasticitetsmodul vid böjtillstånd
E_{yy}^N	Laminatets ekvivalenta elasticitetsmodul vid membrantillstånd
G_{12}	Skjuvmodul i skiktens plan
G_{LT}	Skjuvmodul i skiktens plan
G_f	Fibermaterialets skjuvmodul
G_m	Plastmatrisens skjuvmodul
G_{xy}^M	Laminatets ekvivalenta skjuvmodul vid böjtillstånd
G_{xy}^N	Laminatets ekvivalenta skjuvmodul vid membrantillstånd
L	Laminatets längd
M	Momentkraftsvektor
M_{xx}	Momentkraft kring laminatets y-axel (se Figur 18)
M_{xy}	Momentkraft i laminatets plan (se Figur 18)
M_{yy}	Momentkraftkraft kring laminatets x-axel (se Figur 18)
N	Normalkraftsvektor (se Figur 18)
N_{xx}	Normalkraft i laminatets x-riktning (se Figur 18)
N_{xy}	Skjuvkraft i laminatets plan (se Figur 18)
N_{yy}	Normalkraft i laminatets y-riktning (se Figur 18)
$[Q]$	Skiktens reducerade styvhetsmatris
Q_{ij}	Element i skiktens reducerade styvhetsmatris
$[\bar{Q}]$	Skiktens transformerade reducerade styvhetsmatris
\bar{Q}_{ij}	Element i skiktens transformerade reducerade styvhetsmatris
$[S]$	Skiktens inverterade reducerade styvhetsmatris
S_{ij}	Element i skiktens inverterade reducerade styvhetsmatris
$[T_\varepsilon^+]$	Transformationsmatris mellan lokala och globala töjningar
$[T_\sigma^+]$	Transformationsmatris mellan lokala och globala spänningar
$[T_\sigma^-]$	Inversen till transformationsmatrisen $[T_\sigma^+]$
V_f	Skiktens fibervolyminnehåll

Latinska gemena

$[a]$	Laminatets inverterade styvhetsmatris vid membrantillstånd
$[b]$	Laminatets inverterade styvhetsmatris vid koppling
$[d]$	Laminatets inverterade styvhetsmatris vid böjtillstånd
b	Laminatets bredd
h	Avstånd från laminatets symmetriplan till skikten
n	Antal skikt i ett laminat
t	Tjockleken på ett enkelriktad fiberband (skikt)
z	avstånd från laminatets symmetriplan till skiktens medellinje

Grekiska gemener

γ_{12}	Skiktens skjuvningsvinkel
γ_{xy}	laminatets skjuvningsvinkel
ϵ_{11}	Töjning i skiktens fiberriktning
ϵ_{22}	Töjning tvärs skiktens fiberriktning
ϵ_{xx}	Töjning i laminatets longitudinella riktning
ϵ_{xx}^0	Töjning i laminatets longitudinella riktning vid symmetriplanet
ϵ_{yy}	Töjning i laminats transversella riktning
ϵ_{yy}^0	Töjning i laminats transversella riktning vid symmetriplanet
κ_{xx}^0	Krökning längs med laminatets longitudinella riktning vid symmetriplanet
κ_{xy}^0	Vriddeformation i laminatets plan vid symmetriplanet
κ_{yy}^0	Krökning längs med laminatets transversella riktning vid symmetriplanet
ν_{12}	Poisson's tal för skikten i fiberriktningen
ν_{21}	Poisson's tal för skikten tvärs fiberriktning
ν_{LT}	Poisson's tal för skikten i fiberriktningen
ν_{TL}	Poisson's tal för skikten tvärs fiberriktning
ν_f	Poisson's tal för fibermaterial
ν_m	Poisson's tal för plastmatrisen
σ_{11}	Spänning i skiktens fiberriktning
σ_{22}	Spänning tvärs skiktens fiberriktning
σ_{xx}	Spänning i laminatets longitudinella riktning
σ_{yy}	Spänning i laminatets transversella riktning
$\sigma_{LU,c}$	Skiktens longitudinella brottspänning vid tryck
$\sigma_{LU,t}$	Skiktens longitudinella brottspänning vid drag
$\sigma_{TU,c}$	Skiktens transversella brottspänning vid tryck
$\sigma_{TU,t}$	Skiktens transversella brottspänning vid drag
τ_{12}	Skjuvspänning i lokala koordinater
τ_{xy}	Skjuvspänning i globala koordinater
τ_{LT}	Skiktens brottspänning vid skjuvning
θ	Vinkel mellan lokala och globala koordinater

Begrepp

Komposit	Två eller flera material med skilda egenskaper som tillsammans bildar ett nytt material med nya egenskaper.
FRP	Fiberarmerad plast. En komposit av fiber och plastmatris.
Fiber	Armeringsmaterialet som används i fiberarmerade plaster.
Plastmatris	Bindemedlet i fiberarmerade plaster.
Isotrop	Samma fysikaliska egenskaper i alla riktningar.
Anisotrop	Olika fysikaliska egenskaper i alla riktningar.
Ortotrop	Olika fysikaliska egenskaper i de tre vinkelräta huvudriktningarna.
Skikt	En lamell av fiber och plastmatris.
Laminat	Flera skikt bildar tillsammans ett laminat.
Balanserat laminat	På varje sida om symmetriplanet finns det ett skikt orienterat i samma riktning på samma avstånd från symmetriplanet. Det ska även finnas lika många skikt orienterat $+\theta$ som $-\theta$ i laminatet (se Figur 17).

1 Inledning

Följande kapitel ger en inledande information kring examensarbetet där bakgrund, syfte och metod presenteras.

1.1 Bakgrund

Trä, stål och betong är de dominerande materialen inom byggbranschen tack vare deras långa tradition som konstruktionsmaterial. Detta har lett fram till erfarenheter och beräkningsmodeller för materialen. Utvecklingen gör dock att nya material kan tillverkas med liknande egenskaper och i många fall bättre än de traditionella. Bristen på kunskap om nya material inom byggbranschen gör dock att de används i mindre utsträckning än de traditionella.

Fiberarmerad plast är ett intressant material som utmärker sig som konstruktionsmaterial på grund av dess styvhet och höga hållfasthet i förhållande till dess låga vikt. Materialet kan också anpassas till att vara extra beständigt mot exempel brand, syra och UV beroende på ingående material (Sveriges Verkstadsindustrier 2001). Även vid tillverkning och uppbyggnad av materialet kan de färdiga mekaniska egenskaperna anpassas. I jämförelse med de traditionella byggmaterialen är FRP dyrare men har längre livslängd och lägre underhållsbehov (Fiberline 2014).

I dag finns det dock inga allmänna beräkningsmodeller för hur fiberarmerad plast tillämpas inom byggbranschen, och den svaga kunskapen kring FRP som byggmaterial är en bidragande faktor till att det inte byggs i FRP i större utsträckning.

Som byggmaterialet är fiberarmerade plaster främst kända för sin användning i vindkraftverk och konstruktioner i fientliga miljöer. Kunskap kring materialet och dess egenskaper finns därför redan, men måste exponeras för en bredare användning.

Detta examensarbete ska hjälpa att sprida kunskap, framvisa för- och nackdelar vid fiberarmerade plaster, framför allt i tillämpning som konstruktionsmaterial.

1.2 Syfte

Syftet med detta arbete är att underlätta dimensioneringen av balkar av fiberarmerade plaster genom att:

- Beskriva materialet fiberarmerad plast och dess tillverkningsprocesser.
- Beskriva hur fiber och plastmatris integrerar och hur uppbyggnad påverkar det färdiga laminatet.
- Skapa ett beräkningsverktyg utifrån befintliga beräkningsmodeller som kan beräkna ett laminats karakteristiska mekaniska egenskaper.

1.3 Avgränsningar

De ingående materialen, fiber och plastmatris, beskrivs med avseende på de mekaniska-, fysikaliska- och deras beständighetsegenskaper. Dessa anses viktiga för konstruktionselement.

Tillverkning av den färdiga fiberkompositen beskrivs endast med avseende på att framställa konstruktionsdelar.

I rapportens konstruktionsdel behandlas endast balanserade laminat, vilket innebär att laminaten byggs upp symetrisk och får därmed ortotropa egenskaper. Balanserade
CHALMERS Bygg- och miljöteknik, Examensarbete 2014:47

laminat används därför symmetriska egenskaper önskas vid konstruktion av balkar. På grund av begränsad tidsram tas endast hänsyn till deformationer som uppkommer på grund av yttre fysiska laster.

1.4 Metod

Rapporten består av tre delar: en beskrivande del kring fiberarmerade plaster, en beräkningsdel bestående av förklarande teori och ett beräkningsverktyg.

För den beskrivande delen genomfördes en litteraturstudie kring fiberarmerade plaster och dess delmaterial, där aktuell information om materialens egenskaper, uppbyggnad, tillverkningsmetoder och användningsområden studerades. På den grunden gjordes en sammanfattning där intressanta materialval och tillverkningsprocesser som lämpar sig bra för konstruktion av fiberförstärkta balkar lyftes fram.

För beräkningsdelen har en litteraturstudie genomförts kring aktuella teorier för beräkning av laminerade fiberarmerade plaster. Även kontakt med professorer, lärare och masterstudenter från Chalmers tekniska högskola, teknikkonsulter från Norconsult samt Fiberline har varit till stor hjälp. Med hjälp av detta har en förklarande beräkningsdel tagits fram som också är underlag för beräkningsverktyget. För utformning av beräkningsverktyget har Mathcad Prime 3.0 används därför det är lättanvändbart verktyg som redan har stor exponering bland teknikföretag.

2 Fiberkompositens material

Fiberförstärkt plast är ett kompositmaterial uppbyggt utav fibrer och plastmatris. Fiberns uppgift är att ta hand om de laster kompositens utsätts för. Plastmatrisen fungerar i sin tur som bindemedel som både håller ihop materialet och överför kraftpåkänningarna till fibrerna. Då lasterna i huvudsak bärs genom fibrerna kan inre kraftriktningen styras genom att ändra fiberriktningen i kompositen. Matrisen kan även ha skyddande egenskaper mot yttre påverkan så som UV-strålning, kemikalier, fukt med mera.

FRP-material har ett brett användningsområde och används bland annat inom tillverkning av sportutrustning, båtar, flyg- och rymdkonstruktioner samt förstärkning och konstruktionsdelar av byggnationer. Beroende på användningsområde kan kompositens egenskaper styras vilket beror på val av fiber- och matristyp, materialens procentuella andel, riktning och längd på fibrerna samt vidhäftning. (Sveriges verkstadsindustrier 2001)

2.1 Fiber

Fiber som används i FRP-material fungerar som armering och kännetecknas av dess låga densitet samt höga hållfasthet och elasticitetsmodul. Fibrerna finns i en rad olika sorter där de vanligaste är glasfiber, kolfiber, aramidfiber, polyetenfiber och naturfiber.

I de följande avsnitten presenteras dessa fibertyper mer ingående. Tabeller över fibrernas mekaniska egenskaper finns i bilaga A.

2.1.1 Glasfiber

Glasfiber är det mest använda fiber materialet på grund av goda mekaniska egenskaper och är relativt billigt jämfört med andra fiber som kol- och aramidfiber. Ett vanligt användningsområde är som armering, där glasfiber bland annat är det mest använda inom polymerbaserade material, och kan även ersätta stål där risk för korrosion eller känslighet för magnetiska fält finns (Sto Scandinavia AB 2006). Andra attraktiva egenskaper är att elasticitetsmodulen för glasfiber är samma i alla riktningar (University of Bolton 2014), draghållfastheten, isolatoriska förmågan samt termiska beständighet. Vid en temperatur mellan 0°C och 300°C är hållfastheten hos glasfiber i princip oförändrad, och om glasfibern utsätts för 400°C under ett dygn sänks hållfastheten till ungefär hälften (Owens Corning Sweden AB 2014).

Glasfiber finns i olika kvaliteter. Vanligast är elektrogas (E), Höghållfasthetsglas (S), kemikalieresistent glas (C) och dielektrisk glas (D), där egenskaperna anpassas utefter användningsområde.

2.1.2 Kolfiber

Kolfiber erhåller mycket hög prestanda när det kommer till mekaniska egenskaper, men är bland de dyrare fibertyperna. Detta gör kolfibern lämpad för mer extrema tillämpningar, exempel inom flyg- och rymdindustrin, där högre krav på styvhet och styrka ställs. Några utmärkande egenskaper är dess minimala termiska utvidgning, goda utmattnings egenskaper, röntgenomsläplighet och bra korrosionsbeständighet. Kolfiber har även en bra förmåga att leda värme och elektricitet.

Man kan dela in kolfiber i två huvudgrupper, PAN- eller Pitchbaserade, och inom dessa finns det även olika fiberklasser. PAN- och Pitchbaserade kolfibrer framställs på olika sätt och utifrån olika råmaterial vilket ger en viss skillnad i egenskaper. Pitchbaserad ger ofta en högre elasticitetsmodul medan PAN-baserad ofta har högre hållfasthet (Seldén, 2001).

2.1.3 Aramidfiber

Aramidfiber finns i två typer, meta-aramid och para-aramid. I denna rapport kommer endast para-aramid tas upp eftersom den fibertypen är mest relevant och har bättre mekaniska egenskaper.

Precis som kolfiber är aramidfiber ett dyrare material lämpad för mer extrema tillämpningar på grund av dess höga styvhet och styrka. Aramidfibern, också kallad kevlar i vissa sammanhang, ger även en väldigt hög slagseghet vilket den är känd för. Ett bekant användningsområde är i skyddsvästar (kevlarvästar) som används av polis och inom försvaret. Aramidfibers extremt höga specifika draghållfasthet och bra utmattningsegenskaper gör den användbar i konstruktioner med extrema krav på låg vikt, dock är tryckhållfastheten inte lika god på grund av känslighet för intern buckling.

