

STF24 A04011 - Åpen

RAPPORT



Designstudie av RSW tanker fremstilt av sandwich med PVC kjerne og glassfiberarmert herdeplast hud

Alfred Andersen og Reidar Stokke

www.sintef.no

SINTEF Materialer og kjemi

Juli 2004

TITTEL

Designstudie av RSW tanker fremstilt av sandwich med PVC kjerne og glassfiberarmert herdeplast hud

FORFATTER(E)

Alfred Andersen og Reidar Stokke

OPPDRAGSGIVER(E)

Fiskeri- og havbruksnæringens forskningsfond (FHF)
Norges forskningsråd

RAPPORTNR. STF24 A04011	GRADERING Åpen	OPPDRAGSGIVERS REF. Terje Flatøy / Turid Hiller	
GRADER. DENNE SIDE Åpen	ISBN	PROSJEKTNR. 24446500	ANTALL SIDER OG BILAG 25
ELEKTRONISK ARKIVKODE		PROSJEKTLEDER (NAVN, SIGN.) Reidar Stokke	VERIFISERT AV (NAVN, SIGN.) Reidar Friberg
ARKIVKODE	DATO 08.07.04	GODKJENT AV (NAVN, STILLING, SIGN.) Reidar Stokke, Spesialrådgiver	

SAMMENDRAG

Det er gjennomført en studie for å vurdere et konsept med løse RSW-tanker (Refrigerated Sea Water) i sandwich som alternativ til tradisjonell stålplategarnering. De viktigste årsakene til å vurdere en sandwichløsning er:

- Stort potensial for vektreduksjon
- Forbedret isolasjonsevne vil gi mindre behov for å sirkulere sjøvann og bedre kvalitet på fisken.
- Redusert behov for vedlikehold
- Lettere og bedre renhold

Det ble tatt utgangspunkt i et 44m kombinert snurper og snurravadfartøy med 8 RSW-tanker. Det er gjennomført en rekke numeriske beregninger (FEM) av de mest kritiske delene av tankene for å komme frem til en tilfredsstillende konstruksjonsløsning i sandwich.

Analysene viser at løse RSW-tanker i sandwich er et realistisk alternativ til stålplategarnering og vil gi en betydelig vektbesparelse. For det aktuelle fartøyet er det beregnet at bruk av sandwich i RSW-tankene vil gi en vektbesparelse på ca. 40 tonn i forhold til nåværende stålplategarnering, en reduksjon fra 65 tonn til 25 tonn. Dette representerer en vektbesparelse på nær 10 % av lettskipsvekten.

STIKKORD	NORSK	ENGELSK
GRUPPE 1	Materialteknologi	Materials Technology
GRUPPE 2	Polymerer	Polymers
EGENVALGTE	Elementberegninger	Finite element calculations
	Statisk	Static
	Sandwich	Sandwich

INNHALDSFORTEGNELSE

1	Innledning	3
2	Bøystivhet hos sandwich og stål.....	6
3	FEM modell av RSW tank i sandwich.....	8
4	Materialegenskaper og belastning.....	10
5	Designstrategi	11
6	Designstudie av RSW tank.....	11
6.1	Vegg nr. 1: 7.50x3.75 m ²	11
6.1.1	Kombinasjon 1: 3 og 4 mm hud med 75 mm H80 kjerne.....	11
6.1.2	Kombinasjon 2: 3 mm hud 100 mm H45 kjerne.....	12
6.1.3	Ytterligere kombinasjoner og forslag til løsning	12
6.1.4	Vegg med ytterligere avstivninger	14
6.1.5	Konklusjon vegg nr. 1	15
6.2	Vegg nr. 2: 3.75x8.00 m ²	16
6.2.1	4 mm hud, 75 mm H80 kjerne og 3 mm hud, 100 og 120 mm H45 kjerne	16
6.2.2	3 og 4 mm hud 120 og 150 mm, H80 kjerne	17
6.2.3	Vegg med ytterligere avstivning I.....	19
6.2.4	Vegg med ytterligere avstivning II	20
6.2.5	Konklusjon vegg nr. 2	22
7	Diskusjon rundt valgt design	22
8	Vektberegninger for valgt design	24
9	Konklusjon	25
	Referanseliste	25

1 Innledning

På et 44 meter kombinert snurper og snurrevadfartøy er det 8 stk. RSW (Refrigerated Sea Water) tanker. Disse tankene er oppbevaringstanker for fisken som fanges på feltene. Den døde fisken helles over i de enorme tankene som er fylt med avkjølt sjøvann. Dette er en metode som sikrer at fiskens kvalitet ikke forringes i nevneverdig grad før den taes i land. Volumet av RSW tanker ombord i denne fartøytypen ligger ofte i mellom 700 og 1000m³. Den totale overflaten av tankene inkludert trunker er over 1000 m² på et fartøy av denne typen så det er snakk om betydelige dimensjoner. Et slikt fartøy er avbildet i figur 1.



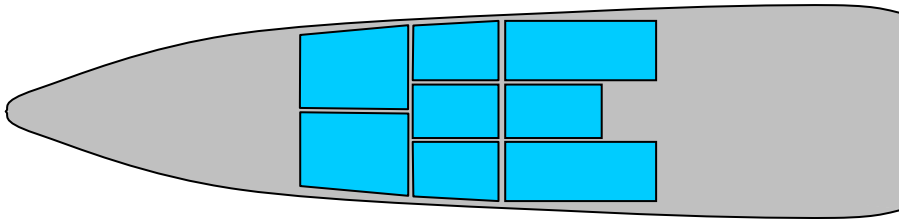
Figur 1: Et 44 meter snurrevadfartøy med 8 RSW tanker. Tankene er hovedsakelig montert under fartøyets vannlinje.

De viktigste årsakene til å vurdere et konsept med løse RSW-tanker i sandwich er:

- Potensial for vektreduksjon
- Forbedret isolasjonsevne som vil gi mindre behov for å sirkulere sjøvann og dermed forbedre kvaliteten på fisken
- Redusert behov for vedlikehold
- Lettere og bedre renhold

Dagens løsning består av innvendig garnering med stålplater og injisert PUR-skum mellom stålplater og skott. Stålplatene blir i noen tilfeller sveist fast til spantene i skroget slik at de bidrar til styrken i skroget. I andre tilfeller blir garneringsplatene atskilt fra stålskroget med trebjelker. I disse tilfellene bidrar ikke garneringen til styrken i skroget. Typiske problemer med disse løsningene er kuldebroer og dårlig isolasjon; oppsprekking i garneringen, noe som ofte skjer, gir luktproblemer som det er vanskelig å fjerne. Det er også et betydelig korrosjons- og vedlikeholdsproblemer. Malingen som benyttes for vedlikeholdet har også lett for å flasse av.

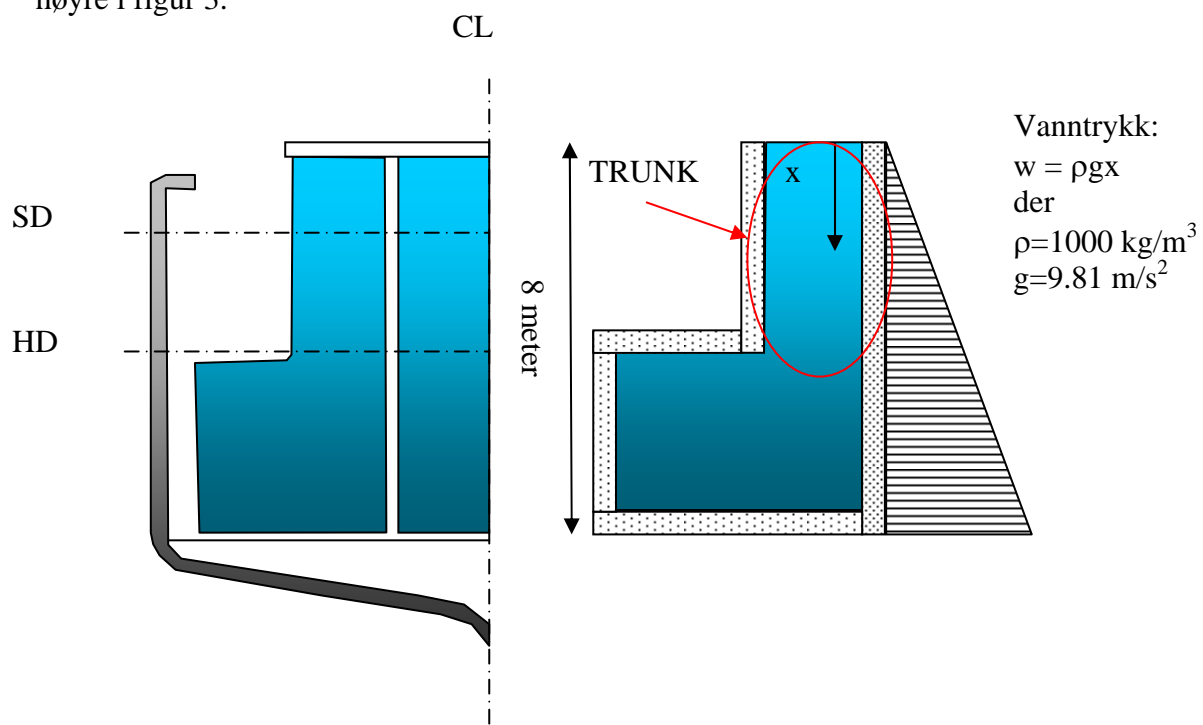
I dag er det vanlig å produsere en rekke tanker og beholdere i kompositter. Disse tankene benyttes i kjemisk industri, i offshorevirksomhet og i fritidsmarkedet. Komposittmaterialer har en rekke fordeler med hensyn til styrke og vekt i forhold til tradisjonelle materialer som stål.



Figur 2: Skisse av fartøyet med RSW disposisjon. Det er 8 tanker totalt.

Komposittenes spesifikke styrke (styrke i forhold til vekt) er mye høyere enn den spesifikke styrken til tradisjonelle bulkmaterialer som stål og aluminium. I tillegg kan kompositter benyttes i sandwichløsninger der bøyestivhet er totalt overlegen den man finner i vanlige plater. Dette kommer vi tilbake til senere i rapporten. Sandwichmaterialer har også den fordelen at de er ferdig isolerte og at kondensproblemer er så godt som eliminert.

I figur 3 er det vist et snitt i gjennom halve fartøyet. Tankene er dimensjonert for vanntrykk som varierer lineært fra 0 (topp trunk) til 0.07848 N/mm^2 (bunn RSW-tank). Vanntrykket er vist til høyre i figur 3.

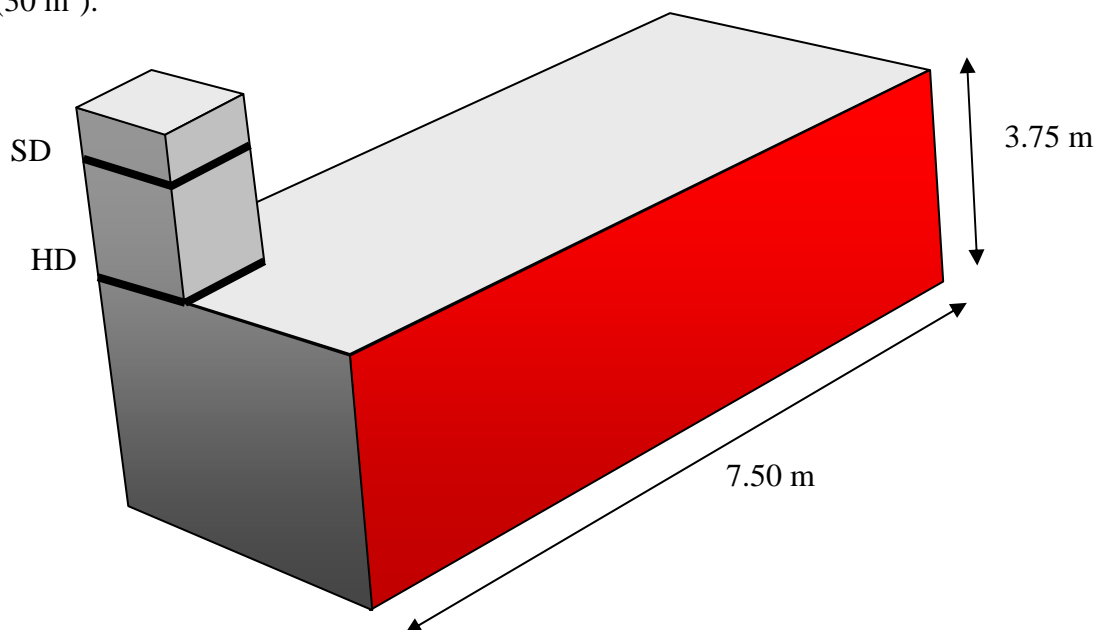


Figur 3: Til venstre vises et snitt i gjennom halve skipet. S.D. betyr Shelterdekk mens H.D. betyr Hoveddekk. Total høyde av RSW tank med trunk er 8 meter. Selve trunken er i overkant av 4 meter. Vanntrykket er vist til høyre. Det varierer lineært som en funksjon av hvor langt nede i tanken man befinner seg.

