

STF24 A04014 - Åpen

# RAPPORT



## Kompositt-/sandwichmaterialer for bruk i fiskeflåten

Alfred Andersen og Reidar Stokke

[www.sintef.no](http://www.sintef.no)

**SINTEF Materialer og kjemi**

Desember 2004

**SINTEF Materialer og kjemi**Postadresse: Boks 124, Blindern  
0314 Oslo

Besøksadresse: Forskningsveien 1

Telefon: 22 06 73 00

Telefaks: 22 06 73 50

Foretaksregisteret: NO 948 007 029 MVA

**SINTEF RAPPORT**

TITTEL

**Kompositt-/sandwichmaterialer for bruk i fiskeflåten**

FORFATTER(E)

Alfred Andersen og Reidar Stokke

OPPDRAGSGIVER(E)

Fiskeri- og havbruksnæringens forskningsfond (FHF)  
Norges forskningsråd

RAPPORTNR. <b>STF24 A04014</b>	GRADERING <b>Åpen</b>	OPPDRAGSGIVERS REF. <b>Terje Flatøy / Turid Hiller</b>	
GRADER. DENNE SIDE <b>Åpen</b>	ISBN	PROSJEKTNR. <b>24446500</b>	ANTALL SIDER OG BILAG <b>46</b>
ELEKTRONISK ARKIVKODE		PROSJEKTLÉDER (NAVN, SIGN.) <b>Reidar Stokke</b>	VERIFISERT AV (NAVN, SIGN.) <b>Reidar Friberg</b>
ARKIVKODE	DATO <b>2004-12-14</b>	GODKJENT AV (NAVN, STILLING, SIGN.) <b>Reidar Stokke, Spesialrådgiver</b>	

**SAMMENDRAG**

Rapporten er ment å være en introduksjon om kompositt-/sandwichmaterialer for de som skal vurdere å ta i bruk materialene i fiskeflåten.

Rapporten gir en beskrivelse av materialene, de viktigste matrisematerialer og armeringsfibere, hvordan materialene bygges opp og hvilke faktorer som bestemmer egenskapene. Rapporten gir en grundig oversikt over styrke- og stivhetsegenskapene og hvordan disse påvirkes av fibertype, fibermengde og fiberorientering. Viktige egenskaper til kompositt-/sandwichmaterialer er angitt og sammenlignet med tilsvarende egenskaper for stål og aluminium. Det gis en oversikt over de fordeler som kan oppnås ved bruk av sandwichkonstruksjoner når det gjelder stivhet og styrke i forhold til vekt. Bruk av sandwichkonstruksjoner sammenlignes med konvensjonelle materialer som stål og aluminium.

Det gis også en oversikt over komposittmaterialenes langtidse mekaniske egenskaper som utmatting og siging, skaderesistens og resistens overfor kjemikalier og miljøpåvirkninger.

Det er tatt med flere eksempler på anvendelser av komposittmaterialer som er relevant for bruk i fiskeflåten og som viser litt av bredden i anvendelser hvor kompositt-/og sandwichmaterialer benyttes i dag.

STIKKORD	NORSK	ENGELSK
GRUPPE 1	Materialteknologi	Materials Technology
GRUPPE 2	Polymerer og kompositter	Polymers and composites
EGENVALGTE	Komposittmaterialer	Composites
	Egenskaper	Properties
	Anvendelser	Applications

## INNHALDSFORTEGNELSE

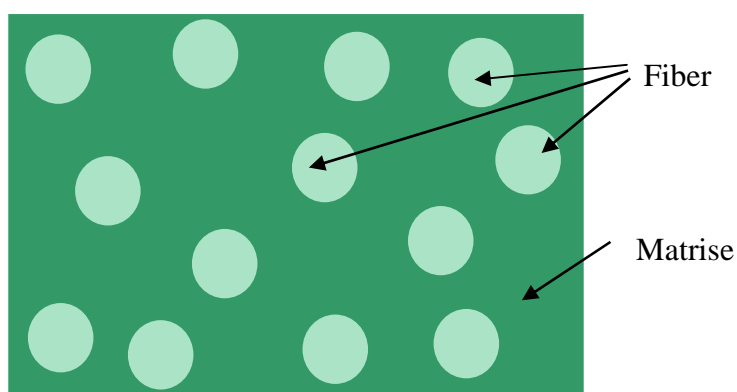
<b>1. Innledning</b> .....	<b>3</b>
1.1 Definisjon av begrepet komposittmaterial .....	3
1.2 Bakgrunn og anvendelser .....	3
1.3 Matrisematerialer .....	4
1.4 Fiber .....	6
1.4.1 Innledning .....	6
1.4.2 Glassfiber .....	7
1.4.3 Karbonfiber .....	8
1.4.4 Aramid fiber .....	8
<b>2. Komposit- og sandwichmaterialer</b> .....	<b>9</b>
2.1 Innledning .....	9
2.2 Spesifikk styrke og stivhet .....	9
2.3 Mengdeforhold mellom fiber og matrise .....	11
2.4 Stivhet, fiberorientering og notasjon .....	14
2.5 Styrke .....	16
2.6 Sandwich .....	17
2.7 Langtids mekaniske egenskaper .....	22
2.7.1 Utmattingsegenskaper .....	22
2.7.2 Sigeegenskaper .....	24
2.7.3 Innflytelse av ytre miljø (vær, vann, kjemikalier) .....	24
2.8 Skaderesistens .....	26
2.9 Designfrihet .....	28
2.10 Produksjonsmetoder .....	29
<b>3. Eksempler på anvendelser av komposit- / sandwichmaterialer</b> .....	<b>31</b>
3.1 Anvendelser i fiskefartøy, militære fartøy og hurtiggående fartøy .....	31
3.2 Overbygninger i komposit- / sandwich .....	36
3.3 Eksempler på andre anvendelser av komposit- / sandwich .....	38
<b>Referanseliste</b> .....	<b>45</b>

## 1. Innledning

### 1.1 Definisjon av begrepet komposittmaterial

Komposittmaterialer betyr i vid forstand sammensatte materialer, d.v.s. materialer som er bygget opp av to eller flere enkeltmaterialer. Hvis man tenker seg den enkleste formen for kompositt vil dette være bygget opp av kun to delmaterialer. I denne rapporten vil vi begrense komposittmaterialene til å omfatte plastmaterialer forsterket med kontinuerlige fibre. I disse materialene er det fibrene som bidrar med styrke og stivhet, mens matrisen, som oftest er en herdeplast, bidrar til å binde fibrene sammen, overføre og fordele krefter mellom/til fibrene, beskytte mot miljøpåkjenninger og eventuelle ytre skader samt å gi en kontinuerlig overflate.

De mest vanlige armeringsfibrene er glassfiber, karbonfiber og aramidfiber. Det finnes også andre fibertyper som polyetylenfiber, polyesterfiber og lignende. De mest vanlige matrisetyper er polyester, vinylester, epoksy, fenol og polyuretan. I tillegg finnes også andre matrisetyper som benyttes bl.a. for å øke materialenes temperaturresistens og kontinuerlig brukstemperatur.



Figur 1: Eksempel på en kompositt der "fibrene" er diskontinuerlige mens matrisen som limer det hele sammen er kontinuerlig

Vanlige fiberarmerte plastmaterialer har et fiberinnhold som varierer fra 20-80 vekt %. Egenskaper som domineres av fibrene er bl.a. styrke, stivhet, dimensjonsstabilitet, fysikalske egenskaper og anisotropi. Egenskaper som domineres av matrisematerialet er bl. a. temperaturresistens, aldringsegenskaper og brannresistens. Skaderesistens er en egenskap som er avhengig av begge delmaterialene.

### 1.2 Bakgrunn og anvendelser

Komposittmaterialer ble utviklet fordi ingen homogene konstruksjonsmaterialer, som hadde alle de ønskede egenskapene for gitte anvendelser, var tilgjengelige. Hoveddrivkraften var behov for nye materialer, som ga økt ytelse, innen luft- og romfart. Aluminiumslegeringer, som gir relativt høy styrke og stivhet kombinert med lav vekt, er et hovedmateriale i denne industrien, men både med hensyn til korrosjonsresistens og utmatting har aluminiumslegeringer klare begrensninger. Materialer basert på fiberkompositter viste gode egenskaper med hensyn til korrosjon og sprekkdannelse i slike anvendelser.

Kompositter anvendes nå på en rekke områder der korrosjonsresistens, lang levetid, lav vekt, designfrihet, etc. er viktig. Viktige anvendelsesområder er i båtbygging, marine anvendelser, offshore, bygg og anlegg, transport, flyindustri, forsvar, sport, bilindustri etc. Begrensninger for

mer utbredt anvendelse er relativt høy pris på råmaterialene og mangel på raske, effektive og automatiserte produksjonsprosesser.

Fordelene ved komposittmaterialer er mange. En spesifikk styrke langt bedre enn stål og aluminium samt en spesifikk stivhet minst på høyde med disse i tillegg til nærmest ubegrensede muligheter til å skreddersy mekaniske egenskaper gjør kompositter meget anvendbare.

### 1.3 Matrisematerialer

I de fleste komposittsystemer som benyttes i konstruksjons- og ingeniørsammenhenger er det fibrene som spiller den avgjørende rollen for komposittmaterialets mekaniske egenskaper. Matrisens funksjon er som tidligere sagt å holde fibrene på plass og å overføre belastningen til og mellom fibrene. Matrisens egenskaper er imidlertid fortsatt meget viktige da den er med på å gi komposittmaterialet dets unike egenskaper. Det kan for eksempel være stor forskjell på et glass/polyester laminat og et glass/epoksy laminat selv om det benyttes akkurat samme mengde og type fiber i begge to. Matrisen influerer signifikant på komposittens korrosjonsmotstand og bidrar sterkt til sluttprisen på materialet. [1, 5, 7]

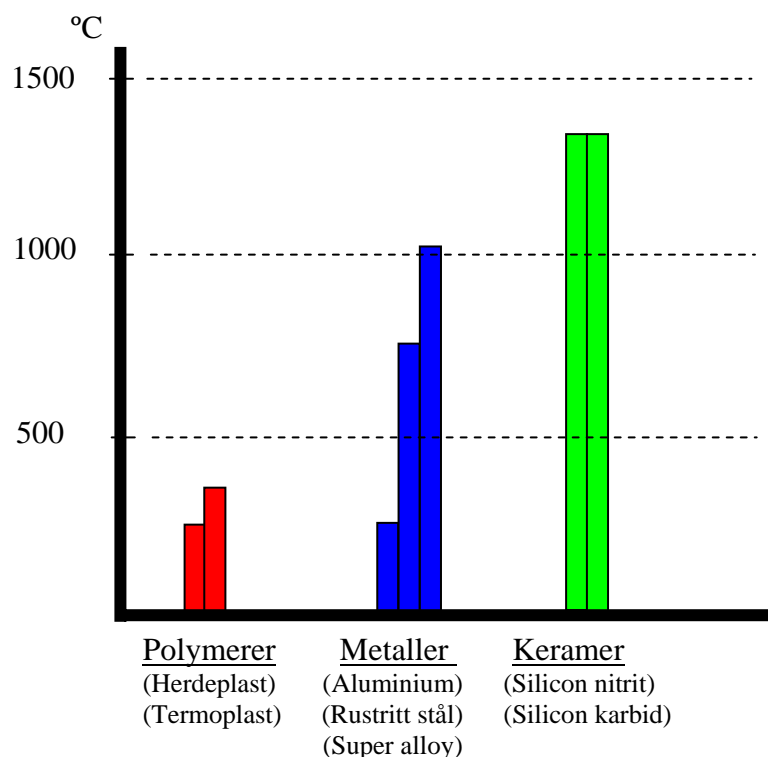
Utvalgte egenskaper til de viktigste matrisematerialene er gjengitt i tabell 1.

Tabell 1: Egenskaper til en del matrisematerialer [10,12]

Materiale	Stivhet [GPa] v/bøy	Stivhet [GPa] v/strekk	Styrke [MPa] v/strekk	Bruddtøffhet K <sub>IC</sub>	Tetthet [g/cm <sup>3</sup> ]
Polyester	3.5	1.3-4.5	45-85	0.5	1.1-1.5
Vinylester	3.7	3.6	80	-----	1.0-1.1
Epoksy	3.4	2.1-6.0	35-90	0.6-1.0	1.1-1.4
Fenol	-----	4.4	50-60	-----	1.30
Polyuretan	1.6-2.0	-----	-----	-----	0.85-0.90

I denne sammenhengen skal vi konsentrere oss om de såkalte herdeplastene, men det finnes også termoplaster som benyttes som matrisematerial. Termoplaster i denne sammenheng er generelt mer kostbare enn herdeplaster og de er vanligere i sammenheng med kortfiberarmerte sprøytetøpte småprodukter som ofte lages i store serier. Termoplastene er mekanisk tøffere enn herdeplastene og med de mest avanserte kan det oppnås noe bedre temperaturresistens. Termoplastmatriser med høy temperaturresistens er svært dyre og blir bare brukt i spesielle anvendelser. Herdeplaster fungerer imidlertid så godt sammen med standard glassfiber og karbonfiber, både økonomisk og mekanisk, at disse totalt dominerer markedet for store konstruksjoner og detaljer (skrog, dekksluker, dører, småbåter osv).

Generelt kan man si at polyester oftest benyttes i ukritiske konstruksjonssammenhenger der det er viktig at kostnadene holdes nede. Det finnes selvfølgelig en rekke med høykvalitets polyestere som både er dyre og meget gode, men disse er ikke like vanlige. Epoksy er en meget god matrisetype som generelt har høyere styrke, seighet og evne til å hefte enn polyester. Epoksy har også meget gode korrosjonsegenskaper. Fenol er rimelig og benyttes ofte til ablative applikasjoner (varmeskjold), som termisk isolasjon og der det stilles strenge krav til brannresistens. I tabell 2 er en del fordeler og ulemper for noen matrisematerialer oppsummert. Komposittmaterialer har en begrenset øvre brukstemperatur på omtrent 300 °C. Dette er noe høyere enn aluminium, men noe lavere enn stål og keramiske materialer. Dette er illustrert i figur 2.



Figur 2: Brukstemperatur for matrisematerialer kontra noen vanlige metaller og keramer

Valget av matrisemateriale bidrar også sterkt til de mekaniske egenskapene til kompositten. Typiske matrisedominerende egenskaper er styrke og stivhet på tvers av et laminat, sprekkvekst, tøffhet og slagstyrke og evne til å tåle sykliske laster over lange tidsrom. Dette kommer vi tilbake til i detalj senere.

Kjemikalieresistens og utendørsbestandighet varierer en del mellom de forskjellige matrisetyperne. Polyester har blitt benyttet i mange år til applikasjoner som krever høy kjemikalieresistens og værbestandighet. Korrosjonsbestandige tanker, rør, osv. brukes ofte i kjemisk prosess- og papirindustri. Prosessindustrien bruker mye vinylester fordi den tåler de ekstreme kjemiske miljøene bedre. Noen polyestere er sterke mot syrer, andre mot baser osv. Tabell 2 vises typiske forskjeller mellom de ulike matrisematerialene. Det er viktig å være klar over at det er store variasjoner i egenskaper for de forskjellige matrisetyperne. Tabellen gir kun et grovt bilde.

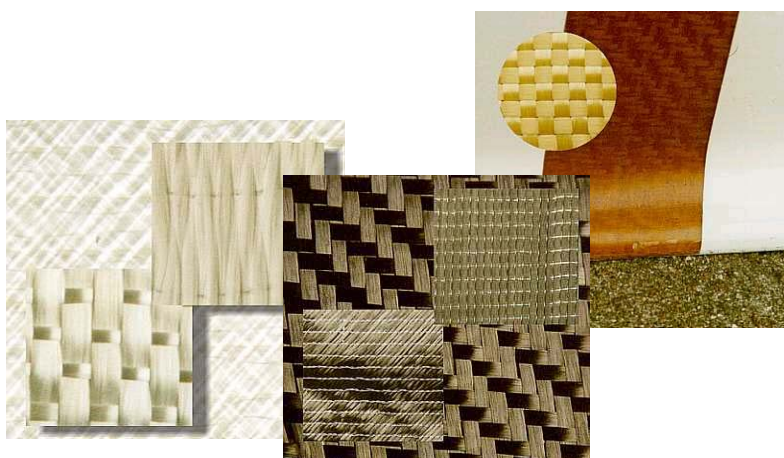
Tabell 2: Egenskaper for forskjellige matrisetyper

Materiale	Mekaniske egenskaper	Kjemisk motstand	Termiske egenskaper	Brannmotstand	Tøffhet (slag)
Polyester	Meget bra	Bra	Bra	Mindre bra	Bra
Vinylester	Svært bra	Svært bra	Bra	Mindre bra	Meget bra
Epoksy	Svært bra	Meget bra	Bra	Mindre bra	Meget bra
Fenol	Mindre bra	Bra	Meget bra	Bra	Mindre bra
Polyuretan	Bra	Meget bra	Bra	Mindre bra	Meget bra

## 1.4 Fiber

### 1.4.1 Innledning

Det finnes en rekke forskjellige fibertyper som benyttes i komposittmaterialer. Fibrene kan være alt fra nærmest partikler til lange og kontinuerlige. I denne rapporten vil vi begrense oss hovedsakelig til kompositter med lange kontinuerlige fiber, men vi vil også til en viss grad behandle kompositter med fiber som ikke er kontinuerlige. I båtindustrien dominerer glassfiber, men det benyttes også noe karbon- og aramidfiber. Fibrene kan være laget av mange typer materialer som f.eks. glass (E, S og C), karbon, boron, silica, tungsten, aramid eller metaller. I plastbaserte kompositter er glass, karbon og aramid imidlertid vanligst.