Aramidfibern är även beständig mot korrosion, har goda elektriska egenskaper, tål under en längre tid temperaturer runt 150-175°C utan större förluster i mekaniska egenskaper. Aramidfibern har anisotropa egenskaper både mekaniskt, fysikaliskt och termiskt. Vid uppvärmning drar fibrerna ihop sig i längdriktning, vilket kan användas för tillverkning av kompositmaterial med liten längdutvidgning.

Bindningsförmågan mellan aramidfiber och plastmatris är relativt dålig på grund av opolär struktur hos fibern. Resistens mot UV-ljus är dålig. (Seldén, 2001).

2.1.4 Polyetenfiber

Polyetenfibern är generellt ett beständigt material med god resistens mot kemikalier och UV-ljus, men bör inte användas vid temperaturer över 100°C. En utmärkande egenskap är dess förmåga att absorbera energi vid slagpåkänningar, förhållande till dess densitet. Andra bra egenskaper är hög specifik hållfasthet och elasticitetsmodul, nötningstålig, låg fuktabsorption samt hög brottenergi. Polyetenfibers sämre egenskaper är dess låga tryckhållfasthet, svaga deformationsegenskaper i annan riktning än längs fibrerna, låga resistens mot krypning och dålig vidhäftning till plastmatris. En viss förbättring av vidhäftningen kan erhållas genom plasmabehandling.

Två sätt att framställa polyetenfiber är genom gel-spinning samt genom smältreducering följt av sträckning. Den sistnämnda ger en lägre hållfasthet och elasticitetsmodul, men är en mer miljövänlig och billigare metod. (Seldén, 2001).

2.1.5 Naturfiber

Naturfiber är en växtbaserad fibertyp och intresset för användning har ökat i takt med medvetenheten för miljön. Den används främst ur miljösynpunkt men även för att den är billig att framställa och kan återvinnas. Ett kompositmaterial som är gjort utav naturfiber har en låg hållfasthet och används endast då kraven för hållfasthet inte är höga. Nackdelen med fibern är att egenskaperna varierar kraftigt beroende på var den har växt och eventuell förbehandling. (Seldén, 2001)

Denna fibertyp är inte aktuell för rapporten och kommer inte beskrivas djupare.

2.2 Plastmatris

Syftet med polymermatrisen är att binda samman fibrerna och skydda dem. Dessutom är matrisen viktig för att ta upp mekaniska tryckkrafter och fördela dem till fibrerna, matrisens vidhäftningsegenskaper är därför viktig.

Polymermatriser indelas i härdplaster och termoplaster som skiljer sig i sin kemiska struktur samt egenskaper och tillverkningsätt.

Härdplaster är högbeständiga mot temperatur och kan inte smältas om efter härdning. Termoplaster kan smältas om och är mer gummiliknande och återgår till trögflytande vätska vid uppvärmning. De mekaniska egenskaperna hos båda termoplaster och härdplaster beror på glasomvandlingstemperaturen. Under glasomvandlingstemperaturen är materialet sprött, styvt och erhåller en känslighet mot slag. Över glasomvandlingstemperaturen är materialet mer gummiliknande, men kan fortfarande erhålla hög styvhet och hållfasthet (Bank 2006).

2.2.1 Härdplaster

Härdplaster är vanligt förekommande som plastmatris vid tillverkning av konstruktionsdelar i fiberarmerade plaster på grund av dess goda mekaniska egenskaper och höga beständighet mot temperatur och kemikalier (Seldén 2001).

Härdplaster tillverkas som en vätska kallad harts som vid gjutning tillsätts en härdare och eventuella andra tillsatser som katalysatorer, förtunnare och flexibulatorer.

Harts Det lim som ska få matrisen att fästa i fibrerna.

Härdare Får matrisen att stelna och ger styvhet till kompositen.

Katalytiska härdare Accelererar härdningsprocessen.

Förtunnare Används för att kontrollera hartsens viskositet.

Flexibulatorer Ger matrisen seghet.

Hartsen har låg viskositet vilket underlättar impregnering av fibrerna, men nackdelen är dess långa härdtid som ofta är beroende av höga temperaturer och tryck (Seldén 2001).

2.2.1.1 Polyester

Polyester också kallat esterplaster är den vanligast förekommande matris inom fiberarmerade plaster och den används främst i kombination med glasfiber. Polyestermatriser påvisar goda mekaniska egenskaper och vidhäftningsegenskaper. Beständighet mot temperaturer är bra och glasomvandlingstemperaturen ligger mellan 40 och 110 grader Celsius, vilket gör den användbar till de flesta konstruktionstyper (Bank 2006).

Jämfört med andra polymermatriser med liknande mekaniska egenskaper är priset lågt för polyester vilket är främsta faktorn till den stora användningen. Bland polyestermatrisens andra positiva egenskaper kan nämnas god beständighet mot syror och baser, elektrisk isoleringsförmåga och en snabb härdning (Seldén 2001).

2.2.1.2 Epoxiplast

Epoxiplast är en vanligt förekommande polymermatris oftast i kombination med kolfiber, men kan även ingå i andra kombinationer. Epoxiplast har god beständighet mot kemikalier och temperaturer upp emot 130°C. De fysikaliska egenskaperna hos

epoxiplaster kan varieras från mycket hård till gummiliknande material. En styv epoxiplast ger dock materialet en viss sprödhet, men kryp- och utmatningsresistensen är hög. Härdning av epoxiplaster kräver höga temperaturer (120-180°C) och även förhöjt tryck. Vidhäftningen till andra material är god (Seldén 2001).

Epoxi är något dyrare än polyester varför den används enbart där polyesterns temperatur eller mekaniska egenskaper inte räcker till.

2.2.1.3 Vinylplaster

Vinylplast används där polyesterens egenskaper inte räcker till. Vinylplaster är jämförbar med epoxiplaster, kännetecknad av god kemikaliebeständighet och goda mekaniska egenskaper men har en snabbare härdning som inte är beroende av tryck och temperatur, dessutom är härdkrympningen låg. Vinylplaster har goda vidhäftningsegenskaper (Seldén 2001).

2.2.1.4 Imidplast

Imidplaster är tillverkade i det syfte att tåla extrema temperaturer och kan användas under kort tid vid 450°C och längre tid vid 300°C. Imidplaster är även beständigt mot kemikalier vid lägre temperaturer. De mekaniska egenskaperna är mycket goda: hög styvhet, utmatning-, kryp-, och nötningsbeständighet. Formningen av imidplaster kan vara svår eftersom vätskan är mycket trögflytande, även härdningen är komplicerad och de flesta imidplaster kräver efterhärdning med temperaturer på 300-350°C (Seldén 2001).

2.2.1.5 Uretanplast

Uretanplast har många användningsområden och är bäst känd som cellplast och gummi i kompositer. Genom tillverkningsmetoden kan de fysikaliska egenskaperna varieras från en styv hård plast till gummi med hög nötningsbeständighet och seghet. Uretanplaster är kemikaliebeständiga men har begränsad temperaturbeständighet. Härdningen sker snabbt, men vätskan har hög viskositet och måste bearbetas vid gjutning. Vidhäftningen till andra material är god (Seldén 2001).

2.2.1.6 Fenoplast

Fenoplast är ett billigt material med goda högtemperaturegenskaper och kemikaliebeständighet. Fenoplast är även ett styvt och hårt material men känsligt mot slag och har låg draghållfasthet. Fenolplaster är smidiga att arbeta med och de fenolplaster som används i polymerkompositer härdar direkt vid uppvärmning (Seldén 2001).

2.2.2 Termoplaster

Termoplasternas kemiska struktur skiljer sig från härdplasterna vilket gör att termoplaster smälter vid uppvärmning. Detta kan utnyttjas vid tillverkning och reparationer av kompositer. Impregneringen av fibrerna kan dock vara svår på grund av att termoplaster oftast är trögflytande, även vid uppvärmning. Härdningen av termoplaster sker dock något snabbare än för härdplasterna.

Termoplaster variera från gummiliknande till styva material vars mekaniska egenskaper till stor del beror på användningstemperaturen och polymermatrisens glassomvandlingstemperatur.

Termoplasternas styvhet och hållfasthet är oftast sämre än hårdplasternas och har därmed begränsad användning som konstruktionskomponenter. Termoplasterna är billigare än hårdplasterna och kan återanvändas (Bank 2006).

2.2.2.1 Propenplast

Propenplasts är också känt under namnet polypropen. Kännetecknande för propenplast är en god kemikaliebeständighet, relativ hög smältpunkt och god utmattningshållfasthet. Dess fysikaliska egenskaper påverkas i hög grad av tillsatser och tillverkningsmetoder.

Glasomvandlingstemperaturen är vanligtvis hög (-10°C), men kan sänkas genom speciella tillverkningsmetoder och tillsatser. Dessutom har propenplast låg UV-stabilitet, därför bör plasten bearbetas vid utomhusanvändning (Seldén 2001).

2.2.2.2 Amidplast

Polyamid erhåller goda mekaniska egenskaper och utmärker sig med sin höga hållfasthet, utmatning-, nötning-, och krypresistens. Egenskaperna försämras dock av fuktabsorption och UV-strålning. Polyamid har höga smälttemperaturer, men högtemperaturogenskaperna är inte att jämföra med hårdplaster. Amidplaster är lätta att bearbeta och kan formsprutas (Seldén 2001).

2.2.2.3 Etereterketonplast

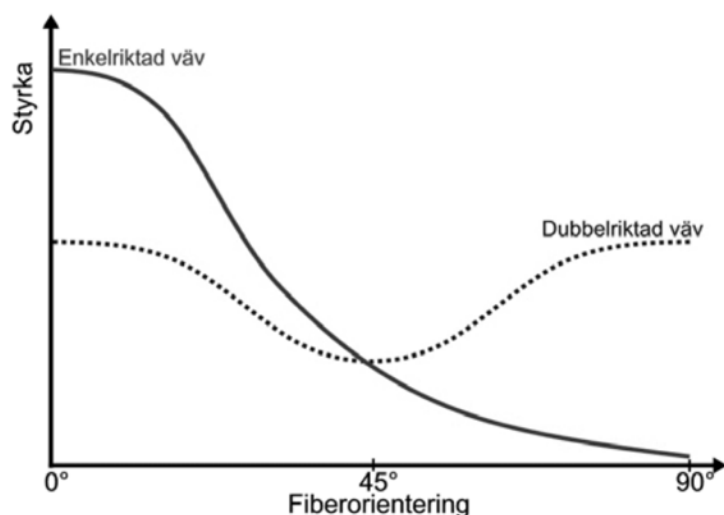
Etereterketonplast är ett mycket styvt material och har generellt goda mekaniska egenskaper. Dessa egenskaper erhålls vid temperaturer upp till glasomvandlingstemperaturen (143°C). Etereterketonplast ingår oftast i kompositer med kolfiberarmering och dessa kompositer är hydrolys-, brand- och strålningsbeständiga. Plastens nackdel är dess höga pris (Seldén 2001).

3 Fiberkompositens uppbyggnad

Som nämnt i avsnitt 2 är kombinationen av fiber och matris samt fiberriktning viktig för kompositens egenskaper vilket kommer att behandlas i detta avsnitt.

3.1 Fibrernas riktning och längd

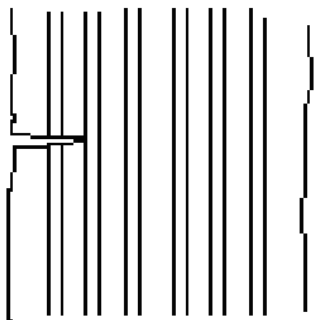
Genom att variera riktning och längd på fibrerna kan två kompositerna bestående av samma material få helt olika mekaniska egenskaper. Längs med fibrerna fås den högsta hållfastheten och styvheten medan den lägsta erhålls tvärs fibrerna. Långa kontinuerliga fibrer bidrar till ett starkare och styvare material jämfört med korta fibrer. Genom att i en komposit låta alla fibrer ha samma orientering (enkelriktad komposit) erhålls ett väldigt draghållfast och styvt material i aktuell riktning, men dock svagt i andra riktningar. Om fibrernas orientering istället varierar (flerriktad komposit) erhålls mer riktningsoberoende egenskaper. I figur 1 illustreras förhållandet i hållfasthet mellan en enkelriktad och dubbelriktad fiberarmering i ett laminat (Sjögren 2010).



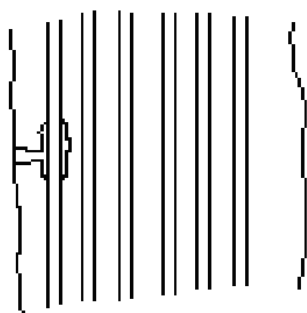
Figur 1 Fiberorienteringens inverkan på hållfastheten (Viebke 2009).

3.2 Vidhäftning

Det är som tidigare nämnt matrisen som håller ihop materialet och överför krafter och spänningar till fibrerna. Därför är bindningen mellan fiber och matris en väsentlig faktor för kompositens egenskaper. Ofta önskas en stark bindning för att materialet skall få en hög styrka och styvhet, detta medför dock ett sprödare brott (Sjögren 2010). Om vidhäftningen är väldigt stark och en spricka uppstår i matrisen är det större chans för fiberbrott då töjningskoncentrationen är väldigt hög när sprickan når fibern (se Figur 2). En svagare bindning ger istället en brottseghet som i vissa sammanhang kan vara önskvärt. När sprickan då når fibern fortsätter den spricka upp längs med fibern, vilket medför att ett större arbete krävs för att slutbrott skall uppnås (se Figur 3) (Seldén 2001). Vid för svag vidhäftning medförs försämrade kraftöverförande egenskaper vilket ger kompositens en lägre styrka och styvhet (Sjögren 2010).