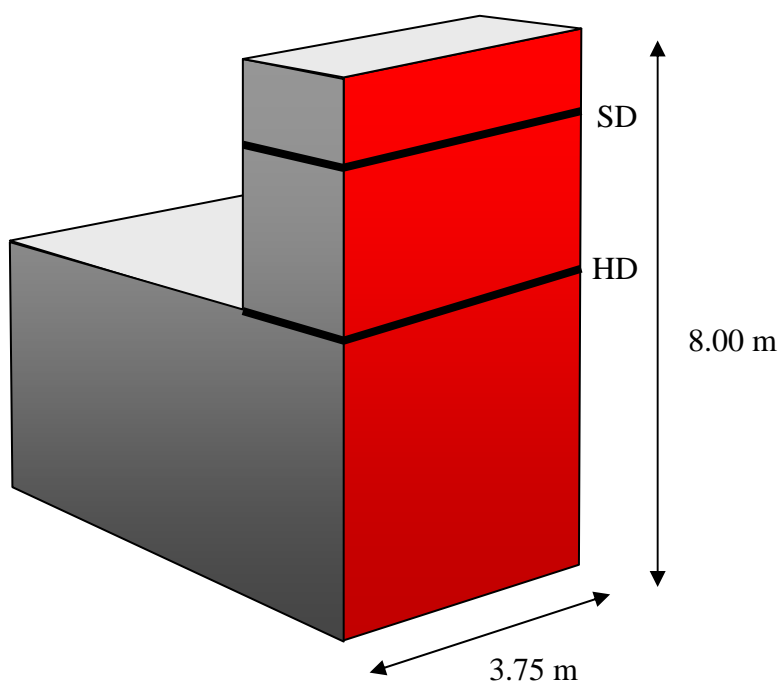
Utgangspunktet for denne rapporten er at man vil vurdere å erstatte dagens tradisjonelle løsning med stålplategarnering med løse tanker i sandwich med glassfiberarmert herdeplast som hudlaminater og en kjerne av PVC skum. Med en slik sandwichløsning får man stive, sterke, lette og ferdigisolerte tanker som et spennende alternativ til dagens stålgarnerte løsning. Hvorvidt dette er gjennomførbart og om man sparer vekt, eventuelt hvor mye vekt man sparer er det som

skal undersøkes i denne rapporten. Potensialet for vektbesparelser er stort da det er snakk om store deler av skipet.

Til analysene plukkes de antatt mest kritiske tankveggene ut. Det er de lengste og høyeste veggene som vil få de største påkjenningene fra vanntrykket. Lar det seg gjøre å fremstille nettopp disse i en sandwichløsning kan man regne med at hele RSW-systemet kan bygges slik. De to tankene som er ansett som mest kritiske er illustrert i figur 4 og figur 5. De analyserte veggene er farget med rødfarge. Veggene størrelse er henholdsvis 7.50 x 3.75 meter (28 m²) og 3.75 x 8.00 meter (30 m²).



Figur 4: Den røde veggen med dimensjonene 7.50x3.75 m² er analysert. Vanntrykket ved Hoved dekk er 0.0417 N/mm² og 0.0785 N/mm² i bunn av tanken (lineær variasjon). Avstivninger er ikke vist på figuren. SD=Shelterdekk, HD=Hoveddekk.

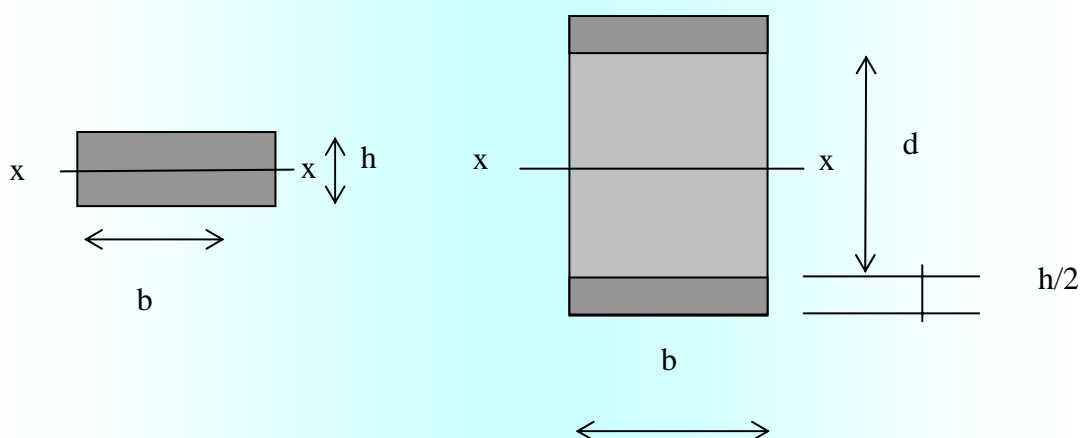


Figur 5: Den røde veggen med dimensjonene 3.75x8.00 m² er analysert. Vanntrykket ved toppen er 0.0 N/mm² og 0.0785 N/mm² i bunn av tanken (lineær variasjon). SD=Shelterdekk, HD=Hoveddekk

2 Bøyestivhet hos sandwich og stål

Hvis man ønsker å si noe om en bjelkes eller plates bøyestivhet må man kjenne bjelkens eller platens 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 5) bli:

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



Figur 6: Venstre: Bjelke med bredde b og høyde h bøyer om aksene x - x . Høyre: Bjelke med bredde b , kjernetykkelse d og hud med tykkelse $h/2$ bøyer om aksene x - x

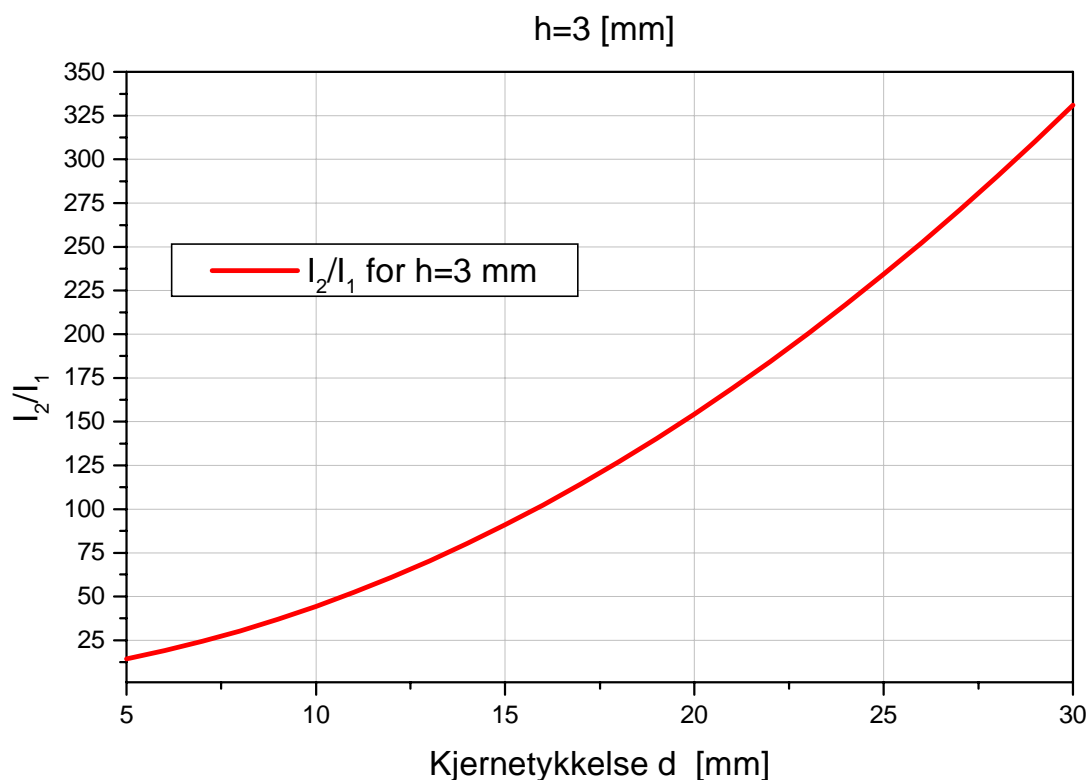
Hvis man derimot tenker seg en bjelke bygget opp som et sandwich vil man få et helt annet uttrykk for treghetsmomentet og dermed helt andre egenskaper i bøyesammenheng. Siden treghetsmomentet varierer med kvadratet av avstanden fra x - x aksene er det viktig å ha det "effektive" materialet så langt som mulig unna x - x aksene (vist til høyre i figur 6). For en sandwichbjelke kan man neglisjere kjernens bidrag til treghetsmomentet. Kjernens primæroppgave er å "holde" huden vekk i fra x - x aksene kan man si meget forenklet.

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 stift et sandwich er i forhold til et massivt tverrsnitt når samme mengde komposittmateriale benyttes:

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

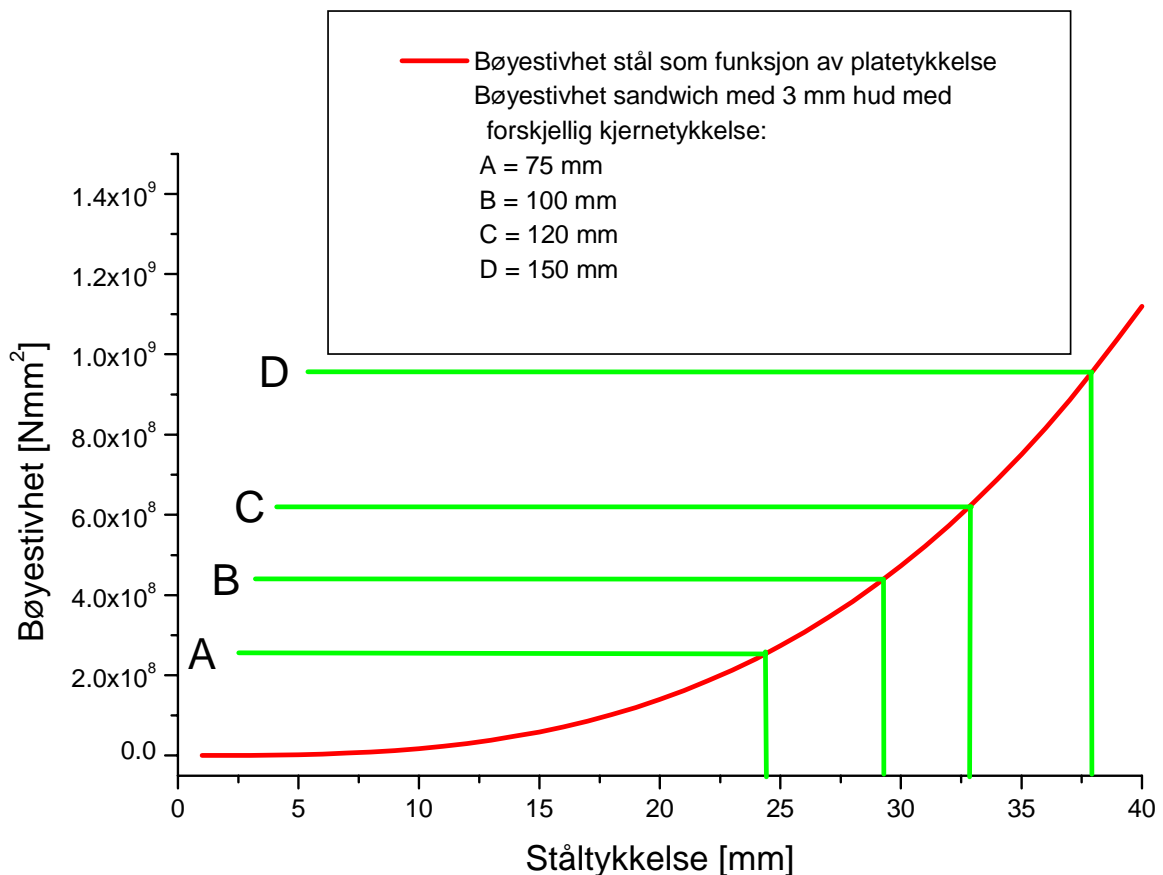


Figur 7: Bøyestivheten til sandwich i forhold til bøyestivheten for et massivt tverrsnitt når sandwich huden (2×1.5 mm) og massiv plate har samme tykkelse, 3 mm

Figur 7 viser uttrykket grafisk for $h=3$ mm. 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 kjerne på 30 mm har en bøyestivhet (treghetsmoment) som er 331 ganger høyere enn en bjelke med tykkelse på 3 mm (h).