Figur 3: Eksempler på fiber. Fra venstre: Glass, karbon og aramid. De to førstnevnte er vanligst.

Hvis man studerer de mekaniske egenskapene til glassfiber, karbonfiber, stål og aluminium virker de mekaniske egenskapene fibrene besitter ikke direkte imponerende ved første øyekast. I tabell 3 ser man at stivheten til glassfiber er omtrent som den til aluminium og at karbonfiber er omtrent like stift som stål. De mest avanserte karbonfibrene kan ha en E-modul opp i mot 900 GPa og styrke opp mot 5-6 GPa [17]. På styrkesiden viser det seg at glassfiber er noe sterkere enn aluminium og karbonfiber, men at stål ligger høyest. Tar man imidlertid hensyn til tettheten de forskjellige materialene har, vil bildet se ganske annerledes ut.

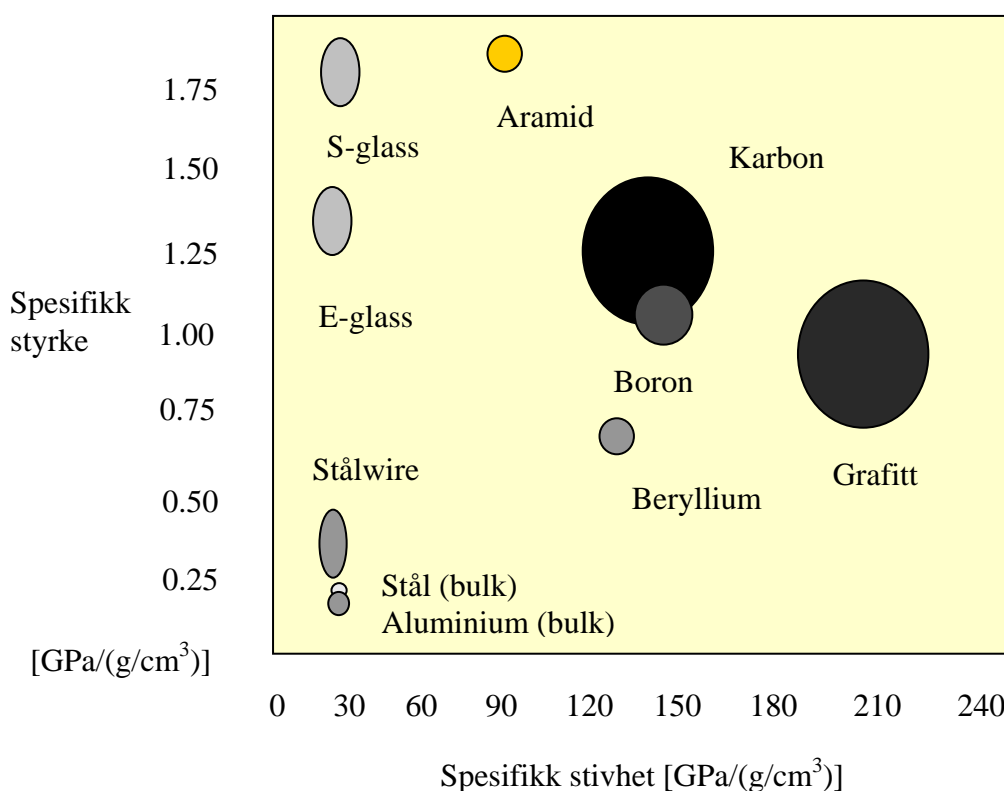
Tabell 3: Egenskaper til fiber og konvensjonelle materialer [1, 10, 17]

Materiale	Stivhet [GPa]	Styrke [GPa]	Tetthet [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
E-glass	75	3.5	2.54
S-glass	85	4.6	2.48
Karbon	230	2.5	1.90
Aramid	130	3.6	1.44
Stål	210	7.8	7.8
Aluminium	70	2.7	2.7

Fibrenes styrke og stivhet er nemlig meget stor sett i forhold til egenvekten deres. Styrke eller stivhet i forhold til egenvekt kalles spesifikk styrke og spesifikk stivhet. Hvis man studerer spesifikk styrke og spesifikk stivhet som forskjellige materialer besitter vil man se at glass, karbon, aramid osv kommer meget godt ut i forhold til metallene. Glassfiber som er den aller

vanligste fibertypen utmerker seg i forhold til konvensjonelle materialer med en særlig høy spesifikk styrke. På stivhetssiden er glassfiber mer lik stål og aluminium. Dette er illustrert i figur 4.

De fiberdominerende egenskapene til en kompositt er stort sett alle de egenskapene som man tradisjonelt tenker på for et materiale. Stivhet, strekkstyrke og kompresjonsstyrke i fiberretning domineres totalt av fibre. Det samme gjelder stivhet og styrke i bøy.



Figur 4: En del fibertyper og metaller plassert i et spesifikk styrke/spesifikk stivhetsdiagram.[1,7]

Fibre blir som regel videreforedlet til en armering som igjen påføres en matrise. Disse armeringene kan være laget på en rekke forskjellige måter. Vevde og sydde armeringer med orienterte, kontinuerlige fibre er vanligst for kompositter. Skal ikke kompositten brukes i en kritisk detalj er imidlertid ofte armeringen av en annen type. Man benytter da ofte såkalt CSM (Chopped Strand Mat) som består av korte fibre og bindemiddel slik at de danner en sammenhengende armering med fibre i en vilkårlig orienteringsretning.

#### 1.4.2 Glassfiber

Glassfiber er på grunn av kombinasjonen lav pris, høy styrke og relativt lav tetthet den vanligste formen for armering i polymerbaserte kompositter. Til forskjell fra karbon og aramid er glassfiber isotropiske og følgelig besitter akkurat de samme egenskapene når de er lastet på tvers som på langs av fibre. Fibrene kan ha forskjellige diameter og egenskaper. Den rimeligste typen som kalles E-glass har ofte tilstrekkelige styrke- og stivhetsegenskaper og er mye benyttet. C-glass besitter mange av de samme mekaniske egenskapene som E-glass, men er i tillegg mer kjemikalieresistent. S-glass har bedre mekaniske egenskaper men er også dyrere og brukes følgelig mest i spesielt krevende anvendelser. Forskjellen mellom S- og E-glass er illustrert i figur 4 og viser at den spesifikke stivheten til de to er omtrent lik, mens den spesifikke styrken til S-



glass er omtrent 40 % høyere enn den til E-glass. Begge fibrene har en spesifikk stivhet omtrent som stål og aluminium mens den spesifikke styrken er langt høyere.

Glassfiber er resistent mot fuktopptak. De absorberer ikke vann og er følgelig ikke utsatt for svelling. Glassfiber (særlig C-glass) er motstandsdyktig mot løsningsmidler, olje og drivstoff. Ved brann smelter glassfibrene ved omtrent 850 til 900 °C. Når det gjelder termisk konduktivitet er den lav i forhold til aluminium, faktisk bare fra omtrent en femtende del til en tyvende del. Komposittmaterialenes lave termiske ledningsevne er fordelaktig i brannsituasjoner ved at effekten av brannen blir begrenset til selve brannsonen. Den termiske utvidelseskoeffisienten er også lav for glassfiber, bare en femtedel av aluminium og en tredjedel av stål.

Når det gjelder glassfibreens stivhetsmodul så ligger den omtrent på det samme som stivhetsmodulen til aluminium, det vil si rundt en tredjedel av den til stål. I forhold til disse konvensjonelle materialene har glass gode utmattingsegenskaper.

### **1.4.3 Karbonfiber**

Karbonfiber benyttes i en rekke avanserte anvendelser innen bl.a. marint, aerospace, automotiv og sport. Karbonfiber karakteriseres av en meget høy stivhet og lav tetthet. Enkelte karbonfiber har en stivhet som er 10 ganger den til glass og en tetthet som er halvparten. Dette illustreres godt i figur 4. Styrken er imidlertid ofte dårligere enn hos f.eks. glass og aramid. De termiske egenskapene gode og fibrene er stabile opp til 550 -700 °C. Hvis man holder seg til mer normale temperaturer så har karbonfiber meget lav termisk utvidelseskoeffisient. Det kan utnyttes i kritiske konstruksjonsdeler som utsettes for høye temperaturer og temperaturvariasjoner. Fibrene er lite utsatt for korrosjon og oksidasjon ved høye temperaturer. Utmatningsstyrken til karbonfiber er også meget bra. Den eneste ulempen med karbonfiber er den høye prisen som kan være nesten 100 ganger prisen på E-glass. Den effektive prisforskjellen blir imidlertid ikke så stor fordi det kan benyttes tynnere laminater. Rimeligere karbonfiber med grovere fiberbunter (f. eks. 48K) er også i ferd med å komme inn på markedet. I tillegg er karbonfiber ikke isotrope som glassfiber men anisotrope. De er 10 ganger så sterke i lengderetning som på tvers.

### **1.4.4 Aramid fiber**

Aramid fiber er en organisk fiber som kom på markedet tidlig på 70-tallet. Aramid fiber benyttes spesielt i anvendelser hvor det er krav til tøffhet, skaderesistens og ballistiske egenskaper. Aramidfiber har lav tetthet (ca. 1,4 g/cm<sup>3</sup>) og har høyere spesifikk styrke enn glass- og karbonfiber. Den spesifikke stivheten ligger mellom glass og karbonfiber. Aramidfibre er anisotrope og har høyere styrke og stivhet i fiberretningen enn på tvers av fibre. Aramidfibre har gode egenskaper i både dynamisk og statisk utmatting. Sighetshastigheten er omtrent som for glassfiber men aramidfibre er mindre utsatt for sigebrudd. Strekkstyrken avtar lineært med økende temperatur fra ca. 30 °C og ved 180 °C er ca. 80 % av strekkstyrken i behold. Aramidfibre dekomponerer ved ca. 425 °C i luft og anvendes vanligvis ikke i over lang tid ved temperaturer over 150 °C. Aramidfibrene svakheter er dårlige egenskaper ved kompresjonsbelastninger. Ved en kompresjonstøyning på ca. 0.3 - 0.5 % oppstår flyt og strukturelle defekter i fibre. Dette fører til at anvendelse av aramidfibre i produkter som utsettes for høye tøyninger i kompresjons- og bøyebelastninger er begrenset. Aramidfibre kan degraderes av sterke syrer og baser, men er resistente mot de fleste andre kjemikalier og løsningsmidler.

## 2. Kompositt- og sandwichmaterialer

### 2.1 Innledning

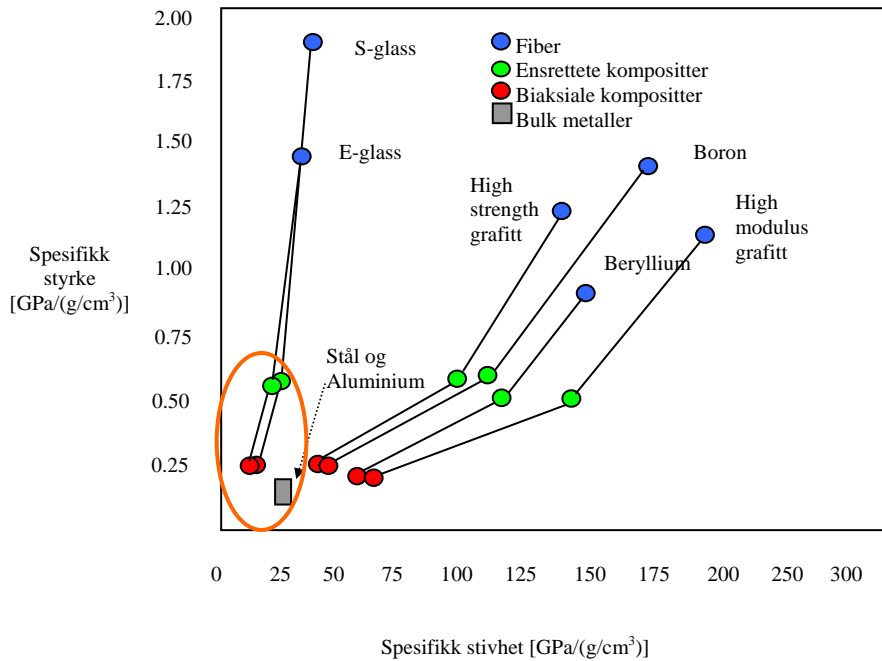
De mekaniske og fysikalske egenskapene til komposittmaterialer avhenger av en rekke kompliserte faktorer, men forenklet kan man si at de bestemmes av:

- **Fibertype:** Fibrene kan være av f.eks. glass, karbon eller aramid og de kan være tykke, tynne, kontinuerlige eller korte.
- **Armeringstype:** Fibrene benyttes oftest i form av ulike ferdige armeringer som f.eks. vevde armeringer, sydde armeringer og vilkårlig orienterte armeringer med korte fibre (CSM).
- **Matrisetype:** Matrisen kan være f.eks. epoksy, polyester, vinylester, polyuretan og fenol.
- **Mengdeforholdet mellom fiber og matrise:** Høyt fiberinnhold gir generelt stive og sterke materialer.
- **Orientering av fiber:** Ved å orientere fibrene i forskjellige retninger kan man skreddersy komposittens mekaniske egenskaper etter de belastningene den utsettes for.

Disse punktene vil bli nærmere beskrevet i dette kapittelet.

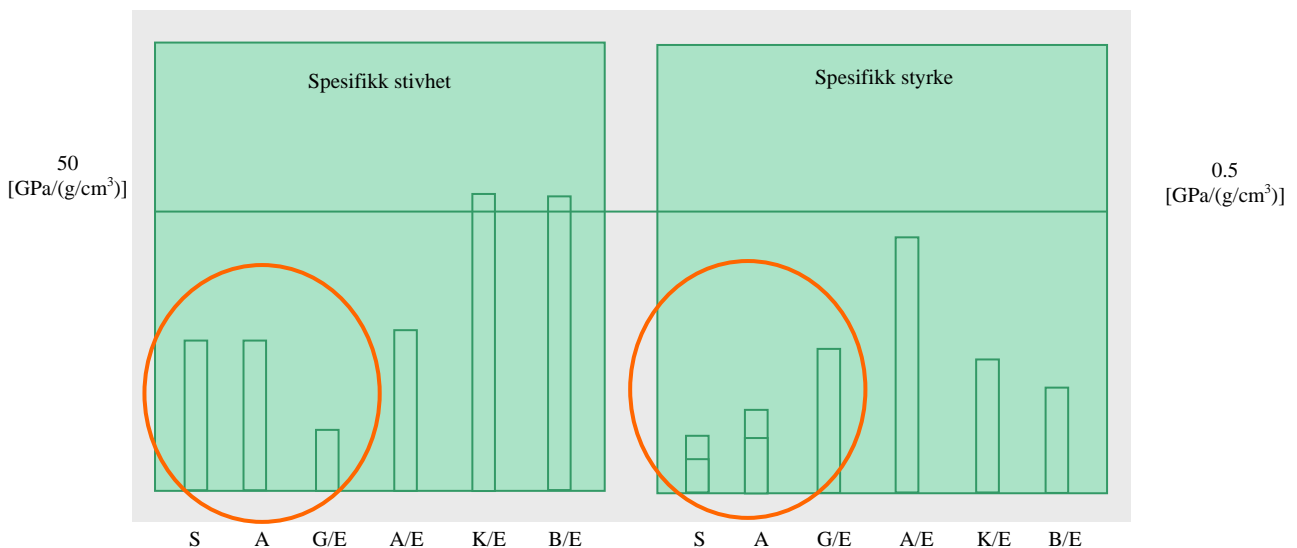
### 2.2 Spesifikk styrke og stivhet

Kompositten er som tidligere nevnt det materialet man får når fiber og matrise virker sammen. Man kan grovt si at komposittmaterialer har 3 hovedfordeler over metaller. Den første fordel er knyttet til vekt. Da kompositter generelt har meget gode spesifikke styrke- og stivhetsegenskaper er det ofte mulig å oppnå betydelige vektbesparelser ved å benytte kompositter kontra metaller. I figur 5 ser man et diagram for spesifikk styrke og stivhet. Det er helt tydelig at fibrene alene kommer meget sterkt ut i forhold til bulkmaterialene. Ensrettede glassfiberkompositter besitter meget gode egenskaper. De har en spesifikk styrke som er betydelig høyere enn stål og aluminium og en spesifikk stivhet som er omtrent som stål og aluminium. Biaksiale glassfiberkompositter (armeringsfibre i 0° og 90° retning) ligger noe lavere enn metallene i spesifikk stivhet men en god del høyere i spesifikk styrke. For ensrettede karbonfiberlaminater har man en spesifikk stivhet og styrke som er langt bedre enn stål og aluminium. For biaksiale karbonfiberlaminater har man det samme, men verdiene ligger noe nærmere stål og aluminium. Dette er illustrert i figur 5 og figur 6. Metallene og glassfiberlaminatene er sirklet inn da de er vanligst.



