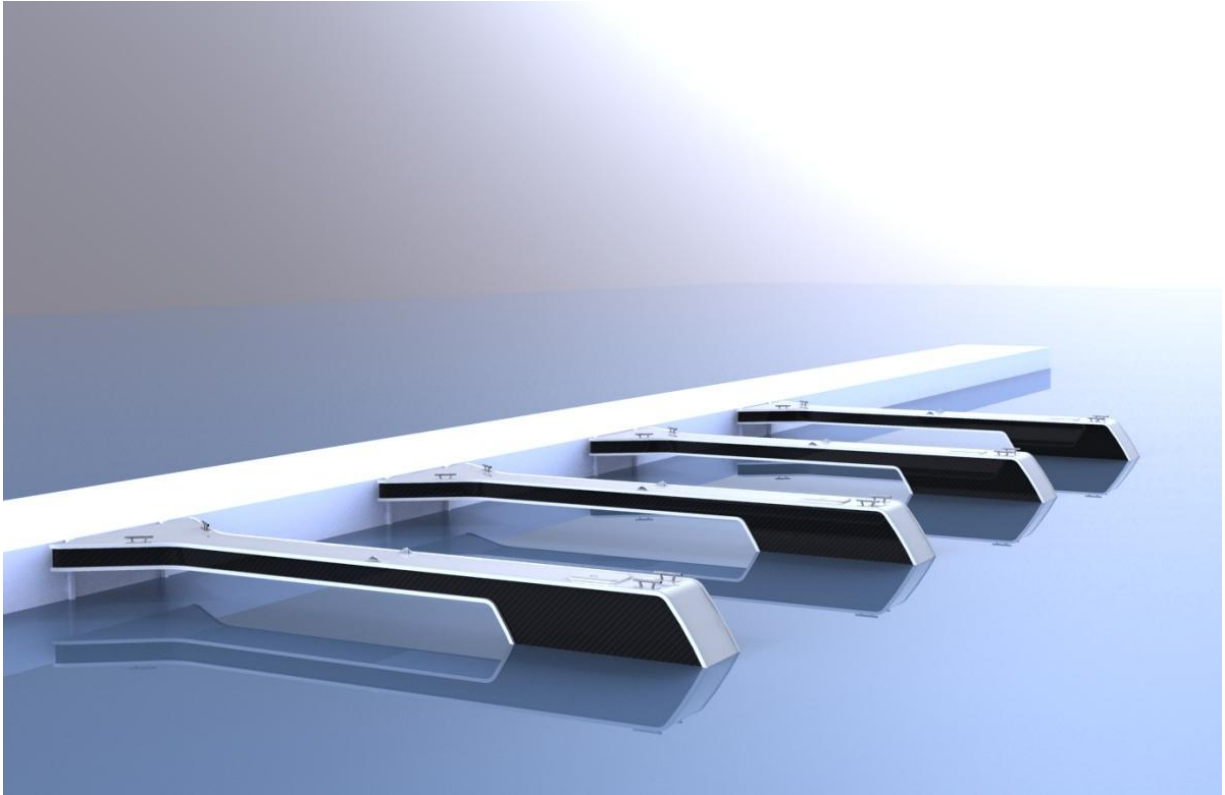


Masteroppgave 2011 av Safet Kurtovic



*Modellering og Elementanalyse av
Sandwichkomposittmaterialer for utriggere*



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Konstruksjoner og materialer/ Maskinkonstruksjoner	Vårsemesteret, 2011 Konfidensiell
Forfatter: Safet Kurtovic (signatur forfatter)
Fagansvarlig: Hirpa L. Gelgele Veileder(e): Hirpa L. Gelgele	
Tittel på masteroppgaven: Modellering og elementanalyse av sandwichkomposittmaterialer for utriggere. Engelsk tittel: Modelling and finite element analysis of sandwich composite materials for boat docking.	
Studiepoeng: 30	
Emneord: Utrigger Komposittmaterialer Sandwichmaterialer Analyse ANSYS Matlab FEM/FEA	Sidetall: 121 + vedlegg/annet: 51 Stavanger, 14/06/2011

Forord

Dette er en masteroppgave i studiet konstruksjoner og materialer, våren 2011. Oppgaven gjennomføres ved teknisk-naturvitenskapelige fakultet på Universitetet i Stavanger. Rapporten er utarbeidet for Green Bay Systems AS, og er konfidensiell fram til 15/06/2013.

Alt utstyret som ble brukt i forbindelse med denne rapporten er tilgjengelig ved Universitetet i Stavanger, og det ble derfor ikke nødvendig med finansiell støtte. Nødvendig utstyr begrenser seg til dataprogrammer. De mest brukte programvarene i forbindelse med oppgaven er ANSYS, Solid Edge og Matlab.

Oppgaven handler først og fremst om avanserte komposittmaterialer og vil ta for seg en del teori rundt temaet. Videre inneholder oppgaven en stor del beregninger og datamodellering av komposittmaterialer og sandwichkompositter. Hovedmålet med denne oppgaven er å styrke universitetets kunnskap av materialene, samt utføre beregninger og analyser for bedriften Green Bay Systems. Green Bay Systems lager utriggere til båter. Utriggenne blir laget av komposittmaterialer, med noen komponenter i stål. Oppgaven vil også ta for seg enkle beregninger av stålkomponentene på utriggeren.

Jeg ønsker å takke Hirpa L. Gelgele som ga meg muligheten til å skrive denne oppgaven, og for gode tips gjennom hele semesteret. Jeg vil også takke Odd Christian Sandengen, eier av Green Bay Systems, for all informasjon gjennom semesteret. Til slutt ønsker jeg å takke Hans Jørgen Fjeldvik ved EKRO AS for mye god informasjon.

Stavanger
10. Juni 2011

Safet Kurtovic

Innholdsliste

1	Innledning.....	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Avanserte komposittmaterialer.....	3
1.3	Beregning av komposittmaterialer.....	4
1.4	Målsettinger	5
1.4.1	Teoretisk arbeid.....	5
1.4.2	Analyse av ytre krefter	5
1.4.3	Beregning av deler som ikke er komposittmaterialer.....	6
1.4.4	Analyse og beregning av komposittmaterialer.....	6
1.5	Begrensninger.....	6
1.5.1	Teoretisk arbeid.....	6
1.5.2	Analyse av ytre krefter	7
1.5.3	Beregning av deler som ikke er komposittmaterialer.....	7
1.5.4	Begrensninger i analysen av komposittmaterialer	7
1.6	Disposisjon	7
2	Historisk om komposittmaterialer.....	9
2.1	Tidlige komposittmaterialer	9
2.2	20. Århundre.....	10
2.2.1	Første generasjons avanserte komposittmaterialer.....	10
2.2.2	Nye og bedre komposittmaterialer	11
2.3	Dagens bruk av komposittmaterialer.....	13
2.4	Framtidig utvikling.....	14
3	Oppbygning.....	15
4	Egenskaper	17
4.1	Matriksmaterialer.....	17
4.1.1	Polyester	18
4.1.2	Vinylester	19
4.1.3	Epoxy	19
4.1.4	Andre matriksmaterialer.....	20
4.1.5	Materialegenskaper til noen matriksmaterialer	20
4.2	Fiberforsterkningen	21
4.2.1	Glassfiber	21

4.2.2	Karbonfiber	21
4.2.3	Aramidfiber	22
4.2.4	Andre fibertyper	22
4.2.5	Materialegenskaper til noen fibertyper	23
4.3	Egenskaper til noen komposittmaterialer	24
4.4	Sandwichkompositter	25
5	Green Bay Systems	27
5.1	Om bedriften.....	27
5.2	Konstruksjon og design	28
5.2.1	Oppbygning.....	28
5.2.2	Dimensjoner	29
5.2.3	Innfesting.....	30
5.3	Materialer.....	31
5.3.1	Rustfritt stål.....	32
5.3.2	Polleo Pan.....	33
5.3.3	Bolte kvalitet	36
5.4	Lover og standarder	36
5.4.1	Konstruksjon	36
5.4.2	Laster.....	36
5.4.3	Bolter og skruer.....	36
5.4.4	Materialer	36
6	Analyse av krefter	37
6.1	Egenlaster	37
6.2	Variable laster.....	38
6.2.1	Bølgelaster.....	38
6.2.2	Brukslast 1: Menneskelaster.....	41
6.2.3	Brukslast 2: Båtlaster	43
6.2.4	Ulykkeslaster.....	44
6.3	Sammendrag av opplagerkrefter.....	45
7	Analyse av innfesting	46
7.1	Deformasjon av innfesting.....	47
7.1.1	Lokale stivhetsmatriser	48
7.1.2	Globale stivhetsmatriser.....	49

7.1.3	Randbetingelser	50
7.1.4	Resultater.....	50
7.1.5	Diskusjon.....	50
7.2	Analyse av bolter	51
7.2.1	Plassering av bolter	51
7.2.2	Avskjæringskapasitet	52
7.2.3	Hullkanttrykk	52
7.2.4	Strekkekapasitet	53
7.2.5	Momentkapasitet	53
7.2.6	Utmatningskapasitet.....	54
7.2.7	Resultater.....	54
7.2.8	Diskusjon.....	54
8	Metoder for analyse av sandwichkomposittmaterialer.....	55
8.1	Klassisk sandwichteori for bjelker	55
8.1.1	Stivhet.....	56
8.1.2	Spenninger.....	56
8.1.3	Nedbøyning ved symmetrisk påført last.....	57
8.1.4	Nedbøyning ved ikke-symmetrisk påført last	58
8.1.5	Test av metoden	59
8.2	Beregning ved bruk av elementmetoden	60
8.2.1	Skallelementer	60
8.2.2	Volum-elementer.....	62
8.3	Andre metoder for analyse av sandwichkomposittmaterialer	63
8.3.1	Klassisk sandwichteori for plater	63
8.3.2	Rules of mixture	63
8.3.3	Enkle dataprogrammer	64
8.4	Analyse ved hjelp av dataprogramvare	64
8.4.1	Om ANSYS.....	64
8.4.2	Framgangsmåte	65
8.4.3	Elementer	65
9	Testanalyse av sandwichkomposittplater	69
9.1	Analysemodell	69
9.2	Testanalyse 1: Shell181	71

9.2.1	Framgangsmåte	71
9.2.2	Resultater.....	74
9.2.3	Diskusjon.....	75
9.3	Testanalyse 2: Solid45.....	78
9.3.1	Framgangsmåte	78
9.3.2	Resultater.....	80
9.3.3	Diskusjon.....	81
9.4	Testanalyse 3: Solid45/Shell181	82
9.4.1	Framgangsmåte	82
9.4.2	Resultater.....	84
9.4.3	Diskusjon.....	85
9.5	Sammenligning av testanalyse 1, 2 og 3.....	86
9.6	Testanalyse 4-27	88
9.6.1	Framgangsmåte	88
9.6.2	Resultat.....	89
9.6.3	Diskusjon av Testanalyse 4-27.....	90
9.7	Spenninger	91
9.7.1	Resultat.....	91
9.7.2	Diskusjon.....	92
9.8	Begrensninger for ANSYS-analyser	92
10	Analyse av utrigger	94
10.1	Analyse av topplater	94
10.1.1	Framgangsmåte	95
10.1.2	Resultat og diskusjon	96
10.2	Spenningskonsentrasjoner for utrigger	99
10.2.1	Framgangsmåte	100
10.2.2	Resultat og diskusjon for lasttilfelle 1	103
10.2.3	Resultat og diskusjon for lasttilfelle 2.....	105
10.2.4	Resultat og diskusjon for Lasttilfelle 3	107
11	Konklusjon	111
	Litteraturliste	113
	Liste over vedlegg	115

Sammendrag

Hovedformålet med oppgaven er å finne en metode for beregning av sandwichkompositter. Metoden som er utarbeidet skal brukes til å analysere en uttrigger laget av Green Bay Systems. I tillegg skal enkelte stålkomponenter på uttriggeren analyseres. Rapporten inneholder også en studie av komposittmaterialers egenskaper og oppbygning.

Avanserte komposittmaterialer består vanligvis av et plast som er forsterket med fibre. Det er fibre som avgjør de mekaniske egenskapene til kompositten. Mens fibrenes orientering avgjør materialets egenskaper i forskjellige retninger. Komposittmaterialer kan brukes alene, eller som skall i en sandwichstruktur. Kjernen i sandwichmaterialet er vanligvis isotropisk.

Det finnes få eller ingen gode metoder for å gjøre beregninger på plater av sandwichstruktur med komposittmaterialer som skall. Polleo Pan er et slikt materiale. De fleste som bruker disse materialene tester produktet for å bestemme konstruksjonens dimensjoner.

For å finne fram til en god måte å analysere komposittmaterialer, er det laget tre analysemetoder i ANSYS. Alle tre metodene er laget ved programmering av inputfiler. Forskjellen på metodene er hvilken elementtype som brukes. Den første analysemetoden bruker skall-elementer, den andre bruker volum-elementer, mens den tredje kombinerer disse. I kombinasjonen brukes skall-elementer i komposittskallene, mens volum-elementer brukes i sandwichmaterialets kjerne.

For å verifisere at analysene er riktige, sammenlignes nedbøyninger i analysene med testet nedbøyning av Polleo Pan-plater. Alle tre elementtypene gav gode verdier for nedbøyning av plater. Analysemetoden ved bruk av skall-elementer er den eneste som gir helt korrekte spenningsverdier. Denne elementtypen er samtidig den eneste som ikke finner spenningenes og tøyningenes fordeling i platens tverrsnitt. Programkodenes svakhet er at skjærspenninger ikke blir korrekt.

For å finne nedbøyning av platene på uttriggeren brukes volum-elementer. Mens for å finne spenninger i hele konstruksjonen brukes skall-elementer.

Analysen av Polleo Pan-platene på uttriggeren viser at den er godt dimensjonert ved vanlig bruk. Det er også vurdert ekstreme laster på konstruksjonen. Disse resultatene viste at dersom en båt krasjer i uttriggeren i en fart på 5 m/s, oppstår det brudd i uttriggeren.

Analysen av stålkomponentene viser at også disse er godt dimensjonert. Antallet skruer for å feste uttriggeren til land er derimot overdimensjonert. Det er kun nødvendig med totalt 4 skruer, i motsetning til de 12 som brukes.

For å ha en fullverdig analysemetode av sandwichkompositter anbefales det å modifisere programmeringskodene slik at også skjærspenninger kan finnes.

1 Innledning

Komposittmaterialer blir ofte omtalt som et materiale for fremtiden. Grunnen til dette er at de har lav vekt og høy styrke. Disse materialene kan brukes i en rekke applikasjoner. I dag brukes materialet i alt fra golfkøller til romferjer. Årsaken til at komposittmaterialer kan brukes i så mange forskjellige applikasjoner, er at det finnes hundrevis av ulike komposittmaterialer.

Et komposittmateriale består av to separate materialer. Det kan på mange måter sammenlignes med en legering. En legering består av et hovedmateriale som er forsterket med ett eller flere legeringsmaterialer. På samme måte består komposittmaterialer av et grunnmateriale som kalles matriks, forsterket med fibre. Den store forskjellen mellom en legering og et komposittmateriale er at legeringer består av grunnstoffer som er i en jevn blanding[1]. Med en jevn blanding menes det at de ikke kan skilles på et makroskopisk nivå. I et komposittmateriale kan man ofte se fibre i matriksen med det blotte øyet. Fibrene blandes ikke jevnt i matriksen, men forblir i egen fase.

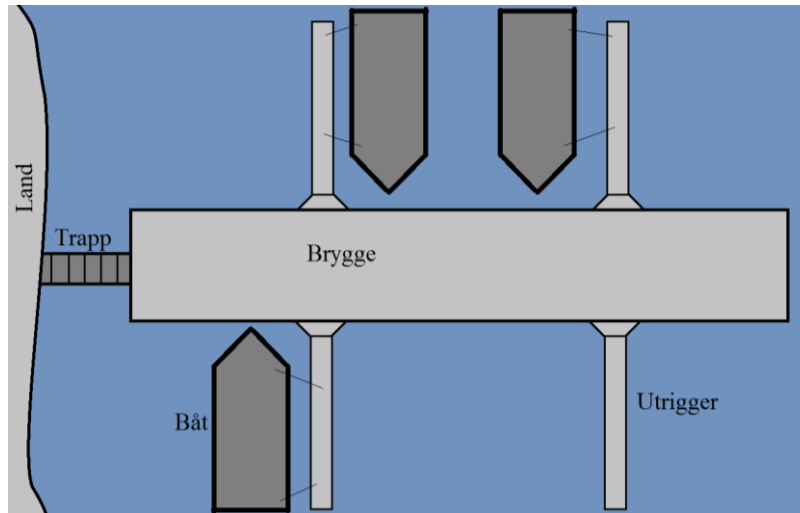
Et av de aller vanligste legeringene er stål. Dette er essensielt en blanding av jern og karbon. Et komposittmateriale består ofte av vidt forskjellige materialer som herdeplast og glassfiber.

I neste de delkapitlene kan man lese mer om disse materialene. Her kan man også lese om formålet med oppgaven, samt bedriften oppgaven skrives for.

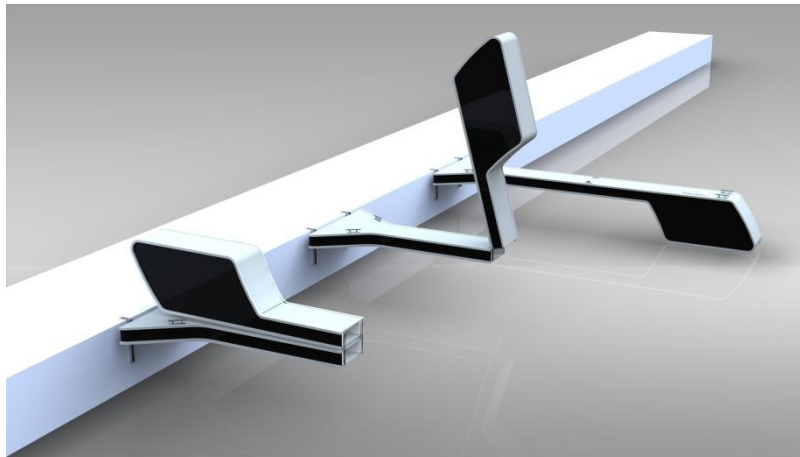
1.1 Bakgrunn

Green Bay Systems har som mål å starte produksjon av utriggere til båter i løpet. For å være sikre på at deres produkt holder mål, er det ønskelig med en analyse av utriggeren med hensyn på krefter som kan oppstå. En utrigger er ofte festet til en brygge og brukes til å stige av og på båter. Figur 1.1 viser en illustrasjon av hvordan dette fungerer, mens Figur 1.2 viser den faktiske utriggeren som GBS har utviklet. Denne utriggeren skiller seg fra andre på markedet ved at den har lav vekt, og har en mulighet til å vippe tilbake for å unngå at den ligger i vannet med flyteelementet. Denne vippefunksjonen vises tydelig på Figur 1.2.

Kapittel 1: Innledning



Figur 1.1: Land, brygge, utriggere og båter

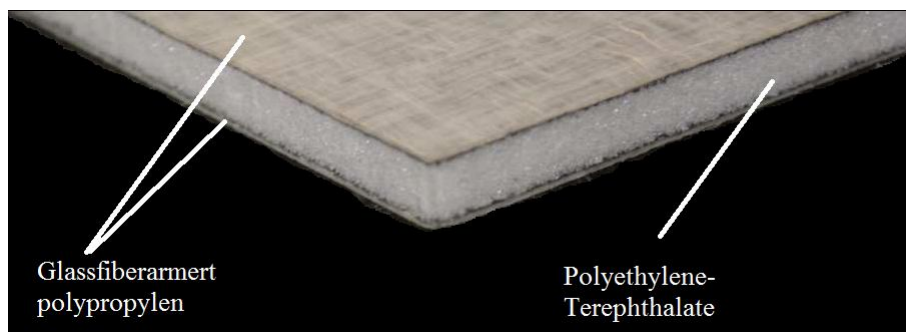


Figur 1.2: Green Bay Systems utrigger "Foldback"-versjon[2]

Utriggeren til GBS skal produseres i et sandwichmateriale som heter Polleo Pan. Figur 1.3 viser hvordan dette materialet ser ut. I denne omgang vil vi kun fokusere på skallene i sandwichen. Skallene er laget av komposittmaterialet glassfiberarmert polypropylen.

I dag er det knyttet store utfordringer til beregningen av komposittmaterialer. Det finnes ingen standard metoder for å beregne styrken. Det er generelt svært krevende å dimensjonere produkter som lages av komposittmaterialer. I lang tid har den vanlige måten vært å testa et produkt, til man er fornøyd med resultatet. Dette er kostbart, og lite egnet for større konstruksjoner.

Det finnes heller ingen standard metoder for produksjon av komposittmaterialer. Dette gjør at svært få har forsøkt å utvikle metoder for generell beregning av disse materialene.



Figur 1.3: Sandwichmaterialet Polleo Pan[3]

1.2 Avanserte komposittmaterialer

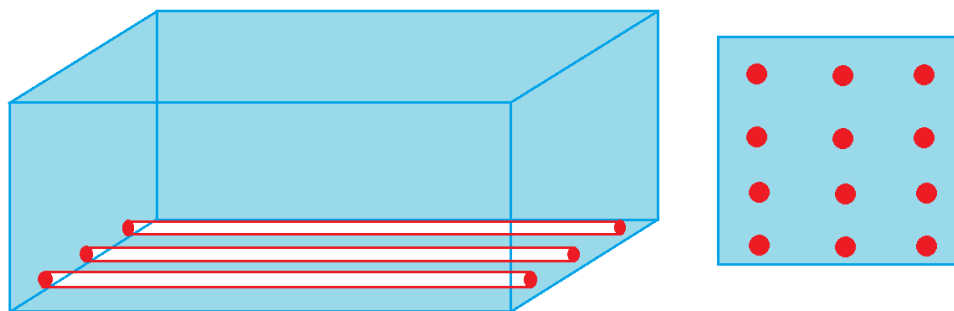
Mange tror komposittmaterialer er lite utbredt, dette stemmer ikke. Et mye brukt materiale som armert betong kan falle innenfor kategorien komposittmateriale. Betongen er da grunnmaterialet, også kalt matriksen, mens stålarmeringen er forsterkningen. Det mest vanlige komposittmaterialet er tre. I et tre er ligningen matriksmaterialet, mens cellulosen er fiberforsterkningen. Selv om både tre og betong er komposittmaterialer, er de ikke avanserte komposittmaterialer. I avanserte komposittmaterialer er forsterkningen laget av fibre. Dette er ikke tilfellet for betong. For tre derimot er cellulosen fibre. For å ha et klart skille, kan man tenke seg at avanserte komposittmaterialer er menneskeskapt og bruker fibre som forsterkning til et grunnmateriale.

Avanserte komposittmaterialer brukes i produkter hvor styrke i forhold til vekt er viktig. Båtbransjen er i dag den viktigste eksponenten av disse materialene. Men andre høyteknologiske bransjer som bil, og romfart har de siste årene omfavnet materialet. Det er ventet en stor økning i bruken av disse materialene i årene framover. Årsaken til dette er at de finnes i en rekke prisklasser, og med et utall forskjellige matriks/fiber-materialer.

Selv om tre og betong faller innenfor kategorien komposittmaterialer, er det de avanserte komposittmaterialene man tenker på når man snakker om temaet. Dette er tilfellet også i denne rapporten. Videre i rapporten vil avanserte komposittmaterialer, bli referert til som komposittmaterialer. Figur 1.4 viser et eksempel på likheter og forskjeller mellom armert betong, tre og et komposittmateriale.



Figur 1.4: Fra venstre; karbonfiberarmert epoxy[4], trepanel[5] og armert betong[6]



Figur 1.5: "Røde" fibre i "blå" matriks

I daglig tale blir komposittmaterialer gitt navn etter hvilke fibre som brukes. Derfor vil et komposittmateriale av karbonfiber og epoxy kalles bare karbonfiber. Et korrekt navn på dette materialet er karbonfiberarmert epoxy. I denne rapporten vil det variere mellom disse to.

Figur 1.5 viser skjematisk hvordan et komposittmateriale ser ut, samt hvordan materialet ser ut i tverrsnittet. Grunnmaterialet eller matriksmaterialet er vanligvis herdeplast eller epoxy. Formålet med matriksen er å holde de sterke fibertrådene på plass, og overføre krefter til fibrene. Fibrenes stryke avgjør de mekaniske egenskapene til et komposittmateriale. Siden fibrene ligger i en bestemt retning er materialegenskapene anisotropiske. I Kapittel 3 og 4 kan man lese mye mer om oppbygningen, samt materialegenskaper til forskjellige komposittmaterialer.

1.3 Beregning av komposittmaterialer

Typiske materialegenskaper til glassfiberarmert epoxy kan vi se i Tabell 1.1. Materialet ikke er isotropisk. Ved å veve fibrene på kryss og tvers kan man oppnå samme materialegenskaper i x- og y-retningen. Man kan derimot aldri få samme materialegenskaper i alle retninger i et komposittmateriale. I tillegg kan man generelt si at egenskapene endres etter fiberlengden, volumfraksjonen av fibre, og flere variable som diskuteres senere i rapporten.

Den mest anerkjente metoden for beregning av komposittmaterialer krever bruk av elementmetoden. Dette er en krevende metode, og det er dårlig kartlagt hvor godt den virkelig fungerer. Elementmetoden kan også brukes for beregning av sandwichmaterialer. Det store problemet oppstår når det brukes komposittmaterialer i et sandwichmateriale. I denne rapporten er det utviklet en metode for å analysere denne typen materialer. Man kan lese om allerede eksisterende metoder i Kapittel 7, mens i Kapittel 8 kan man se metoden som er utviklet i forbindelse med denne rapporten. Den egenutviklede metoden skal brukes til å gjøre en analyse av uttriggeren til Green Bay Systems.

Tabell 1.1: Materialelegenskaper hentet fra [7]

	Glassfiber/ Epoxy	Vevd Glassfiber/ Epoxy
Tetthet; ρ (g/cm ³)	2,10	2,20
Volumfraksjon av fibre; V_f (%)	0,55	0,45
E-modul i fiberretning; E_x (GPa)	39	29,7
E-modul vinkelrett på fibre; E_y (GPa)	8,6	29,7
Skjærmodul; G_{12} (GPa)	3,8	5,3

1.4 Målsettinger

Dette kapittelet beskriver masteroppgavens mål. Målsetningene ble definert i Forstudierapporten som finnes i Vedlegg I. For en enklere forståelse av målene kan man se i oversiktstreet og tidsplanen i som finnes i forstudierapporten.

1.4.1 Teoretisk arbeid

Første delen av oppgaven skal inneholde en studie av komposittmaterialer, dets historie og bruksområder. Det vil bli lagt stor vekt på å forklare komposittmaterialers egenskaper og oppbygging.

Når det kommer til komposittmaterialenes egenskaper skal det fokuseres på de mest brukte materialene på markedet. Rapporten skal inneholde en enkel guide som viser hvilke materialer som egner seg best i forskjellige sammenhenger. Rapporten skal også inneholde en omfattende beskrivelse av materialet Polleo Pan.

I historiedelen skal det tydelig komme fram når og av hvem de viktigste framskrittene innen teknologien ble gjort. Hvordan komposittmaterialer kan brukes i framtiden skal også vurderes.

Store deler av dette målet kan løses ved hjelp av litteratur tilgjengelig på BIBSYS. For informasjon angående Polleo Pan vil det være nødvendig å kontakte EKRO AS, produsent av materialet.

1.4.2 Analyse av ytre krefter

Det skal utføres en analyse av ytre krefter som kan virke på uttriggeren fra Green Bay Systems. Denne analysen vil legge grunnlaget for de neste delmålene.

Denne analysen vil omfatte det å snakke med diverse båtbrukere, og observere hvordan småbåter legger til en uttrigger.

Krefter som blir påført uttriggeren skal regnes med sikkerhetsfaktorer fra Norsk Standard. Kun egenvekten regnes uten sikkerhetsfaktorer fordi den ikke har noen variasjoner fra produkt til produkt.

1.4.3 Beregning av deler som ikke er komposittmaterialer

Etter analysen av krefter som er påført uttriggeren, skal det utføres kalkulasjoner på komponentene som ikke er laget av komposittmaterialer. Det skal vurderes om det er endringer som kan gjøres for å optimalisere konstruksjonen rent dimensjoneringsmessig.

I denne delen vil hovedfokuset ligge på å regne ut hvor store krefter innfestingen kan tåle.

For å løse innfestingssystemet mellom bryggen og uttriggeren blir det nødvendig å bruke Matlab som verktøy for å løse store matriser. Skrue/bolte-forbindelser skal løses etter NS EN 1993-1-8, som er en norsk standard for skrue- og bolteforbindelser.

1.4.4 Analyse og beregning av komposittmaterialer

Denne delen av oppgaven tar for seg å mulighetene for å analysere sandwichkomposittmaterialer både ved CAD(computer aided design) og tradisjonell regning. Hovedfokuset vil være å lage en god analyse i ANSYS.

Dette målet oppfylles når ANSYS-analysen er god nok for å analysere konstruksjoner laget av sandwichkomposittmaterialer. Det er ønskelig at analysene i ANSYS gjøres ved hjelp av programmering, og ikke GUI. Det er essensielt at analysen kan verifiseres med virkelige tester før den brukes videre.

Når en god metode for å analyse materialet er funnet, skal denne brukes for å gjøre en omfattende analyse av uttriggeren til Green Bay Systems.

1.5 Begrensninger

Det er vanskelig å forutse hindringer og problemer en oppgave av denne størrelsen kan by på. Det faktum at teknologien rundt komposittmaterialer er forholdsvis ny, og at forståelsen av materialene ikke er utbredt fører til at det kan bli vanskelig å finne informasjon. Det kan tenkes at det vil være nødvendig å ta noen antagelser som ikke har blitt tatt tidligere for å komme videre i oppgaven.

1.5.1 Teoretisk arbeid

Den første og mest naturlige begrensningen vil være det faktum at komposittmaterialer ikke har en standardproduksjon. Dette fører til at egenskaper og oppbygning av materialene vil variere fra produsent til produsent. Egenskapene til materialer vil derfor hentes fra store produsenters tall. Eventuelle yrkeshemmigheter angående oppbygging og egenskaper av komposittmaterialer vil også være en naturlig begrensning.

Det er knyttet stor usikkerhet angående hvor mye EKRO AS vet om materialeegenskapene til Polleo Pan.

1.5.2 Analyse av ytre krefter

Det vil ikke bli utført tester for å finne ut hvor store krefter som vil virke på uttriggeren. Grunnen er at dette krever mye utstyr. Denne delen av oppgaven regnes samtidig som mindre viktig enn selve analysedelene. Det vil derfor ikke legges stor vekt på hvordan bølgekrefter virker på konstruksjonen.

Det vil heller ikke gjøres store undersøkelser for å finne ut hvordan båter kan treffe uttriggeren. Isteden skal kun verste mulige tilfelle finnes.

1.5.3 Beregning av deler som ikke er komposittmaterialer

Begrensningen på denne delen av oppgaven vil være tiden. Da disse materialene ikke er hovedfokuset for oppgaven, vil det ikke være bli lagt vekt på store designendringer i innfestingen og midtleddet.

Dersom Green Bay Systems ønsker en videre analyse av innfestingen, vil det bli vurdert hvorvidt dette er relevant for oppgaven.

1.5.4 Begrensninger i analysen av komposittmaterialer

I og med at Green Bay Systems har kommet langt i utviklingsprosessen av sitt produkt, vil det ikke bli lagt stor vekt på å foreslå store endringer i designet av uttriggeren.

Det faktum at det ikke finnes gode analyser av materialet tidligere vil gjøre at det kan bli nødvendig med antagelser og forenklinger av både materialet og designet av uttriggeren for denne analysen.

Denne delen av oppgaven krever at det finnes tilstrekkelig materialdata for Polleo Pan.

1.6 Disposisjon

Rapporten består av 11 kapitler fordelt på 112 sider.

Kapittel 2 tar for seg den historiske utviklingen av komposittmaterialer. I dette kapittelet er det lagt stor vekt på å kartlegge når komposittmaterialer oppsto og ble tatt i bruk. I dette kapittelet er det også lagt vekt på å forklare dagens bruk av komposittmaterialer, samt hvordan materialene kan brukes i framtiden.

Det 3. kapittelet er det korteste men er svært viktig for forståelsen av komposittmaterialenes oppbygning. Kapittelet tar for seg viktige temaer om hvorfor komposittmaterialer har særegne materialeegenskaper.

Etter at oppbygningen av komposittmaterialer er forklart vil det være fokus på forskjellige komposittmaterialer. Kapittel 4 handler om materialeegenskaper til forskjellige komposittmaterialer. I dette inngår både egenskaper til fibre, matriks og egenskaper til

Kapittel 1: Innledning

sandwichkompositter. Dette kapitlet er det siste som ikke er tilknyttet uttriggeren eller analyser.

Kapittel 5 handler om bedriften Green Bay Systems og produktet som skal analyseres i forbindelse med rapporten. I dette kapitlet kan man lese om uttriggerens oppbygning, materialer og lignende. Kapitlet er ikke nødvendig å lese for å forstå analysene som er gjennomført i forbindelse med denne rapporten. Men kapitlet er nødvendig for en forståelse av hvorfor analysene gjøres.

For å kunne analysere uttriggeren er det nødvendig å kartlegge hvilke krefter som kan oppstå. Dette gjøres i Kapittel 6. Her vil det også bli regnet ut hvor store reaksjonskreftene er i uttriggerens innfesting.

Kapittel 7 handler om nettopp innfestingen mellom uttriggeren og bryggen. I dette kapitlet vil det fokuseres på to viktige aspekter ved innfestingen. Dette er en elementanalyse av innfestingskomponentene og en analyse av bolteinnfestingen. Dette kapitlet er det eneste av analysekapitelene som handler om stålkomponenter.

I Kapittel 8 kan man lese om noen utvalgte metoder for å gjøre beregninger på kompositt-, og sandwichkomposittmaterialer. Den beregningsmetoden som gis mest oppmerksomhet er elementmetoden ved bruk av dataprogramvare. I Kapittel 8 står det om generelt om hvordan ANSYS kan brukes for å beregne sandwichkompositter.

Det to neste kapitlene handler om dataanalyse av sandwichkompositter. Kapittel 9 forklarer i detaljer hvordan 3 programkoder for beregning av sandwichkompositter er laget. I tillegg gjøres det tester for å finne ut av hvor gode ANSYS-kodene er. Fordeler og ulemper ved de 3 kodene vil også diskuteres i dette kapitlet. Dette kapitlet er essensielt for gjennomføringen av det neste.

Kapittel 10 handler om den faktiske analysen av uttriggeren. Her vil både enkelte komponenter, og hele konstruksjonen analyseres men hensyn til kreftene som er funnet i Kapittel 6. Hovedfokuset er å vise mulighetene for analyser og mulighetene til å bruke de ANSYS-kodene som er laget i forbindelse med rapporten.

Kapittel 11 er konklusjonen av rapporten. Her vil de røde trådene samles og viktige resultater framheves. Her vil det også bli gitt tips om videre arbeid som kan gjøres for en bedre utnyttelse av denne rapporten.

2 Historisk om komposittmaterialer

Dette kapittelet tar for seg fire faser i komposittmaterialenes utvikling. Det starter med den eldre historien, da avanserte komposittmaterialer ikke var funnet opp. Deretter går vi videre til 1900-tallet da de ble oppfunnet. De siste to delene handler om bruk og utvikling av komposittmaterialer i dag og i framtiden.

Den eldre historien er inkludert for å vise hvor inspirasjonen til de moderne materialene kommer fra, og for vise at mennesker på et tidlig tidspunkt innså mulighetene for å blande forskjellige materialer for å få fram nye og bedre egenskaper. Dette kapittelet tar for seg en grov oversikt over utviklingen av komposittmaterialer, og vil ikke ta for seg en detaljert tilnærming av all historisk utvikling.

De aller nyeste komposittmaterialene, som blir kalt nanokompositter, er ikke av interesse. Det er heller ikke lagt vekt på utviklingen innen framstilling og produksjon av materialene.

2.1 Tidlige komposittmaterialer

Komposittmaterialer har eksistert helt siden *det nye riket* i oldtidens Egypt. På Figur 2.1 viser hva som antas å være et av de aller første komposittmaterialer. Allerede på 1500-tallet f.Kr brukte egypterne strå for å forsterke leiren som ble brukt til å lage bygninger[8]. Når egypterne fant ut at strå forbedret styrken i leiren, hadde de muligheten til å bygge større hus, som samtidig tålte mer. Strå i leire er helt likt prinsippet med armert betong. Begge disse er komposittmaterialer, men de faller ikke innenfor kategorien avanserte komposittmaterialer.

Egypternes tanker om å forbedre et materiale, med et annet som er prinsipielt forskjellig, og la de være separert i det ferdige materialet var genial på den tiden. Men det skulle gå mange år før noen videreførte deres ideer rundt dette, og brukte det i andre sammenhenger enn byggverk. Denne typen primitive komposittmaterialer har blitt brukt kontinuerlig siden egypterne introduserte det. Først på 1800-tallet begynte man å forsterke murer med metall. Dette regnes ikke som et stort teknologisk framskritt, men en videreføring av eksisterende prinsipper.



Figur 2.1: Leire forsterket med strå brukes enda enkelte steder i verden



Figur 2.2: Mongolsk bue

Det er funnet rester av laminerte buer fra 1800 f.Kr. Disse var laget av Assyrerne. Mongolbuen blir likevel trukket fram som den første komposittbuen. Grunnen til dette er at den ble laget av tre, horn og sener som var bindet sammen av animalsk lim. Buen hadde en veldig spesiell form som vist på Figur 2.2. Den spesielle formen gjør at spennvidden kan være mindre enn tidligere. Grunnen til at dette ses på som et komposittmateriale er at det får nye og bedre egenskaper ved å blande kjente materialer. Dette legger grunnlaget for utviklingen på 1900-tallet.

2.2 20. Århundre

Informasjonen i dette kapittelet og dets underkapitler er hentet fra [9], [10] og [11].

På 1930-tallet ble de første avanserte komposittmaterialene laget. Prinsippet var det samme som egypternes. Forskjellen er at nå ble strået byttet ut med glassfiber, og leiren med polymerer. Dette skapte et helt nytt materiale med lav vekt og høy styrke.

2.2.1 Første generasjons avanserte komposittmaterialer

Det var Owens Corning Fiberglass Company som laget de første brukbare glassfibrene i 1935, og begynte å selge de kommersielt allerede i 1938. Utviklingen av nye polymere på starten 1900-tallet la grunnlaget for et glassfiber raskt kunne tas i bruk som armering i polymermaterialer. Det startet med at marineindustrien tok det i bruk tidlig på 1940-tallet som en erstatning for de tunge tre- og metallbåtene. Mulighetene for å lage alle mulige former i et så sterkt materiale gjorde det også veldig interessant for flyindustrien. Mangel på tradisjonelle materialer i flyindustrien under 2. verdenskrig, førte til at utviklingen av kompositter ble intensivert. Figur 2.3 viser treningsflyet BT-15, hvor hele vingene ble laget av komposittmaterialer. Rett etter krigen gikk flyindustrien tilbake tradisjonelle materialer.

På denne tiden var det kun glassfiber som ble brukt som armering, og diverse polymere som matriks. Selv om dette blir regnet som første generasjons avanserte komposittmaterialer, dominerer disse dagens marked.



Figur 2.3: BT-15 øvelsesfly med vinger av glassfiberarmert epoxy[12]



Figur 2.4: Northrop Grumman B-2 Spirit[13]

Det er først i senere tid at fly igjen bruker avanserte komposittmaterialer i stor skala. I Kapittel 2.3 kan man lese litt mer om Boeing og Airbus sine nye fly, og deres bruk av disse materialene. Det gigantiske bombeflyet B-2, introdusert i 1997, er nesten utelukkende laget av komposittmaterialer. På Figur 2.4 ser vi hvordan B-2 ser ut og at designerne har dratt nytte av at komposittmaterialer er enkle å forme. Dette åpnet muligheten for stealthteknologien.

2.2.2 Nye og bedre komposittmaterialer

Den første utviklingen som skjedde etter 1945, var at man tok i bruk ulike matriksmaterialer. Epoxy og umettet polyester ble brukt sammen med glassfiber i alt fra sportsbiler til kretskort. Matriksmaterialene ble utviklet på nye måter som gjorde at de kunne blant annet tåle høyere temperaturer. Dette var svært viktig for romfartsindustrien.

Utviklingen av nye matrikser presset fram til utvikling av nye fibre. Karbon- og Boronfiber ble laget tidlig på 1960-tallet. De dyre og ekstremt gode Boronfibrene ble brukt i militære konstruksjoner hvor egenskaper, og ikke kostnader var avgjørende. Boronfibrene blir i dag brukt med metallmatrikser og er regnet som en av de beste fibrene i komposittmaterialer. Men det var karbonfiber som umiddelbart ble ansett som den beste erstatningen for glassfiber.

Kapittel 2: Historisk om komposittmaterialer

Lave råvare- og prosesskostnader har gjort at karbonfiber i dag blir sett på som det beste alternativet til metaller i mange industrier.

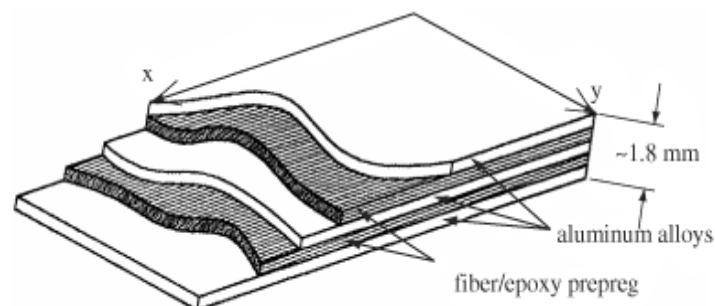
Den siste, og kanskje mest allment kjente fibertypen fra denne æraen er aramidfiber. Aramidfiber ble utviklet av DuPont i 1965 og er best kjent som Kevlar. Det blir brukt i utallige sammenhenger som strekker seg fra skuddsikre vester, til høyttalere.

