

STF24 A04013 - Åpen

RAPPORT



Pris- og vektvurdering av overbygg i sandwich til fiskefartøy

Reidar Friberg, Reidar Stokke og Alfred Andersen

www.sintef.no

SINTEF Materialer og kjemi

Juli 2004



SINTEF Materialer og kjemi

Postadresse: Boks 124, Blindern
0314 Oslo

Besøksadresse: Forskningsveien 1
Telefon: 22 06 75 80
Telefaks: 22 06 73 50

Foretaksregisteret: NO 948 007 029 MVA

SINTEF RAPPORT

TITTEL

Pris- og vektvurdering av overbygg i sandwich til fiskefartøy

FORFATTER(E)

Reidar Friberg, Reidar Stokke og Alfred Andersen

OPPDRAGSGIVER(E)

Fiskeri- og havbruksnæringens forskningsfond (FHF)
Norges forskningsråd

RAPPORTNR. STF24 A04013	GRADERING Åpen	OPPDRAGSGIVERS REF. Terje Flatøy/Turid Hiller	
GRADER. DENNE SIDE Åpen	ISBN	PROSJEKTNR. 244465.00	ANTALL SIDER OG BILAG 30
ELEKTRONISK ARKIVKODE		PROSJEKTLEDER (NAVN, SIGN.) Reidar Stokke	VERIFISERT AV (NAVN, SIGN.) Alfred Andersen
ARKIVKODE	DATO 2004-07-06	GODKJENT AV (NAVN, STILLING, SIGN.) Reidar Stokke, Spesialrådgiver	

SAMMENDRAG

Overbygg til fiskefartøy lages i dag normalt i aluminium. Det er gjennomført en studie for å sammenligne overbygg i aluminium og sandwich med hensyn kostnader og vekt. Fordelene som trekkes frem ved å bygge overbygninger i sandwich er:

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

Resultatene viser at et overbygg i sandwich vil være konkurransedyktig eller sammenlignbart i pris med aluminium. Analyser av et konkret styrehus viser at en sandwichløsning vil gi ca. 18 % lavere kostnad når den sammenlignes med et isolert styrehus i aluminium. Resultatene viser at bruk av sandwich vil gi en betydelig vektbesparelse sammenlignet med aluminium. En sandwichløsning vil veie ca. 10 kg/m², mens isolert aluminium vil veie ca. 30kg/m². Dette gir en vektbesparelse på ca. 20kg/m² eller nær 70 %. Den prosentvise vektbesparelsen vil bli mindre (50-60 %) når ferdig innredete overbygninger sammenlignes. Analyser av mekaniske egenskaper og egenfrekvenser viser at de sandwichpanelene som er vurdert i rapporten er ekvivalente med aluminiumspanelene de er sammenlignet med.

STIKKORD	NORSK	ENGELSK
GRUPPE 1	Materialteknologi	Materials Technology
GRUPPE 2	Polymerer	Polymers
EGENVALGTE	Pris- og vektvurderinger	Cost and weight analysis
	Stivhetsvurderinger	Stiffness analysis
	Elementberegninger	Finite element calculations

INNHALDSFORTEGNELSE

1	Innledning	3
2	Eksempler på overbygg og fiskefartøy i sandwich	4
2.1	Eksempler på store overbygg i sandwich	5
3	Prissammenlikning på overbygg i sandwich og aluminium	6
3.1	Pris på overbygg i aluminium	6
3.1.1	Vekt på aluminiumsoverbygg	9
3.2	Priser på overbygg i sandwich	10
3.2.1	Vekt på sandwichoverbygg	15
3.2.2	Vekt optimaliserte hurtigbåter med overbygg i sandwich med karbonfiberlaminater	15
3.3	Konklusjoner	16
4	Innfesting av sandwich til stål eller aluminiumsdekk	17
4.1	Andre eksempler på innfesting til sandwich	19
5	Sammenlikning av panelenes mekaniske egenskaper	20
5.1	Analyse av bøyestivhet, egenfrekvenser og styrke	20
5.1.1	Forenklinger og forutsetninger	20
5.1.2	Beregning av treghetsmoment for sandwichbjelke	21
5.1.3	Beregning av treghetsmoment for aluminiumsbjelke	22
5.1.4	Sammenligning av bjelketverrsnitt	23
5.1.5	Analyse av egenfrekvenser og svingeformer	25
5.1.6	Forenklet styrkevurdering	28
5.2	Konklusjoner	28
	Referanse liste	30

1 Innledning

Prosjektet "Nye materialløsninger for fiskeflåten" ble innledet med en omfattende kartleggingsfase for å finne frem til komponenter hvor det var behov for nye materialløsninger og hvor nye materialløsninger kunne gi fordeler. Kartleggingsarbeidet omfattet bl.a. møter og diskusjoner med skipskonsulenter, redere, verft og produsenter, omvisning på fiskefartøy, litteraturundersøkelse og søk på internett.

Basert på resultater fra kartleggingsarbeidet ble det valgt å fokusere arbeidet på noen utvalgte konkrete komponenter/delkonstruksjoner hvor potensialet for forbedringer ble ansett å være størst. Overbygninger i kompositt/sandwich ble valgt som en av disse.

Overbygninger til fiskefartøy lages i dag normalt i aluminium og det ble valgt å gjennomføre en studie for å sammenligne overbygg i aluminium og sandwich med hensyn i, første rekke, til kostnader og vekt. De potensielle fordelene som trekkes frem ved å bygge overbygninger i sandwich er:

- Vektreduksjon høyt oppe på fartøyet
- Overbygg i sandwich er ferdig isolert
- Unngår problem med kondensdannelse (kondensdannelse trekkes frem som et betydelig problem som gir korrosjonsproblemer, dårlig komfort og luktdannelse)
- Ingen korrosjonsproblemer
- Reduserte vedlikeholdskostnader
- Mulighet for finere linjer (enklere å fremstille med kompleks geometri)
- Lav stivhet og gode utmattingsegenskaper gir liten risiko for oppsprekking ved innfesting til ståldekk

Det ble innledningsvis uttrykt fra bransjen at en høyere pris kunne aksepteres for et overbygg i sandwich dersom det ville gi en signifikant vektbesparelse og at en vektbesparelse på 4-5kg/m² ville være interessant.

Det er gjennomført en analyse av kostnader og vekt ved å bygge overbygninger i aluminium og sandwich. Det ble tatt utgangspunkt i et konkret overbygg på et mindre fiskefartøy (grunnareal på 22m²) som er laget i aluminium. Data for kostnader og vekt ved å bygge i sandwich er basert på samarbeid med fire produsenter av sandwichstrukturer og en råvareleverandør som har lang erfaring med sandwichkonstruksjoner. Tilsvarende data for aluminium er basert på samarbeid med skipskonsulenter og verft. Det er utviklet generelle regneark for å vurdere kostnader og vekt slik at resultatene ikke er begrenset til overbygget som er valgt som "case" for arbeidet.

Resultatene viser at et overbygg i sandwich vil være konkurransedyktig eller sammenlignbart i pris med aluminium. Analyser som er gjennomført for et konkret styrehus viser at en sandwichløsning vil gi ca. 18 % lavere kostnad når den sammenlignes med et isolert, men ikke innredet styrehus i aluminium. Resultatene viser at bruk av sandwich vil gi en betydelig vektbesparelse sammenlignet med aluminium. En sandwichløsning vil veie ca. 10 kg/m², mens isolert aluminium vil veie ca. 30kg/m². Dette gir en vektbesparelse på ca. 20kg/m² eller nær 70 %. Den prosentvise vektbesparelsen vil bli mindre når ferdig innredete overbygninger sammenlignes. I praksis vil et ferdig innredet overbygg i sandwich kunne bli 50-60 % lettere enn i aluminium. Analyser av mekaniske egenskaper og egenfrekvenser viser at de sandwichpanelene som er vurdert i rapporten er ekvivalente med aluminiumspanelene de er sammenlignet med. Målsettingen med denne rapporten er på en oversiktlig måte å få presentert data for kostnader og vekt både for løsninger i sandwich og aluminium. Hensikten er at skipsbyggere og konsulenter

lettere skal se fordelene ved bruk av sandwich og etterspørre disse løsningene i større grad enn i dag.

2 Eksempler på overbygg og fiskefartøy i sandwich

I løpet av prosjektperioden ble det funnet frem til mange vellykkede satsninger med bruk av kompositt/sandwich overbygg. Figur 1 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 2 viser fergen MS Nordfjord med et overbygg i sandwich. Overbygget ble laget av Norwegian Marine AS i Eikefjord. Skroget er 72 meter langt, i stål og ble bygget i Klaipeda i Litauen. Eierne av båten er rederiet Fylkesbåtane i Sogn og Fjordane (FSF). Erfaringene 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 m² 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 viser et eksempel på et fiskefartøy bygget helt i sandwich inkludert skrog, overbygninger, hovedskott og tankskott. Båten som er på 70 fot ble produsert av Mundal Båt AS i år 2000. Bedriften kan levere fiskebåter opp til 90' i sandwich. Erfaringene viser til betydelige forbedringer med hensyn til komfort, kondens og vedlikehold. Lavere vekt på fartøyet gir dessuten mindre slitasje på not og tauverk i grov sjø.



Figur 1: Sandwichoverbygg til fiskebåten MS Solgunn



Figur 2: Sandwichoverbygg til kystfergen MS Nordfjord



Figur 3: "Bluefin", et 70 fots fiskefartøy i sandwich produsert av Mundal Båt AS..

2.1 Eksempler på store overbygg i sandwich

Danyard AS har bygget et overbygg i sandwich til en 77m lang superyacht i stål (Princess Mariana, se figur 4). 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.

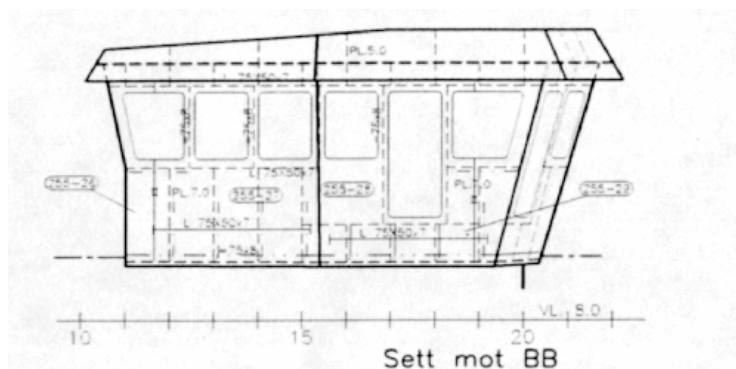
Det finnes flere eksempler på overbygg i kompositt/sandwich på store militære fartøy. I denne sammenheng fremheves også materialenes ballistiske egenskaper og evne til å stoppe splinter og fragmenter. Den største overbygningen vi har funnet på militære fartøy er på den franske fregatten LaFayette. Den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



Figur 4: Eksempel på overbygg i sandwich til superyachten "Princess Mariana".