Figur 2 Fiberbrott orsakat av töjningskoncentration vid sprickspets (Seldén 2001).



Figur 3 Matrisbrott. Plastmatrisen släpper runt fiber (Seldén 2001).

3.3 Materialval

Beroende på önskade komposittegenskaper har valet av material en betydande roll. Dels skiljer sig egenskaperna hos de enskilda materialen men även deras förmåga att samverka. Alla fiber- och plastmatrismaterial har inte samma vidhäftningsegenskaper utan skiljer sig beroende på kombinationsval, exempelvis binder aramidfiber dåligt med plastmatriser på grund av opolär struktur hos fibern. Olika sätt fiber och matris kan vidhäftas är genom kemisk bindning, elektrostatiske attraktion, mekanisk låsning eller molekylära intrasslingar. (Sjögren 2010)

3.4 Armeringstyper

Det finns olika metoder att bygga upp en fiberkomposit och styra dess fiberorientering. Val av tillverkningsprocess bestämmer vilka armeringstyper som kan användas vilket i sin tur bestämmer fibrernas placering. Nedan beskrivs kortfattat olika fiberarmeringstyper. Tillverkningsmetoderna förklaras i kapitel 4.

- | | |
|---------|--|
| Rovning | En bunt av långa otvinnade parallella fibrer som levereras på en rulle. Rovning används antingen som det är, som armering vid lindning, sprutning eller profildragning, men också som tillverkningsmaterial för andra armeringstyper som mattor och vävar. |
| Garn | Består av långa tvinnade parallella fibrer. Används vid tillverkning av garnväv. |
| Flock | Huggna fiber i längderna 3-50mm. |

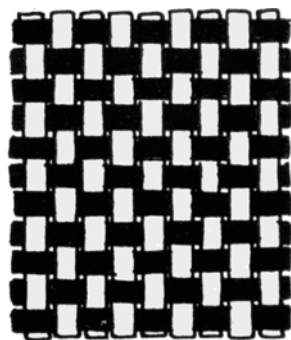
Enkelriktat fiberband	Enkelriktade parallella fibrer ihopsatta till en tunn bandliknande form.
Matta	Består av antingen huggna eller kontinuerliga fibrer upplagda i ett virvelmönster som pressas till önskad tjocklek. Fibrerna binds ihop antingen mekaniskt eller kemiskt med ett pulver- eller emulsionsbindmedel.
Ytmatta	En tunn matta med syfte att förhindra fibergenomslag genom att ligga som ett skyddande lager mellan annan armering och matris.
Vävar	Består av två eller flera system av fiberbuntar som i konstant vinkel korsar varandra och bildar en tygliknande struktur (se figur 4). Buntarna består antingen utav tvinnade eller otvinnade fibrer (garn respektive rovning). Vävningen kan ske genom olika bindningar vilka medför olika egenskaper i hållfasthet, täthet, impregnerbarhet ¹ och draperbarhet ² . Den vanligaste bindningen är fibrer vävda i 90 grader i förhållande till varandra.

I en jämförelse med mattor och enkelriktade fiberband så är risken för delaminering³ mindre för vävar, vilket medför att vävar har en bättre tålighet mot slag. Vävar ger dock en sämre hållfasthet i både tryck och drag på grund av att fibrerna ligger krökta (Seldén 2001, Sjögren 2010).

¹ Impregnerbarhet - förmåga att låta ett ämne tränga in och fylla hålrum.

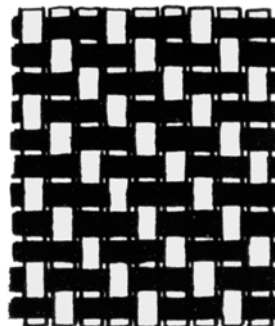
² Draperbarhet – förmåga att följa en dubbelkrökt yta.

³ Delaminering – separation mellan laminatskikten.



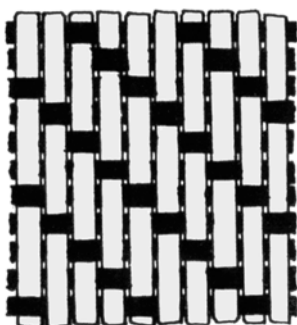
Tvåskaftsbindning

En tät och stabil väv som är lätt att impregnera.



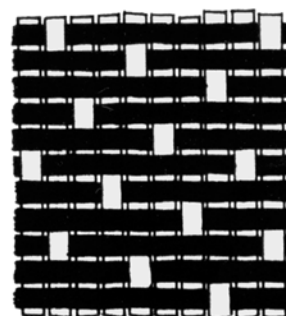
Kypertbidning

En medeltät väv med hyfsad draperbarhet.



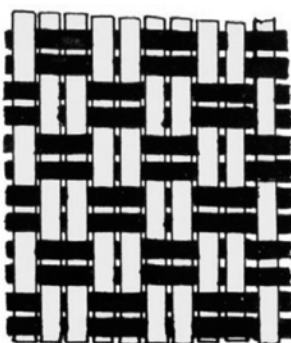
Satinbindning

En medeltät väv med bra draperbarhet.



Atlasbindning

Hög hållfasthet och god draperbarhet.



Panamabindning (Basket)

Lik en tvåskaftsbindning men med grupper av två parallella trådar.

Figur 4 Olika typer av vävar (Viebke 2009, Seldén 2001).

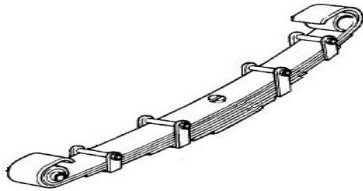
3.5 Laminattyper

Ett sätt att tillverka en fiberkomposit är med en laminatuppbyggnad. Laminatet består utav flera lager av fiberdukar ovanpå varandra vilket tillsammans bildar en komponent. De olika skikten kan bestå av samma eller olika armeringstyper samt vara placerade i olika riktningar. Uppbyggnaden kan därmed anpassa kompositens mekaniska egenskaper efter behov. De olika laminatutförandena kan delas in i två grupper, enkelriktade laminat och flerriktade laminat.

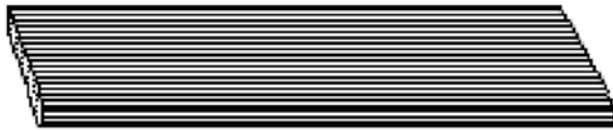
En annan typ av laminatsammansättning är om olika fibrer kombineras i komponenten, en så kallad hybridkomposit. Detta kan göras genom att olika skikt i laminatet består av olika sorters fibrer, eller att de olika fibrerna är blandade i samma skikt. Hybridkomposit kan även tillverkas i andra utföranden än laminat. Blandas exempelvis kolfiber med antingen glas- eller aramidfiber erhålls en komposit som är slagåligare än endast en kolfiberkomposit. Andra egenskaper kan också förbättras. (Seldén 2001)

3.5.1 Enkelriktat laminat

Skikten i laminatet består av längsgående fibrer och alla skikt är placerade med samma fiberriktning. Detta medför ett starkt och styvt material i fiberled, vilket används vid bland annat bladfjäderkonstruktioner. Det enkelriktade laminatet är däremot svagt tvärs fibrerna, här är matrisens mekaniska egenskaper starkast.



Figur 5 Bild på bladfjäder.

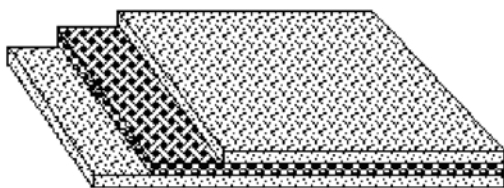


Figur 6 Laminatskiva med enkelriktad fiberarmering (Seldén 2001).

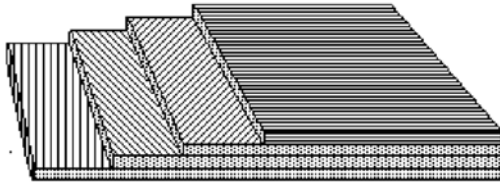
Enkelriktad laminatuppbyggnad lämpar sig därför bäst till konstruktionsdelar som endast belastas i en riktning. Armeringstyper som passar bra i denna typ av laminat är exempel rovning och malda fibrer (Seldén 2001).

3.5.2 Flerriktat laminat

Laminat med fibrer i endast en riktning är ovanligt just på grund av dess känslighet mot snedbelastning. Då en konstruktionsdel behöver ta hand om belastningar i flera riktningar kan flerriktade laminatet användas. Här kan fibrernas orientering anpassas efter behov, då hållfastheten i alla riktningar kanske inte har samma krav. Kombinationsmöjligheten är i princip oändlig då skivor med samma och/eller olika armeringstyper kan samverka på olika sätt. Nedanför visas två sätt att kombinera ett flerriktat laminat



Figur 7 Kombination av skivor med matt- och vävarmering (Seldén 2001).



Figur 8 Flerriktat laminat uppbyggt av skivor med enkelriktad armering i olika riktningar (Seldén 2001).

Att ha i åtanke är att armeringstypen har stor inverkan på den slutgiltiga komponentens egenskaper.

Enkelriktade armeringsskivor i olika riktningar – ger en hög fiberhalt i laminatet samt raka fibrer vilket medför en hög hållfasthet. Nackdelen är dock en högre risk för delaminering än för exempelvis vävlaminat.

Vävlaminat - risk för delaminering är lägre än för parallellfiberskikt. På grund av den vävda strukturen är fibrerna krökta vilket medför en nedsatt tryck- och draghållfasthet. Fiberhalten är även lägre än för parallellfiberskikt.

Mattlaminat – har fiber i slumpmässig ordning vilket medför i princip isotropa egenskaper. Fiberhalt och draghållfastheten är mindre än för både parallellfiber- och mattfiberskikt (Seldén 2001).

4 Tillverkningsprocesser

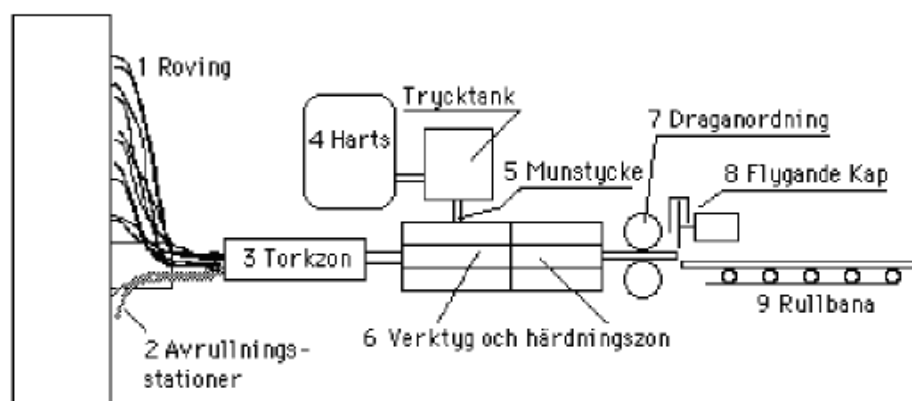
Tillverkningsstandarder är främst beroende av matrisval, man skiljer på härdplaster och termoplaster för tillverkning av såväl laminat som färdiga konstruktionsdelar. Fiberarmerad plast till användning i konstruktioner tillverkas främst med profildragning och handuppläggning, som är en öppen formmetod (Bank 2006). Val av tillverkningsmetod styrs även av teknik och ekonomi, men större fokus på inre- och yttre miljö har medfört att metoder och material har utvecklats för att möta dessa krav (Hansson, Löfgren, Johansson 2001).

4.1 Tillverkning av härdplastkompositer

Härdplaster tillverkas som vätskor kallad harts med låg viskositet vilket underlättar impregneringen och tillverkningen på många sätt. Hartsen har begränsad hållbarhet och ska blandas med tillsatser för optimal härdning, dessutom är härdningen långsam och känslig mot yttre faktorer som temperatur och fukt.

4.1.1 Profildragning

Profildragning, även kallad pultrudering, är en mycket använd metod för tillverkning av kontinuerliga konstruktionsdelar i fiberarmerad plast. Metoden är kontinuerlig och innebär att fibrerna dras genom en injiceringskammare och pressas ut genom ett uppvärmt munstycke och ugn där profilen härdas och kommer ut som en färdig profil, slutligen kapas denna i önskad längd. Processen ses i Figur 9.



Figur 9 Bild över en profildragningsprocess (Hansson, Löfgren, Johansson 2001).

De flesta typer av härdplaster och fibrer kan användas vid profildragning, men glaspolyester kombinationen är den vanligaste (Hansson, Löfgren, Johansson 2001).

Profilernas tvärsnitt är mycket begränsat till munstyckets dimensioner, munstycket kan dock justeras på de flesta maskiner för profildragning. Armeringstyper som kan används vid profildragning är roving, fiberband, mattor och vävar. Rovningen fungerar även som en "form" att fästa skikten på innan de injiceras med hartsen.

4.1.2 Öppna metoder

Öppna formmetoder bygger på manuell tillverkning där kompositen formas i en öppen form. Fördelarna med de öppna metoderna är främst den flexibla formningen, där

mycket detaljerade delar kan tillverkas samtidig som hög kvalitet erhålls på de färdiga delarna.

4.1.2.1 Handuppläggning

Vid handuppläggning läggs förtillverkade fibermattor i formen, harts och tillsatser kan tillföras för hand eller med robot. Endast härdplaster användas vid denna metod.