Figur 5: Spesifikk styrke vs. spesifikk stivhet for en rekke metaller, fiber og kompositttyper. Sirkelen omrammer de vanligste laminattypene, nemlig ensrettete (grønn) og biaksiale (rød) glassfiberlaminater samt aluminium og stål. [1,7]

Komposittenes gode mekaniske egenskaper illustreres også godt i figur 6 der søyler viser ulike biaksiale kompositters spesifikke stivhet og styrke kontra stål og aluminium.



Figur 6: Spesifikk styrke og stivhet for en del biaksiale kompositter (armeringsfibre i 0°- og 90°-retning) og metaller. (S = stål, A = Aluminium, G/E = E-glass/epoksy, A/E = Aramid/Epoksy, K/E = Karbon/epoksy, B/E = Boron/epoksy). Sirkelene omrammer det vanligste laminatet nemlig biaksielt glassfiberlaminat samt stål og aluminium.[1]

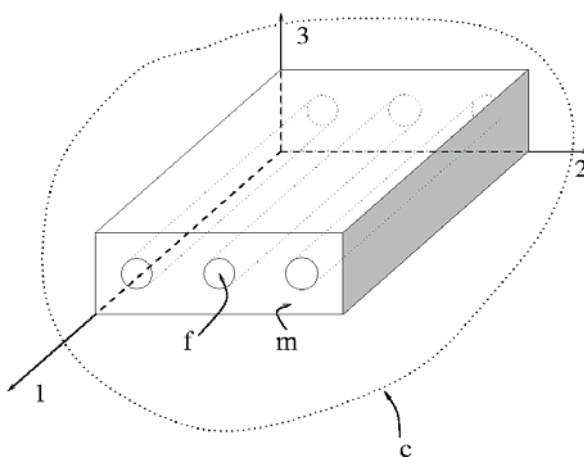
### 2.3 Mengdeforhold mellom fiber og matrise

Styrken og stivheten til en kompositt er avhengig av retningen til fibrene og ikke minst mengden av fibrene. Hvis man for enkelhets skyld studerer en ensrettet kompositt, d.v.s. en kompositt der alle fibrene er orientert i en retning og benytter nomenklaturet vist i figur 7, vil følgende "rules of mixture" uttrykk kunne utledes for komposittens stivhet og styrke:

( $\sigma_c$  er styrke kompositt,  $\sigma_f$  er styrke fiber,  $\sigma_m$  er styrke matrise,  $E_c$  er stivhet kompositt,  $E_f$  er stivhet fiber,  $E_m$  er stivhet matrise,  $V_f$  er volumandel fiber og  $V_m$  er volumandel matrise)

$$\text{Styrke: } \sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m$$

$$\text{Stivhet: } E_c = E_f V_f + E_m V_m$$



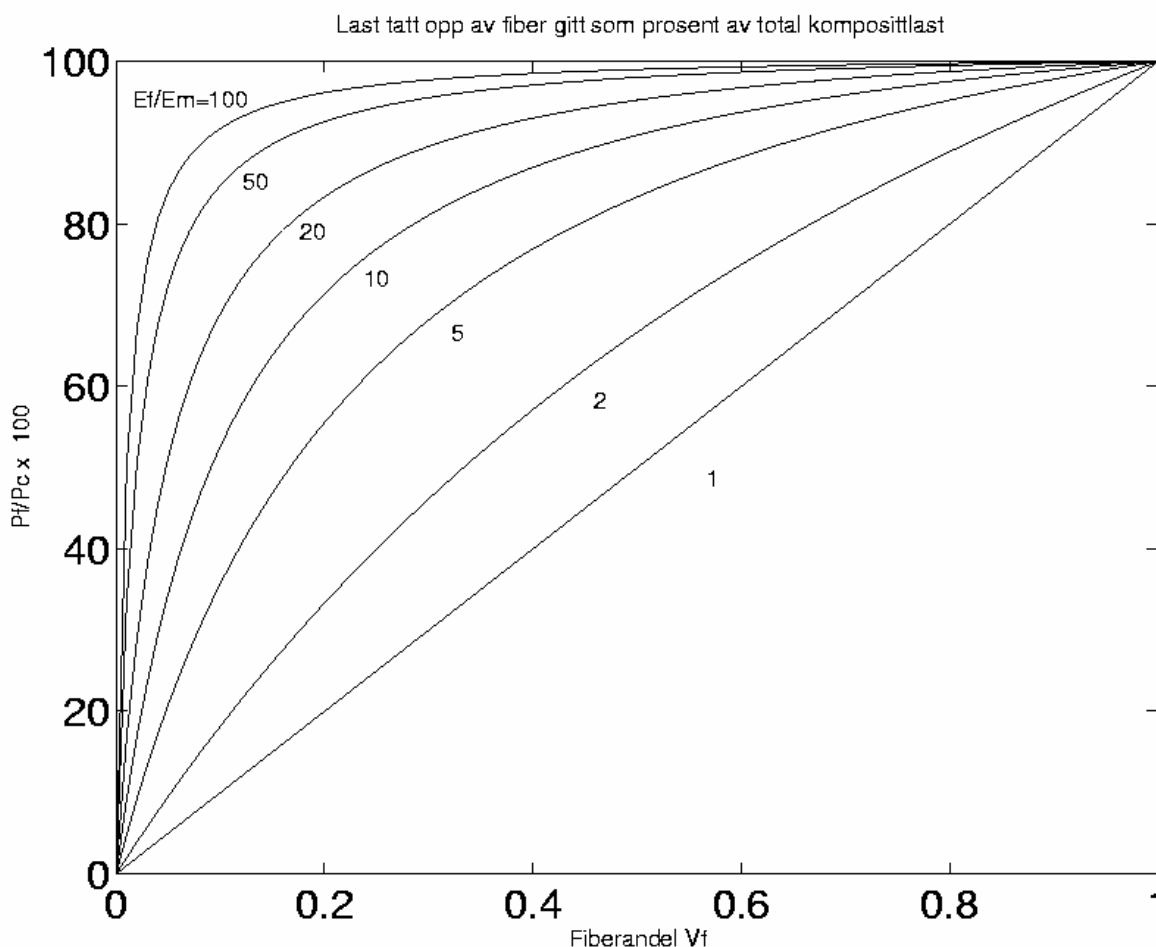
Figur 7: Nomenklatur for en ensrettet kompositt. **m**-matrise, **f**-fiber, **c**-kompositt, **1**-lengderetning, **2** og **3**-tverretning [6]

Andelen av last som taes opp av fibrene kan ogs a utledes som en funksjon av parametrene over:

$$P_f/P_c = (E_f/E_m)/((E_f/E_m)+(V_m/V_f))$$

Figur 8 illustrerer hvor stor del av kreftene som taes opp av fibrene som funksjon av den totale lasten p a kompositten. For ensrettet karbon ligger forholdet  $E_f/E_m$  rundt 100 mens det for ensrettet glass ligger rundt 20. Andelen av lasten som fibrene b erer øker når stivhetsforholdet mellom fiber og matrise øker og n r volumandelen med fiber i kompositten øker. I praksis er det imidlertid ikke fullt så enkelt. Bli'r volumandelen fiber over 80 % vil egenskapene til kompositten sannsynligvis bli dårligere da det i slike tilfeller er meget vanskelig   fukte fibrene tilstrekkelig.

De gode spesifikke styrke- og stivhetsegenskapene som glassfiberarmerte kompositter oppnår er et resultat av den høye styrken til glassfibrene samt egenskapen komposittmaterialet har til   nyttegjøre seg av denne styrken da  $E_f/E_m$  er omtrent 20. Selv ved 10 % volumandel glass vil fibrene ta opp 70 % av den totale lasten.



Figur 8: Last tatt opp av fibre (i % av den totale lasten på kompositten) som funksjon av fiberandelen for forskjellige stivhetsforhold mellom fiber og matrise. For ensrettet karbon ligger  $E_f/E_m$  rundt 100, mens det for ensrettet glass ligger rundt 20. [6]

Andelen fiber som oppnås i produktene avhenger av produksjonsprosess. De mest aktuelle produksjonsprosessene for komponenter til fiskebåter er håndopplegg, sprøyting (spray-up) og vakuuminjisering.

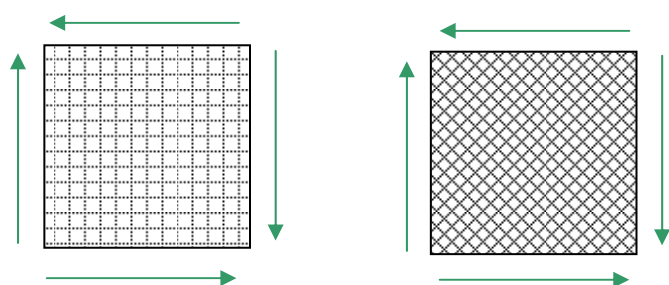
For noen komponenter kan også RTM (Resin Transfer Moulding) og pultrudering være aktuelt. Typiske volumandeler fiber for håndopplegg er opp til 40 %, for RTM opp til 65 % og for vakuuminjeksjon og pultrudering opp til 60 %.

Egenskaper for en del laminaer fremstilt ved håndopplegg og vakuuminjeksjon er gitt i tabell 4. Laminaene er av typen balansert 0/90. Man ser tydelig at stivheten  $E$  er mye lavere enn hos stål og aluminium, men materialet er samtidig lettere. Hadde flere fiber vært orientert i kraftretningen ville stivheten økt betraktelig. I skjær er egenskapene dårlige, men det skyldes igjen fiberorienteringen. Er skjærkrefter i planet en viktig påkjenning ville fibre vært orientert i  $\pm 45$  grader med det resultat at skjærstivheten og styrken ville vært mye høyere (figur 9).

Tabell 4: Materialegenskaper for en del balanserte 0/90 glassfiberlaminater. Volumandel fiber er rundt 60 %. Tilsvarende egenskaper for stål og aluminium er tatt med for sammenligning.

Materiale Fiber/matrise	Tetthet (g/cm <sup>3</sup> )	E (GPa)	G <sub>LT</sub> (GPa)	σ <sub>U</sub> (MPa)	σ' <sub>U</sub> (MPa)	τ <sub>LTU</sub> (MPa)
Glass/epoksy	2.1	26	5	520	400	65
Glass/vinylester	2.1	26	5	550	400	65
Glass/polyester	2.1	26	5	460	480	65
<b>Bulkmaterialer</b>						
Stål	7.80	210	80	320-490		
Aluminium	2.70	70	27	140-260		

E – E-modul i strekk i laminatplanet, G<sub>LT</sub> – Skjærmodul, σ<sub>U</sub> – bruddspenning i strekk, σ'<sub>U</sub> – bruddspenning i kompresjon, τ<sub>LTU</sub> – bruddspenning i skjær (i-planet skjær). Resultatene i tabell 4 er hentet fra testing av 0/90 glassfiberlaminater ved SINTEF Materialteknologi [9].



Figur 9: Liten skjærstivhet når fibrene har en 0/90 orientering, stor skjærstivhet når fibrene har en ±45 orientering og belastningen er ren skjærpåkjenning.

Tabell 5: Materialdata for ensrettede laminater ( ' = kompresjon) og bulkmaterialer.[1]

Materiale Fiber/matrise	Vol.andel fiber	Tetthet (g/cm <sup>3</sup> )	E <sub>L</sub> (GPa)	E <sub>T</sub> (GPa)	σ <sub>LU</sub> (MPa)	σ' <sub>LU</sub> (MPa)	σ <sub>TU</sub> (MPa)	σ' <sub>TU</sub> (MPa)
Glass/epoksy	0.45	1.80	38	8.3	1060	610	31	118
Karbon/epoksy	0.66	1.60	138	8.9	1450	1450	51	206
Aramid/epoksy	0.60	1.46	76	5.5	1400	235	12	53
<b>Bulkmaterialer</b>								
Stål		7.80	210		320-490			
Aluminium		2.70	70		140-260			

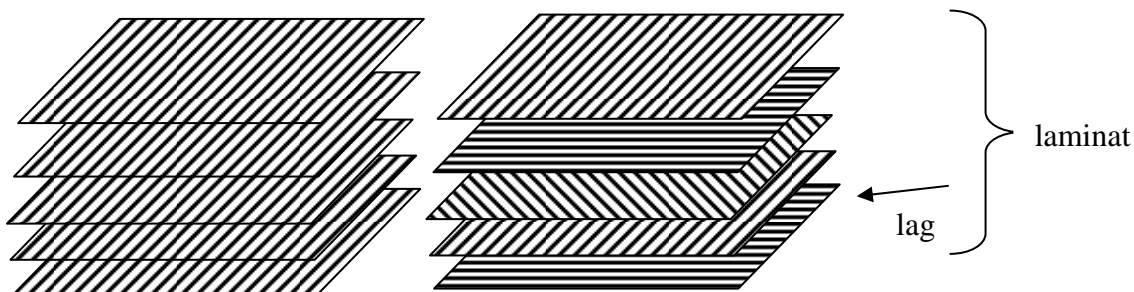
E<sub>L</sub> – E-modul i fiberretning, E<sub>T</sub> – E-modul på tvers av fiberretningen, σ<sub>LU</sub> – bruddspenning i strekk i fiberretningen, σ'<sub>LU</sub> – bruddspenning i kompresjon i fiberretningen, σ<sub>TU</sub> – bruddspenning i strekk på tvers av fiberretningen, σ'<sub>TU</sub> – bruddspenning i kompresjon på tvers av fiberretningen.

I tabell 5 vises data for tre forskjellige ensrettede laminater som er bygget opp ved hjelp av epoksy matrise. Man ser tydelig at stivheten (E<sub>L</sub>) i lengderetning er meget varierende fra fibertype til fibertype, mens stivheten på tvers (E<sub>T</sub>) ikke varierer noe særlig. Det skyldes at stivheten i

tverretning domineres av matrisen og at fibrene virker mer som et fyllstoff. Det er videre verdt å merke seg at både glass- og aramidlaminatene har dårligere egenskaper i kompresjon enn i strekk og spesielt gjelder dette laminatene med aramidfiber. Karbonlaminatet er derimot like sterkt i begge “disipliner”. I tverretning er det omvent., laminatene tåler mye mer i kompresjon enn strekk. I tillegg til dette vises data for stål og aluminium. Det gjøres oppmerksom på at egenskapene til slike laminater forsterket med ensrettede fibere vil variere avhengig fiberkvaliteten. Dette gjelder spesielt ensrettede laminater med karbonfiber.

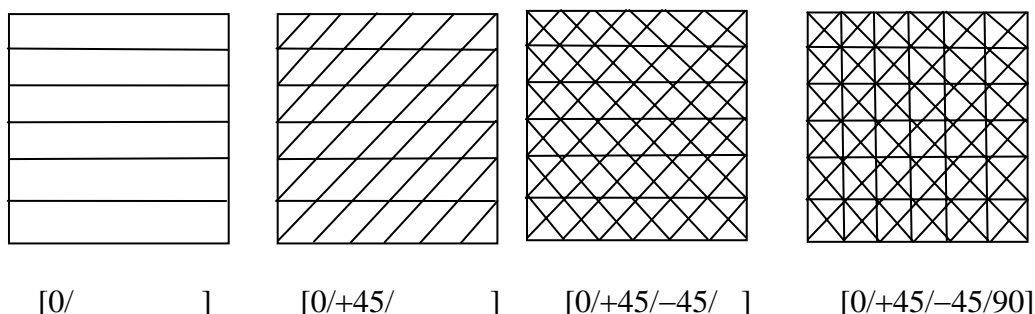
## 2.4 Stivhet, fiberorientering og notasjon

Fiberkompositter kan deles inn i to hovedklasser, ett-lags (single layer) og multi-lags (multi layer). Ett-lags kompositter har samtlige fibere orientert i en retning mens multi-lags kompositter vanligvis har fibrene orientert i flere vilkårlige retninger. Dette er illustrert i figur 10.



Figur 10: Fiberkompositter. Fra venstre: Ett-lags (single layer) og Multi-lags (multi layer). Et laminat er som figuren viser bygget opp av flere lag (her 5).

Når flere lag med fiber legges sammen og fibrene er orientert i forskjellige retninger er det praktisk å ha en notasjon som forteller om dette. I et ferdig laminat er det nemlig så å si umulig å se hvilke retninger fibrene ligger. I figur 11 vises et enkelt eksempel. Det første laget inneholder fiber i 0-retningen, så legges et i +45, et i -45 og til slutt et i 90-retningen.

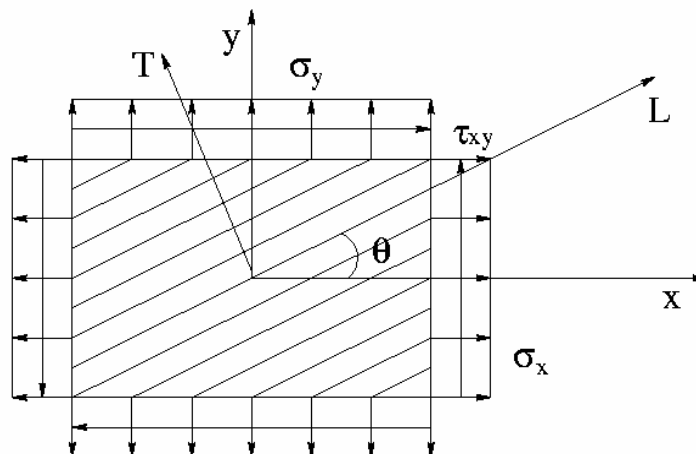


Figur 11: Eksempel på notasjon for 4 lags komposittlaminat.