I de seneste årene har det blitt mer vanlig å bruke metalliske eller keramiske matrikser i kombinasjon med de tradisjonelle fibrene. Det veldig mange forskjellige kombinasjoner av fiber og matriks. De vanligste avanserte komposittmaterialene[7] er i dag:

- Glass/Epoxy, Aramid/Epoxy, Karbon/Epoxy, Grafitt/Epoxy, Boron/Epoxy
- Karbon/Polyesterplast(PEEK), Glass/Polyesterplast
- Karbon/Polyamid
- Boron/Aluminium, Silikonkarbid/Aluminium
- Silikonkarbid/Keramikk

De tre vanligste matriksene er representert i denne listen; polymeres, metallisk og keramisk matriks. I tillegg finnes det karbonmatriks. Karbonmatriks brukes med karbonfibre og har svært gode mekaniske egenskaper. Egenskapene til mange av disse materialene kan man finne i Kapittel 4.

I tillegg til alle disse komposittmaterialene, finnes det som heter sandwichkompositter. Her kan man altså laminere komposittmaterialer med andre materialer. Et godt eksempel på dette er GLARE. GLARE brukes i flyet Airbus A380 og er et laminat med glassfiberarmert epoxy, og en aluminiumlegering. Figur 2.5 viser hvordan sandwichen GLARE er bygd opp. Her er de hvite lagene aluminiumslegeringen, mens de mørke er glassfiberarmert epoxy. Dette sandwichmaterialet er en direkte videreføring av teknologien fra Mongolenes buer.



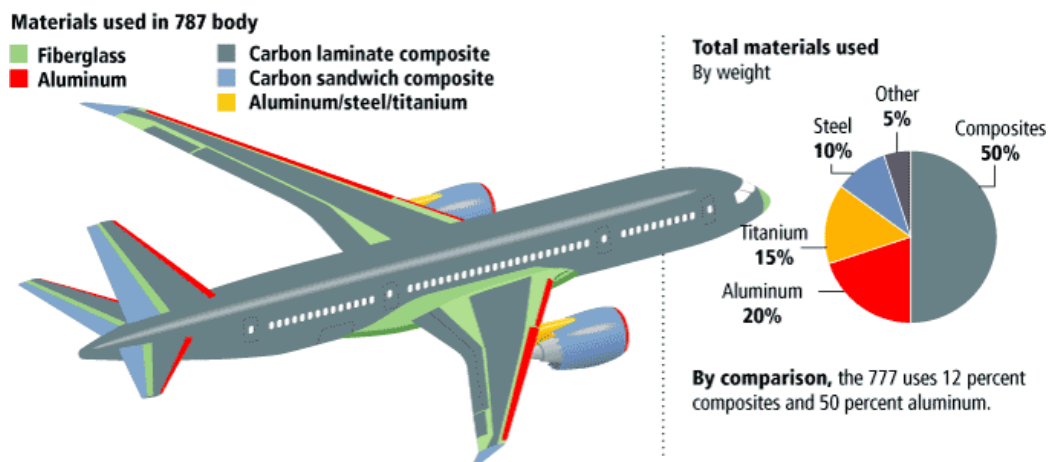
Figur 2.5: Oppbygning av GLARE [14]

2.3 Dagens bruk av komposittmaterialer

Komposittmaterialer blir i dag brukt i svært mange forskjellige sammenhenger. Grunnen til dette er nok at det finnes såpass mange forskjellige typer komposittmaterialer. Som tidligere nevnt er glassfiberarmert epoxy ett av de. Dette er et materiale som blant komposittmaterialene blir regnet som mindre godt grunnet lav stivhet, og styrke. Likevel lages så å si alle moderne båter under 30 fot, og enkelte fiskebåter helt opptil 100 fot av dette komposittmaterialet.

Karbonfiber brukes i svært mange sammenhenger, akkurat som glassfiber. Alt fra moderne sportsbiler til golfkøller blir laget i karbonfiber. Dette skyldes materialets lave vekt i forhold til styrken. Den høye bruddfastheten på opptil 3000Mpa og gode egenskaper med tanke på termisk utvidelse fanget tidlig på 80-tallet interessen til Formula 1-lagene. Siden den gang har Formula 1 videreutviklet og optimalisert materialet til bruk i moderne sportsbiler. Materialets lave vekt gir muligheter for høyere hastigheter, men samtidig gir lav vekt en mulighet for lavere drivstofforbruk. Ironisk nok kan karbonfiber være en god løsning til det økende kravet om mindre drivstofforbruk. Dette er per dags dato en veldig dyr løsning, men masseproduksjon kan endre dette da råvarene ikke er kostbare.

Det relativt nye flyet Airbus A380 kan ses på som det optimale eksempelet på hva som kan oppnås ved bruk av komposittmateriale. Dette flyet består av mer enn 20% komposittmaterialer[16]. Flyet symboliserer på mange måter hva man kan oppnå ved bruk av avanserte komposittmaterialer. Boeing har brukt lignende materialer i sine nyeste fly. Spesielt deres samarbeid med NASA har ledet til deres neste fly som heter Boeing Dreamliner 787. Dette er ikke et stort fly sammenlignet med Airbus A380, men dreamlineren til Boeing har som mål å senke drivstofforbruket drastisk. Så mye som 50 vektprosent av flyet er laget av moderne komposittmaterialer[15]. Komposittmaterialer er av den grunn Boeings storsatsing på neste generasjons fly. Figur 2.6 viser hvilke deler av skroget til Boeing 787 Dreamliner som faktisk er laget av komposittmaterialer. Siden komposittmaterialer veier mindre enn tradisjonelle materialer, vil 50 vektprosent utgjøre en svært stor del av skrogets areal.



Figur 2.6: Bruk av komposittmaterialer på Boeing 787 Dreamliner[15]

2.4 Framtidig utvikling

Mennesker har i all tid brukt tilgjengelig teknologi for å gjøre sine liv enklere og bedre. De nye og avanserte komposittmaterialene brukes i forholdsvis mange produkter allerede i dag, men i framtiden vil vi etter all sannsynlighet få en stor økning i komposittmaterienes bruksområder.

Det er tre motivasjonsgrunner for utviklingen av komposittmaterialer i kommersielle produkter. Det første er den økte forståelsen av materialeegenskapene til komposittmaterialer. Den andre grunnen er kravet av materialer med høy ytelse i forhold til vekt. Og den siste grunnen er moderne datamaskiners beregningsmuligheter[7]. Disse tre grunnene er per dags dato veldig viktige årsaker for økningen i bruk av komposittmaterialer. I framtiden vil kravet om enda lettere og bedre materialer øke i flere industrier. Dette vil føre til en enorm utvikling på de to andre punktene som handler om forståelsen av materialene og mulighetene for å gjøre kalkulasjoner. På denne måten kan komposittmaterialer få en kraftig økning i tiden som kommer.

Mange ingeniører og designere har et inntrykk av at komposittmaterialer kan bli alt for dyre i forhold til å bruke tradisjonelle materialer. Dette stemmer ikke alltid. Grunnen er at avanserte komposittmaterialer har overlegene egenskaper når det kommer til styrke og stivhet i forhold til vekt. Mindre vekt og bedre egenskaper, betyr at man trenger mindre materiale, og derfor så kan en løsning med komposittmaterialer bli kostnadseffektiv. Komposittmaterialer kan også bli kostnadseffektivt dersom man tar hensyn til mindre korrosjon og god utmattingsmotstand. Problemet i dag er at det ikke er stor nok kunnskap blant gjennomsnittsingeniører. Det kan være vanskelig å bruke komposittmaterialer hvis man ikke har erfaring med materialene fra tidligere. Derfor vil disse materialene i nærmeste framtid forbli et nisjemateriale.

Ettersom kunnskapen blant ingeniører sannsynligvis vil øke med årene, vil det bli muligheter for flere og flere produkter som er laget av avanserte komposittmaterialer. Nedenfor finner man en kort liste over produkter som allerede er i utvikling.

- Laptop: Lettere, tynnere, stivere og med lavere varmeutvikling.
- Økovenlige transportmidler: Lettere biler, tog, fly etc.
- Forsterkning av konstruksjoner: forsterkning av lastbærende bjelker.
- Medisin og tannlegeindustri: Protoser og implantatkirurgi for bein og tenner.

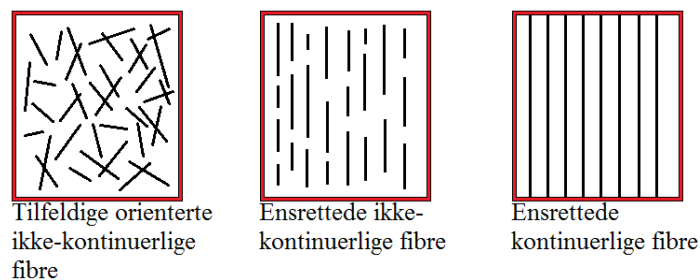
I tillegg til konstruksjoner som krever høye mekaniske egenskaper i forhold til vekt, vil komposittmaterialer være viktig for komponenter som krever liten termisk utvidelse, god korrosjonsmotstand eller god utmattingsmotstand. Det er vanskelig å si spesifikt hva komposittmaterialer kan bli brukt til. Grunnen er mangfoldet av materialer tilgjengelig. I tillegg til at det finnes mange forskjellige kombinasjoner av fiber og matriks, kan man bygge opp et spesifikt komposittmateriale på forskjellige måter. Dette gir en veldig stor variasjon i mekaniske egenskaper. Man kan lese mer om dette i kapittel 3 og 4.

3 Oppbygning

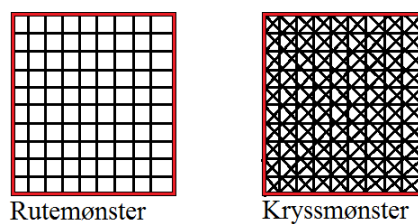
Dette kapitlet handler om hvordan komposittmaterialer er bygd opp, og hvorfor de har annerledes mekaniske egenskaper enn metaller. Grunnmaterialet, eller matriksmaterialet, i en kompositt er som regel en polymer eller epoxy, mens fibreene kan være laget av forskjellige materialer. De mest vanlige fibreene er glassfiber og karbonfiber. Man kan lese om forskjellige fibre og matriksmaterialer i Kapittel 4.

Fibreene som forsterker matriksen kan enten være kontinuerlige eller ikke-kontinuerlige. På Figur 3.1 ser vi hvordan disse to typene kan brukes som forsterkning. Alt innenfor den røde rammen, bortsett fra de svarte strekene, er matriksmateriale. De svarte strekene symboliserer fibreene.

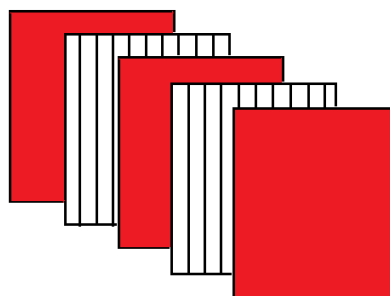
Det er også mulig å veve fiber. Da brukes ensrettede kontinuerlige fibre som veves sammen. Man får da et rute- eller kryssmønster med ensrettede fibre. Fordelene med å veve fiber er at man har gode mekaniske egenskaper i flere retninger. Ved å veve fibreene i et kryssmønster kan man oppnå svært jevne mekaniske egenskaper i planet. Figur 3.2 viser eksempel på disse to vevemønstrene.



Figur 3.1: Tre hovedtyper av fibre



Figur 3.2: Vevde fibre



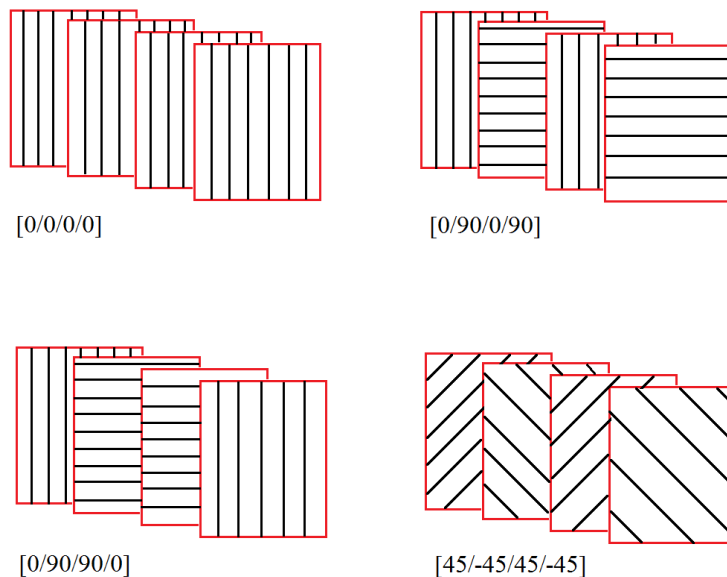
Figur 3.3: Lagvis Oppbygning

Kapittel 3: Oppbygning

For å lage et komposittmateriale er det vanlig å bruke mange lag med fibre. En vanlig måte å bygge opp en kompositt på er å først legge et lag med matriksmateriale, så et lag med fibre. Dette gjøres til man har oppnådd den ønskede tykkelsen av materialet. Figur 3.3 viser hvordan lagoppbygningen ser ut dersom man bruker ensrettede kontinuerlige fibre. Grunnmaterialet er igjen merket med rødt, mens fibreene er svarte. Denne figuren viser hvordan et ferdig laminert komposittmateriale vil se ut rent skjematisk. Ved å se for seg en slik lagvis oppbygning går man glipp av en detalj. Dette er at grunnmaterialet vil fylle alle hulrom mellom fibreene. Derfor er det i virkeligheten ingen lagvis oppbygning mellom grunnmateriale og fibreene. Det er fibreene som er bygd opp lagvis, mens grunnmaterialet flyter rundt.

For å få fram ønskede mekaniske egenskaper i et laminat som vist i Figur 3.3, er det viktig at både matriksmaterialet og fibreene er valgt i forhold til ønsket resultat. I tillegg så vil det være viktig med orienteringen av fiberlagene. Figur 3.4 viser noen orienteringer på fibreene. Denne figuren viser ikke matriksmaterialet. Det er altså kun fiberlagene i laminatet som vises. Teksten under de 4 tegningene i figuren er standard notasjon for å forklare orienteringene til de forskjellige lagene. Ved å orientere lagene riktig kan man oppnå jevne mekaniske egenskaper i planet, akkurat som ved å veve fibreene.

Siden fibre har best egenskaper i sin lengderetning, er det svært viktig at fibrenes orientering er riktig dersom det brukes ensrettede fibre. Et komposittmateriale som har feil fiberretning kan ende opp som et svært dårlig alternativ til konvensjonelle materialer.



Figur 3.4: Fiberretninger

4 Egenskaper

Komposittmaterialer har forskjellige egenskaper enn metaller. Det finnes flere grunner til dette, men først og fremst skyldes det at materialene ikke er homogene. Den andre store forskjellen er at komposittmaterialer består av to separate materialer. Dette gir en del utfordringer forbundet med det å finne materialeegenskaper. Man må se på både matriksmaterialet og fiberforsterkningen for å forstå egenskapene til et komposittmateriale.

Dette kapittelet vil gi en forklaring og sammenligning av forskjellige matriksmaterialer og fibre, samt hva formålet er med disse to komponentene. Kapittelet tar også for seg materialeegenskaper til vanlige fiber/matriks-kombinasjoner. Mot slutten er det et delkapittel angående sandwichkompositter.

Mye av informasjonen i underkapitlene 4.1, 4.2 og 4.3 er hentet fra [17]. Dette inkluderer fakta om materialer, prisantydninger, grafer, tabeller og lignende.

4.1 Matriksmaterialer

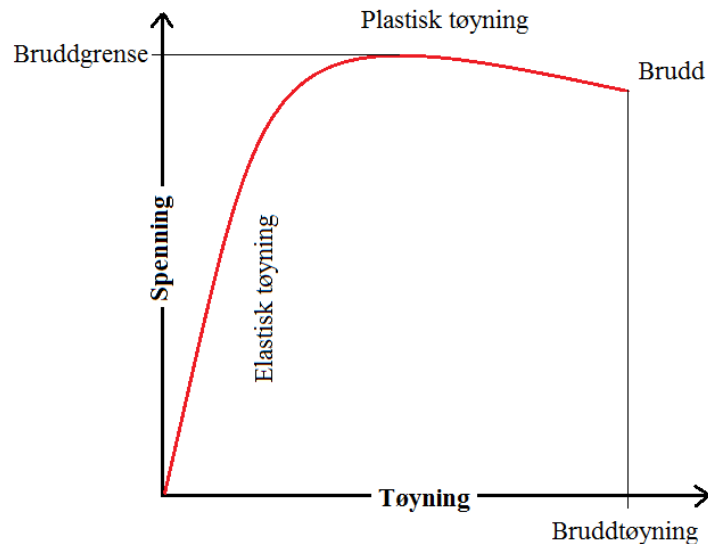
Matriksmateriler finnes svært mange varianter. Alle variantene kan deles i tre hovedkategorier. Den mest brukte er polymerbasert. Polymere kan igjen deles inn i undergruppene termoplast og herdeplast. De to andre hovedkategoriene er metall-, keramikkmatriser.

Matriksens formål er å overføre krefter til fibre og å holde fibre på plass.

For at matriksmaterialet effektivt skal overføre krefter påført til fibre, må det være god binding mellom fibre og matriksen. Dette er derfor ett av matriksmaterialenes viktigste egenskap.

Det er også essensielt at matriksen blir valgt ut ifra hvilket miljø materialet skal brukes i. Matriksen vil, i motsetning til fibre, være i kontakt med miljøet rundt, og må derfor være bestandig mot eventuelle kjemikalier og lignende. Det kan også være viktig at matriksen tåler slag og støt for å beskytte fibre.

Et optimalt spennings-tøynings-diagram for et matriksmateriale ser en på Figur 4.1. Det aller viktigste ved de mekaniske egenskapene er at matriksmaterialet har større eller lik elastisk deformasjon som fibre. Grunnen til dette er at bindingen med fibre ikke skal ødelegges. Dette er også viktig for å kunne dra nytte av fibrenes høye styrke. Dersom den elastiske deformasjonen til matriksen er mindre enn for fibre, vil materialet ødelegges uten at fibrenes gode mekaniske egenskaper blir utnyttet fullt ut.



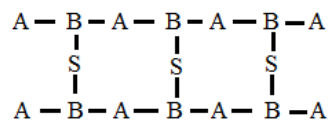
Figur 4.1: Optimalt spenning-tøyningsdiagram for matriksmateriale

Figuren viser at man har elastisk tøyning ved høy bruddgrense(strekfasthet). Men det er også viktig at matriksmaterialet har tilstrekkelig plastisk deformasjon for å unngå sprøbrudd.

4.1.1 Polyester

Umettet polyester er ett av de mest brukte matriksmaterialet i kompositter. Det finnes mange varianter av polyester som har forskjellige egenskaper. Fokuset ligger på grunnegenskapene til polyester, og ikke alle de forskjellige variantene. Dette vil også gjelde for de andre matriksmaterialene og fibre som kommer senere rapporten.

Det er styren som danner kryssbindingene med de molekylære kjedene av polyester. De fleste polyesterresinene inneholder opptil 50% styren. Illustrasjonen nedenfor viser hvordan disse bindingene ser ut. S representerer styrenmolekyler, mens A og B representerer polyestermolekyler hvor B er bindingsmolekylet. Denne typen bindinger gjør at man har et sprøtt materiale ved slag.

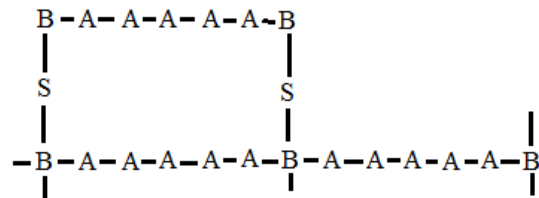


Polyester resin er den enkleste å bruke av kommersielt tilgjengelige resiner. Grunnen er at det har lav viskositet. En annen fordel er at mettet polyester ikke krever høyt trykk for å tørke.

Polyester er den matriksen som har de dårligste mekaniske egenskapene. Grunnen til at det blir brukt er at kostnadene er lave (10-20 kr/kg). Samtidig er polyester et velprøvd materiale som kan brukes i de fleste sammenhenger hvor det kreves moderate mekaniske egenskaper. Utmattingsmotstanden er dårlig i forhold til mange andre polymerbaserte resiner, men er mye bedre enn de aller fleste metaller. Diverse tilsetningsstoffer kan brukes for å øke de mekaniske egenskapene til polyester.

4.1.2 Vinylester

Vinylesters molekylære struktur ligner på polyester. Forskjellen er at bindingene ligger på begge ender av molekylærkjeden. Nedenfor vises molekylstrukturen til vinylester. Ved å sammenligne med bindingene i polyester er det færre styrenbindinger(S). A og B representerer vinylestermolekyler hvor B er molekylet som bindes til styren. Denne typen bindinger fører til at materialet kan absorbere slag og lignende uten å få sprøbrudd. Denne egenskapen har gjort at vinylester ofte brukes som ytre skall for polyester.



Vinylester inneholder færre estergrupper enn polyester. Dette fører til at det vinylester har er bedre egnet i marine konstruksjoner grunnet estergruppene følsomhet for vann. Vinylester er også bedre mot andre kjemikalier enn polyester. Vinylester kan derfor brukes som matriksmateriale i rør og tanker.

Vinylester har generelt noe bedre mekaniske egenskaper enn polyester. Men ulempene med vinylester er at det kreves omfattende herding for å oppnå disse egenskapene. Den største ulempen er likevel at den har stor sammenkrymping ved herding, tilsvarende som polyester.

Til tross mange fordeler i forhold til polyester, brukes vinylester mye mindre. Grunnen kan være at prisen er dobbelt så høy(20-40 kr/kg).

4.1.3 Epoxy

Av de mest vanlige polymerbaserte matriksmaterialene blir epoxy resin regnet som det aller beste. Grunnen til dette er at epoxy har svært gode mekaniske egenskaper. Dette innebærer høy stivhet og elastisk deformasjon. Epoxy har også god varme- og kjemisk bestandighet samt gode elektriske isolasjonsegenskaper. Epoxy har gode bindinger til de fleste fibertyper og overfører derfor krefter godt. Epoxy er svært allsidig og blir brukt i mange industrier som matriks. Spesielt godt er materialet mot utmatting og vanninntrenging. Epoxy kan derfor ofte finnes i speedbåter og vannjeter.

Andre store fordeler med epoxy er at det er svært lett å forme, samt at det krymper lite ved herding. Dette fører til at det er få indre spenninger som kan skade materialets egenskaper.

Den største ulempen med epoxy er at det krever svært nøyaktig blanding med herder. I tillegg er epoxy mye dyrere enn polyester og vinylester. Prisen på epoxy varierer etter kvalitet, men er vanligvis 50-100 kr/kg.

4.1.4 Andre matriksmaterialer

Det finnes utallige matriksmaterialer på markedet i dag. De tre som er nevnt ovenfor er alle polymerbaserte.

Lette metaller som Aluminium og Titan brukes også i visse sammenhenger. Disse materialene har som kjent veldig gode mekaniske egenskaper på de fleste områder. Kompositter med metallmatriks brukes først og fremst som forsterkninger av sylindre og lignende i bilindustrien. Hjulopphenget på F-16-fly blir laget av silikonkarbidfibre i titanmatriks[18].

Den tredje, og siste, typen matriksmateriale er keramisk. Disse har utrolig lav vekt, samtidig som de mekaniske egenskapene er gode. Den store styrken til keramiske kompositter er varmebestandigheten på minst 1000 °C. Keramiske komposittmaterialer er fortsatt tidlig i utviklingen, og man vil etter all sannsynlighet ta i bruk disse materialene i større grad de neste årene. I dag brukes de primært til bremseskiver i sportsbiler og som armering i skuddsikre kjøretøy. Som armering brukes ofte Aramidfiber til denne matrikstypen.

4.1.5 Materialeegenskaper til noen matriksmaterialer

Tabell 4.1 er en oversikt over materialeegenskaper til forskjellige matriksmaterialer. Ettersom egenskapene for matriksmaterialet avhenger av herdetiden, er alle av verdiene i tabellen funnet ved hjelp av tester utført av bedriften Gurit. Tabellen viser de mekaniske egenskapene ved to vanlige herdeprosesser. Den første er 7 dager i romtemperatur, mens den andre er 5 timer ved 80°C. Jevnt over gir det siste alternativet bedre materialeegenskaper.

Tabell 4.1: Materialeegenskaper til noen matriksmaterialer

Egenskap Material	Strekkfasthet (GPa)		E-modul (MPa)	
	7 dager ved 20°C	5 timer ved 80°C	7 dager ved 20°C	5 timer ved 80°C
Polyester	2	2,8	50	65
Vinylester	2,5	3	50	75
Epoxy	3,4	3,3	60	80

4.2 Fiberforsterkningen

I denne delen av rapporten fokuseres det på de kontinuerlige ensrettede fibre. Først i Kapittel 4.2.5 kan man lese om faktiske mekaniske egenskaper. Underkapitlene fram til dette er ment for å gi en oversikt over styrker og svakheter ved de forskjellige fibertypene.

Fibrenes formål er å gi kompositten gode mekaniske egenskaper. Fibrene er altså lastbæreren. De mekaniske egenskapene blir i stor grad definert av fibrenes egenskaper.

Følgende fire faktorer bestemmer fibrenes bidrag i en kompositt:

1. Fibrenes mekaniske egenskaper
2. Kraftoverførselen mellom fiber og matriks
3. Fiberorienteringen
4. Volumfraksjonen av fibre

Punkt 2 og 4 vil betyr det samme ved veldig høy volumfraksjon av fiber. Problemet oppstår når volumfraksjonen av fibre kommer over 70%. Da er det ikke nok matriksmateriale for å få gode bindinger mellom fiber og matriks. Dette fører til lavere mekaniske egenskaper.

Fiberorienteringen er den største fordel, og samtidig svakheten til komposittmaterialer. Siden fibre har sin styrke i lengderetningen er det viktig å orientere fibre på en måte som fører til at påførte krefter virker i samme retning som fibrenes lengderetning.

4.2.1 Glassfiber

Glassfiber er utvilsomt den mest brukte fiberforsterkningen i kompositter. Det brukes veldig mye i båter og andre marine konstruksjoner. Grunnen til dette er nok den lave prisen. Det er riktignok veldig mange forskjellige typer glassfiber, men en typisk pris på ensrettede fibre er rundt 50-200 kr/kg. Det finnes to hovedgrupper av glassfiber; dette er E-glass og C-glass.

C-glass, eller kjemisk glass, har til forskjell fra E-glass(elektrisk) god motstand mot kjemikalier og brukes derfor ofte i rørsystemer og tanker. E-glass er den mest brukte typen. Det finnes utallige undergrupper for disse fibre. Alle de store fabrikantene har sitt navn på fibre, men essensielt er alle like. Den mest markante egenskapen for glassfiber er at de elastiske helt til brudd. Mekaniske egenskaper for Glassfiber, og de andre fibertypene finnes i Kapittel 4.2.5.

4.2.2 Karbonfiber

Variasjoner i grafittiseringen ved produksjon gjør at karbonfiber enten får høy styrke, eller høy E-modul. Det er umulig å få begge deler med dagens produksjonsmetoder. Det er mest vanlig med en kompromiss mellom disse to egenskapene, og dermed få jevnt gode fibre.

Kapittel 4: Egenskaper

Karbonfiber har mye bedre materialegenskaper enn glassfiber på alle områder. Karbonfiber har i tillegg lavere tetthet. Kostnaden på karbonfiber er derfor 150 til 400 kr/kg. Dette begrenser bruken av disse fibre til produkter som krever ekstreme egenskaper.

Denne fibertypen har god korrosjonsmotstand samt motstand mot utmatting og sprekkdannelse. Det negative med karbonfiber er at det har veldig lav slagseighet, som gir sprøbrudd. Dette problemet oppstår spesielt dersom fibre er laget for å ha høy styrke, og lavere elastisitetsmodul.

4.2.3 Aramidfiber

Aramidfiber har veldig god slagseighet og brukes derfor mye i militærsektoren som armering i kjøretøy og i skuddsikre vester. En annen grunn til at den brukes som armering er den lave vekten. Vi ser en tabell over tettheten til aramidfiber sammenlignet med de andre fibertypene i Kapittel 4.2.5.

Aramidfiber har veldig høy strekkstyrke og gjennomsnittlig elastisitetsmodul. En annen styrke til denne fibertypen er god kjemikalie- og termisk resistens. Svakheter med aramidfiber er kompresjonsstyrken er lav (lik som for glassfiber) og at det er sensitivt mot UV-lys.

Aramidfiber koster vanligvis mellom 150 og 250 kr/kg. DuPont som er den største produsenten av denne fibertypen og selger det under merkenavnet Kevlar.

4.2.4 Andre fibertyper

De tre fibertypene som er nevnt tidligere står for en svært stor del av markedsandelen for fibre i dag. Disse fibertypene som har jevnt over gode mekaniske egenskaper samtidig som de har konkurransedyktig pris. Men det finnes mange flere fibertyper. De øvrige fibre har mer spesialiserte egenskaper.

Et godt eksempel på spesialiserte egenskaper er polyesterfiber. Disse fibre har veldig god motstand mot slag. Derfor brukes disse fibre i de ytterste lagene i et komposittmateriale. Polyesterfibre har forøvrig mye dårligere stivhet enn andre fibertyper.

Polyetylenfibre har også er svært spesifikt bruksområde. Disse fibre har svært høy strekkfasthet sammenlignet med vekt på fibre. Det finnes derfor et stort marked for denne fibertypen. Det største problemet med fibre er at det kreves mye arbeid for å lage de, og at de har svært dårlige egenskaper i kompresjon.

Mineral(kvarts)-fibre brukes i komponenter som utsettes for ekstremt høye temperaturer. Ved bruk med keramiske matriksmaterialer kan kvartsfibre brukes i over 1000°C. Denne fibertypen blir regnet som den aller dyreste sammen med det som heter Boronfibre.

Boronfibre har de beste mekaniske egenskapene av alle. Grunnet den ekstremt høye prisen brukes Boronfibre ofte i kombinasjon med en billigere fibertype.

4.2.5 Materialegenskaper til noen fibertyper

For en full forståelse av egenskapene til fibre er det mer enn bare mekaniske egenskaper til fibre som må vurderes. Andre viktige faktorer er binding med matriks og volumfraksjon fibre. Tabell 4.2 viser en oversikt over materialeegenskapene: strekkfasthet, E-modul og tetthet, til forskjellige fibertyper. Tallene i tabellen er hentet fra [7] og verifisert med [17].

Tabell 4.2: Vanlige egenskaper for noen fibertyper

Fibermateriale	Type	Strekkfasthet (MPa)	E-modul (GPa)	Tetthet (g/cm ²)	Merknad
Karbon	Høy styrke	3500	160-270	1,8	Billig ift. andre kvaliteter
	Std E-modul	5300	270-325	1,8	
	Høy E-modul	3500	325-440	1,8	
	Maks E-modul	2000	440+	2,0	Lite brukt
Aramid	Lav E-modul	3600	60	1,45	
	Høy E-modul	3100	120	1,45	
	Maks E-modul	3400	180	1,47	
Glass	E glass	2400	69	2,5	Standard glassfiber
	S glass	3450	86	2,5	Trademark; OCF

4.3 Egenskaper til noen komposittmaterialer

Tidligere i kapittelet ble materialeegenskaper til fiber og matriks diskutert separat. Nå studeres egenskapene til et ferdig komposittmateriale. Det fokuseres kun på et fåtall materialer som er mye brukt. Boronarmert Aluminium har jevnt over de beste materialeegenskapene av komposittmaterialene i Tabell 4.3 og 4.4. Dette materialet har også en veldig høy egenvekt i forhold til de andre. Fordelen med metallmatriks er at E-modulen blir høy vinkelrett på fibre. For øvrig har Karbonfiberarmert epoxy de beste egenskapene av standardfibrene. Ved å bruke PEEK(polymer)matriks med karbonfiber faller egenskapene som vist i Tabell 4.4. Dette stemmer godt overens med materialeegenskaper vist i Tabell 4.1 og 4.2. Forskjellene mellom de dyre og billige komposittmaterialene ikke er så stor som man kanskje kunne forventet. Verdiene i Tabell 4.3 og 4.4 er hentet fra [7].

Verdien fra tabellene tar utgangspunkt i ensrettede fibre. Det er verdt å merke seg at materialer som er vevd har like egenskaper i planet. Dette stemmer godt overens med teori fra Kapittel 3. Strekkfastheten er oppgitt kun i strekk i disse tabellene. Generelt er kompresjonsfastheten er fra 50-90% av strekkfastheten.

Tabell 4.3: Materialeegenskaper til vanlige komposittmaterialer

Egenskap \ Materiale	Glassfiber/ Epoxy	Vevd Glassfiber/ Epoxy	Karbon/ Epoxy	Aramid/ Epoxy
Tetthet; ρ (g/cm ³)	2,10	2,20	1,58	1,38
Volumfraksjon av fibre; V_f (%)	0,55	0,45	0,63	0,60
E-modul i fiberretning; E_1 (GPa)	39	29,7	142	87
E-modul vinkelrett på fibre; E_2 (GPa)	8,6	29,7	10,3	5,5
Skjærmodul; G_{12} (GPa)	3,8	5,3	7,2	2,2
Tverrkontraksjon, ν_{12}	0,28	0,27	0,27	0,34
Tverrkontraksjon, ν_{21}	0,06	0,06	0,02	0,02
Strekkfasthet i fiberretning; σ_1 (MPa)	1080	1280	2280	1280
Strekkfasthet vinkelrett på fibre; σ_2 (MPa)	39	49	57	30

Tabell 4.4: Materialeegenskaper til andre komposittmaterialer

Egenskap \ Materiale	Karbon/ PEEK	Grafit/ Epoxy	Boron/ Epoxy	Boron/ Aluminium
Tetthet; ρ (g/cm ³)	1,57	1,59	2,03	2,65
Volumfraksjon av fibre; V_f (%)	0,58	0,57	0,50	0,50
E-modul i fiberretning; E_1 (GPa)	131	249	201	235
E-modul vinkelrett på fibre; E_2 (GPa)	8,7	6,4	21,7	137
Skjærmodul; G_{12} (GPa)	5,0	4,9	5,4	47
Tverrkontraksjon, ν_{12}	0,28	0,23	0,17	0,30
Tverrkontraksjon, ν_{21}	0,02	0,01	0,02	0,17
Strekkfasthet i fiberretning; σ_1 (MPa)	2060	589	1600	1573
Strekkfasthet vinkelrett på fibre; σ_2 (MPa)	78	29,4	125	157

4.4 Sandwichkompositter

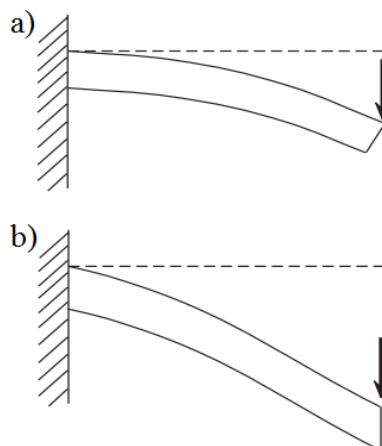
Sandwichkompositter er egentlig bare en ny måte å bruke komposittmaterialer på. Sandwichkompositter har et annet materiale mellom to komposittplater. Tidligere i rapporten ble GLARE nevnt. GLARE er en sandwichkompositt bestående mange lag med aluminium og glassfiberarmert epoxy. Dette er en meget avansert sandwichkompositt, og er ikke vanlig å bruke i annet enn fly- og romfartsindustrien. Figur 4.2 viser en av NASAs mest avanserte sandwichkompositter. Topp- og bunnlagene i sandwichen er komposittmateriale med keramisk matriks, mens kjernen er av keramisk skummateriale. Denne sandwichoppbygningen er standard for alle moderne sandwichkompositter.

Vanligvis brukes mye enkle kjernematerialer som Polyuretan- og PVC-skum. Disse har svært lav vekt, og er billige. Kjernen i et sandwichmateriale har flere formål. For det første så skal kjernematerialet holde de to sidene i konstant avstand fra hverandre[19]. Ved å ha en avstand mellom de to sideflatene som er av komposittmaterialer oppnås økt treghetsmoment og bedre bøyestivhet. [20]

Den viktigste oppgaven for kjernen i en sandwich er å ta opp skjærkrefter. Dersom kjernen ikke gjør det, svekkes sandwicheffekten[20]. Figur 4.3 viser tydelig hvorfor skjærstyrke er viktig for sandwichkompositter. I Figur 4.3b klarer ikke kjernen å ta opp skjærkreftene som oppstår, og fører til stor nedbøyning.



Figur 4.2: Sandwichkompositt utviklet av NASA[21]



Figur 4.3: Skjærkrefter i kjernen[20]

Kapittel 4: Egenskaper

Andre fordeler som kan oppnås ved valg av riktig kjernemateriale er isolasjonsegenskaper, opptak av fuktighet og lignende.

Det ytre skallet, som er av komposittmateriale skal i motsetning til kjernen, ta opp strekk og kompresjonskrefter.

Bindingen mellom kjernen og skallet må overføre skjærkreftene. Det kan være vanskelig å spesifisere kravene til denne binderen. Ofte neglisjeres denne ved kalkulasjoner av sandwichmaterialer.

5 Green Bay Systems

Dette kapittelet handler om bedriften Green Bay Systems, samt produktet de skal produsere.

5.1 Om bedriften

Green Bay Systems AS er en bedrift som holder til i Kongsberg, Buskerud. Prosjektet som førte til dannelsen av bedriften ble igangsatt våren 2008, og stiftet i 2010 av Odd Christian Sandengen. Bedriften ble stiftet som et datterselskap av Arkitek AS. Green Bay Systems lager utriggere for båter på rundt 20 fot(6 meter). For øyeblikket har GBS to utriggere i sitt sortiment. Dette er *Straight version* og *Foldback version*. Fakta om foldbackutgaven kan man finne i Kapittel 5.2. *Straight version* skiller seg fra denne i design, men lages av de samme materialene. Figur 5.1 viser forskjellene i design mellom de to typene.

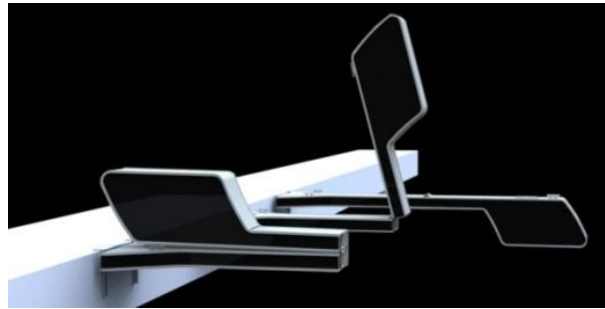
Forretningsvirksomheten i bedriften er definert fra et grønt maritimt miljø, og har stort fokus på å være miljøvennlig. Utriggere produsert av GBS har som mål å være markedsledere når det kommer til kvalitet. Store deler av utriggeren er derfor produsert i komposittmaterialet Polleo Pan.

Green bay systems har allerede laget fungerende prototyper av utriggeren som heter *Foldback version*, men trenger flere kalkulasjoner for å være trygge på at produktet er godt nok for markedet. Denne rapporten vil kun ta for seg *Foldback version* i videre arbeid. Utriggeren skiller seg fra andre på markedet ved å bruke komposittmaterialer, men også ved det som kalles “foldback”-funksjon. Denne funksjonen gjør at den ytterste delen av utriggeren vipper tilbake, for å unngå at den ligger i vannet med flyteelementet. Figur 5.2 viser hvordan utriggeren med vippemekanismen ser ut. Formålet med en slik mekanisme er muligheten til å løfte den når vannet fryser, eller når den ikke er i bruk.

Utriggerens vekt er av stor betydning for bedriften. En lav vekt gjør at det ikke kreves løfteutstyr for å sjøsette utriggeren. En lav vekt fører også til at vippemekanismen brukes enkelt.



Figur 5.1: *Straight version* til venstre, og *foldback* til høyre[2]



Figur 5.2: Vippe-mekanisme[2]

5.2 Konstruksjon og design

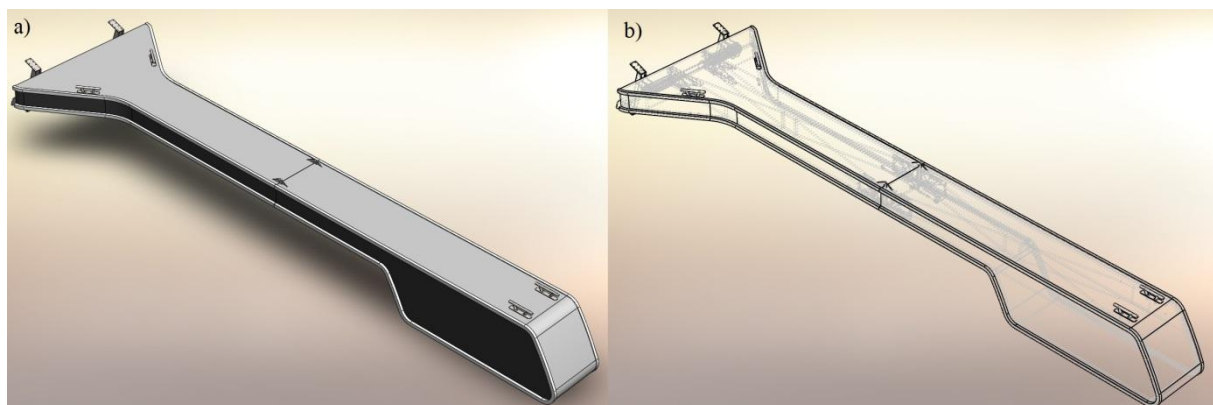
Utriggeren er designet av Hans Jørgen Fjeldvik og Knut Erik Kvarme. Dette kapitlet handler om konstruksjonens oppbygning og designelementer på konstruksjonen som har innvirkning for analysen som kommer senere i rapporten. I dette kapitlet kan man også finne viktige dimensjoner av uttriggeren.