Ønsker man å sammenligne bøyestivheten til en sandwichplate med glassfiberarmert herdeplast i huden og PVC skum i kjernen med en stålplate må man gange platens treghetsmoment 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 8.

Tilsvarende hvis sandwich hudens elastisitetsmodul er 27000 MPa og hudtykkelse på 1,5 mm ganges med I_2 og plottes for variabel kjernetykkelse så ser man i figur 8 at et sandwich med 100 mm kjerne og 3 mm hud har samme bøyestivhet som en stålplate på omtrent 29 mm. Dette viser tydelig hvor bøyestive sandwich geometrier er i forhold til konvensjonelle massive tverrsnitt.

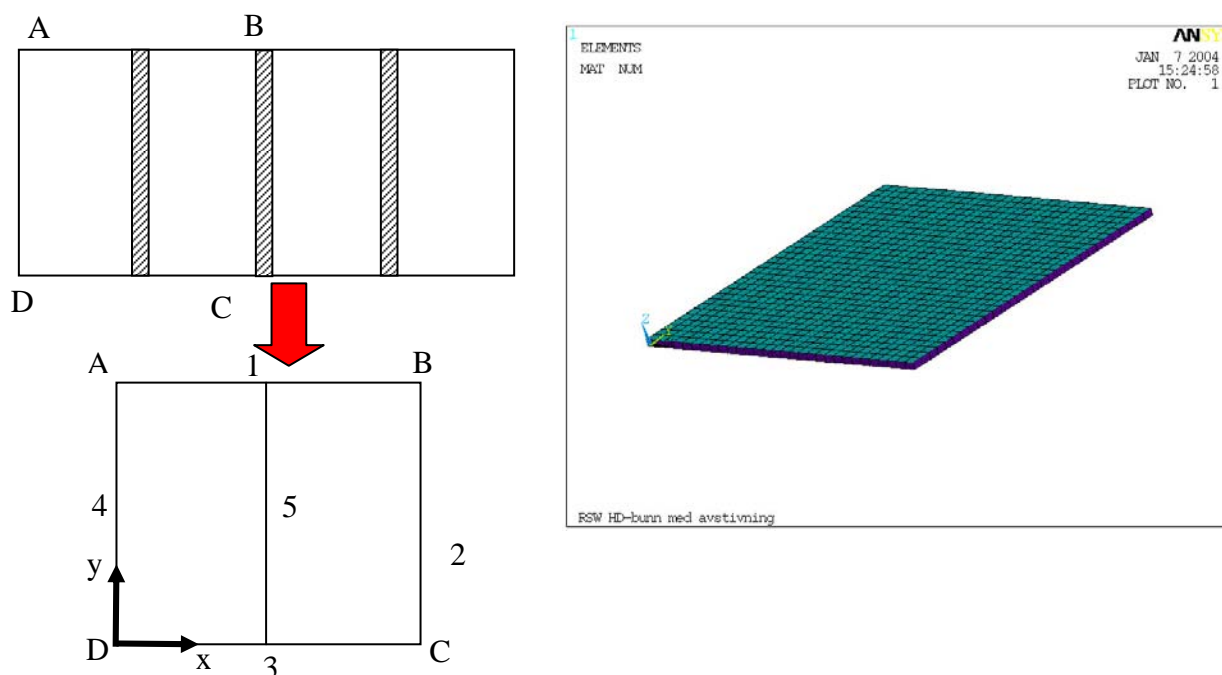


Figur 8: Bøvestivheten til en sandwich med 3 mm hud og variabel kjernetykkelse er sammenlignet med en massiv stålplate. F.eks: Med 3 mm hud og 75 mm kjerne har sandwichet samme bøvestivhet som en 24 mm tykk stålplate. Til sammenligning veier en 24 mm stålplaten 11 ganger så mye som et sandwich med 3 mm hud. En 24 mm stålplate veier rundt 187 kg/m² mens et sandwich med 3 mm hud og 75 mm H80 kjerne veier 17.4 kg/m². Stivheten til kjernen er negligjert i beregningene.

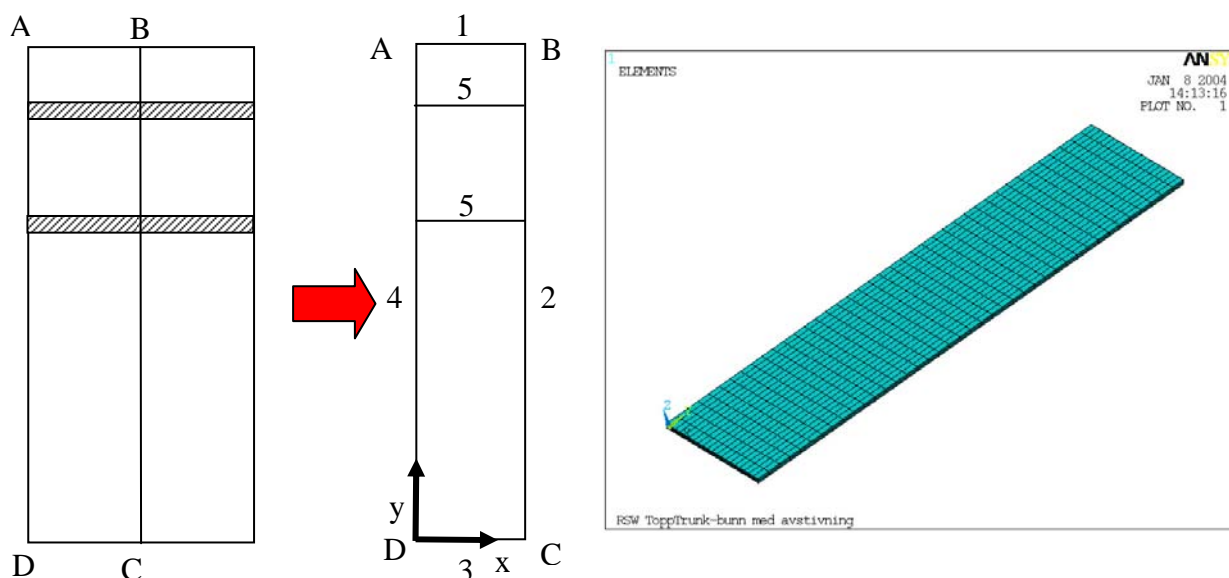
3 FEM modell av RSW tank i sandwich

Beregningsmodellene er bygget opp i det numeriske simuleringsprogrammet ANSYS. Huden på sandwichet er bygget opp av skallelementet SHELL63 mens kjernen er bygget opp med volumelementet SOLID45. Grunnet symmetri er kun halvparten av tankveggen modellert. Tankveggen som er vist i figur 4 er modellert ved hjelp av 30x30 elementer til huden og 30x30x4 elementer til kjernen, dvs. at det totalt benyttes 5400 elementer i modellen. Symmetriaksene og elementmodellen er vist i figur 9. Tankveggen som er vist i figur 5 er modellert ved hjelp av 20x40 elementer til huden og 20x40x4 elementer til kjernen, dvs. at det totalt benyttes 4800 elementer i modellen. Symmetriaksene og elementmodellen er vist i figur 10.

Randbetingelsene er utformet slik at det ikke tillates noen forskyvning normalt på rendene eller rotasjon om randens akse. (f.eks. langs flate parallelt med x-aksen tillates ikke forskyvning i y- og z-retning eller rotasjon om x-aksen). Avstivningene er modellert slik at det ikke tillates forskyvning ut av planet. Dette vises i detalj i figur 9 og figur 10. Nomenklaturet i figurene er som følger; *u* betegner forskyvning og *rot* betegner rotasjon.



Figur 9: Til venstre: Skisse av vegg og modellert veggflate med randbetingelser: 1) $u_y = u_z = \text{rot}_x = 0$, 2) $u_x = u_z = \text{rot}_y = 0$, 3) $u_y = u_z = \text{rot}_x = 0$, 4) $u_x = u_z = \text{rot}_y = 0$, 5) $u_z = 0$. Til høyre: ANSYS elementmodellen for $\frac{1}{2}$ del av vegg. Nomenklaturet i figurene er som følger; u betegner forskyvning og rot betegner rotasjon.



Figur 10: Til venstre: Skisse av vegg og modellert veggflate med randbetingelser: 1) $u_y = u_z = \text{rot}_x = 0$, 2) $u_x = \text{rot}_y = 0$, 3) $u_y = u_z = \text{rot}_x = 0$, 4) $u_x = u_z = \text{rot}_y = 0$, 5) $u_z = 0$. Til høyre: ANSYS elementmodellen for $\frac{1}{2}$ del av vegg. Nomenklaturet i figurene er som følger; u betegner forskyvning og rot betegner rotasjon.

4 Materialelegenskaper og belastning

Huden kan bygges opp av f. eks 2xLT 2000 glassfiber armeringsmatter fra Devold AMT eller lignende. Dette er en kraftig 0/90 glassfibermatte som gir balanserte 4 lags laminaer med gode mekaniske egenskaper. Laminatrykkelsen blir omtrent 3-4 mm avhengig av produksjonsmetode. Produksjonsmetoden kan variere men håndopplegg og vakuuminjeksjon er vanligst. Særlig vakuuminjeksjon gir laminaer med meget gode og jevne resultater.

Materialdata som er nødvendig for simuleringene av laminaer i polyester/vinylester og LT2000 glassfiber er resultater fra mekanisk testing SINTEF har utført på injiserte laminaer (SINTEF Rapport STF24 F02053). Til kjernemateriale blir det hovedsakelig benyttet en Divinycell H Grade med tetthet 80 kg/m^3 (H 80) med materialdata hentet fra leverandørens datablad.

Følgende materialdata er benyttet i vurderingene:

HUD : 2xLT2000 0/90 $V_f=53\%$ (laminaet ligger i XY-planet):

- Stivhet i planet: $E_x=E_y=27000 \text{ MPa}$
- Stivhet ut av planet: $E_z=8000 \text{ MPa}$
- Skjærstivhet i planet: $G_{xy}=5000 \text{ MPa}$
- Tverrkontraksjon: $\nu=0.2$
- Styrke og bruddforlengelse i strekk og trykk: $\sigma_u=460 \text{ MPa}$, $\epsilon_u=1.8-2.2 \%$
- Skjærstyrke: $\tau_{xy}=70 \text{ MPa}$
- Tetthet: $\rho \approx 1.9 - 2.1 \text{ g/cm}^3$

Skumkjerne: H80:

- Stivhet: $E=85 \text{ MPa}$
- Skjærstivhet: $G=31 \text{ MPa}$
- Styrke i strekk: $\sigma_u=2.2 \text{ MPa}$
- Styrke i trykk: $\sigma_u=1.2 \text{ MPa}$
- Skjærstyrke: $\tau_u=1.0 \text{ MPa}$
- Tetthet: $\rho = 80 \text{ kg/m}^3$

Skumkjerne: H45:

- Stivhet: $E=40 \text{ MPa}$
- Skjærstivhet: $G=18 \text{ MPa}$
- Styrke i strekk: $\sigma_u=1.2 \text{ MPa}$
- Styrke i trykk: $\sigma_u=0.55 \text{ MPa}$
- Skjærstyrke: $\tau_u=0.5 \text{ MPa}$
- Tetthet: $\rho = 48 \text{ kg/m}^3$

Belastning:

- Lineært fordelt vanntrykk med maksimalt 8 meter vannsøyle.

Analysene er lineært elastiske både med hensyn på materialelegenskaper og geometri.

5 Designstrategi

Det er mange måter å konstruere RSW tankene på. Det viktige er at de fyller alle funksjonskrav og at de er lettere enn dagens løsning. Samtidig må de være et reelt økonomisk alternativ. Er løsningene for kostbare økonomisk blir de ikke valgt selv om de er aldri så bra. Den kostnadsdrivende komponenten for sandwichmaterialer er kjerne. Jo tykkere og hardere kjerne, jo dyrere blir sandwichet. Jo tynnere og dårligere kjerne, jo billigere blir løsningen, men samtidig svekkes de mekaniske egenskapene slik at det blir nødvendig med ytterligere avstivning.

For å illustrere hvordan kernetykkelsen innvirker på prisen gjengis følgende standard blokk priser på Divinycell H80 PVC kjernemateriale fra produsenten DIAB:

- 75 mm tykkelse, Kr. 890.- /m²
- 100 mm tykkelse, Kr.1050.- /m²
- 150 mm tykkelse, Kr.1680.- /m²
- 200 mm tykkelse, Kr.2310.- /m²
- 250 mm tykkelse, Kr.2940.- /m²

Prisøkningen for å gå opp i tetthet er også signifikant. For eksempel koster 40 mm H80 460.-/m² mens 40 mm H60 koster 340.-/m² (Prisene er basert på bestilling av realistisk kvantum).