Det er i de aller fleste sammenhenger vanligst å bruke kompositter av multi-lags typen. Det er vanligvis bare i spesielle lastbærende konstruksjoner man vil orientere samtlige fibere i kun en retning. Gjør man det, er det meget viktig at fibrene er orientert nøyaktig i den retningen kreftene

virker da egenskapene til ensrettede kompositter mht. styrke og stivhet avtar raskt hvis man beveger seg litt vekk fra fiberretningen (Se tabell 5).

Konsekvensene av at fiberretningen ikke legges parallelt med belastningen er ikke helt trivielle. Teorien som følger vil gjøre et forsøk på å tilnærme seg denne problematikken på en enkel og lettfattelig måte.

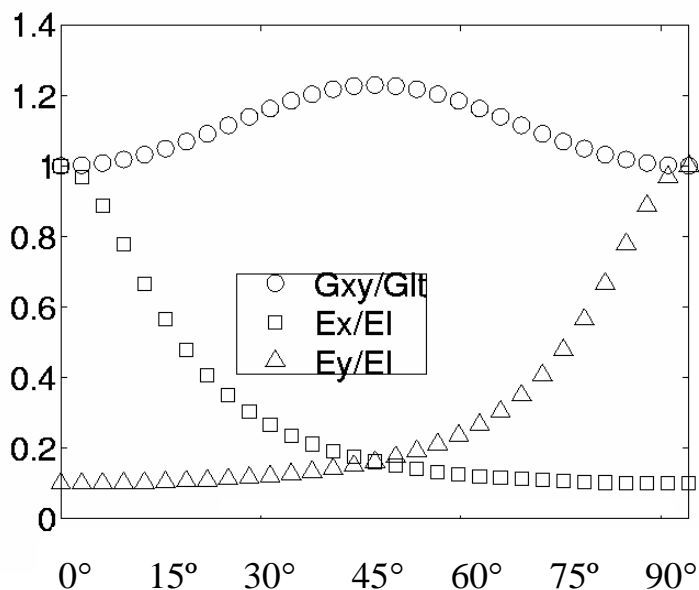


Figur 12: Fibrene som ligger i L retningen er rotert en vinkel  $\theta$  i forhold til x-aksen. LT-koordinatsystemet er dermed også rotert vinkelen  $\theta$  i forhold til xy-koordinatsystemet. [6]

I figur 12 vises en kompositt der fibrene er orientert i L-retningen. Aksene L og T danner et ortogonalt (vinkelrett) koordinatsystem. Dette systemet er rotert en vinkel  $\theta$  i forhold til xy-systemet. Alle de ytre lastene er orientert i henhold til dette xy-systemet. Lastene er representert ved:  $\sigma_x$  (normalspenning x-retning),  $\sigma_y$  (normalspenning y-retning) og  $\tau_{xy}$  (skjærspenning i xy-planet). Det er mulig å beregne hvordan komposittens stivhet i x og y retningene påvirkes av at fibrene roteres på denne måten. Uttrykkene for  $E_x$  (stivhet i x-retning),  $E_y$  (stivhet i y-retning) og  $G_{xy}$  (skjærstivhet i xy-planet) blir meget kompliserte funksjoner av vinkelen  $\theta$ . I figur 13, som viser et eksempel, ser man tydelig at  $E_x$  faller raskt når vinkelen øker og er nede i 30 % av sin opprinnelige verdi når fibrene er vridd 30 grader.  $E_y$  på sin side har nesten ikke økt. Skjærstivheten  $G_{xy}$  øker imidlertid svakt mot sitt maksimum som den har ved 45 grader fiberretning. Skjærstivheten er da oppe i omtrent 120 % av sin opprinnelige verdi. Ved en slik vridningsvinkel er imidlertid stivheten  $E_x$  og  $E_y$  kun 20 % av maksimalverdiene.

Er laminatet bygget opp som et multilaglaminat med fiber i 0, 90, 60 og 45 retninger, slik mange laminaer i praksis er bygget opp, vil ikke laminatet være på langt nær så følsomt for vinkelavvik som ensrettede laminaer. Man ser tydelig fra figuren at fiber som er orientert i vinkler mellom 25 og 65 grader ikke er særlig følsomme ovenfor noen graders vinkelavvik fra eller til.

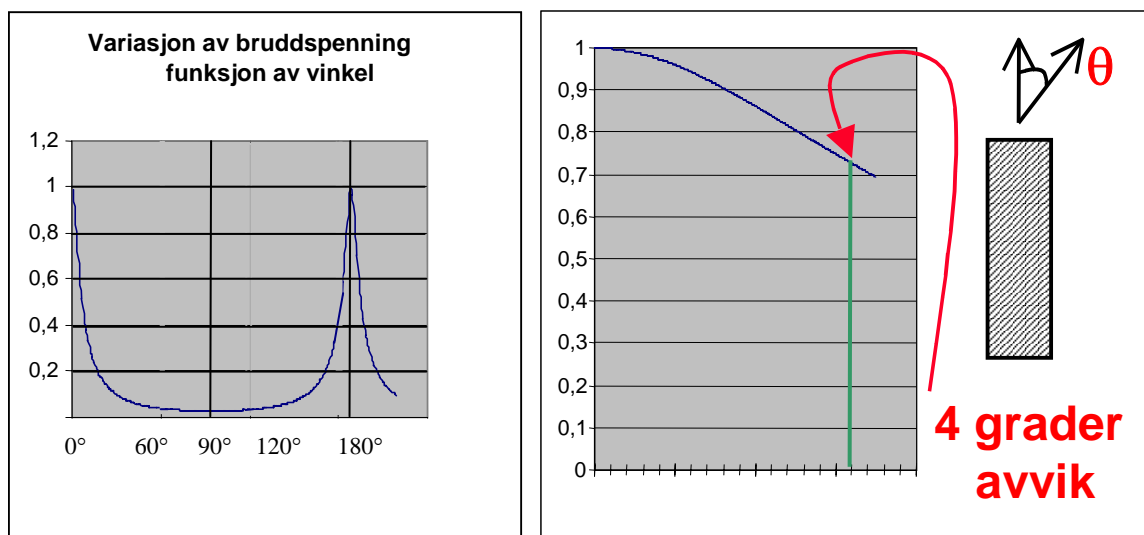




Figur 13: Stivhetsmodulene  $E_x$ ,  $E_y$  og  $G_{xy}$  som funksjoner av vinkelen  $\theta$  (gitt i radianer [ $45^\circ = 0.785$  rad]). ( Plottet er vist for:  $E_L=1000$ ,  $E_T=100$ ,  $G_{LT}=70$  og  $\nu_{LT}=0.31$  som er typiske materialdata for karbon/epoksy med 50 % volumandel fiber). [6,1]

## 2.5 Styrke

Generelt er komposittmaterialenes styrkeegenskaper mer komplisert enn stivhetsegenskapene, særlig hvis man roterer fibrevekk fra lastretningene. Trendene er imidlertid de samme, styrken faller raskt når lastretningen ikke sammenfaller med fiberretningen.



Figur 14: Beregnet bruddstyrke som funksjon av vinkel mellom fiber og last for et ensrettet glass/epoksy laminat [9]

I figur 14 vises det at et ensrettet glass/epoksy laminat mister 30 % av styrken sin hvis fibrevekk bare er rotert  $4^\circ$  i forhold til belastningen. Økes vinkelen til  $15^\circ$  har styrken falt omtrent 80 %. Dette illustrerer viktigheten av at fiberorientering er i samsvar med belastningen spesielt ved bruk

av ensrettede kompositter. Dette gir også en teoretisk forklaring på de store styrkeforskjellene mellom lengde- og tverretning som man ser i tabell 5.

Det er i midlertidig verd å merke seg at de fleste laminater er bygget opp med fiber i 0, 90, 60 og 45 retninger. Slike laminater er langt mindre følsomme for fiberorientering og vil uansett besitte bedre styrkeegenskaper enn f.eks. aluminium.

## 2.6 Sandwich

Sandwichkonstruksjoner gjør det mulig å utnytte hver materialkomponent optimalt. De mest åpenbare fordelene ved sandwichmaterialer er svært høyt forhold mellom bøyestivhet og vekt. Komposittlaminater har sammenlignbar eller høyere styrke enn metaller som stål og aluminium, men de har lavere stivhetsmodul selv om dette forholdet bedres noe hvis man betrakter stivhet kontra vekt. Den lavere stivheten kan imidlertid lett kompenseres ved å benytte komposittmaterialene i en sandwichkonstruksjon.

Ytterhudene vil virke sammen for å oppta og motvirke ytre bøyepåkjenninger (momenter). Kjernens viktigste oppgave er å overføre skjærbelastninger og å stabilisere ytterhudene mot bukling, vridning og skrukking. Det er følgelig av største viktighet at heften mellom kjernen og ytterhudene er sterk nok til å motstå skjær- og strekkspenningene som oppstår mellom kjernen og ytterhudene.

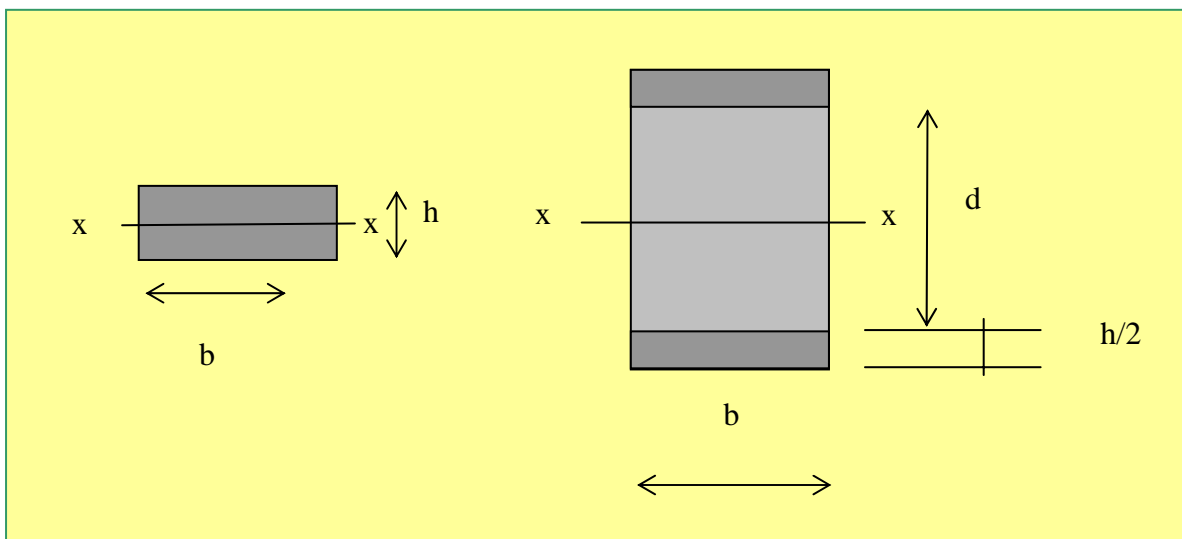
Viktige faktorer ved anvendelse av sandwichmaterialer er høy styrke og stivhet, lav vekt, integrert termisk og akustisk isolasjon og høy skaderesistens. Sandwichmaterialer med komposittlaminater er dessuten ikke-magnetiske materialer.

En viktig faktor for å bruke fiberkompositter i ytterhudene er at fremstillingen er vesentlig lettere/enklere enn fremstillingen av sandwich med metall ytterhuder. Dette gjelder spesielt for fremstilling av dobbeltkrumme paneler, hvor sandwich med metallhuder er meget komplisert å fremstille.

Eksempler på anvendelser av komposittbaserte sandwichkonstruksjoner er bl.a. lastebil-/trailerskap, containere for frakt av kjølevarer, transport (bil, tog), fritidsbåter, marinefartøyer, fiskebåter, vindmøllevinger og vindmøllehus, overbygninger og frontpartier i store ferger, undervanns beskyttelsesstrukturer for anvendelse offshore, bekledningsplater for hus og spesialrom, himlingsplater, etc.

Hvis man ønsker å si noe om en bjelkes bøyestivhet må man kjenne bjelkens treghetsmoment. En flates treghetsmoment om en akse er lik arealet multiplisert med kvadratet av avstanden til aksene. Er treghetsmomentet stort vil bjelken yte stor motstand mot bøyning, er det derimot lite vil motstanden bli liten. For en bjelke med rektangulært tverrsnitt med en bredde  $b$  og høyde  $h$  vil treghetsmomentet for bøyning om  $x$ - $x$  aksene (venstre i figur 15) bli:

$$\text{Treghetsmoment: } I_1 = bh^3/12$$



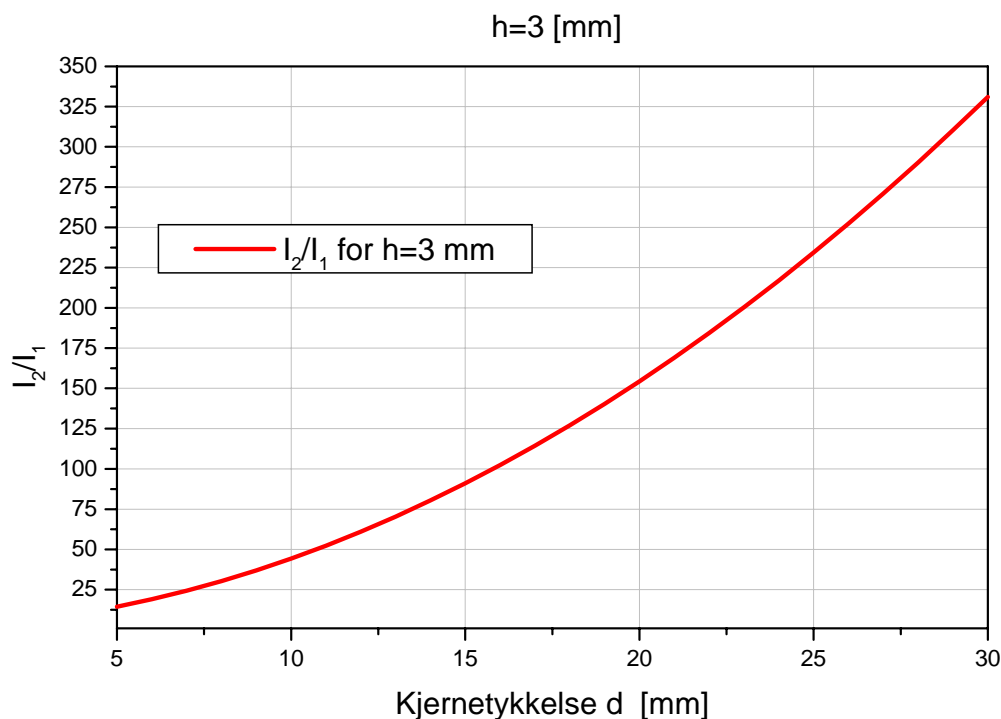
Figur 15: Venstre: Bjelke med bredde  $b$  og høyde  $h$  bøyer om akse  $x$ - $x$ . Høyre: Bjelke med bredde  $b$ , kjernetykkelse  $d$  og hud med tykkelse  $h/2$  bøyer om akse  $x$ - $x$

Hvis man derimot tenker seg en bjelke bygget opp som en sandwich vil man få et helt annet uttrykk for treghetsmomentet og dermed helt andre egenskaper i bøyesammenheng. Siden treghetsmomentet varierer med kvadratet av avstanden fra  $x$ - $x$  akse er det viktig å ha det "effektive" materialet så langt som mulig unna  $x$ - $x$  akse (høyre i figur 15). For en sandwichbjelke kan man neglisjere kjernens bidrag til treghetsmomentet. Meget forenklet kan man si at kjernens primæroppgave er å "holde" huden vekk fra  $x$ - $x$  akse. Treghetsmomentet for et slikt tverrsnitt blir:

$$I_2 = 2b(h/2)^3/12 + 2bh/2(d/2+h/4)^2 = bh^3/48 + bh(d^2/4 + dh/4 + h^2/16) = bh^3/12(1 + 3d/h + 3d^2/h^2)$$

Forholdet mellom treghetsmomentene  $I_1$  og  $I_2$  er meget interessant da det sier noe om hvor bøystiv en sandwich er i forhold til et massivt tverrsnitt når samme oppbygging og tykkelse av komposittmateriale benyttes:

$$I_2/I_1 = (1 + 3d/h + 3d^2/h^2)$$



Figur 16: Bøyestivheten til sandwich i forhold til bøyestivheten for massivt tverrsnitt når samme oppbygging og tykkelse av komposittlaminatene benyttes.