Ulikt mange andre uttriggere, deles ikke opplagerkreftene likt på flyteelement og innfestingen på denne. Her har innfestingen en mye større betydning enn flyteelementet. Dette vil bli diskutert i underkapitlet; Kapittel 5.2.3.

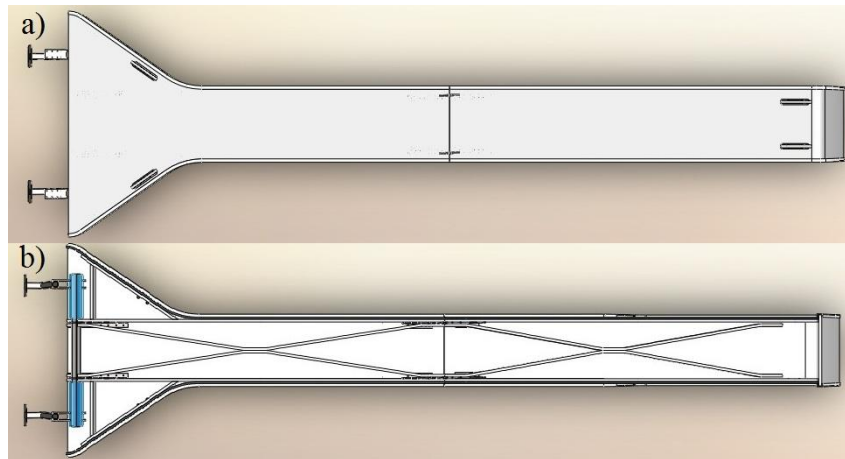
En større guide til materialene som brukes i uttriggeren finnes i Kapittel 5.3.

5.2.1 Oppbygning

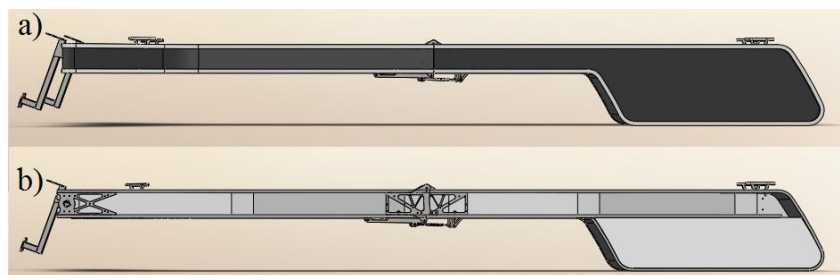
Utriggeren er bygd opp av en rekke Polleo Pan-plater. Utvendig består uttriggeren av dekkplater. På innsiden av disse platene er det plater som forsterker konstruksjonen. Figur 5.3a viser hvordan konstruksjonen er bygd opp utvendig med to plater på toppen, og to sideplater. Den ytterste topplaten strekker seg fra midten og rundt flyteelementet. På Figur 5.3b er dekkplatene usynlige, noe som viser at innvendig skjuler det seg flere komponenter. Dette er innfestingen, midtleddet og forsterkningen. Figur 5.4a viser uttriggeren sett ovenfra. Figur 5.4b er et snitt som viser hvordan uttriggeren ser ut uten topplater. Utriggerens forsterkning er bygd opp som et fagverk, men er i realiteten plater. Disse platene gir konstruksjonen stivhet samtidig som de hindrer at topplatene bøyer seg ned under bruk.



Figur 5.3: Viser hele uttriggeren fra fugleperspektiv



Figur 5.4: Ovenfra

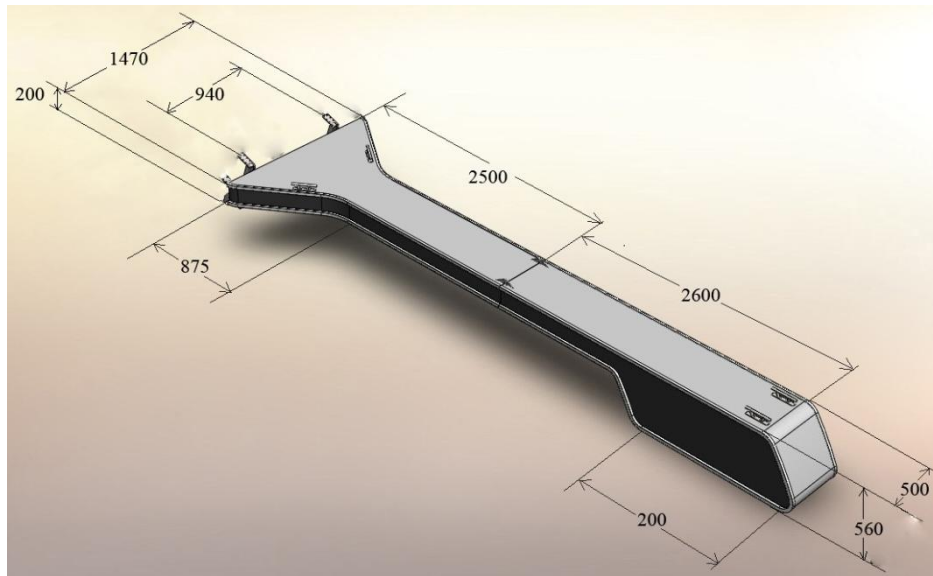


Figur 5.5: Profil

Den siste figuren, Figur 5.5 illustrerer uttriggeren fra siden, og med de to sideplatene fjernet. Metallkomponentene i innfestingen og midtleddet vises tydelig i Figur 5.5b. På denne figuren er det en stor feil. Flyteelementet er ikke hult, men massivt.

5.2.2 Dimensjoner

Dimensjonene på Figur 5.6 er laget for at leseren skal ha en formening om størrelse på uttriggeren og er ikke ment som en erstatning til arbeidstegningene. Dette er kun en forenklet illustrasjon. Alle målene på figuren er i mm.



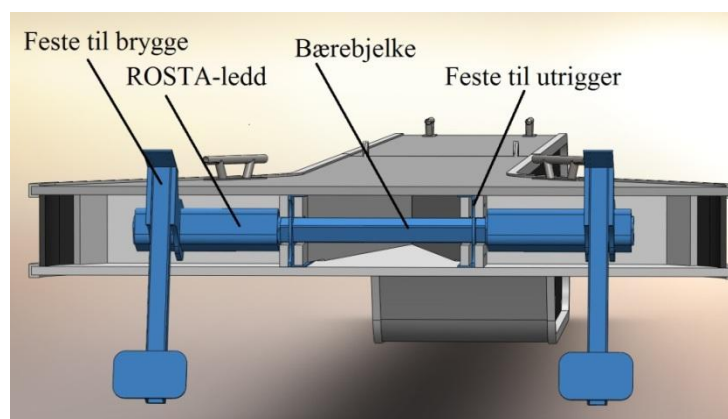
Figur 5.6: Dimensjoner

5.2.3 Innfesting

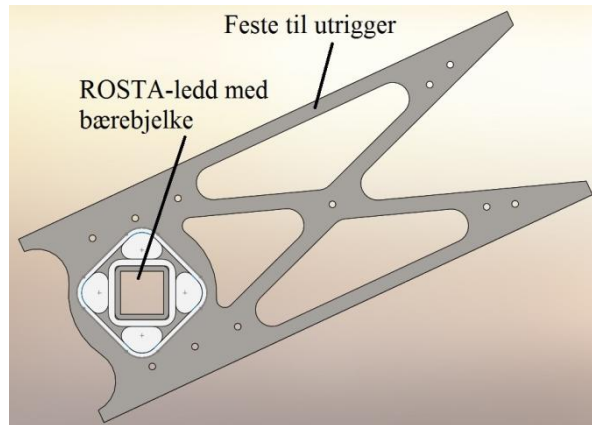
Innfestingen mellom selve uttriggeren og bryggen inneholder en rekke komponenter.

Utriggerens totale festemekanisme er merket som blått på Figur 5.7. Innfestingen består av ROSTA-leddet, bærebjelke, feste til uttrigger, og feste til brygge. Av disse komponentene er det festet mellom brygge og ROSTA-leddet, og selve ROSTA-leddet som er av interesse.

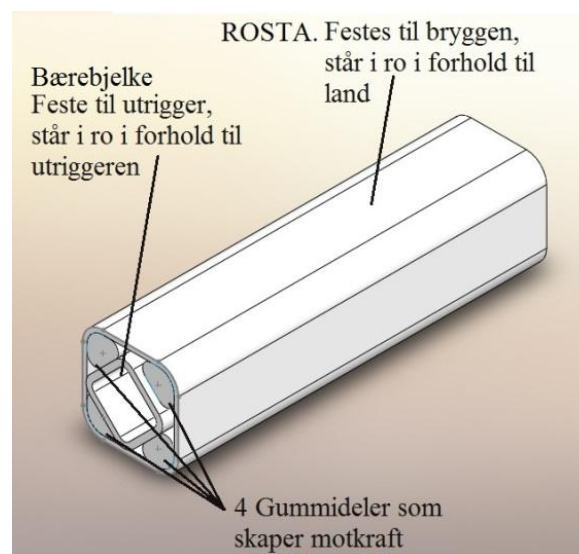
Figur 5.8 er et profilbilde av alle innfestingskomponentene bortsett fra bryggefestet. Siden bryggefestet er montert på ROSTA-leddet, må det oppstå en vinkelendring for at uttriggeren skal være plan med sjøen. Dette sørger ROSTA-leddet for. Når uttriggeren ligger plan med sjøen er dette leddet rotert 20° i forhold til hvileposisjon. Figur 5.9 viser skjematisk komponentene i dette leddet. Utriggerens vekt som er festet til den indre bærebjelken vil prøve å rotere det. Gummikomponentene blir da sammentrykt og forhindrer systemet i å rotere fritt. Gummikomponentene skaper et motmoment. Størrelsen på momentet, og hvordan det opptrer ved bruk av uttriggeren kan man lese om i Kapittel 6; Analyse av krefter. Det ytre "røret" står alltid i ro i forhold til bryggen, mens bærebjelken alltid står i ro i forhold til uttriggeren



Figur 5.7: Alle innfestingskomponenter



Figur 5.8: Profilbilde av innfestingen til kompositten



Figur 5.9: Ett Rosta-ledd

Denne innfestingsmekanismen er sjelden. Fordelene med dette er at leddene ikke lager lyd ved rotasjon. I tillegg vil konstruksjonen føles mer stabil grunnet gradvis økning/senking i motmoment ved bevegelse på uttriggeren. Ulempene med dette leddet er at det gir en mye større påkjenning til innfestingen, og dårligere utnyttelse av oppdrift i flyteelementet.

5.3 Materialer

Det brukes 3 materialer i uttriggeren. Det første er rustfritt stål i kvaliteten 316L, og det andre er Polleo Pan. Polleo Pan produseres av EKRO AS i Porsgrunn og er et sandwichmateriale som med glassfiberarmert polypropylen og Polyetylentereftalatskum.

Polyetylentereftalatskum, eller PET-skum, er et termoplast i polyesterfamilien. PET-skummet som brukes heter Airex T92 og produseres av 3A Composites.

Materialet glassfiberarmert propylen er egentlig ikke tilsatt en resin med Polypropylen. Isteden er det filamenter av termoplasten Polypropylen vevet sammen med glassfiberfilamenter. Når dette materialet blir varmet opp tilstrekkelig smelter polypropylen-

filamentene og væter glassfibrene. Materialet blir så kjølt ned til det herder. Dette materialet heter Twintex T PP og produseres av Owens Corning.

Rustfritt stål brukes i midtleddet på konstruksjonen, og i innfestingen. Til sammen utgjør dette 19 komponenter. 7 av komponentene hører til innfestingsmekanismen, 8 til midtleddet og 4 kryssholt(taufester). I neste delkapittel kan man lese om materialeegenskapene til dette stålet.

5.3.1 Rustfritt stål

Som allerede nevnt brukes kvaliteten 316L i konstruksjonen. Denne ståltypen er lik 316, men med et noe mindre karboninnhold som gir bedre korrosjonsmotstand. I Tabell 5.1 vises materialeegenskapene til dette materialet. Verdiene i tabellen er hentet fra Lenntech[22].

Av komponentene som lages av stålet er det kun innfestingskomponentene som skal analyseres med tanke på deformasjoner og lignende. Denne analysen finnes i Kapittel 7

Tabell 5.1: Materialeegenskaper stålqualität 316L

	Enhet	Verdi
Tetthet	Kg/m ³	8027
Strekkfasthet	MPa	558
Flytgrense	MPa	290
E-modul	GPa	193
Skjærmodul	GPa	77

5.3.2 Polleo Pan

Tabell 5.2 og Tabell 5.3 viser materialegenskapene til de to materialene som Polleo Pan består av. Informasjonen i tabellene er hentet fra produsentenes offisielle tall som kan finnes i Vedlegg II og III.

Tabell 5.2 Materialelegenskaper Twintex T PP

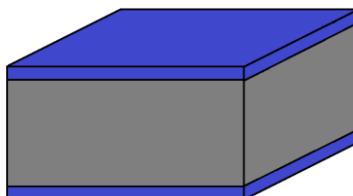
	Enhet	Verdi
Tetthet	kg/m ²	0,745
Strekkfasthet	MPa	300
E-modul i strekk	GPa	14
Bøyestrekfasthet	MPa	280
Bøyestrekmodul	GPa	13
Fiberinnhold i vekt	%	60
Fiberinnhold i volum	%	35

Tabell 5.3 Materialelegenskaper AIREX T92

	Enhet	Verdi
Tetthet	kg/m ³	106,60
Strekkfasthet	MPa	2,27
E-modul i strekk	MPa	112,51
Kompresjonsfasthet	MPa	1,36
E-modul i kompresjon	MPa	92,50
Skjærstyrke	MPa	2,27
Skjærmodul	MPa	20,39



Figur 5.10: Airex til venstre, twintex i midten og Polleo Pan til venstre[3]



Figur 5.11: Polleo Pan skjematisk

Kapittel 5: Green Bay Systems

Figur 5.10 viser hvordan de to komponentene ser ut, og hvordan ferdig Polleo Pan ser ut. Ut ifra denne figuren kan man tydelig se hvordan glassfiberarmert polypropylen og PET-skum er laminert for å lage sandwichstrukturen til Polleo Pan. En skjematisk oppbygning av materialet kan man se Figur 5.11. På denne figuren er Twintex merket med blå farge, og Airex med grå.

Det brukes forskjellige tykkelser og varianter Polleo Pan-plater i uttriggeren. Totalt er det 3 typer som brukes. Tabell 5.4 viser de 3 variantene. I tabellen blir det referert til 3 figurer som forklarer hvor på uttriggeren de respektive platene brukes.

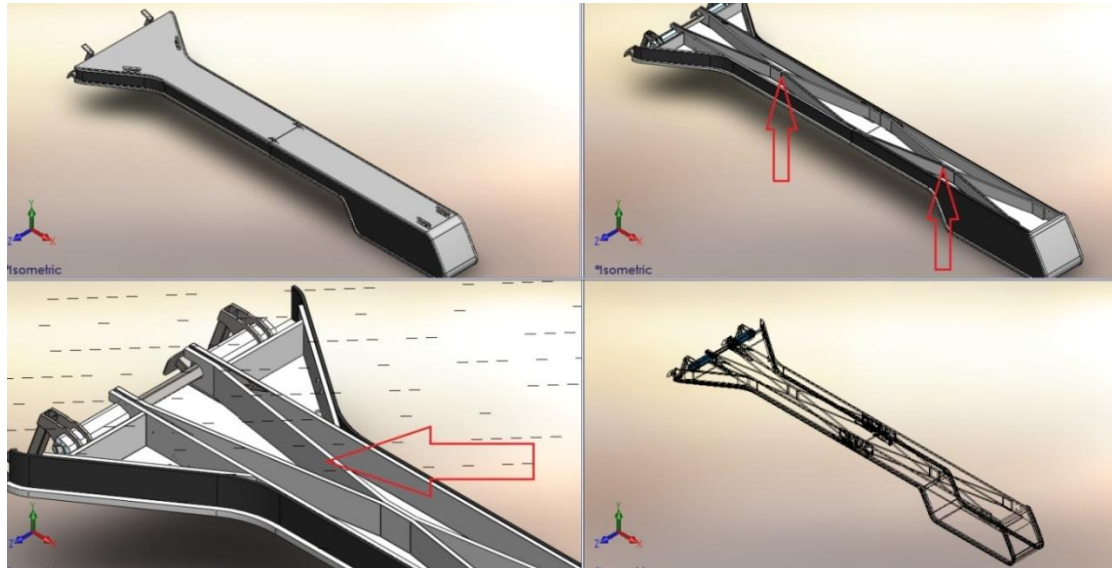
Navnet på materialet inneholder svært mye informasjon. Eksempelvis Polleo Pan 18 2980 NS:

- Det første tallet, i dette eksempelet 18, betyr at totaltykkelsen på laminatet er 18mm.
- Det neste tallet er totalvekten av glassfiberarmert polypropylen. I dette tilfellet betyr det at totalvekten av dette komposittmaterialet er 2980 g/m². Det betyr det brukes totalt 4 lag, 2 lag på hver side(745*2*2=2980).
- Den første bokstaven etter dette forteller hvilken farge som brukes. I eksempelet er det N, som er Natural. Den andre fargens om brukes er B, som er svart(black).
- Den siste bokstaven står for hvilken overflatebehandling som skal brukes. S er smooth og A er antislid.

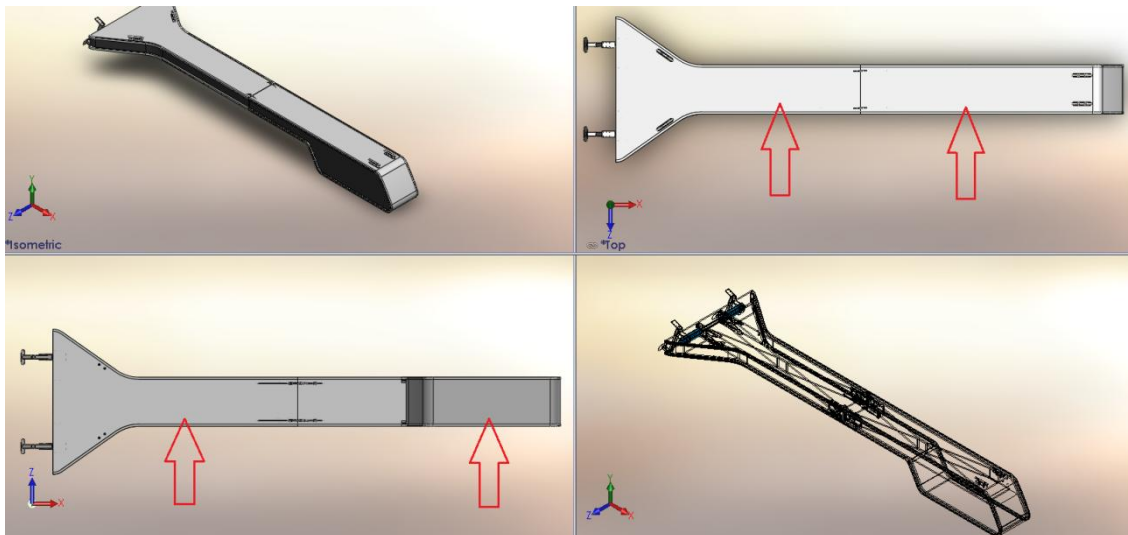
Tabell 5.4 Bruk av Polleo Pan i uttriggeren

Kodenavn: Polleo Pan-	Opplegg	Overflate	Hvor	Merk
18 2980 NS	0,5 mm Twintex T PP 0,5 mm Twintex T PP 16 mm Airex T92 0,5 mm Twintex T PP 0,5 mm Twintex T PP	Naturell farge med glatt overflate	Innvendig forsterkning, se Figur 5.12 for nærmere forklaring	
18 2980 NA	0,5 mm Twintex T PP 0,5 mm Twintex T PP 16 mm Airex T92 0,5 mm Twintex T PP 0,5 mm Twintex T PP	Naturell farge med antiskli overflate	Rundt hele konstruksjonen, se Figur 5.13 for nærmere forklaring	Ser bort fra ruglete antisklioverflate som gir noe tykkere topplag
12 2980 BS	0,5 mm Twintex T PP 0,5 mm Twintex T PP 10 mm Airex T92 0,5 mm Twintex T PP 0,5 mm Twintex T PP	Svart farge med glatt overflate	Dekkpanelene på siden, se Figur 5.14 for nærmere forklaring	

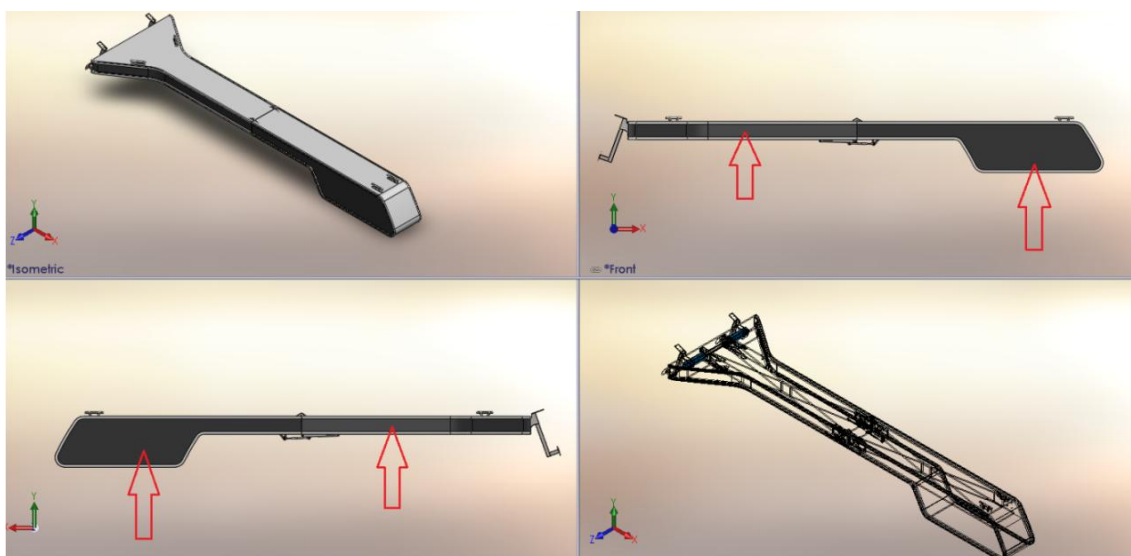
Kapittel 5: Green Bay Systems



Figur 5.12: 18 2980 NS, all innvending forsterkning



Figur 5.13: 18 2980 NA, brettet rundt konstruksjonen



Figur 5.14: 12 2980 BS, dekkpanelene på siden

5.3.3 Boltekkvalitet

Det brukes en rekke bolter i uttriggeren. Det er gjort forsøk på å kontakte både Green Bay Systems, og designere av uttriggeren for å finne ut av egenskapene til boltene. Siden ingen var sikre på dette, antas kvaliteten 8.8 videre i rapporten. Disse boltene har en strekkfasthet på 800 MPa, og flytgrense på 640 MPa.

5.4 Lover og standarder

Dette kapittelet handler om krav som stilles til uttriggeren i følge Norsk lov, og standarder som myndigheter forventer at følges.

5.4.1 Konstruksjon

Det finnes per dags dato ingen standarder for hvordan uttriggere skal lages. Det er ingen lover som forteller noe om hvor mye en slik konstruksjon skal tåle, eller levetiden til en slik konstruksjon. Ved å følge standarden for byggverk i Norge bør den bygges for bruk i 50 eller 100 år. I dokumentet NS3490 er det spesifisert hvilken pålitelighetsklasse kai og havneanlegg krever. Men i følge Standard Norge gjelder ikke dette for uttriggere.

5.4.2 Laster

En uttrigger blir påført forskjellige laster. Disse kan oppsummeres i egenlast og variable laster. Sikkerhetsfaktor fra Norsk Standard[23] brukes på alle laster. Det står ikke direkte hva disse bør være for en uttrigger eller brygge, men ved å anta at dette er det samme som for vanlige bolighus brukes det mest ugunstige tilfellet av følgende sikkerhetsfaktorer:

- $1,35 \cdot \text{Egenlast} + 1,05 \cdot \text{Variabel last}$
- $1,2 \cdot \text{Egenlast} + 1,5 \cdot \text{Variabel last}$

5.4.3 Bolter og skruer

Det finnes standarder for hvordan skruer og bolter skal dimensjoneres. NS EN 1993-1-8 er et dokument som er allment anerkjent og verifisert av CEN (European Committee for Standardisation). Det forventes at denne standarden blir fulgt i alle av uttriggerens bolte/skrueforbindelser.

5.4.4 Materialer

Det finnes ingen standarder for verken produksjon, dimensjonering eller beregninger av komposittmaterialer og sandwichkomposittmaterialer.

Standarden ASTM C 393 er beregnet for vanlige sandwichmaterialer. Denne brukes til å tolke resultater fra nedbøyningstester. Hvorvidt denne standarden er egnet for sandwichmaterialer med skall av komposittmaterialer er ukjent.

6 Analyse av krefter

Dette kapittelet handler om krefter som virker på utriggeren. Dette innebærer krefter på grunn av egenvekt, bølger, båter og personer.

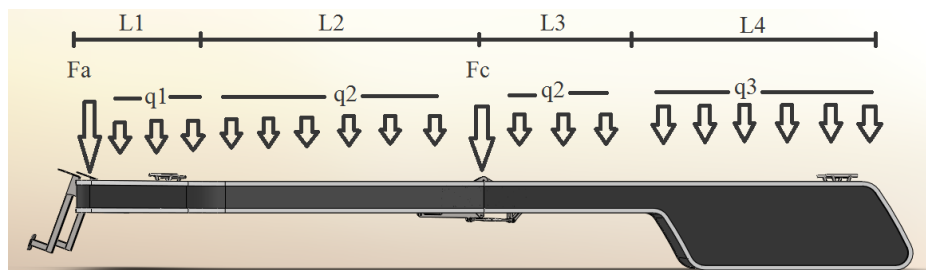
I dette kapittelet finnes mange figurer som viser hvor krefter virker. Påførte punktlaster betegnes med bokstaven F , og jevnt fordelte laster med bokstaven q og opplagerkrefter betegnes med bokstaven R .

6.1 Egenlaster

Konstruksjonen veier totalt 134kg. Metallkomponentene i opplageret og midtleddet veier henholdsvis 17 kg og 13 kg. Dette gir en resterende vekt på 104 kg, som da er totalvekten av komposittmaterialene. På grunn av variasjoner i tverrsnittet fordeler kreftene av egenvekten seg som vist på Figur 6.1 hvor:

- $F_a=166,8$ N
- $F_c=127,5$ N
- $q_1=187,2$ N/m
- $q_2=174,6$ N/m
- $q_3=245,3$ N/m
- $L_1=0,5$ m
- $L_2=2,1$ m
- $L_3=1,1$ m
- $L_4=1,5$ m

På Figur 6.1 vises ikke opplagerkreftene. Oppdriften i flytelementet vil variere etter hvor mye vekt det er på. Arealet på bunnflaten til flytelementet er $0,65$ m². Jo mer vekt som tas av denne delen, jo lenger ned synker utriggeren. Dette fører til økt oppdrift. Denne oppdriften vil forenkles i utregningen av opplagerkrefter ved at konstruksjonen antas å ha en reaksjonskraft midt på flytelementet. Den jevnt fordelte lasten q_3 regnes da som en punktlast i samme posisjon som oppdriften fra flytelementet.



Figur 6.1: Egenlaster

Opplagerkreftene på grunn av egenlaster beregnes ut i Kapittel 6.2.1. Grunnen til dette er at egenlastene i seg selv aldri er verste mulige tilfelle. Egenlaster kombinert med bølger skaper større påkjenninger i opplageret.

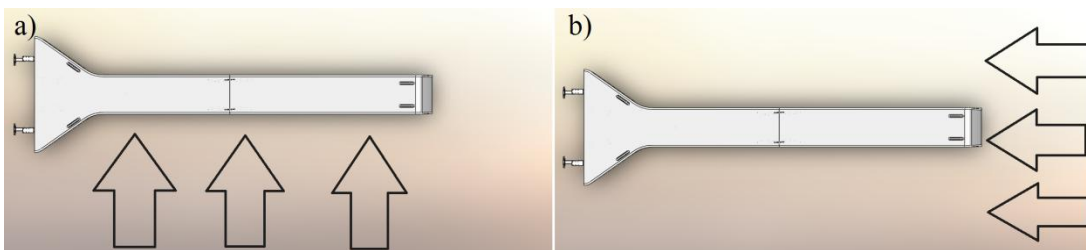
6.2 Variable laster

Denne typen krefter krever ofte en høyere sikkerhetsfaktor. I denne rapporten skal vi se på 4 ulike tilfeller med variable laster. Dette er bølgelaster, menneskelaster, båtlaster og ulykkeslaster.

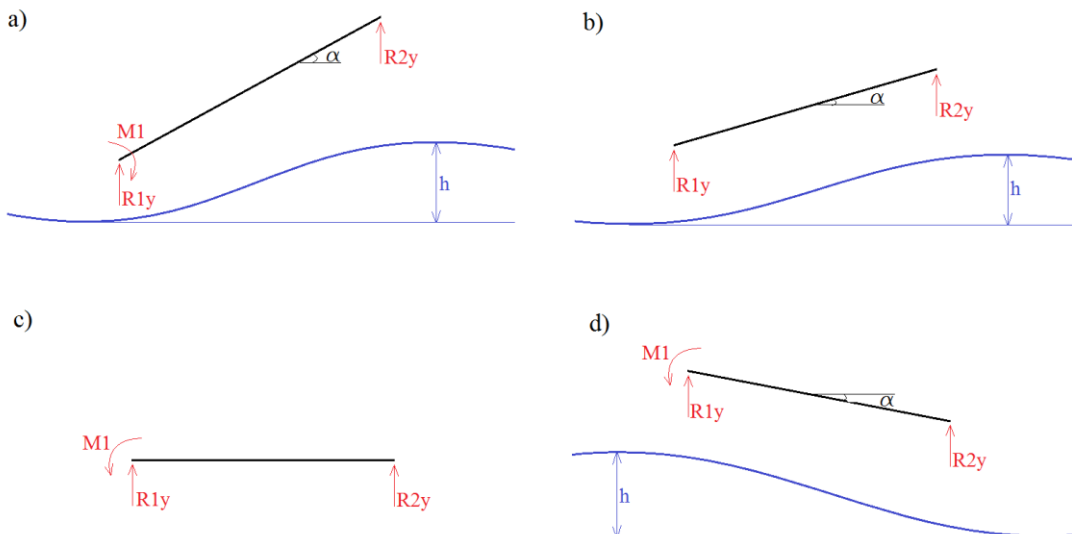
6.2.1 Bølgelaster

For å se på verste mulige tilfelle antas det at bølgene kan treffe uttriggeren i siden, eller fronten. Figur 6.2 a og b viser de to tilfellene. Bølgene som treffer siden antas ikke kritiske for konstruksjonen. Årsaken er at sidekrefter fra båter er større. Utriggeren er kun 500 mm i bredde, noe som gjør at rotasjon om x-aksen (lengden) antas å være liten ved sidebølger.

Bølger som treffer uttriggerens front kan derimot skape store problemer for innfestingsleddet. Figur 6.3 a-d viser de tilfellene som kan oppstå på grunn av bølger i denne retningen. Bølger som treffer fronten vil enten løfte fronten samtidig som den senker innfestingen, eller motsatt. På Figur 6.3 vises reaksjonskrefter når kun egenlast virker.



Figur 6.2: a) Bølger fra siden og b) bølger mot front



Figur 6.3: 4 tilfeller med ulik bølgehøyde

Kapittel 6: Analyse av krefter

På Figuren 6.3a og b løftes fronten av uttriggeren. I situasjon a er vinkelen så stor at momentet fra ROSTA-mekanismen presser uttriggeren tilbake mot vannet. I tilfelle b er vinkelendringen 20° , så Rosta-leddet er i likevekt og skaper ikke moment. Figur 6.3 c illustrerer normalt tilfellet uten bølger. Den siste delen (d) av figuren viser at fronten blir senket. Dette er dette tilfellet som vil skape problemer for innfestingen.

Tabellen nedenfor viser ved hvilken vinkelendring de nevnte tilfellene oppstår. Vinkelen måles til 0° når det ikke er bølger som vist i Tabell 6.1, og måles i negativ retning i tilfelle e. Vinkelendringen er altså ikke ut ifra ROSTA-leddets nullpunkt, men uttriggerens bruksposisjon. ROSTA-leddets nullpunkt er ved det som er definert som 20° i Figur 6.3 og Tabell 6.1. Tabell 6.1 viser også hvilken bølgehøyde som kreves for at det gitte scenarioet skal oppstå ved konstant bølgefrequens som er lik uttriggerens lengde. Fra tabellen kan man se at bølgehøyden som kreves for at situasjon a og b skal oppstå er meget høy. Denne bølgehøyden blir regnet som urealistisk og vil ikke bli tatt med i videre beregninger.

Når uttriggeren ligger plant med sjøen, dvs i tilfelle c, så har ROSTA-leddet en vinkelendring på 20° . Det vil si at ved en bølgehøyde på 1,7 m, så har uttriggeren en vinkelendring på 20° , mens ROSTA-leddet har da ingen vinkelendring, og lager ikke et motmoment.

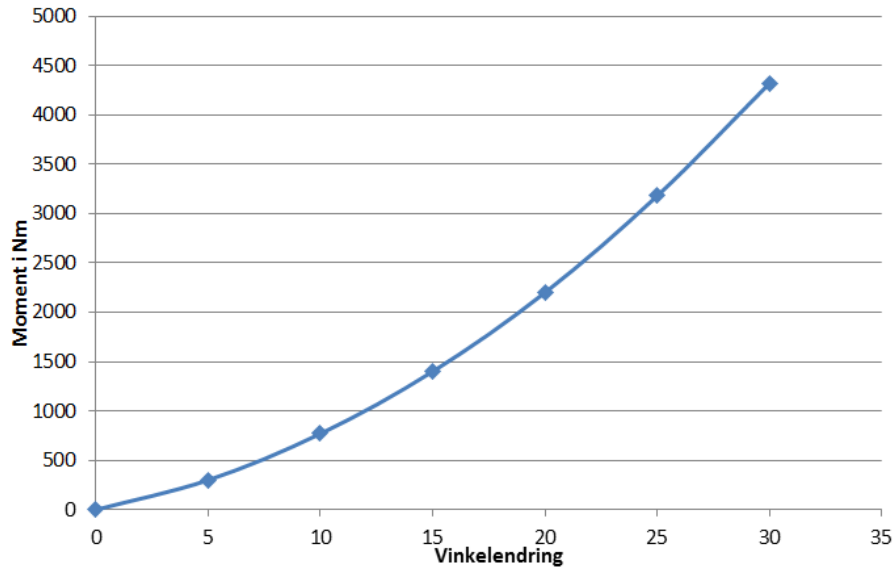
Tabell 6.1: Bølgehøyde lager vinkelendring

Tilfelle	Bølgehøyde (h)	Vinkelendring (α)
a	$h > 1,7\text{m}$	$\alpha > 20^\circ$
b	$h = 1,7\text{ m}$	$\alpha = 20^\circ$
	$0\text{m} < h < 1,7\text{m}$	$0^\circ < \alpha < 20^\circ$
c	$h = 0\text{m}$	$\alpha = 0^\circ$
d	$h < 0\text{m}$	$\alpha < 0^\circ$

Tabell 6.2: Utvikling av totalt moment for begge ROSTA-leddene

Vinkelendring	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°
Tilfelle	b	b/c	b/c	b/c	c	d	d
Moment i Nm (M_A)	0	300	770	1400	2200	3180	4320

Kapittel 6: Analyse av krefter



Figur 6.4: Utvikling av totalt moment i begge Rosta-leddene

Momentet som ROSTA-leddet gir er gitt i Tabell 6.2. Tabellen er hentet fra ROSTAs offisielle nettside[24] og er grafisk framstilt i Figur 6.4. Både grafen og tabellen viser samlet moment fra 2 Rosta-ledd. Rostas offisielle målinger går kun til en vinkelendring på 30°. Da dette er deres anbefalte maksimale vinkelendring betyr dette at maksimal vinkelendring for uttriggeren blir -10°. Dette tilsvarer en bølgehøyde på 0,85 m.

Alle opplagerkrefter styres i stor grad av hvor stort motmomentet blir i Rosta-leddet. I utregningene av opplagerkrefter er det antatt at kun egenvekten opptrer, og er utført på følgende måte:

$$\sum M_{1y} = 0, \text{ Positivt moment med klokken.}$$

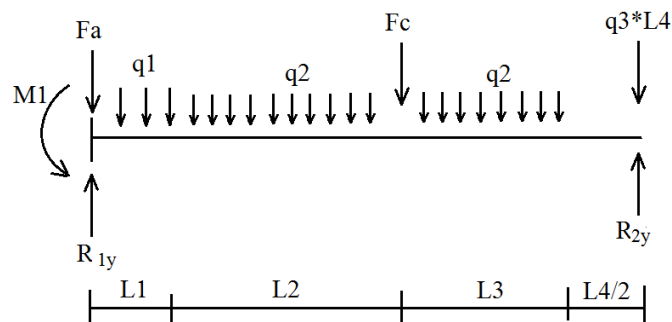
$$\sum M_{1y} = F_c * (L_1 + L_2) - R_{2y} * (L_1 + L_2 + L_3 + \frac{L_4}{2}) + q_1 * (\frac{L_1^2}{2}) + q_2 * (L_2 + L_3)(L_1 + \frac{L_2 + L_3}{2}) + q_3 * (L_4)(L_1 + L_2 + L_3 + \frac{L_4}{2}) - M_{1y} = 0$$

Denne utregningen forutsetter at modellen blir forenklet til et system som det er mulig å regne på. I dette tilfellet forenkles systemet til det som er vist i Figur 6.5. Verdiene til bokstavene i ligningen ovenfor er hentet fra Kapittel 6.1. Fra ligningen ovenfor bestemmes R_{2y} . R_{1y} bestemmes med en likevektsbetraktning på følgende måte:

$$R_{1y} = F_c + q_1 * L_1 + q_2 * (L_3 + L_3) + q_3 * L_4 - R_{2y}$$

I Tabell 6.3 kan man lese ut opplagringskreftene som er beregnet med disse formlene. Opplagerkreftene er regnet ut for bølgesituasjonene c, d og e.

Kapittel 6: Analyse av krefter



Figur 6.5: Forenklet modell for beregning

Tabell 6.3: Opplagerkrefter ved brukslast 1: Bølgelaster

Situasjon	Vinkelendring (α)	Moment (M_{1y}) i Nm	R_{1y} i N	R_{2y} i N	Merk
c	20°	0	621	711	Fordeling av krefter uten ROSTA-ledd
d	0°	2200	1115	217	
e	-4,8°	3166	1332	0	Ingen kontakt med vannet.

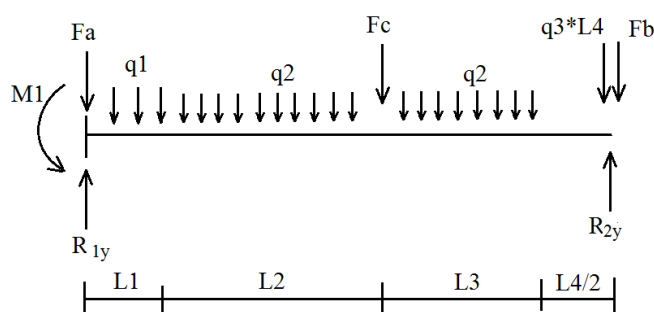
Vi ser fra verdiene i Tabell 6.3 at når momentet i rostaleddet når 3166 Nm, så bidrar ikke flytelementet med reaksjonskrefter. Dette vil skje ved en vinkelendring på 24,8° i Rostaleddet, og er verste mulige tilfelle for innfestingen.

6.2.2 Brukslast 1: Menneskelaster

Med brukslaster menes normal bruk av uttrigger. Dette inkluderer ikke støt, slag og lignende.

Det er to måter menneskelaster kan skade uttriggeren på. Det første er nedbøyning av topplatene. Dette analyseres i Kapittel 10.1. Utgangspunktet for den analysen er at et menneske a 75 kg med 10 kg utstyr står på uttriggeren. Nedbøyningen av topplaten, samt spenninger i topplaten vurderes.

Det andre tilfellet er når 3 personer a 75 kg står på flyteelementet. Dette kan skape problemer i innfestingen. Lastene er denotert til en enkel last som heter F_b . Figur 6.6 viser lasten i tillegg til alle nødvendige mål for videre beregning. Verdien på lastene er lik som tidligere, mens $F_b=3315$ N.