3 Prissammenlikning på overbygg i sandwich og aluminium

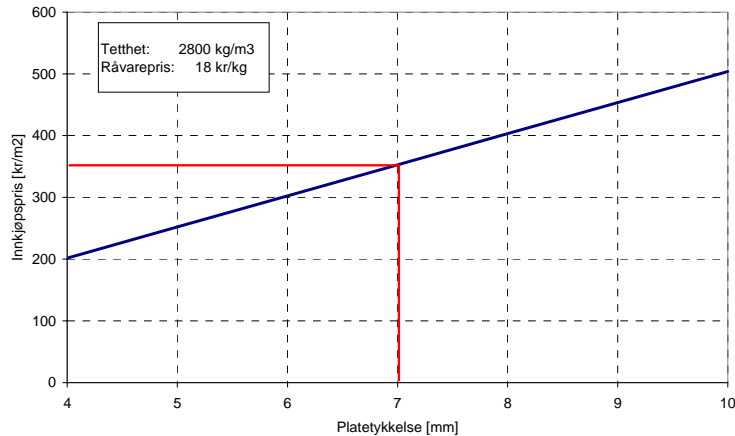
Dette kapittelet beskriver typiske priser for overbygg i sandwich/kompositt og aluminium til fiskefartøy. Tall og verdier er hentet fra kjente båtbyggere og relevante underleverandører i Norge. Som et utgangspunkt for kostnads sammenlikning mellom aluminium og kompositt, er det tatt utgangspunkt i styrhuset vist i figur 5. Alle tall presentert i dokumentet er basert på fortrolige samtaler med leverandører og båtbyggere, og er derfor gjengitt uten referanse dersom ikke annet er oppgitt. Det er samarbeidet med 4 produsenter av sandwich og en materialleverandør med lang erfaring med sandwichkonstruksjoner. Tilsvarende data for aluminium er basert på samarbeid med skipskonsulenter og verft.



Figur 5: Typisk styrhus til fiskebåt. Styrhuset er ca. 2.6 m høyt, 5.8 m langt og 5.3 m bredt. Styrhuset har en grunnflate på ca. 22 m² og et utvendig overflateareal på ca. 100 m².

3.1 Pris på overbygg i aluminium

Typisk råvarepris for sjøvannsbestandig aluminium i 2002 var 17-19 kr/kg (fritt levert som plater). Gjennomgang av arbeidstegninger for overbygg i aluminium viser at normal platetykkelse er 7 mm. Et regneeksempel viser at dersom en aluminiumsplate koster 18 kr/kg vil en 7 mm plate koste 352 kr/m² fritt levert. Råvarepris for andre tykkelser er vist i figur 6.



Figur 6: Beregnet kvadratmeterpris for aluminiumsplater med økende tykkelse. Som grunnlag for beregningene er det antatt at en aluminiumsplate koster 18 kr/kg og har tettheten 2800 kg/m^3 .

Beregning av pris for et aluminiumsbygg (uten isolasjon og paneler) er forholdsvis enkelt. I verftsbransjen er det normalt å beregne eller veie vekten av aluminium som brukes, og multiplisere dette med en faktor Q for bearbeidet materialkost. I år 2002 lå denne Q -faktoren rundt 100 kr/kg. Dersom geometrien anses som komplisert multipliseres det igjen med ny faktor k som ligger mellom 1-1.05. Så for et rent aluminiumsbygg blir prisen P gitt som

$$P = kQM_{tot}$$

k = komplikasjonsfaktor 1-1.05

Q = pris for bearbeidet aluminium kr/kg, 95-105 kr/kg

M_{tot} = total masse av aluminium i overbygget

Ved beregning av pris ble det opplyst fra flere verft at det ikke skal taes hensyn til vektbesparelse pga. utskjæring av vindu, dører etc. Dermed kan byggetegninger enkelt og greit brukes til å estimere pris ut ifra overbyggets brutto flateareal. Dersom flatearealet A er kjent vil total-kostnaden P for overbygget bli:

$$P = kQM_{tot} = kQ\rho A t s$$

der

ρ = tetthet til aluminium [kg/m^3]

t = platetykkelse [m]

A = areal [m^2]

s = avstiverfaktor (ligger rundt 1.35 for fiskefartøy)

Avstiverfaktoren s er knyttet til ekstra forbruk av aluminium pga. nødvendig avstivning av større platefelt. Det er normalt med forsterkninger i golv, tak og vegger. Fotografiet i figur 7 illustrerer dette. For overbygg generelt vil avstiverfaktoren s ligge mellom 1.35 - 1.65. Desto mer vekt optimalisert strukturen er, desto høyere blir faktoren. For et overbygg til et fiskefartøy vil s normalt ligge rundt 1.35. Ved innsetting av

Q = 100 kr/kg

ρ = 2800 kg/m^3

t = 0.007 m

k = 1

s = 1.35

inn i formelen ovenfor vil prisen per kvadratmeter i aluminium bli 2646 kr/m². Av dette utgjør materialkosten 476 kr/m² (pris/m² multiplisert med avstiverfaktoren s) og arbeidskosten 2170 kr/m². Materialkosten ble beregnet ved å sette $Q = 18$ kr/kg i ligningen for P ovenfor. For et mindre styrhus som vist i figur 5 er antallet tellende kvadratmeter (inkl. vegg, gulv og tak) rundt 100 m². Prisen for råbygget vil da bli ca 265.000 kroner. I tillegg vil det komme kostnader knyttet til isolasjon og innredning etc.



Figur 7: Eksempler på bruk av spanter for å stive av og forsterke platefelter i et aluminiumsoverbygg. Bildene er hentet fra Naval-Consult sine hjemmesider.

Kostnaden for å etterisolere og bekle et råbygg varierer og er sterkt avhengig av standarden på bekledningen. Enkelte fiskefartøy har svært høy standard og utgiftene til innredning kan fort nærme seg prisen av råbygget. En spørreundersøkelse blant bedrifter som driver med innredning oppgir at kostnaden kan variere fra rundt 4 000 kr/m² og opp til 15 000 kr/m² (kun gulvareal skal brukes her). Figur 8 viser et standard ferdig isolert og et ferdig innredet aluminiumstyrhus. Det bør bemerkes at for normal høy standard vil typisk innredningskostnad ligge rundt 12 000-15 000 kr/m² (tall fra skipskonsulent). Dette inkluderer da skuffer, skap etc. og ellers alt annet som normalt hører med til et styrhus (ikke elektronisk utstyr). I denne rapporten er det benyttet minimumstall for innredning og isolasjon. Hensikten er å forenkle kostnadssammenlikningen med et overbygg i sandwich som i utgangspunktet er ferdig isolert.

Beregnet gulvarealet for det overnevnte styrehuset (figur 5) er ca. 22 m². Antar vi en minimums isolasjons- og innredningskostnad på 4.000 kr/m², vil det koste ca 88.000 kroner å innrede styrhuset. Totalkostnaden for et ferdig innredet styrhus i aluminium blir dermed ca. 352.600 kroner (se også tabell 1). Av de 88.000 kr er det beregnet at omtrent 17.555 går til isolering med Rockwool[®] og resten 70.445 går til innredning med Norac[®] paneler. Typiske materialkostnader er hentet fra materialleverandørene og gjengitt i tabell 2. Ved å trekke materialkostnaden fra totalkostnaden kan arbeidskostnaden bestemmes. Arbeidskostnaden er vist i tabell 3. Et ferdig isolert, men ikke innredet styrhus vil derfor koste 264.600 + 17.555 = 282.000 kr.

Tabell 1: Totalkostnader for aluminiumsoverbygg

Kostnadssted	Kvadratmeter [m ²]	Pris [kr/m ²]	Totalkostnad [kr]
Aluminium	100	2646	264 600
Isolasjon	78	180	17 555
Bekledning	100	704	70 445
SUM			352 600

Tabell 2: Materialkostnader for isolert aluminiumoverbygg

Komponenter	Kvadratmeter [m ²]	Pris [kr/m ²]	Delkostnad [kr]	Materialkostnad [kr]
Aluminium	100	476		47 600
Isolasjon tak	32	45	1 440	
Isolasjon vegg	47	45	2 115	
Isolasjon gulv*	-	45	0	3 555
Akerpanel vegg	47	300	14 100	
Akerpanel tak	32	300	9 600	
Br.hem. finer gulv	22	300	6 600	30 300
SUM				81 455

* Det er ikke kjent om gulv isoleres.

Tabell 3: Estimerte arbeidskostnader. Tallene er beregnet ved å trekke materialkostnaden fra totalkostnaden angitt i hhv. tabell 2 og 1. Unntaket er arbeidskostnader knyttet til isolering, de er oppgitt av relevant leverandør.

Kostnadssted	Antall timer	Timekostnad [kr]	Arbeidskostnad [kr]
Aluminium	620	350	217 000
Isolasjon	40	350	14 000
Bekledning	115	350	40 145
SUM	895		271 145



Figur 8: Bildet til venstre viser et isolert styrhus, mens bildet til høyre viser et ferdig innredet styrhus i aluminium. Bildet er hentet fra Naval-Consult sine hjemmesider.

3.1.1 Vekt på aluminiumoverbygg

Det kan være interessant å se på vekten av et uisolert overbygg i aluminium. Beregninger viser at vekten av en kvadratmeter styrhus i aluminium vil veie ca. 26.5 kg. Vekten er kommet frem ved bruk av relasjonen $M_{tot} = \rho A t s$, innsatt $\rho = 2800 \text{ kg/m}^3$, $t = 0.007 \text{ m}$ og $s = 1.35$ og $A = 1 \text{ m}^2$. Det er viktig å merke seg at man ikke finner den reelle vekten av råbygget for et styrhus ved å gange opp med f.eks. flatearealet benyttet ovenfor. Årsaken er at flatearealet ikke tar hensyn til utskjæring av dører og vindu etc. Men tallet egner seg godt for å sammenlikne med andre overbyggsløsninger, som f.eks. sandwich.

Det er viktig å merke seg at etterisoleringen og innredning/bekledning av råbygget fører til en betydelig vektøkning. Årsaken er at hver kvadratmeter isolasjon, vegg-, tak- og gulvpanel veier forholdsvis mye. Et enkelt innredet aluminiumoverbygg som vist i figur 5 vil veie hele 4122 kg.

Tabell 4 gir en detaljert oversikt over hvert vektbidrag. Legg merke til at 100 mm isolasjon som vanligvis benyttes i aluminiumsoverbygg veier hele 3.2 kg/m^2 og vil øke vekten av overbygget til 29.7 kg/m^2 . For å øke komforten ytterligere er det vanlig å øke tykkelsen på isolasjonen til 150 mm. Vekten og prisen vil da øke tilsvarende.

Tabell 4: Vektoversikt for forskjellige komponenter til et styrhus i aluminium.

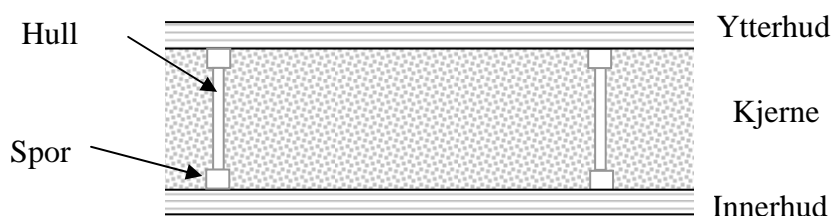
Sted	Material	Type	Tetthet [kg/m^3]	Tykkelse [mm]	Vekt [kg/m^2]	Areal [m^2]	Vekt [kg]
Plater	Aluminium	Sjøvannsbest.	2800	7	26.5	100	2650
Vegg og tak	Isoasjon	Comfort A	32	100	3.2	78	250
Vekt av isolert styrhus							2900
Vegger	Akerpanel	Norac	-	25	13.8	47	649
Tak	Akerpanel	Norac	-	25	8.0	32	256
Gulv	Finerplate	Br.hem.	800	18	14.4	22	317
SUM - Vekt av isolert og innredet styrhus							4122

3.2 Priser på overbygg i sandwich

Kostnadsberegninger for overbygg i sandwich er gjennomført på samme måte som for et aluminiumsoverbygg, men regnestykket blir noe mer komplisert pga. flere dimensjoneringsmuligheter og materialkombinasjoner.