Formerna ytbehandlas innan formning för att plastkompositen ska släppa formen, men även för att ge den färdiga komposit en slät och fin yta. En gelcoat bestående av polyester används ofta och syftar till att undvika fibergenomslag samt bilda en hård och beständig yta på den färdiga plastkompositen. Vanligen sprutas eller penslas matrisen på formen innan fibrerna för att bilda ett ytskikt för plastkompositen där fibrerna är skyddade och väl impregnerade. Fibrerna som används vid handuppläggning är oftast huggna och orienterad slumpmässigt, men även kontinuerliga fibrer kan användas och orienteras i önskade riktningar. Processen med att bygga upp kompositen av matris respektive fiber fortsätts till önskad tjocklek är uppnådd och slutligen läggs en topcoat av samma anledning som gelcoaten (Sjögren 2010).

Handuppläggning är en mycket omständlig metod och dyr vid tillverkning av unika komponenter på grund av formkostnaderna, men det fria tillverkningssättets många möjligheter kan ändå vara fördelaktigt vid tillverkning av unika detaljer. Vid specialtillverkning är gjutarens skicklighet mycket avgörande för kompositens kvalitet och egenskaper (Hansson, Löfgren, Johansson 2001).

4.1.2.2 Formsprutning härdplaster

Tillverkning med formsprutning av härdplaster erhåller mycket av de samma egenskaper som handuppläggnings. Harts och fiber sprutas på formen med en pistol som fördelar matrisen och snittar fibrerna i önskad längd. Eftersom materialet fördelas slumpvis fås en ojämn yta som sedan glattas för hand med extra harts. Formsprutning ger vanligen en låg fiberhalt på den färdiga plastkompositen.

Fördelarna med sprutning är som vid handuppläggning den stora designmässiga friheten, men jämfört med handuppläggning är tillverkning med formsprutning något snabbare (Viebke 2009).

4.1.3 Pressmetoder

Slutna formar, där två formhalvor används, blir allt vanligare för att klara kraven om inomhusarbetsmiljö. Det är framförallt härdplastens styrenhalt som äventyrar arbetsmiljön (Hansson, Löfgren, Johansson, 2001). Tillverkning med slutna formar ger möjlighet för att pressa kompositen. Med en pressning kan man uppnå bättre fördelning av materialen samt jämnare och glattare ytor på båda sidorna av kompositen (Plast- och Kemiföretagen 1991). Formpressning är en metod där kompositen pressas mekaniskt i hårda formar. Med autoklavhärdning eller säckmetoden härdas kompositen under tryck där den ena formen är hård och den andra formen är ett tätslutande membran (Hansson, Löfgren, Johansson 2001).

4.1.3.1 Formpressning

Med formpressning menas en mekanisk pressning mellan två fasta formar, detta kan ske vid våt- och varmpressning. Våtpressning innebär att en flytande härdplastharts fördelas över fibrerna innan formen tätsluts och ofta används vakuum eller tryck för att trycka ner kompositen i formen.

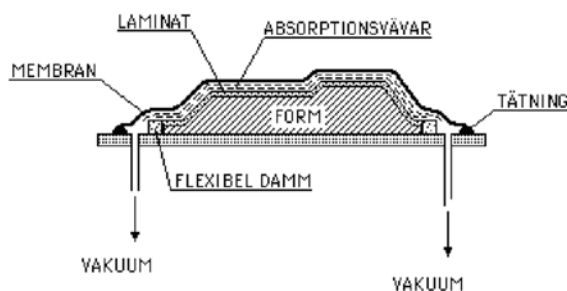
Det kan tillverkas stora komponenter med formpressningsmetoden och varierande utseende på formar ger möjligheter för formning av balkar, plattor och detaljer.

4.1.3.2 Autoklavhärdning och Säckmetoden

Vid pressning av hårdplaster används autoklavhärdning eller säckmetoden där plastkompositen läggs upp för hand eller formsprutas. Form och ohärdad komposit täcks med en flexibel membran (säck) och kompositen härdas under tryck på formen. Trycket kan skapas med vakuum inne i formen eller som övertryck på utsidan, beroende på om det används vakuum eller tryck har man vakuumsäckmetoden respektive trycksäckmetoden (Hansson, Löfgren, Johansson 2001). För att uppnå bättre härdning måste membran och form ytbehandlas med släppmedel och kanaler till att föra bort överskottet av harts och gaser som uppstår under härdning. Härdning under uppvärmning kan vara nödvändigt vid tillverkning av högpresterande komposit. Vanligen förekommande hartser för dessa metoder är epoxi och polyester och som armering används glass-, kol- och aramidfiber (Hansson, Löfgren, Johansson 2001).

Vakuumsäcksmetoden

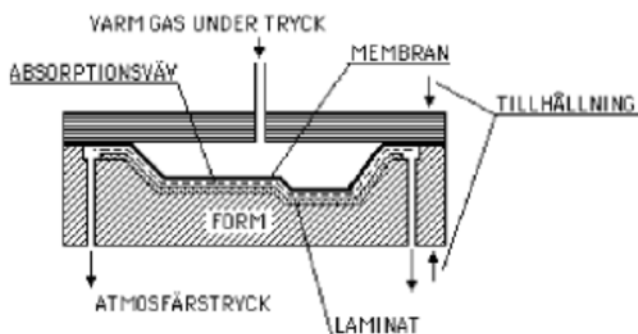
Den hårda formen bestämmer kompositens utformning och kompositen tillverkas oftast med våtlaminering. Det är viktigt att form och membran behandlas innan gjutning för att uppnå bra egenskaper hos den färdiga kompositen, man kan exempelvis lägga in mattor längs formen som sedan bildar kompositens ytskikt. Vid formning av stora komponenter är det nödvändigt med vakuumledare för att föra bort gaser och överskottet av harts (se Figur 10) (Hansson, Löfgren, Johansson, 2001). När plasten pressas ut ökar fiberinnehållet procentuellt hos den färdiga kompositen vilket ger en högre specifik styvhet, därför är vakuummetoden mycket använd vid tillverkning av flygplansdelar (Hansson, Löfgren, Johansson, 2001).



Figur 10 Vakuumsäcksmetoden (Hansson W, Löfgren P-Å, Johansson A 2001).

Trycksäcksmetoden

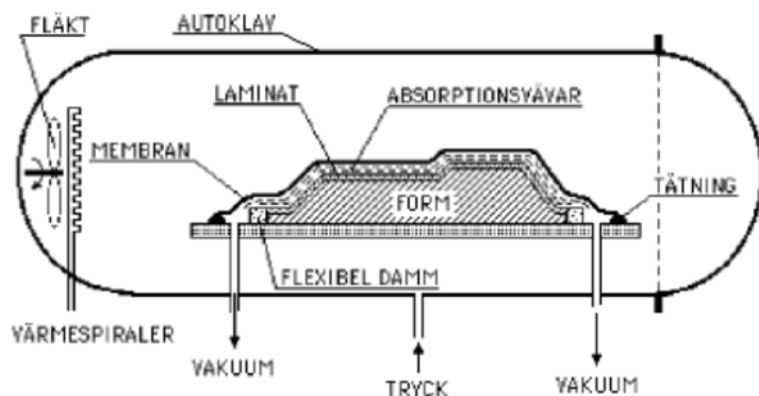
Trycksäcksmetoden bygger på samma principer som vakuumsäcksmetoden. Uppläggning sker för hand med våtlaminering, dock behövs det inga kanalsystem i formen eftersom trycket från utsidan pressar ut gaser och harts (se Figur 11). Eftersom trycket bara verkar på formens membransida ställs stora krav till hårda formens stabilitet. Vanligen ligger trycket på 1400 kPa och en temperatur upp emot 180°C kan uppnås (Hansson, Löfgren, Johansson 2001). Figur 3 visar principen vid trycksäcksmetoden.



Figur 11 Trycksäcksmetoden (Hansson, Löfgren, Johansson 2001).

Autoklavhärdning

Autoklavhärdning är en variant av trycksäcksmetoden där trycket verkar på hela formen, därmed är formens stabilitet inte lika avgörande samtidigt som högre tryck kan uppnås (se Figur 12). Trycket på kompositen höjas genom att skapa ett vakuum på formens insida, som vid vakuumsäcksmetoden. Vid tillverkning av extrema komponenter kan tryck och temperatur höjas till 3500 kPa respektive 250°C. Vid autoklavhärdning ställs samma krav på släppmedel och vakuumedlare som för vakuumsäcksmetoden (Hansson, Löfgren, Johansson 2001).



Figur 12 Autoklav härdning (Hansson, Löfgren, Johansson 2001).

4.1.4 Injicering

Injicering innebär att harts och eventuella tillsatser blandas till en matris och förs in i en form och härdas. Fibrerna kan föras in i formen tillsammans med matrisen om de inte redan ligger ordnade i formen. Det särskiljs på olika injiceringsprocessor beroende på vilken typ av form som används och hur fiberstrukturen ser ut. Injiceringen sker mellan två formhalvor som bildar stöd för kompositen under härdningen, men kan även ske med vakuum där endast en formhalva används tillsammans med ett membran (Plast- & Kemiföretagen 1991).

Eftersom injicering sker i slutna formar kan utsläpp av flyktiga ämnen kontrolleras med ventilation. Detta gör att injicering är bland de mest miljövänliga tillverkningsprocessorer för fiberarmerade plastkompositer. Injiceringsmetoden ersätter mer och mer handuppläggningsmetoden på grund av de arbetsmiljömässiga fördelarna (Hansson, Löfgren, Johansson 2001).

4.2 Tillverkning av termoplastkompositer

Termoplasterna är fasta efter tillverkning och smälts sedan in med fibrerna vid uppvärmning. Vid många tillverkningsprocesser sker denna smältning först i formen eller i verktyget, vilket medför att arbetarens kontakt med den smälta termoplasten är mycket liten.

Komponenterna av termoplaster tillverkas oftast med någon form av varmpressning, där man utnyttjar att termoplasterna smälter vid uppvärmning och stelnar igen vid lägre temperaturer. Formpressning ger stor repeterbarhet där stora volymer kan tillverkas snabbt och samtidig ger formen möjlighet för detaljerade komponenter.

Det går dock att använda termoplast vid tillverkning av konstruktionsdelar, där är formsprutning och extrudering vanliga metoder (Hansson, Löfgren, Johansson 2001).

4.2.1 Formpressning

Vid pressning av termoplaster används varmpressning där en massa innehållande fiber, matris och tillsatser placeras i en varm form så att massan smälter och kan pressas ut till önskad form. Man särskiljer på två olika typer av pressmassor, Sheet Molding Compound (SMC) och Dough Molding Compound (DMC).

Sheet Molding Compound är en massa som vid tillverkning formas till ett mattliknade utseende och levereras i skivor eller som en rulle. Fibrerna är antingen kontinuerliga eller huggna och kan inta såväl en rak riktning, slumpmässig samt kombination (Hansson, Löfgren, Johansson 2001).

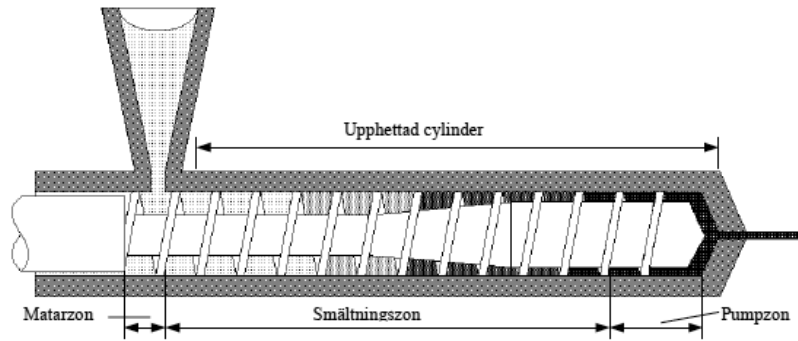
Dough Molding Compound består av huggen fiber och massan framställs i en degliknad form. Massan kan användas vid formsprutning och pressas sedan på liknande sätt som för SMC (Plast och kemiföretagen 1991).

4.2.2 Formsprutning

Plasten blandas med korta fibrer och värms i ett injiceringsverktyg. När plasten har smälts pressas den ned i en kall form och stelnar nästa omedelbart, ett nytt lager kan påföras inom 20 sekunder till två minuter. Injiceringsverktyget pressar ut plasten med hjälp av en roterande skruv vilket determinerar fibrernas orientering i formen (Hansson, Löfgren, Johansson 2001).

4.2.3 Extrudering

Extrudering är en process där plast smälts i en cylinder med en uppvärmd extruderingsskruv och pressas ut genom en dysa. Plasten dras ur extruderingsmaskinen i samma hastighet som materialet smälts. Plasten stelnar när det lämnar verktygets munstycke, munstycket är därför form för den färdiga komponenten. Processen ses i Figur 13 (Hansson, Löfgren, Johansson 2001).



Figur 13 Extrudering (Hansson, Löfgren, Johansson 2001).

Materialet tillsätts som fiberarmerade plastgranulat och fibrerna är oftast korta eller samma längd som granulatets dimensioner.

Extrudering var en av de första metoderna för bearbetning av fiberarmerade plaster och den numera använda profildragningsmetoden har många jämförelser med extruderingsprocessen.

5 Delsammanfattning

Rapporten har hittills behandlat fiberarmerade plaster från delmaterial till färdiga komponenter samt tillverkningsprocesser. Detta kapitel syftar på att lyfta fram de material och tillverkningsprocesser som lämpar sig för dimensionering av balkar.

5.1 Tillverkning

Vid val av tillverkningsprocess är det viktigt att processen ger element av hög kvalitet. Därutöver är det viktigt att processen ger möjlighet att producera stora volymer.

Som tidigare nämnt i avsnitt 4.1.1 är profildragning en vanlig och effektiv metod för tillverkning av FRP-balkar och används redan av flera företag som producerar balkelement. Profildragningen är fördelaktig vid massproduktion, detta medför även ett lägre styckpris jämfört med de manuella metoderna. Dessutom ger profildragningen högkvalitets balkar med mycket små differenser mellan varje elements kvalitet.