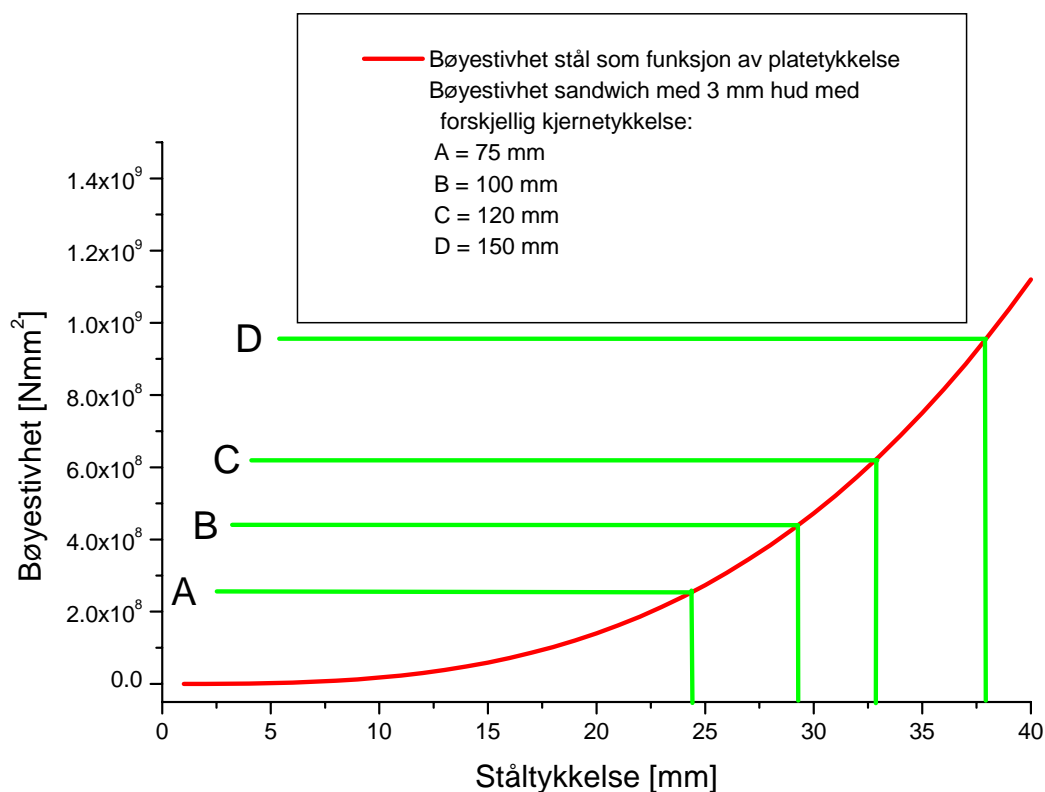
Figur 16 viser uttrykket grafisk for en samlet laminatthikkelse  $h = 3$  mm, hvor kjernetykkelsen  $d$  øker fra 5 mm til 30 mm. Kurven viser dermed at en sandwichbjelke med hud på 1,5 mm ( $h/2$ ) og en kerne på 30 mm har en bøyestivhet (treghetsmoment) som er 331 ganger høyere enn en massiv bjelke med tykkelse på 3 mm ( $h$ ).

Bøyestivheten til en sandwich eller en stålplate er gitt av platens treghetsmoment ganget opp med materialets elastisitetsmodul. Stål har en modul på 210000 MPa og når denne ganges opp med  $I_1$  og plottes for variabel tykkelse og med bredden  $b$  lik 1 så får man den røde grafen i figur 17. Tilsvarende hvis glassfiberkompositens elastisitetsmodul på 27000 MPa og hudtykkelse på 1,5 mm ganges med  $I_2$  og plottes for variabel kjernetykkelse så ser man i figur 17 at en sandwich med 100 mm kerne og 3 mm hud (2 x 1,5mm) har samme bøyestivhet som en stålplate på omtrent 29 mm. Dette viser tydelig hvor bøyestive sandwich geometrier er i forhold til konvensjonelle massive tverrsnitt.

Vekt pr  $m^2$  for 29 mm stålplate: 226,2kg

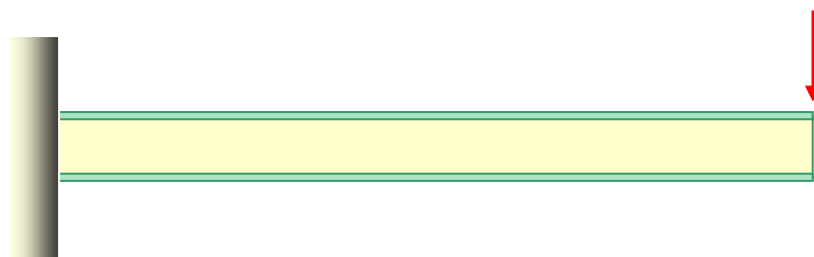
Vekt pr  $m^2$  for sandwichplate med samme bøyestivhet: 13,4 kg  
(hud: 2 x 1,5 mm, kjernetykkelse 100mm, kjernetetthet: 80  $kg/m^3$ )

Stålplaten blir ca. 14 ganger tyngre enn sandwichplaten når bøyestivheten er den samme.



Figur 17: Sandwich med 3 mm hud og variabel kjernetykkelse sammenlignes med stålplate. F.eks.: Med 3 mm hud og 75 mm kerne har man samme bøyesivhet som en 24 mm tykk stålplate.

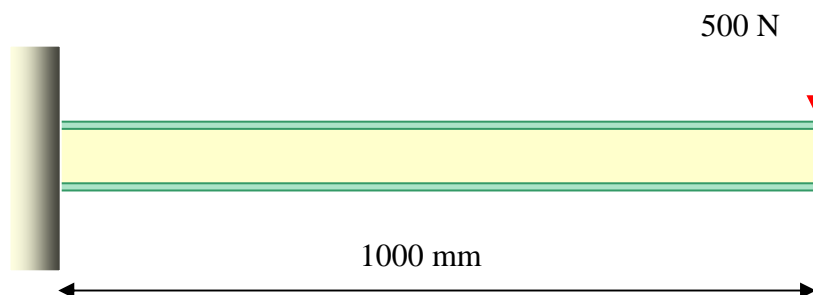
For å illustrere hvor effektivt man kan spare vekt ved å benytte sandwichmaterialer skal vi ta et eksempel.



Figur 18: Innspent bjelke med endelast

Eksempel 1 (figur 18): Innspent bjelke der man tillater samme nedbøyning. Tar utgangspunkt i en sandwich med 30 mm kerne og 1.5 mm 0/90 glass/polyester hud og finner:

- 1 Massivt 0/90glass/polyester laminat: Ekvivalent stivhet gir  $h = 20.75$  mm og 7 ganger så høy vekt som for sandwich
- 2 Massiv stål: Ekvivalent stivhet gir  $h = 10.44$  mm og over 12 ganger så høy vekt som for sandwich
- 3 Massiv aluminium: Ekvivalent stivhet gir  $h = 15.07$  mm og 7 ganger så høy vekt som for sandwich

Eksempel 2:


Figur 19: Innspent bjelke med lengde 1000mm og påsatt en endelast på 500N

Kompositter og særlig sandwich sin meget høye spesifikke styrke illustreres ved eksempel 2. Gitt en utkragerbjelke som er en meter lang. På enden virker en punktkraft på 500 N.(figur 19) Man ønsker å dimensjonere med utkragerens styrke som kriterium.

- 1 Sandwich med en hud bygget opp av 0/90 glassfiber og en bruddstyrke på 520 MPa. Kjernetykkelsen er gitt ved  $d$  mens tykkelsen på huden er gitt ved  $h/2$ . Hudtykkelsen settes til 1.5 mm, bredden av bjelken til 50 mm. Kjernen antas å ha en tetthet på  $100 \text{ kg/m}^3$  mens huden har en tetthet på  $1.97 \text{ g/cm}^3$ . Følgende uttrykk gir da minimum kjernetykkelse  $d$ :

$$\sigma_{\max} = My/I = PL(h/2 + d/2)/(bh^3/12(1 + 3d/h + 3d^2/h^2)) \Rightarrow d = 12.6 \text{ mm}$$

Vekten av sandwichbjelken blir:  $W_s = 0.36 \text{ kg}$

Relativ nedbøyning: nedbøyning sandwich vs. nedbøyning stål: 9.8

- 2 Konstruksjonsstål antas å ha en styrke på 350 MPa. Bredden av bjelken er 50 mm, tettheten er  $7.8 \text{ g/cm}^3$ . Følgende uttrykk gir da minimum tykkelse  $h$ :

$$\sigma_{\max} = My/I = PL(h/2)/(bh^3/12) \Rightarrow h = 13.1 \text{ mm}$$

Vekten av stålbjelken blir:  $W_s = 5.11 \text{ kg}$

Relativ nedbøyning: nedbøyning stål vs. nedbøyning stål: 1.0

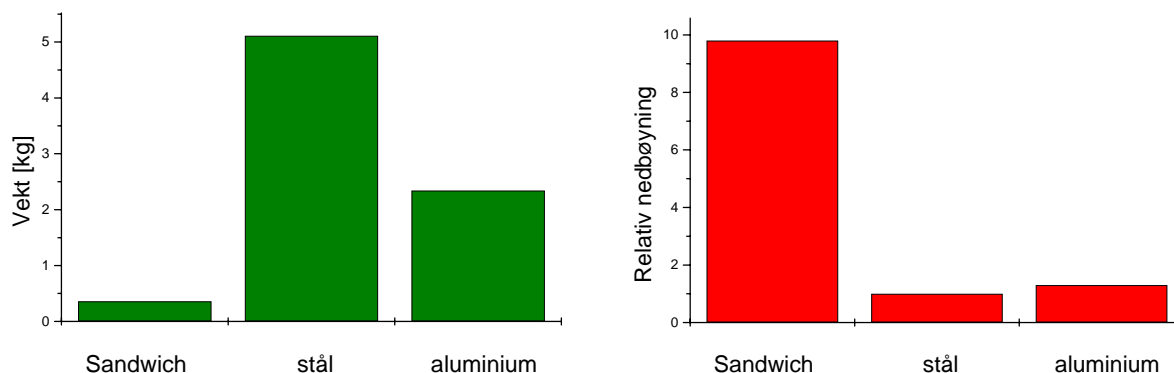
- 3 Aluminium har en styrke på rundt 200 MPa. Bredden av bjelken er 50 mm, tettheten er  $2.7 \text{ g/cm}^3$ . Følgende uttrykk gir da minimum tykkelse  $h$ :

$$\sigma_{\max} = My/I = PL(h/2)/(bh^3/12) \Rightarrow h = 17.3 \text{ mm}$$

Vekten av aluminiumsbjelken blir:  $W_s = 2.34 \text{ kg}$

Relativ nedbøyning: nedbøyning aluminium vs. nedbøyning stål: 1.30

Det er videre helt tydelig at styrken man oppnår ved hjelp av sandwich er helt overlegen den man oppnår med konvensjonelle materialer som stål og aluminium hvis vekt er en kritisk faktor. Det er imidlertid slik at glassfiberlaminater og da også sandwich laget med hud av glassfiber er sterkere enn det er stivt. Det betyr at man får en mye mykere, mer fleksibel konstruksjon enn om man konstruerer med stål eller aluminium. Konstruksjonen blir imidlertid like sterk. Resultatene er vist grafisk i figur 20.



Figur 20: Når man dimensjonerer etter styrke får man en enormt lett og fleksibel konstruksjon med sandwich i forhold til stål og aluminium.

Eksemplene 1 og 2 viser at vektbesparelsen ved å bruke sandwich sammenlignet med massivt stål og aluminium blir omtrent den samme enten man dimensjonerer etter stivhet eller styrke.

## 2.7 Langtids mekaniske egenskaper

### 2.7.1 Utmattingsegenskaper

Utmattingsegenskapene hos et materiale er materialets respons på syklisk last. Utmattingsstyrken er lavere enn den statiske styrken da sykliske laster over tid vil gjøre konstruksjonen "trett". Tiden som går før man får utmattingsbrudd er avhengig av en rekke faktorer som spenningsnivå, lastmåte (kompresjon eller strekk), lasthistorie og miljø.

Det er en rekke forskjeller mellom fiberarmerte komposittmaterialer og metaller når det gjelder hvordan de oppfører seg ved utmattingsbelastninger. I metallene foregår en prosess med gradvis og ikke observerbar skadeutvikling som omfatter nesten hele utmattingslevetiden. Ingen vesentlig reduksjon i stivhet observeres under utmattingsprosessen. Det siste trinnet i utmattingsprosessen starter med dannelse av små sprekker som er den eneste formen for makroskopisk observerbar skade. Gradvis vekst og sammensmelting av disse sprekkenes produserer raskt en stor sprekke og dermed endelig brudd i den strukturelle komponenten. Da stivheten til metallene er tilnærmet upåvirket vil den lineære relasjonen mellom spenning og tøyning være gyldig og utmattingsprosessen kan simuleres ved lineær elastisk analyse og lineær bruddmekanikk.

Komposittmaterialer er inhomogene og anisotrope og har en mer komplisert oppførsel ved sykliske belastninger enn homogene og isotrope materialer som metallene. Hovedårsaken er de mange forskjellige skademekanismene som opptrer, slik som matriseprekking, fiberbrudd, fiber/matrise sprekker, fiberbukling og delaminering. Disse vil innvirke på hverandre og ha forskjellig veksthastighet. I fiberarmerte komposittmaterialer vil skadeutvikling starte forholdsvis tidlig i utmattingsprosessen og omfanget av skader vil vokse gradvis og skademekanismene vil endre seg. Den gradvise svekkelsen av fiberkompositter med tap av stivhet i de skadede områdene vil lede til en kontinuerlig omfordeling av spenninger og reduksjon av spenningskonsentrasjoner i strukturelle komponenter som utsettes for utmattingsbelastninger. Som et resultat av dette vil ikke komposittmaterialer feile i utmatting på grunn av utvikling av en stor makroskopisk sprekke, men på grunn av en serie av uavhengige skademekanismer.

Sprø og elastiske materialer som glass, karbon og bor forventes ikke å vise den karakteristiske reduksjon i lastbærende kapasitet ved sykliske belastninger som er typisk for oppførselen til materialer som deformeres plastisk. Komposittmaterialer basert på slike armeringsfibere vil derfor være svært resistente mot utmatting så lenge fibrene bærer hoveddelen av lasten. For kompositter med ensrettet karbonfiberarmering har dette vist seg å holde stikk. S/N-kurvene (som viser hvordan bruddspenningen avtar når antall belastningssyklus øker) er svært flate. Sammenlignet med metallene hevdes avanserte fiberkompositter å være overlegne i utmatting. Det skyldes materialenes høye utmattingsgrense og korrosjonsresistens.

På den andre siden er glass mye mindre stivt enn karbon og bor. Ved belastninger som gir god utnyttelse av fiberstyrken, vil tøyningene være så høye at epoksy og polyestertriserne enten vil være utsatt for mikrosprekker eller så høye sykliske spenninger at de kan utsettes for utmattingsbrudd. I begge tilfeller vil skader i matrisematerialene etterfølges av sprekkdannelse mellom fiber og matrise og komposittmaterialet feiler ved oppsplitting og nedbrytning av matrisen. Komposittmaterialer basert på glassfiberarmering for marine anvendelser dimensjoneres vanligvis med så store sikkerhetsfaktorer at utmattingsbelastninger sjelden representerer noe problem.

Utmattingsegenskaper presenteres ofte i såkalte S/N-kurver. Kurvene viser hvilken bruddspenning man får etter så og så mange sykler. Bruddspenningen synker når antall belastningssyklus øker. Etter en viss tid vil kurvene flate ut og bruddspenningsnivået holder seg forholdsvis konstant uavhengig av antall sykler. Den horisontale akse i slike S/N-kurver er logaritmisk, det vil si at det er like stor avstand mellom 10 000 og 100 000 sykler som mellom 100 000 og 1 000 000 sykler.

Utmattingsegenskapene til plastkompositter er avhengig av armering og matrisematerialer, mengdeforhold mellom fiber og matrise, fiber orientering, laminat lay-up, og belastningstype. Når man har så mange variasjonsmuligheter er det selvsagt at man har tildeles store forskjeller i langtids utmattingsegenskaper hos plastkompositter. Hildebrand [2] har samlet mye data om utmattingsstyrken for forskjellige fiberarmerte plastmaterialer. Noen hovedkonklusjoner fra dette arbeidet er tatt med nedenfor.

- Utmattingsstyrken for CSM-polyester laminater etter  $10^7$  sykler lå mellom 25 og 45 % av statisk bruddstyrke i strekk. Volumandel fiber var 20-30 %. (CSM – Chopped Strand Mat)
- Utmattingsstyrken til 0/90 glassfiber / polyesterlaminater ved  $10^7$  sykler lå på 20-25% av statisk bruddstyrke i strekk. Volumandel fiber i disse laminatene var 35-50 vol %.
- Utmattingsstyrken til ensrettede glassfiber / polyesterlaminater ved  $10^7$  sykler var ca. 40 % av statisk bruddstyrke i strekk. Volumandel fiber var 50-60 %.
- Utmattingsstyrken til 0/90 glassfiber / epoksy laminater ved  $10^7$  sykler var mellom 20 og 40 % av statisk bruddstyrke i strekk. Volumandel fiber var 50-60 %.
- Utmattingsstyrken til ensrettede glassfiber / epoksy laminater ved  $10^7$  sykler var mellom 35 og 50 % av statisk bruddstyrke i strekk. Volumandel fiber var fra 20-50 %
- Utmattingsstyrken til 0/90 karbonfiber / epoksy laminater ved  $10^7$  sykler var mellom 65 og 75 % av statisk bruddstyrke i strekk. Volumandel fiber var 55-60 %.
- Utmattingsstyrken til ensrettede karbonfiber / epoksy laminater ved  $10^7$  sykler var mellom 50 og 80 % av statisk bruddstyrke i strekk. Volumandel fiber var 60 %.