Et overbygg i komposittmateriale er normalt laget av sandwich. Det vil si med en lett kjerne og en tynn hud av fiberarmert plast på hver side. Typisk sandwich oppbygning er vist i figur 9, og i tabell 5 gis en nærmere beskrivelse av oppbygningen. Denne konstruksjonen gir et lett og stivt platefelt. Det er like mye armering i huden på begge sider. Laminattykkelsen er typisk 1-2 mm, alt avhengig av ønsket styrke og stivhet. For å få en fin overflate legges det ekstra lakk og sparkel på ytterhuden, som da vil bli noe tykkere. Legg også merke til at det går med forholdsvis mye polyester for å fylle spor og hull i kjernematerialet. Figur 11 viser bilder av innsiden av et styrhus i sandwich og av styrhuset ferdig innredet.

For å få en god oversikt over bygge- og materialkostnadene, er kostnadene for hver bestanddel tatt med. Et typisk kostnadsbilde er vist i tabell 6. Alle tilleggene for polyester, glassfiber etc. er erfaringsbaserte tall fra produsenter. Tallene i tabellen forutsetter at laminatet produseres ved vakuuminjisering. Ved håndopplegg vil polyesterinnholdet i laminatet være noe høyere, samt at svinnet vil være større, men til gjengjeld vil det ikke gå med polyester til å fylle hull og spor.



Figur 9: Typisk sandwich konstruksjon for overbygg til større fiskefartøy. Spor og hull i kjernematerialet er kun aktuelt for produksjon ved hjelp av vakuuminjisering.

Tabell 5: Typisk oppbygning av sandwich til overbygg. Det er vanlig å estimere med ca. 1.9 kg glass på hver side. Ved vakuuminjisering er det normalt å anta at vektandelen glassfiber blir ca. 65 wt.%.

Komponenter	Material	Andel Vol. [%]	Andel Vekt [%]	Tetthet [g/cm ³]	Tykkelse [mm]	Vekt [kg/m ²]
Kjerne	PVC			0.06	40	2.4
Innerhud	Glassfiber	46	65	2.6	0.74	1.91
	Polyester	54	35	1.2	0.86	1.04
				1.8	1.60	2.95
Ytterhud	Glassfiber	46	65	2.6	0.74	1.91
	Polyester	54	35	1.2	0.86	1.04
				1.8	1.60	2.95
Primer kjerne, spor og hull	Polyester			1.2	0.93	1.12
Lakk	PU			1.3	0.20	0.26
Vekt pr. m ² for sandwich til overbygg						9,7

Tabell 6: Kostnadsfordeling for sandwich overbygg med oppbygning som gitt i tabell 5

Komponenter	Tykkelser [mm]	Vekt [kg/m ²]	Pris [kr/kg]	Pris [kr/m ²]
PVC kjerne (60 kg/m ³)	40	2.4	133	340 ¹
Armering, glassfiber	1.47	3.83	23	88
Resin, polyester	1.73	2.07	18	37
Primer, spor og hull	0.93	1.12	22	25
Overflate, lakk og sparkel	0.20	0.26	35	9
10% ekstra forbruk polyester og glass				13
5% ekstra forbruk kjerne				17
Forbruksmaterial (slanger, duker etc.)				77
Netto materialkost				606
15 % tillegg materialkostnad				91
Total materialkostnad	44.3	9.7	72	697

¹⁾PVC kjerne med tetthet 80 kg/m³ koster 460 kr/m².

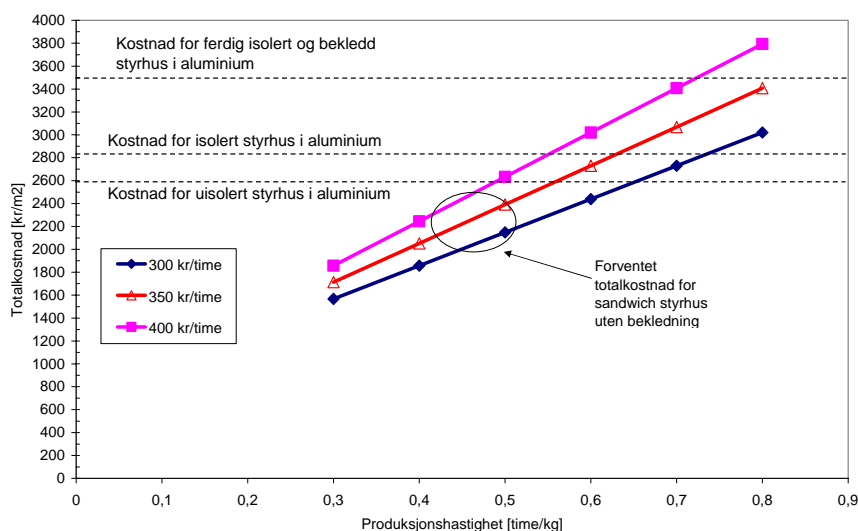
Materialkostnadene var forholdsvis enkelt å estimere. Arbeidskostnaden derimot, har vist seg å være vanskeligere å bestemme. Arbeidskostnaden er avhengig av produksjonsmåte, for eksempel injisering eller håndopplegg. Om det bygges rundt en plugg eller settes sammen av mindre seksjoner. Det er også stor forskjell på om det skal bygges 1 eller 10 enheter. Ved å se på tidligere prosjekter, ble det funnet ut at 0.4-0.5 timer/kg for et ferdig overbygg i sandwich var et realistisk tall. Tallet er sjekket opp mot erfaringstall fra flere produsenter og leverandører og bekreftet.

Normalt vil timeprisen ligger rundt 300-400 kr/time. Ved 300 kr/time vil arbeidskostnaden for overbygget med overflateareal på 100m² beskrevet ovenfor være 9.7 kg/m² x 100m² x 0.5t/kg x 300kr/t = 145.000,- kroner. Tallene er hentet ut fra tabell 5 og 6. Dette gir en total arbeidskostnad på 1.450 kr/m². I tillegg kommer materialkostnader på ca. 700 kr/m². Totalkostnaden per produsert kvadratmeter sandwich blir da ca. 2150 kr/m². Dette er litt lavere enn kostnaden for et uisolert aluminiumstyrhus, som er 2640 kr/m². Økes timeprisen til 350 blir arbeidskosten 1700 kr/m². Legges materialkosten på 700 kr/m² til, blir totalkosten ca. 2400 kr/m², som også er litt lavere enn for aluminium. En sandwichløsning er ferdig isolert og et bedre sammenligningsgrunnlag vil derfor være et isolert, men uinnredet styrehus i aluminium. For et isolert, men ellers uinnredet aluminiumstyrhus, blir totalkosten 2800 kr/m² (se tabell 1). Disse

tallene viser at det skal være mulig å bygge styrhus i sandwich til omtrent samme eller lavere pris enn aluminium. Tabell 7 viser totalkostnader for overbygget i sandwich basert på en timekostnad på 350 kr. og en produksjonshastighet på 0,5 timer pr. kg. Figur 10 viser hvordan totalkostnadene pr. m² for et overbygg i sandwich avhenger av produksjonshastigheten for forskjellige timepriser. Til sammenligning er også totalkostnader for aluminium lagt inn.

Tabell 7: Totalkostnader for overbygg i sandwich.

Produksjonshastighet	0.5	time/kg
Sandwich vekt	9.7	kg/m ²
Styrhus størrelse	100	m ²
Timekostnad	350	kr/time
Timeforbruk	484	timer
<hr/>		
Delsum byggekostnad	169 400	kr
Delsum materialkostnad	69 700	kr
<hr/>		
Totalkostnad	239 100	kr



Figur 10: Totalkostnad for overbygg i sandwich og aluminium. Grafen illustrer at kostnaden for overbygg i sandwich er sterkt avhengig av produksjonshastigheten og timeprisen. Basert på erfaringstall fra produsenter og leverandører viser grafen at et overbygg i sandwich kan bli rimeligere enn et styrhus i aluminium.

I stedet for å beregne pris ut i fra kostnad i timer/kg, er det for vakuuminjisert sandwich ofte mer fornuftig å se på kostnad i timer pr. kvadratmeter. Årsaken er at det tar omtrent like lang tid å vakuuminjisere et tungt sandwichpanel som et lett. I samtaler med produsenter og leverandører ble produksjonshastigheten ved vakuuminjisering av flate sandwichpaneler oppgitt til å ligge mellom 1-3 m²/time, nesten uavhengig av laminatrykkelse. Med en timepris på 300-400 kr, vil det koste mellom 100-400 kr/m² i arbeid for å fremstille selve sandwichpanelene. Materialkosten på ca. 700 kr/m² kommer i tillegg. Dersom totalkosten ligger rundt 2400 kr/m² gjenstår det omtrent 1300 - 1600 kr/m² kr til alt etterarbeidet med skjæring, skjøting, liming etc. Det betyr at det praksis vil ta 4-5 timer/m² å ferdigstille et sandwichstyrhus. Figur 12 viser effekten av timepris og produksjonshastighet på totalkostnadene.

For å sjekke om dette estimatet kan være omtrentlig riktig, er enkle overslag basert på kjente kostnader fra aluminiumsstyrhus benyttet. Overslagene i tabell 3 viser at det tar rundt 620/1.35 = 460 timer å sette sammen aluminiumsplatene til et styrhus med samme størrelse (tid til avstivning er med vilje ikke tatt med). Det gir en produksjonshastighet på 4,6 timer/m², som er på linje med produksjonshastigheten for sammenstilling av sandwichpaneler til et styrhus. Det vil si at det er

avsatt omtrent like mye tid til bygging av sandwichpaneler som til bygging med aluminiumsplater. Dette virker rimelig. Det betyr at med en effektiv produksjon av sandwichpaneler og en timepris på 3-400 kr. på arbeidskraften så vil en sandwichløsning blir noe rimeligere enn en aluminiumsløsning.