Öppna metoder som handuppläggning kan vara lämplig vid tillverkning av unika balkelement på grund av metodens designfrihet. Till exempel vid brokonstruktioner kan balkar designas med varierande armeringsmängd och form med avseende att möta de aktuella påfrestningarna. Handuppläggningsen sker dock manuellt vilket är mer tidskrävande, dyrare och ger större variation i kvalitet vid massproduktioner än vid en maskinell tillverkningsprocess. Därför anses profildragning som en bra metod för tillverkning av standardbalkar.

5.2 Material

Egenskaperna på de ingående material och deras sammansättning har stort inflytande på den färdiga balkens mekaniska egenskaper och hållfasthet, men även priset spelar en betydande roll för val av fiber och plastmatris.

Balkprofiler i FRP kan byggas upp av laminat som limmas ihop eller pultruderas som en färdig profil. Vid uppbyggnad av dessa laminat är kontinuerliga enkeltriktade fiber att föredra därför att de ger bättre styvhet än de korta fibrerna. Kontinuerliga fibrer är samtidigt en förutsättning för att balkar kan pultruderas.

På bakgrund av avsnitt 2.1 kan glasfiber lyftas fram som en bra fiber för konstruktion av balkar. Glasfiber erhåller goda mekaniska egenskaper och är relativt billigt jämfört med kol- och aramidfiber. Glasfiber är tåligt, beständigt och kan kombineras med de flesta plastmatriser där polyester och epoxi är vanligast.

För mer extrema konstruktioner där hållfasthet och låg vikt prioriteras högt kan kolfiber vara ett bra alternativ. Kolfiber är dyrt jämfört med glasfiber men ger en lättare och styvare konstruktion. Kolfiber kan liksom glasfiber kombineras med de flesta plastmatriser, men för att utnyttja kolfibers egenskaper optimalt väljs oftast epoxi.

Plastmatriser som lämpar sig för konstruktion av balkar ska erhålla goda mekaniska egenskaper i form av styvhet och hållfasthet. Dessutom måste plastmatrisen vara lätt att injicera och interagera bra med fibern. Det är även en fördelaktigt om plastmatrisen kan användas vid profildragning enligt tidigare resonemang. På bakgrund av dessa kriterier kan flera matriser väljas ut, men polyestern utmärker sig med att vara relativt billig och epoxin har de bästa mekaniska egenskaperna.

5.3 Kombination av fiber och plastmatris

Här ges det exempel på vanliga kombinationer av fiber och plastmatris samt en tabell med karakteristiska värden för dessa material.

Glasfiber-polyester är en vanlig förekommande kombination när det gäller fiberarmerade plaster som redan används av flera företag för konstruktion av kontinuerliga konstruktionsdelar. Kombinationen glasfiber-polyester ger då en högpresterande komposit till ett relativt lågt pris.

Kolfiber-epoxi är en vanlig kombination för mer extrema plastbaserade kompositer. De specifika mekaniska egenskaperna är högre än för glasfiber-polyester men kombinationen är även dyrare och tillämpas bäst då mycket höga krav ställs.

Tabell 1 visar utvalda värden, från tabeller i bilaga A och B, på intressanta mekaniska egenskaper för de valda materialen. Tabell 2 ger karakteristiska hållfasthetsvärden för kombinationer av fiber och matris. Tabell 1 och tabell 2 ses på nästa sida.

Tabell 1 Värden på aktuella egenskaper för valda material (University of Bolton 2014, Seldén 2001).

Egenskaper		Material	Fiber		Matris	
			E-glass	Kol (HT)	Epoxi	Polyester
Draghållfasthet	MPa		3400	3500	55-110	40-90
Elasticitetsmodul, E	GPa					
Longitudinell		71	230	3,5	2,5	
Transversell		71	14	3,5	2,5	
Skjuvmodul, G	GPa		30	14	1,25	1,2
Poissons-tal, ν	-		0,22	0,2	0,33	0,33
Densitet, ρ	Kg/m ³		2540	1760	1200-1300	1100-1400

Tabell 2 Karakteristiska hållfasthetsvärden för fiberskikt, ($V_f = 50\%$), [MPa], (NPTEL, 2014)

	Glas- polyester	Kol-epoxi
Longitudinellt drag ($\sigma_{LU,t}$)	650-950	850-1500
Longitudinellt tryck ($\sigma_{LU,c}$)	600-900	700-1200
Transversellt drag ($\sigma_{TU,t}$)	20-25	35-40
Transversellt tryck ($\sigma_{TU,c}$)	90-120	130-190
Skjuvning (τ_{LTU})	45-60	60-75

6 Beräkningskapitel

Följande kapitel presenterar förutsättningar och teorier kring dimensionering av fiberkompositlaminatet. Detta bildade underlaget för utformningen av beräkningsverktyget. Tanken är att fiberkompositlaminaten sedan kan användas vid uppbyggnad av balktvärsnitt.

Arbetet behandlar spänningar och deformationer som uppkommer på grund av yttre laster. Deformationer på grund av krypning samt fukt- och temperaturskillnader ingår inte i rapporten på grund av begränsad tidsram.

Teorin som kommer att presenteras bygger på en rad antaganden (Mallik 2008):

- Fullständig vidhäftning mellan fiber och plastmatris.
- Fullständig vidhäftning mellan laminatets ingående skikt.
- Skikten är makroskopiskt homogena och kan anses linjärelastiska.

6.1 Generellt om dimensionering av laminat

Dimensionering av laminat kan vara svårt därför att många skikt med olika fiberriktningar gör det svårt att förutspå den färdiga balkens egenskaper. Detta innebär bland annat att man inte kan utgå ifrån Bernoulli-Euler balkteori där skjuvdeformationer försummas. Istället måste man utgå ifrån Timosjenkos balkteori där det tas hänsyn till skjuvdeformationer orsakad av laster och temperaturändring.

Laminatets egenskaper kan bestämmas utifrån de ingående skiktens egenskaper och deras fiberorientering enligt den klassiska laminatteorin. Skiktens egenskaper bestämmas av de ingående plastmatris- och fiberegenskaper samt förhållandet mellan dessa enligt mikromekaniska modeller.

6.2 Mikromekaniska modeller

Med de mikromekaniska modellerna undersöker vi ett element i ett större system. I detta fall vill vi bestämma ett skikts egenskaper utifrån de ingående materialens egenskaper. Till exempel kan elasticitetsmodulen för ett skikt uppbyggd av fiber och plastmatris beräknas med Rule of Mixtures (ROM) (Clarke 1996):

$$E_L = E_{11} = V_f E_f + V_m E_m \quad (1)$$

Index f och m står för fiber respektive matris och V_f är fiberns volyminnehåll i procent.

Med ekvation (1) kan skiktets elasticitetsmodul bestämmas i fibrernas längdriktning. I ett laminat är fiberriktningen för de olika skikten inte alltid orienterade i laminatets längdriktning. De olika orienterade skikten ger olika bidrag till laminatets egenskaper även om de består av samma material. Elasticitetsmodulen i skiktens transversella fiberriktning fås enligt ekvation (2):

$$E_T = E_{22} = \frac{E_m E_f}{E_f(1-V_f) + E_m V_f} \quad (2)$$

Med ROM kan även skjuvmodul och Poisson's tal bestämmas med ekvation (3), (4) och (5).

$$G_{LT} = G_{12} = \frac{G_m G_f}{G_f(1-V_f) + G_m V_f} \quad (3)$$

$$\nu_{LT} = \nu_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \nu_m(1 - V_f) + \nu_f V_f \quad (4)$$

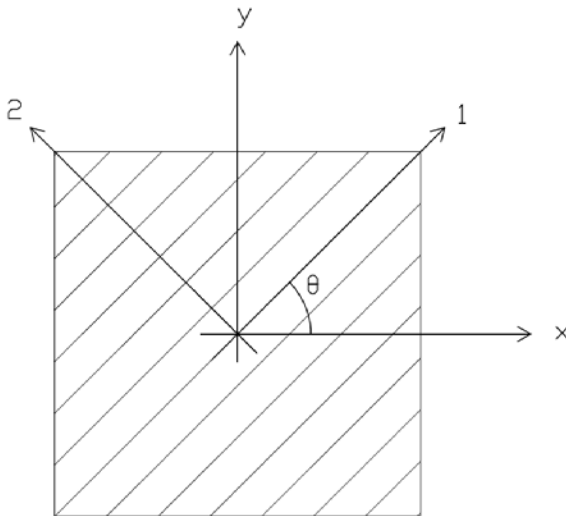
$$\nu_{TL} = \nu_{21} = \frac{E_{22}}{E_{11}} \nu_{12} \quad (5)$$

6.3 Laminatteorin

Laminatteorin används till att bestämma ett laminats mekaniska egenskaper utifrån de ingående skiktens egenskaper och deras orientering.

6.3.1 Spänning-töjningssamband

Det första steget är att definiera relationen mellan skiktets respektive laminatets koordinatsystem. I skiktets koordinatsystem är x-axeln orienterad längs fiberriktningen i det enskilda skiktet, y-axeln tvärs fiberriktningen och z-axeln vinkelrätt skiktet. I laminatets koordinatsystem är x-axeln i laminatets längdriktning, y-axeln pekar tvärs laminatets längdriktning och z-axeln vinkelrätt laminatet. Skiktet respektive laminatets x,y-plan kommer då att sammanfalla och relationen kan beskrivas med en vinkel θ kring sammanfallande z-axeln. För att skilja på skiktets och laminatets koordinataxlar används beteckningen (1,2,3) för skiktets koordinataxlar och (x,y,z) för laminatets koordinataxlar. Vidare i rapporten kommer även referensen *lokala* och *globala* koordinater att användas för skiktets respektive laminatets koordinatsystem. Koordinatsystemets relation ses i Figur 14.



Figur 14 Relation mellan skiktets- och laminatets koordinater.

Varje skikt är uppbyggd utav kontinuerliga fibrer, detta ger skilda egenskaper längs 1- respektive 2-axeln och skiktet kan beskrivas som ortotropt. I det följande härleds en relation mellan de lokala och globala spänningarna. Först beskrivs spänning-töjningssambandet för ett enskilt skikt enligt Hooks-lag för tvåaxiell belastning (Wysocki 2001):

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E_{11}} - \frac{\nu_{12}\sigma_{22}}{E_{22}} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{\sigma_{22}}{E_{22}} - \frac{\nu_{21}\sigma_{11}}{E_{11}} \quad (7)$$

$$\gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}} \quad (8)$$

Detta kan skrivas på matrisform:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{21}}{E_{22}} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (9)$$

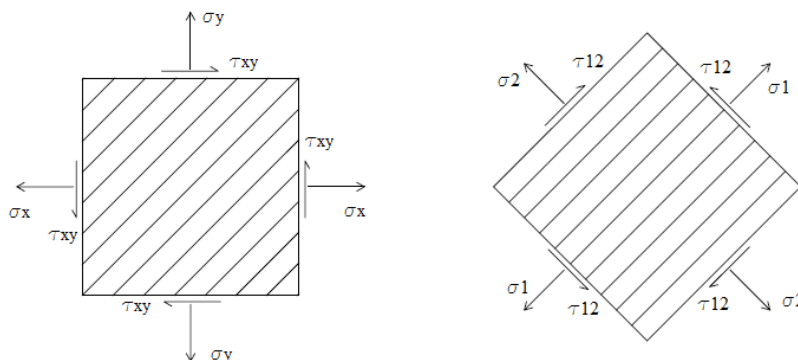
På samma sätt fås spänningarna uttryckt av töjningar som:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_{11}}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{12}E_{22}}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{21}E_{11}}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_{22}}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = [Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Matrisen $[Q]$ i ekvation (10) motsvarar skiktets elasticitetsmodul skrivit på matrisform och kallas skiktets reducerade styvhetsmatris. Index 11, 22, 12 och 21 på E , ν och G motsvarar materialegenskaperna i de lokala koordinatriktningarna enligt Figur 14 (Wysocki 2001).

Den faktiska $[Q]$ har storleken 6×6 och innehåller även element som beskriver samband mellan spänningar och töjningar tvärs skiktets plan samt interlaminära spänningar. De uteblivna elementen beaktas inte i detta arbete därför att analysen skulle bli komplicerad, dessutom ger den reducerade $[Q]$ matrisen tillräckligt med information om skiktets styvheter för de flesta beräkningar⁴.

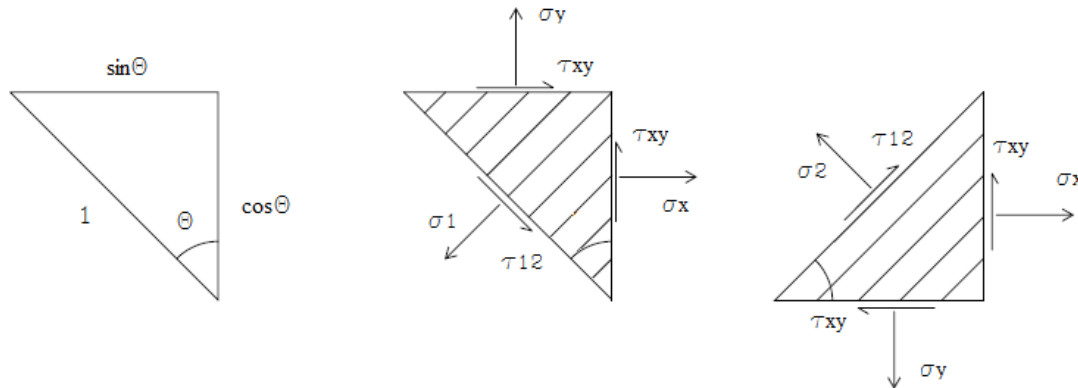
Spänningarna i de lokala riktningarna ska transformeras till spänningar i globala riktningar. Se Figur 15 för spänningarna i de olika koordinatsystemen.