Figur 6.6: Viser uttriggerens krefter og reaksjonskrefter

Kapittel 6: Analyse av krefter

Det er svært problematisk å finne opplagerkreftene til et slikt system. Grunnen er at Rosta-momentet M_1 ikke er kjent. Ved å anta at uttriggeren er plan når denne lasten påføres, kan man si at oppdriften fra flyteelementet er lik F_B . For å oppnå denne oppdriften må uttriggerens flyteelement synke ned høyden h . Følgende formel kan brukes for å finne nedsenkingen:

$$R_{2y} = \rho g V = \rho g A h \rightarrow h = \frac{F_B}{\rho g A}$$

Hvor h er nedsenkingen og A er bunnarealet til flyteelementet. I ligningen er $A=0,65 \text{ m}^2$, $\rho=1027 \text{ kg/m}^3$, $g=9,81 \text{ m/s}^2$ og til slutt $F_B=3315 \text{ N}$

$$h = \frac{3315}{1027 * 9,81 * 0,65} = 0,51 \text{ m}$$

I dette tilfellet er det fortsatt ikke mulig å fastslå M_1 fordi denne vil bidra til at nedsenknigen blir mindre enn det som akkurat ble regnet ut. For å komme videre med dette problemet antas det at nedsenknigen halveres grunnet momentet fra Rosta-leddet. Dermed kan nedbøyningsvinkelen finnes, og M_1 hentes fra Figur 6.4 i Kapittel 6.2.1. Nedbøyningsvinkelen ved halvert nedsenkning er:

$$\tan(\alpha) = \frac{L}{h} \rightarrow \tan^{-1}(\alpha) = \frac{5,2}{0,51/2} \rightarrow \alpha = 2,81$$

En vinkel på $2,81^\circ$ tilsvarer $22,81^\circ$ i Figur 6.4. Momentet blir da: $M_1=2600 \text{ Nm}$. Ved bruk formelen nedenfor finner man derfor opplagerkraften R_{2y} . R_{1y} regnes da enkelt ut ved en likevektsbetraktning.

$$\sum M_A = F_c * (L_1 + L_2) - R_{2y} * (L_1 + L_2 + L_3 + \frac{L_4}{2}) + q_1 * (\frac{L_1^2}{2}) + q_2 * (L_2 + L_3)(L_1 + \frac{L_2 + L_3}{2}) + q_3 * (L_4)(L_1 + L_2 + L_3 + \frac{L_4}{2}) + F_B - M_1 = 0$$

Løsningen til ligningen kan er i Tabell 6.4. I beregningen av opplagerkrefter er det antatt at det ikke er bølger på uttriggeren. Som tidligere nevnt krevde denne løsningen noen forenklinger. Disse gir en høy usikkerhet til resultatet i tabellen.

Tabell 6.4: Opplagerkrefter ved brukslast 2: Menneskelaster

Vinkelendring (α)	Moment (M_1) i Nm	R_{1y} i N	R_{2y} i N	Merk
$1,82^\circ$	2600	641	691	Ikke-vitenskapelig framgangsmåte

6.2.3 Brukslast 2: Båtlaster

Kreftene fra fortøyde båter avhenger etter størrelse på båten, bølger, vind og fortøyningsmetode. Ved å først anta at båten er riktig fortøyd, fordeles kreftene som vist i Figur 6.7. Figuren viser uttriggeren ovenfra hvor det er en båt på hver side av uttriggeren som skaper krefter i samme retning. Reaksjonskraften fra flyteelementet neglisjeres i dette tilfellet.

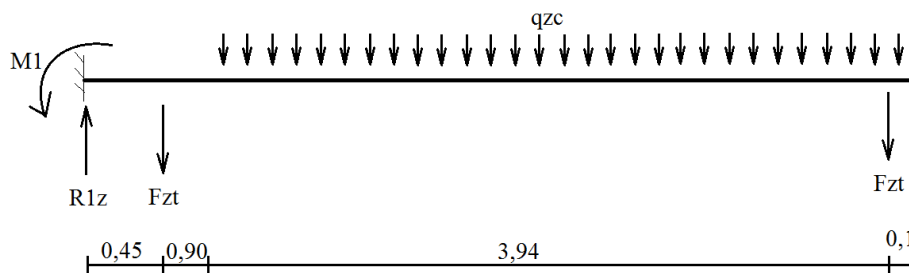
I denne analysen ser vi på en vanlig båt[25] på 20 fot og vekt på 1200 kg. Kreftene en slik båt vil påføre uttriggeren avhenger av vind og bølger. Det kreves tester for å finne eksakte verdier på disse kreftene.

Derfor antas kreftene å være å være konstante over tid med følgende verdier:

- $F_{zt}=1200 \text{ N}$
- $q_{zc}=594 \text{ N/m}$

Disse kreftene antagelser basert på kvalifisert gjetting hvor båtenes vekt og bølgehastighet er tatt til grunn. De påførte krefter fører til at opplagerkreftene blir som følger:

- $R_{1z} = (594 * 4,04) + 1200 + 1200 = 4800 \text{ N}$
- $M_{1y} = [1200 * 0,45] + \left[594 * 4,04 * \left(0,45 + 0,9 + \frac{4,04}{2} \right) \right] + [1200 * (0,45 + 0,9 + 3,94)] = 14975 \text{ Nm}$



Figur 6.7: Krefter fra fortøyde båter

6.2.4 Ulykkeslaster

Dette er uforutsette krefter som kan virke inn på uttriggeren. Det alle verste tilfellet som kan oppstå antas å være når en båt treffer uttriggeren med følgende attributter:

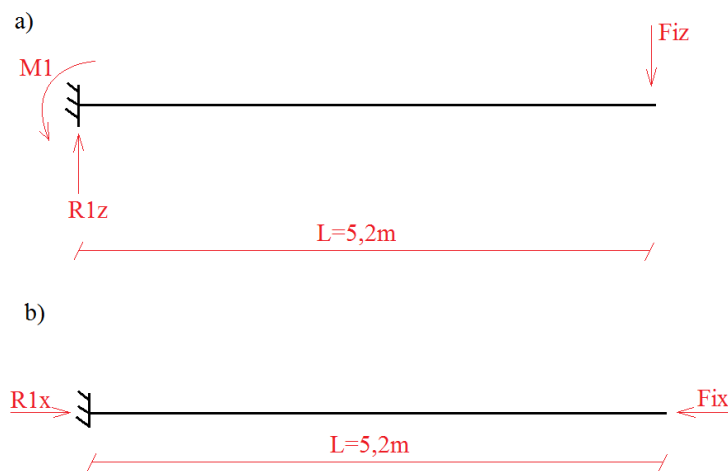
- 5 m/s hastighet
- 1200 kg tung båt
- Deselerasjon på 0,5 s

Dette medfører følgende impuls kraft:

$$F_i = \frac{mv}{t} = \frac{1200 \text{ kg} * 5 \text{ m/s}}{0,5 \text{ s}} = 12000 \text{ N}$$

Når man ser uttriggeren ovenfra blir mest kritiske treffpunkter for ulykkeslaster (F_i) som vist i Figur 6.8 a og b. Reaksjonskrefter fra flytelementet neglisjeres og opplagerkreftene blir som følge:

- $M_{1y} = 62400 \text{ Nm}$ ($12000 \text{ N} * 5,2 \text{ m}$)
- $R_{1z} = -F_i = 12000 \text{ N}$
- $R_{1x} = -F_i = 12000 \text{ N}$



Figur 6.8: Verste treffpunkter for ulykkes last.
a) fra siden, og b) mot fronten

6.3 Sammendrag av opplagerkrefter

De største kreftene innfestingen til bryggen må tåle er:

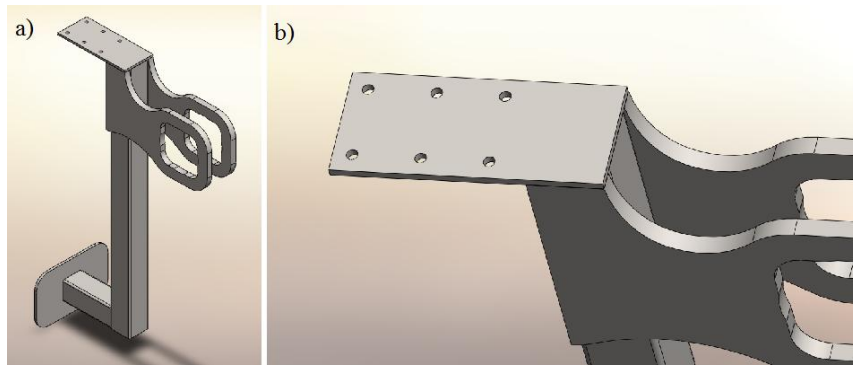
- $R_{1x} = -12000$ N (Fra impulskraften)
- $R_{1y} = -1332$ N (Egenvekt og bølger)
- $R_{1z} = 12000$ N (Fra impulskraften)
- $M_{1z} = 3166$ (Alt tas opp av ROSTA)
- $M_{1y} = 62400$ Nmm

7 Analyse av innfesting

Denne analysen tar for seg to aspekter ved innfestingen. Det første er deformasjoner i innfestingskomponentene, og det andre er boltene som fester uttriggeren til bryggen. Boltenes avstand mellom hverandre, samt avstand til kanten, hullkantrykk, avskjæringskapasitet, strekkapasitet og momentkapasitet er områder som skal vurderes i forbindelse med boltinnfestningen.

Innfestingen består av to like stålkomponenter av kvalitet 316L, med 6 bolter festet til bryggen i hver av disse. Figur 7.1a viser en av innfestingene, mens Figur 7.1b fokuserer på selve boltegruppen.

For å vite kreftene som virker på boltene må det gjøres en elementanalyse av innfestingen.



Figur 7.1: a) Innfesting mellom Rosta-leddet. b) nærbilde av bolteholder

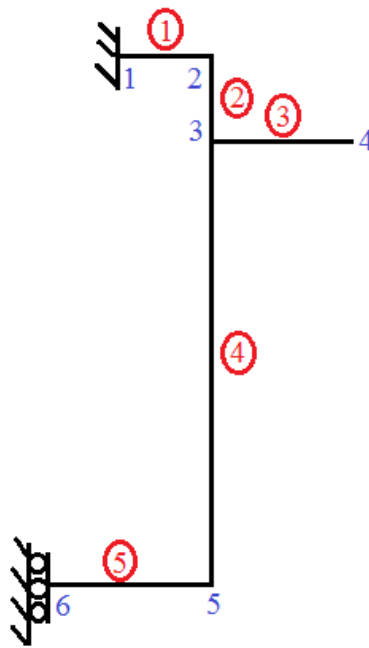
7.1 Deformasjon av innfesting

For å finne deformasjoner i innfestingen brukes krefter funnet i Kapittel 6. Figur 7.2 viser en enkel modell av innfestingen. For å finne ut av deformasjoner på denne konstruksjoner brukes elementmetoden. Elementene er delt opp som vist i Figur 7.2. Elementer er merket med en ring rundt tallet, mens noder er merket med blått tall. Ytre krefter og moment blir påført i node 4. Tabell 7.1 viser lengden til alle elementene, samt arealet og treghetsmomentet.

Treghetsmomentet i Tabell 7.1 er regnet ut fra følgende formel:

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

I denne utregningen har element 3 har blitt forenklet til et rektangulært tverrsnitt med målene 2mm*75mm. Det er tatt hensyn til at element 2, 4 og 5 er hule i beregningen av treghetsmoment.



Figur 7.2: Elementer og noder

Tabell 7.1: Dimensjoner på elementene

Element nr	Lengde (mm)	Areal (mm ²)	Treghetsmoment (mm ⁴)
1	30	240	320
2	88	576	125952
3	133	1500	703125
4	396	576	125952
5	124	576	125952

7.1.1 Lokale stivhetsmatriser

For at elementmetoden skal gi riktige resultater brukes det “frame-element”. Dette innebærer at alle elementer har mulighet for deformasjon i 3 retninger; x, y og θ (vinkelendring). Frame-elementet er en kombinasjon av et bjelke- og et stavelement. Stivhetsmatrisen til et stav-element ser slik ut:

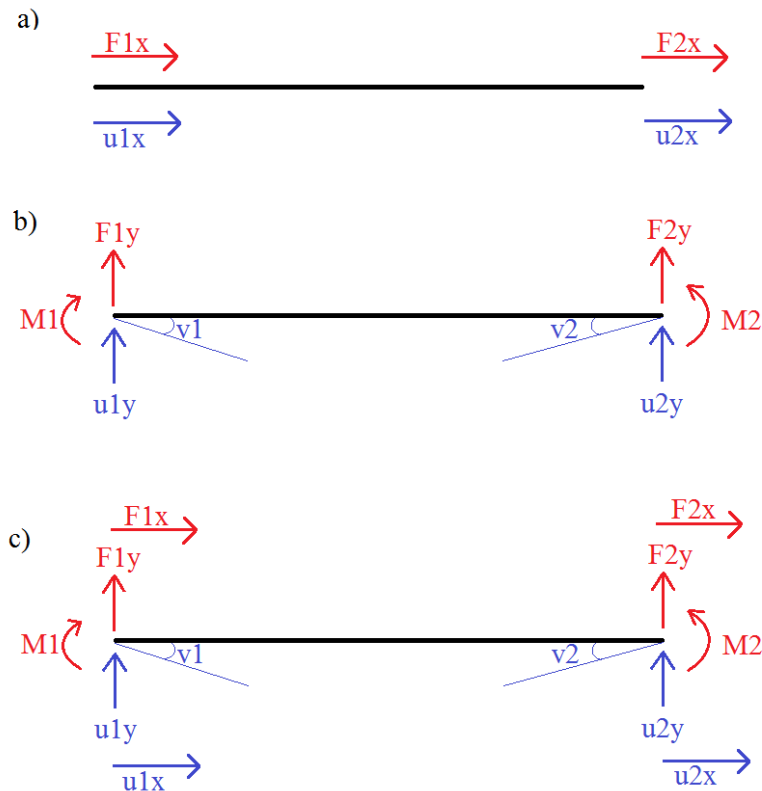
$$\begin{bmatrix} F_{1x} \\ F_{2x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & -\frac{EA}{L} \\ -\frac{EA}{L} & \frac{EA}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{1x} \\ u_{2x} \end{bmatrix}$$

Denne stivhetsmatrisen modellerer krefter og forskyvninger i lengderetningen som vi ser på Figur 7.3a. På Figur 7.3 så er de blå pilene forskyvninger, mens de røde er krefter. Som nevnt inneholder frame-elementet også et bjelke-element. Stivhetsmatrisen for et bjelkeelement er:

$$\begin{bmatrix} F_{1y} \\ M_1 \\ F_{2y} \\ M_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{1y} \\ \theta_1 \\ u_{2y} \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$

Denne kan brukes til å se på vinkelendringer(θ) og forskyvninger vinkelrett på lengderetningen til elementet. Figur 7.3b viser dette. Ved kombinere stav- og bjelkeelementene fås et frame-element. Frihetsgradene til dette elementet er vist i Figur 7.3c, mens den lokale stivhetsmatrisen for elementet er:

$$\begin{bmatrix} F_{1x} \\ F_{1y} \\ M_1 \\ F_{2x} \\ F_{2y} \\ M_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{1x} \\ u_{1y} \\ \theta_1 \\ u_{2x} \\ u_{2y} \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$



Figur 7.3: a) Bar-element. b) Bar-element. c) Frame-element ($v=\theta$)

7.1.2 Globale stivhetsmatriser

Før man kan sette de lokale stivhetmatrisene sammen til en global stivhetsmatrise må lokale stivhetsmatrisene til element 2 og 4 transformeres. Dette gjøre med formelen:

$$[K_{i,global}] = [L]^T [K_{i,lokal}] [L]$$

Hvor

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dermed plasseres de lokale stivehtsmatrisene inn i en global stivhetsmatrise. Denne matrisen har dimensjonen 18x18. Det kommer av at de 5 elementene lager 6 unike noder. Hver node har 3 frihetsgrader (bevegelse i x- og y-retning, og vinkelendring). Formen på denne matrisen blir som følge:

$$\begin{bmatrix} F_{1x} \\ F_{1y} \\ M_1 \\ F_{2x} \\ \dots \\ M_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{Global} \\ 18*18 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{1x} \\ u_{1y} \\ \theta_1 \\ u_{2x} \\ \dots \\ \theta_6 \end{bmatrix}$$

7.1.3 Randbetingelser

Dem kjente randbetingelser for forskyvninger satt inn, blir deformasjonsmatrisen:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & u_{2x} & u_{2y} & \theta_2 & u_{3x} & u_{3y} & \theta_3 & u_{4x} & u_{4y} & \theta_4 & u_{5x} & u_{5y} & \theta_5 & 0 & u_{6y} & 0 \end{bmatrix}^T,$$

mens kraftmatrisen blir:

$$\begin{bmatrix} F_{1x} & F_{1y} & M_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6000 & -666 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{6x} & 0 & M_6 \end{bmatrix}^T$$

Kreftene $F_{4x} = -6000$ N, $F_{4y} = -666$ N og $M_4 = 0$ N (momentet tas opp av Rosta-leddet) ble funnet i Kapittel 6, og halvert fordi de fordeles på 2 innfestingskomponenter.

7.1.4 Resultater

Ved å bruke de kjente forskyvningene, og kreftene sammen med stivhetsmatrisen finnes følgende verdier for krefter og moment (Oppgitt i N og Nmm):

$$\begin{bmatrix} 4880 & 666 & 6240 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6000 & -666 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1120 & 0 & 11823 \end{bmatrix}^T$$

Dette gir følgende deformasjoner oppgitt i mm og vinkelendringer oppgitt i radianer:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -0,003 & 0,003 & 0,002 & -0,143 & 0,003 & 0,001 & -0,146 & \rightarrow \\ -0,048 & 0,001 & -0,001 & -0,037 & -0,001 & 0 & -0,064 & 0 \end{bmatrix}^T$$

Denne analysen er utført i Matlab. Koden skrevet for denne analysen finnes i Vedlegg IV. På den elektroniske versjonen av denne rapporten medfølger Matlab-koden i .txt-format. Denne koden kan modifieres dersom det skulle være ønskelig å endre dimensjoner eller krefter på innfestingskomponenten.

7.1.5 Diskusjon

Deformasjonene i innfestingen er veldig små og har ingen praktisk betydning for bruken av uttriggeren. Da kreftene som er påført er kun i x-y-planet, simulerer ikke dette uttriggerens deformasjon i z-retning.

Dette resultatet ser tilfredsstillende ut med tanke på deformasjoner. Det får bli opp til Green Bay Systems å vurdere hvorvidt de ønsker forbedringer på innfestingskomponentene.

Kreftene som virker på boltegruppen ligger i node 1 og brukes videre i rapporten for beregning av boltegruppen.

7.2 Analyse av bolter

Alle krefter som virker på boltegruppen er som følge:

- $F_x=4880$ N
- $F_y=666$ N
- $F_z=6000$ N
- $M_z=6240$ Nmm
- $M_y=31200$ Nmm

Kreftene F_z og M_y ble funnet i Kapittel 6.2.4. Kreftene fra dette kapittelet fordeles likt mellom de to innfestingene, og er derfor halvert. Kreftene F_x , F_y og M_z ble funnet i Kapittel 7.1.5. Beregningen gjøres for M6-bolter, med fasthetsklasse 8.8. Alle kapasitetsberegninger for boltene i Kapitelene 7.2.1-7.2.6 er utført i henhold til [26].

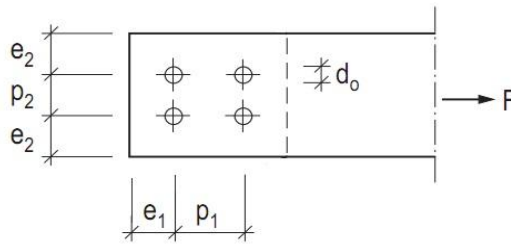
7.2.1 Plassering av bolter

Det er krav for minimumsavstander mellom bolter i en boltegruppe. Første kolonne i Tabell 7.2 viser minimumskravene. Verdien d_0 er diameteren til bolten. Andre kolonne viser de faktiske kravene for bolter med diameter på 6 mm. Siste kolonne i Tabell 7.2 viser faktiske avstander for boltegruppen på uttriggeren. Figur 7.4 henviser til hvilke avstander det er snakk om i Tabell 7.2.

Tabell 7.2: Avstandskrav fra Norsk Standard

	Minimums-avstand (mm)	Faktisk min-avstand (mm)	Virkelig avstand på uttrigger(mm)
e1	$1,2d_0$	7,2	10
p1	$2,2d_0$	13,2	33
e2	$1,2d_0$	7,2	10
p2	$2,4d_0$	14,4	34

Kapittel 7: Analyse av innfesting



Figur 7.4: Henvvisning til verdier i Tabell 7.2[26]

De virkelige avstandene fra Tabell 7.2 er tilstrekkelige, og innenfor Standard Norges krav. Det er en mulig å gjøre innfestingsplaten mindre hvis det er ønskelig, så lenge man er innenfor kravene som er oppgitt i andre kolonne i tabellen.

7.2.2 Avskjæringskapasitet

Skjærkapasitet beregnes med formelen:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}}$$

Hvor:

- A er arealet av tverrsnittet på bolten. Dette kan være både gjenget og ugjenget del av skruen (For M6 bolter er tverrsnittsarealet 20,1 mm² i gjenget del)
- f_{ub} er strekkfastheten (For bolter og skruer i fasthetsklasse 8.8, er strekkfastheten 800MPa, og flytgrensen 640MPa).
- γ_{M2} er en sikkerhetsfaktor med verdien 1,25.
- α_v er en konstant som avhenger av skruens fasthetsklasse. Verdien er 0,6 for fasthetsklassene 4.6, 5.6 og 8.8, og 0,5 for fasthetsklassene 4.8, 5.8 og 10.9.

For innfestingsboltene til uttriggeren avskjæringskapasiteten:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 * 800 * 20,1}{1,25} = 7718 N$$

7.2.3 Hullkanttrykk

Formelen for hullkantkapasitet er:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}}$$

Hvor:

- f_u er strekkfastheten for materialet som omringer bolten.
- d er nominell bolt diameter.
- t er tykkelsen på platen

Kapittel 7: Analyse av innfesting

- α_b er minste verdien av: $\alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1$
- α_d er minste verdien av: $\frac{e_1}{3d_0}; \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$
- k_1 er minste verdi av: $2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5$

For boltene i innfestingen på uttriggeren blir hullkantkapasiteten:

$$k_1 = \min(2,97; 6,23; 2,5) = 2,5$$

$$\alpha_b = \min(0,56; 1,58; 1,43; 1) = 0,56$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 * 0,56 * 558 * 6 * 4}{1,25} = 14999 \text{ N}$$

7.2.4 Strekkkapasitet

Ligningen for strekkkapasiteten er:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A}{\gamma_{M2}}$$

Hvor:

- $k_2=0,9$ for skruer, $k_2= 0,63$ for forsenket skrue og $k_2=0,6$ for ugjenget del av skruen.
- f_{ub} er strekkfastheten til skruen.

I boltene på uttriggeren blir derfor kapasiteten mot utrivning:

$$F_{t,Rd} = \frac{0,6 * 800 * 20,1}{1,25} = 7718 \text{ N}$$

7.2.5 Momentkapasitet

Formelen for momentkapasitet til en bolt eller skrue er:

$$M_{Rd} = \frac{1,5 f_{yp} W_{el}}{\gamma_{M0}}, \text{ hvor: } W_{el} = \frac{\pi}{4} r^3$$

Verdien av W_{el} blir da:

$$W_{el} = \frac{\pi}{4} 3^3 = 21,206$$

Dette gir en momentkapasitet per bolt på:

$$M_{Rd} = \frac{1,5 * 640 * 21,206}{1,25} = 16286 \text{ Nmm}$$

7.2.6 Utmatningskapasitet

Green Bay systems har utført tester på uttriggeren for å se på utmatting. Da testene var vellykket er ikke av interesse å analysere i rapporten.

7.2.7 Resultater

Med kjente kapasiteter for avskjæring, hullkanttrykk og utrivning, og kjente krefter påført boltegruppen, er det enkelt å beregne antall bolter som er nødvendig å bruke. For å finne ut av dette er det viktig å se på hva som er verste tilfelle for boltene. Dette gjøres ved å se på faktoren mellom påført kraft, og kapasitet. Denne faktoren forteller hvor mange bolter det er nødvendig å bruke. Faktoren rundes alltid opp til nærmeste heltall.

- For avskjæring: $\frac{F_v}{F_{v,Rd}} = \frac{6000}{7718} = 1$
- For hullkanttrykk: $\frac{F_b}{F_{b,Rd}} = \frac{6000}{14999} = 1$
- For strekkrefter: $\frac{F_t}{F_{t,Rd}} = \frac{1583}{7718} = 1$
- For moment: $\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{31200}{16286} = 2$

7.2.8 Diskusjon

Det finnes en rekke usikkerheter rundt disse beregningene. Det første er at bolte kvaliteten og størrelsen ikke er kjent. Det er også knyttet noe usikkerhet rundt det hvor store krefter som faktisk kan oppstå på boltegruppen. Denne beregningen er derfor veiledende. Det er enkelt å endre alt fra bolte kvalitet og påførte krefter dersom de skulle være nødvendig med en ny analyse.

Ut ifra beregninger er 2 bolter per innfestingsledd tilstrekkelig til å motstå de krefter som kan oppstå. Hvis det er noen komponenter på uttriggeren som kan overdimensjoneres, så er det boltene, da de ikke er kostbare. I tillegg vil bolter bli svakere med tiden. Dette er spesielt viktig da de står i et område med stor korrosjonsfare.

8 Metoder for analyse av sandwichkomposittmaterialer

I dette kapittelet undersøkes noen metoder for analyse av sandwichkompositter. Kapittelet inneholder noen teorier knyttet til beregning av nedbøyning, spenningskonsentrasjoner og lignende på plater og bjelker laget av sandwichkompositter. Formålet er å drøfte teorien bak beregnings og analysemetoder og bestemme hvorvidt teoriene kan brukes videre i rapporten for beregning av uttriggeren.

8.1 Klassisk sandwichteori for bjelker

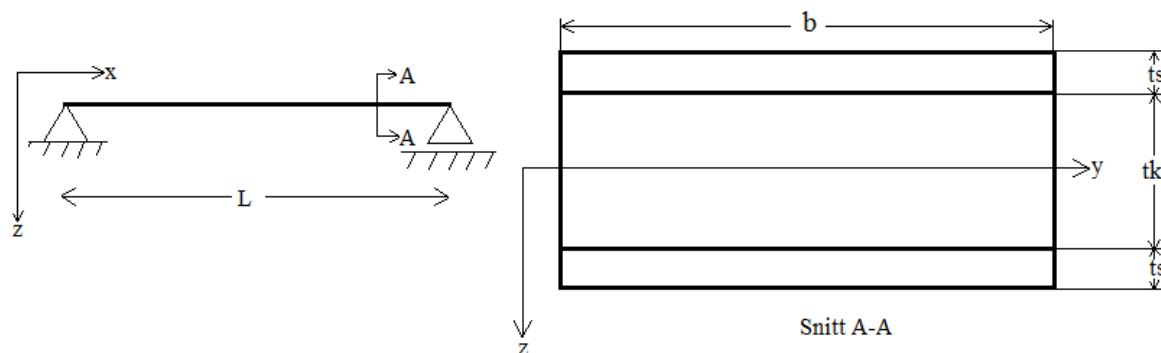
Denne teorien er hentet fra [20] og supplementert med teori fra [27].

Når det kommer til nedbøyning av bjelker, ligner sandwichteorien på klassisk bjelketeori. Den store forskjellen er at kjernen bærer skjærkrefter, mens topp og bunnlagene, kalt skall, bærer strekk og kompresjonskrefter. Dette forutsetter at bindingen mellom skallet og kjernen overfører skjærkreftene. Ved å dimensjonere denne bindingen til å være like motstandsdyktig mot skjærkrefter som kjernen, kan denne neglisjeres. Topp- og bunnskallet i en sandwich må være like tykt for at teorien skal gjelde.

Teorien forutsetter enkel opplagring som vist på Figur 8.1, og fungerer for både plater og bjelker. Dersom beregningene gjøres på plater, endres elastisitetsmodulen til: $E = E/(1 - \nu_k)$.

I Figur 8.1 viser også hvordan platens mål er definert. I dette kapittelet brukes to bokstaver i indeks. Dette er s og k. S står for skall, mens k er kerne. I figuren nedenfor er derfor t_s

tykkelsen på ett skall. Bokstaven d brukes for avstanden $t_k + \frac{t_s}{2} + \frac{t_s}{2}$.



Figur 8.1: Definisjon av mål

8.1.1 Stivhet

Stivheten, D , av en bjelke regnes ut på følgende måte ved bruk av den klassiske sandwichteorien:

$$D = EI = E_s \frac{bt_s^3}{6} + E_s \frac{bt_s d^2}{2} + E_k \frac{bt_k^3}{12}$$

Denne ligningen kan forenkles til:

$$D = E_s \frac{bt_s d^2}{2} + E_k \frac{bt_k^3}{12}, \text{ dersom: } \frac{d}{t_s} = 5,77$$

$$D = E_s \frac{bt_s d^2}{2}, \text{ dersom: } \frac{E_s}{E_k} \frac{t_s d^2}{t_k^3} > 16,7$$

8.1.2 Spenninger

Stivheten brukes videre for å finne spenninger i skallet og kjernen, samt å finne total nedbøyning av sandwichen. Spenninger i skallet og i kjernen regnes ut på følgende måte:

$$\sigma_s = \frac{Mz}{D} E_s, \text{ og } \sigma_k = \frac{Mz}{D} E_k$$

Maksimal spenning oppstår når z er stor. Siden z måles fra sentrum, og E-modulen til skallet alltid er større enn kjernen, er det i skallet de største spenningsene oppstår. For å finne skjærkrefter brukes følgende ligning:

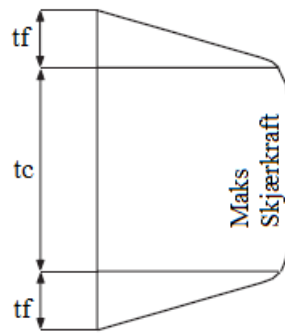
$$\tau = \frac{QS}{Ib}$$

Hvor S er første arealmoment, I er andre arealmoment og Q er skjærkraften. Siden dette er en sandwichstruktur, så må man ta hensyn til at E-modulen i de forskjellige lagene er ulik. Skjærkreftene fordeler seg i tverrsnittet som vist på Figur 8.2. Figuren viser at skjærkreftene er størst i sentrum av kjernen. Formelen for Skjærkrefter i kjernen er:

$$\tau = \frac{Q}{Db} \sum (SE) \text{ hvor: } \sum (SE) = E_s \frac{bt_s d}{2} + E_k \frac{b}{2} \left(\frac{t_k}{2} - z \right) \left(\frac{t_k}{2} + z \right)$$

Bredden faller så ut av ligningen og følgende formel gjenstår:

$$\tau = \frac{Q}{D} \left[E_s \frac{t_s d}{2} + \frac{E_k}{2} \left(\frac{t_k}{4} - z^2 \right) \right]$$

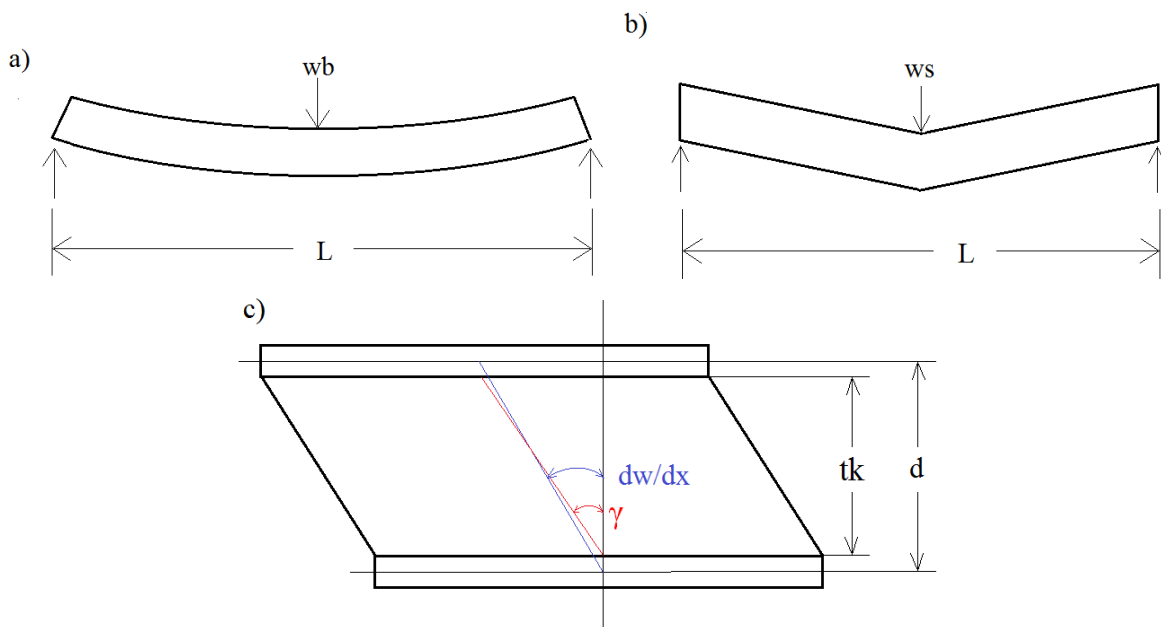


Figur 8.2: Skjærkreftenes fordeling i tverrsnittet

8.1.3 Nedbøyning ved symmetrisk påført last

For å finne nedbøyningen til bjelker og plater som er opplagret på to sider, må man ta hensyn til vanlig bjelkenedbøyning samt nedbøyning grunnet skjærkrefter. For å forstå nedbøyning grunnet skjærkrefter må man se på vinkelendringer i en liten del av bjelken/platen. Figur 8.3a viser bjelkens vanlige nedbøyning. Figur 8.3b viser dens nedbøyning grunnet skjærkrefter i kjernen. På disse figurene er w_b vanlig bjelkenedbøyning, w_s nedbøyning grunnet skjærkrefter. I samme punkt og retning som w_s og w_b virker det også en kraft som fører til denne nedbøyningen. Figur 8.3c viser en liten del av bjelken som blir utsatt for skjærkrefter.

På denne figuren er gjennomsnittlig skjærvinkel $\frac{dw_s}{dx}$. γ er definert som τ/G . G er skjærmodulen til kjernematerialet. Skjærkrefter i skallene antas å ikke føre til nedbøyning.



Figur 8.3: a) vanlig bjelkenedbøyning. b) nedbøyning grunne skjær. c) utdrag fra bjelke under skjærnedbøyning

Følgende sammenheng eksisterer kun ved laster som er symmetrisk fordelt om bjelkens lengde. Teorien krever også at skallet er tilstrekkelig tynt til at $\frac{dw_s}{dx} \cong \gamma$. Ved å studere Figur 8.3c, kan man se at:

$$d \frac{dw_s}{dx} \cong \mathcal{N}_k$$

$$\frac{dw_s}{dx} \cong \frac{\mathcal{N}_k}{d}$$

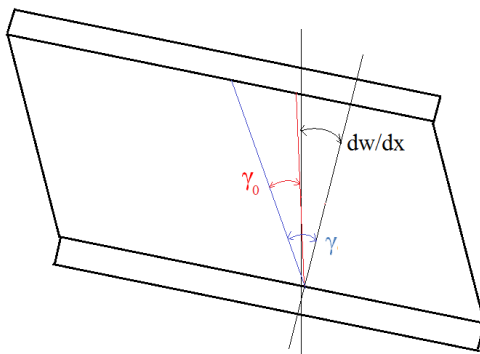
Ved å integrere den siste ligningen finner man nedbøyningen på grunn av skjærkrefter i bjelken ved en bestemt lengde, x . I tillegg må man regne nedbøyning som oppstår dersom dette er en vanlig, og ikke sandwichbjelke. Formler for nedbøyning av vanlige bjelker finnes i de aller fleste formelsamlinger. Når man har regnet ut vanlig nedbøyning på en bjelke og nedbøyning grunnet skjær i samme punktet, kan man benytte superposisjonsprinsippet for å finne total nedbøyning.

8.1.4 Nedbøyning ved ikke-symmetrisk påført last

Dersom lastene påført bjelken ikke er symmetriske, blir resultatet for skjærnedbøyningen noe annerledes. Snittet av bjelken blir da som vist i Figur 8.4. Forskjellen fra symmetriske laster er at et bestemt punkt i snittet forflytter seg både horisontalt og i tillegg til vertikalt. Ligningen for deriverte av nedbøyningen blir da:

$$\frac{dw_s}{dx} = (\gamma - \gamma_0) \frac{t_k}{d}$$

Ved å integrere denne kan vi finne nedbøyningen i et bestemt punkt. Grunnen til at γ_0 kommer i tillegg er at skjærkreftene antas å deformere i to retninger som vist på Figur 8.4.



Figur 8.4: Utdrag fra bjelke under skjærnedbøyning

8.1.5 Test av metoden

Nå gjøres et regneforsøk for å finne nedbøyningen på en plate. Dette gjøres for å se om nedbøyninger stemmer overens med nedbøyninger funnet i tester. Nedenfor er dimensjoner og materialeegenskaper til sandwichplaten oppgitt. Alle tall er oppgitt i N og/eller mm. Platen er enkelt opplagret, med en kraft på midten.

- Lengde, $L=200$ mm
- Bredde, $b=100$ mm
- Skalltykkelse, $t_s=1$ mm
- Kjernetykkelse, $T_k=14$ mm
- E-modul skall, $E_s=13000$ MPa
- E-modul kjerne, $E_k=100$ MPa
- Skjærmodul kjerne, $G_k=20$ MPa
- Tverrkontraksjon skall, $\nu_s=0,28$
- Tverrkontraksjon kjerne, $\nu_k=0,2$
- Kraft; $F=1100$ N

Siden platens lengde er dobbelte av bredden, brukes følgende E-moduler:

$$E_s = \frac{E_s}{1 - \nu_s} = \frac{13000}{1 - 0,28} = 18056 \text{ MPa}$$

$$E_k = \frac{E_k}{1 - \nu_k} = \frac{100}{1 - 0,2} = 125 \text{ MPa}$$

Platestivheten blir da:

$$\begin{aligned} D = EI &= E_s \frac{bt_s^3}{6} + E_s \frac{bt_s d^2}{2} + E_k \frac{bt_k^3}{12} \\ &= 18056 \frac{100 * 1^3}{6} + 18056 \frac{100 * 1 * 15^2}{2} + 125 \frac{15 * 14^3}{12} = 203461558 \text{ Nmm}^2 \end{aligned}$$

Dermed kan man regne ut skjærspenningen i kjernen og γ som vi ser nedenfor.

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{Q}{D} \left[E_s \frac{t_s d}{2} + \frac{E_k}{2} \left(\frac{t_k}{4} - z^2 \right) \right] = \frac{1100}{2 * 203461558} \left[18056 \frac{1 * 15}{2} + \frac{125}{2} \left(\frac{14}{4} - 0^2 \right) \right] \\ &= 0,367 \text{ N / mm}^2 \end{aligned}$$

$$\gamma = \frac{\tau}{G_k} = \frac{0,367}{20} = 0,01835$$

Nedbøyningen, i midten av platen, grunnet skjærkrefter kan da regnes ut:

$$w_s = \int_0^{L/2} \frac{\gamma_k}{d} dx = \frac{0,01835 * 14}{15} * 100 = 1,71 \text{ mm}$$

I tillegg regnes vanlig nedbøyning ut fra følgende formel:

$$w_b = \frac{FL^3}{48D} = \frac{1100 * 200^3}{48 * 203461558} = 0,90 \text{ mm}$$

Dette gir en total nedbøyning på 2,61 mm.

Dette resultatet er avviker hele 30% fra nedbøyninger funnet i tester. Studenter fra Høyskolen i Telemark har utviklet en kalkulator for EKRO AS i Microsoft Excel. Kalkulatoren beregner nedbøyninger av en plate ved bruk av samme teori. Også denne kalkulatoren gir uriktige resultater. Kalkulatoren hadde i utgangspunktet svært mange feil. De fleste av feilene er rettet og vedlagt i den elektroniske versjonen av rapporten. Avviket for kalkulatoren er i samme størrelsesorden som for utregningen i dette kapittelet.

Årsaken til at denne teorien ikke fungerer er ukjent. Mest sannsynlig er problemet at skallagene antas isotropiske. Da dette er en anerkjent teori for beregning av sandwichplater, er det overraskende at resultatene avviker med hele 30% i nedbøyning.

8.2 Beregning ved bruk av elementmetoden

Den antatt beste metoden for å analyse av nedbøyninger av en sandwichplate ved bruk av elementmetoden er beskrevet i [28]. Denne beskrivelsen av elementmetoden for analyse av sandwichmaterialer er en gjengivning av det som står skrevet i [28]. I tillegg er det tatt med noe teori angående skallenes egenskaper fra [27]. Det vil ikke legges vekt på å forklare all teori detaljert, kun i grove trekk.

I kjernen av sandwichen brukes solid-elementer, mens for skallene brukes skall-elementer. Disse settes til slutt sammen for å lage en fullstendig systemmatrise til sandwichkompositten. I denne rapporten vil ikke dette utføres. Kun systemmatrisene til ett skallelement, og ett solid-element skal forklares.

8.2.1 Skallelementer

Spenninger og tøyninger for ett lag med komposittmateriale i skallelementet kan beskrives med følgende matrise:

Kapittel 8: Metoder for analyse av sandwichkomposittmaterialer

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{26} \\ c_{61} & c_{62} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

Dette forutsetter at $\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0$. Verdien av c_{ij} avhenger av materialegenskapene til kompositten. For å finne hovedspenninger $\sigma_1 = \sigma_2 = \tau_{12}$ brukes en transformasjonsmatrise. Matrisen for hovedspenningene blir da som følge;

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}$$

Q_{ij} kan finnes ved formlene nedenfor. I disse formlene er ν_{ij} poissontallet og E_i er E-modulen i de respektive retningene og G_{ij} er skjærmodulen.