I korthet gjelder det å finne en kombinasjon av hudtykkelse, kjerne type og tykkelse samt avstivningssystem som gir en lett, teknisk tilfredsstillende og økonomisk realiserbar løsning.

6 Designstudie av RSW tank

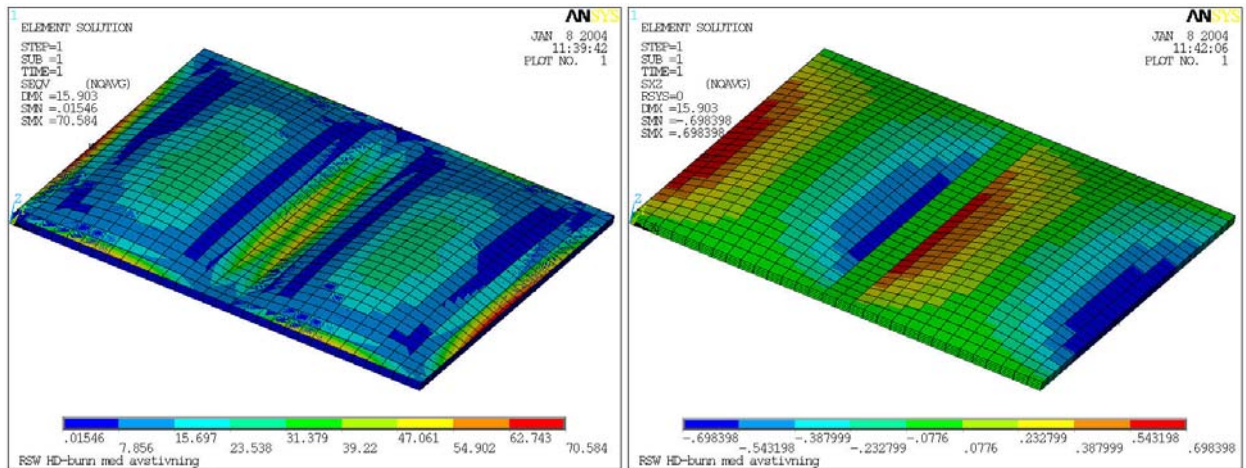
6.1 Vegg nr. 1: 7.50x3.75 m²

Den første vegg som skal studeres kommer fra den tanken som er illustrert i figur 4. Veggen er 7.5 meter lang og 3.75 meter høy. Midt på veggen går det en vertikal avstivningsbjelke som forhindrer en hver forskyvning der. Dette er skissert i figur 9. Følgende parametere blir variert i studien: laminattykkelse, kjerne type og kernetykkelse samt antall vertikale stivere.

6.1.1 Kombinasjon 1: 3 og 4 mm hud med 75 mm H80 kjerne

Veggen er avstivet som vist i figur 9. Analysen viser at utbøyningen blir maksimalt 15 mm for denne hud/kjerne kombinasjonen. Simuleringer av veggen med 3 og 4 mm hud og 75 mm H80 kjerne viser at de interlaminære skjærspenningene i kjernen blir for høye.

Studien indikerer at det nettopp blir de interlaminære skjærspenningene τ_{yz} og τ_{xz} i kjernen som blir de kritiske parameterene i denne studien. Spenningene som taes opp i huden er ikke kritiske, tvert i mot er de innenfor det forsvarlige. I figur 11 vises spenningene i huden samt spenningssituasjonen i kjernen. Disse resultatene motiverer videre parameterstudier

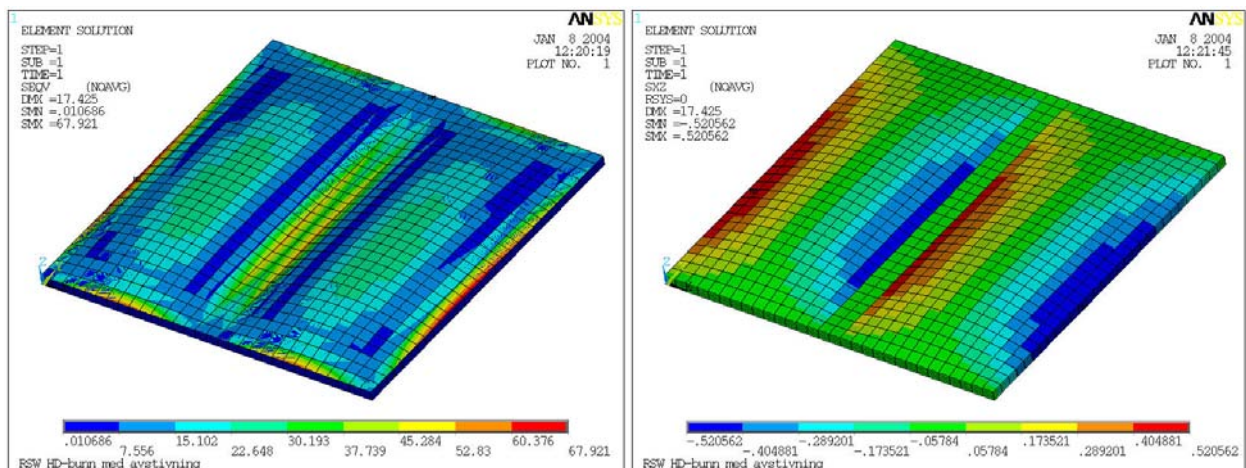


Figur 11: Von Mises ekvivalente spenning σ_{eqv} ligger under 75 MPa. Dette viser at huden er lastet til 16 % av brudd. I-planet skjærspenningen τ_{xy} ligger imidlertid opp i mot 0.7 MPa som er 70 % av bruddspenningen..

6.1.2 Kombinasjon 2: 3 mm hud 100 mm H45 kjerne

Ønsker nå å studere virkningen av en tykkere men lettere kjerne. Økt kjernetykkelse gir en stivere sandwich men lettere kjerne gir lavere skjærstyrke. Hvis en slik kombinasjon kan benyttes vil det medføre spart vekt og sparte kostnader. Det viser seg også at det er liten forskjell mellom 3 og 4 mm hud. Velger derfor å benytte 3 mm hud.

Veggen er avstivet som vist i figur 9. Ved å øke kjernetykkelsen men gå ned i kvalitet er det mulig at man får en god nok løsning. Det viser seg imidlertid at man grunnet H45 sin lave bruddstyrke går over skjærbruddspenningen i skummet. Dette er vist i figur 12.



Figur 12: Von Mises ekvivalente spenning σ_{eqv} ligger under 67MPa. Dette viser at huden er lastet til 15 % av brudd. I-planet skjærspenningen τ_{xy} ligger imidlertid opp i mot 0.5 MPa som er 100 % av bruddspenningen til H45 kjernen, dvs. skjærbrudd i kjernen

6.1.3 Ytterligere kombinasjoner og forslag til løsning

Ingen av de foreslåtte kombinasjonene av hud og kjerne har hittil gitt tilfredsstillende resultater. Uten å endre avstivningssystemet som er vist i figur 9 forsøkes det derfor med flere og kraftigere alternativer. Kombinasjon 1 med 3 eller 4 mm hud og 75 mm H80 kjerne gir brukbare resultater

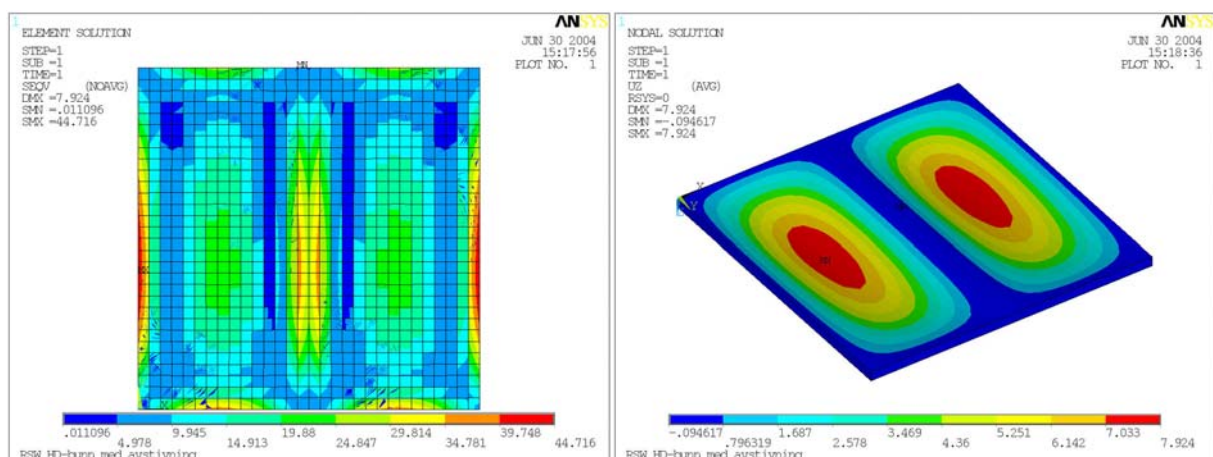
men ligger alt for nær skjærbrudd i kjernen. Kombinasjon 2 med 3 mm hud og 100 mm H45 gir heller ikke tilfredsstillende resultater. Det viser seg også at kjøringene med 4 mm hud og 100 mm H45 heller ikke bedrer situasjonen. Huden er med andre ord mer enn tilstrekkelig. Det handler nå om å finne en egnet kjernetykkelse slik at skjæroverføringen fungerer bedre. Undersøkelsene så langt tyder det på at H45 kjernen er for dårlig til dette formålet da denne kjernen har for lav skjærstyrke. Fortsetter derfor analysene med andre tykkelser H80.

Første alternativ er 3 mm hud med 100 mm H80 kjerner. Denne kombinasjonen gir en maksimal nedbøyning på omtrent 12 mm. Spenningene i huden fortsatt lave. Det viser seg også at spenningsbildet i skummet har endret seg til det bedre. Det interlamminære skjærnivået er imidlertid fortsatt oppe i over 50 % av bruddstyrken. Ved å øke til 4 mm hudtykkelse endrer ikke skjærspenningene i skummet seg

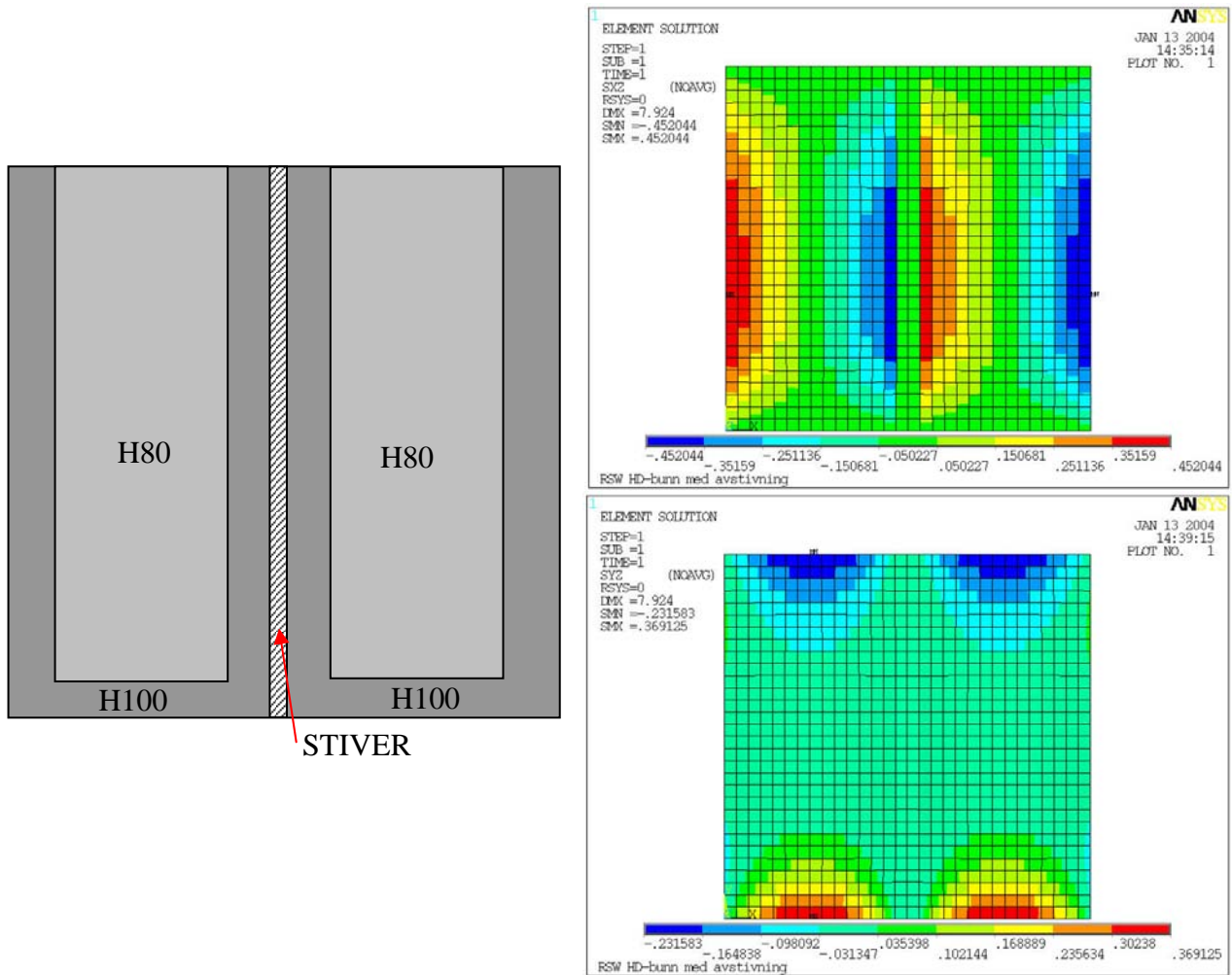
Øker man til 120 mm H80 kjernetykkelse faller det interlamminære skjæret ned i 0.44 MPa dvs. 44 % av brudd. Analysene viser at de maksimale interlamminære skjærverdiene opptrer langs rendene av veggen. I virkeligheten vil innspenningen langs kanten av veggen være mindre stiv enn det randbetingelsene her gir. Det betyr at de virkelige verdiene blir noe lavere enn analysene nå antyder. Ved å legge inn H100 kjerner i sonene langs kanten vil situasjonen bedre seg da denne kjernen har en skjærstyrke på 1.4 MPa. Det viser seg nemlig at analyser med 120 mm H100 kerne gir omtrent samme skjærspenninger i skummet som analysene med H80 kjernen gir. Det er ikke så rart da hoveddelen av bøyekreftene jo taes opp av huden. Analysene viser at spenningene i planet i huden ligger under 10 % av bruddstyrken til laminatet. Utbøyningen er også meget liten, bare 7 mm. Dette er vist i figur 13. Uansett så betyr dette at H100 kjerne i kritiske områder gir en situasjon som er langt bedre, spenningene er da nede i 30 % av brudd. Dette betyr at:

Mulig valg for denne tanken er : 3 mm laminat med 120 mm H80 kjerne med randforsterkning i H100 eller H100 kjerne over det hele.

Løsningen med H80/H100 er illustrert i figur 14.



Figur 13: 3 mm hud og 120 mm H100 kjerne. Von Mises ekvivalente spenning σ_{eqv} ligger under 45MPa. Dette viser at huden er lastet til under 10 % av brudd. Nedbøyningene er maksimalt 8



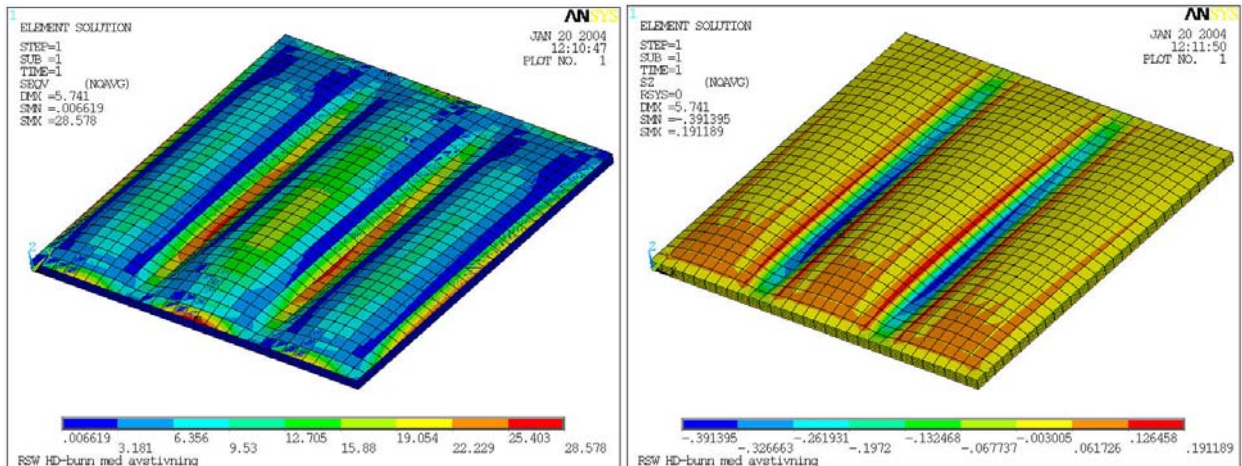
Figur 14: Skjærspenningsnivået til τ_{xz} og τ_{yz} i alternativet med 3 mm hud og 120 mm H100 kjerne er nesten identisk lik nivået i alternativet med 120 mm H80 kjerne. H100 kjernen har en skjærstyrke som er 40 % høyere enn H80 noe som betyr at en sone på 130-200 mm bør forsterkes med H100 kjerne for å oppnå tilstrekkelig sikkerhet mot skjærbrudd.

En slik løsning med 3 stivere som illustrert i figur 9 gir tilfredsstillende sikkerhet mot brudd i kjernen da denne bare lastes til 30 % av brudd.

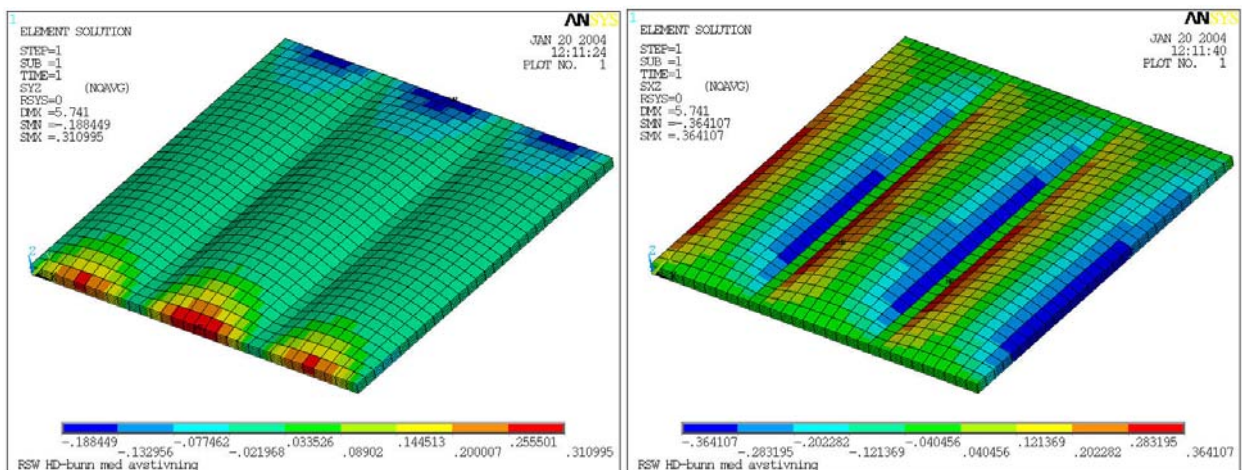
6.1.4 Vegg med ytterligere avstivninger

For å motvirke de relativt høye skjærspennningene i kjernen kan det være en mulighet å avstive tankveggen ytterligere. Med riktig plassert avstivning vil man kunne gå ned på dimensjonene på sandwichet eller unngå å benytte H100 kjerne. I stedet for å avstive som vist i figur 9 med 3 stivere benyttes det nå 5 stivere som er jevnt fordelt over veggen. Det benyttes 3 mm hud og 100 mm H80 kjerne.

I figur 15 og 16 vises de viktigste spenningsfordelingene i huden og skummet.



Figur 15: Von Mises spenningene i huden er maksimalt 28 MPa. Trykkspenningene σ_z i skummet er oppe i 0.39 MPa dvs 33 % av brudd. Begge disse parameterne er tilfredsstillende.

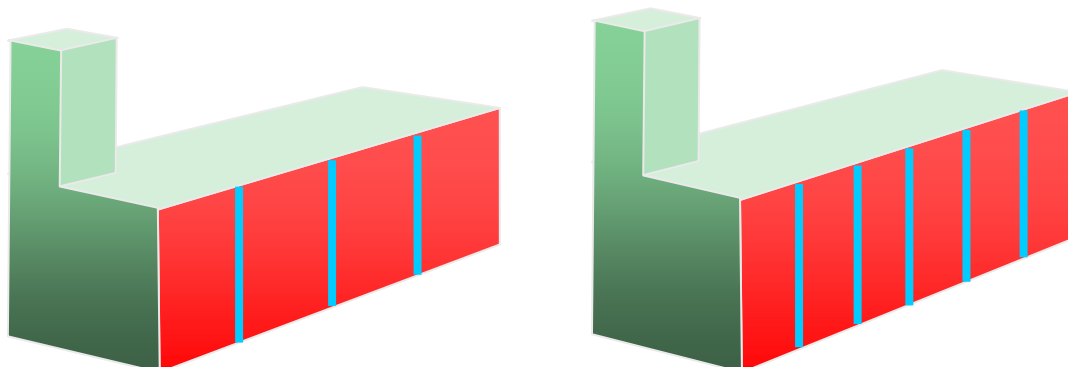


Figur 16: Skjærspenningene τ_{yz} og τ_{xz} i skummet er maksimalt 36 % av brudd. Dette kan ansees som tilfredsstillende.

6.1.5 Konklusjon vegg nr. 1

Det er utarbeidet tre alternative designløsninger for vegg nr.1 (7.50x3.75 m²). Alternativene er som vist i tabell 1. 1) 3 mm hud og 120 mm H80 kjerne med forsterkninger av H100 kjerne langs kantene. Denne løsningen krever 3 vertikale stivere (figur 17 venstre). 2) 3 mm hud og 120 mm H100 kjerne med 3 vertikale stivere (figur 17 venstre). 3) 3 mm hud og 100 mm H80 kjerne og 5 vertikale stivere (figur 17 høyre).

For alle de 3 alternativene er belastningen på huden lav. Von Mises spenningene σ_{eqv} i huden er under 10 % av brudd for alle alternativene. I kjernen er skjæret maksimalt rundt 35 % av bruddstyrken, dette anses som tilfredsstillende på dette stadiet i dimensjoneringen.



Figur 17: Venstre: 100 mm H80+H100 løsnings eller 100 mm H100 løsnings med 3 stivere. Høyre: 100 mm H80 løsnings med 5 stivere.

Tabell 1: De 3 alternativene for vegg 1.

Materialvalg				σ_{eqv} i huden [% av brudd]	τ_{yz} og τ_{xz} i kjernen [% av brudd]
Hudtykkelse	Kjernetykkelse	Kjernetype	Ant.stivere		
3 mm	120 mm	H80+H100	3	10	30
3 mm	120 mm	H100	3	10	30
3 mm	100 mm	H80	5	6	36

6.2 Vegg nr. 2: 3.75x8.00 m²

Den neste vegg som skal studeres kommer fra den tanken som er illustrert i figur 4. Vegg er 3.75 meter lang og 8 meter høy. Ved Shelterdekk og Hoveddekk går det horisontale stivere som forhindrer en hver forskyvning der. Dette er skissert i figur 10. Flere parametre blir endret i studien, laminatthikkelse, kjerne type og kjerne tykkelse samt antall horisontale stivere.

6.2.1 4 mm hud, 75 mm H80 kjerne og 3 mm hud, 100 og 120 mm H45 kjerne

Tankveggen er avstivet som vist i figur 10. Det viser seg at løsningen med 4 mm hud og 75 mm H80 kjerne ikke er tilfredsstillende. Det ble derfor gjort simuleringer med henholdsvis 3 og 4 mm hud samt 100 mm H80 kjerne. Dette resulterer i interlaminære skjærspenninger på rundt 0.9 MPa i skummet noe som er 90 % av bruddgrensen, med andre ord alt for høye verdier. For ordens skyld ble også en løsning med H45 kjerne testet ut. Denne løsningen ble også forkastet grunnet problemer med kjernen.