Figur 15 Spänningar i xy - respektive $1,2$ -systemet.

⁴ Reza Haghani, 1 april 2014, (Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, CTH)

För att skapa en relation mellan σ_{11} , σ_{22} , τ_{12} och σ_{xx} , σ_{yy} , τ_{xy} utnyttjar vi jämvikten på segmentet enligt Figur 16 (Wysocki 2001):



Figur 16 Spänningssamband mellan lokala och globala koordinater.

Vertikal och horisontell jämvikt på mittersta segmentet i Figur 16:

$$\rightarrow: \sigma_{xx} \cos \theta + \tau_{xy} \sin \theta - \sigma_{11} \cos \theta + \tau_{12} \sin \theta = 0 \quad (11)$$

$$\uparrow: \sigma_{yy} \sin \theta + \tau_{xy} \cos \theta - \sigma_{11} \sin \theta + \tau_{12} \cos \theta = 0 \quad (12)$$

Elimination av τ_{12} i ekvationerna (11) och (12) ger:

$$\sigma_{11} = \sigma_{xx} \cos^2 \theta + \sigma_{yy} \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (13)$$

Elimination av σ_{11} i ekvationerna (11) och (12) ger:

$$\tau_{12} = \sigma_{xx} \sin \theta \cos \theta + \sigma_{yy} \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (14)$$

Vertikal och horisontell jämvikt på högra segmentet i Figur 16:

$$\rightarrow: \sigma_{xx} \sin \theta + \tau_{xy} \cos \theta - \sigma_{11} \sin \theta + \tau_{12} \cos \theta = 0 \quad (15)$$

$$\uparrow: \sigma_{22} \cos \theta + \tau_{12} \sin \theta - \sigma_{yy} \cos \theta + \tau_{xy} \sin \theta = 0 \quad (16)$$

Elimination av τ_{12} i ekvationerna 16 och 17 ger:

$$\sigma_{22} = \sigma_{xx} \sin^2 \theta + \sigma_{yy} \cos^2 \theta - 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (17)$$

Nu har vi en relation mellan de lokala och globala spänningarna enligt ekvationerna (13), (14) och (17), och de kan skrivas på matrisform enligt:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \cos \theta \sin \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \cos \theta \sin \theta \\ -\cos \theta \sin \theta & \cos \theta \sin \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T_{\sigma}^+] \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Matrisen $[T_{\sigma}^+]$ är en transformationsmatris där θ räknas positiv moturs från x,y-systemet till 1,2-systemet.

På samma sätt kan en relation mellan lokala och globala töjningar härledas:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -\cos \theta \sin \theta \\ -2 \cos \theta \sin \theta & \cos^2 \theta \sin \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [T_\varepsilon^+] \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Observera skillnaden på transformationsmatriserna $[T_\sigma^+]$ och $[T_\varepsilon^+]$.

Nu kan även en relation mellan spänningar och töjningar på globalnivå skrivas upp:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T_\sigma^-] \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T_\sigma^-][Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = [T_\sigma^-][Q][T_\varepsilon^+] \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Matrisen $[\bar{Q}]$ kallas skiktets transformerade reducerade styvhetsmatris och har formen:

$$[\bar{Q}] = [T_\sigma^-][Q][T_\varepsilon^+] = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Med dessa relationer kan de lokala spänningarna och töjningar beräknas på bakgrund av de globala spänningarna (Wysocki 2001).

6.3.2 Deformationssamband

En annan svårighet med att dimensionera fiberarmerade plaster är att spänningar parallellt laminatets plan kan ge upphov till deformationer vinkelrätt laminatets plan. Denna krökning orsakas av skiktets ortotropa egenskaper, alltså olika deformationsegenskaper i olika riktningar vilket ger interlaminära spänningar. Krökning av laminatet som uppkommer på bakgrund av axiella laster kan till stor del undvikas genom att bygga upp ett balanserat laminat, där krökningar på var sin sida om laminatets symmetriplan motverkar varandra.

6.3.2.1 Balanserat laminat

Ett balanserat laminat innebär att skikten på var sin sida om laminatets symmetriplan är orienterat i samma riktning (symetrisk laminat). Dessutom måste det finnas balans mellan skikt som är orienterat $+\theta$ respektive $-\theta$ på var sin sida om symmetriplanet. (Wysocki 2001). Se Figur 17 för balanserat laminat:

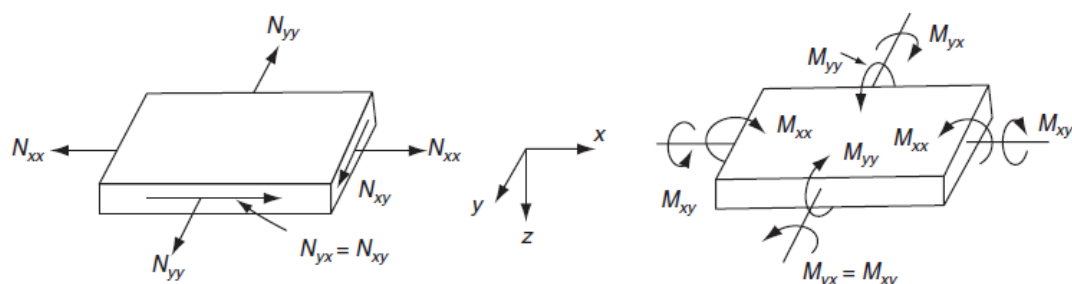
0
+45
-45
0
0
-45
+45
0

Figur 17 Balanserat laminat.

6.3.2.2 Membran – och böjtillstånd

Med *membrantillstånd* menas laminatets förmåga att ta upp krafter parallellt laminatets plan (x,y-planet). Membrantillstånd innebär att laminatet enbart tar upp normal- och skjuvkrafter och att deformationer enbart sker i laminatets plan, se vänster del i Figur 18 (Mallik 2008).

Böjtillstånd betyder att deformationer sker vinkelrätt laminatets plan, böjning och krökning. Laminatet motverkar dessa deformationer genom att vara moment- och vridstvt, se höger del av Figur 18 (Mallik 2008).



Figur 18 Membran- respektive böjtillstånd (Mallik 2008).

6.3.2.3 Konstitutivt samband

Sambandet mellan kraft och deformation ges av konstitutiva sambandet i ekvation (22):

$$\begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \\ M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_{xx}^0 \\ \kappa_{yy}^0 \\ \kappa_{xy}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_{xx}^0 \\ \kappa_{yy}^0 \\ \kappa_{xy}^0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Där $N_{xx}, N_{yy}, N_{xy}, M_{xx}, M_{yy}, M_{xy}$ är definierat enligt Figur 18 och har definitionen kraft per breddenhet och är därför beroende av laminatets dimensioner.

Töjningarna ε_{xx}^0 och ε_{yy}^0 är symmetriplanets töjningar longitudinellt respektive transversellt laminatet och ε_{xy}^0 är skjuvtöjningen vid laminatets symmetriplan. κ_{xx}^0 och κ_{yy}^0 är krökningen längs med x respektive y-axeln och κ_{xy}^0 är vriddeformatioen i x,y-planet.

Bemärk att index 11, 12, ..., 66 motsvarar matris elementen i $[\bar{Q}]$. Matriselementen ges av följande ekvationer (Clarke 1996):

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{ij}^k (h_k - h_{k-1}) \quad , \quad i, j = 1, 2, 6 \quad (23)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{ij}^k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad , \quad i, j = 1, 2, 6 \quad (24)$$

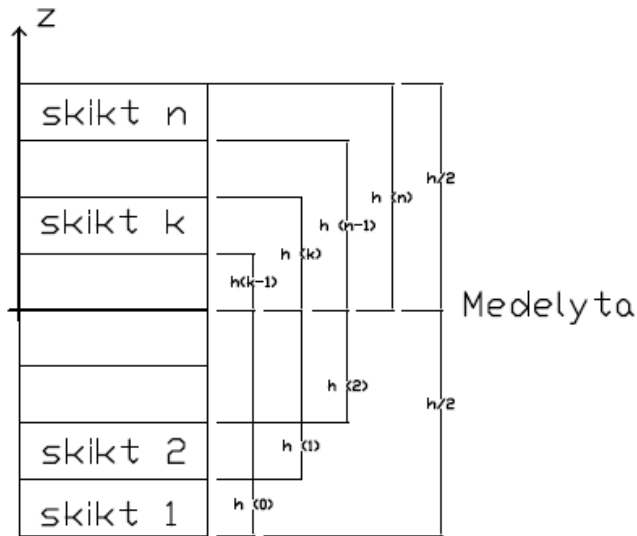
$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{ij}^k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad , \quad i, j = 1, 2, 6 \quad (25)$$

Där: **A**: Laminatets styvhetsmatris för membrantillstånd.

B: Kopplingsmatris, bildar relation mellan membran- och böjtillstånd.

D : Laminatets styvhetsmatris vid böjtillstånd.

Index k betecknar skiktnummer enligt Figur 19 och n är antalet skikt i laminatet.



Figur 19 Skiktnumrering.

Laminatets ekvivalenta mekaniska egenskaper kan nu bestämmas med hjälp av komplementärmatrixerna till $[A]$, $[B]$ och $[D]$. Styvhetsmatriserna inverteras enligt:

$$[a] = [A]^{-1} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$[b] = [B]^{-1} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{16} \\ b_{12} & b_{22} & b_{26} \\ b_{16} & b_{26} & b_{66} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$[d] = [D]^{-1} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{16} \\ d_{12} & d_{22} & d_{26} \\ d_{16} & d_{26} & d_{66} \end{bmatrix} \quad (28)$$

De ekvivalenta mekaniska egenskaperna för laminatet i membran- respektive böjtillstånd tas fram enligt ekvationerna (29) - (32) (Clarke 1996):

För membrantillstånd:

$$E_{xx}^N = \frac{1}{h a_{11}} \quad E_{yy}^N = \frac{1}{h a_{22}} \quad G_{xy}^N = \frac{1}{h a_{66}} \quad (29)$$

$$\nu_{xy}^N = -\frac{a_{12}}{a_{11}} \quad \nu_{yx}^N = -\frac{a_{12}}{a_{22}} \quad (30)$$

För böjtillstånd får vi:

$$E_{xx}^M = \frac{12}{h^3 d_{11}} \quad E_{yy}^M = \frac{12}{h^3 d_{22}} \quad G_{xy}^M = \frac{12}{h^3 d_{66}} \quad (31)$$

$$\nu_{xy}^M = -\frac{d_{12}}{d_{11}} \quad \nu_{yx}^M = -\frac{d_{12}}{d_{22}} \quad (32)$$

För balanserade laminat har vi ingen koppling mellan membran- och böjtillstånd vilket innebär $B_{ij} = 0$, alltså kan vi reducera det konstitutiva sambandet till ekvation (33) (Wysocki 2001):

$$\begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \\ M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & 0 & 0 & 0 \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & 0 & 0 & 0 \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ 0 & 0 & 0 & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ 0 & 0 & 0 & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \\ \kappa_{xx} \\ \kappa_{yy} \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \\ \kappa_{xx} \\ \kappa_{yy} \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (33)$$

Eller:

$$\begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{bmatrix} = [D] \begin{bmatrix} \kappa_{xx} \\ \kappa_{yy} \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (34)$$

6.3.3 Hållfasthetskriterier

Det finns flera olika teorier som beskriver hållfastheten i ett laminat. I denna rapport utgår vi ifrån *maximum stress theory* som innebär att brott uppstår när spänningen i någon orientering överskrider hållfastheten, detta kan beskrivas enligt brottkriterierna (Wysocki 2001):

$$-\sigma_{LU,c} < \sigma_{11} < \sigma_{LU,t} \quad (35)$$

$$-\sigma_{TU,c} < \sigma_{22} < \sigma_{TU,t} \quad (36)$$

$$\tau_{22} < \tau_{LT} \quad (37)$$

Det vill säga att de lokala spänningarna inte får överskrida skiktets hållfasthet longitudinellt, transversellt och i skjvning.

Hållfastheten för ett laminat kan beräknas genom en iterativ analys där de yttre lasterna ökas stegvist och laminatets styvhet korrigeras varje gång ett skikt bryts. Den lasten som erhålls när sista skiktet bryts och laminatet har kollapsat ger laminatets hållfasthet. Detta arbete syftade inte på att göra denna typ av analys varför det istället har valts ut representativa experimentella framtagna värden som ses Tabell 2.

6.3.3.1 Kinematiskt samband

Effekten av pådrivande moment- och tvärkraft tillsammans med laminatets styvhet ger töjningar, skjvtöjningar (38) och krökningar, och vriddeformationer (39) vid laminatets symmetriplan enligt ekvation (Clarke 1996):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} = [A^{-1}] \begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{bmatrix} + [B^{-1}] \begin{bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{bmatrix} = [a] \begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$\begin{bmatrix} \kappa_{xx}^0 \\ \kappa_{yy}^0 \\ \kappa_{xy}^0 \end{bmatrix} = [B^{-1}] \begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{bmatrix} + [D^{-1}] \begin{bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{bmatrix} = [d] \begin{bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{bmatrix} \quad (39)$$

Observera att vi har utnyttjat ekvation (34). Detta kan göras på grund av att arbetet endast behandlar balanserade laminat.

Skiktens töjningar kan skrivas som summan av symmetriplanets töjning summerat med effekten av krökningen enligt ekvations (40):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^k \\ \varepsilon_{yy}^k \\ \gamma_{xy}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} \kappa_{xx}^0 \\ \kappa_{yy}^0 \\ \kappa_{xy}^0 \end{bmatrix} \quad (40)$$

Där z är avståndet från laminatets symmetriplan till skiktens medelyta:

$$z_k = h_k - \frac{t}{2} \quad (41)$$

Där t är skiktens tjocklek.