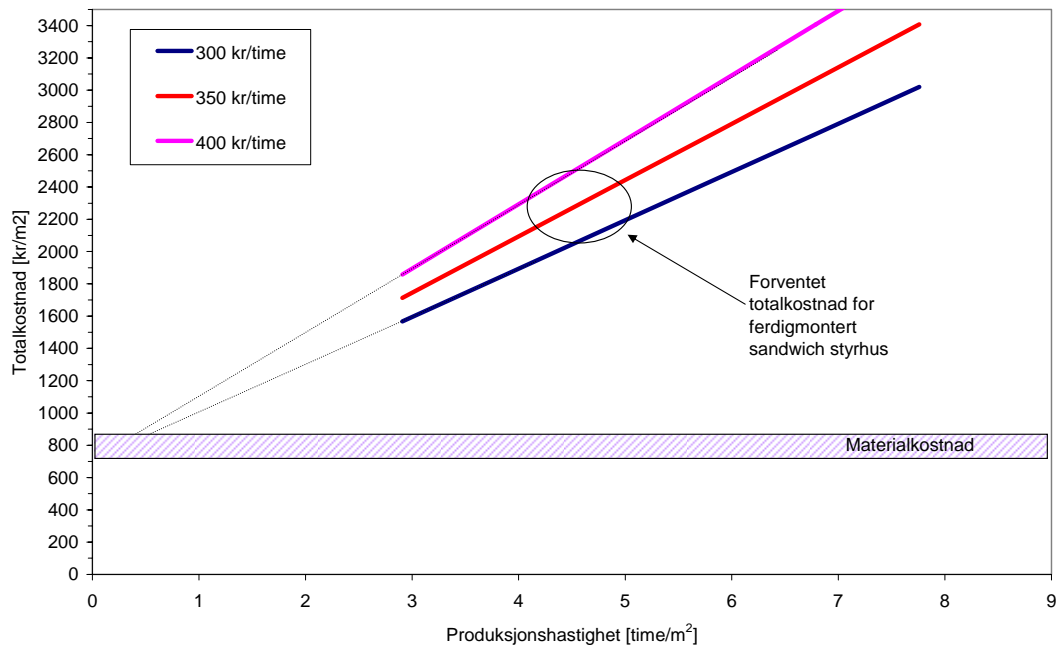
Tabell 8: Materialkostnad for sandwich som funksjon av laminatrykkelse.

Hud tykkelse [mm]	Totaltykkelse [mm]	Vekt [kg/m ²]	Pris [kr/kg]	Pris [kr/m ²]
1.0	43.1	7.5	85	638
1.6	44.3	9.7	72	697
3.0	47.1	14.8	56	836
6.0	53.1	25.9	44	1 133
9.0	59.1	37.0	39	1 430

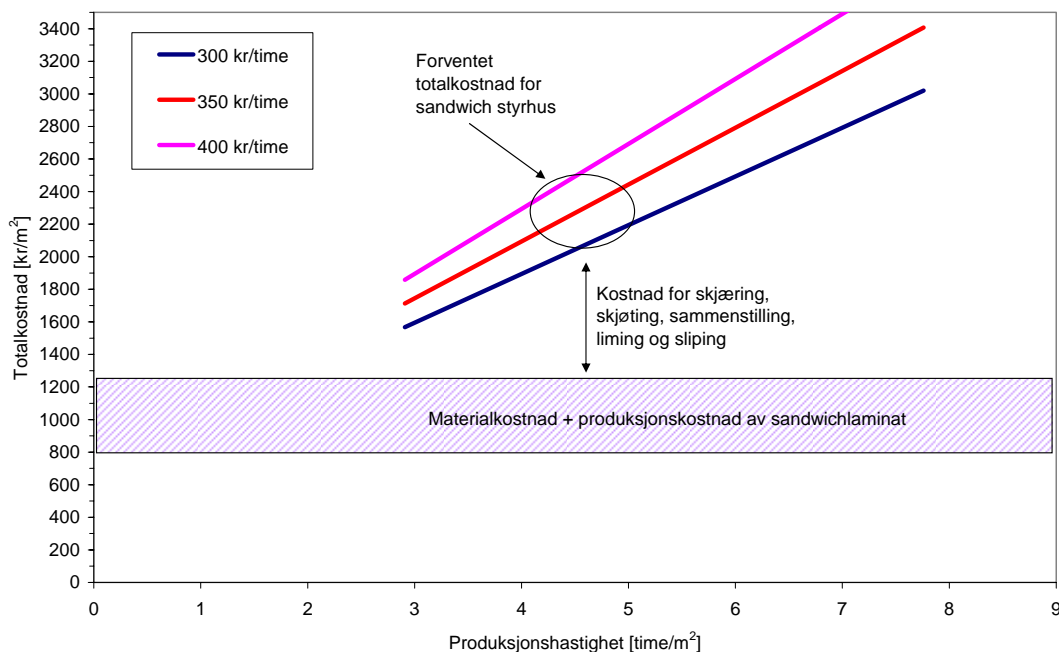
Ved å gå litt dypere inn i tallmaterialet kan fortjenestemarginger og effekter av kostnadsvariasjoner studeres. For eksempel vil en sammenlikning av totalkostnad og materialkostnad for overbygg i sandwich, se figur 12, vise at materialkostnaden er en stor utgift. Uten kontroll på produksjonshastigheten ser man fort at prisen for et ferdig overbygg kan bli vesentlig høyere. Det er ikke forventet at totalkostnaden kan bli noe særlig rimeligere enn estimert i tabell 7. Utgifter knyttet til usikkerhet i dimensjonering, for eksempel laminatrykkelse, har liten innvirkning på sluttsummen. Dette er også illustrert i tabell 8. For å illustrere det lettere er det i figur 12 tegnet inn to horisontale linjer som angir materialpris for sandwich med 1.6 mm hud og 3.0 mm hud. Differansen er kun 150 kr, som slår mindre ut enn om timeprisen skulle øke med 50 kroner eller om produksjonshastigheten skulle øke med 0,5 timer/m². I figur 13 er det forsøkt å få frem gjenstående ressurser etter at sandwichpanelene er ferdig produsert og klar til montering. Figuren viser tydelig at dersom prisen skal ned, i forhold til tallene oppgitt i tabell 7, må først og fremst sammenstillingen av overbygget gjøres raskere. Alternativt kan totalprisen reduseres dersom materialprisen går ned.



Figur 11: Bildet til venstre viser innsiden av et overbygg i kompositt. Typiske sammenføyninger av tak og vegger kan også sees. En u-profil er benyttet for å stive opp tak og vegger. Til høyre sees et ferdig innredet styrhus i kompositt. Bildet er hentet fra hjemmesiden til Mundal Båt AS.



Figur 12: En sammenlikning av totalkost og materialkost for et overbygg i sandwich. Figuren viser at den totale arbeidskostnaden normalt vil være noe større enn materialkostnaden. Øvre og nedre nivå for materialkostnaden representere laminatrykkelse på henholdsvis 1,6 og 3mm.



Figur 13: Figuren viser at summen av materialkostnad (700) og produksjonskostnad (100-400) for flate sandwichpaneler utgjør en betydelig andel av totalkostnaden. For å holde totalkostnaden lav er det viktig at alt etterarbeidet med skjæring, skjøting, etc gjøres effektivt.

3.2.1 Vekt på sandwichoverbygg

En sammenlikning av vekt pr. kvadratmeter viser at sandwichløsningen kommer svært godt ut. Fra beregningene presentert i tabell 5 fremgår det at et ferdig isolert sandwichpanel kun veier 9,7 kg/m². Et uisolert aluminiumspanel med nødvendig avstivning veier ca. 26,5kg/m². Etterisolering av aluminiumsløsningen vil gi en betydelig vektøkning. Årsaken er at hver kvadratmeter isolasjon veier 3,2kg basert på en isolasjonstykkelse på 100mm. Siden sandwichløsningen er ferdig isolert blir det riktigst å sammenligne med isolert aluminium. Da vil vekten av sandwichpanelene (9,7kg/m²) være ca 20kg lettere pr. m² (nær 70 %) enn isolert aluminium som veier ca. 29,7kg/m². I tabell 9 er vekten av styrehuset i sandwich med en enkel innredning skissert. Totalvekten blir ca. 2200kg. Den tilsvarende vekten for aluminiumsløsningen er som det fremgår av tabell 4 på ca. 4100kg. Det betyr at for et ferdig innredet overbygg vil sandwichløsningen veie ca. halvparten av aluminiumsløsningen. Vektbesparelsen beregnet ovenfor, stemmer godt overens med anslag presentert av andre leverandører.

Tabell 9: Vektoversikt for styrhus i sandwich

Sted	Panel type	Material	Tetthet [kg/m ³]	Tykkelse [mm]	Vekt [kg/m ²]	Areal [m ²]	Vekt [kg]
Plater	Sandwich	GRP	-	44,3	9,7	100	970
Vegger	Akerpanel	Norac	-	25	13,8	47	649
Tak	Akerpanel	Norac	-	25	8,8	32	256
Gulv	Finerplate	Br.hem. finerplate	800	18	14,4	22	317
SUM							2192

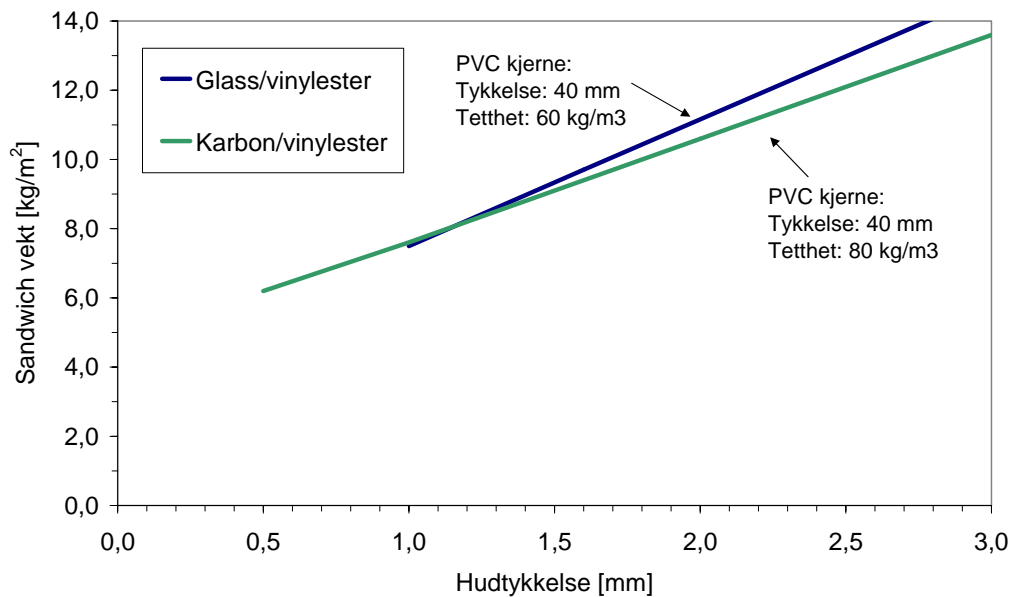
3.2.2 Vektoptimaliserte hurtigbåter med overbygg i sandwich med karbonfiberlaminater

For hurtigbåter, som skal opp i plan, er vektbesparelser svært viktig. Hurtigbåter lages mye lettere enn fiskebåter av samme størrelse. Det gjøres ved å benytte tynnere aluminiumsplater og øke antallet stivere. Avstivningsfaktoren kan i enkelte tilfeller være så høy som 1.6 mot 1.35 for fiskebåter. I tabell 10 er typiske tall for panelvekter til hurtigbåter oppgitt. Tabellen viser at sandwichskrog og overbygg blir vesentlig lettere enn aluminium. Benyttes karbonfiber som armering i sandwichpanelene, kan overbygget veie helt ned i 7 kg/m². Årsaken er at karbonløsningen gjør sandwichhuden opptil 40-50% tynnere, samtidig som de mekaniske egenskapene beholdes. Dessverre spises noe av vektgevinsten opp p.g.a. at kjernen bør ha en høyere densitet for å opprettholde slagresistensen. Vekt som funksjon av hudtykkelse er illustrert i figur 14. I appendiks beskrives et karbon/vinylester sandwichpanel for hurtigbåter nærmere.