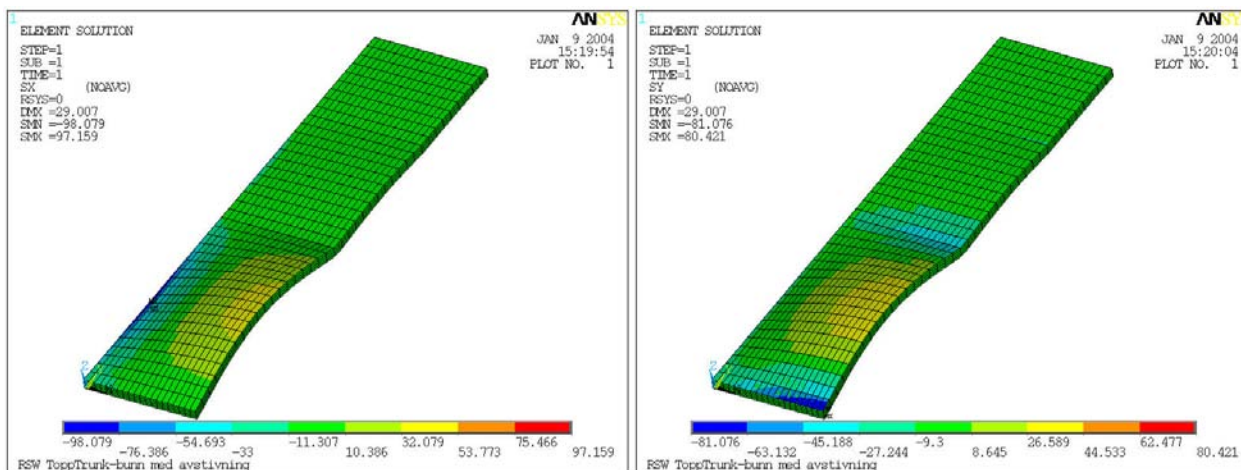
Til tross for at skumtykkelsen er oppe i 100 mm er dette ikke godt nok. Ytterligere studier med 3 mm hud og 120 mm H45 kjerne viser at heller ikke dette holder. Skjærspenningene i skummet kommer opp i over 0.75 MPa noe som er langt over bruddgrensen.

H45 kjernen ansees etter dette som uegnet til RSW tankene. Videre analyser ble derfor konsentrert om tykkere utgaver av H80 kjernen.

6.2.2 3 og 4 mm hud 120 og 150 mm, H80 kjerne

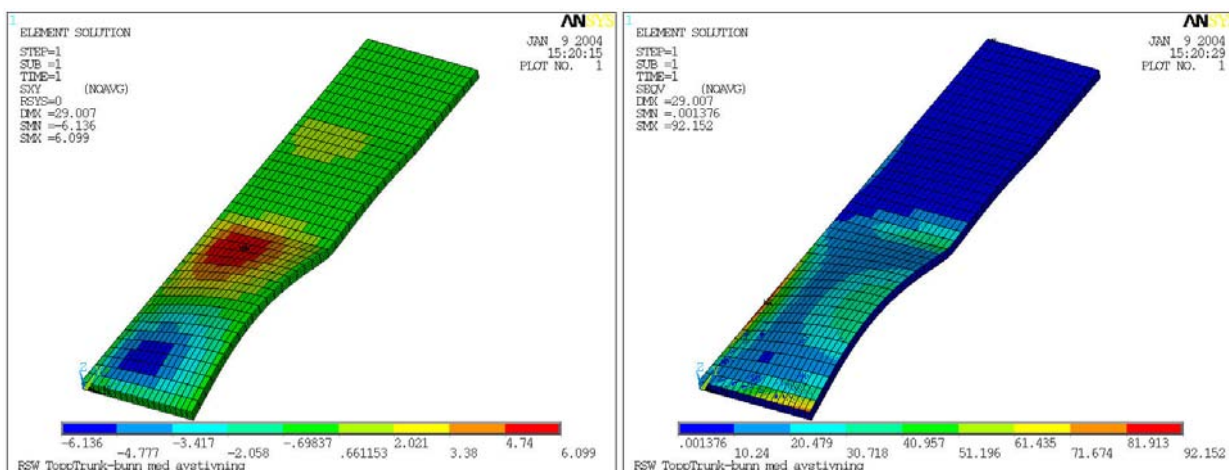
Tanken er avstivet som vist i figur 10. Et forsøk med 4 mm hud og 120 mm H80 gir interlaminære skjærspenninger i skummet på 0.75 MPa. Dette er verdier som ikke kan tolereres i designsammenheng.

Neste forsøk er å gå opp til 150 mm kjernetykkelse. Dette gir sammen med en hud på 4 mm de resultatene som er gjengitt i figurene 18, 19, 20 og 21.

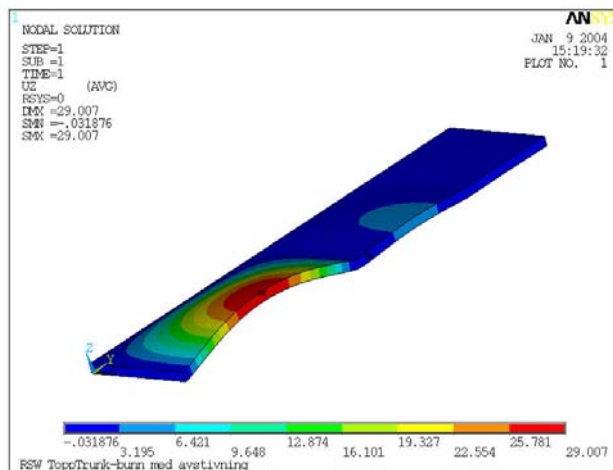


Figur 18: Spenningene σ_x og σ_y i huden ligger maksimalt på omtrent 20 % av bruddgrensen.

Figur 18 viser at spenningene i huden ligger nede på 20 % av bruddstyrken til huden. Dette er godkjente resultater. Likeledes er resultatene som er vist i figur 19 tilfredsstillende. I planet skjærspenninger på 8 % av brudd er lavt. Utbøyningen mellom bunn av tanken og hoveddekk er 29 mm. Dette er illustrert i figur 20.



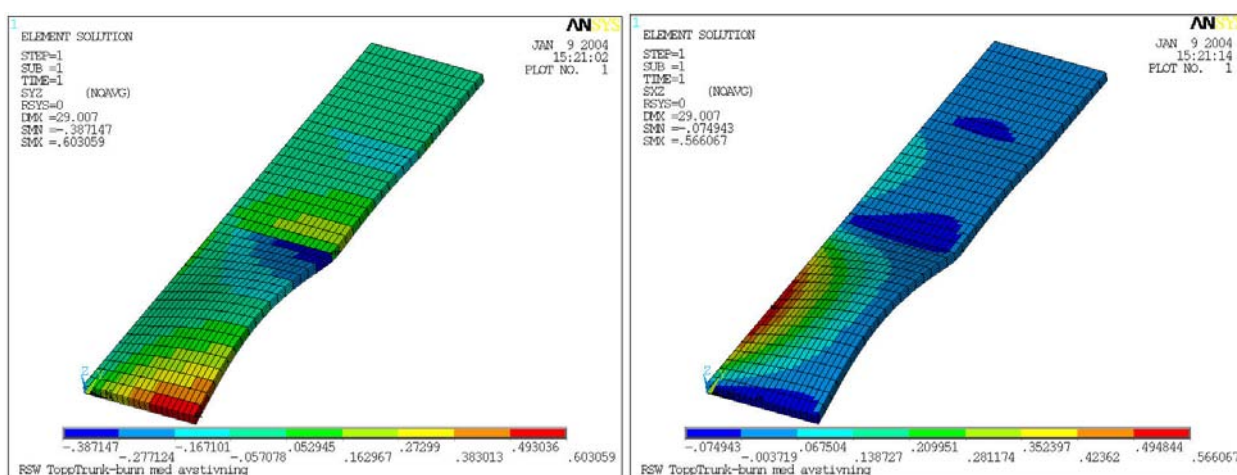
Figur 19: I-planet skjærspenningene τ_{xy} i huden er maksimalt ca 8 % av bruddgrensen. Von Mises spenningen er maksimalt rundt 90 MPa noe som er tilfredsstillende.



Figur 20: Den maksimale utbøyningen forekommer midt mellom hoveddekk og tankbunn er 29 mm.

I figur 21 vises den interlaminære skjærspenningsfordelingen i kjernen. Den maksimale skjærspenningen ligger opp i mot 60 % av bruddstyrken. Hvis man i disse sonene erstatter H80 med H100 vil man imidlertid komme ned i mot 43 % av bruddstyrken.

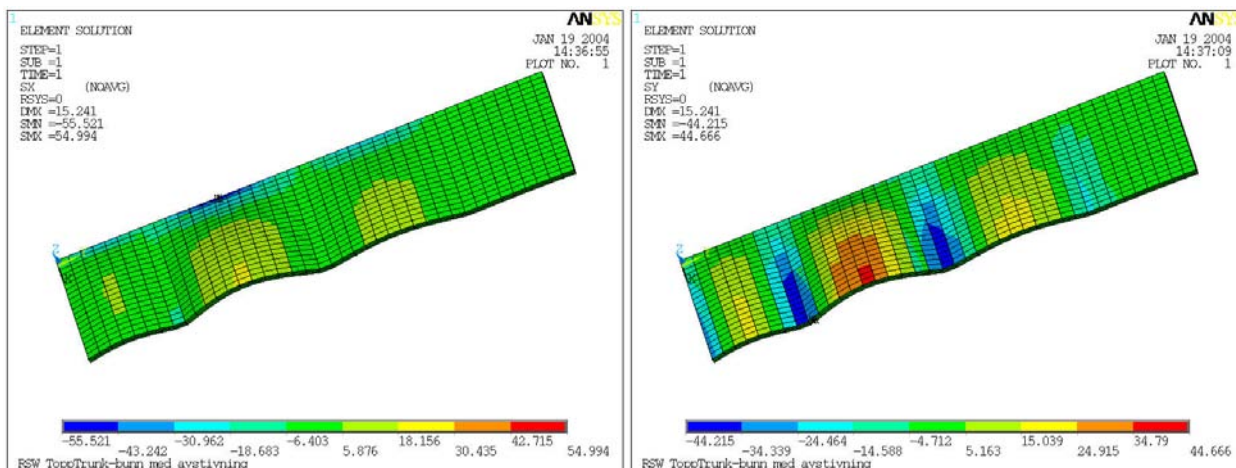
Velger man å benytte en 180 mm H80/H100 kommer de maksimale spenningene i huden ned i mot 75 MPa, mens de maksimal interlaminære skjærspenningene i skummet går ned i omtrent 0.5 MPa. Det betyr at skjæret i skummet ligger på 50 % av brudd for H80 og 36 % av brudd for H100. Gevinsten ved å øke fra 150 mm til 180 mm er med andre ord ikke veldig stor. Det er bedre å avstive ytterligere slik at deformasjonene forhindres. Det bør da være mulig å benytte 150 mm H80 i hele tanken. Med den enkle avstivningen som er skissert i figur 10 kan det la seg gjøre å benytte 150 mm H80 med 150 mm H100 forsterkning i sonene med de høyeste skjærspenningene samt 4 mm hud. En så kraftig kjerne er imidlertid kostbar og følgelig motiveres videre studier av løsninger med ytterligere avstivning.



Figur 21: Skjærspenningen i skummet τ_{xz} går opp i 0.60 MPa, dvs. 60% av brudd. τ_{yz} er noe lavere.

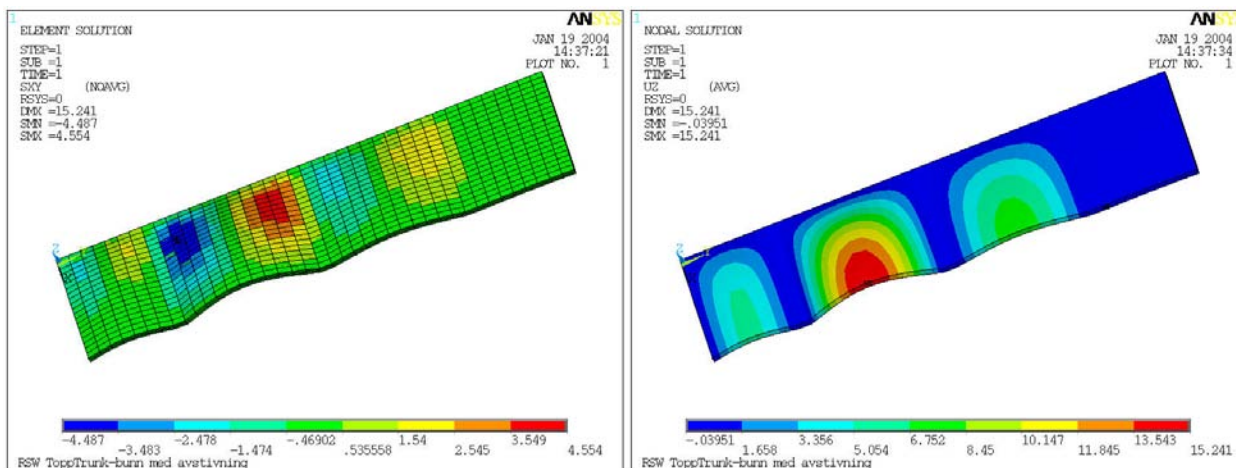
6.2.3 Vegg med ytterligere avstivning I

For å motvirke den store deformasjonen som oppstår mellom hoveddekk og bunn av tanken kan det være en mulighet å avstive ytterligere. Med riktig plassert avstivning vil man kunne gå ned på dimensjonene på sandwichet, med andre ord få en mindre kjernetykkelse. Det ble oppnådd lavest interlaminære skjærspenninger i kjernen når støtten ble plassert ca 1.5 meter fra bunnen av tanken. Det benyttes 3 mm hud og 120 mm H80 kjerne.