For laminatene med 0/90 og ensrettet armering av glassfiber viste resultatene at den relative utmattingsstyrken i forhold til statisk bruddstyrke i strekk økte når volumandel fiber avtok. Resultatene av denne undersøkelsen viser at ved riktig materialvalg og god kvalitet på laminatene kan det oppnås en utmattingsstyrke ved  $10^7$  sykler som ligger fra 40-50 % av statisk bruddstyrke i



strekk for glassfiberarmerte materialer og mellom 60 og 80 % for laminaer med karbonfiberarmering.

### **2.7.2 Sigeegenskaper**

Siging kan defineres som den deformasjonen som oppstår i en komponent når den utsettes for en statisk belastning over lang tid. De fleste konstruksjonsmaterialer er utsatt for siging som kan være viktig i spesielle anvendelser. Siging er viktig i metaller ved høye temperaturer og i uarmerte plastmaterialer ved omgivelsestemperaturer. Siden glass- og karbonfiber har en tilnærmet ideell elastisk oppførsel til brudd, vil herdeplaster med slike armeringsfibre ha høy motstand mot siging. Normalt vil sigeproblematikk bare være viktig ved høye belastninger eller ved høye temperaturer.

Det er to hovedfaktorer som bidrar til sigeegenskapene til fiberarmerte plaster. Det er de viskoelastiske egenskapene til herdeplastmatrisen og den tidsavhengige utviklingen av mikroskader i komposittmaterialet når det utsettes for belastninger (mikrosprekker i matrisen og sprekkutvikling i grenseflaten mellom fiber og matrise) som til slutt kan føre til fiberbrudd. Den første mekanismen vil være dominerende ved høye temperaturer, mens den siste vil dominere ved normale driftsbetingelser.

Tilgjengelige data om siging i komposittmaterialer indikerer at ved belastninger lavere enn 20 % av kort tids bruddstyrke vil ikke siging være noe problem [15]. Det betyr at med de sikkerhetsfaktorer som normalt benyttes ved dimensjonering av kompositter vil ikke siging representere noe problem.

### **2.7.3 Innflytelse av ytre miljø (vær, vann, kjemikalier)**

For marine anvendelser og bruk i fiskefartøy er det innvirkning fra vær og vann/sjøvann på komposittmaterialenes egenskaper som er mest aktuelt. Det er viktig å ha en forståelse av hvordan materialenes egenskaper endrer seg når de blir utsatt for forskjellige miljøeffekter som UV-lys, høy fuktighet, temperaturvariasjoner og sjøvann. Mens materialenes mekaniske egenskaper hovedsakelig bestemmes av armeringsfibrene, er evnen til å motstå ytre miljøpåvirkninger mer bestemt av matrisematerialet og kvaliteten av heften mellom fiber og matrise.

#### Værbestandighet

Komposittmaterialer for utendørs bruk som utsettes for påvirkning fra vær og vind produseres normalt med et resinrikt overflatesjikt som vanligvis er lett forsterket med en tynn overflatematte. Dette overflatesjiktet beskytter det underliggende laminatet ved å hindre påvirkning fra UV-stråler og minimalisere vanninntrengning. Kontrollerte tester og brukserfaring fra marint miljø har vist at komposittmaterialer har gode utendørsegenskaper i tøffe klimatiske omgivelser. Effekt av værpåvirkning er hovedsakelig estetisk i form av svak misfarging (gulning) og ved at overflaten blir mattere og mer ru. Slike overflateendringer kan forårsakes av sollys, temperaturendringer, regn og normal slitasje.

Akselererte tester i såkalte Weather-o-metere har vist at dybden av denne overflateerosjonen ligger i området 20-50µm etter en eksponeringstid på 50 år i temperert klima. Resultater fra undersøkelser har indikert at levetider på mer enn 50 år er realistisk for produkter av god kvalitet når de utsettes hovedsakelig for værbelastninger. Resultater for kompositter med glassfiberarmering indikerer at de beholder 90-100 % av opprinnelig stivhet og styrke i arktisk klima, 80-100 % i temperert klima og 70-90 % i tropisk klima over en tidsperiode på 10-20 år. [15]. Moderate statiske langtidsbelastninger på 10-15% av opprinnelig strekkstyrke synes ikke å ha noen signifikant innflytelse på materialenes værresistens. Høyere belastninger kan redusere

værresistensen på grunn av spenningskorrosjon og sprekkdannelser i overflatesjiktet som kan føre til et øket vannopptak.

#### Vannabsorpsjon

Vanninntrenging i komposittmaterialer bestemmes hovedsakelig av to mekanismer. Den ene er diffusjon og den andre ved kapillareffekter. Mens diffusjon bare skjer i resinnet, oppstår kapillarinntrengning i forbindelse med porer og mikrosprekker og langs grenseflaten mellom fiber og matrise. Vannabsorpsjonen er størst i starten og avtar deretter mot en likevektssituasjon. Den inntreter etter typisk 0,5-1,5 år, avhengig av laminatrykkelse, kvalitet på laminatene, temperatur og vannkvalitet. Diffusjonshastigheten øker med økende temperatur og er tilnærmet uavhengig av det hydrostatiske trykket.

Vannabsorpsjon fører normalt til en svak svelling og mykgjøring av matrisematerialet som fører til en generell reduksjon av styrke og stivhet. Heften mellom fiber og matrise kan også svekkes ved at kompresjonskrefter fra herdeprosessen blir svakere. Osmotiske effekter kan også oppstå i laminatet på grunn av vannløselige komponenter i materialet. Dette kan føre til blæredannelser i overflaten og lokal delaminering i laminatet. Reduksjon i styrke og stivhet på grunn av vannabsorpsjon skyldes hovedsakelig fysikalske prosesser og er reversible slik at materialene gjenvinner sin styrke når de tørker opp.

Undersøkelser har vist at komposittmaterialer opprettholder 50-90% av sin opprinnelige styrke og stivhet etter 5-10års neddykking i vann [15]. Hvor mye egenskapene reduseres avhenger av en rekke parametere som type matrisematerial, laminatoppbygging og tykkelse, laminatkvalitet, herdebetingelser og heft mellom fiber og matrise. Matrisematerialer med god kjemikalieresistens opprettholder en større andel av sine egenskaper ved lang tids eksponering i vann. Generelt er vinylester bedre enn iso- og bisfenolpolyestere som igjen er bedre enn vanlig ortopolyester.

Laminater av god kvalitet og med riktig valg av matrisematerial vil fortsatt besitte 80-90% av sin opprinnelige styrke og stivhet etter typisk 5-10års neddykking i sjøvann.

Moderate belastninger (opp til 50 % av korttids bruddstyrke) synes ikke å ha noen signifikant innflytelse på reduksjon i mekaniske egenskaper som følge av vannopptak. Høyere belastninger kan imidlertid føre til økt fall i egenskaper. Høye temperaturer vil øke reduksjonen i mekaniske egenskaper ved eksponering i vann.

#### Kjemikalieresistens

Komposittmaterialers resistens mot kjemikalier bestemmes hovedsaklig av matrisematerialet og til en viss grad av armeringsfibrene. For både polyestere, vinylestere og epoksier finnes det et bredt utvalg av forskjellige kvaliteter. Det er viktig å velge matrisematerialer i forhold til de kjemikalier materialene forventes å bli utsatt for. Når det gjelder armeringsfibrene og spesielt glassfiber er det viktig å velge typer som er resistente mot syrer og baser. A-type glassfiber anbefales f.eks. når materialene utsettes for syrer, mens E-type glassfiber anbefales i basiske miljøer.

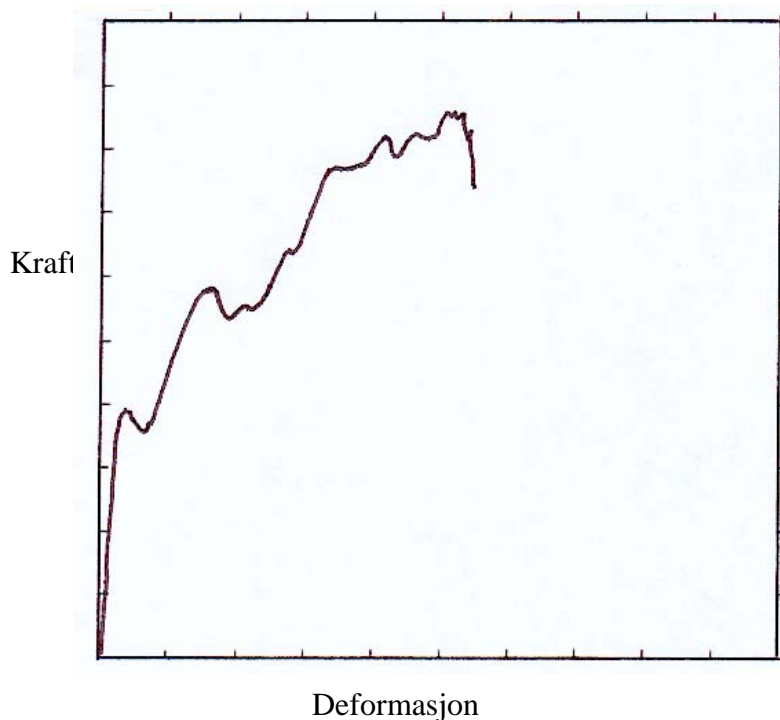
Kjemikalieresistensen til polyester og epoksy avhenger av resintype og hvilken herder som benyttes. Generelt vil egenskapene til en herdet polyester avhenge av materialets kjemiske oppbygging, mens for epoksy betyr det mest hvilken type herder som benyttes. Ulike herdere gir forskjellige reaksjonsmekanismer som påvirker den kjemiske strukturen og derved kjemikalieresistensen til det herdede materialet.

Ved bruk av komposittmaterialer i aggressive kjemiske miljøer med syrer, baser, salter, løsningsmidler etc. er det viktig å velge riktig matrisemateriale i forhold kjemikalierne de vil utsettes for. Det er normalt ikke vanskelig å finne frem til materialsammensetninger som er egnet for de fleste kjemiske miljøer. Vinylestere har svært god kjemikalieresistens og regnes generelt å være bedre polyestere. Epoksy har også generelt god kjemikalieresistens og er spesielt resistente overfor basiske miljøer.

## 2.8 Skaderesistens

Skaderesistens er den evnen et materiale har til å absorbere og forbruke (omdanne) slagenergi og sjokklaster. Responsen som man kan få grunnet en slagbelastning strekker seg fra små lokale skader til total destruering av konstruksjonen, men selv lokale, tilsynelatende ufarlige, skader kan føre til f.eks. delaminering og oppsprekking og dermed fremskynde et konstruksjonshavari.

Ved slagbelastninger i komposittmaterialer opptrer en rekke energiabsorberende skademekanismer som gjør at materialene har en god skaderesistens. Disse mekanismene tilsvarer de som er trukket frem i kapitlet om utmattingsegenskaper. Hvordan disse mekanismene bidrar til å absorbere energi er illustrert i figur 22. Figuren viser kraft/deformasjonsforløpet ved instrumentert slagtesting av et filamentviklet glassfiberarmert rør [14].

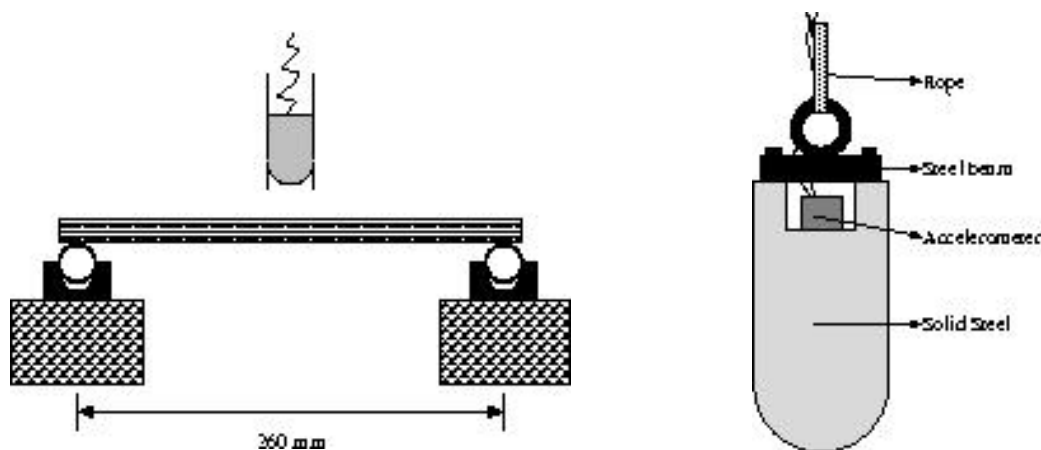


Figur 22: Kraft/deformasjonsforløp ved instrumentert fallslagtesting av et filamentviklet, glassfiberarmert rør [14]

Den første toppen på kurven ved relativt lav belastning representerer det nivået hvor det oppstår mikrosprekker i matrisen. Det oppstår et lite fall i kraften som etterfølges av et stort område hvor kraften øker gradvis. I dette området begynner fiberarmeringen å bære lasten og det forgår flere energikrevende skademekanismer slik som sprekkutvikling i grenseflaten mellom fiber og matrise, skjærsprekker mellom lagene, delamineringer, fiberbrudd, fiber pull-out, etc. I dette området frem til kraften når sin maksimalverdi opptrer disse ulike skademekanismene og bidrar

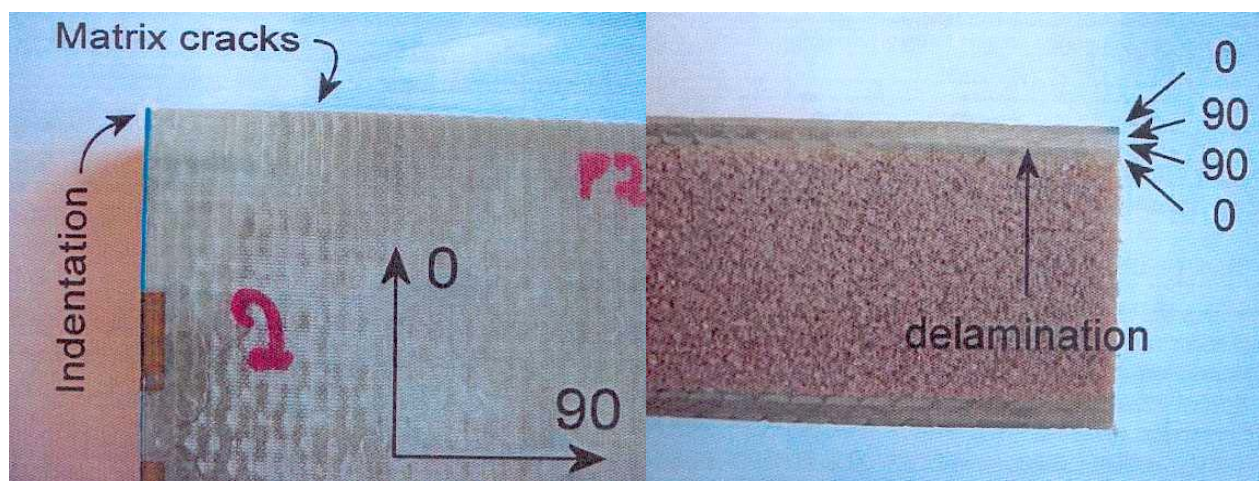
som figuren viser til at det absorberes betydelige mengder energi. Dette forløpet er årsaken til den gode slagresistensen til komposittmaterialer. Det arbeides for eksempel mye med å utnytte denne egenskapen til komposittmaterialer i utvikling av støtabsorberende komponenter i bilindustrien.

En annen illustrasjon av komposittmaterialenes gode slagresistens er resultater fra fallslagtesting av sandwichpaneler som nylig ble utført på SINTEF som del av en hovedfagsoppgave. Det ble utført tester av sandwichpaneler med 2 x 3mm lamener i huden av 0/90 glassfiberarmering og 25mm kjerne av PVC-skum med tetthet  $80\text{kg/m}^3$ . Paneler på 620x620mm ble lagt på en ramme av stålrør og utsatt for slag fra et sylindrisk lodd (6,2kg) med halvkuleformet tupp (diameter: 75mm). Lodd og opplagingsramme er vist i figur 23 nedenfor. Loddet ble sluppet ned på sandwichpanelet fra en høyde på 3,5m. Dette gir en slagenergi på 213J.



Figur 23: Venstre: Skisse av panelet lagt opp på stålrørssammen som igjen ligger på et Lecafundament. Høyre: Loddet er 75 mm i diameter, har halvkuleformet tupp og veier 6.2 kg. Et akselerometer er festet i overkant.