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{12} = Q_{21} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{66} = G_{12}$$

Dermed kan samme transformasjonsmatrise invertert brukes for å finne tilbake til den opprinnelige spenning-tøyningsmatrisen. Forskjellen er at man nå har verdier for de forskjellige komponentene i stivhetsmatrisen. Transformeringen av stivhetsmatrisen gjøres på følgende måte:

$$\begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2sc \\ s^2 & c^2 & 2sc \\ sc & -sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix}$$

↓

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

Siden tøyningen ε er lik defleksjonen u addert med kurvaturen κ , kan man finne kraft-deformasjons-matrisen for skallelementer. Matrisen nedenfor er den fullstendige løsningen av

en kraft-deformasjonsmatrise til skall-elementer. Siden skallet i en kompositt er bygd opp av flere lag(se Kapittel 3), kan man finne kreftene i ett enkelt lag ved å endre systemmatrisen.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_{xy} \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix}$$

Hvor:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})_k] (h_k - h_{k-1})$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})_k] (h_k^2 - h_{k-1}^2)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})_k] (h_k^3 - h_{k-1}^3)$$

Måten man finner kreftene i ulike lag av skallet er å endre høyden h fra sandwichmaterialets nøytralakse. Midtlaget i kompositten er h_k . Dersom det kun er ett lag, ignoreres siste del av ligningene.

Systemmatrisen gjelder i sin fulle form dersom alle lagene i kompositten er i samme retning[0,0,0,0]. Dersom lagene er bygd opp symmetrisk om midtlaget [0,90,0,90,0] blir $B_{ij}=0$.

Det finnes svært mange forskjellige oppbygninger av lag i komposittmaterialer. En vanlig oppbygning er krysslaminering[0,90,0,90]. I denne type oppbygning kan det bevises at $A_{16}=A_{26}=B_{16}=B_{26}=D_{16}=D_{26}=0$. Dette kan man lese mer om i [27].

8.2.2 Volum-elementer

Som tidligere nevnt brukes volum-elementer for å beskrive kjernens materialegenskaper. Spennings-tøyings-matrisen og kraft-deformasjons-matrisen til kjernen ved bruk av volum-element er vist nedenfor.

$$\begin{bmatrix} \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{44} & 0 \\ 0 & c_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Q_{yz} \\ Q_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{44} & 0 \\ 0 & B_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{yz} \\ u_{xz} \end{bmatrix}$$

Hvor c_{44} og c_{55} er skjærmodulen (G) til kjernematerialet. For vanlige plater er $c_{44}=B_{44}$ og $c_{55}=B_{55}$. Dette gjelder dersom bøyestivheten til kjernen neglisjeres.

Dersom skjærmodulen varierer med kjernens tykkelse gjøres det endringer i stivhetsmatrisen (c_{44} og c_{55}). Dette er detaljert beskrevet i [28]. I denne oppgaven er ikke dette relevant da det antas at skjærmodulen til kjernematerialet er konstant.

I denne rapporten skal analysene ved bruk av elementmetoden gjøres i ANSYS, og ikke for hånd. Hvordan disse elementene brukes i ANSYS forklares senere i rapporten.

8.3 Andre metoder for analyse av sandwichkomposittmaterialer

Det finnes svært mange andre metoder for beregning og analyse av komposittmaterialer. De tre metodene nedenfor oppsummerer mange av de alternative metodene. Klassisk sandwichteori for plater er bare en utvidet teori av den som ble diskutert og testet i Kapittel 8.1. Rules of mixture er en enkle metode for å finne materialeegenskaper for komposittmaterialer. Til slutt står det kort om dataprogrammer som kan benyttes for å finne materialeegenskaper til komposittmaterialer.

8.3.1 Klassisk sandwichteori for plater

Klassisk sandwichteori for bjelker begrenset seg til enkel opplagring på to sider. Denne teorien støtter også opplagring i hjørner i tillegg til opplagring på alle fire sider. Teorien baserer seg på de samme prinsippene som ved bjelketeorien, men har i tillegg energibetraktninger for å finne nedbøyninger. Energimetoden baserer seg på det faktum at tøyingsenergi (U) og potensiell energi (H) oppstår i platen ved deformasjon [20]. $U+H$ vil ha minimumsverdi når den nedbøyde platen er i likevekt. Fra dette kan kritiske laster og spenninger finnes. Denne teorien vil ikke utdypes ytterligere da den ligner på klassisk sandwichteori for bjelker, bare mye mer avansert.

Etter all sannsynlighet vil også denne teorien ha de samme problemene som klassisk sandwichteori for bjelker. Grunnen til dette er at begge metodene forutsetter isotropiske materialeegenskaper i sandwichskallene.

8.3.2 Rules of mixture

Rules of mixture er en anerkjent teori som brukes kun til å finne egenskaper i et komposittmateriale. Metoden kan ikke benyttes for å finne egenskaper i sandwichkompositter. Teorien kan brukes til å finne samlet tetthet, E -modul og skjærmodul i et lagvis oppbygd komposittmateriale. Kravet for å bruke denne teorien er at alle egenskaper ved fibre og matriksen er kjent, samt at volumfraksjonen av fibre er kjent. Denne teorien diskuteres ikke videre i rapporten da komposittmaterialet som brukes i topp og bunnet av sandwichmaterialet Polleo Pan, har kjente egenskaper.

8.3.3 Enkle dataprogrammer

Det finnes noen dataprogrammer som er spesiallaget for komposittmaterialer. Composite Star og The Laminator er av de mest kjente. The Laminator er et lite dataprogram til Microsoft Windows som kan beregne stivhetsmatrisen til komposittmaterialer ved bruk av SHELL-elementer. Dette programmet krever input med materialegenskaper, lagtykkelse, og orientering av lagene. Programmet beregner alle verdier i stivhetsmatrisen. Programmet vil beregne en stivhetsmatrise som har lik form som matrisene vist i Kapittel 8.2.1. Programmet har svært begrensede muligheter for beregning av spenninger, tøyninger og lignende. Composite Star er noe mer avansert, men har de samme begrensningene som The Laminator.

Ved å bruke Rules of Mixure til å finne materialegenskapene i ett lag med komposittmateriale, samt The Laminator til å finne stivhetsmatrisen trenger man kun kjernens stivhetsmatrise for å gjøre en elementanalyse av plater.

8.4 Analyse ved hjelp av dataprogramvare

For å analysere komposittmaterialer brukes veldig ofte avanserte dataprogramvarer. Grunnen til dette er at håndberegninger er tilnærmet umulig å gjennomføre på avanserte sandwichkonstruksjoner. Et dataprogram kan lages på en måte som gjør at beregninger av matriser og lignende gjøres svært effektivt.

Programvarer som gjør avanserte regneoperasjoner eller analyser kan brukes på to måter. Den første og enkleste er å se bort fra alt av regneoperasjoner som foregår i programvaren, og blindt stole på dets resultat. Dette kan være nyttig ved rutineberegninger og lignende. For komposittmaterialer har programvaren liten formål dersom man ikke forstår hva programmet gjør for å komme til sitt resultat. Man må vite at resultatet er riktig for å bruke det videre.

Det finnes i dag mange elementmetodeprogrammer med muligheter for beregning av komposittmaterialer og sandwichkompositter. De fleste av disse programmene har disse beregningsmulighetene som en tilleggsmodul. Det finnes per i dag svært få analyseverktøy spesialisert for dette formålet. Og ingen som er spesialtilpasset for sandwichkompositter. De vanligste programvarene for analyse av konstruksjoner er ANSYS, Nastran og Abaqus. Disse programvarene bruker elementmetoden for å finne nedbøyninger, krefter, spenninger, tøyninger og lignende.

8.4.1 Om ANSYS

ANSYS brukes i arbeidet med denne rapporten. Hovedgrunnen til dette er at det er et miljø på Universitetet i Stavanger rundt denne programvaren. Selv om det ikke er et miljø for analyse av komposittmaterialer, er det en stor fordel å diskutere metoder og framgangsmåter med erfarne brukere av programmet.

ANSYS er et av de mest analoge analyseverktøyene tilgjengelig. Programmet har store muligheter for modifikasjoner av eksisterende funksjoner. Dette er nødvendig siden mange av

standardfunksjonene ikke er tilpasset komposittmaterialer. I ANSYS kan man skrive programkoder i tekstformat for en analyse. Det er ikke nødvendig å legge inn geometri, krefter og lignende for hver eneste analyse. Fordelen med dette er at det er svært enkelt å endre geometrien, påførte krefter, randbetingelser og lignende.

8.4.2 Framgangsmåte

Alle analyser i denne rapporten skrives som programkoder, og ikke ved bruk av GUI.

En analyse kan gjøres på veldig mange forskjellige måter. Det første leddet er å lage geometrien som skal analyseres. Dette kan gjøres på mange forskjellige måter. For en plate vil det være naturlig å lage 8 nøkkelpunkter, for så å definere et volum innad disse punktene. Hvorvidt man i det hele tatt trenger et volum avhenger av elementtypen man ønsker å bruke. Dette er diskutert i neste delkapittel.

Når geometrien er laget, må man definere materialeegenskapene som hører til geometrien. Dette er første trinnet som kan gi problemer i en sandwichkompositt. Materialene er ikke like i kjernen som i skallene. En måte å løse dette på er å bygge opp platen av 3 volumer som er bundet sammen, for så å gi volumene sine respektive materialeegenskaper. En annen måte er å bruke kommandoer som er spesialisert for sandwichmaterialer. Dette kan dessverre ikke brukes for alle elementtyper.

Når geometrien er laget, og den er gitt materialeegenskaper, meshes analysemodellen. Her deler man modellen opp i mange elementer som gjør det mulig å finne spenninger og tøyninger i alle områder av modellen. Meshingen er avgjørende for hvor nøyaktig resultatet blir. Generelt blir resultatet riktigere jo flere elementer som brukes. Ved et visst antall elementer, vil resultatene stabiliseres, og man antar at analysen gir et godt resultat.

Siste trinn før selve analysen er å definere randbetingelser og påførte krefter. Disse defineres vanligvis på forhåndsdefinerte knutepunkter, arealer, eller noder laget under meshingen.

Til slutt skal analysen utføres. Da bestemmes det hvorvidt systemet er statisk og lignende. Når analysen er fullført, gjenstår det å tolke analysens resultat.

8.4.3 Elementer

Valg av elementtype er det viktigste ved en analyse i ANSYS. Elementer skiller seg fra hverandre på en rekke områder. De viktigste forskjellene mellom elementtyper er antall noder per element, antall frihetsgrader per node, elementenes form og elementenes systemmatriser/stivhetsmatriser. Tidligere i rapporten ble forskjellen mellom stivhetsmatrisen til et skall- og et solid-element vist.

Valget av element har derfor en direkte sammenheng med resultatet man får. Ved å bruke to forskjellige element på samme konstruksjon, så kan man få ulikt resultat. Dette skyldes i første rekke antallet frihetsgrader og elementtypens måte å bygge opp systemmatrisen på. For

å finne det elementet som gir best resultat i en gitt situasjon, kan man benytte seg av flere framgangsmåter.

Den første metoden er å tilpasse elementtypen med fysiske tester av identiske konstruksjoner. Dette er den enkleste metoden, og gir vanligvis et godt resultat. Det største problemet med denne framgangsmåten er å vite om geometrien kan endres og likevel gi et korrekt resultat. Dette vil være en vurderingssak for den enkelte situasjon.

Hvordan et element lager stivhetsmatriser og regner ut forskjellige attributter kan man finne i hjelpefilen i ANSYS under seksjonen "*Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications*". Man kan finne en tilnærmet komplett versjon av denne hjelpefilen på [29]. Ved å ha en god forståelse av sitt respektive system, og hvordan det skal beregnes, kan man direkte finne ut hvilken elementtype som bør brukes. Denne metoden for å finne riktig elementtype på er svært god for enkle systemer som bjelker og lignende. Men dersom komplekse strukturer skal analyseres, regnes dette som den vanskeligste måten å finne riktig elementtype på.

Den siste metoden er erfaring. Det er denne metoden som brukes oftest. Erfaringens opphav kan stamme fra lignende analyser, allment aksepterte metoder, og lignende. Hjelpfunksjonen i ANSYS kan også regnes som en erfaringsbasert måte å finne riktig elementtype. I hjelpfunksjonen foreslås følgende elementer for analyse av komposittmaterialer:

- SHELL181
- SHELL281
- SOLSH190
- SOLID185
- SOLID186

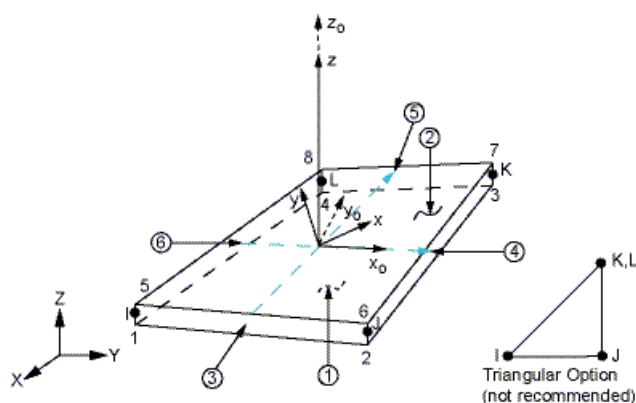
Det er viktig å huske at materialet på uttriggeren er Polleo Pan som er et sandwichmateriale med komposittskall. Som vist i Kapittel 8.2 er den mest anerkjente metoden å bruke en kombinasjon av skall- og solidelementer. I følge hjelpefilen er ikke dette et alternativ. For sandwichmaterialer med komposittskall anbefaler ANSYS kun bruk av SHELL/skall-elementer. Tidlige testforsøk i forbindelse med denne rapporten indikerer derimot at solid/volum-elementer også kan brukes i forbindelse med sandwichstrukturer. Dette krever noen tilnærmelser som kan gi usikkerhet i resultatet. Det er ønskelig at minst ett volum-element testes i forbindelse med denne rapporten fordi elementet har fordeler framfor skall-elementer. Den største fordelen er at man kan se på hvordan materialet vil oppføre seg i tverrsnittet. skall-elementer kan ikke grafisk framstille spenninger, krefter og forskyvninger i tverrsnittet. Grunnen til dette er at det er basert på arealer som er gitt en tenkt tykkelse, og ikke faktiske tykkelser. I tillegg er det ønskelig å forsøke metoden forklart i Kapittel 8.2. Da brukes skall-elementer i komposittlagene, mens volumelementer brukes i kjernen.

Kapittel 8: Metoder for analyse av sandwichkomposittmaterialer

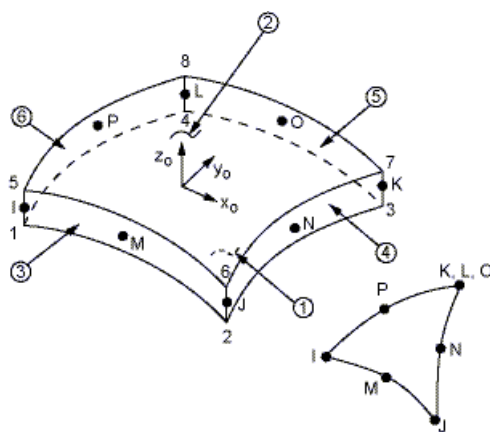
SHELL181 er et skallelement med 4 noder og 6 frihetsgrader per node. De 6 frihetsgradene er forskyvning i alle 3 akser, samt rotasjon om aksene. Dette elementet har støtte for opptil 255 lag i tverrsnittet. For å modellere Polleo Pan er det neppe nødvendig med mer enn 3-9 lag ettersom hvordan analysen utføres. Dette diskuteres senere i rapporten. Figur 8.5 er et direkte utdrag fra ANSYS-hjelpetil og forklarer hvordan ett element ser ut. Hvert element har fire (I, J, K og L) noder. Siden dette er et areal defineres den tenkte tykkelsen samlet for alle elementer i modellen.

SHELL281 har svært like muligheter som SHELL181. Forskjellen ligger i elementets oppbygning. Dette er et 8-node element som har, akkurat som SHELL181, 6 frihetsgrader per node. Figur 8.6 viser hvordan de 8 (I, J, K, L, M, N, O og P) nodene er fordelt på elementet.

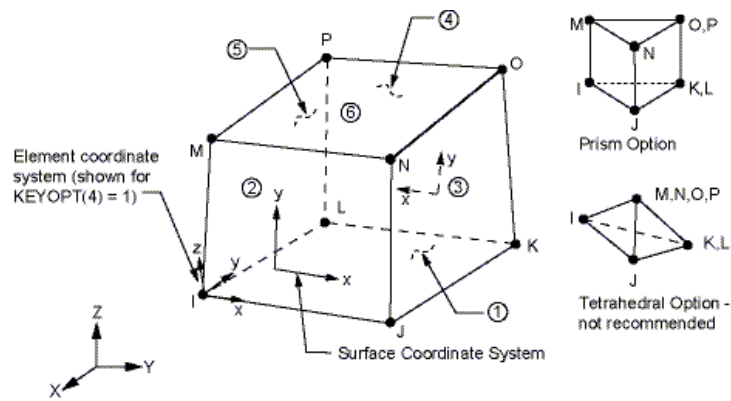
Skall-elementer har gode muligheter for å analysere komposittmaterialer og sandwichkompositter. Siden kun arealet modelleres, gis egenskaper som tykkelse og lagvis oppbygning ved hjelp av kommandoer. Deretter spesifiseres materialegenskaper til de forskjellige lagene. Selv om det er disse elementene er gode for analyse av komposittmaterialer medfører de store utfordringer og begrensinger. Foruten utfordringen i forbindelse med spenninger i tverrsnittet, er skall-elementer lite brukt som designmodeller i de fleste bedrifter. Derfor kreves en helt ny modell for analyser. Dette er en annen grunn til at volum-elementer ønskes brukt i denne rapporten.



Figur 8.5: Shell181[29]



Figur 8.6: Shell281[29]



Figur 8.7: Solid45[29]

SOLID185 er et element som ligner veldig på det gamle SOLID45-elementet. SOLID186 er til forskjell et høyere ordens element. Dette er ikke nødvendig for denne oppgaven. Figur 8.7 viser et SOLID45-element. Elementet har 8 noder og 3 frihetsgrader per node. Dette er forskyvninger i x-, y- og z-retning.

For å analysere sandwichkomposittene i denne oppgaven brukes følgende elementtyper:

- SHELL181
- SOLID45
- SHELL181 og SOLID45

Det siste punktet er en analyse hvor begge elementene skal brukes samtidig. Denne analysen har svært mange fordeler når sandwichkompositter skal analyseres. Ideen er å bruke SHELL-elementer i skallet, og SOLID-elementer i kjernen. Dette gir muligheten til å bygge skallene opp lagvis av komposittmaterialer og samtidig ha mulighet til å se på spenninger i analysemodellens tverrsnitt. Metoden er, meg bekjent, lite testet i ANSYS selv om den er anerkjent ved håndberegninger.

9 Testanalyse av sandwichkomposittplater

Det finnes per i dag ingen enkle metoder for å finne nedbøyninger av sandwichplater, og langt mindre dersom skallene er laget av komposittmaterialer. Ved EKRO AS er det utført en rekke nedbøyningstester av Polleo Pan-plater. Ved å lage en analyse av disse sandwichkomposittplatene i ANSYS, og sammenligne analyseresultater med testresultatene til EKRO AS, kan man verifisere hvorvidt programkoden i ANSYS gir korrekt resultat. Dette er nødvendig for å utføre analyser av uttriggeren.

Testene utført av EKRO AS er standard 3-punkts nedbøyningstester og er utført sommeren 2010. Alle tester ble belastet til brudd med en gradvis økende kraft. Alle tester er utført 5 ganger. Nedbøyningsverdier oppgitt i forbindelse med denne rapporten er gjennomsnittet fra de 5 testene.

Det antas at analysene som kommer senere i dette kapittelet stemmer godt overens med testresultater dersom nedbøyninger følger samme trend, og avviket mellom analyse og test er lite. I tillegg kreves det at spenninger funnet med ANSYS-analysen stemmer overens med virkelige spenninger.

Tidligere i rapporten ble det bestemt at SOLID45, SHELL181 og en kombinasjon av disse skal testes for å se om disse kan brukes i en analyse av sandwichkompositter. I Kapittel 9.2 er testanalysen ved bruk SHELL181-elementet, og i Kapittel 9.3 kan man lese om testanalysen av SOLID45-elementet. Kapittel 9.4 inneholder den spennende kombinasjonen av SHELL181- og SOLID45-elementer. Analysene sammenlignes kontinuerlig med testresultatene til EKRO AS. På denne måten kan den beste elementtypen for analyse av sandwichkompositter i ANSYS bestemmes.

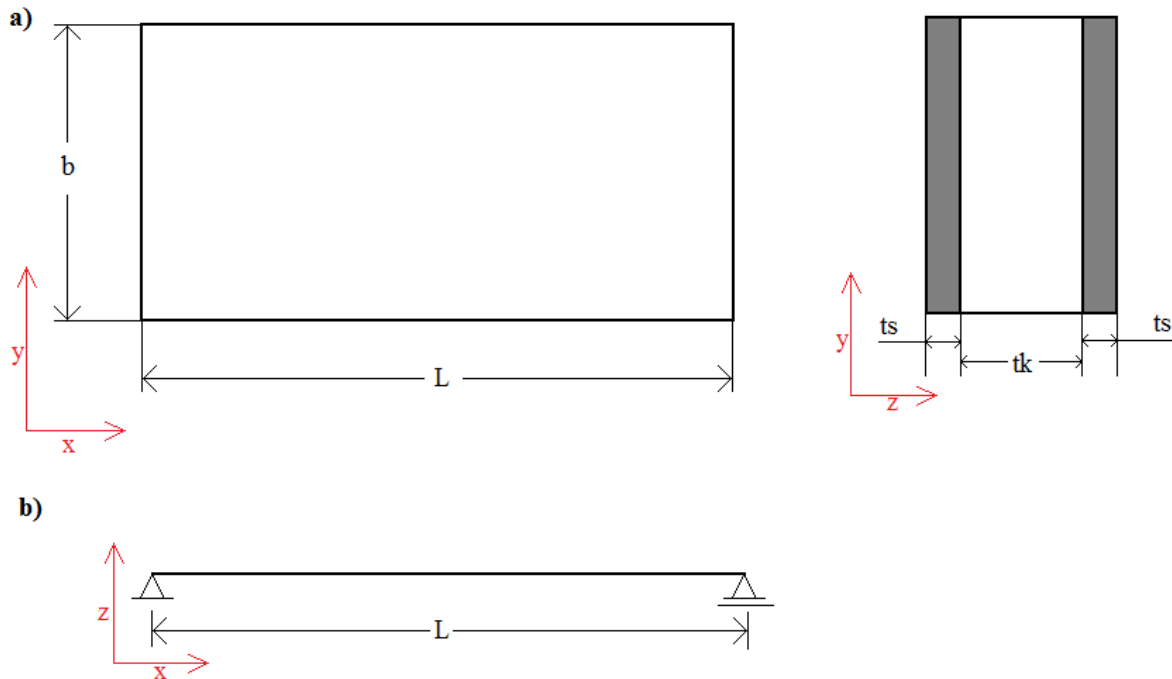
Alle testanalyser utføres i ANSYS Mechanical APDL. Analysene er skrevet i kodeform og er vedlagt rapporten i tekstformat. Alle programkodene er utviklet fra bunn av. Programkodene senere optimalisert ved bruk av teori fra [30].

9.1 Analysemodell

For å kunne sammenligne med testene som er utført, må analysemodellen ha like dimensjoner som testplaten. Analysen skal gjøres på en plate med dimensjoner som vist i Figur 9.1. Figuren viser også at platen er enkelt opplagret på begge sider. Denne opplagringen er lik i platens bredde, og ikke kun i hjørnene. Verdiene tilhørende figuren er listet opp nedenfor, mens materialegenskapene til skallene og kjernen finnes i Tabell 9.1. Disse platedimensjonene brukes fordi denne platen ga lite avvik over 5 tester. Alle tester utført av EKRO AS finnes vedlagt i den elektronsike versjonen av oppgaven.

- $b=100$ mm, $L=200$ mm, $t_s=1$ mm, $t_k=14$ mm

Kapittel 9: Testanalyse av sandwichkomposittplater

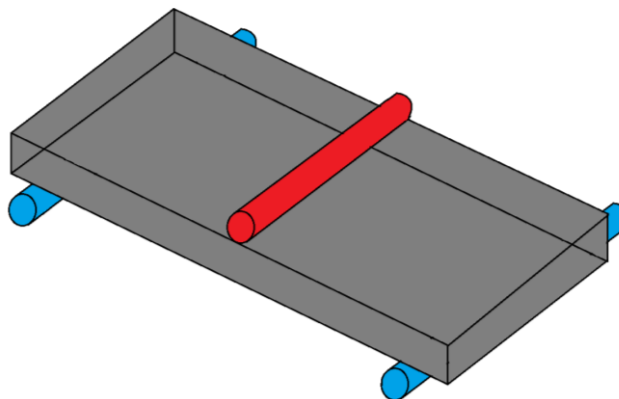


Figur 9.1 a) viser platens dimensjoner, og b) viser opplagringen av platen

Tabell 9.1: Materialegenskaper til kjernematerialet og skallmaterialet

Egenskap	Forkortelse og benevning	Skallmateriale (Twintex 745)	Kjernemateriale (Airex T92)
E-modul i x-retning	E_x (MPa)	13000	92,5
E-modul i y-retning	E_y (MPa)	13000	92,5
E-modul i z-retning	E_z (MPa)	7000	92,5
Poisson-tall	ν (-)	0,28	0,20
Skjærmodul i x-retning	G_{xy} (MPa)	4000	20,39
Skjærmodul i y-retning	G_{yz} (MPa)	1000	20,39
Skjærmodul i z-retning	G_{xz} (MPa)	1000	20,39

Analyseplaten er belastet likt som en 3-punkts nedbøyningstest. Det vil si at man påfører en kraft på midten av platen, som virker i hele platens bredde. Figur 9.2 er en konseptskisse som viser hvordan kraften blir påført i en slik test. Kraften er på denne figuren påført av den røde sylindren, mens opplagrene er merket med blått.



Figur 9.2: konseptskisse av 3-punkt nedbøyningstest

For at analysen skal være tilstrekkelig nøyaktig er det ønskelig med 20-40 elementer i platens lengderetning(x-retning) og 5-10 elementer i bredden(y-retning). Ved bruk av SHELL-elementer er det ikke nødvendig med elementoppdeling i platens høyde(z-retning). Ved bruk av SOLID45 elementet er det ønskelig at de to skallene skal bestå av 2-3 elementer hver i z-retning, mens kjernen skal bestå av 4-6 elementer. Det vil i ikke fokuseres på å gjøre mer detaljerte meshinger i områder hvor krefter og forskyvninger antas å være størst.

9.2 Testanalyse 1: Shell181

I Vedlegg V finnes hele programkoden til denne analysen. Det er enkelt å modifisere teksten i vedlegget. Dermed kan man bruke ønskede dimensjoner og materialegenskaper på platen. I den elektroniske versjonen av rapporten ligger programfilen vedlagt i tekstformat.

9.2.1 Framgangsmåte

Framgangsmåten for denne analysen er standard og forklart i Kapittel 8.4.2, med noen unntak. Endringer av dimensjoner og materialegenskaper gjøres i programkodens første del. På Figur 9.3 ser vi et utdrag fra denne definisjonsdelen av kodingen, med forklaring av hva de forskjellige parameterne betyr. Definisjonene brukes aktivt i kodingen for å holde den oversiktlig og gjøre endringer.

Videre i dette kapittelet vil det bli forklart hvordan selve programkoden fungerer.

```
LENGDE=200 !(mm) Platens lengde
BREDDE=100 !(mm)Platens bredde
T_SKALL=1 !(mm)Tykkelsen for ett skall
T_KJAERNE=14 !(mm)Tykkelse på kjernen
EX_SKALL=13000 !(MPa)Elastitetsmodul for skallene
EY_SKALL=13000
EZ_SKALL=7500
GXY_SKALL=4000 !(MPa) Skjørmodul for skallene
GYZ_SKALL=1000
PRXY_SKALL=0.28 !Tverrkontraksjon for skallene
EX_KJAERNE=100 !(MPa) Elastitetsmoduk for kjernen
EY_KJAERNE=100
EZ_KJAERNE=100
GXY_KJAERNE=20 !(MPa) Skjørmodul for kjernen
GYZ_KJAERNE=20
GXZ_KJAERNE=20
PRXY_KJAERNE=0.2 !Tverrkontraksjon for kjernen
KRAFT=1000/11 !(N) Kraften fordeles på 11 noder|
```

Figur 9.3: Definerings for videre bruk

Kapittel 9: Testanalyse av sandwichkomposittplater

```
SECTYPE,1,SHELL,,
SECDATA,T_SKALL,1,,3 første lag, tykkelse på laget, materialnr, orientering av laget, (antall integrasjonspunker)
SECDATA,T_KJAERNE,2,,3 andre lag, tykkelse på laget, materialnr, orientering av laget, (antall integrasjonspunker)
SECDATA,T_SKALL,1,,3 tredje lag, tykkelse på laget, materialnr, orientering av laget, (antall integrasjonspunker)

!....Materialegenskaper til skallet....
MP,EX,1,EX_SKALL første materialeegenskap, elastitetsmodul i x-retning, materialnr, verdi på materialeegenskapen
MP,EY,1,EX_SKALL
MP,EZ,1,EX_SKALL/2
MP,GXY,1,GXY_SKALL
MP,GYZ,1,GXY_SKALL/4
MP,GXZ,1,GXY_SKALL/4
MP,PRXY,1,PRXY_SKALL
MP,PRYZ,1,PRXY_SKALL
MP,PRXZ,1,PRXY_SKALL

!....Materialegenskaper til kjernen....
MP,EX,2,EX_KJAERNE første materialeegenskap, elastitetsmodul i x-retning, materialnr, verdi på materialeegenskapen
MP,EY,2,EX_KJAERNE
MP,EZ,2,EX_KJAERNE
MP,GXY,2,GXY_KJAERNE
MP,GYZ,2,GXY_KJAERNE
MP,GXZ,2,GXY_KJAERNE
MP,PRXY,2,PRXY_KJAERNE
MP,PRYZ,2,PRXY_KJAERNE
MP,PRXZ,2,PRXY_KJAERNE
```

Figur 9.4: Oppbygning av lag og definering av materialeegenskaper

Unntaket fra standard framgangsmåte er at skall-elementer ikke bruker fysiske tykkelser, men arealer som er gitt tenkte tykkelser. Dette ga en fordel i denne analysen fordi det kun er nødvendig å lage ett areal med platens lengde- og bredde-dimensjoner. Deretter spesifiseres det at arealet består av 3 lag med tykkelser som definert i Figur 9.1. Orienteringen av lagene neglisjeres i denne programkoden fordi komposittmaterialet i skallagene er vevd, og har like egenskaper i x- og y-retning. Kjernematerialet er isotropisk og trenger heller ikke å orienteres for å få fram ulike egenskaper i retningene. Figur 9.4 er et utdrag av programkoden som viser hvordan dette er utført. I figuren står det beskrevet med rød skrift hva de forskjellige kommandoene gjør. Figuren viser også defineringen av materialeegenskaper for kjernen og skallene. Defineringen av materialeegenskaper er lik uansett hvilken elementtype som brukes.

Etter tykkelsen til de 3 lagene, er det referert til ett tall i kodingen. Lag 1 og 3 er topp/bunnlagene og refererer til tallet 1, mens midtlaget refererer til 2. Dette forteller programmet at materialnummer 1 brukes i lag 1 og 3, mens material 2 brukes i lag 2.

I denne analysen er det brukt en meshing på 10 elementer i bredderetning, og 20 i lengderetning. Meshingen lager totalt 200 elementer, med 4 noder per element. Meshingen er mer avansert for testanalyse 2 og 3. Den vil derfor ikke bli nærmere forklart for denne testanalysen.

Siden SHELL181-elementet har 6 frihetsgrader per node, låses alle bevegelser i z retning i begge opplagrene, samt bevegelse i x- og y-retning i venstre opplager. Rotasjon om z- og x-aksen låses også på begge sider. Rotasjonen om y-aksen er fri i begge opplagrene. Figur 9.5 viser kodingen for å bestemme randbetingelsene.

Kapittel 9: Testanalyse av sandwichkomposittplater

!.....Randbetingelser.....

```
NSEL,S,LOC,X,0 velg noder, nytt sett, velg vha koordinatsyst, velg i x-retning, velg alle noder når x=0  
DSYM,ASYM,X lås valgte noder, asymetriske randbetingelser, låser bevegelse i y- og z-retn og rotasjon om x  
DSYM,ASYM,Z lås valgte noder, asymetriske randbetingelser, låser bevegelse i x- og y-retn og rotasjon om z
```

```
NSEL,A,LOC,X,LENGDE velg noder, utvid tidligere sett,.....,velg noder x=LENGDE(200)  
DSYM,ASYM,X
```

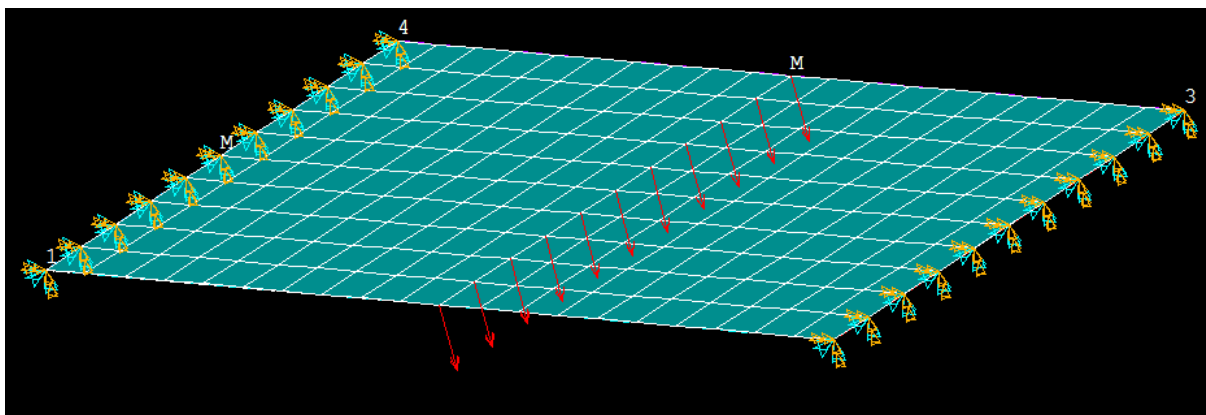
Figur 9.5: Koding for randbetingelser

Den påførte kraften fordeles over platens fulle bredde. Meshingen lager 11 noder i platens bredde. Ved bruk av kodingen på Figur 9.6 fordeles kraften på disse 11 nodene. Resultatet av dette vises på Figur 9.7. Påføringen av krefter kan gjøres mer nøyaktig ved å fordele kraften på elementene, og ikke nodene. Figur 9.8 viser hvordan den påførte kraften ser ut i dette tilfellet. Grunnen til at dette ikke brukes er at krever flere elementer for å påføre kraften over et tynt nok område i lengderetningen.

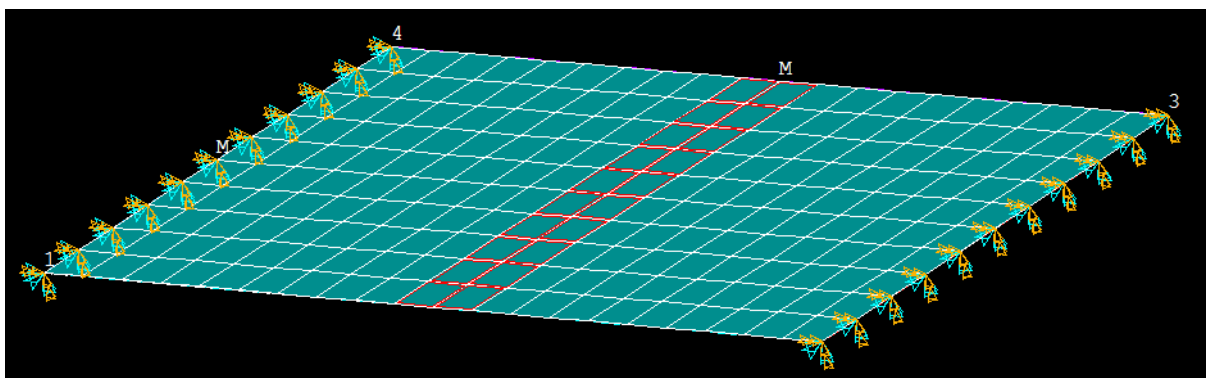
!.....Krefter.....

```
NSEL,S,LOC,X,0.5*LENGDE velg noder, nytt sett, velg vha koordinatsyst, velg i x-retn, midten av lengden  
NSEL,R,LOC,Y,0,BREDDE velg noder, bygg videre på valgt sett,...., velg i y-retn, fra y=0, til y=bredde(100)  
F,ALL,FZ,-KRAFT spesifiser kraft, alle valgte noder, restning z, verdi på kraften
```

Figur 9.6: Påføring av krefter på noder



Figur 9.7: Krefter fordelt på noder



Figur 9.8: Krefter fordelt på elementer

9.2.2 Resultater

For å finne ut av spenningskonsentrasjoner, nedbøyninger og opplagerkrefter brukes statistisk analyse.

En oppsummering av resultatene fra analysen finnes i Tabell 9.2. Tabellen kan viser nedbøyningen av platen ved forskjellige laster. Lastene oppgitt i tabellen er totallasten fordelt på de 11 nodene i midten av platen. Nedbøyningen er målt samme sted som kraften virker. I denne tabellen ser man også verdiene for nedbøyningen fra testen utført av EKRO AS. Til slutt vises også se differansen mellom nedbøyningen funnet i test, og nedbøyningen funnet ved ANSYS-analysen.

Resultatene fra denne analysen diskuteres i neste kapittel.

Tabell 9.2: Resultater ved bruk av Shell181-elementet vs. testet nedbøyning

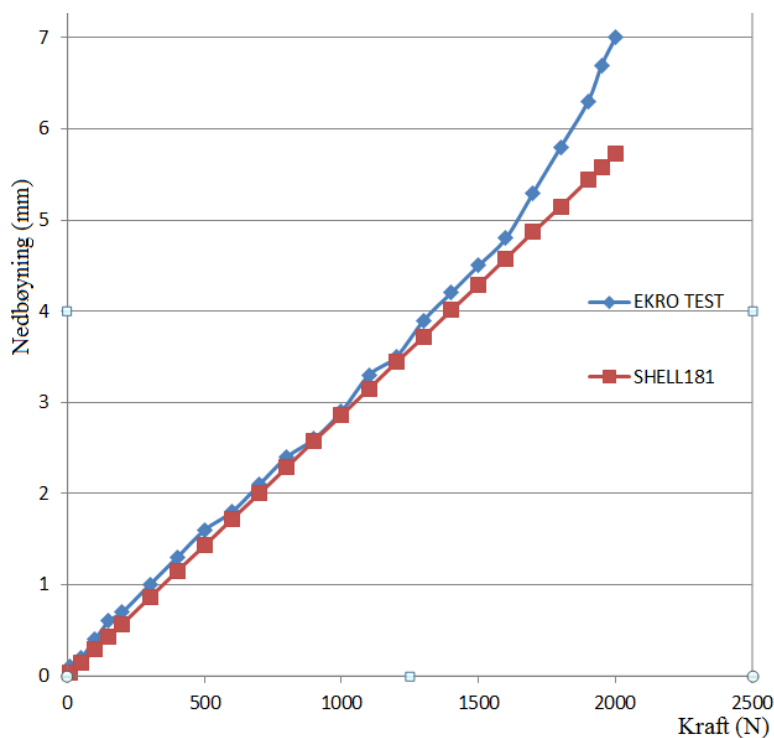
Kraft (N)	Nedbøyning Shell181 (mm)	Nedbøyning fra EKRO (mm)	Diff. (mm)	Kraft (N)	Nedbøyning Shell181 (mm)	Nedbøyning fra EKRO (mm)	Diff. (mm)
10	0,03	0,1	-0,07	1000	2,86	2,9	-0,04
50	0,14	0,2	-0,06	1100	3,15	3,3	-0,15
100	0,29	0,4	-0,11	1200	3,44	3,5	-0,06
150	0,43	0,6	-0,17	1300	3,72	3,9	-0,18
200	0,57	0,7	-0,13	1400	4,01	4,2	-0,19
300	0,86	1,0	-0,14	1500	4,29	4,5	-0,21
400	1,15	1,3	-0,15	1600	4,58	4,8	-0,22
500	1,43	1,6	-0,17	1700	4,87	5,3	-0,43
600	1,72	1,8	-0,08	1800	5,15	5,8	-0,65
700	2,00	2,1	-0,10	1900	5,44	6,3	-0,86
800	2,29	2,4	-0,11	1950	5,58	6,7	-1,12
900	2,58	2,6	-0,02	2000	5,73	7,0	-1,27

9.2.3 Diskusjon

Fra Tabell 9.2 i forrige kapittel ble det vist at faktiske nedbøyninger og nedbøyninger funnet ved analysen stemmer rimelig godt overens. Fra en kraft på 10 til 1600 N er maksimalt avvik 0,25 mm. Fra 1600 N og til brudd blir avviket mye større. Brudd i platen skjer ved 2000N, og der er differansen 1,27 mm. Platens faktiske nedbøyning er hele tiden større enn verdiene funnet i analysen. Dette kan skyldes flere ting.