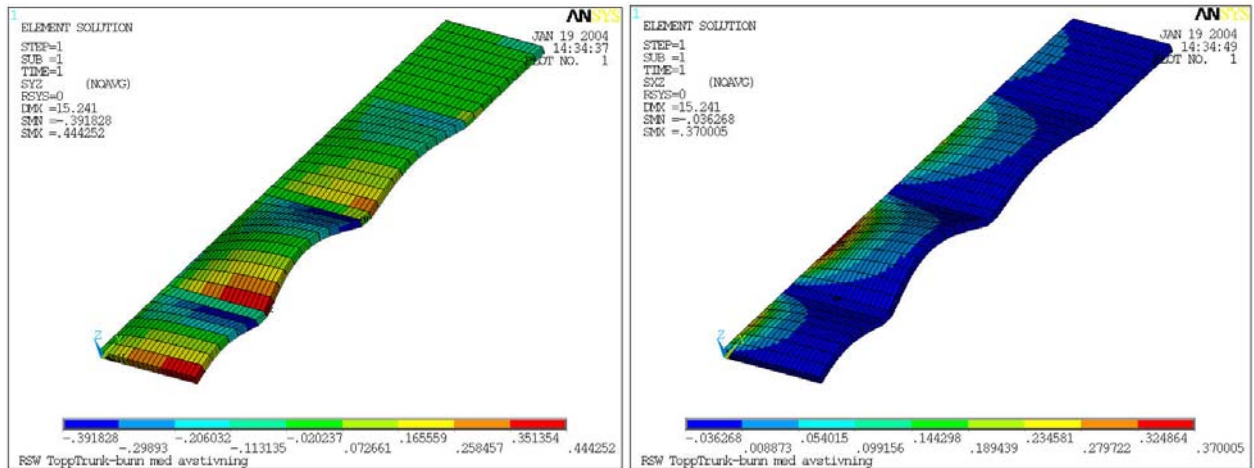
Figur 22: Spenningene σ_x og σ_y i huden ligger maksimalt på maksimalt 12 % av bruddgrensen.

Spenningene i huden er lave. Figur 22 viser at spenningsnivået bare ligger rundt 12 % av bruddstyrken. Det er også langt igjen til brudd når det gjelder skjærspenninger i planet som er vist i figur 23.

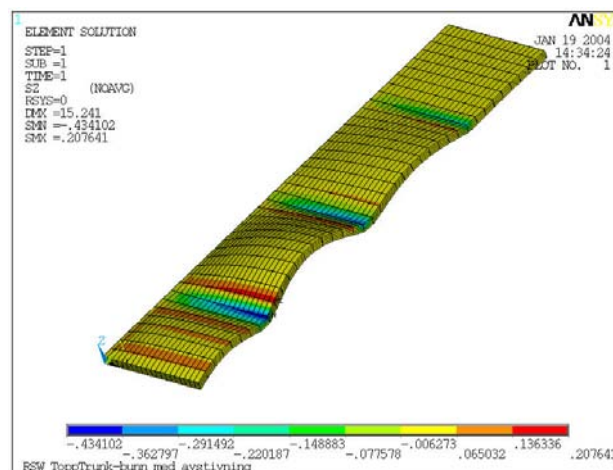


Figur 23: I-planet skjærspenningene τ_{xy} i huden er maksimalt ca 7 % av bruddgrensen. Maksimal utbøyning er drøye 15 mm.

I figur 24 vises den interlaminære skjærspenningsfordelingen i kjernen. Den maksimale skjærspenningen ligger opp i mot 44 % av bruddstyrken. Hvis man i disse sonene erstatter H80 med H100 vil man imidlertid komme ned i mot 31 % av bruddstyrken.



Figur 24: Skjærspenningen i skummet τ_{yz} går opp i 0.44 MPa, dvs 44% av brudd. τ_{xz} er noe lavere. Erstattes H80 kjernen med H100 kommer man imidlertid ned i mot 31 % av bruddstyrken.

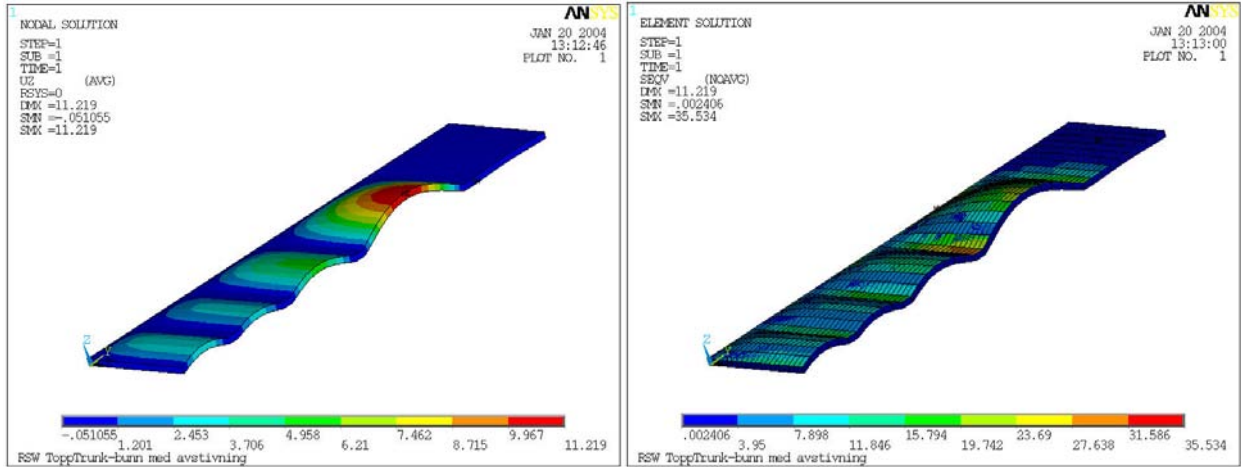


Figur 25: Spenningene σ_z i skummet normalt på veggen (i z-retning) varierer mellom 0.20 MPa strekk og 0.43 MPa trykk. Dette tilsvarer 30 % av brudd i kompresjon og må sies å være akseptabelt.

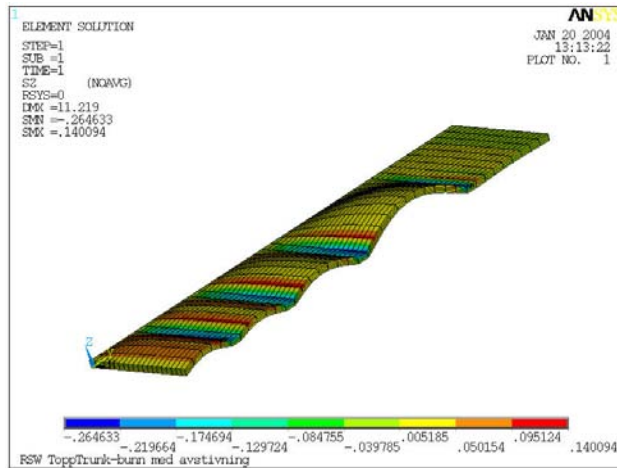
6.2.4 Vegg med ytterligere avstivning II

For å undersøke mulighet for å redusere kjernetykkelsen og unngå ekstra forsterkninger med H100 kjerne i deler av tanken ble det besluttet å vurdere bruk av ekstra stivere.

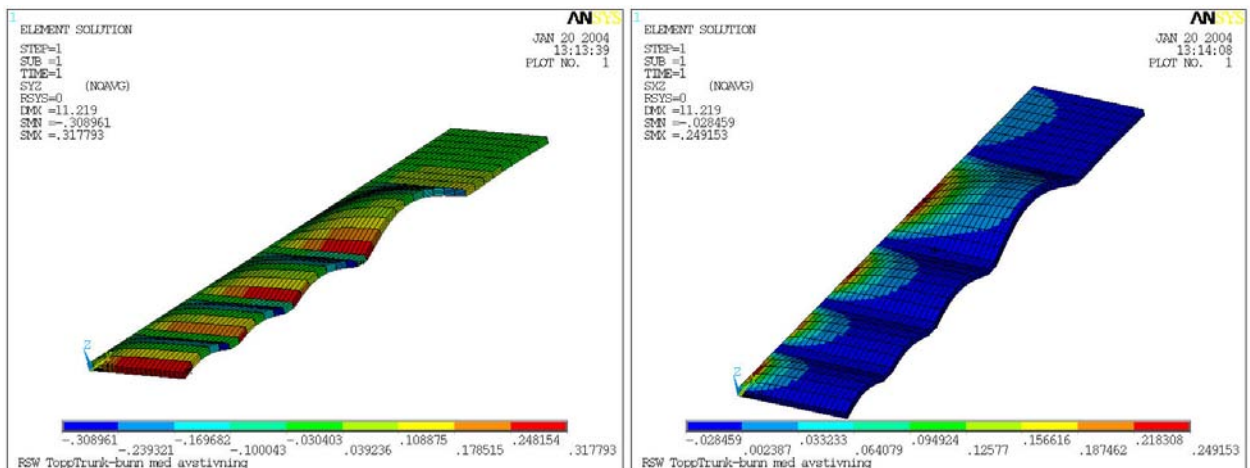
Det viste seg at man ved å plassere støtter ca 1.0 og 2.3 meter fra bunnen av tanken får enda lavere spenninger i veggen, enn når man bare benytter en ekstra stiver. Dette oppnås selv om man benytter et tynnere sandwich med 3 mm hud og 100 mm H80 kjerne.



Figur 26: Utbøyningen er liten, maksimalt 11 mm. Von Mises spenningene i huden er under 36 MPa.



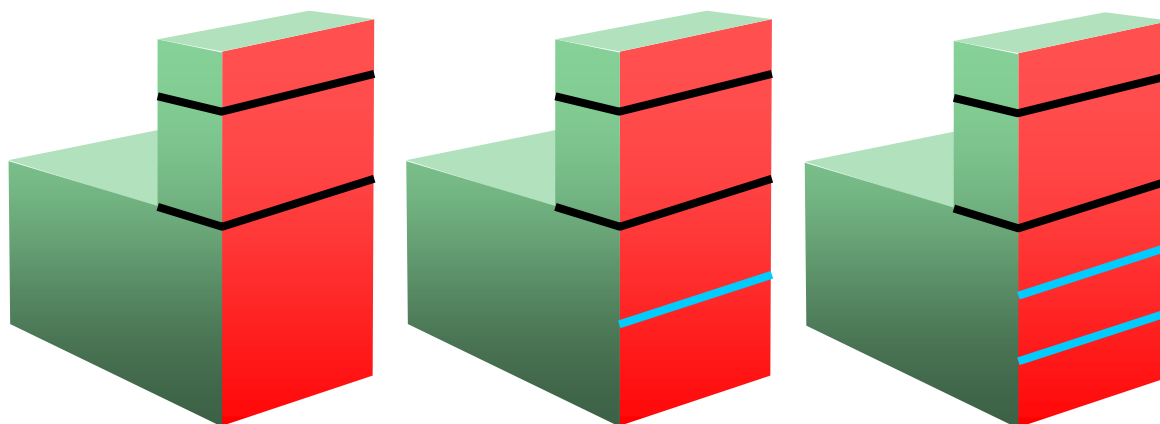
Figur 27: Det er maksimalt 0.26 MPa trykkspenning σ_z på skummet, dette er rundt 22 % av brudd.



Figur 28: Skjærspenningen i skummet τ_{yz} går opp i 0.32 MPa, dvs 32% av brudd. τ_{xz} er noe lavere. Dette er tilfredsstillende.

6.2.5 Konklusjon vegg nr. 2

Det er utarbeidet tre alternative designløsninger for vegg nr.2 (3.75x8.00 m²). Alternativene er som vist i tabell 2. 1) 3 mm hud og 150 mm H80 kjerne med forsterkninger av H100 kjerne langs kantene og to horisontale stivere (figur 29 venstre). 2) 3 mm hud og 120 mm H80 kjerne og tre horisontale stivere (figur 29 midten). 3) 3 mm hud og 100 mm H80 kjerne og 4 horisontale stivere (figur 29 høyre).



Figur 29: Venstre: 100 mm H80+H100 løsning eller 100 mm H100 løsning med 3 stivere. Høyre: 120 mm H80 løsning med 5 stivere.

For alle de 3 alternativene er belastningen på huden lav. Von Mises spenningene σ_{eqv} i huden er under 20 % av brudd for alle alternativene. I kjernen er skjæret maksimalt rundt 44 % av bruddstyrken, som muligens er noe høyt men som nok er tilfredsstillende på dette stadiet i dimensjoneringen. For alternativet med 4 stivere er imidlertid skjæret nede i 32 % av brudd. Dette er meget bra.