Skadene som ble observert i sandwichpanelet etter denne slagpåkjenningen var ubetydelige. Det synlige skadeområdet hadde en radiell utstrekning på 20mm fra slagsenteret. Den øverste huden fikk små matriseprekker og en liten delaminering mellom det nedre 90 og 0 laget (mot kjernen). Dette er vist på bildene av det slagpåkente panelet i figur 24. Det ble ikke registrert gjennomgående sprekker av noe slag i dette øvre hudlaminatet. Det ble heller ikke observert noen synlig skade på kjernen eller på huden på undersiden av panelet. I en avstand på 20mm fra slagsenteret var sandwichpanelet totalt uskadd og panelets overflate var også helt plan etter slaget.



Figur 24: Venstre: ¼ del av sandwichpanelet sett ovenfra, slaget (213 J) har funnet sted i øverste venstre hjørne. De små matricesprekkene i overflaten av huden er synlige i 0-retning. Høyre: Det forekommer noe delaminering i øvre hud mellom nederste 90- og 0-lag. Det kan ikke observeres gjennomgående sprekker i den øvre huden av noe slag. Det ble heller ikke observert noen synlig skade på kjernen eller på huden på undersiden av panelet. Panelet er plant etter slaget.

Ved hjelp av standardiserte metoder basert på pendelslag kan også materialers evne til å absorbere energi vurderes. Jo mer energi materialet absorberer jo sterkere er materialets skaderesistens og "tøffhet". I tabell 6 er det angitt resultater fra tester med den såkalte Charpy-metoden for ulike ensrettede komposittmaterialer sammen med stål å aluminium.

Tabell 6: Resultater fra Charpy-test på ensrettede kompositter, stål og aluminium

Materiale	Absorbent energi (relativt) [%]
S-glass/epoksy (55 % fiber)	100
Aramid/epoksy (60 % fiber)	43
AS karbon/epoksy (60 % fiber)	14
HMS karbon/epoksy (60 % fiber)	3
T300 karbon/epoksy	18
4340 stål	29
6061-T6 aluminium	20
7075-T6 aluminium	9

## 2.9 Designfrihet

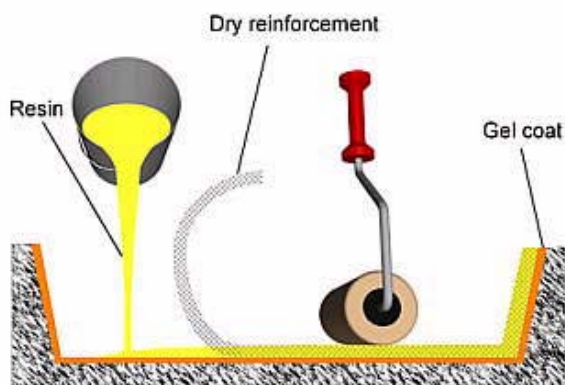
Et viktig aspekt for komposittmaterialer er knyttet til produksjonsvennlighet. I stedet for å benytte flere separate deler som må sveises eller boltes sammen kan man designe delen i ett stykke. Dette reduserer antall deler og monterings tid i tillegg til at produktet blir optimalt. Det er også enkelt å produsere komplekse geometrier med dobbeltkrumme flater med komposittmaterialer. Sist men ikke minst kan man skreddersy de mekaniske egenskapene ved å variere fiber/matrise forhold, fiberorientering og lagrekkefølge slik at de nødvendige krav til stivhet og styrke oppfylles på en optimal måte. Dette kommer vi tilbake til senere.

## 2.10 Produksjonsmetoder

Fabrikasjonen og formingen av produkter laget av komposittmaterialer inkluderer ofte selve oppbygningen av materialet. Belastningssituasjon, bruksområder, miljøpåkjenninger osv er med på å bestemme mengder, typer, plassering og retninger på fiber, samt mengde og typer resiner og produktets geometri. Krav til sluttproduktet bestemmer ofte hvilke produksjonsmetoder som er best egnet. Det finnes en rekke slike metoder og de mest aktuelle blir presentert her.

- **Håndopplegg:** Dette er den eldste, enkleste og kanskje vanligste metoden som benyttes. Armering legges i formen og resin påføres. Tykkelsen på produktet bestemmes av antall lag med armering som legges. Resultatet er en metode som krever minimum med utstyr men som er arbeidskrevende. Store og komplekse strukturer kan produseres relativt enkelt. Metoden er illustrert i figur 25.
- **Spray-up:** Dette er en delvis automatisert prosess der en blanding av korte fiber og resin sprøytes i formen. Dette er raskt og rimelig, men det umuliggjør bruken av kontinuerlige fibre som gir en langt sterkere struktur. Metoden er illustrert i figur 26
- **Vakuuminjeksjon:** Armeringen legges da i en hun-form som representerer produktets sluttgeometri. En vakuumbolie legges så over armeringsmattene, det tettes med tettemasse langs alle kanter og ved alle ut- og innløp. Det suges så vakuumbolie under folien ved hjelp av en pumpe og resin suges inn. Metoden er illustrert i figur 27.
- **RTM (Resin Transfer Moulding):** Samme prinsipp som ved vakuuminjeksjon men i stedet for å benytte en myk folie benyttes en stiv overform som suges på plass ved hjelp av vakuumbolie. Resinet injiseres så med trykkluft. Dette er en relativt kostbar metode som egner seg primært til å fremstille mindre produkter i store serier der krav til finish og høye ytelser er store. Metoden er illustrert i figur 28.

I tillegg til disse metodene finnes f.eks. autoklav, vikling og pultrudering. Disse blir ikke illustrert her.

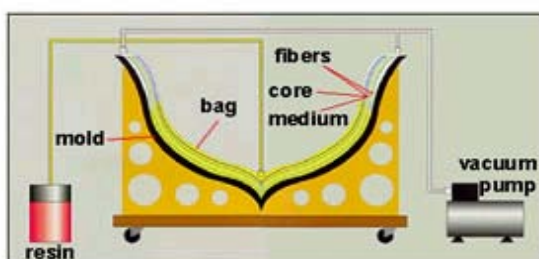


Figur 25: Håndopplegg. Gel coat påføres formen før armeringen rulles på plass med resin

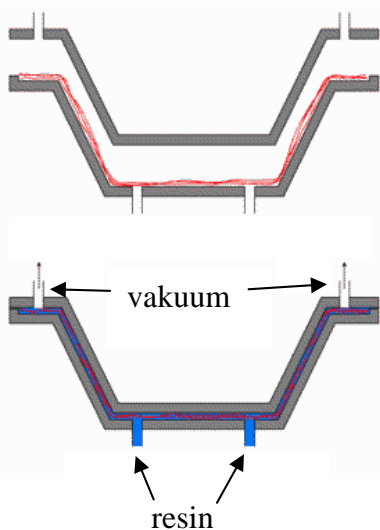




Figur 26: Spray-up: Blandingen av korte fiber og resin sprayeres på produktet

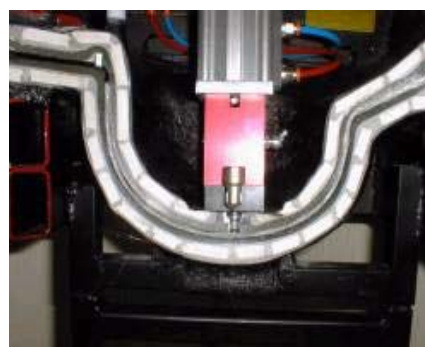


Figur 27: Vakuuminjeksjon: Fibrene (armeringen) legges i formen sammen med en eventuell kjerne, folie trekkes over, vakuu settes på og resinet suges inn. Metoden er skissert til venstre mens et eksempel er vist til høyre.



Tørr armering plasseres i formen

Vakuu settes på og resin injiseres



Figur 28: RTM prosessen vises til venstre mens en transparent prøveform vises til høyre

### 3. Eksempler på anvendelser av kompositt-/sandwichmaterialer

Kompositter er lette konstruksjonsmaterialer med høy styrke og stivhet i forhold til vekten. Materialene er tilnærmet vedlikeholdsfrie og har lang levetid under belastning i korrosive miljøer. Det kan oppnås stor reduksjon i vekt ved å erstatte metaller med kompositter.

Komposittmaterialer benyttes ofte i sandwichkonstruksjoner som består av to komposittlaminater på hver side av en lett kjerne av plastskum. Slike sandwichkonstruksjoner karakteriseres ved høy styrke og stivhet, meget lav vekt, god termisk og akustisk isolasjon og høy skaderesistens.

Komposittmaterialer har fått utstrakt anvendelse på en rekke ulike områder som f. eks. innen offshore, marint, transport, infrastruktur, luft og romfart, forsvar og sport. Norsk komposittindustri har en sterk posisjon internasjonalt på utvalgte områder innen transport, luft og romfart, offshore/marint og forsvar. Eksempler på komposittprodukter og strukturer som leveres av norsk industri er bl.a. store beskyttelsesstrukturer for brønnehoder på havbunnen, minesveipere og motortorpedobåter i kompositt/sandwich, vinger til vindmøller og tidevannsmøller, tanker for flytende naturgass og propan, nordiske ski, fronter til flytoget, ambulansefartøy i karbonfibersandwich, tanker og prosessutstyr for korrosive kjemiske miljøer, etc. I Fredrikstad ble dessuten en 60 m lang gangbru i glass- og karbonfiberkompositt nylig installert. Norge og de nordiske landene har en ledende posisjon internasjonalt når det gjelder fremstilling og anvendelse av sandwichkonstruksjoner. Norske komposittbedrifter er også engasjert i utvikling av stigerør i kompositter for offshore, og utvikling av et nytt norsk sjømålsmissil hvor de viktigste konstruksjonselementene lages i kompositter.

#### 3.1 Anvendelser i fiskefartøy, militære fartøy og hurtiggående fartøy

##### Fiskefartøy

De største fiskefartøyene vi har funnet som lages i komposittmaterialer er opp til ca. 50 meters lengde. Bildet i figur 3.1 viser et 50m langt fiskefartøy i sandwich fra Greben i Kroatia. Det er hevdet i litteraturen [10] at det også lages fiskefartøy i denne størrelsen i komposittmaterialer i Japan og at 60 % av den japanske fiskeflåten består av komposittfartøyer.



Figur 3.1: 50 m langt fiskefartøy i sandwich fra Greben i Kroatia



De største norskbygde fiskefartøyene i kompositt/sandwich er på 70-75 fot. Bildet i figur 3.2 under viser Bluefin som er et fiskefartøy i sandwich på 70 fot bygget ved Mundal Båt AS. Mundal Båt AS kan bygge fiskefartøy i sandwich opp til 90 fot. Mundal lager hele fartøyene i sandwich med skrog, overbygninger, hovedskott, tankskott, daviter etc. Fartøyene bygges i moduler som lamineres sammen omtrent som på stålfartøy. De viktigste fordelene som trekkes frem ved å bygge slike fartøy i sandwich er:

- De hevdes å være konkurransedyktige i pris med tilsvarende båter i stål
- De har lavere vekt. Dette gir mulighet for finere linjer og redusert drivstofforbruk. Båtene blir lettere å manøvrere. Lettere bevegelser gir også mindre slitasje på brukene i dårlig vær.
- Sandwichfartøyer avgir mindre støy til sjøen
- Vedlikeholdskostnadene blir lavere. Det godtas bl.a. at det settes av mindre midler til vedlikehold for disse båtene.
- Sandwichbåter er i utgangspunktet isolert og bedre isolert enn stålbåter. Det er ingen problemer med kondens som skaper korrosjonsproblemer.
- Reparasjon og ombygging hevdes å være enkelt.



Figur 3.2: Bluefin, 70 fots fiskefartøy i sandwich bygget hos Mundal Båt AS

Det bygges også en rekke mindre kystfiskefartøy (opp til ca. 40 fot) i kompositter i Norge. Produsenter er bl.a. Norpower, Selfa Arctic, Viksund og Grimsøy. Bildene i figur 3.3 viser et 35 fots kystfiskefartøy fra Norpower AS og en 38 fots Proff Speedsjark fra Selfa Arctic. Skrogene på disse båtene støpes i form som enkeltskall ved håndopplegg.



Figur 3.3: Kystfiskefartøy på 35 fot i komposittmateriale fra Norpower (til venstre). Norpower arbeider nå med et tilsvarende fartøy på 38 fot. Bildet til høyre viser en Proff Speedsjark på 38 fot i kompositt fra Selfa Arctic. Dette fartøyet har en toppfart på 24 knop.

#### Militære fartøy

Kompositt-/sandwichmaterialer er benyttet i en rekke militære fartøyer, bl.a. i Skandinavia, England, USA og Frankrike. I en oversiktsartikkel fra 2001 [13] refereres det til over 20 fartøyer i komposittmateriale med lengde over 50 m. Disse skipene lages i forsterket enkeltskall, monocoque og sandwich.

Bildet i figur 3.4 viser en korvett i Visby klassen som er bygd av Karlskronavarvet i Sverige. Den er 73m lang og en av de største konstruksjoner som er bygd i kompositter. Skroget er bygget i sandwich med kjerne av stivt skum og karbonfiberarmert herdeplast i hudlaminatene. Dette gir høy styrke, høy stivhet, lav vekt, god evne til å motstå sjokkbelastninger og lav radarsignatur. Verftet oppgir en vektbesparelse på 50 % sammenlignet med et konvensjonelt stålskrog.



Figur 3.4: Korvett i Visby klassen bygd i sandwich med karbonfiber i hudlaminatene. Fartøyet er bygd ved Karlskronavarvet i Sverige.

Bildet i figur 3.5. viser MTB'en Skjold som er bygd av Umoe Mandal. Båten er 45 m lang og bygd i sandwich med stivt PVC-skum i kjernen og glassfiberarmert herdeplast i hudlaminatene. I

figur 3.6 er vist et minerydningsfartøy på 55 m i sandwich som også er produsert av Umoe Mandal. Dette fartøyet er en luftputekatamaran.



Figur 3.5: MTB'en Skjold bygd i sandwich av Umoe Mandal AS



Figur 3.6: Minerydningsfartøy i sandwich (55 m) produsert av Umoe Mandal AS



Figur 3.7 viser en minesveiper i Ospreyklassen som er bygd i USA. Den har en total lengde på 56,5 m. Skroget er fremstilt i enkeltskall uten transversale skott og longitudinale stivere. Dette bedrer fartøyets resistens overfor undervannsekspløsjoner.



Figur 3.7: Minesveiper i Ospreyklassen bygd i komposittmaterialer (enkeltskall)

Det arbeides mye med å ta i bruk kompositter i militære fartøyer. US Navy har uttalt i en artikkel [13] at de tror komposittmaterialer vil bli et foretrukket skrogmateriale til skip opp til ca. 90 m i løpet av en tiårsperiode. Bruken av kompositter øker også i en rekke komponenter på militære fartøyer. Eksempler på komponenter som er laget i kompositter er: Overbygninger, master, propeller, drivaksler, rør, dekk, skillevegger, luker, fundamenter, dører, ror, ventilasjonskanaler og gangrister.

#### Hurtiggående fartøy i karbonfiber-sandwich

Brødrene Aa as begynte allerede på 70 tallet å ta i bruk kompositt/sandwich som byggemateriale i hurtiggående fartøy. På 80-tallet utviklet bedriften de såkalte SES-fartøyene i sandwich. Sandwichmaterialet som ble brukt i disse fartøyene var hudlaminater i glassfiberarmert herdeplast og PVC-skum i kjernen. Dette var luftputekatamaraner som fikk stor suksess og bedriften bygde i løpet av en tiårsperiode 18 slike fartøyer. På 90-tallet stagnerte hurtigbåtmarkedet og bedriftens hovedproduksjon ble konsentrert om store beskyttelsesstrukturer til offshoreinstallasjoner, tunnelkledninger og togfronter (bl.a. til flytoget). I denne perioden utviklet bedriften kompetanse på vakuuminjisering og implementerte med suksess denne prosessen i sin produksjon.

Bedriften utnyttet denne kompetansen i utvikling av en ny type hurtiggående fartøyer i sandwich basert på bruk av karbonfiberarmering i hudlaminatene i stedet for glassfiber. Dette ble kombinert med produksjon basert på vakuuminjisering. Det første av denne nye typen fartøy var Rygerdoktoren (se fig. 3.8) som ble levert i 2002. Rygerdoktoren er et ambulansefartøy som benyttes i utrykninger. Det har en toppfart på 44 knop og marsjfart er 36-38 knop. Rygerdoktoren ble fulgt opp av to nye passasjerfartøy, Rygerkatt som ble levert i mai 2004 og Rygerfjord som er under bygging. Rygerkatt og Rygerfjord er katamaraner hvor det benyttes samme byggemateriale som i Rygerdoktoren.

Dette er alle ekstreme fartøyer. Bruk av sandwich basert på karbonfiber og produksjon basert på vakuuminjisering hevdes å gi en vektreduksjon sammenlignet med tilsvarende fartøy bygd i tradisjonelle materialer på ca. 40 %. Rygerdoktoren er bygd med så lav vekt at oppdriften i

materialene er større enn totalvekten på fartøyet. Rygerdoktoren kan dermed ikke synke. Selv om karbonfiber er dyrere enn glassfiber er det god økonomi på grunn av betydelig vektbesparelse, og redusert drivstofforbruk. Rygerkatt som er 18,5 m lang veier bare 27 tonn. Ved en marsjfart på 25 knop vil fartøyet ha et drivstofforbruk på under 6 liter per nautisk mil. Rygerkatt har en topphastighet på 29 knop.