Skiktens töjningar enligt 1,2-systemet kan nu beräknas med transformationsmatrisen enligt ekvation (19):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^k \\ \varepsilon_{22}^k \\ \gamma_{12}^k \end{bmatrix} = [T_\varepsilon^+] \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^k \\ \varepsilon_{yy}^k \\ \gamma_{xy}^k \end{bmatrix} \quad (19)$$

Slutligen får vi spänningarna för varje skikt enligt ekvation (10) avsnitt 6.3.1:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11}^k \\ \sigma_{22}^k \\ \tau_{12}^k \end{bmatrix} = [Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^k \\ \varepsilon_{22}^k \\ \gamma_{12}^k \end{bmatrix} \quad (10)$$

Spänningarna för varje skikt ska nu kontrolleras mot hållfastheten enligt ekvationerna (35), (36) och (37).

Det framtagna beräkningsverktyget kontrollerar laminatet enligt *First Ply Failure* vilket innebär att laminatet antas kollapsa vid brott på ett enda skikt. Modellen ger därför en dimensionering på säkra sidan där det finns kapacitet kvar i laminatet.

7 Numeriska beräkningar

Detta kapitel beskriver beräkningsverktygets beräkningsgång, hur den kan användas samt en beskrivning av de olika in-respektive utvärdena.

Metoden är delvis inspirerad av *Eurocomp handbook*'s metod för beräkning av ekvivalenta karakteristiska egenskaper samt hållfasthetskontroll för laminat.

7.1 Mathcad-filens beräkningsgång

Konstruktören väljer

- Laminatets geometri
 - Antal skikt, orientering, samt laminatets längd och bredd.
- Materialkombination
 - Egenskaper för plastmatris respektive fiber och fibervolyminnehåll.
- Laster.
 - Moment och tvärkraft

Modellen har följande struktur:

1. Beräknar skiktegenskaperna E_{11} , E_{22} , ν_{12} , ν_{21} och G_{12} enligt kapitel 6.2.

Laminatteorin, se kapitel 6.3.

2. Beräknar laminatets reducerade styvhetsmatris $[Q]$.
3. Beräknar laminatets transformerade reducerade styvhetsmatris $[\bar{Q}]$.
4. Definiera avståndet h_k till varje skiktyta, avståndet räknas från laminatets symmetriplan.
5. Beräknar laminatets styvhetsmatriser för membran-, koppling- och böjtillstånd $[A]$, $[B]$ och $[D]$.
6. Beräkna komplementärmatriserna $[a]$, $[b]$ och $[d]$.
7. Beräknar ekvivalenta mekaniska egenskaper för laminatet E_{xx}^N , E_{yy}^N , G_{xy}^N , ν_{xy}^N , ν_{yx}^N och E_{xx}^M , E_{yy}^M , G_{xy}^M , ν_{xy}^M , ν_{yx}^M .

Brottkontroll – Maximum stress theory

8. På bakgrund av $[A]$, $[B]$ och $[D]$ beräknas matriserna $[a]$, $[b]$ och $[d]$.
9. Tjörning och krökning av symmetriplanet beräknas enligt globala koordinatsystemet $(\varepsilon_{xx}^0, \varepsilon_{yy}^0, \varepsilon_{xy}^0$ och $\kappa_{xx}^0, \kappa_{yy}^0, \kappa_{xy}^0)$.
10. Definiera avståndet från laminatets symmetriyta till varje skikts mittplan z_k .
11. Tjörningar i varje skikt beräknas enligt globala koordinatsystemet på bakgrund av symmetriplanets tjörningar $(\varepsilon_{xx}^k, \varepsilon_{yy}^k, \varepsilon_{xy}^k)$.
12. Transformera tjörningarna till 1,2-systemet med transformationsmatrisen $[T_\varepsilon^+]$ $(\varepsilon_{11}^k, \varepsilon_{22}^k, \varepsilon_{12}^k)$.
13. Beräkna spänningarna i varje skick på bakgrund av tjörningarna. $(\sigma_{11}^k, \sigma_{22}^k, \sigma_{12}^k)$.
14. Kontrollera varje skikt enligt *maximum stress theory*.

7.2 Rekommendationer

Beräkningsverktyget kan endast användas vid undersökning av balanserade laminat.

Beräkningsverktyget kan användas till att undersöka laminat och dess mekaniska egenskaper relaterat till de ingående material och skiktens orientering. Modellens resultat är ekvivalenta karakteristiska värden för det uppbyggda laminatet.

Modellen kan användas till att studera fiberriktningens orientering och bidrag till laminatets egenskaper, dock kommer val av fiberriktning inte att granskas av modellen. Det vill säga att ett laminat med färre skikt kan ha samma kapacitet som ett laminat med flera skikt i vissa riktningar.

Eftersom balkflänsarna främst verkar i tryck och drag borde fibrerna i flänslaminat enbart orienteras längs balkens axiella riktning. Det finns dock stora fördelar med att placera fibrer $\pm 45^\circ$ i förhållande till balkens axiella riktning: Balkens stabilitet och vridstyvhet ökar och dessa skikt vill dessutom hjälpa till att föra in laster till balkens liv. Vid tryckta laminat har dessa skikt en positiv effekt därför de motverkar tryckkrossning av fibrerna genom att omfördela krafterna och utnyttja fibrernas goda dragegenskaper.

I livet finns det uppenbara fördelar med skikt orienterat $\pm 45^\circ$ därför kommer dessa att verka som tvärkraftsarmering och föra vertikala krafter ut till upplagen.

De beräknade laminategenskaperna kan användas vid dimensionering av balkar där laminaten kan ingå som liv och flänsar. Vid dimensionering av balkar är det viktigt att hålla koll på laminatens orientering jämfört med balkens orientering på samma sätt som mellan skikt och laminat. Det måste även väljas rätta mekaniska egenskaper beroende på om laminatet verkar i membran- eller böjtillstånd.

Vid dimensionering av balkar måste en kontroll av tvärsnittet göras, här måste maxspänningarna i liv och fläns kontrolleras med hänsyn till tryck, drag och böjning. Dessutom är det viktigt att kontrollera skarven mellan liv och flänsar. Om inte skarven armeras vill skarvens skjuvhållfasthet vara lika med plastmatrisens skjuvhållfasthet. Här kan det vara fördelaktigt att armera med skikt som har $\pm 45^\circ$ orientering för att ta upp skjuvkrafter.

8 Diskussion

På bakgrund av de resultat som lyfts fram i kapitel 5 är det viktigt att välja en fiber och plastmatris med bra mekaniska egenskaper och beständighet vid tillverkning av balkar av fiberarmerad plast. Det är även viktigt att välja en tillverkningsprocess som kan tillverka stora volymer av hög kvalitet om balkarna ska få större användning.

Litteraturstudien kring material och tillverkningsprocesser har varit mycket generell för att ge en bred kunskap kring fiberarmerade plaster i allmänhet. Om fokus hade lagts på färre fibrer, plastmatriser och tillverkningsprocesser, eller om mer tid hade funnits, skulle analysen kunnat bli mer detaljerad och gett mer specifika resultat. Detta skulle ha underlättat dimensioneringen ännu mer.

Rapportens konstruktionskapitel underlättar dimensionering av balkar av fiberarmerad plast genom att förklara hur laminat dimensioneras som senare kan användas för konstruktion av balkprofiler. Konstruktionskapitlet tar endast hänsyn till faktorer enligt avgränsningarna (avsnitt 1.3). Andra faktorer som är viktiga för en fullständig dimensionering är bland annat fukt, temperatur och utmattning vilka behövs beaktas. Beräkningsverktyget är därför inget komplett dimensioneringsverktyg, men ska ses som ett hjälpverktyg för beräkningar och förståelse hur fiberarmerad plast fungerar. De faktorer som inte beaktas har utelämnats eftersom dess teori går utanför ramen för ett examensarbete på denna nivå.

Eftersom det inte finns någon standard för dimensionering av komponenter av fiberarmerade plaster har vi tagit hjälp från forskarassistent och masterstudenter inom området. Utvalt material (Clarke 1996, Mallik 2008, Wysocki 2001) anses därför tillförlitligt som underlag för beräkningsverktyget.

Ett syfte med rapporten var att ge tillräckligt med kunskap för att kunna förstå och använda beräkningsverktyget som har gjorts i Mathcad Prime 3.0. Inga tidigare erfarenheter med Mathcad Prime har varit en begränsning i utformningen av filens funktion och struktur. Detta ses i steg 5 i exemplet där kopplingsmatrisen inte blir en nollmatris, men detta har ingen inverkan på resultatet (se kommentar steg 5).

För vidare studier rekommenderas att materialen utvalda i kapitel 5 utvärderas närmare. En närmare studie av samverkan mellan fiber och plastmatris och olika brottmoder skulle vara intressant. Dessutom skulle beräkningskapitlet kunna utvecklas med avseende på de utelämnade faktorerna för mer användbara resultat. Beräkningsverktyget kan även utvecklas med avseende på att konstruera kompletta balkprofiler utav laminaten enligt avsnitt 7.2.

9 Slutsats

Syftet med detta arbete var att underlätta dimensioneringen av balkar av fiberarmerade plaster genom att:

- Beskriva materialet fiberarmerad plast och dess tillverkningsprocesser.
- Beskriva hur fiber och plastmatris integrerar och hur uppbyggnad påverkar det färdiga laminatet.
- Skapa ett beräkningsverktyg utifrån befintliga beräkningsmodeller som kan beräkna ett laminats karakteristiska egenskaper.

Arbetet har lett fram till en rad slutsatser som poängteras härunder.

Det ska understrykas att fiberarmerade plaster är en grupp av material som erhåller mycket olika egenskaper beroende på val av fiber och plastmatris samt uppbyggnad och tillverkningsätt. Vid konstruktion av balkar måste fiber och plastmatris vara väl vald med hänsyn till mekaniska egenskaper och beständighet beroende på användningsområde.

Arbetet har visat att glasfiber, kolfiber, polyester och epoxiplast kan användas för att konstruera balkar av fiberarmerade plaster främst på grund av de mekaniska egenskaperna. Vid mer extrema tillämpningar är konstruktionsdelar av FRP att föredra jämfört med de traditionella konstruktionsmaterialen på grund av sina specifika hållfasthets- och beständighetsegenskaper.

Laminat uppbyggda av enkeltriktade fiberband ger ett starkare och mer hållbart laminat jämfört med laminat av korta fibrer. Laminat ger en flexibilitet i uppbyggnad av balktvärsnitt där symmetriska tvärsnitt rekommenderas för att undvika oönskade deformationer.

Det finns flera sätt att tillverka balkar av fiberarmerade plaster där profildragning är fördelaktig vid tillverkning av standardbalkar och handuppläggning en fördel vid specialutformade balkar.

Beräkningsverktyget underlättar dimensioneringen av fiberarmerade balkar genom att beräkna ett laminats ekvivalenta egenskaper utifrån ingående material, fiberorientering och laster.

Förutom att underlätta dimensioneringen av balkar kan beräkningsverktyget även användas till att studera andra sorters komponenter av fiberarmerade plaster med laminatuppbyggnad.

10 Referenser

- [Bild på bladfjäder], n.d. [elektronisk bild], http://www.4x4shop.se/ser_suspension_leafs.php [Åtkomst: 2014-02-11]
- Bank L. C. (2006): *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*. [Elektronisk], John Wiley and Sons Inc, Hoboken, New Jersey, ss 40-78.
- Clarke J.L. (1996), Materials, *Structural Design of Composites: EUROCOMP design code* [Elektronisk], Taylor and Francis Group, ss. 43-119.
- Clarke J.L. (1996), Section and Member design, *Structural Design of Composites: EUROCOMP handbook*, [Elektronisk], Taylor and Francis Group, ss. 312-386.
- Exel Composites (2014), *Pultruded CRP composite profile (carbon fiber plastics)* [Bild, framsida], http://www.directindustry.com/prod/exel-composites/pultruded-crp-composite-profiles-carbon-fiber-reinforced-plastic-16769-426695.html#product-item_426700 [Åtkomst: 2014-05-29].
- Fiberline (2014), Hvorfor anvende komposit? *Fiberline.dk*, <http://www.fiberline.dk/konstruktioner/konstruktionsprofiler-og-beslag/hvorfor-vaelge-komposit/hvorfor-anvende-komposit> (2014-05-29).
- Hansson W., Löfgren P-Å, Johansson A. (2001) Tillverkningsmetoder, *Komposithandboken - polyarberade fiberkompositer*, red. Håkan Damberg, ss 85-140. Stockholm: VI Sveriges Verkstadsindustrier.
- Mallik P. K. (2008), Design, *Fiber Reinforced Composites – Materials, Manufacturing and Design*. Third edition. [Elektronisk], Taylor and Francis Group, Dearborn-Michigan.
- Mallik P. K. (2008), Mechanics *Fiber Reinforced Composites – Materials, Manufacturing and Design*. Third edition. [Elektronisk], Taylor and Francis Group, Dearborn-Michigan.
- NPTEL 2014, *Module 7: Strength and Failure Theories* [Elektronisk], http://nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IISc-BANG/Composite%20Materials/pdf/Lecture_Notes/LNm7.pdf, National Programme on Technology Enhanced Learning (2014-05-03).
- Owens Corning Sweden AB, O.C. (2014), *Vad är glasfiber?* <http://www.gazechim.se/owens-corning/61DAF477F28D4693A4F5CB6DB4D3B337>, (11 mars 2014).
- Plast- och Kemiföretagen (1991) *Materialinformationsblad: Fiberarmerade Härdplaster* [Elektronisk], version juni 1991.
- Seldén R. (2001) Fiber- och matrismaterial, *Komposithandboken - polyarberade fiberkompositer*, red. Håkan Damberg. Stockholm: VI Sveriges Verkstadsindustrier, ss 19-75.
- Sjögren A. (2010) *Vårt att veta om kompositer* [Elektronisk], Plastforum, nr.12 del 2, http://www.ad-manus.se/wp-content/uploads/2010/12/Kompositkolan-2010_sid19_36.pdf (2014-02-21), ss 19-35.