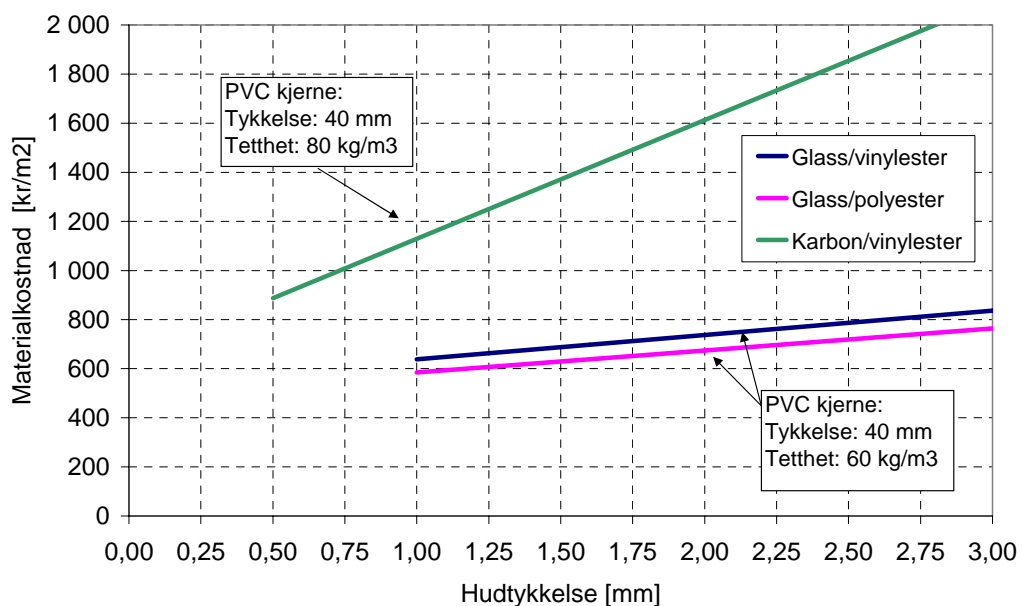
Figur 15 viser kostnadene for sandwich med karbonfiber og glassfiber. Siden en karbonfiberløsning kan ha tynnere hud, blir prisforskjellen ved bruk av glassfiber mindre. I enkelte tilfeller kan forskjellen være så liten som 200-400 kr/m². For hurtigbåter er denne forskjellen så liten at sett over tid vil det tjenes inn ved lavere drivstoffutgifter. Vektbesparelsen vil redusere behovet for motorkraft, og kan således også være med på redusere investeringsnivået.

Tabell 10: Typisk vekt for strukturer i aluminium og sandwich for hurtigbåter.

Struktur	Aluminium [kg/m ²]	Sandwich [kg/m ²]
Overbygg	18	7-10
Skrog	20-25	10-15



Figur 14: Vekten av sandwich med karbonfiber og glassfiber

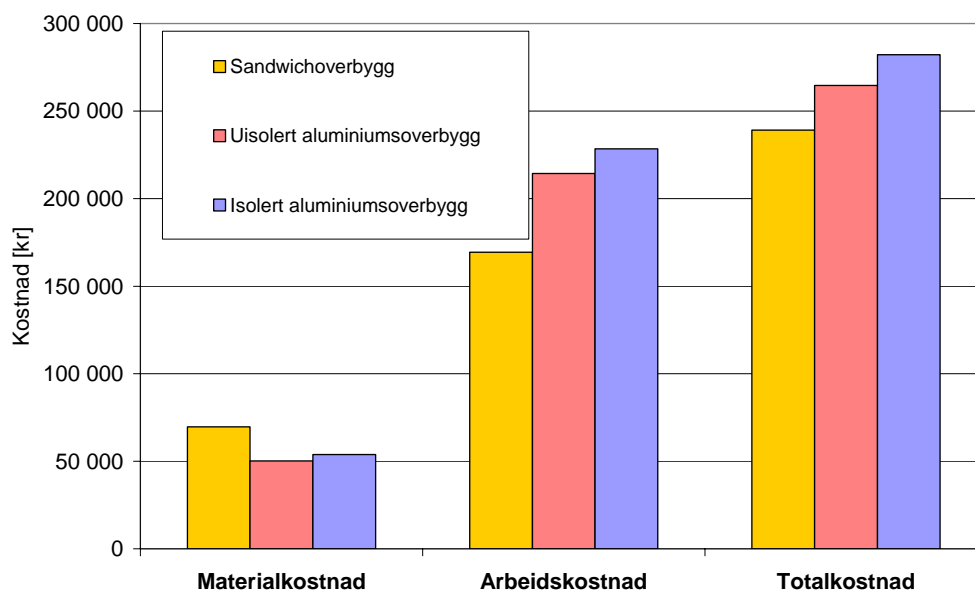


Figur 15: Typiske materialkostnader for sandwich med bruk av karbonfiber og glassfiber.

3.3 Konklusjoner

Kostnadene for overbygg i aluminium og sandwich er diskutert i hhv. kapittel 3.1 og 3.2. Som et eksempel er det tatt utgangspunkt i et forholdsvis begrenset overbygg/styrhus, med grunnflate på ca. 22 m² og et total flateareal på 100 m². Studiet viser at et isolert og enkelt bekledd aluminiumstyrhus vil koste 352.000 kr. Dersom bekleddingen fjernes, slik at overbygget kun er isolert, vil det i følge beregningene koste 282.000 kr. Et tilsvarende styrhus i sandwich vil koste 240.000 kr, dvs. at et aluminiumsoverbygg blir omtrent 18 % dyrere. Kostnadsforskjellene og kostnadsfordelingene er også illustrert i figur 16. Det er først og fremst arbeidskostnaden med aluminium, som er årsaken til at løsningen blir dyrere.

En vektsammenlikning viser at sandwichløsningen kommer svært godt ut. I utgangspunktet veier et ferdig isolert sandwichpanel kun 9.7 kg/m^2 , mens et uisolert aluminiumpanel vil veie ca. 26.5 kg/m^2 . Etterisolering av aluminiumen øker vekten ytterligere med ca. 3.2 kg/m^2 . Det betyr at det kan spares opp mot 20 kg/m^2 ved å velge et overbygg i sandwich. På grunn av at interiøret i et styrhus vil veie forholdsvis mye, vil den prosentvise vektbesparelsen på et sandwichoverbygg bli noe lavere, enn det tallene overfor indikerer. Typisk vil sandwich gi et overbygg som er omtrent 50 % lettere enn et i aluminium.



Figur 16: Kostnadsfordeling for overbygg i kompositt og uisolert og isolert aluminium.

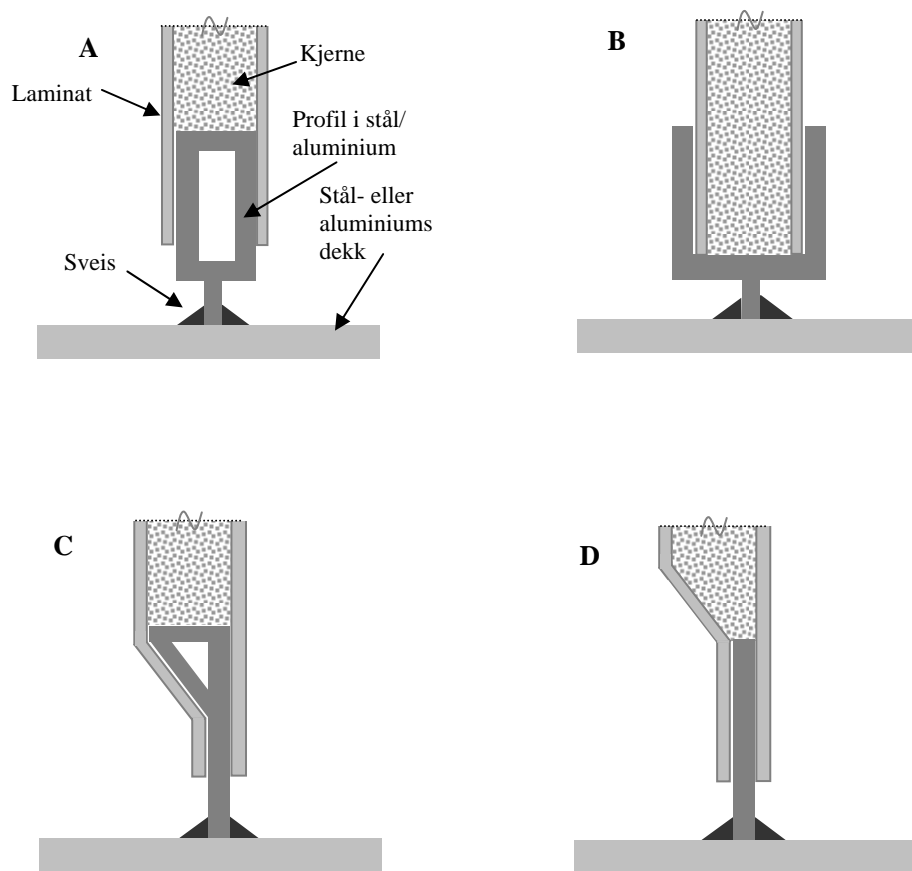
4 Innfesting av sandwich til stål eller aluminiumsdekk

Figur 17 og 18 viser hvordan overbygg i sandwich kan festes til et stål- eller aluminiumsdekk. Overbygget kan limes eller boltes fast til dekket. Normalt vil et limt overbygg gi det sterkeste og beste resultatet. Er lastene lave, vil en boltløsning fungere godt. Normalt vil også boltløsningen være billigst. En innfestingsmetode som benyttes er også å støpe inn en stålskinne på undersiden av sandwichoverbygget som kan sveises fast i ståldekket eller boltes til en tilsvarende skinne i dekket.

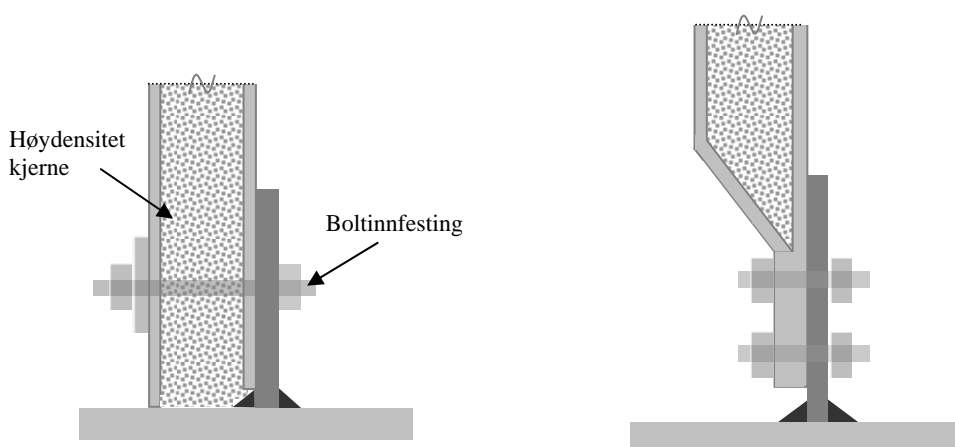
For at en limskjøt skal fungere tilfredsstillende over lang tid, må en rekke forhold være oppfylt. De viktigste er:

- Kopper eller kopperlegeringer bør unngås.
- Messing og bronse koblinger bør lakeres med epoksy før de støpes inn i polyester.
- Aluminium- og stållegeringer bør fortrinnsvis primes før limet påføres.
- Alle metalldeleer bør avfettes før bruk og overflatene bør også pusses/slipes ned.
- Unngå at metall/sandwich skjøter blir liggende under vannflaten
- Dimensjoner skjøten tilstrekkelig (for relevante belastninger)

Detaljer knyttet til utforming etc. for innfestinger, er tilgjengelig i referansene 1, 2 og 3.