- 1) Den første grunnen kan være at bindingen mellom kjernen og skallene også bidrar til nedbøyning. Analysen har ikke tatt hensyn til dette.
- 2) Komposittmaterialet i skallene er laget av 2 lag med vevde fibre. Bindingen mellom disse lagene kan skape usikkerhet i analysen.
- 3) Usikkerhet i materialeegenskapene

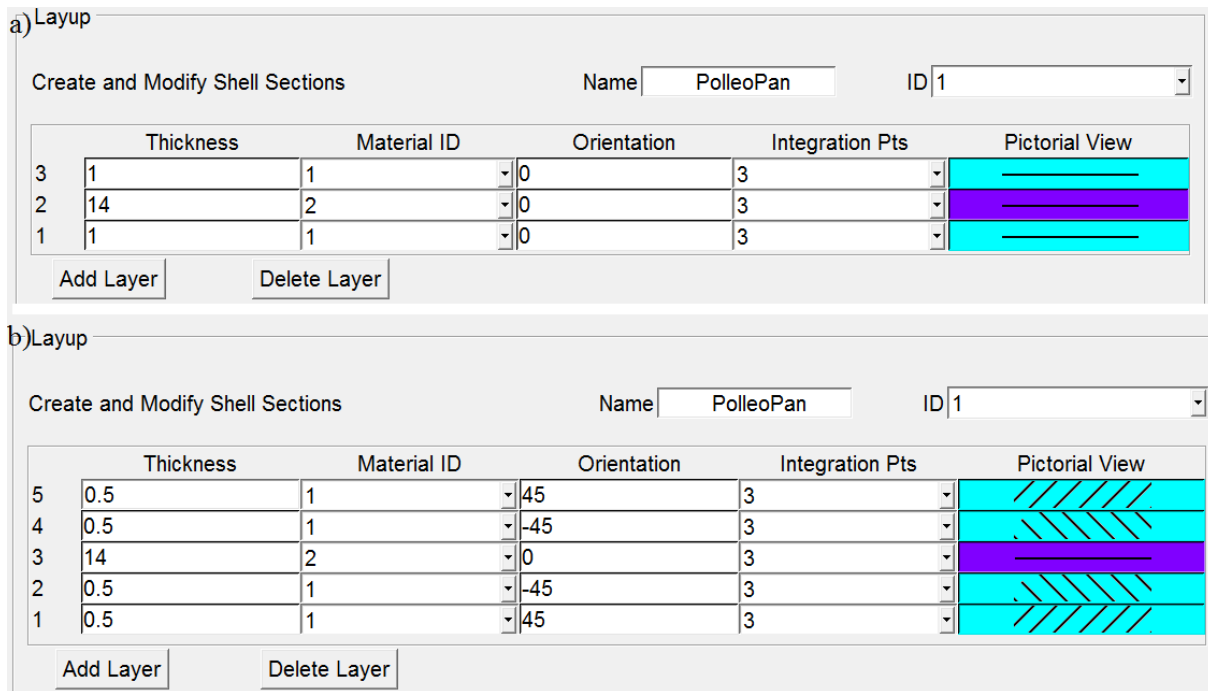
Figur 9.9 viser grafisk nedbøyningene. Den blå grafen er nedbøyningen i testen, mens den røde er analysenedbøyningen. Begge grafene er tilnærmet lineære fram til en påkjenning på 1600 N. Nedbøyningen øker voldsomt mot slutten av testen. Dette er et tegn på at enkelte fibre sprekker før andre. Grunnen kan også være at kjernematerialet gradvis sprekker opp. Årsaken er ikke plastisk deformasjon, da verken kjerne-, eller skallmaterialet har dette. En siste årsak kan være at platen begynner å skli på opplageret.



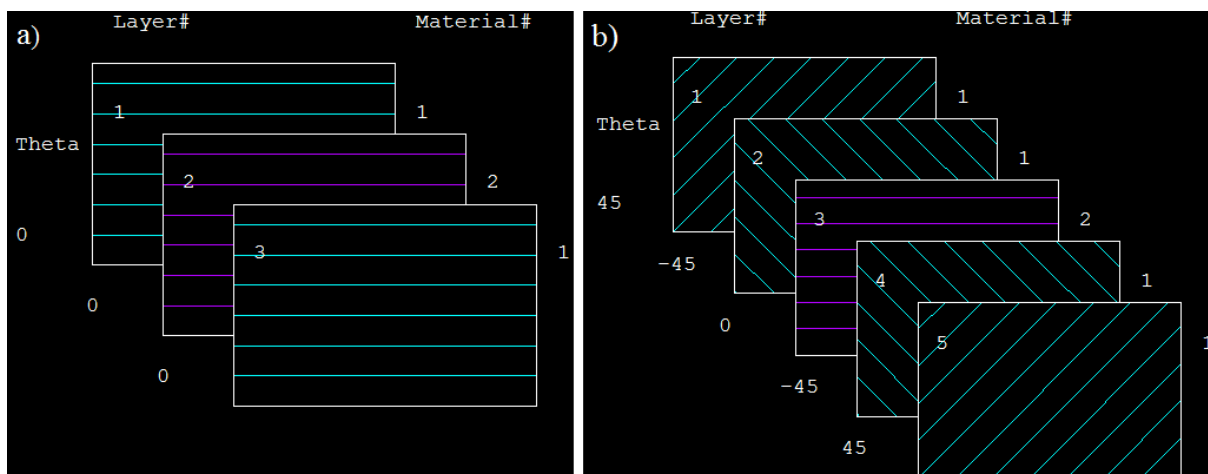
Figur 9.9: Grafisk framstilling av resultatene

Kapittel 9: Testanalyse av sandwichkomposittplater

Fordeler og ulemper ved en analyse med bruk av SHELL181-elementet er diskutert tidligere. Først og fremst innebar fordelene muligheten til å orientere de 3 lagene som gjør at man kan ha ulike egenskaper i forskjellige retninger. I tillegg så er det mye enklere å legge inn flere lag. For testmaterialet (Polleo Pan) ble ikke dette nødvendig siden det var 2 lag med vevde fibre. Dersom det hadde vært ensrettede fibre i ulik orientering, kunne man benyttet seg av dette. Figur 9.10, viser mulighetene til å endre lagoppbygningen. Figur 9.11 viser illustrativt definerte materialvalg, lagtykkelser og lagorienteringer fra Figur 9.10.



Figur 9.10: Lagoppbygning for shell-elementer i ANSYS



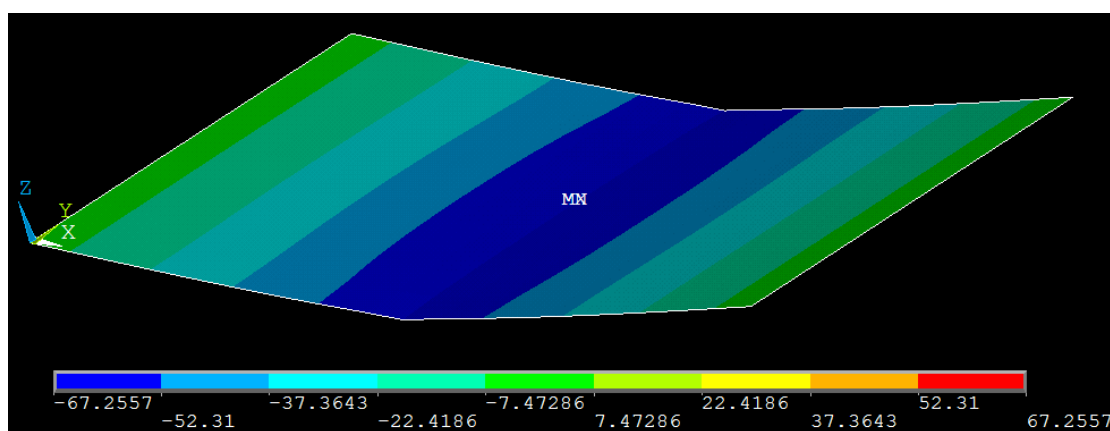
Figur 9.11: Resultatet fra lagoppbygningen

Kapittel 9: Testanalyse av sandwichkomposittplater

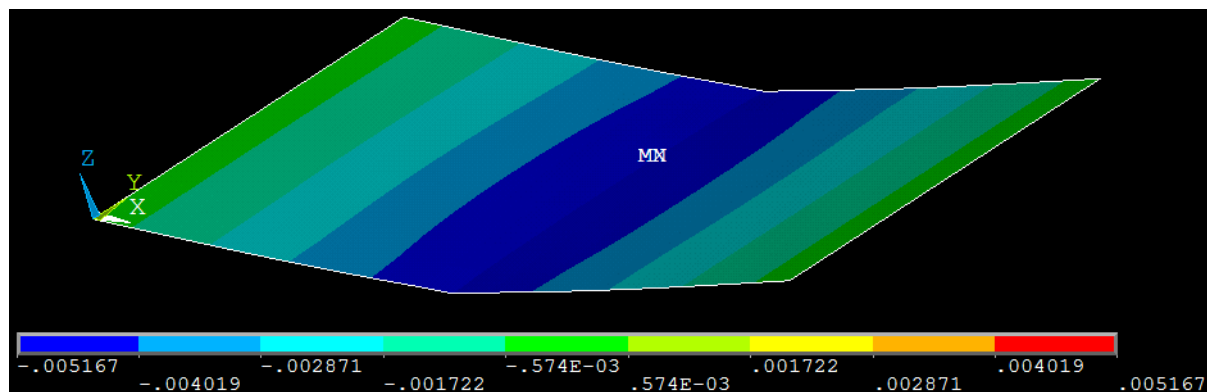
Begrensningene ved bruk av denne elementtypen er at man ikke kan se på krefter, spenninger, tøyninger og lignende i tverrsnittet. Ved å studere Figur 9.12, viser spenninger i platens x-retning ved en påført kraft på 2000 N. Figur 9.13 viser tøyningene i samme retning.

Tøyningen og spenningen ser identisk ut, bare med andre verdier. Figurene sier ingenting om fordelingen av spenninger og tøyninger i de for 3 lagene i sandwichen. Områder merket med blå farge betyr at spenningen og tøyningen er negativ. For Figur 9.13, som viser tøyningene betyr dette kompresjon på oversiden. På undersiden er midten av platen rød, som betyr at platen strekkes.

I Kapittel 9.5 finnes sammenligningsverdier for denne analysen med analysene for de to andre elementtypene.



Figur 9.12: Spenninger i x-retning



Figur 9.13: tøyninger i x-retning

9.3 Testanalyse 2: Solid45

I Vedlegg VI ligger hele programkoden for denne testen. Neste kapittel forklarer utvalgte kommandoer som brukes i denne programkoden. Programkoden er vedlagt som tekstfil i den elektroniske versjonen av rapporten.

9.3.1 Framgangsmåte

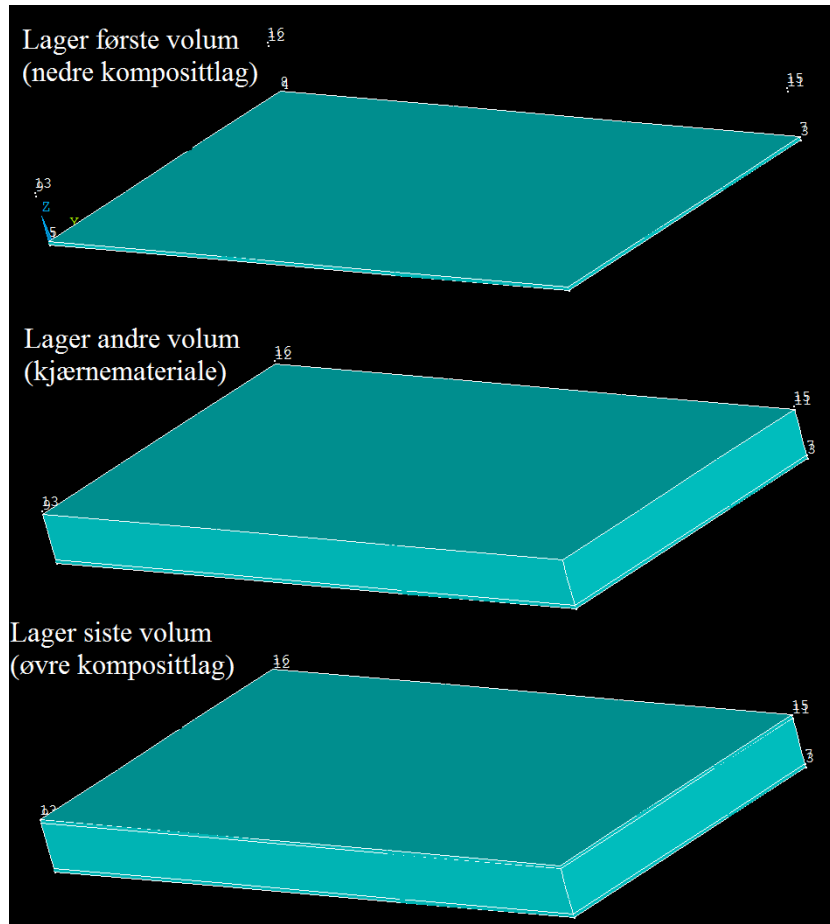
Utfordringene ved bruk SOLID45-elementet er at materialet består av 3 lag med forskjellige materialeegenskaper. Dette er løst ved lage 3 volumer, som bindes sammen av en kommando som heter VGLUE. Denne kommandoen binder de 3 volumene sammen i felles noder. Denne bindingen er perfekt med tanke på fysiske egenskaper. Dette simulerer altså ikke materialeegenskapene til bindemiddelet som i virkeligheten brukes til å feste skallene til kjernen.

For å lage modellen lager man først 4 knutepunkter. Disse knutepunktene kan ses på som bunnarealet og er identisk med den ferdige modellen som fra Testanalyse 1. Dermed brukes kommandoen KGEN til å lage tilsvarende knutepunkter i 3 avstander fra grunnpunktene. Herfra er det enkelt å definere de 3 volumene ved hjelp av knutepunkter. Dette gjøres med kommandoen V. Til slutt brukes den nevnte VGLUE-kommandoen. Figur 9.14 viser kodingen for hvordan modellen lages. Neste figuren, Figur 9.15, er et skjermdump fra ANSYS som viser hvordan de 3 volumene lagvis genereres fra knutepunktene.

```

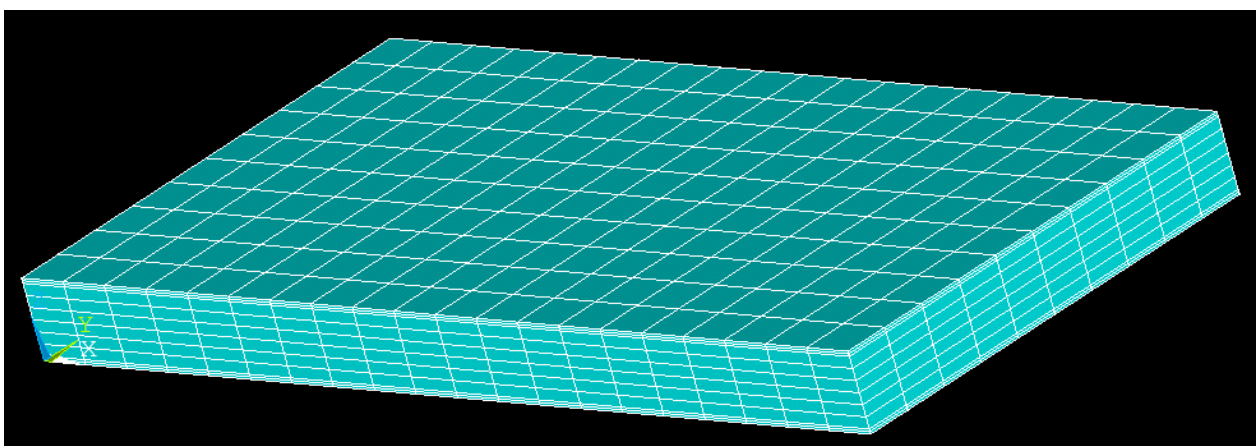
K,1 lag knutepunkt, knutepunkt nr 1, x=0, y=0, z=0
K,2, LENGDE lag knutepunkt, knutepunkt nr 2, x=200, y=0, z=0
K,3, LENGDE, BREDDE
K,4, , BREDDE
KGEN,2,1,4,1,,,T_SKALL genererer nytt sett med knutepunkter i avstandt 1 mm i z-retn
KGEN,2,1,4,1,,,T_KJAERNE+T_SKALL ..... i avstand 15 mm i z-retn
KGEN,2,1,4,1,,,T_KJAERNE+2*T_SKALL ..... i avstand 16 mm i z-retn
V,1,2,3,4,5,6,7,8 lager første volum av knutepunktene 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 og 8
V,5,6,7,8,9,10,11,12 lager andre volum av knutepunktene.....
V,9,10,11,12,13,14,15,16
VGLUE,1,2,3 binder de 3 volumene
    
```

Figur 9.14: Oppbygning av 3 volumer



Figur 9.15: Utfall av kodingen for volumoppbygning

Til slutt meshes de tre volumene på en måte som gjør at de deler felles noder i alle felles arealer. Figur 9.16 viser resultatet. Modellen har 20 elementene i platens lengderetning og 10 i platens bredde. Dette er identisk som for Testanalyse 1. I tillegg meshes denne modellen i z-retning. Her brukes bruke 2 elementer i skallene, mens kjernen består av 6 elementer i z-retningen.



Figur 9.16: De 3 volumene er gitt materialelegenskaper og meshet

Kapittel 9: Testanalyse av sandwichkomposittplater

Den eneste forskjellen fra Testanalyse 1 ved påføringen av krefter, er at det spesifiseres at kreftene virker på toppoverflaten av sandwichplaten. Randbetingelsene er noe lettere for dette elementet da det kun har 3 frihetsgrader per node.

9.3.2 Resultater

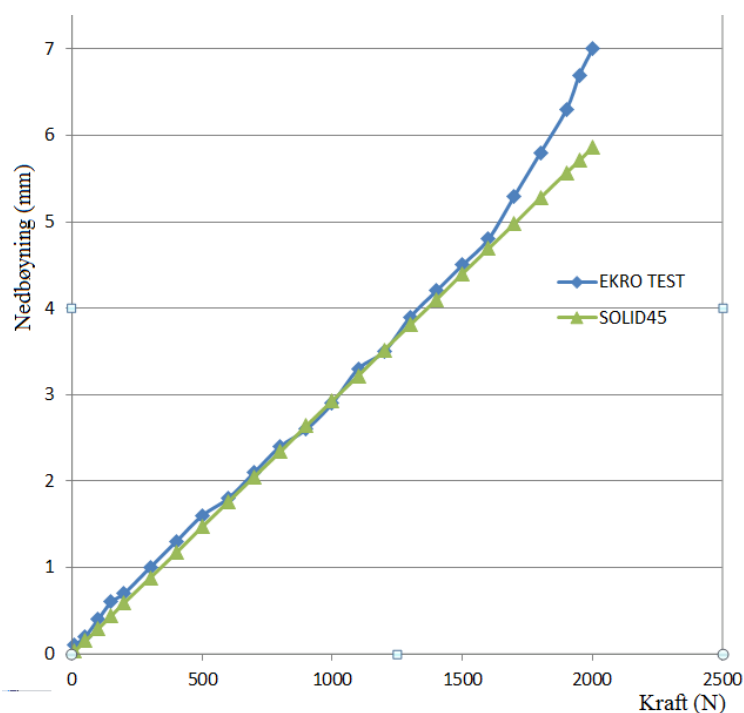
Verdiene for nedbøyninger ved forskjellige laster er vist i Tabell 9.1. Tabellen er satt opp på samme måte som for Testanalyse 1.

Tabell 9.3: Nedbøyning ved bruk av Solid45-elementer vs. testet nedbøyning

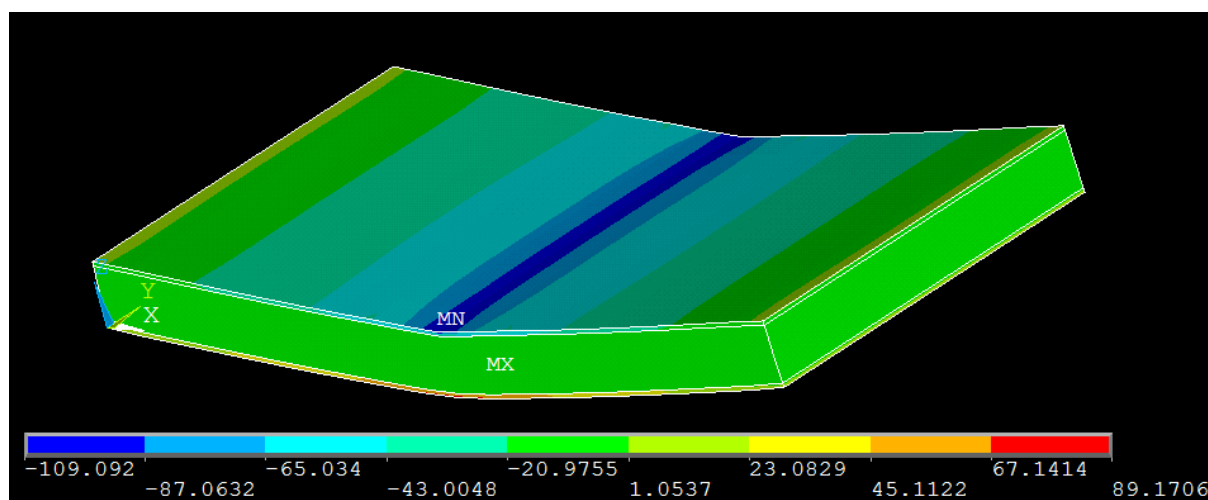
Kraft (N)	Nedbøyning Solid45 (mm)	Nedbøyning fra EKRO (mm)	Diff. (mm)	Kraft (N)	Nedbøyning Solid45 (mm)	Nedbøyning fra EKRO (mm)	Diff. (mm)
10	0,03	0,1	-0,07	1000	2,93	2,9	0,03
50	0,15	0,2	-0,05	1100	3,22	3,3	-0,08
100	0,29	0,4	-0,11	1200	3,52	3,5	0,02
150	0,44	0,6	-0,16	1300	3,81	3,9	-0,09
200	0,59	0,7	-0,11	1400	4,1	4,2	-0,1
300	0,88	1	-0,12	1500	4,4	4,5	-0,1
400	1,17	1,3	-0,13	1600	4,69	4,8	-0,11
500	1,47	1,6	-0,13	1700	4,98	5,3	-0,32
600	1,76	1,8	-0,04	1800	5,28	5,8	-0,52
700	2,05	2,1	-0,05	1900	5,57	6,3	-0,73
800	2,34	2,4	-0,06	1950	5,71	6,7	-0,99
900	2,64	2,6	0,04	2000	5,86	7,0	-1,14

9.3.3 Diskusjon

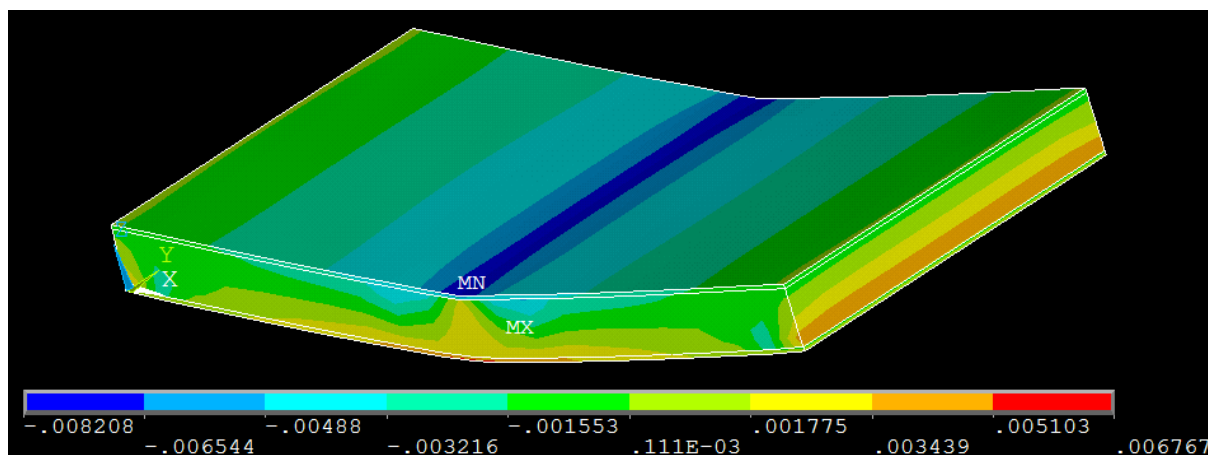
Nedbøyningene for denne analysen er tilnærmet identisk med hva som ble funnet ved bruk av SHELL181-elementet. Nedbøyninger fram til 1600 N har et lite avvik fra testresultater. Nedbøyningen er konsekvent litt mindre enn testnedbøyninger i dette området. Dette avviket kan forklares med at bindemiddelet mellom skallene og kjernen ikke er tatt hensyn til i analysen. Dette gjaldt også for Testanalyse 1. Det at avviket fra testnedbøyningen er konstant til 1600 N fører til at det prosentvise avviket er stort for små krefter. Dette antas å være irrelevant, da krefter på uttriggeren alltid er større. Figur 9.17 er en grafisk framstilling av resultatet. Avviket fra 1600 N og til brudd er forklart i Testanalyse 1.



Figur 9.17: Grafisk framstilling av analyse- og testnedbøyninger



Figur 9.18: Spenninger i x-retning



Figur 9.19: Tøyninger i x-retning

Figur 9.18 viser spenninger i x-retning fra denne analysen. Ved å sammenligne denne informasjonen med den første testanalysen er det helt tydelige fordeler. Det er nå mulig å finne spenninger i kjernen. Da kjernen ofte kan være et svakt ledd er dette meget viktig. Tøyninger i x-retning kan også finnes i tverrsnittet. Figur 9.19 viser tøyningene i x-retning for den samme kraftsituasjonen. Tøyningene fordeles ulikt i tverrsnittet. Dette er informasjon man ikke fikk ved å bruke SHELL181-elementer.

Den store ulempen med bruk av SOLID-elementer for å analysere sandwichkompositter er at det er svært tidskrevende og vanskelig å bygge opp lagene. Hvis det hadde vært ulik orientering av lagene i skallene ville det vært nødvendig å bruke et eget volum for hvert lag. Dette ville ført til store problemer når det kommer til oppbygningen og meshingen av modellen.

9.4 Testanalyse 3: Solid45/Shell181

Den fulle programkoden for denne testen finnes i Vedlegg VII. Som for tidligere analyser finnes denne programkoden også vedlagt den elektroniske versjonen av rapporten.

9.4.1 Framgangsmåte

I dette kapitlet skal noen viktige deler programkoden denne forklares. Fokuset ligger på å forklare kommandoer som skiller seg fra de to tidligere testanalysene.

```

K,1 Lager knutepunkt i x=0, y=0 og z=0
K,2, LENGDE
K,3, LENGDE, BREDDE
K,4, , BREDDE
K,5, , T_KJAERNE
K,6, LENGDE, , T_KJAERNE
K,7, LENGDE, BREDDE, T_KJAERNE
K,8, , BREDDE, T_KJAERNE
V,1,2,3,4,5,6,7,8 Lager volum av de 8 knutepunktene
A,1,2,3,4 Lager et bunnareal av de 4 første knutepunktene
A,5,6,7,8 Lager et toppareal av de 4 siste knutepunktene
    
```

Figur 9.20: oppbygning av skallarealer og kjernevolumet

Kapittel 9: Testanalyse av sandwichkomposittplater

Denne testanalysen benytter to elementer; SOLID45 og SHELL181. Framgangsmåten vil være en blanding mellom de to tidligere analysene. Nå lages det 8 knutepunkter som er volumet til kjernen i sandwichmaterialet. Knutepunkt 1, 2, 3 og 4 er da bunnarealet av kjernen, mens knutepunkt 5, 6, 7 og 8 vil være toppen. Se Figur 9.20 for forklaring av alle kommandoene som blir brukt til å generere volumet med topp- og bunnareal.

I arealene brukes SHELL181-elementet, og i kjernen SOLID45. Bindingen mellom disse er en usikkerhet grunnet ulikt antall frihetsgrader.

Det er viktig å gi volumet materialeegenskaper under meshingen, likt som for Testanalyse 2. I forkant av meshingen må det lages linjer mellom knutepunkter. Det er viktig at linjene danner et det samme volumet som ble laget under modelleringen. Linjene deles dermed opp sånn at de er like lange som antallet elementer som ønskes. Figur 9.21 viser hvordan hele meshingprosessen blir utført.

Som for de 2 forrige analysene, settes randbetingelser og krefter på noder. Randbetingelser for denne analysen er identisk til den som ble satt i SHELL181-analysen, mens kreftene er identisk som i SOLID45-analysen.

```
LSEL,S,LENGTH,,T_KJAERNE velger alle linjer som er like lange som platens bredde
LESIZE,ALL,,,6 deler linjene i 6 like store deler
LSEL,S,LENGTH,,BREDDE velger linjene som er like lange som bredden
LESIZE,ALL,,,10 deler disse i 10 like store deler
LSEL,S,LENGTH,,LENGDE velger linjene som er like langde som platens lengde
LESIZE,ALL,,,20 deler linjene opp i 20 like store deler

AMESH,1 lager 20 elementer i bunnarealets lengde og 10 i bredden
AMESH,6 lager 20 elementer i topparealets lengde og 10 i bredden

MAT,2 velger at neste meshing skal bruke material 2
VMESH,1 Lager 20 elementer i lengden på volumet, 10 i bredden og 6 i høyden
```

Figur 9.21: Meshing av arealer og volumet

9.4.2 Resultater

Når programkoden kjøres kan man plote nedbøyningen på midten av platen. Tabell 9.4 viser nedbøyningen ved forskjellige krefter. Denne tabellen viser også de faktiske nedbøyningene som oppsto når EKRO AS testet den samme platen.

Tabell 9.4: Nedbøyninger ved bruk av solid/shell-elementer vs. testede nedbøyninger

Kraft (N)	Nedbøyning Solid/Shell (mm)	Nedbøyning fra EKRO (mm)	Diff. (mm)	Kraft (N)	Nedbøyning Solid/Shell (mm)	Nedbøyning fra EKRO (mm)	Diff. (mm)
10	0,03	0,1	-0,07	1000	3,27	2,9	0,37
50	0,16	0,2	-0,04	1100	3,60	3,3	0,30
100	0,33	0,4	-0,07	1200	3,93	3,5	0,43
150	0,49	0,6	-0,11	1300	4,24	3,9	0,35
200	0,65	0,7	-0,05	1400	4,58	4,2	0,38
300	0,98	1	0,02	1500	4,91	4,5	0,41
400	1,31	1,3	0,01	1600	5,24	4,8	0,44
500	1,64	1,6	0,04	1700	5,56	5,3	0,26
600	1,96	1,8	0,16	1800	5,89	5,8	0,09
700	2,29	2,1	0,19	1900	6,22	6,3	-0,08
800	2,62	2,4	0,22	1950	6,38	6,7	-0,32
900	2,95	2,6	0,35	2000	6,55	7,0	-0,45

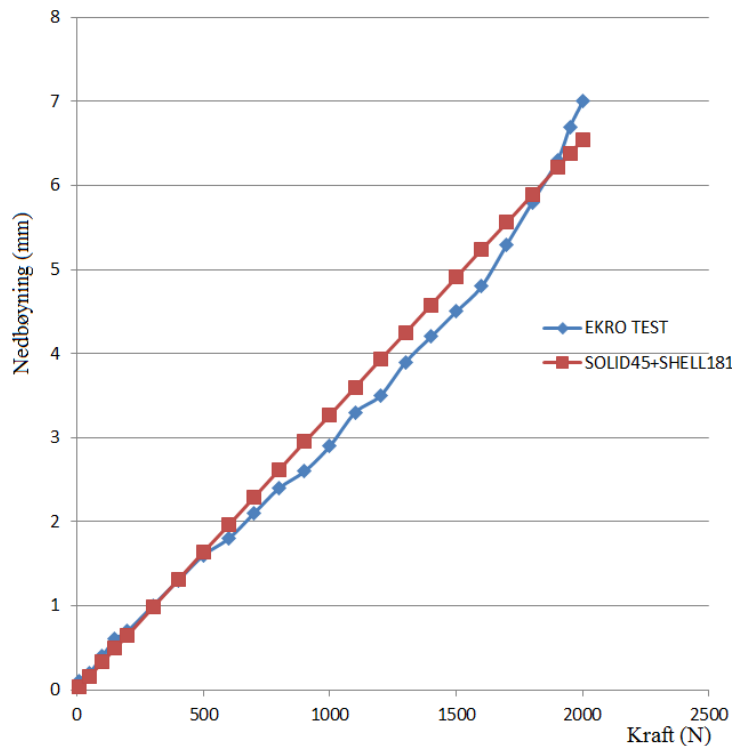
9.4.3 Diskusjon

Denne analysen er den mest konservative av de tre testanalysene. Figur 9.22 viser grafisk hvordan den i store deler av analysen har en større nedbøyning enn ved testen. Det at metoden er konservativ fører til at nedbøyninger mot slutten av analysen har et mindre avvik fra testen.

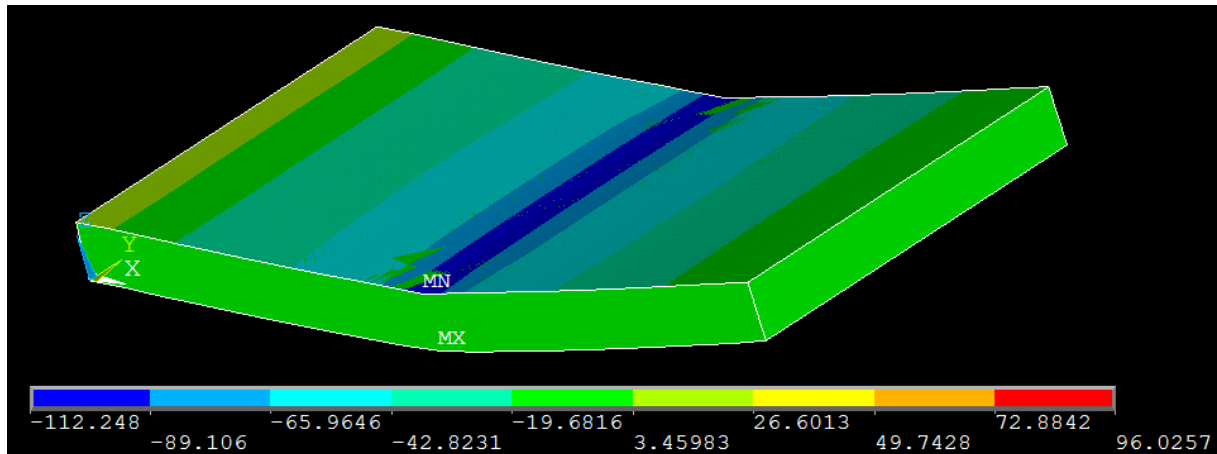
Årsaken til at denne analysen gir en noe større nedbøyning enn de to andre, er at tverrsnittsarealet blir mindre for denne analysen. Grunnen til dette er at skallarealene er festet til kjernevolumet. Når skallene blir gitt en tykkelse vil denne fordele seg likt på begge sider av arealet. Dette tar vekk til sammen 2 mm fra den virkelige tykkelsen til materialet. Analysen viser forøvrig samme tendenser som de to forestående testanalysene med tanke på nedbøyningens utvikling.

Ved bruk av to typer elementer i en og samme analyse oppnås alle fordelene med tanke på lagoppbygning og de fleste med tanke på spenninger og tøyninger i tverrsnittet. Figur 9.23 viser spenningene i x-retning, mens Figur 9.24 viser tøyningene i samme retning. Informasjonen som går tapt ved å bruke skallelementer på overflaten er minimal.

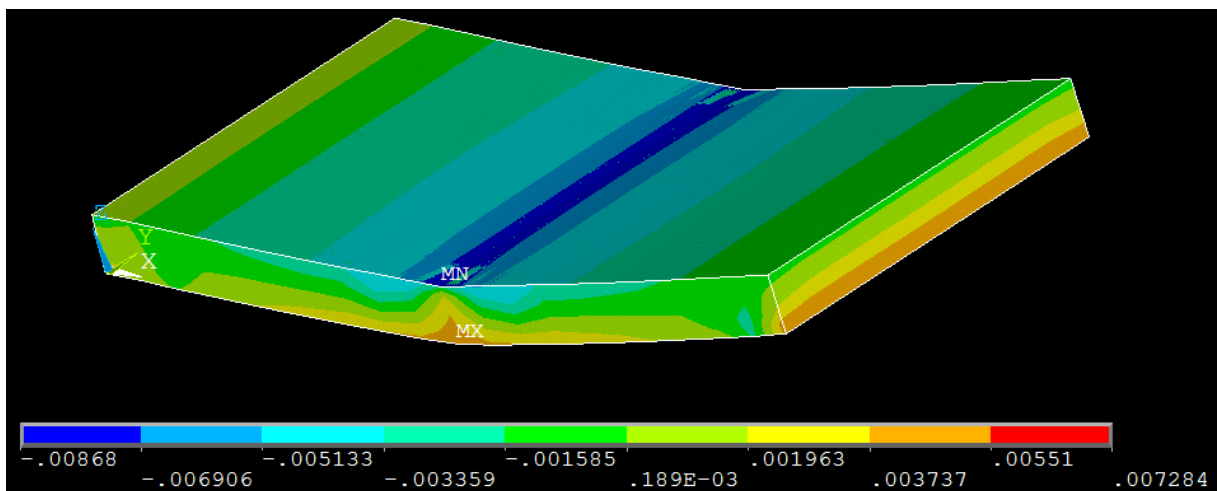
Det negative med å bruke denne metoden for å finne nedbøyninger er at den er mer komplisert enn de andre metodene.



Figur 9.22: Grafisk framstilling av resultater



Figur 9.23: Spenninger i x-retning ved last på 2000 N



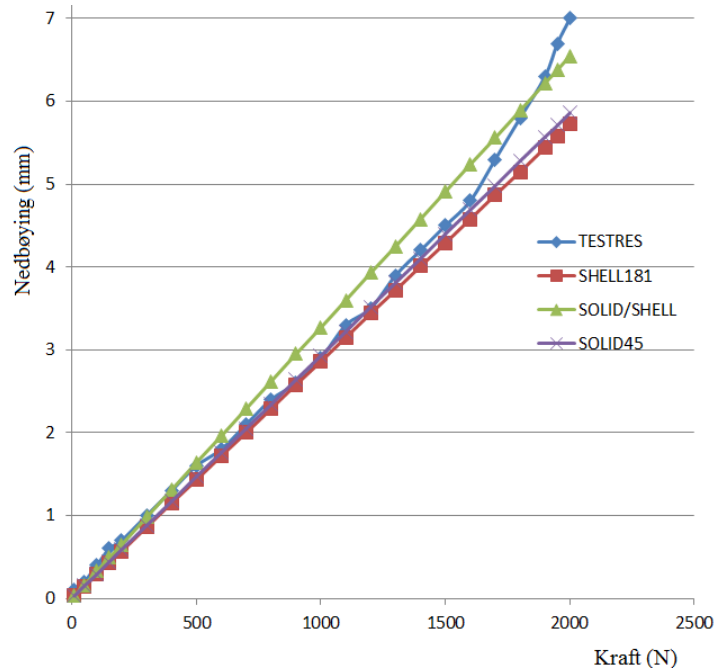
Figur 9.24: Tøyninger i x-retning ved last på 2000 N

9.5 Sammenligning av testanalyse 1, 2 og 3

I dette kapittelet skal det vurderes hvilken av testanalysene som er best egnet for å analysere sandwichkompositter.

De 3 testanalysene viste at alle elementtypene har sine fordeler og ulemper for å se på nedbøyninger av en plate. Alle testanalysene simulerer godt nedbøyningen i det lineære området. Figur 9.25 viser nedbøyningen til alle tre analysene sammenlignet med testen. Testanalyse 2 med SOLID45-elementer gir mest nøyaktige nedbøyninger. Forøvrig er differansen mellom nedbøyninger funnet ved SOLID45 og SHELL181 minimal. Kombinasjonen av SOLID45- og SHELL181-elementer gir derimot et bedre resultat rett før brudd. Det at kombinasjonen av elementene fjerner en del av tverrsnittets tykkelse kan skape svært store problemer dersom skalltykkelsen er stor sammenlignet med kjernen.

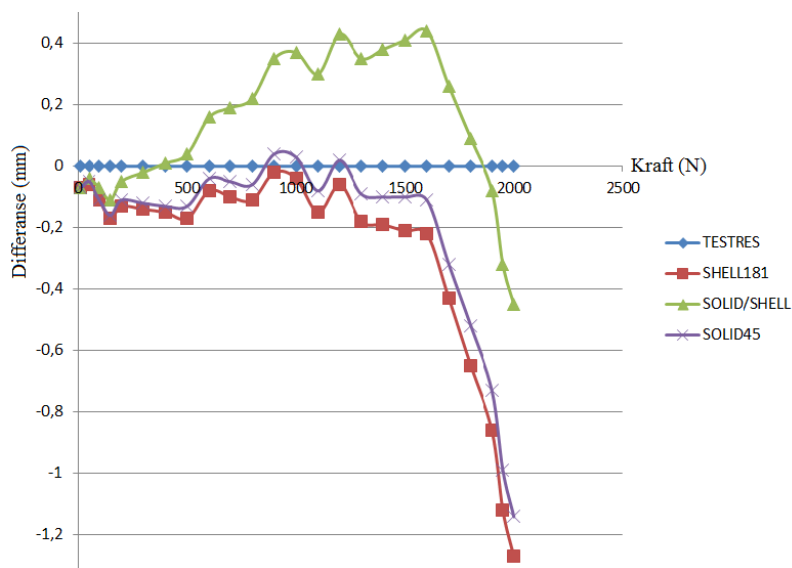
Kapittel 9: Testanalyse av sandwichkomposittplater



Figur 9.25: Analysenedbøyninger vs. testnedbøyninger

Figur 9.26 viser differansen i forhold til testresultatet for alle tre testanalysene. Optimalt burde alle grafene vært lineære fram til en kraft på 1600 N påføres. Grunnen til variasjonen i differanse er at testede nedbøyninger aldri vil være helt lineære, selv om teorier tilsier så.