Tabell 2: De tre alternativene for vegg 2.

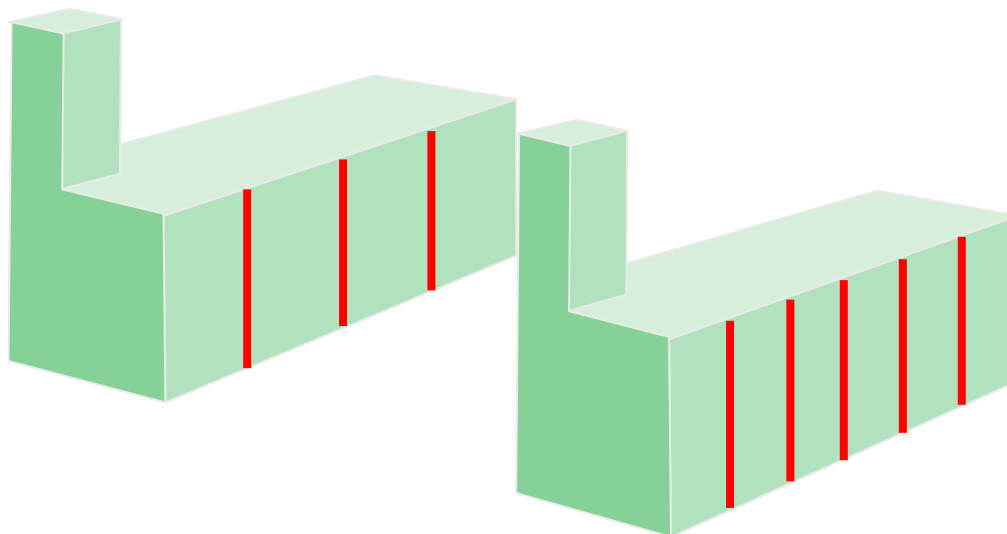
Materialvalg				σ_{eqv} i huden [% av brudd]	τ_{yz} og τ_{xz} i kjernen [% av brudd]
Hudtykkelse	Kjernetykkelse	Kjernetype	Ant.stivere		
3 mm	150 mm	H80+H100	2	20	43
3 mm	120 mm	H80	3	12	44
3 mm	100 mm	H80	4	8	32

7 Diskusjon rundt valgt design

Analysene tyder på at det ikke er mulig å benytte en kjerne kvalitet som er lettere enn Divinycell H80. Dette skyldes det faktum at kjerner med lavere vekt (H45 eller H60) har for lav skjærstyrke. I enkelte kritiske soner kan det også være nødvendig å benytte Divinycell H100 for å takle høye skjærspenningsverdier. Alternativet er å støtte bedre opp slik at deformasjonene blir mindre. Det vil resultere i blant annet lavere skjærspenningsverdier og dermed redusere behovet for å benytte tyngre kvaliteter enn H80.

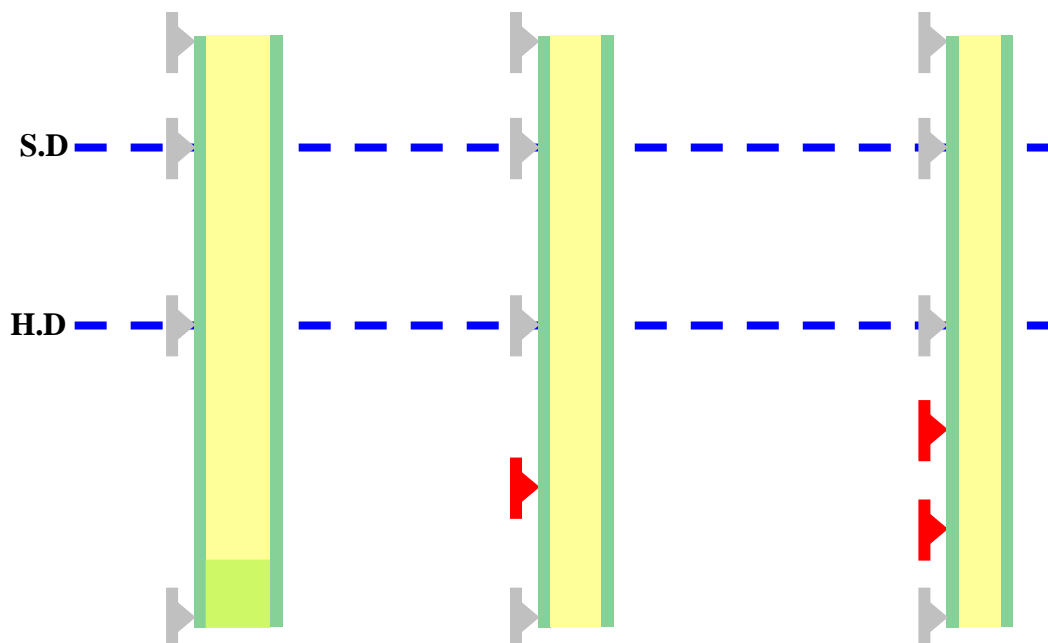
Analysene av vegg nr 1 som er lang og lav indikerer at man for alternativet med tre støtter (figur 27 alternativ 1) må opp i 120 mm H80 kjerne sammen med en hud på 3 mm. Kritiske soner må også forsterkes med H100 kjerne. Forsterkningsopplegget er illustrert i figur 19. Hvis man

imidlertid øker antall avstivninger til fem (illustrert i figur 30 alternativ 2) så klarer man seg med 100 mm H80 kjerne og 3 mm hud.



Figur 30: Venstre: Alternativ 1 med 3 stivere; 120 mm H80 med H100 forsterkning (se figur 19) og 3 mm hud. Høyre: Alternativ 2 med 5 stivere; 100 mm H80 og 3 mm hud.

Analysene av vegg nr 2, som er den høyeste vegg, kun avstivet ved hoveddekk og shelterdekk, indikerer at kjernetykkelsene bør være på 150 mm H80 med H100 forsterkning i kritiske soner for å få tilstrekkelig bøyestivhet og lave nok skjærverdier i skummet. Dette er illustrert i figur 31 alternativ 1. Forsterker man i tillegg 1.5 meter fra bunnen av tanken (figur 28 alternativ 2) så kan man gå ned i 120 mm H80 og 3 mm hud. Forsterker man 1.0 og 2.3 meter fra bunnen kan man gå ned i 100 mm H80 og 3 mm hud (figur 31 alternativ 3).



Figur 31: Fra venstre mot høyre. Alternativ 1 som kun er avstivet ved hoveddekk og shelterdekk trenger 150 mm H80 med H100 forsterkning og 3 mm hud. Alternativ 2 med tilleggsavstivning 1.5 meter fra bunnen trenger 120 mm H80 med 3 mm hud. Alternativ 3 med tilleggsavstivning 1.0 og 2.3 meter fra bunnen trenger 100 mm H80 og 3 mm hud.

Det er med andre ord mange forskjellige muligheter. En ting synes imidlertid helt klart fra analysene. **Man kan ved hjelp av tilstrekkelig avstivning dimensjonere samtlige tanker med 100 mm H80 kjerne og 3 mm 0/90 glassfiberhud. Valg av konsepter med ulike malterialegenskaper og antall stivere vil avhenge av hva som blir mest kostnadseffektivt.**

Det er imidlertid muligheter til dimensjonsjusteringer ved å utføre ytterligere detaljerte parameterstudier. Dette må eventuelt gjøres med mer detaljerte modeller. Resultatene som er vist i denne rapporten gjelder for de forenklete modellene som er benyttet i beregningene.

8 Vektberegninger for valgt design

En av de store fordelene ved å benytte en sandwichbasert løsning til RSW tankene kontra en tradisjonell garnering med stålplater og isolasjon er besparelse av vekt. Følgelig er det foretatt en beregning av konstruksjonsløsningenes vekt. Beregningene av vekten for sandwichløsningen er foretatt uavhengig av både SINTEF og skipskonsulentene Kverndokk & Eldøy AS. Kverndokk & Eldøy AS har stått for vektberegningen av den tradisjonelle løsningen med stålplategarnering da de har lang erfaring i dette.

Sandwichet er bygget opp av en hud fremstilt i glassfiberarmert herdeplast og en PVC skumkjerne. Laminathudens vekt pr kvadratmeter beregnes etter formelen:

Tetthet kompositt ρ_c [g/cm^3]: $\rho_c = 1 / ((W_f / \rho_f) + (W_m / \rho_m))$ der

W_f = Vektandel fiber

W_m = Vektandel matrise

ρ_f = Tetthet fiber

ρ_m = Tetthet matrise

med $W_f = 0.7$, $W_m = 0.3$, $\rho_f = 2.54 g/cm^3$ og $\rho_m = 1.19 g/cm^3$ får man

$$\rho_c = 1.9 g/cm^3$$

Dette gir $\rho_c = 1.9 g/cm^3 \Rightarrow$ med 2 x 3mm laminatrykkelse blir vekten pr m^2 11.4 kg

H80 kjernen har en tetthet på $80 kg/m^3$. Dette gir en vekt pr. m^2 på: $80 \times t$ (t = tykkelse i meter)

Sandwichets vekt pr. kvadratmeter for forskjellige kjernetykkelser er gjengitt i tabell 3.

Tabell 3: Vekt per kvadratmeter for sandwich

Kombinasjon	Vekt pr kvadratmeter [kg/m^2]
100 mm H80 + 3 mm hud	19.4
120 mm H80 + 3 mm hud	21.0
150 mm H80 + 3 mm hud	23.4

Samlet overflatareal av de 8 RSW-tankene i sandwich er av SINTEF beregnet til $1046 m^2$. Dette er areal av sidevegger, bunn og topp samt trunker. Det antas at samme sandwich benyttes i alle veggseksjoner. Benyttes vektene fra tabell 1 betyr det at vekten av RSW tanker uten avstivning ligger i mellom 20.3 tonn og 24.5 tonn. Skipskonsulentene Kverndokk & Eldøy AS beregnet vekten av tankene til 20 tonn uten avstivning. Avstivningen ble på sin side beregnet til 2.5 tonn.

Dette betyr at RSW løsningen i sandwich totalt ligger i størrelsesområdet 25 tonn. Skipskonsulentene Kverndok & Eldøy AS har beregnet vekten av stålskott og garnering for en tradisjonell stålløsning for RSW til 64.8 tonn. Dette indikerer en besparelse på nærmere 40 tonn ved å velge RSW løsning i sandwich kontra tradisjonell løsning i garnert stål.

9 Konklusjon

Det er gjennomført analyser for å vurdere et konsept basert på løse RSW-tanker i sandwich som alternativ til tradisjonell stålplategarnering for et 44 m snurper-/snurrevadfartøy. Det er gjennomført en rekke numeriske beregninger av de mest kritiske delene av tankene for å finne frem til en materialopplegging i sandwich som i kombinasjon med forskjellig antall stivere tilfredsstiller krav til statiske laster (vanstrykk).

Analysene viser at et konsept basert på løse RSW-tanker i sandwich er et realistisk alternativ til tradisjonell stålplategarnering og at en slik løsning vil gi betydelig vektbesparelse. En løsning med et sandwich bygget opp av 3 mm 0/90 glassfiberlaminater og 100 mm kjerne av PVC skum med tetthet 80 kg/m^3 (H80) og bruk av stivere vil for dette fartøyet gi en løsning som veier rundt 25 tonn. Den tradisjonelle løsningen med stålplategarnering veier på sin side omtrent 65 tonn. Dette betyr at man oppnår en vektbesparelse på ca 40 tonn eller over 60 % i forhold til dagens løsning. En slik vektbesparelse representerer nær 10 % av lettskipsvekten for dette fartøyet.

Referanseliste

- [1] Agarwal, BD & Broutman, LJ, "Analysis and performance of fiber composites". Wiley Interscience 1990
- [2] Amateau, MF, "Course notes - Engineering composite materials", The Pennsylvania State University, Department of engineering science and mechanics, 2002
- [3] Andersen, A, "Forelesningsnotater ME 354 Komposittmaterialer", Universitetet i Oslo, Matematisk institutt, Avdeling for mekanikk, 1999
- [4] Abrate, S, "Lecture notes-Composite materials", Southern Illinois University, 2000
- [5] Andersen, A, "Mekanisk testing av injiserte [0/90]glass- og karbonfiberlaminater", SINTEF Rapport STF24 F02053, 2002
- [6] Smeby, Kobberstad, "Tekniske regnetabeller", J. W. Cappelens Forlag AS, 1986
- [7] Friberg, Reidar, "Pris- og vektvurdering av overbygg i sandwich til fiskefartøy", SINTEF Rapport, 2004
- [9] ANSYS "Theory Manual", www.ansys.com
- [10] Kverndokk og Eldøy AS, "General Arrangement 44 m snurper/snurrevadfartøy, 1:150", 2003
- [11] www.diabgroup.com, DIAB information resource, 2003