Figur 17: Eksempler på liminnfesting av sandwichoverbygg til stål- og aluminiumsdekk



Figur 18: Eksempler på boltinnfesting av sandwichoverbygg til stål- og aluminiumsdekk

4.1 Andre eksempler på innfesting til sandwich

En del dekksutstyr som f.eks. sjakler, vinsjer og kraner etc. er utsatt for store laster. Et dekk i sandwich krever spesielle innfestingsteknikker. Noen eksempler er vist i figuren nedenfor. Det er normalt å forsterke sandwichen lokalt, ved å øke laminattrykkelsen eller ved å støpe inn en metall- eller treplate, slik at kreftene på sandwichpanelet fordeles over et større areal. Utstyr som påfører store momenter, som f.eks. en kran, kan festes til et innstøpt gjennomgående stålrør, se figur 20. Dette fungerer svært bra, men krever noe mer plass.

På militære fartøy er det gjort en undersøkelse (4) av å lage fundament for maskineri og utstyr i tykkveggede komposittmaterialer for spare vekt. Det ble rapportert at det var mulig å spare opp til 50 % ved å lage fundamentene i komposittmaterialer i forhold til å benytte stål. I slike anvendelser kan komposittmaterialenes høye styrke og spesielt den høye spesifikke styrken utnyttes. I tillegg til å spare vekt ble det også hevdet at fundament i komposittmaterialer ville være rimeligere enn tilsvarende i stål (opp til 50 %). Komposittfundamenter ble også hevdet å være gunstig på grunn av god slagresistens og vibrasjonsdempende egenskaper.



Figur 19: Typiske eksempler på innfesting av sjakler, kraner og trossefeste til et sandwichskrog. Eksemplene er hentet fra båten "Bluefin", levert av Mundal Båt AS.



Figur 20: Kranen vist i figur 19 er festet til et gjennomgående stålrør. Hensikten er å fordele kreftene og momentene over et større areal, slik at sandwichdekket ikke skades.

5 Sammenlikning av panelenes mekaniske egenskaper

I dette avsnittet er de mekaniske egenskapene til sandwich- og aluminiumspaneler for overbygg til fiskebåter studert. Det er gjennomført analyser av bøyestivhet og bøyestyrke, samt en analyse av panelenes egenfrekvenser. Enkel bjelketeori og avanserte numeriske beregningsmetoder (FEM) er benyttet. Hensikten var å kartlegge om panelene oppfører seg likt for relevante laster. Tanken bak undersøkelsen er at desto mindre forskjellen er, desto mindre må man justere på design etc. ved en overgang fra aluminium til sandwich.

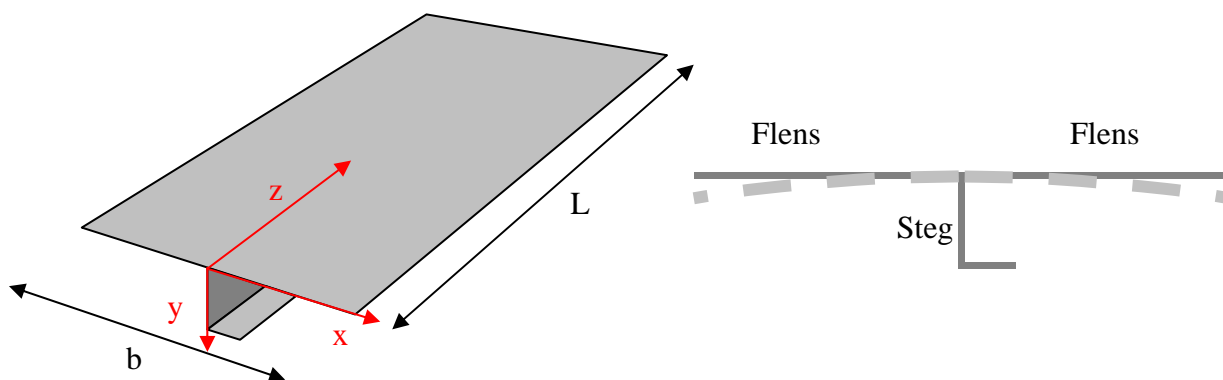
5.1 Analyse av bøyestivhet, egenfrekvenser og styrke

5.1.1 Forenklinger og forutsetninger

Bøyestivhet og belastningsevne for typiske paneler for overbygg til fiskebåter er vurdert med hjelp av analytisk bruk av bjelketeori og numerisk bruk av elementmetoden. Det er i denne sammenhengen greit å gjøre enkelt rede for en del av de forutsetningene som ligger til grunn for disse metodene.

For bjelketeori gjelder det en rekke forutsetninger som må/bør oppfylles for at resultatene skal bli gode ved bruk av metoden. De viktigste, i denne sammenhengen er:

- Lengden av bjelken er mye større enn typisk bredde av tverrsnittet, $b \ll L$ (se figur 21)
- Plane tverrsnitt forblir plane
- Tverrsnittets form endres ikke av belastningen (se figur 21)



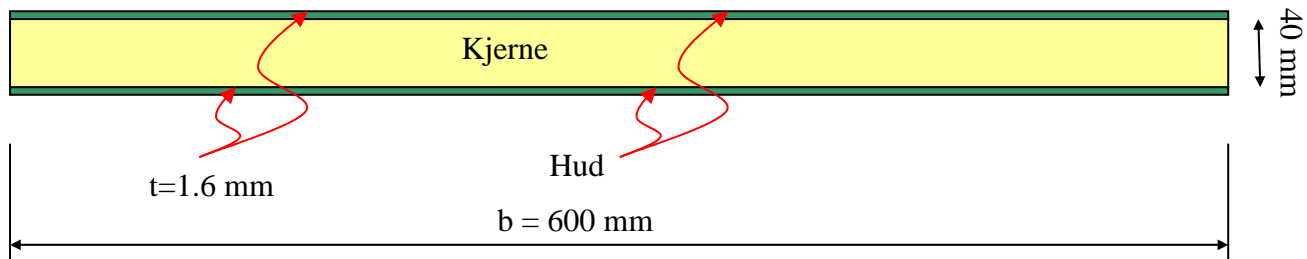
Figur 21: Venstre: For at bjelketeorien skal gi så riktige resultater som mulig bør $b \ll L$. Forholdet mellom b og L er imidlertid ikke optimalt i dette tilfellet, noe som medfører at resultatene ikke er optimale. Høyre: Bjelketeorien neglisjerer formendring av tverrsnittet. Nedbøyning av flensene i forhold til steget kommer derfor ikke med. Dette er en betydelig svakhet når brede bjelketverrsnitt undersøkes.

I bjelketeorien er nedbøyningen bare en funksjon av hvor man befinner seg i bjelkens lengderetning, dvs. at $v=v(z)$. I virkeligheten er det mer komplisert. Nedbøyningen er like mye en funksjon av hvor man befinner seg i tverretningen, dvs. at $v=v(x,z)$. Se figur 21 for detaljer.

De numeriske analysene er gjort i ANSYS. Her benyttes skallemetoder som både besitter plate og membran effekter. Denne metoden sørger for at alle i -planet egenskaper taes med og at forskyvningsfeltet er korrekt ivaretatt, $v=v(x,z)$ (figur 21).

5.1.2 Beregning av treghetsmoment for sandwichbjelke

En prinsippskisse av et sandwichpanel er vist i figur 22. Paneldimensjoner og bestanddeler er listet opp i tabell 11, 12 og 13.



Figur 22: Tverrsnitt av sandwichpanel til overbygg. GRP huden er 1.6 mm tykk mens PVC kjernen er 40 mm tykk. Tverrsnittet har en bredde på 600 mm.

Tabell 11: Fysiske egenskaper til PVC kjernen benyttet i sandwich

Densitet	60	kg/m ³
Kompresjonsstyrke	0.8	MPa
Kompresjonsmodul	0.06	GPa
Tykkelse	40	mm
Vekt pr. m ²	2.4	kg/m ²

Tabell 12: Fysiske egenskaper til 0/90 GRP hud benyttet i sandwich

Vektandel glassfiber	65	vekt. %
Tetthet	1800	kg/m ³
Hudtykkelse	1.6	mm
Vekt	2.95	kg/m ²
E-modul	21.4	GPa
Antatt kompresjon/strekkstyrke	390	MPa

Benytter Steiners sats for treghetsmomentet I til sandwichbjelken

$$I = I_1 + y^2 A = \frac{bt^3}{12} + y^2 bt = \frac{bt}{12} (t^2 + 12y^2)$$

Beregningene gjøres på bjelketverrsnittet med 600 mm bredde da dette samsvarer med spanteavstanden til aluminiumsalternativet.

Setter inn:

$$b = 600 \text{ mm}$$

$$t = 1.6 \text{ mm}$$

$$y = 20 + 0,5 \cdot 1,6 = 20.8 \text{ mm}$$

i likningen for treghetsmomentet.

Dette gir:

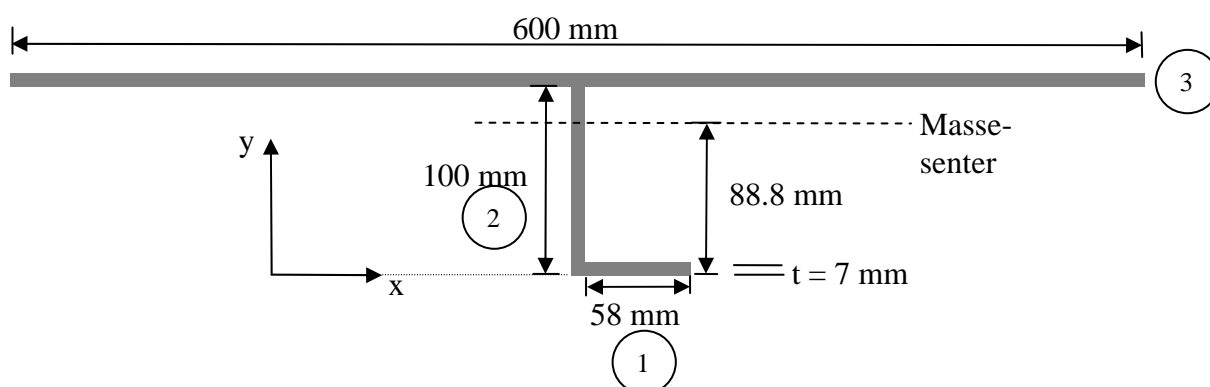
$$I = \frac{600 \cdot 1.6}{12} (1.6^2 + 12 \cdot 20.8^2) = 415539 \text{ mm}^4$$

I beregningen av treghetsmomentet til sandwichbjelken, er bidraget fra kjernen utelatt. Årsaken er kjernens lave stivhet. I og med at det er hud på begge sider av kjernen blir det totale treghetsmomentet

$$I_{\text{sandwich}} = 2 \cdot I = 831078 \text{ mm}^4$$

5.1.3 Beregning av treghetsmoment for aluminiumsbejelke

På tilsvarende måte er det foretatt en forenklet beregning av treghetsmomentet for en seksjon av aluminiumspanelet vha bjelketeori. Beregningen gjøres på en bejelke med en bredde på 600 mm, som tilsvarer spanteavstanden. Tverrsnittet med dimensjoner er vist i figur 23. Typisk avstand mellom spanter/avstivere er 600 mm. Treghetsmomentet av panelet er beregnet ved å ta ut en seksjon av panelet som inneholder en avstiver. For å forenkle beregningene er det valgt å bruke samme godstykkelse på vertikale avstivere som på panelet (7 mm). Denne forenklingen har liten betydning. Gjennomgang av arbeidstegninger av styrhus viser at godstykkelsen varierer noe, men at den hovedsaklig ligger mellom 6 og 8 mm.