- Sto Scandinavia AB, S.S. (2006), *Förstärkning av bärande konstruktioner med StoFRP-system* [Elektronisk], http://www.sto.se/media/documents/broschyror/kolfiberfoerstaerkning_1/Foerstaerkning_av_baerande_konstruktioner_StoFRP_System.pdf (2014-03-11), ss. 1-11.
- Sveriges verkstadsindustrier (2001) Fiberkompositer – inte bara låg vikt, *Komposithandboken - polyarberade fiberkompositer*, red. Håkan Damberg, ss 11-18. Stockholm: VI Sveriges Verkstadsindustrier.
- University of Bolton, (2014) *The Design of Composites materials and structures*, [Elektronisk], <http://www.bolton.ac.uk/codate/newdesignofcomposites.doc>
- Viebke L. (2009) *Fiberkompositlaminering* [Elektronisk] <http://www.viebke.nu/komposit/index.html>, (2014-02-21).
- Wysocki M. (2001) Beräkning och simulering, *Komposithandboken - polyarberade fiberkompositer*, red. Håkan Damberg, ss 223-265. Stockholm: VI Sveriges Verkstadsindustrier.

11 Figurförteckning

Figur 1	Fiberorienteringens inverkan på hållfastheten (Viebke 2009).	8
Figur 2	Fiberbrott orsakat av töjningskoncentration vid sprickspets (Seldén 2001). 9	
Figur 3	Matrisbrott. Plastmatrisen släpper runt fiber (Seldén 2001).	9
Figur 4	Olika typer av vävar (Viebke 2009, Seldén 2001).	11
Figur 5	Bild på bladfjäder.	12
Figur 6	Laminatskiva med enkelriktad fiberarmering (Seldén 2001).	12
Figur 7	Kombination av skivor med matt- och vävarmering (Seldén 2001).	12
Figur 8	Flerriktat laminat uppbyggt av skivor med enkelriktad armering i olika riktningar (Seldén 2001).	13
Figur 9	Bild över en profildragningsprocess (Hansson, Löfgren, Johansson 2001).	14
Figur 10	Vakuumsäcksmetoden (Hansson W, Löfgren P-Å, Johansson A 2001).	16
Figur 11	Trycksäcksmetoden (Hansson, Löfgren, Johansson 2001).	17
Figur 12	Autoklav härdning (Hansson, Löfgren, Johansson 2001).	17
Figur 13	Extrudering (Hansson, Löfgren, Johansson 2001).	19
Figur 14	Relation mellan skiktets- och laminatets koordinater.	24
Figur 15	Spänningar i xy- respektive 1,2-systemet.	25
Figur 16	Spänningssamband mellan lokala och globala koordinater.	26
Figur 17	Balanserat laminat.	27
Figur 18	Membran- respektive böjtillstånd (Mallik 2008).	28
Figur 19	Skiktnummering.	29
Figur 20	I-balk – dimensioner och krafter.	43

Bilaga A: Tabeller över fiberegenskaper

Tabell 3 Glasfibers materialegenskaper (University of Bolton 2014, Seldén 2001).

Glasfiber		E-glas	S-glas	C-glas	D-glas
Draghållfasthet					
-Rovning	MPa	2200	2850	1750	1650
-Monofilament		3400	4500	2900	2400
Elasticitetsmodul	GPa	74	85	70	52
Skjuvmodul	GPa	30	-	-	-
Brottöjning	%	2-3	2-3	2-3	2-3
Densitet	Kg/m ³	2540	2490	2490	2160
Poissons-tal	-	0,22	-	-	-
Längdutr.koeff.	10 ⁻⁶ m/K	5,0	3-5,0	7,0	3,0
Värmekapacitet, RT	KJ/kgK	0,80	0,74	0,85	0,74

Tabell 4 Kolfibers materialegenskaper (University of Bolton 2014, Seldén 2001).

Kolfiber		PAN				PITCH			
		HT	HS	IM	HM	UHM	P55	P75	P100
Draghållfasthet	MPa	3500	4500	4200	2250	1860	1900	2050	2250
Elasticitetsmodul	GPa	230	245	295	395	515	380	515	690
Skjuvmodul	GPa	14	-	-	-	-	-	-	-
Brottöjning	%	0,6- 2	0,6- 2	0,6- 2	0,6- 2	0,4- 2,5	0,4- 2,5	0,4- 2,5	0,4- 2,5
Densitet	Kg/m ³	1760	1800	1740	1810	1960	2020	2060	2150
Poissons-tal	-	0,2	-	-	-	-	-	-	-
Längdutr.koeff.	10 ⁻⁶ m/K	-5,0	-	-	-1,5	-1,5	-0,9	-1,2	-1,6
Värmekapacitet	KJ/kgK	0,71	-	-	0,75		0,93	0,85	0,93
Fiberdiameter	um	7	6	6	6,5	8,4	10	10	11

Tabell 5 Aramidfibers materialegenskaper (University of Bolton 2014, Seldén 2001).

Aramidfiber		Kevlar 149	Twaron HM
Draghållfasthet	MPa	2340	2800
Elasticitetsmodul	GPa	143	103
Skjuvmodul	GPa	~2,9	-
Brottöjning	%	1,5	2,5
Densitet	Kg/m ³	1470	1450
Poissons-tal	-	0.35	-
Längdutr.koeff.	10 ⁻⁶ m/K		
- Longitudinellt		-4,9	-3,5
- Radiellt		66	-
Värmekapacitet, RT 23°C	KJ/kgK	1,42	1,42

Tabell 6 Polyetenfibers materialegenskaper (University of Bolton 2014, Seldén 2001).

Polyetenfiber		Dyneema SK60	Hoechst Celanese (smältextruderad)	Spectra 900	Spectra 1000	Tekmilon
Draghållfasthet	MPa	2620	1300	2080-2400	2740-3000	1470-3430
Elasticitetsmodul	GPa	87	55	86-103	128-171	59-98
Brottöjning	%	-	4	3,6	2,8-3,1	4-6
Densitet	Kg/m ³	970	960	970	970	960

Tabell 7 Naturfibers materialegenskaper (a – från silkebomullstrådet, b – från *Boeheria nivea*) (Seldén 2001).

Naturfiber		Bomull	Kapok ^a	Lin	Hampa	Ramie ^b	Jute	Sisla	Kokos
Drag-hållfasthet	MPa	40-80	-	700-1100	700	870	320-550	640	140
Elasticitetsmodul	GPa	8-10	16	30-60	27	28	13	15	5
Brottöjning	%	5,5-7	1,2	2,0-2,8	1,6-2,7	1,2	1,5	2	15
Densitet	Kg/m ³	1500	1300	1200	1500	1500	1500	1400	1500

Bilaga B: Tabeller över plastmatrisegenskaper

Tabell 8 Hårdplasters materialegenskaper (Bank 2006, Seldén 2001).

Hårdplast		Epoxy	Ester	Vinylester	Imid	Uretan	Fenol
Draghållfasthet	MPa	55-110	40-90	78-82	55-110	40-50	40-60
Elasticitetsmodul	GPa	2,8-4,2	2-4	3,0-4,1	3,2-4,0	-	3-4
Skjuvmodul	GPa	1,25	1,2				
Dragbrotttöjning	%	3-6	1-2	3,0-7,0	6-8	70-100	1-2
Böjhållfasthet	MPa	125	60-160	-	100-120	-	80-20
Böjstyvhet	GPa	-	-	3-4	3,1-3,9	0,9-1,3	-
Densitet	kg/m ³	1200-1300	1100-1400	1000-1200	1300-1450	1200	1300
Poisson-tal	-	0,33	0,33	125-135	-	-	-
Slaghållfasthet, Izod-skårad, 23 °C	J/m	5-50	10-21	-	35-50	-	12-20
Glasomvandlings-temperatur	°C	40-300	40-110	40-150	-	100-150	220-250

Tabell 9 Termoplasters materialegenskaper (a - 50% RH) (Bank 2006, Seldén 2001).

Termoplast		Propen	Amid ^a	Etereterketon
Draghållfasthet	MPa	30 - 35	65 - 80	95 - 115
Elasticitetsmodul	GPa	1,3 - 2	1,4 - 2	3,7 - 4
Dragbrotttöjning	%	500 - 10000	~200	20 - 50
Böjhållfasthet	MPa	40 - 50	55 - 75	120
Densitet	kg/m ³	0,9 - 0,91	1,12 - 1,15	1,31
Poisson-tal	-	0,4	-	-
Längdutr.koeff. (10 ⁻⁶)	m/K	1,6-1,8	0,7-1	0,37
Glasomvandlings-temperatur	°C	-	-	-

Bilaga C: Användning av beräkningsverktyg

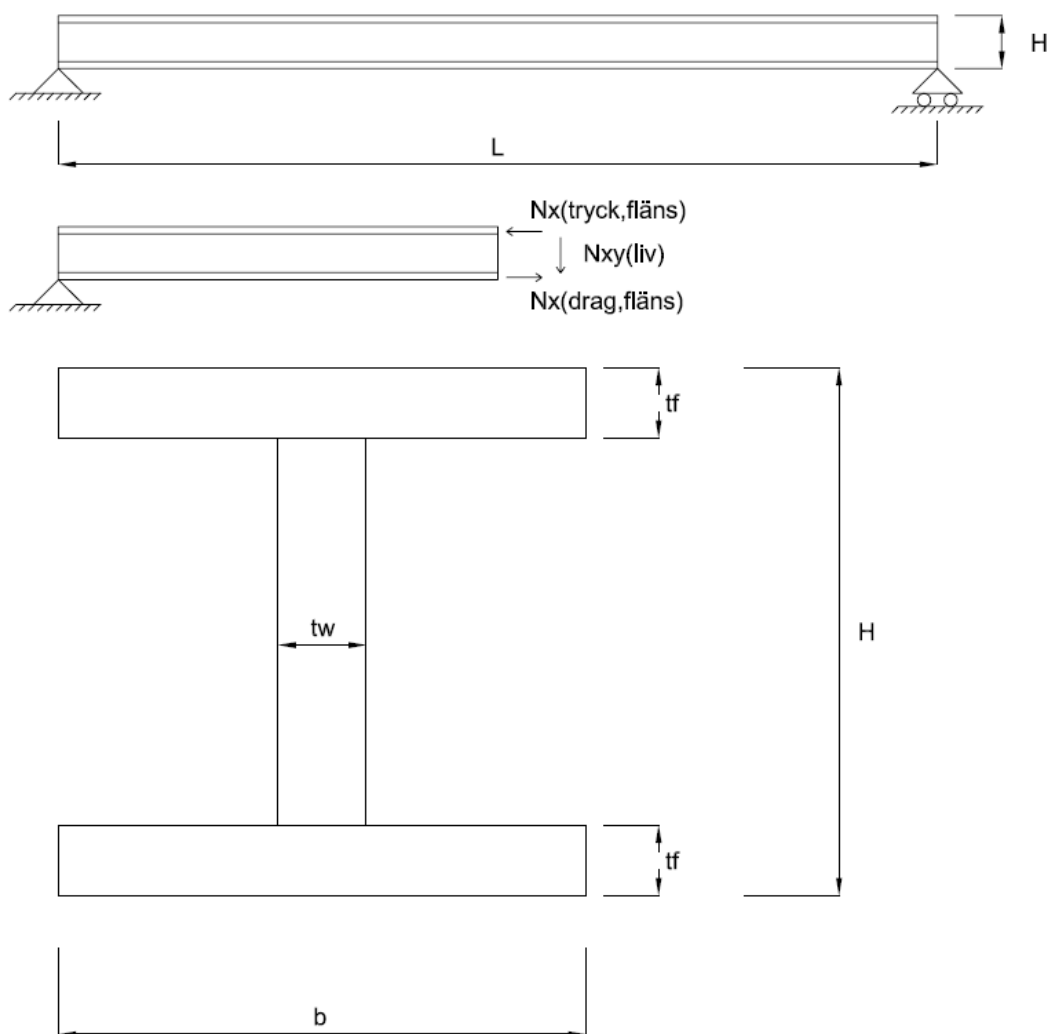
Följande bilaga är ett exempel på hur filen används. Det förklaras hur de ingående värdena väljs samt hur modellens resultat tolkas.

I-balk

Det ska dimensioneras en I-balk med dimensioner och laster enligt Figur 20.

Balkens dimensioneras så att flänsarna tar hand om momentet med genom tryck ($Nx(\text{tryck}, \text{fläns})$) respektive dragkrafter ($Nx(\text{drag}, \text{fläns})$) och livet tar hand om tvärkraften ($Nxy(\text{liv})$).

Filen kan inte användas till att ta fram krafterna, dessa räknas fram för hand.



Figur 20 I-balk – dimensioner och krafter.

Krafter

Balkens dimensioneras så att flänsarna tar hand om momentet med genom tryck ($Nx(\text{tryck}, \text{fläns})$) respektive dragkrafter ($Nx(\text{drag}, \text{fläns})$) och livet tar hand om tvärkraften ($Nxy(\text{liv})$).

$$N_x(\text{tryck, fläns}) = 50 \text{ kN}$$

$$N_x(\text{drag, fläns}) = 50 \text{ kN}$$

$$N_{xy}(\text{liv}) = 160 \text{ kN}$$

Dimensioner

$$H = 0,30 \text{ m}$$

$$B = 0,30 \text{ m}$$

$$L = 5,0 \text{ m}$$

Tjockleken på liv och flänsar bestämmas av antalet skikt i respektive laminat.

Material

Balken konstrueras i glasfiber- polyester.