Når man ser på fordelingen av spenninger og tøyninger er det Testanalyse 2 og 3 som gir mulighet for å se i platens tverrsnitt. Det at Testanalyse 1 ikke hadde mulighet til dette er en stor ulempe da det kan være problematisk å finne hvor i tverrsnittet er eventuelt brudd oppstår.



Figur 9.26: Differanse fra faktisk nedbøyning

9.6 Testanalyse 4-27

Det ble utført mange flere analyser for de 3 elementtypene. Forskjellen fra testanalysene 1, 2 og 3 er at det ble brukt nye dimensjoner for platen. Disse analysene er utført for å verifisere at ANSYS-koden er universell med hensyn til platedimensjoner.

9.6.1 Framgangsmåte

Materialeegenskapene for de 3 lagene i sandwichkompositten er identiske med tidligere. Endringene blir gjort i platens lengde og tykkelse. 24 tester ble utført i forbindelse med denne delen av rapporten. De 24 nye testanalysene nummereres som testanalyse 4 til 27. For hver nye platedimensjon er det utført 3 testanalyser hvor den første er ved bruk av SHELL181-elementer, den andre med SOLID45 og den tredje ved å kombinere disse. I Tabell 9.5 ser vi alle de nye platedimensjonene som testes.

Disse testanalysene er ikke utført like detaljert som for de første 3 testanalysene. Enkelte avvik kan derfor forekomme.

Tabell 9.5: Alle testanalyser

Testanalyse	Total tykkelse (mm)	Kjerne-tykkelse (mm)	Skall-tykkelse (mm)	Lengde (mm)	Bredde (mm)
4/5/6	12	10	1	200	100
7/8/9	12	10	1	600	100
10/11/12	12	10	1	2500	100
13/14/15	16	14	1	600	100
16/17/18	16	14	1	2500	100
19/20/21	20	18	1	200	100
22/23/24	20	18	1	600	100
25/26/27	20	18	1	2500	100

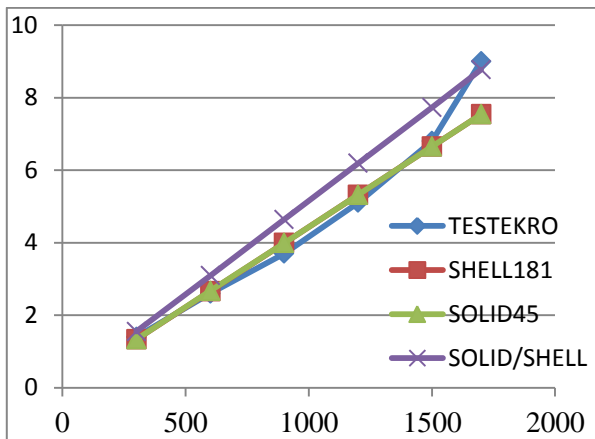
9.6.2 Resultat

Resultatet fra de 24 nye testanalysene representeres kun ved en figur per 3 testanalyser. Tabeller som viser resultatene kan dette finnes i Vedlegg VIII.

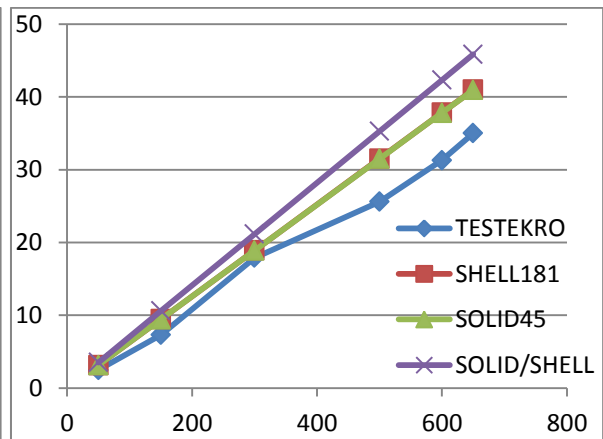
Tabell 9.6 viser i hvilken figur man finner resultatet for en spesifikk testanalyse. I disse figurene representerer y-aksen platenedbøyningen i mm, mens x-aksen viser påført kraft.

Tabell 9.6: Henvisning til resultater

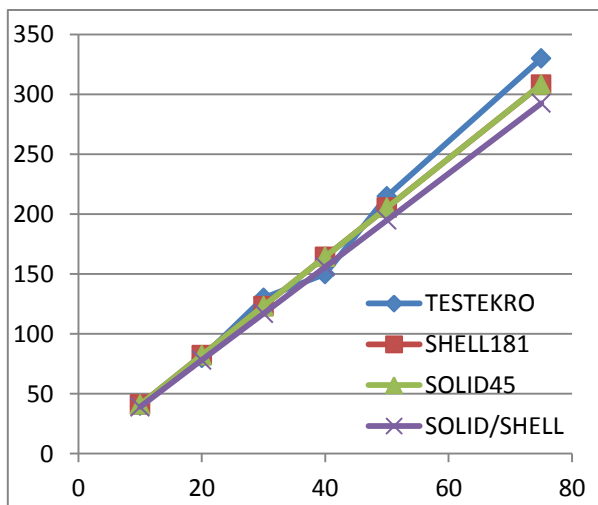
Testanalyse	Tilhørende figur
4/5/6	Figur 9.27
7/8/9	Figur 9.28
10/11/12	Figur 9.29
13/14/15	Figur 9.30
16/17/18	Figur 9.31
19/20/21	Figur 9.32
22/23/24	Figur 9.33
25/26/27	Figur 9.34



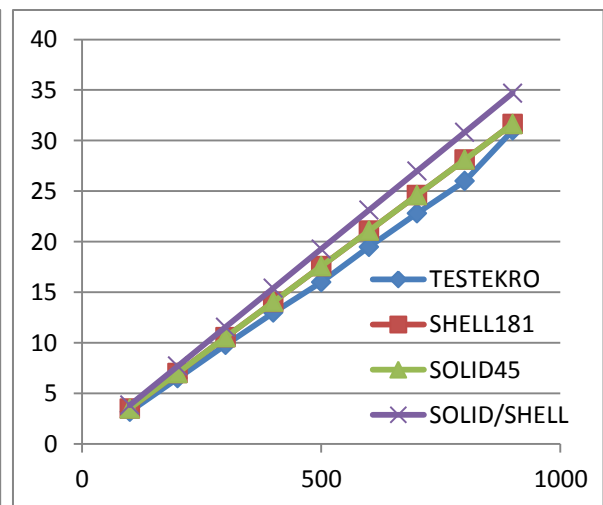
Figur 9.27: Testanalyse 4, 5 og 6



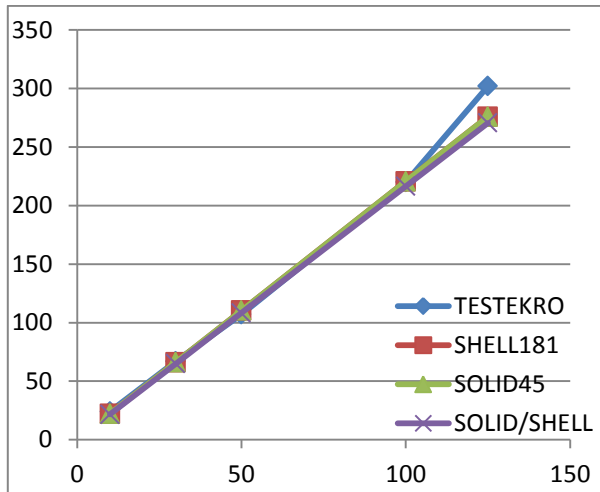
Figur 9.28: Testanalyse 7, 8 og 9



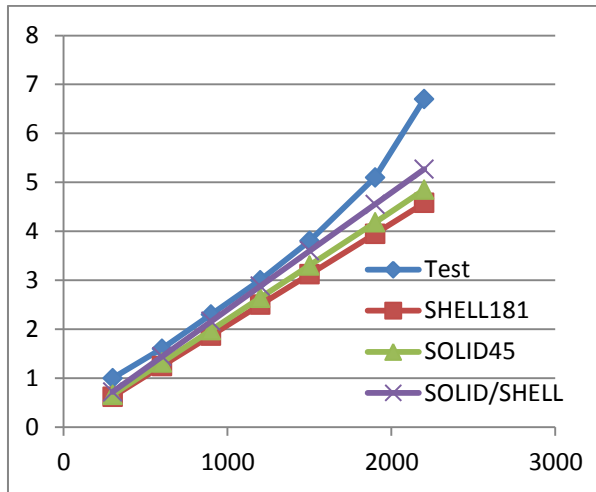
Figur 9.29: Testanalyse 10, 11 og 12



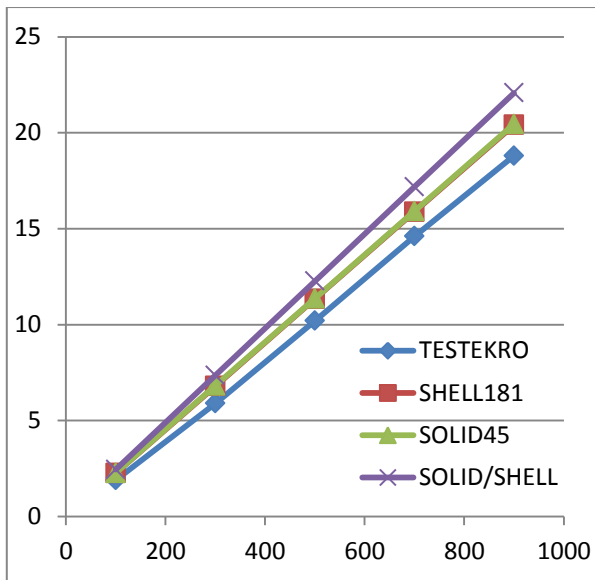
Figur 9.30: Testanalyse 13, 14 og 15



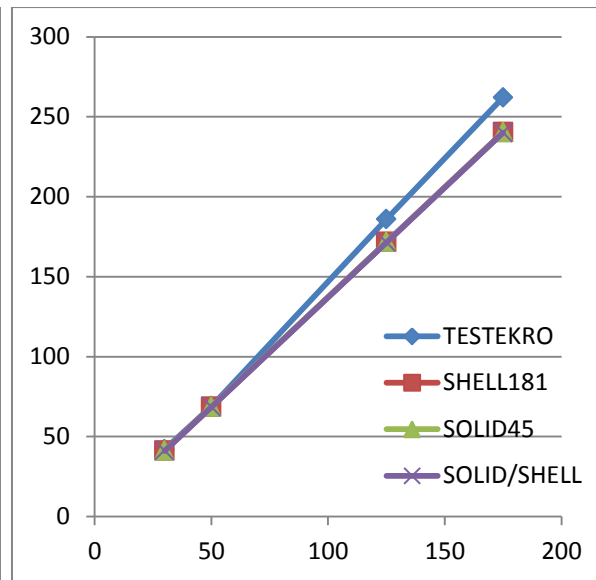
Figur 9.31: Testanalyse 16, 17 og 18



Figur 9.32: Testanalyse 19, 20 og 21



Figur 9.33: Testanalyse 22, 23 og 24



Figur 9.34: Testanalyse 25, 26 og 27

9.6.3 Diskusjon av Testanalyse 4-27

Analysene gir generelt en for stor nedbøyning for den minste platetykkelsen, og for liten nedbøyning for den tykkeste platen. Samtidig har alle analysene riktig trend i det lineære området av platens nedbøyning. At trenden er riktig, men verdien ikke er det tyder på feil med materialeegenskapene, eller bindingen mellom skallene og kjernen.

Generelt ser det ut til at avviket i prosent endres etter hvor lange platene er. Jo lengre platene er, jo mindre blir avviket i prosent. Dette kan tyde på at det er en feilkilde som er konstant tilstede, og som bidrar like mye for de lange, som for de korte platene. Dette underbygger resultater funnet i de første 3 testanalysene.

Det er verdt å merke seg at ved svært høye krefter, kan det oppstå unøyaktigheter i alle analysene. Årsakene til dette er diskutert tidligere.

Testverdiene fra EKRO AS avviker svært fra en test til neste. Testnedbøyningen er en gjennomsnittsverdi fra 5 tester. Ved å sammenligne hver test hver for seg selv, vil de analyserte nedbøyningene stemme godt overens med noen, og dårlig med andre. For de testene hvor avviket i nedbøyninger er liten, stemmer også testanalysene bedre.

Alt i alt virker trendene fra de 3 testanalysene til å stemme med hva som er funnet for disse testene. Kombinasjonen av elementene gir som tidligere en stor nedbøyning, mens elementtypene hver for seg gir tilnærmet identiske resultater i de fleste tilfeller.

9.7 Spenninger

Det finnes noen formler som kan brukes for å beregne spenninger i sandwichplater med komposittskall. Tidligere har vi sett på klassisk sandwich-teori for å finne spenninger. Da det viste seg at denne teorien fungerte dårlig for nedbøyninger, er det vanskelig å stole på eventuelle spenninger som kan finnes ved bruk av denne teorien.

EKRO AS har tipset meg om at ligningen som gir gode resultater for å finne største spenninger i topplaget i platens lengderetning er som følge:

$$\sigma = \frac{F * L}{4t_s(t_k + t_s)b}$$

Formelen er hentet fra standarden ASTM C393. I denne formelen er t_s og t_k henholdsvis skall- og kjernetykkelsen, L er platens lengde, b er platens bredde og F er påført kraft.

Spenninger i x-retning skal vurderes for 6 forskjellige plater. For alle de 6 platene skal spenninger beregnet ved hjelp av formelen ovenfor sammenlignes med spenninger funnet ved bruk av de tre elementtypene i ANSYS. Kraften platene belastes med er den samme som platene gikk til brudd med i testene utført av EKRO AS. Det interessante blir å se om alle elementtypene produserer korrekte verdier for spenninger, uavhengig av platens dimensjoner.

9.7.1 Resultat

Tabell 9.7 viser en fullstendig oversikt over spenninger funnet ved hjelp av formelen ovenfor, og spenninger funnet i ANSYS-analysen.

Tabell 9.7: Sammenligning av spenninger

Elementtype	Platens dimensjoner Tykkelse/lengde/bredde	Påført kraft (N)	Spenning funnet i ANSYS (MPa)	Spenninger funnet vha formel (MPa)
Shell181	12/200/100	1700	80	77
	12/600/100	650	91	88
	12/2500/100	75	45	43
	16/200/100	2000	67	67
	16/600/100	900	90	90
	16/2500/100	125	53	52
Solid45	12/200/100	1700	106	77
	12/600/100	650	96	88
	12/2500/100	75	45	43
	16/200/100	2000	89	67
	16/600/100	900	95	90
	16/2500/100	125	53	52
Solid/Shell	12/200/100	1700	116	77
	12/600/100	650	101	88
	12/2500/100	75	48	43
	16/200/100	2000	96	67
	16/600/100	900	99	90
	16/2500/100	125	52	52

9.7.2 Diskusjon

Ut ifra disse resultatene er det SHELL181 som gir de mest korrekte spenningene. Dette er uheldig da det ikke er mulig å se på spenninger i tverrsnittet for denne elementtypen. SOLID 45-elementet gir feil spenning når platene er 200 mm. For lengre plater ser derimot resultatet godt ut. Kombinasjonen av elementene har samme tendens.

Bruddspenningene på mellom 50 og 80 MPa er lavere enn strekkfastheten til komposittskallet. Dette betyr at brudd oppstår enten i kjernen eller limet som binder kjernen og skallene. Siden de to elementtypene som har mulighet til å se på spenninger i tverrsnittet, ikke gir gode resultater, er det vanskelig å bestemme hvor i tverrsnittet bruddet oppstår. Dette er analysemetodenes store svakhet. ANSYS-analysen gir derfor ikke et konkret svar på hvor og når en plate knekker.

Generelt ser det ut til at plater med lengde/breddeforhold på 2 får brudd i kjernen eller limet når skallspenningen er 75 MPa. Plater med forhold på 6 får brudd ved 90 MPa i skallet, mens de lengste platene med forhold på 25 får brudd ved 50 MPa.

9.8 Begrensninger for ANSYS-analyser

Hvorvidt ANSYS-kodingen fungerer ved andre randbetingelser og geometrier er en usikkerhet som ikke kan elimineres. Men siden ANSYS-analysene ikke er optimalisert for de randbetingelsene som er gitt, antas det at kodingen stemmer godt uavhengig av dette.

Kapittel 9: Testanalyse av sandwichkomposittplater

Analysemetodene kan ikke brukes til å finne ut hvor i tverrsnittet bruddet oppstår. For at dette skal være mulig må kodene utvikles videre for dette formål. Dette er noe som bør gjøres i nærmeste framtid, da det vil gi en av få fullstendige metoder for analyse av sandwichkompositter med komposittmaterialer i topp- og bunnlagene.

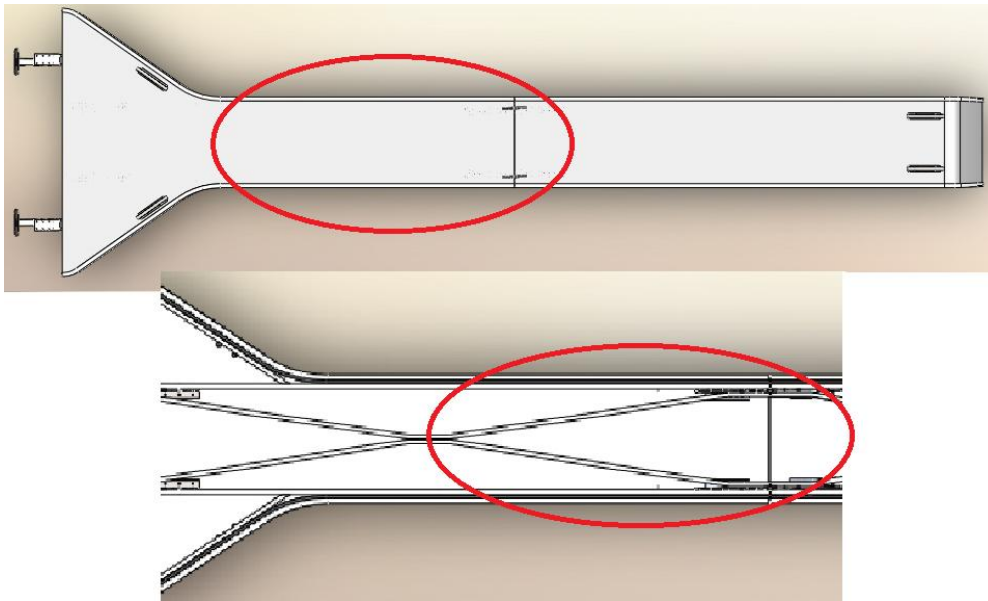
10 Analyse av utrigger

Tidligere i rapporten ble det utført en analyse av innfestingskomponentene på utriggeren. Nå skal komponenter laget av sandwichkompositt Polleo Pan analyseres. Dette kapitlet inneholder en FEM-analyse av hele utriggeren, samt en egen analyse for topplatene.

10.1 Analyse av topplater

Denne analysen viser hvor mye topplaten vil bøye seg ned når det står en person på den. Figur 10.1 viser vi hvordan topplaten holdes oppe ved hjelp av den innvendige forsterkningen og sideplatene. For å se på nedbøyningen av selve topplaten, anses forsterkningen og sideplatene som opplagere. Dermed vil fokuset kun ligge en triangulær del av topplaten. Området merket med rødt på figuren viser den triangulære delen hvor topplaten potensielt kan ha størst nedbøyning.

For denne analysen brukes det SOLID45-elementer fordi denne elementtypen er nøyaktig med hensyn til nedbøyninger av plater.



Figur 10.1: Topplate med dekkpanel og innvendig forsterkning

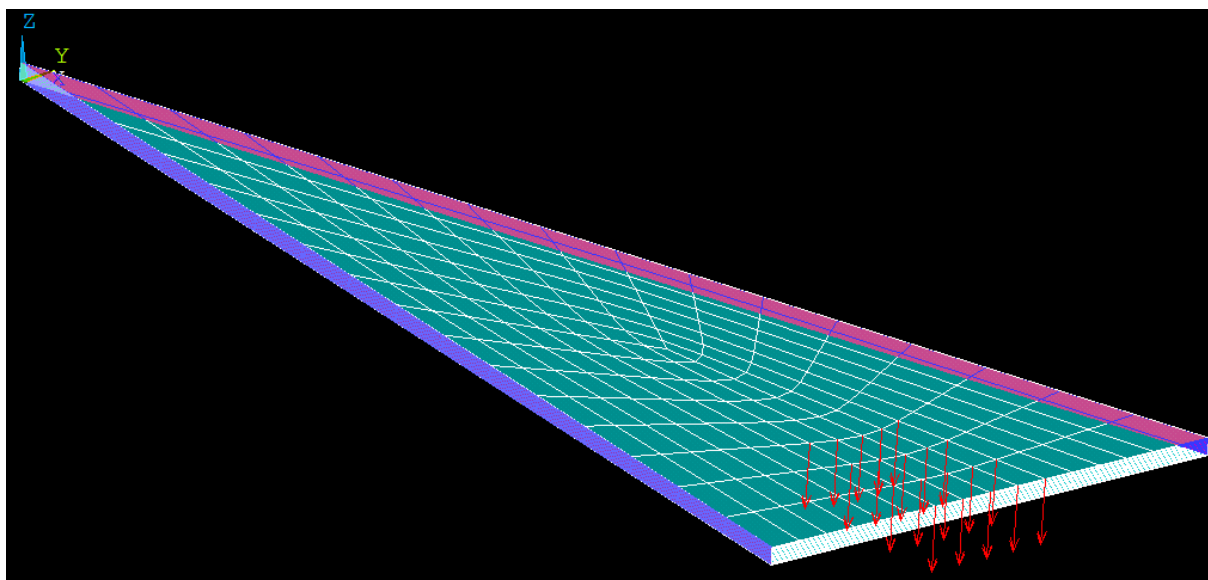
10.1.1 Framgangsmåte

Figur 10.2 viser den kritiske delen av topplaten med påført kraft. Platen er fast opplagret i alle noder på de to lengste sidene av trekanten. Nedbøyninger er mest kritisk på siden hvor platen ikke er opplagret. Valget med å ikke analysere hele topplaten, men kun en trekantet plate er gjort fordi det antas å gi tilfredsstillende resultat. Påførte krefter er merket med røde piler.

Lasten baserer seg på at det står ett menneske på et kortsiden av topplaten. Lasten regnes fra et menneske på 75 kg, og 10 kg med utstyr. Dette fører til en kraft på 1250 N inkludert sikkerhetsfaktor på 1,5. Kraften påføres på 20 noder, som utgjør ca. 15600 mm².

Forøvrig lages topplaten på identisk måte som for testanalysen hvor det ble brukt SOLID45-elementer. ANSYS-koden for hele analysen finnes i Vedlegg IX.

I koordinatsystemet er z-retningen platens tykkelse. X-aksen går langs topplatenes lengde.

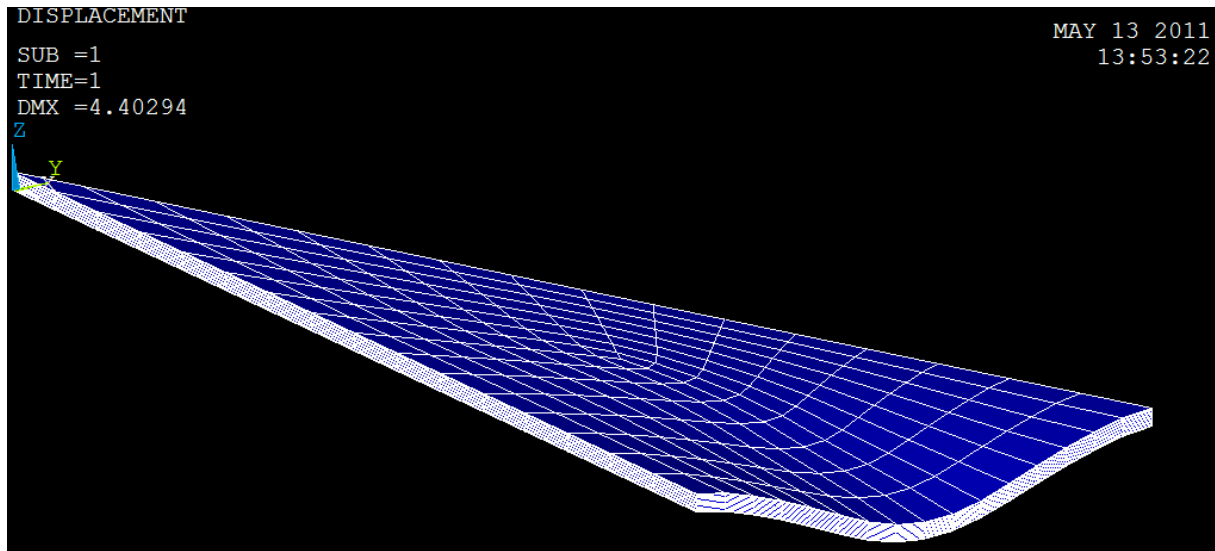


Figur 10.2: Opplager og påført kraft i ANSYS

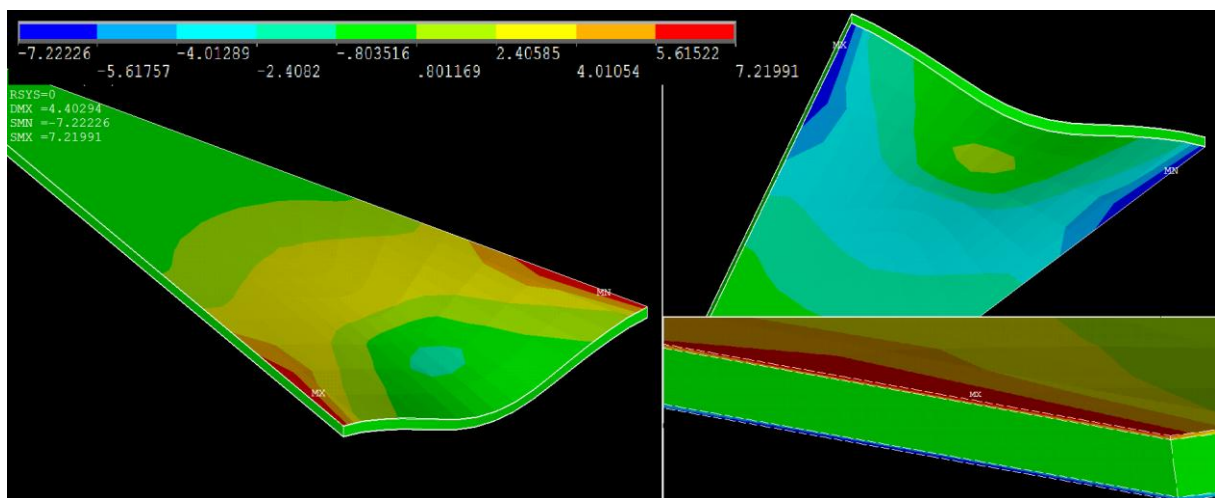
10.1.2 Resultat og diskusjon

Maksimal nedbøyningen på platen er 4,4 mm. Figur 10.3 viser hvordan nedbøyningen fordeles. Spenningene blir størst i opplageret og hvor kraften er påført.

Nedbøyningen i topplaten er så liten at det ikke vil skape problemer for bruk av utriggeren. Spenningene som oppstår i topplaten er svært små og regnes ikke som kritiske. Figur 10.4-10.6 viser fordelingen av spenninger i henholdsvis x- y- og z-retning. På figurene som tilhører spenninger, er de blå områdene kompresjon, eller negativ spenning, mens de røde er de største strekkspenningene. På figurene står det en skala som viser spenningenes størrelse. Alle spenninger er oppgitt i MPa. Maksimal spenning i x-retning blir 7,2 MPa, 21,5 MPa i y-retning, og 1,9 MPa i z-retningen. Den maksimale spenningen oppstår alltid i skallagene. Komposittskallenes stressfasthet på 300 MPa er tilstrekkelig. I kjernen er den maksimale spenningen 2,4 MPa. Dette er også innenfor materialeegenskapene til kjernen.

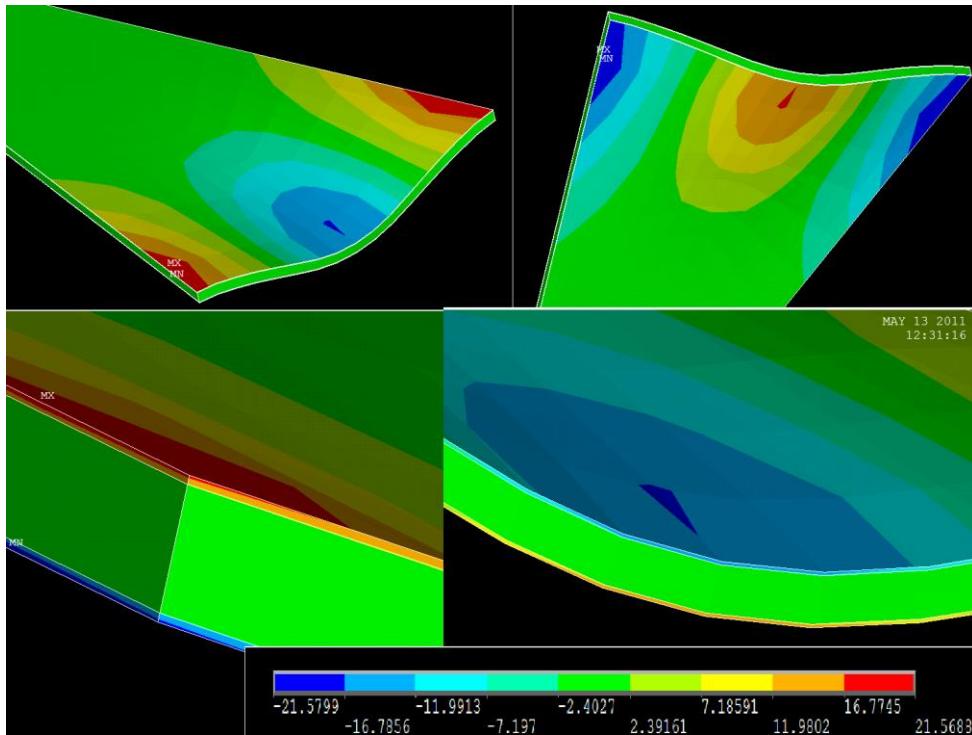


Figur 10.3: Nedbøyning av topplate

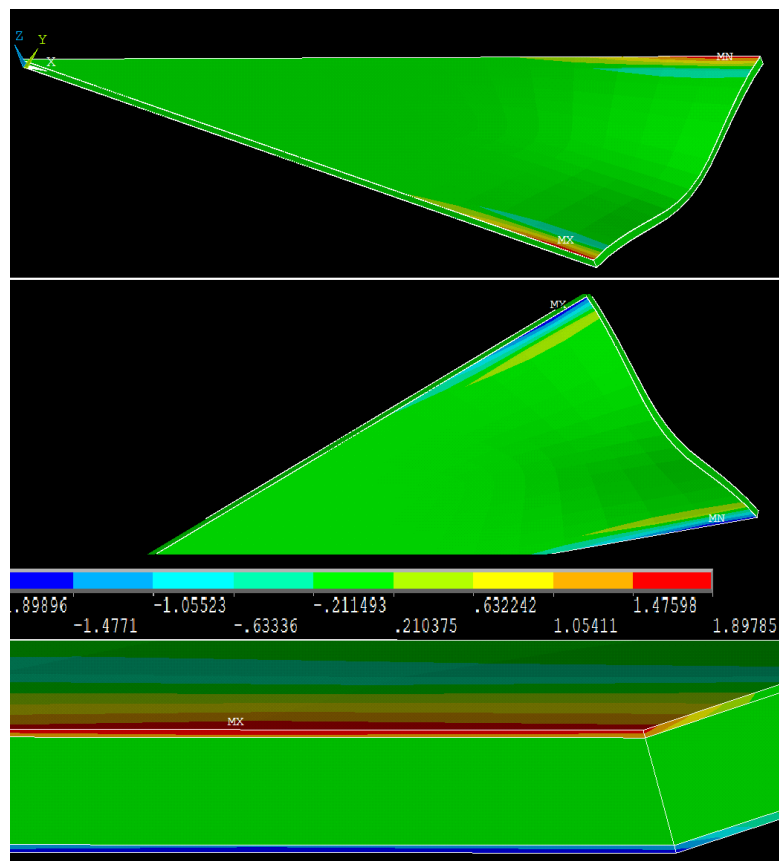


Figur 10.4: Spenninger i x-retning

Kapittel 10: Analyse av utrigger



Figur 10.5: Spenninger i y-retning



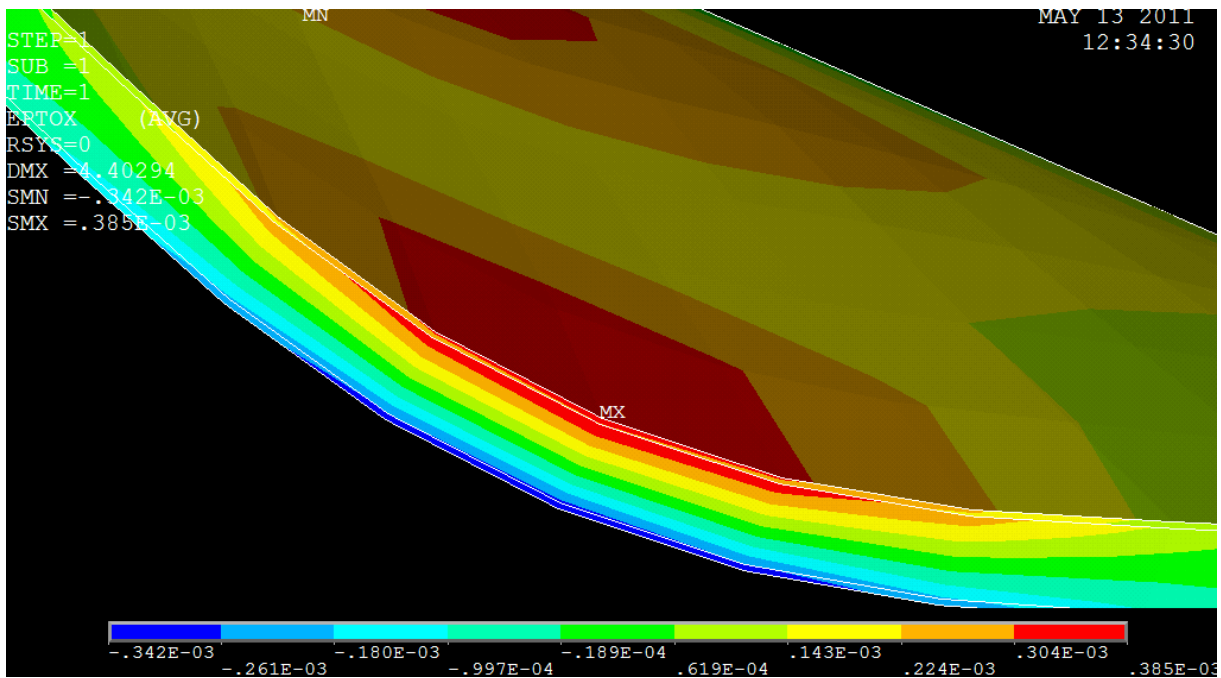
Figur 10.6: Spenninger i z-retning

Tøyningene blir, ulikt spenningsene, ikke alltid størst i komposittlagene. Kjernen har i noen retninger større tøyninger enn skallene. Vi ser tøyninger i de 3 tilhørende retningene på Figur

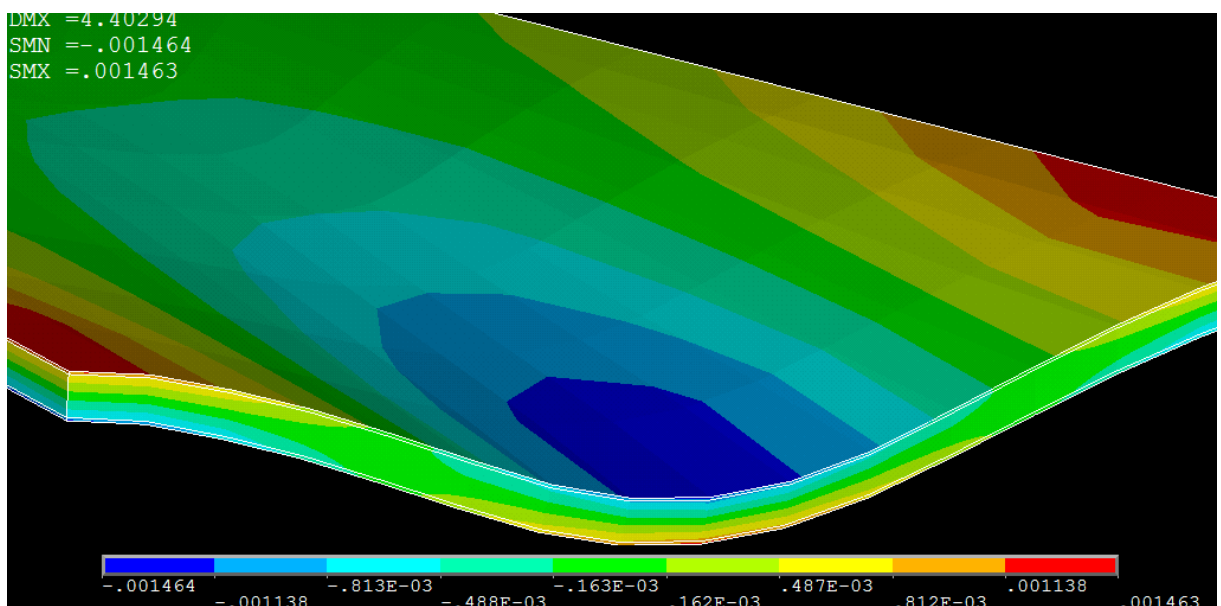
Kapittel 10: Analyse av utrigger

10.7-10.9. Tøyningen er et mål for hvor mye et materiale strekkes/komprimeres per lengdeenhet (dvs: mm/mm). I x-retningen er har tøyningene en gradvis overgang fra komposittskallet til kjernen. Dette er som forventet siden lagene er festet til hverandre. Tøyningene i y-retning viser samme tendenser. I områder hvor det er stor differanse på tøyningen i kjernen og skallet, vil det være store påkjenninger for bindemiddelet som holder disse sammen. Dette gjelder kun for tøyninger i x- og y-retning.

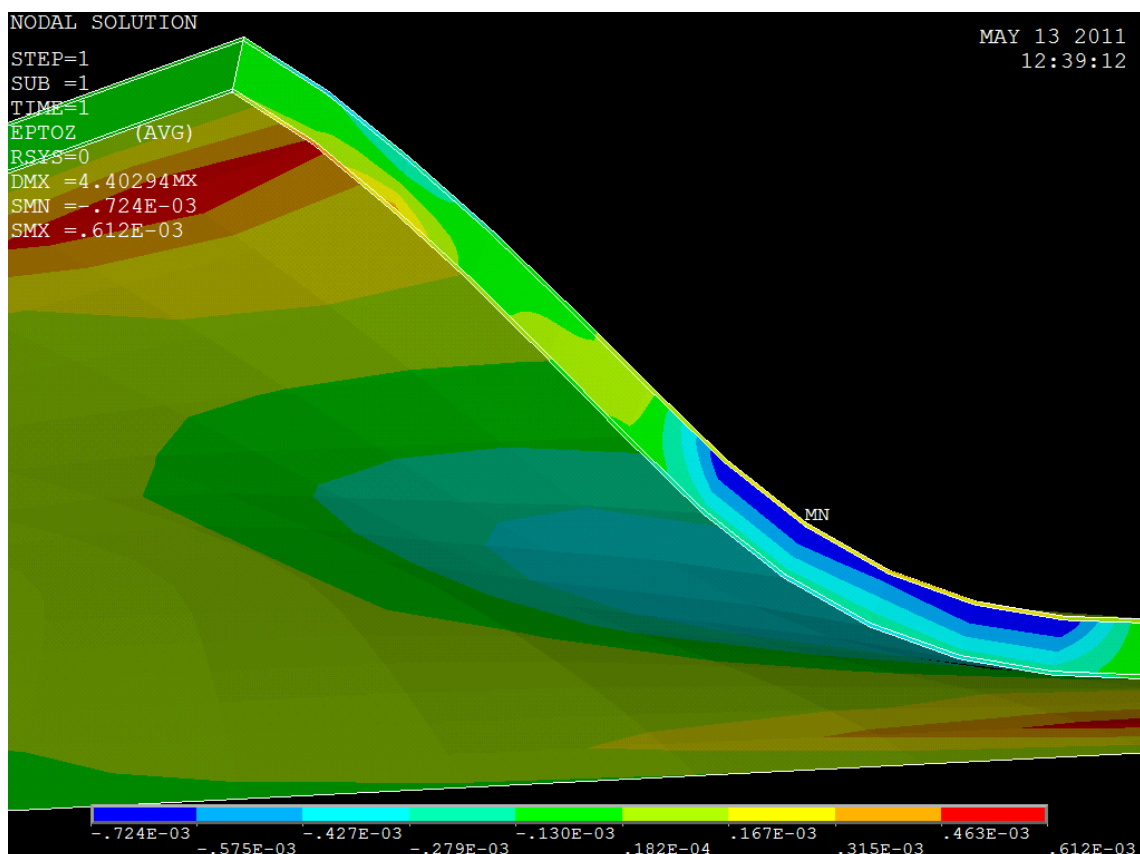
I z-retning er tøyningene størst i kjernen. I området hvor krefter er påført presser komposittskallene ned på kjernen og komprimerer kjernen. Årsaken til dette er at komposittskallene har mye høyere E-modul enn kjernematerialet.