Figur 23: Tverrsnitt av aluminiumspanel til overbygg.

Uttrykket for treghetsmomentet blir noe mer omfattende enn for sandwich pga. utformingen av aluminiumstverrsnittet. Først må panelets arealsenter beregnes. Det er gitt av uttrykket

$$\bar{y} = \frac{y_1 A_1 + y_2 A_2 + y_3 A_3}{A_1 + A_2 + A_3},$$

hvor y_1, y_2, y_3 angir arealsenteret til hver komponent angitt ved tallene 1, 2 og 3 i figur 23. Tilsvarende er A_1, A_2 og A_3 arealet av hver komponent.

Tabell 13: Komponentdimensjoner og beregnede størrelser for aluminiumspanelet. Tallene er satt inn i likningene nedenfor.

Komponent	Tykkelse [mm]	Bredde [mm]	Areal [mm ²]	y [mm]	$\bar{y} - y$ [mm]	$(\bar{y} - y)^2 A$ [mm ⁴]	I [mm ⁴]
1	7	58	406	3.5	85.3	2954 092	1 657
2	100	7	700	50.0	38.8	1053 808	583 333
3	7	600	4200	3.5	-14.7	907 578	17 150

Innsatt gir

$$\bar{y} = \frac{3.5 \cdot 406 + 50 \cdot 700 + (100 + 3.5) \cdot 4200}{406 + 700 + 4200} = \frac{1421 + 35000 + 434700}{5306} = 88.8 \text{ mm}$$

Det betyr at massesenteret ligger 88.8 mm over den nedre ytterkanten av flensen, dvs. komponent 1 på figur 23.

Det totale treghetsmomentet for hele panelet fra komponentene $i = 1, 2$ og 3 blir da

$$I_{alu.} = \sum_{i=1}^3 \left((\bar{y} - y_i)^2 A_i + \frac{b_i h_i^3}{12} \right) = 5517618 \text{ mm}^4$$

5.1.4 Sammenligning av bjelketverrsnitt

Forholdet mellom treghetsmomentet for bjelken i sandwich og aluminium, funnet ved forenklet beregning blir:

$$\frac{I_{alu}}{I_{san}} = \frac{5517618}{831078} = 6.6$$

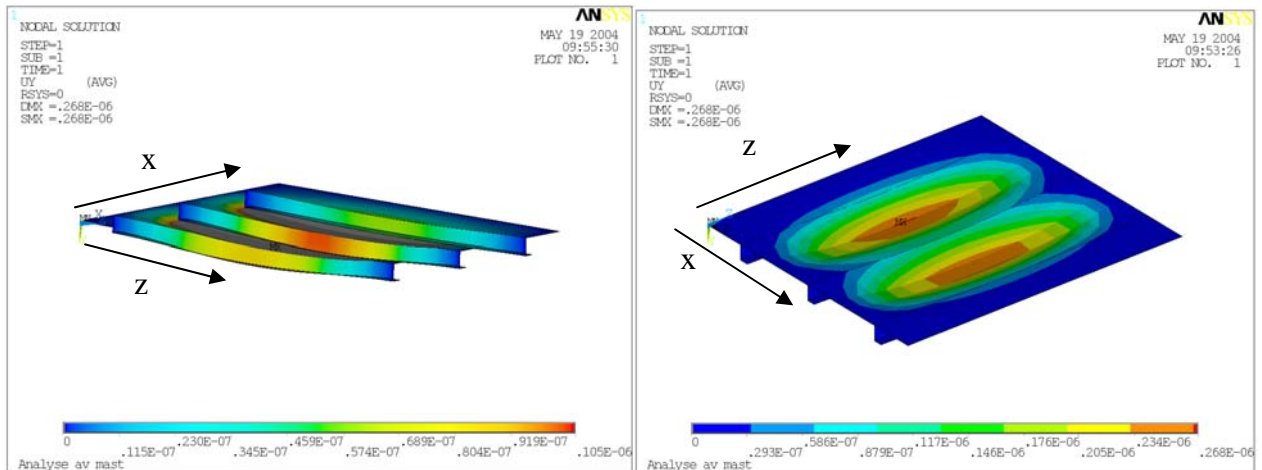
Det betyr at aluminiumsbjelken har et treghetsmoment som er nesten syv ganger så stort som det sandwichverrsnittet har.

Bøystivheten er i følge bjelketeori gitt av treghetsmomentet multiplisert med materialstivheten. Forholdet blir:

$$\frac{E_{alu} I_{alu}}{E_{san} I_{san}} = \frac{70 \text{ GPa} \cdot 5517618}{21.4 \text{ GPa} \cdot 831078} = 21.6$$

Bjelketeorien antyder dermed at for samme horisontale last vil sandwichpanelet bøye ut 21.6 ganger mer enn aluminiumspanelet. Det er mulig at dette ikke er riktig da uttrykkene over egentlig gjelder for en bjelke og ikke et avstivet platefelt. Bjelketeoriens begrensninger kan derfor være en av faktorene som gjør at forskjellen mellom de to alternativene er såpass stor. Dette motiverer en videre studie. En mer detaljert FEM beregning, der modellen får med alle effekter, bla at nedbøyningen $v=v(x,z)$ ble derfor foretatt i ANSYS.

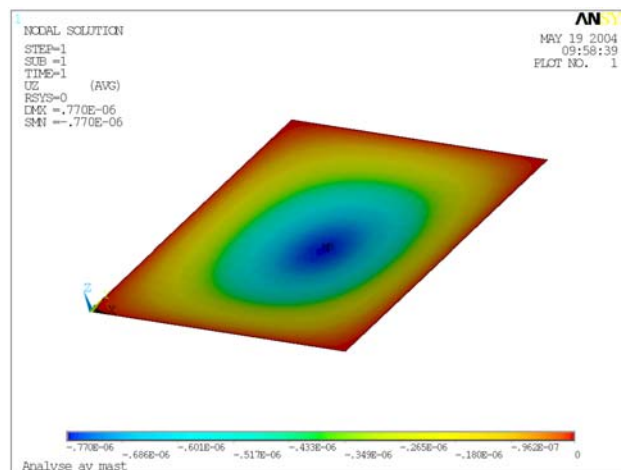
En FEM modell av et panel på 1,8 x 2,0 m ble brukt til å sammenlikne bøystivheten. En jevnt fordelt last ble distribuert ut over begge panelene.



Figur 24: FEM-simulering av utbøyning av aluminiumspanel med jevnt fordelt last avslører tydelig at forskyvningen er sterkt avhengig av hvor man befinner seg i både x og z retning. Den maksimale nedbøyningen finner man midt på platen midt mellom avstiverne. Denne har en verdi som er 2.55 ganger høyere enn den maksimale nedbøyningen av avstiveren.

I figur 24 ser man resultatene for aluminiumsseksjonen. Her avsløres det tydelig at forskyvningen er sterkt avhengig av hvor man befinner seg i både x og z retning. Den maksimale nedbøyningen finner man midt på platen, midt mellom avstiverne. Denne har en verdi som er 2.55 ganger høyere enn den maksimale nedbøyningen av avstiveren.

I figur 25 vises resultatene for sandwichpanelet. Dette panelet har en mye enklere deformasjonsform enn aluminiumsplatene.



Figur 25: FEM-simulering av utbøyning av sandwichpanel med jevnt fordelt last.

Forholdet mellom maksimalnedbøyningene til sandwichpanelet og aluminiumspanelet når vi ser på største nedbøyning i mellom avstiverne blir:

$$\frac{v_s}{v_{af}} = \frac{0.77}{0.268} = 2.9$$

Der v_s er maksimal nedbøyning av sandwichpanelet og v_{af} er maksimal nedbøyning av aluminiumspanelet i feltet mellom avstiverne.

Ser man på nedbøyning av selve avstiverne, blir forholdet naturlig nok høyere da disse bøyes langt mindre ned, se figur 24. Beregningene viser at forholdet mellom maksimal nedbøyning for aluminiumsavstiver og sandwich blir

$$\frac{v_s}{v_{aa}} = \frac{0.77}{0.105} = 7.3$$

Der v_s er maksimal nedbøyning av sandwichpanelet og v_{aa} er maksimal nedbøyning av aluminiumspanelet ved avstiver.

Dette forholdet er også vesentlig lavere enn det beregningene med bjelketeorien antyder. Bjelketeorien ga et forhold på hele 21.6 et tall som er tre ganger for høyt.

Analysene gjort i ANSYS viser at forskjellene i stivhet mellom sandwich- og aluminiumspanelene er størst ved avstiverne og minst i mellom disse. FEM-analysene viser også at bjelketeorien ikke var et egnet redskap i denne sammenhengen.

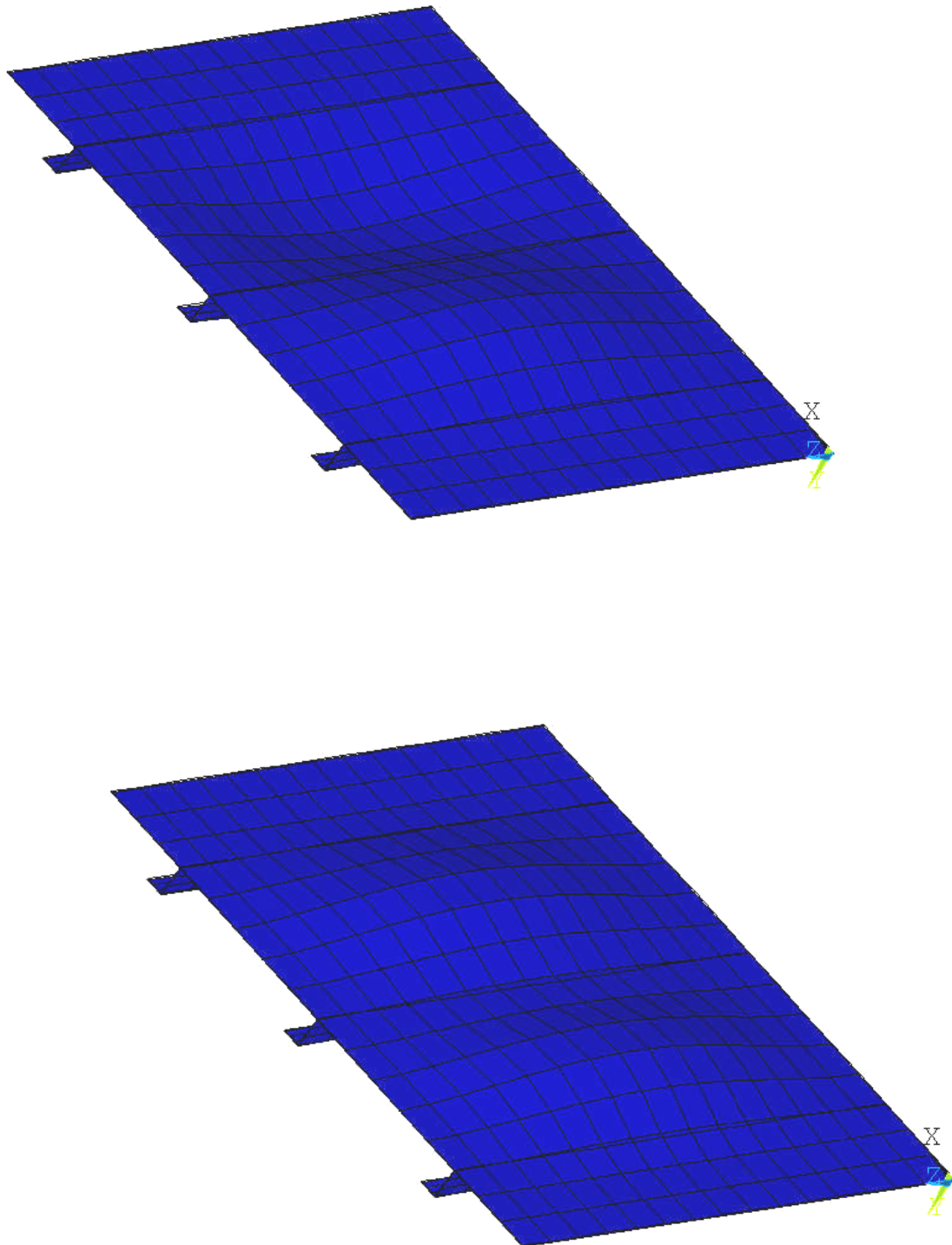
Det er imidlertid fortsatt slik at aluminiumspanelet er stivere enn sandwichpanelet. Dette kan ha positive sider, bla med hensyn på innfesting. En mykere struktur med gode utmattingssegenskaper er en fordel når det gjelder problematikk knyttet til oppsprekking ved innfestinger etc. Det at sandwichpanelet er noe mer fleksibelt kan imidlertid by på problemer knyttet til vibrasjoner i fartøyet. Sandwichpanelets dynamiske egenskaper bør derfor sammenlignes med egenskapene til aluminiumspanelet. Egenfrekvens/svingeform beregningene ble derfor også gjennomført.