Båtene er utviklet i samarbeid med Marintek (skrogutvikling), Hareide Design Mill (design og linjeføring over hoveddekk) og Kukkums, Karlskronavarvet (dimensjonering).



Figur 3.8: Rygerdoktoren. Ambulansefartøy i karbonfiber-sandwich produsert ved vakuuminjisering.



Figur 3.9 Rygerkatt (til venstre) og Rygerfjord til høyre). Katamaran passasjerfartøyer i karbonfiber-sandwich produsert ved vakuuminjisering. Rygerfjord er 21 m lang og kan ta 97 passasjerer. Med 2 x 500 kW kan fartøyet operere med en hastighet på 30 knop og et drivstofforbruk på 7,5 liter/nautisk mil.

### 3.2 Overbygninger i kompositt-/sandwich.

Overbygninger, styrehus og dekkshus er en anvendelse som peker seg ut hvor bruk av kompositt/sandwich kan gi mange fordeler. De viktigste fordelene er:

- Vektreduksjon høyt oppe på fartøyet
- Overbygg i sandwich er ferdig isolert
- Unngår problem med kondensdannelse
- Ingen korrosjon
- Reduserte vedlikeholdskostnader

Det er flere eksempler på overbygninger i kompositt-/sandwich både på fiskefartøy, militære fartøy, ferger, store yachter og andre fartøy.

Figur 3.10 viser et sandwichoverbygg på fiskebåten M/S Solgunn (60 meter langt stålfartøy). I dette tilfellet ga bruk av sandwich en vektbesparelse på rundt 50 %. Overbygget er på to etasjer, 10-12 meter langt og 5 meter bredt. Det ble installert i forbindelse med en ombygging av båten. Silverplast AS utførte arbeidet med overbygget.



Figur 3.10: Sandwichoverbygg til fiskebåten MS Solgunn

Figur 3.11 viser fergen MS Nordfjord med et overbygg i sandwich. Overbygget ble laget av Norwegian Marine AS i Eikefjord. Skroget er 72 meter langt og laget i stål. Det ble bygget i Klaipeda i Litauen. Eieren av båten er rederiet Fylkesbåtane i Sogn og Fjordane (FSF). Erfaringene som trekkes frem med overbygg i sandwich er:

- Vedlikeholdsutgiftene ble lavere på grunn av mindre korrosjon.
- Fergen har fått bedre stabilitet som følge av det lette overbygget.
- Vektreduksjonen på overbygget har ført til betydelig innsparing i drivstoffutgiftene.

I følge rederiet FSF ble overbygget i sandwich hele 30 tonn lettere enn andre alternativer, ned fra 45 til 15 tonn. Fordi kjernematerialet som benyttes i sandwich har meget gode isolerende egenskaper, slapp man også å etterisolere innredningen. Kjernen er av skummet PVC (Divinycell) og belagt med en hud av glassfiberarmert polyester. Alle faste vinduer i overbygget ble limt rett på skottet, uten tunge karmen. Dette gjelder også de store vinduene i styrehuset, som måler 3.6 m<sup>2</sup> og veier 130 kg. Hele overbygget ble limt fast (Sikaflex 290 Marine) til en sveiset kanal på dekket. Overbygget rommer et styrehus, en mannskapsinnredning og et teknisk tavlerom.





Figur 3.11: Sandwichoverbygg til kystfergen MS Nordfjord

Danyard AS har bygget et overbygg i sandwich til en 77m lang superyacht i stål (Princess Mariana, se figur 3.12). Dette overbygget var på 2,5 etasjer, ca. 55m langt, ca. 14m bredt og veide totalt ca. 60 tonn. Overbygget ble prefabrikert og heist på plass i en operasjon innenfor toleranser på i størrelsesorden 1 cm. Overbygget ble boltet fast til ståldekket. Det ble støpt inn en stålskinne på undersiden av overbygget som ble boltet til en tilsvarende skinne som var sveiset fast i ståldekket.



Figur 3.12: Eksempel på overbygg i sandwich til superyachten "Princess Mariana

Det finnes også flere eksempler på overbygg i kompositt/sandwich på store militære fartøy. I denne sammenheng fremheves også materialenes ballistiske egenskaper og evne til å stoppe splinter og fragmenter. Den største overbygningen vi har funnet på militære fartøy er på den franske fregatten LaFayette [13]. Den bakre delen av overbygningen er bygget i sandwich. Den er 38 m lang, 15 m bred og 6,5-8 m høy.

### 3.3 Eksempler på andre anvendelser av kompositt-/sandwich

#### Gangbru på 60 m over Glomma

I mai 2003 ble det åpnet en 60 m gangbru i komposittmateriale over Glomma i Fredrikstad (fig. 3.13). Broa forbinder Fredrikstad sentrum med Kråkerøy. Opprinnelig ble broen tegnet og beregnet for både stål og herdeplastkompositt. Komposittalternativet kom best ut og ble valgt ikke minst på grunn av krav til form og design. Broen er en mekanisk klaffebro. De to heveklaffene,

hver på 30 m, er laget i komposittmateriale. Heveklaffene er en "closed-box-girder" konstruksjon og er bygd opp av både "single skin" laminater og sandwich konstruksjoner. Det er benyttet både glass- og karbonfiber som armering, resinnet er vinylester og PVC-skum og balsa tre er benyttet som kjerne i sandwichdelene. Bunnen og sidene av heveklaffene er produsert ved vakuuminjeksjon. Hver klaff veier ca. 15 tonn. Øvrige hovedkonstruksjoner er i støpt betong og stål.

Det er lagt stor vekt på design og en slank linjeføring i alle konstruksjoner for å ivareta elverommets kontinuitet. Kombinasjonen av innovativ bruk av nye materialer som kompositt i klaffer og en mekanisk løsning uten motvekter gjør broen unik i internasjonal sammenheng.

Broen er designet av Griff kommunikasjon AS. FiReCo AS har hatt ansvaret for materialvalg og dimensjonering av komposittklaffene og de ble produsert av Marine Composites AS. Oppdragsgiver var Fredrikstad Kommune.



Figur 3.13. 60 m gangbro over Glomma i Fredrikstad. Broen er en mekanisk klaffebro og de to heveklaffene, hver på 30 m, er laget i kompositt- og sandwichmaterialer.

#### *Gangbro i kompositt installert i Spania (38 m)*

Figur 3.14 viser en gangbro i kompositt fra Spania. Broen har et spenn på 38 m og krysser et jernbanespor for høyhastighetstog og en parallell motorveg. Broen består av to buer som hver heller ca. 10 grader innover og det er ingen enkle vertikale elementer i broen. Broen er bygd opp av små rette elementer. Den er satt sammen av strukturelle profiler som er fremstilt ved pultrudering. Profilene er levert av Fiberline. Profilene er satt sammen med fittings i syrefast, rustfritt stål. Broen er blant de lengste i sitt slag i Europa





Figur 3.14: Gangbro i kompositt på 38 m i Spania. Broen er bygd opp av rette pultruderte profilelementer som er satt sammen ved hjelp av fittings i syrefast, rustfritt stål.

#### Undervanns beskyttelsesstrukturer for offshore

Komposittmaterialer både i form av single skin og sandwichmaterialer har blitt et fortrukket materialvalg for undervanns beskyttelsesstrukturer i oljevirkosomheten til havs. Figuren viser strukturer i sandwich for brønnhodebeskyttelse. Kompositt-/sandwichmaterialer velges på grunn av lav vekt, korrosjonsresistens og lang levetid.



Figur 3.15: Brønnhode beskyttelsesstrukturer i sandwich. Strukturene er levert av ABB Offshore Systems AS som har stått for materialvalg og dimensjonering. Strukturene er produsert av Brødrene Aa as. Dimensjonene på strukturen til venstre fremgår ved å sammenligne med personene på bildet. Dimensjonene på strukturen til høyre er 15 x 15 x 7 m.

Kompositt- og sandwichmaterialer benyttes også i flere andre anvendelser offshore under vann. Eksempler er bøyebegrensere, rørledningsbeskyttelse og oppdriftselementer.

#### Kompositter i fly

Kompositter tas i økende grad i bruk i fly. I dette anvendelsessegmentet benyttes i hovedsak avanserte kompositter basert på karbonfiber som armeringsmateriale og epoksy som bindemiddel. Et eksempel er Eurofighter Typhon som er vist i figuren under. Skrogoverflaten inkludert vinger består av 70 % karbonfiberarmert komposittmateriale, 15 % lette legeringer og titan, 12 % glassfiberarmert kompositt og 3 % andre materialer. Bruk av disse lette og sterke materialene har

bidratt til en vektreduksjon på 30 % på skrog og motor og til at størrelsen og dermed radarsignaturen er redusert.



Figur 3.16. Eurofighter Typhon, hvor hoveddelen av skroverflaten er lagd i karbonfiberarmert kompositt.

### Vindmøllevinger

Vinger til vindmøller lages i dag nesten utelukkende i komposittmaterialer. I de fleste vingene benyttes glassfiber som armering og vingene bygges opp av en kombinasjon av single skin og sandwich. I de største vingene som har en lengde på ca. 60 m benyttes en kombinasjon av karbon- og glassfiber. Det gir vindmøller med rotordiameter på nær 120 m og en effekt på ca. 5 MW. De fleste vingene produseres i dag basert på injisering.



Figur 3.17: Bildet er hentet fra Hitra vindpark. Den vil bestå av 24 vindmøller som hver vil ha en effekt på 2,3 MW. Hvert mølletårn er 70 meter høyt, og rotordiameteren er 82,4 meter. Vindparken får en samlet installert effekt på 55 MW som tilsvarer produksjon av strøm nok til å dekke behovet til ca 7.500 husstander i ett år. Vindparken ble offisielt åpnet 14. oktober 2004.

### Togfronter i komposittmaterialer

Togfronter lages nå i stor grad i kompositt-/sandwichmaterialer. Komposittmaterialene som brukes i slike anvendelser tilfredsstiller krav til skadetoleranse og brannresistens. Bruk av komposittmaterialer gir også større designfrihet og det er lettere å utnytte kompliserte dobbeltkrumme geometrier for å komme frem til et elegant design.

Bildet i figur 3.18 under viser fronten på Flytoget som benyttes på Gardermoen. Både fronten og plogen lages i komposittmaterialer. Det benyttes en sandwichkonstruksjon med glassfiberarmert fenol i ytterhudene av hensyn til brannresistens. Det benyttes også et brannresistent kjernemateriale. Togfrontene leveres av ABB Offshore Systems AS som står for materialvalg og dimensjonering. Frontene produseres av Brødrene Aa AS og fremstilles ved vakuuminjisering i en operasjon.



Figur 3.18: Front og plog på Flytoget er laget i sandwich med glassfiberarmert fenol i huden og et brannresistent skum i kjernen. Både front og plog fremstilles ved injisering.

### Propanbeholdere i komposittmaterialer

Ragasco AS på Raufoss har utviklet lavtrykksbeholdere for flytende propan basert på komposittmaterialer. Beholderne markedsføres under handelsnavnet "Compleat" og er primært beregnet på forbrukermarkedet. Beholderne er bygd opp med en innvendig liner i termoplast, en lastbærende yttervegg i glassfiberarmert herdeplast og en utvendig casing i termoplast. De viktigste fordelene ved å benytte en kombinasjon av termoplast og komposittmaterialer i slike beholdere er at de er transparente slik at fyllingsnivået kan observeres visuelt, de har lav vekt, er lette å håndtere og de er korrosjons- og kjemikalieresistente. Det er lagt stor vekt på sikkerhet ved utvikling av komposittbeholderen og sikkerheten er tilsvarende eller bedre enn tilsvarende beholdere i stål. Beholderne er sikre når de utsettes for brann. Gassen og beholderen vil forbrenne kontrollert uten risiko for eksplosjon. Dette er vist i branntester utført med beholdere hvor sikkerhetsventilene er fjernet. Beholderne produseres i en høyt automatisert produksjonslinje. Komposittlaget filamentvikles uten på lineren i termoplast som er formlåst.



Figur 3.19: Compleat propanbeholdere i komposittmateriale fra Ragasco AS. Beholderne finnes i standardstørrelser på 5 og 10 kg propan.

### Kompositter i ski

Madshus AS på Biri ved Mjøsa er en av verdens ledende produsenter av nordiske ski (langrennsski). Skiene produseres basert på en patentert triaksial konstruksjon. Den består av glassfiber som veves i en vinkel på 45 grader rundt en lett kjerne av plastskum. Denne konstruksjonen gir forbedret torsjonsstivhet og en stabil ski. I tillegg benyttes tynne og lette karbonfiber for å sikre at skiene får et ideelt spenn og en optimal trykkfordeling langs hele skia. Kjernematerialet i de beste skiene er et polyakrylimid (PMI) skum med lav tetthet. Skiene



produseres i en karusell med en høy grad av automatisering. Madshus AS er kjent for å produsere ski med reproducerbar og stabil kvalitet.



Figur 3.20: Nordiske ski produsert hos Madshus AS basert på kompositt- og sandwichteknologi. Det benyttes glass- og karbonfiber kombinert med en lett og sterk kjerne i plastskum for å komme frem til ski med optimal ytelse for utøverne. Bildet viser Evi Sachenbacher og Thomas Ahlsgaard.

### Komposittmaterialer i sykler

Et annet eksempel på økt bruk av kompositter innen sport og fritid er i avanserte terreng og landeveis sykler. Slike konkurransesykler med ramme og felg i komposittmaterialer blir stadig mer vanlig og benyttes i økende grad av de beste konkurranserytterne. Komposittmaterialer benyttes for å oppnå lav vekt og høy stivhet. I slike sykler benyttes i hovedsak karbonfiberarmert epoksy.



Figur 3.21: Eksempel på terrengsykkel med ramme i karbonfiberarmert epoksy.

Kompositter i lastebilskap og transporttanker for spesialvæsker

Komposittmaterialer benyttes i stor utstrekning i lastebilskap og i tanker for transport av spesialvæsker med bil. Til lastebilskap benyttes sandwichløsninger som gir lette og stive konstruksjoner med god isolasjon. Eksempler på slike anvendelser er vist i figuren under.



Figur 3.22: Eksempler på bruk av kompositt-/sandwich materialer i lastebilskap og i transporttanker for spesialvæsker. Sandwichpanelene og transporttankene på figuren er produsert av SelcoTek AS i Drammen

### Referanseliste

- [1] Agarwal, B.D. & Broutman, L.J., "Analysis and performance of fiber composites". John Wiley & Sons 1990, ISBN 0-471-51152-8.
- [2] Hildebrand, M, "Fatigue-strength data on fibre-reinforced plastics", VTT Research notes 1512, Espoo, Finland, 1993, ISBN 951-38-4446-3.
- [3] Verma, BB, Atkinson, JD & Kumar, M, "Study of fatigue behaviour of 7475 aluminium alloy", Bull. Mater. Sci., Vol 24, No. 2, April 2001
- [4] Vizzini, A.J., "Composite materials and failure mechanics", Composite research laboratory, Department of Aerospace Engineering, University of Maryland
- [5] Amateau, MF, "Course notes - Engineering composite materials", The Pennsylvania State University, Department of Engineering Science and Mechanics, 2002
- [6] Andersen, A, "Forelesningsnotater ME 354 Komposittmaterialer", Universitetet i Oslo, Matematisk institutt, Avdeling for mekanikk, 1999
- [7] Hale, RD, "Lecture highlights- Mechanics of composites", Department of Aerospace Engineering, The University of Kansas, 2002
- [8] Abrate, S, "Lecture notes-Composite materials", Southern Illinois University, 2000

- [9] Andersen, A, ”Mekanisk testing av injiserte [0/90] glass- og karbonfiberlaminater”, SINTEF Rapport STF24 F02053, Desember 2002
- [10] Shenoi, R.A.: ”FRP Composite Materials for Ship Construction”, Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Maritime Conference on “Shipping Trends for the Next Millennium”, Institute of Marine Engineers (India), Mumbai, 19.-21, November, 1998, Vol. 1, pp 11.1 – 11.19.
- [11] Smeby, Kobberstad, ”Tekniske regnetabeller”, J. W. Cappelens Forlag AS, 1986
- [12] Chemical Process Equipments Limited, <http://www.cpel.com>
- [13] Mouritz A.P., Gellert E., Burchill P., Challis K., “Review of advanced composite structures for naval ships and submarines”, Composite Structures, 53 (2001) pp 21-41
- [14] Stokke R., “Impact resistance of GRP pipes. A summary of test results”, SINTEF Rapport STF24 F96057, November 1996, 28s
- [15] Malmo J., “Long term properties of GRP materials”, SI rapport, 85 02 02-9, September 1988, 27s
- [16] Engineered Materials Handbook, Vol. 1, Composites, ASM International, 1987, ISBN 0-87170-279-7 (v. 1)
- [17] ASM Handbook, Vol. 21, Composites, ASM International, 2001, ISBN 0-87170-703-9
- [18] Zenkert D., “The Handbook of Sandwich Construction”, Engineering Materials Advisory Services Ltd, 1997, ISBN 0-947817-96-4