5.1.5 Analyse av egenfrekvenser og svingeformer

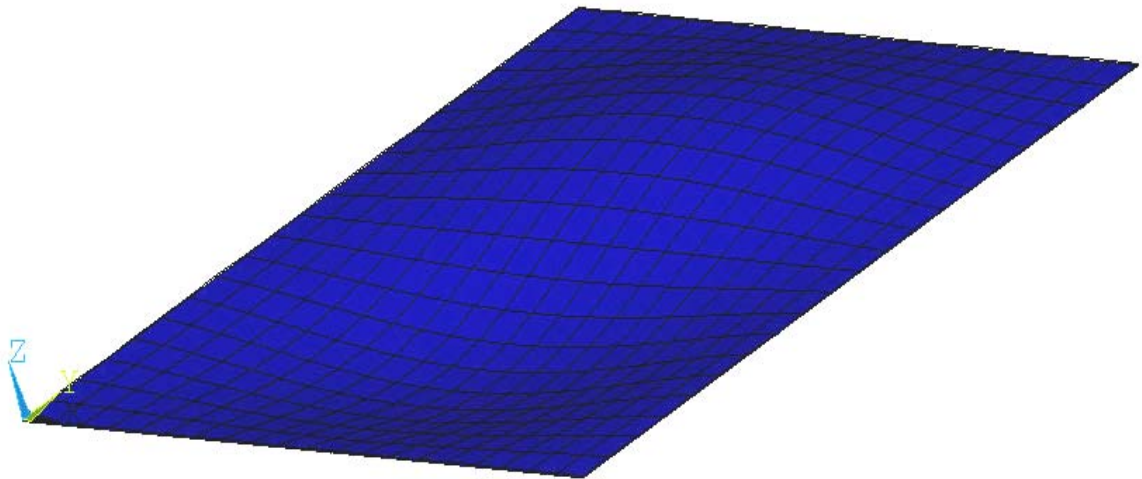
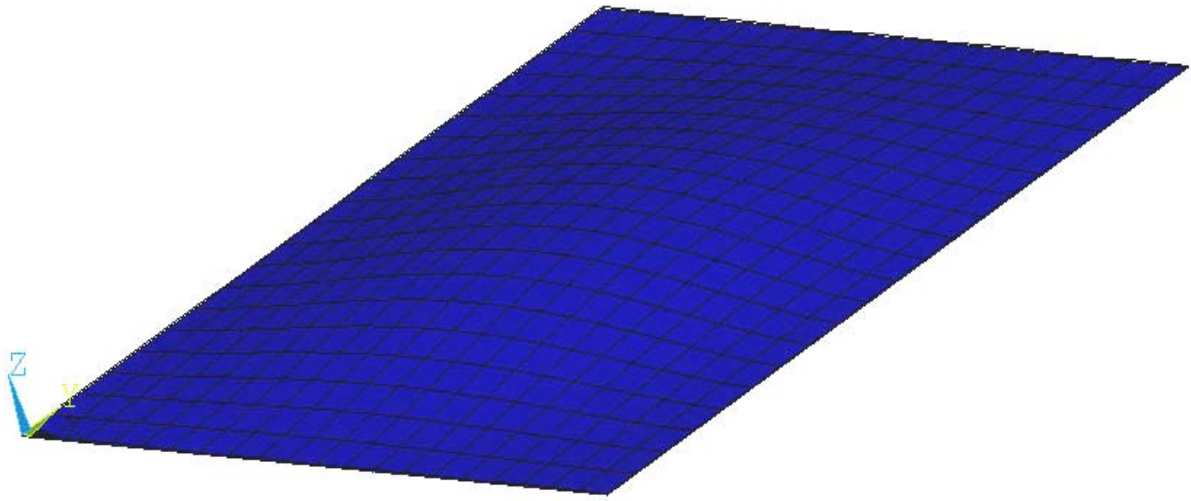
Stivhetsberegningene antyder at sandwichpanelet bare har mellom en tredjedel og en syvendedel av stivheten til aluminiumspanelet. Dette kan skape vibrasjonsproblemer og bør derfor undersøkes. Det er viktig at sandwichløsningen ikke har sin laveste egenfrekvens noe særlig lavere enn det aluminiumsløsningen har da dette kan skape problemer. Det er imidlertid slik at sandwichløsningen er betydelig lettere enn aluminiumsløsningen. Da egenfrekvensene går som kvadratet av forholdet mellom stivhet og masse betyr det at en lett og fleksibel løsning kan ha omtrent samme nedre egenfrekvens som en noe stivere og tyngre løsning.

Resultatene fra ANSYS simuleringene viser at sandwichpanelet har sin laveste egenfrekvens (79 Hz) noe høyere enn det aluminiumspanelet (66 Hz) har. Figur 26 viser de to første svingeformene for aluminiumspanelet mens de to første for sandwichpanelet vises i figur 27. Begge de to første egenfrekvensene til aluminiumspanelet ligger faktisk lavere i frekvens enn den laveste svingefrekvensen til sandwichpanelet. Det betyr sandwichpanelet i prinsippet skal være mindre utsatt for vibrasjoner fra sjøgang, vindlaster og motor enn aluminiumsløsningen.

Beregningene som er foretatt viser dermed at sandwichpanelet er noe mer fleksibelt enn aluminiumspanelet og at det har litt gunstigere egenskaper med hensyn til vibrasjonsproblematikk.



Figur 26: Elementmodell av aluminiumspanelet. Dimensjonen til panelet er: 1.8 m bred og 2.0 m langt. Avstiverne ligger i panelets lengderetning. Horizontal avstand mellom avstiverne er 60 cm. Panelets sidekanter er fast innspent. Figuren øverst viser første egenfrekvens på 66 Hz, mens figuren til under viser andre egenfrekvens på 82 Hz.



Figur 27: Elementmodell av sandwichpanelet. Dimensjonen til panelet er: 1.8 m bred og 2.0 m langt. Panelets sidekanter er fast innspent. Figurene til øverst viser første egenfrekvens på 79 Hz, mens figuren under viser andre egenfrekvens på 135 Hz.

5.1.6 Forenklet styrkevurdering

I tillegg til å sammenligne stivhets- og dynamikegenskapene til sandwich- og aluminiumsløsningen er det interessant å studere eventuelle forskjeller i styrke. Benytter man forenklet teori kan man si at dersom panelene blir utsatt for et ytre moment M , vil bøyepening i en avstand y fra arealsenteret være

$$\sigma = \frac{My}{I}$$

Dersom panelene blir belastet med samme moment M vil forholdet mellom spenningene ytterst i panelene være

$$\frac{\sigma_{alu}}{\sigma_{san}} = \frac{88.8 / 5517618}{21.6 / 831078} = 0.61$$

Forholdet mellom maksimal strekk- eller kompresjonsstyrke for aluminium og sandwich er

$$\frac{\sigma_{alu,maks}}{\sigma_{san,maks}} = \frac{250MPa}{390MPa} = 0.64$$

Dette betyr at

$$\frac{\sigma_{alu}}{\sigma_{san}} \approx \frac{\sigma_{alu,maks}}{\sigma_{san,maks}}$$

Med andre ord at de to panelene har omtrent samme momentkapasitet. Det betyr at med hensyn til laster som forårsaker bøyning av panelene, som f.eks. slag fra bølger og lignende, så kan panelene ansees som ekvivalente. Det er også regnet på vertikal lasteevne, f.eks. last fra overliggende etasjer. Disse lastene blir svært små i forhold til bæreevnen. Beregninger viser at i bunnen av et 10 meter høyt panel, vil spenningen i sandwichen være kun 0,06 % av maksimal vertikal bæreevne. For aluminium er tallet 0,1 %.

Denne vurderingen baserer seg på bjelketeori med de samme svakheter som tidligere. Sandwichløsningen kom feilaktig, ved bruken av denne teorien, lite fordelaktig ut når det gjaldt stivhet. Det er ingen grunn til å anta at noe annet er tilfelle når det gjelder styrke. Følgelig kan man med stor sikkerhet si at de to panelene å anse som likeverdige styrkemessig.

5.2 Konklusjoner

Kort oppsummert viser beregningene ovenfor at et typisk sandwichpanel som vist i figur 21 har omtrent likeverdige mekaniske egenskapene som et avstivet aluminiumspanel. Sandwichpanelet vil være:

- Lettere, noe som er en klar fordel
- Litt mer bøyemykt; noe som er en fordel med hensyn til oppsprekkingsproblematikk og utmatting
- Ha litt høyere egenfrekvenser; en fordel med hensyn på vibrasjoner fra motorer og lignende

- Styrkemessig, med hensyn til vind og bølgelaster er panelene ekvivalente

Man kan derfor, ut i fra rent mekaniske betraktninger, erstatte styrhus og overbygg på fiskebåter som i dag fremstilles i aluminium med sandwich løsninger.

Referanse liste

1. Karl-Axel Olsson og Ronnel P. Reichard, "Sandwich constructions 1" (1989)
2. D. Weissman Berman og K. A. Olsson, "Sandwich constructions 2" (1992)
3. J. Backlund, D Zenkert og B. T. Åstrøm, "Composites and Sandwich structures" (1997)
4. A.P. Mouritz et al, "Review of advanced composite structures for naval ships and submarines", Composite Structures 53 (2001) s 21-41