Figur 10.7: Tøyninger i x-retning



Figur 10.8: Tøyninger i y-retning



Figur 10.9: Tøyninger i z-retning

Når alt kommer til alt ser både spenninger og faktiske nedbøyninger ut til å være innenfor materialets, og utriggerens bruksgrense. Tøyningenes verdi er vanskelig å analysere med hensyn til bruksgrensen for platen. Verdiene ser i all hovedsak ut til å være svært små. Dersom det skulle være ønskelig å bruke andre laster, eller se på andre spenningstilfeller kan dette gjøres ved å kjøre tekstfilen vedlagt den elektroniske rapporten i ANSYS. Ved å gjøre dette kan man finne maksimal brukslast på utriggerens topplate.

10.2 Spenningskonsentrasjoner for utrigger

Dette kapittelet tar for seg en analyse av hele utriggeren. For at utriggeren skal analyseres er det nødvendig med noen forenklinger av utriggerens geometri:

1. Det første er materialvalget. Alle platene antas å være laget av Polleo Pan 18 2980. Dette er en rimelig antagelse siden det kun er noe større tykkelse i topplaten grunnet antisklioverflaten. Det er mulig å kompensere for dette ved definere noe tykkere plater. Dette vil derimot føre til at tykkelsen til de andre platene blir for stor. Bidraget til stivheten fra antisklioverflaten er ukjent, men Fjeldvik ved EKRO AS mener det er marginalt.
2. I kjerven brukes ikke en avrundet overgang. Flyteelementet er heller ikke tatt med. Flyteelementet ville bidratt med en motkraft ved krefter som treffer siden på

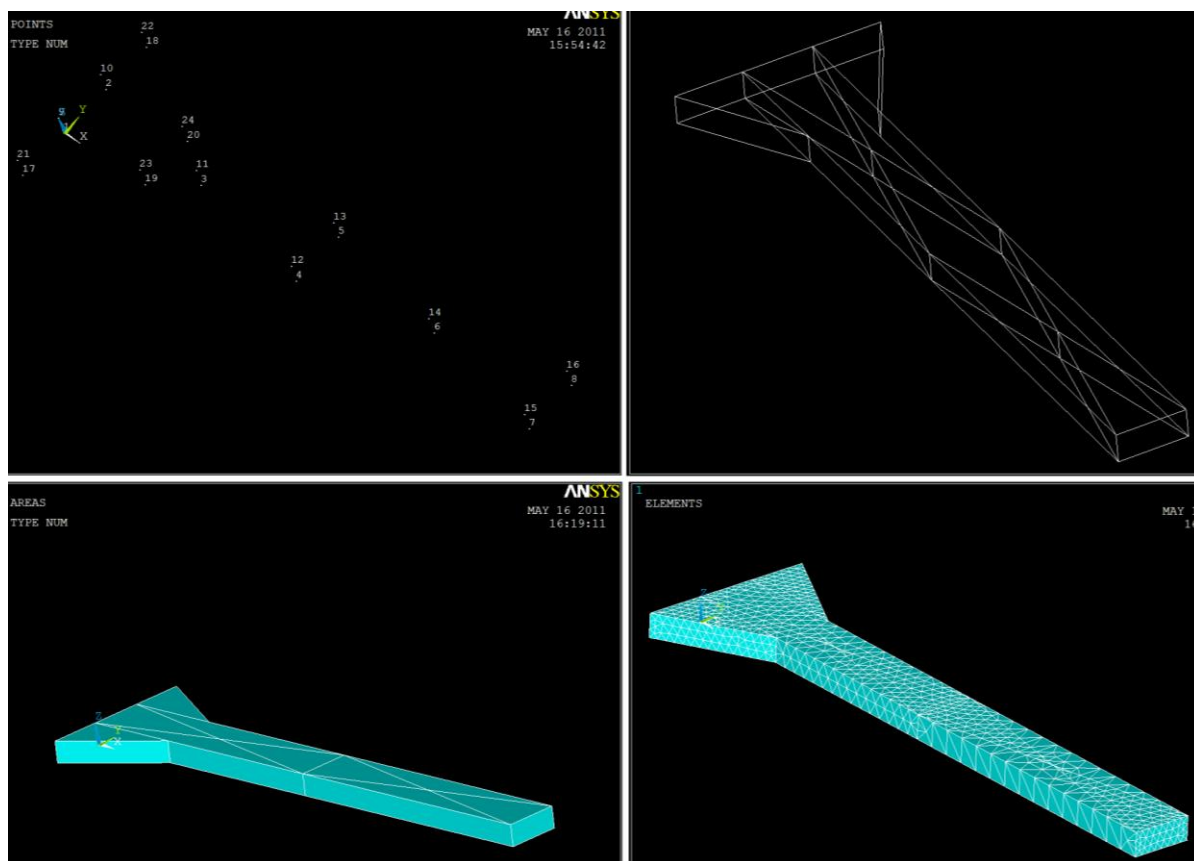
utriggeren. Den benyttede geometrien bør likevel simulere virkeligheten godt (sett bort fra punkt 3).

3. Dekkpanelene på siden er ikke tatt med. Dekkpanelene ligger utenpå sideplatene og tar sannsynligvis opp en del krefter. Dekkpanelene er laget av de tynneste Polleo Pan-platene. Ved å eliminere disse, svekkes stivheten på konstruksjonen. Det fulle omfanget av denne forenklingen er ukjent, derfor vil bli diskutert i de tilfeller hvor spenninger på sideplatene er store.

10.2.1 Framgangsmåte

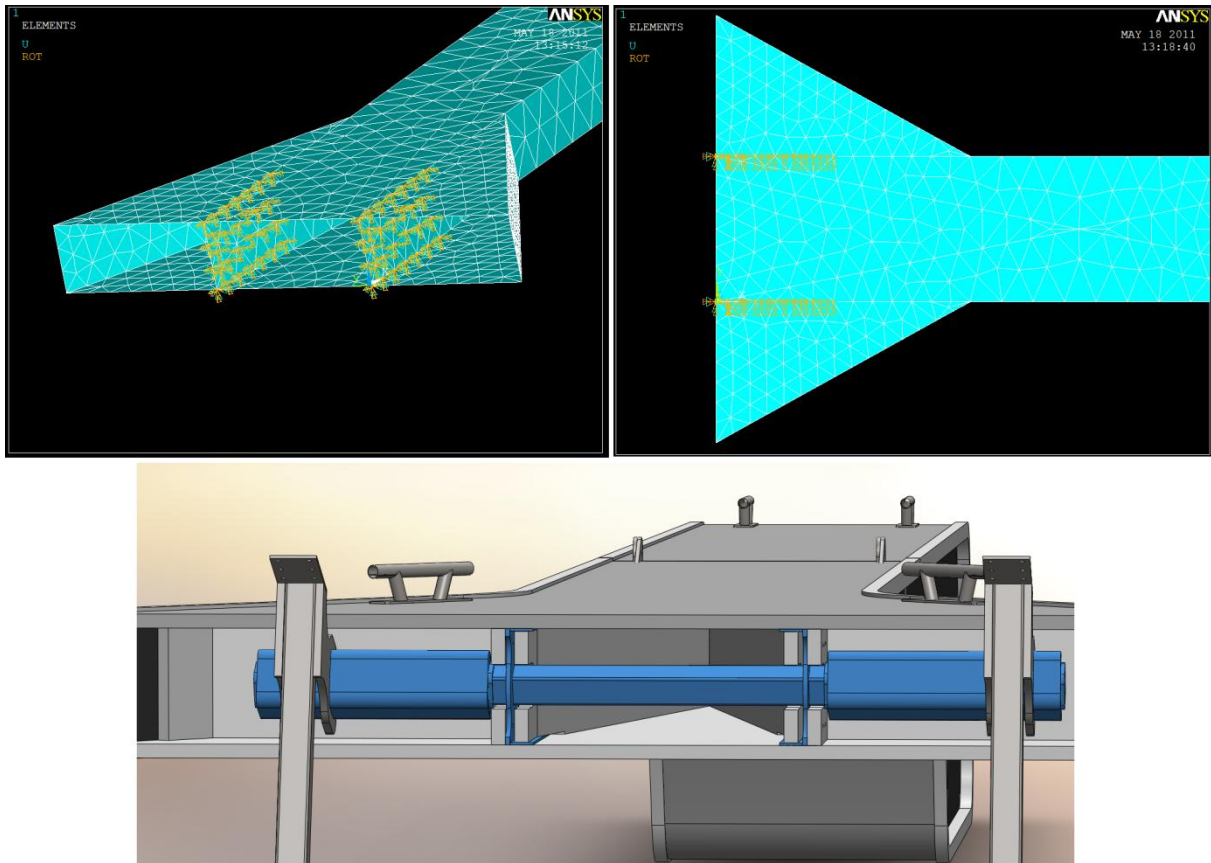
Analysen utføres ved bruk av SHELL181-elementer. Grunnen til dette er at det er enkelt å bygge opp modellen. Den store fordelene med tanke på geometrioppbygning er at det i mindre grad er nødvendig å ta hensyn til knutepunkter og noder som er felles for 2 plater i konstruksjonen. SHELL181 gir i tillegg best resultater når det gjelder spenninger, samt gode resultater for nedbøyning. Utriggeren er bygd opp av totalt 37 arealer, som alle er bygd opp på lik måte som for Testanalyse 1 i Kapittel 9.2.

Figur 10.10 viser hvordan geometrien gradvis bygges opp. Knutepunktene er bygd opp i ett grunnplan, så er det generert et nytt sett med knutepunkter i utriggerens tykkelse fra disse. Det er fra disse knutepunktene arealene som utgjør utriggerens geometri blir laget. ANSYS-koden for utriggerens geometri finnes i Vedlegg X. I koden er ikke krefter og randbetingelser satt på. På den elektroniske versjonen av rapporten ligger den fullstendige analysen vedlagt.



Figur 10.10: Knutepunkter, linjer, ferdig geometri av arealer, ferdig meshet

Kapittel 10: Analyse av utrigger



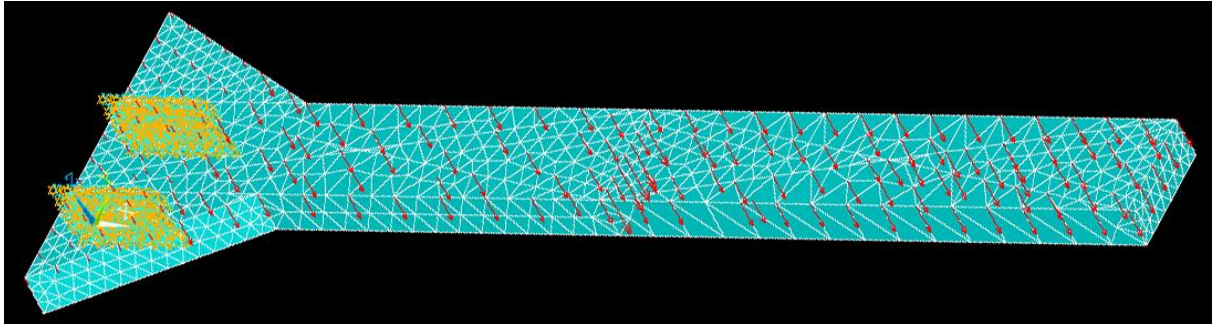
Figur 10.11: Innfesting i virkeligheten og i ANSYS

Innfestingen er ganske lik virkeligheten og er illustrert på Figur 10.11. Belastninger på utriggeren påføres ved aller verste tilfelle. Dette er når en bølgedal møter fronten av utriggeren, og en bølgetopp er på innfestingen. I Kapittel 6.2.1 ble det vist at dette oppstår ved en bølgehøyde på 0,85 meter så er ikke utriggerens flytelement i kontakt med ROSTA-leddet har da en rotasjon på $24,8^\circ$, og innfestingsmekanismen tar opp alle krefter. Siden utriggerens flytelement ikke er kontakt med vannet, ses utriggeren på som en utkrager.

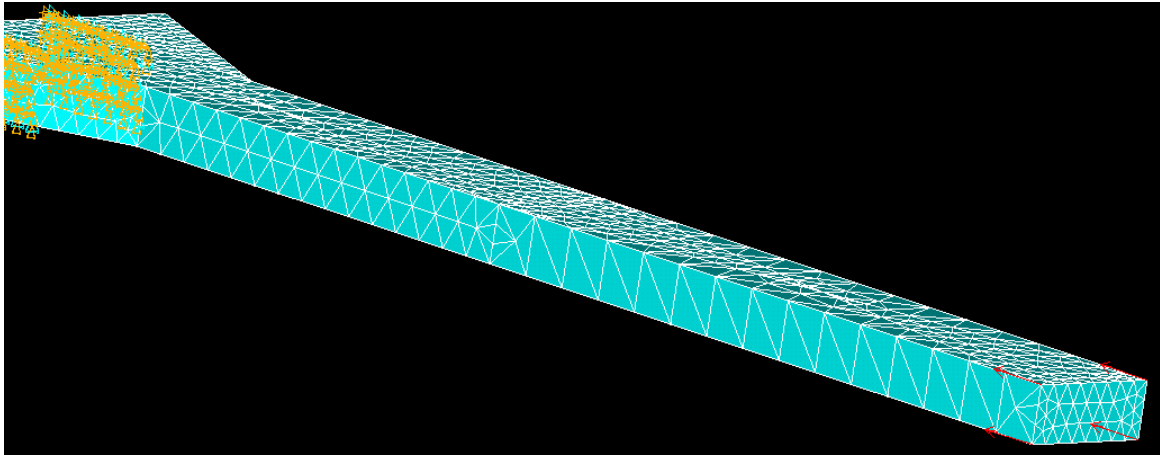
Maksimal rotasjon for ROSTA-leddet er 30° . Det er derfor rimelig å anta at utriggerens innfesting er fast innspent, uten mulighet for rotasjon om y-aksen når krefter påføres.

3 belastningstilfeller skal undersøkes:

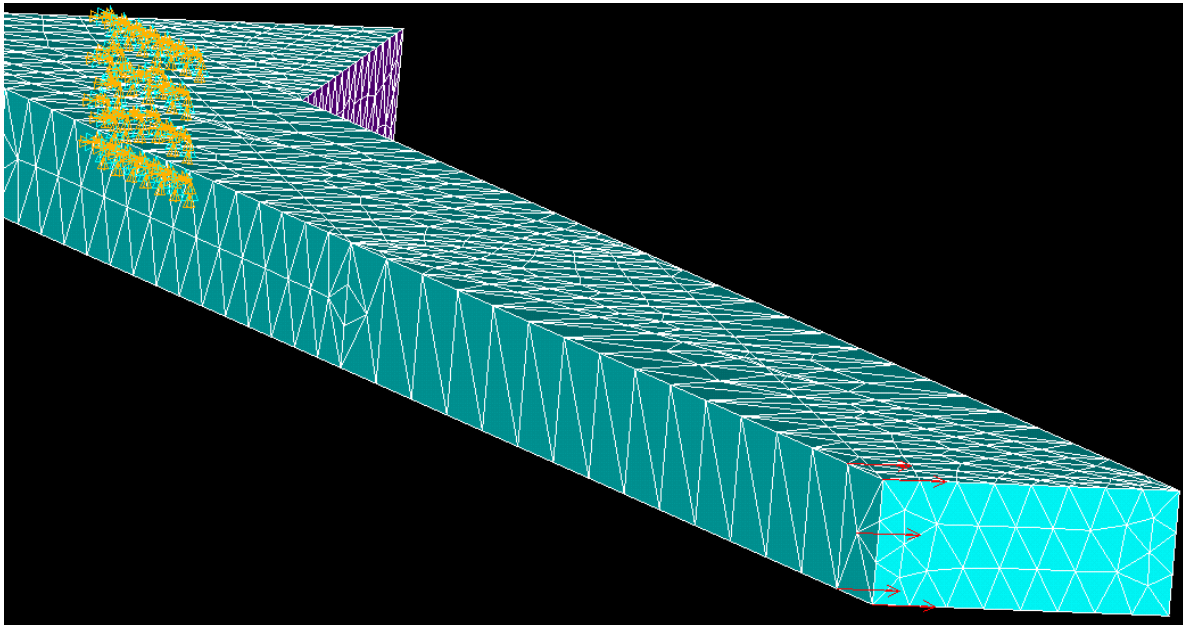
- Lasttilfelle 1: Egenvekt; se Figur 10.12
- Lasttilfelle 2: Kraft direkte på fronten(sammentrykking); se Figur 10.13
- Lasttilfelle 3: Kraft fra siden; se Figur 10.14



Figur 10.12: Lasttilfelle 1; Egenvekt



Figur 10.13: Lasttilfelle 2; Sammentrykking



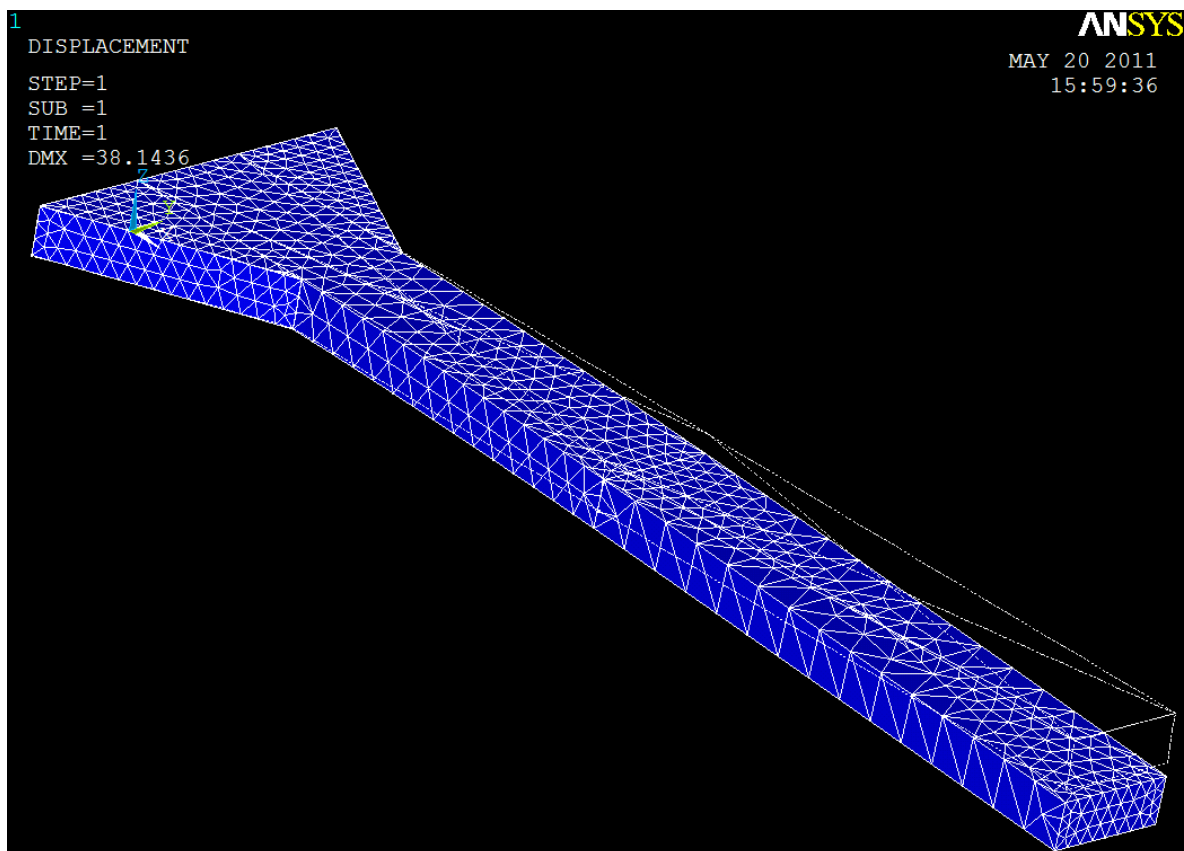
Figur 10.14: Lasttilfelle 3; Sidekraft

Egenvekten er detaljert kartlagt i Kapittel 6.1. Kraften fra siden, og på fronten er begge 12000N, som er den høyeste ulykkeslasten. Denne er fordelt på 4 noder for lasttilfelle 2, og på 5 noder for tilfelle 3.

10.2.2 Resultat og diskusjon for lasttilfelle 1

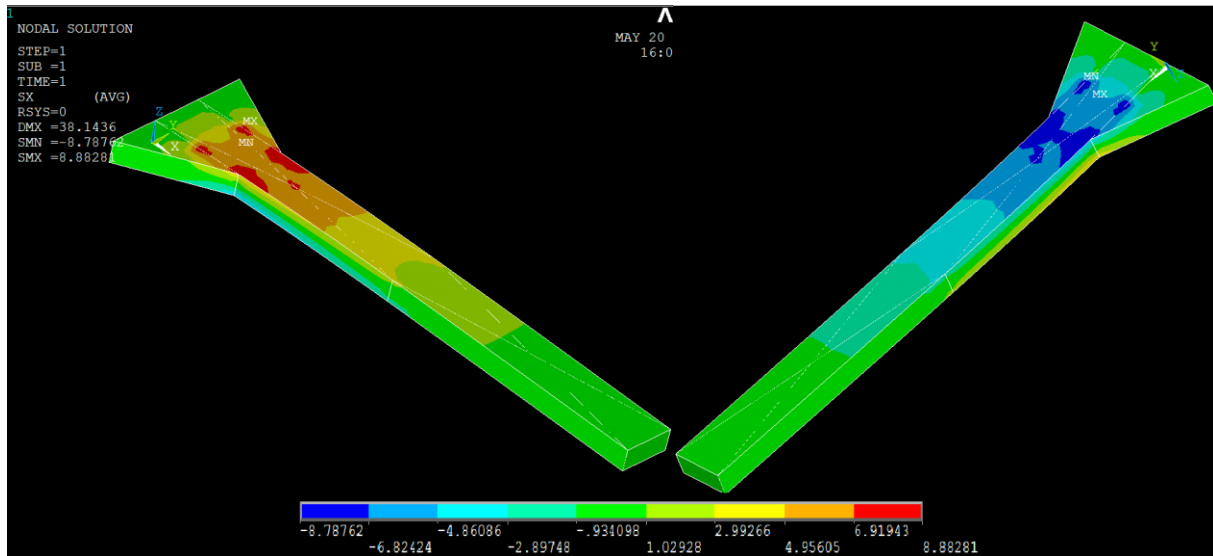
Den totale vekten av utriggeren er i underkant av 150 kg. Når bølgehøyden er stor nok, vil utriggerens flyteelement ikke være i kontakt med vannet. I dette tilfellet vil egenvekten skape en nedbøyning, samt spenninger. Figur 10.15 viser grafisk hvordan nedbøyningen ser ut ved kun egenvekt. Nedbøyninger som vises av figurer fra ANSYS er ikke i skala. Det vil si at dette kun er en veiledende figurer som forteller noe om hvor nedbøyningen er størst, og ingenting om størrelsen på nedbøyningen. Da egenvekten tross alt er lav, blir ikke nedbøyningene store. Nedbøyningen ytterst på utriggeren blir på 38 mm(i z-retning).

Nedbøyningen er liten i forhold til utriggerens lengde på over 5 meter. Det er ikke lyktes å få kontakt med Green Bay Systems for å høre om nedbøyningen stemmer overens med virkeligheten. Men ut ifra bilder av utriggeren, ser nedbøyningen korrekt ut. Når man ser på spenninger som oppstår er de størst i x-retning med en verdi på 8,9 MPa. Fordelingen av spenninger i x-retning ser vi på Figur 10.16. Her er utriggeren til venstre sett ovenfra, mens den til høyre er sett nedenfra. Dette gjelder for alle figurer videre i kapittelet, med mindre noe annet er spesifisert. Spenningene er positive på oversiden og fører til at fibre i topplaten strekkes. Spenningene på over- og undersiden er tilnærmet like, men motsatt rettet. Et eventuelt brudd i komposittskallet vil oppstå på undersiden. Årsaken er at glassfiber har bedre egenskaper i strekk enn i trykk. Når fibre blir sammentrykt kan de knekke fordi matriksmaterialet ikke holder de på plass.

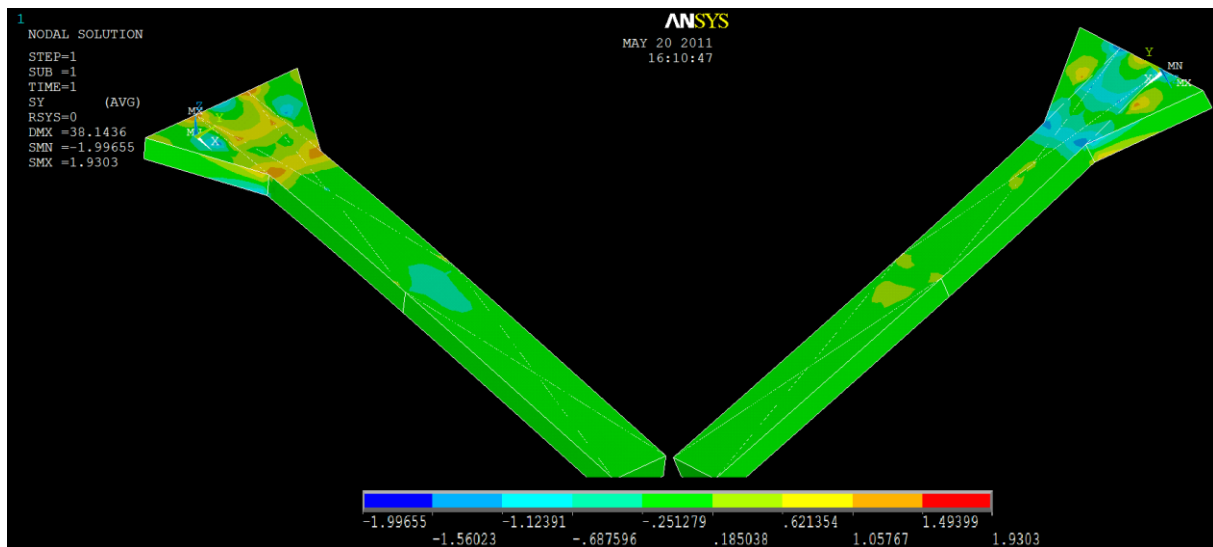


Figur 10.15: Nedbøyning av utrigger ved egenvekt

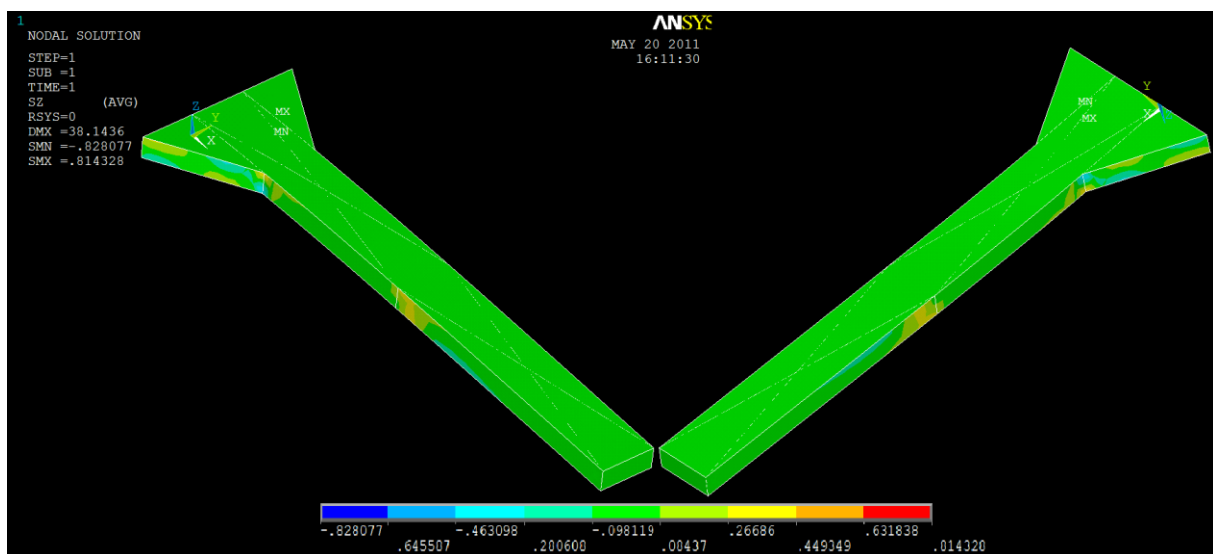
Kapittel 10: Analyse av utrigger



Figur 10.16: Spenninger i x-retning sett ovenfra og nedenfra



Figur 10.17: Spenninger i y-retning sett ovenfra og nedenfra



Figur 10.18: Spenninger i z-retning sett ovenfra og nedenfra

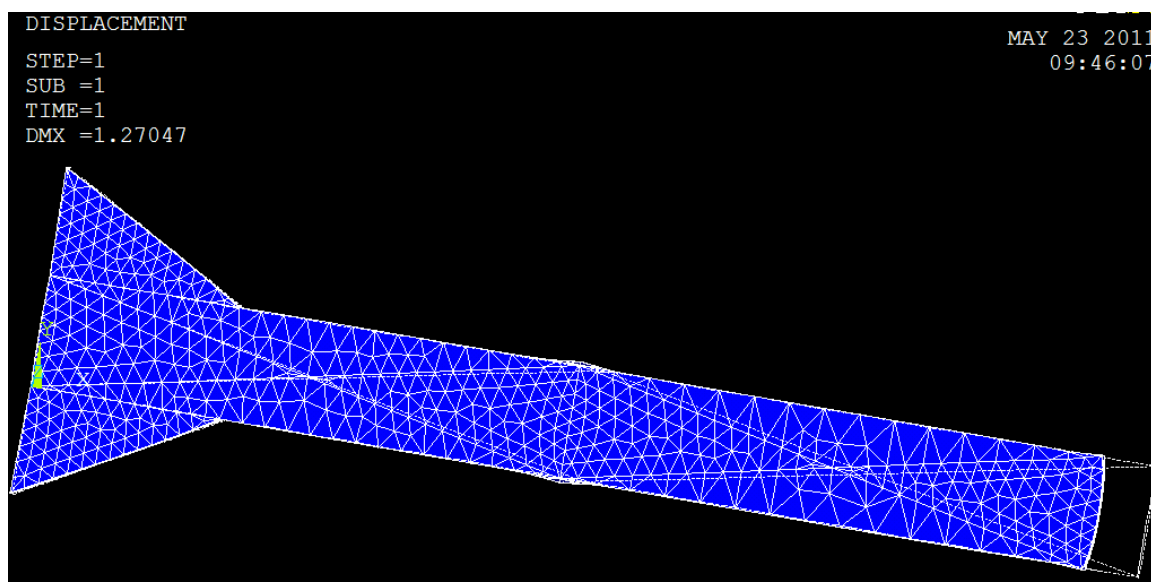
Øvrige spenninger som oppstår for dette lasttilfellet er svært små, og skyldes i stor grad at egenlasten ikke er symmetrisk påført om platens bredde. Figur 10.17 og Figur 10.18 viser spenningsfordelingen for spenninger i y- og z-retning. Spenningene er minimale i begge retninger. Spenningene i z-retningen tas opp av sideplatene, mens spenningene i y-retningen tas opp av både side-, og topp/bunn-platene.

Fra testanalysene ble det vist at plater med lengde mot breddeforhold tilsvarende topplaten knekker når spenningen er rundt 90 MPa. Maksimal spenning i forbindelse med egenvekten er rundt 9 MPa. Egenvekten skaper altså ingen problemer, selv når uttriggeren betraktes som en utkrager.

10.2.3 Resultat og diskusjon for lasttilfelle 2

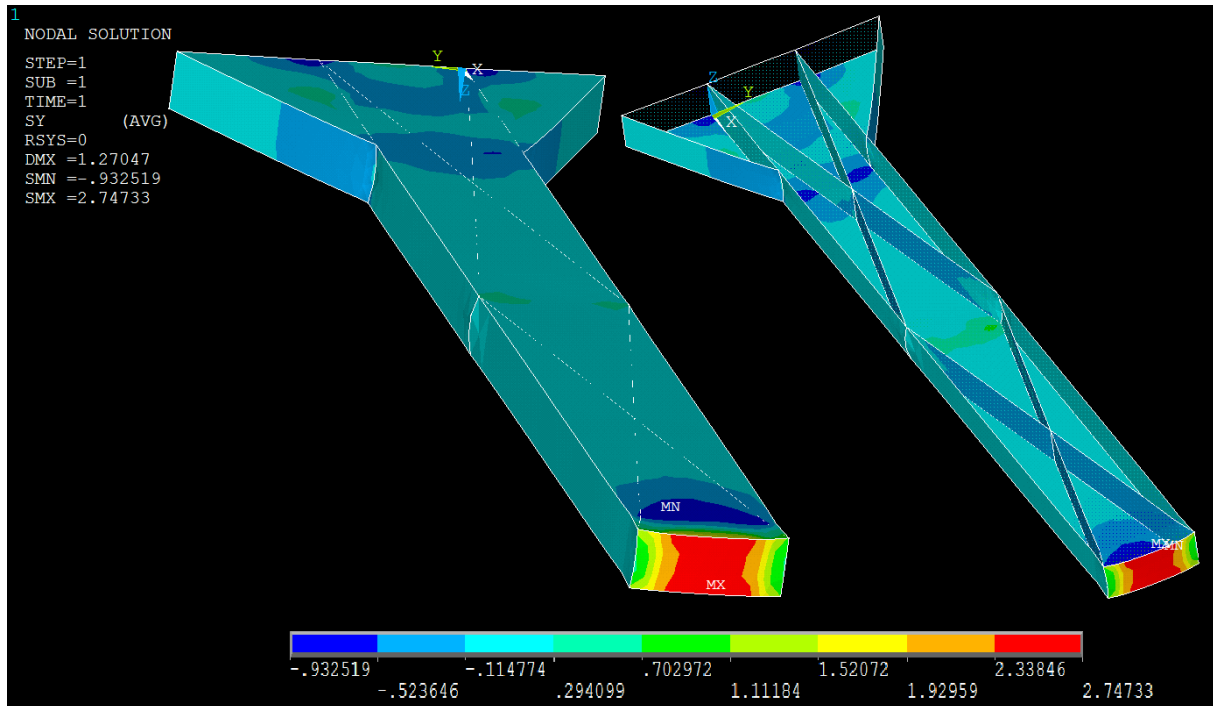
Kraften rett på tuppen av uttriggeren kan skape store problemer i midtleddet. Vi ser fra Figur 10.19 at potensielt kan oppstå store deformasjoner i nettopp midtleddet.

Den største deformasjonen som skjer for dette tilfellet er at de fire knutepunktene som ble påført krefter forflyttes 1,27 mm i negativ x-retning. Spenninger som oppstår i uttriggeren for dette lasttilfellet er svært små. Spenningene i y- og z-retning er henholdsvis 2,7 og 2 MPa på det meste. Figur 10.20 viser fordelingen av spenninger i y-retning, mens Figur 10.21 viser i z-retning. På disse figurene ser man også hvordan spenningene ser ut på forsterkningen under topplaten. Årsaken til spenningskonsentrasjonen mellom kreftene som er påført i er at de fire hjørnene hvor kraften er påført vil trykkes inn, mens topp og bunnplaten vil holde området mellom kreftene i sin opprinnelige posisjon. Dette gjelder for spenninger i x- og y-retning. Dette er på mange måter irrelevant fordi det krever at kraften blir påført på alle fire hjørner.

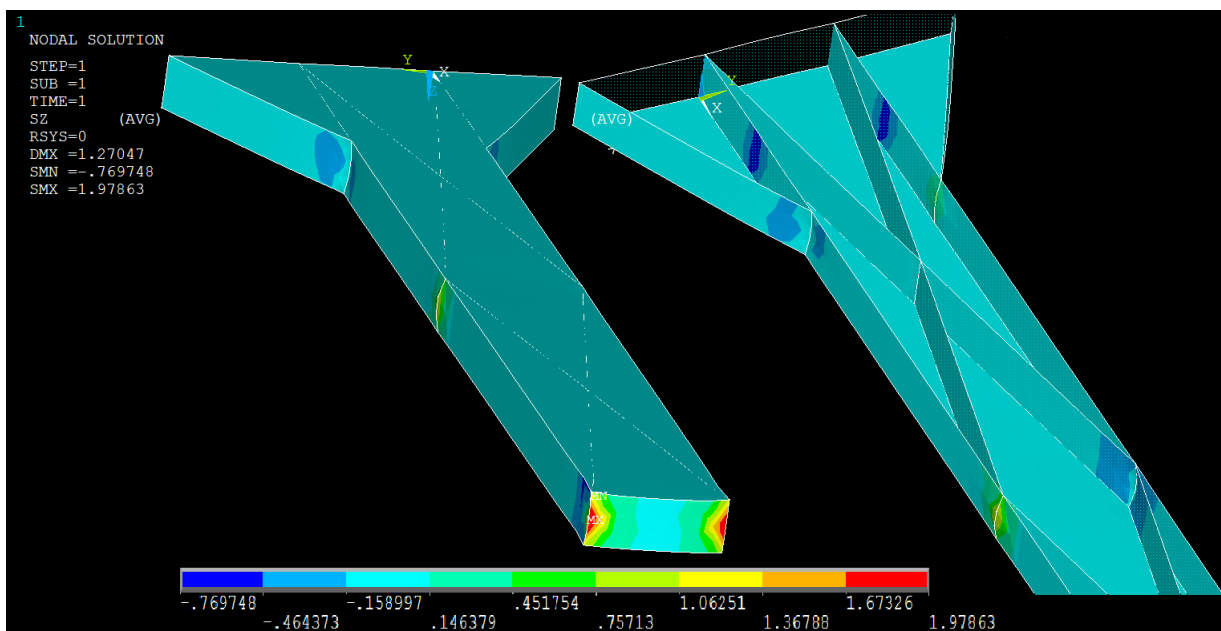


Figur 10.19: Deformasjon av utrigger ved kompresjonskraft i lengderetningen

Kapittel 10: Analyse av utrigger



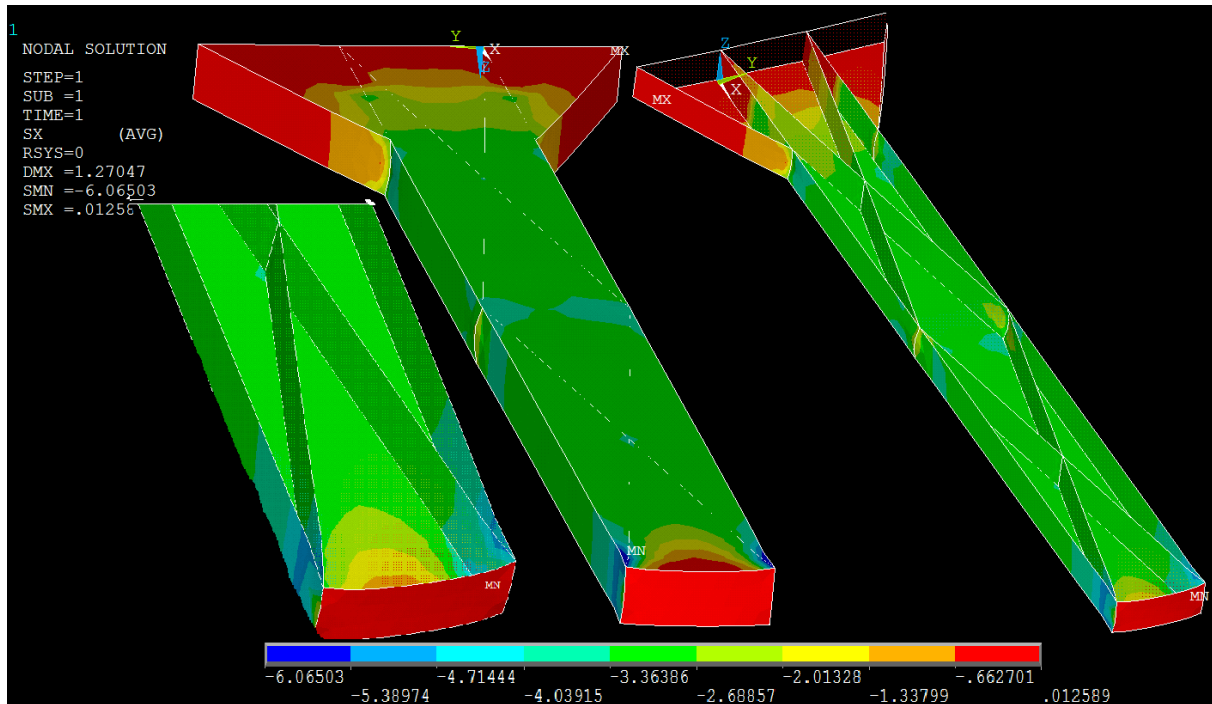
Figur 10.20: Spenninger i y-retning. Gjennomsiktig topplate til høyre



Figur 10.21: Spenninger i z-retning. Gjennomsiktig topplate til høyre

Figur 10.22 viser spenninger i x-retning. Spenningene blir størst i denne retningen. Den maksimale spenningen oppstår i kjernen på sideplaten og er på 6 MPa i kompresjon. Komposittskallene har kompresjonsfasthet på 280 MPa, mens kjernematerialets har 1,36 MPa. Skall-elementer har ikke mulighet for å se spenningen i kjernen. Men i Kapittel 9.7 ble det vist at plater med tilsvarende dimensjoner fikk brudd når skallspenningen var 80 MPa.

Alle spenninger er svært små i forhold til bruddspenninger funnet i Kapittel 9.7. Utriggeren er tilstrekkelig dimensjonert for å tåle denne lasten.

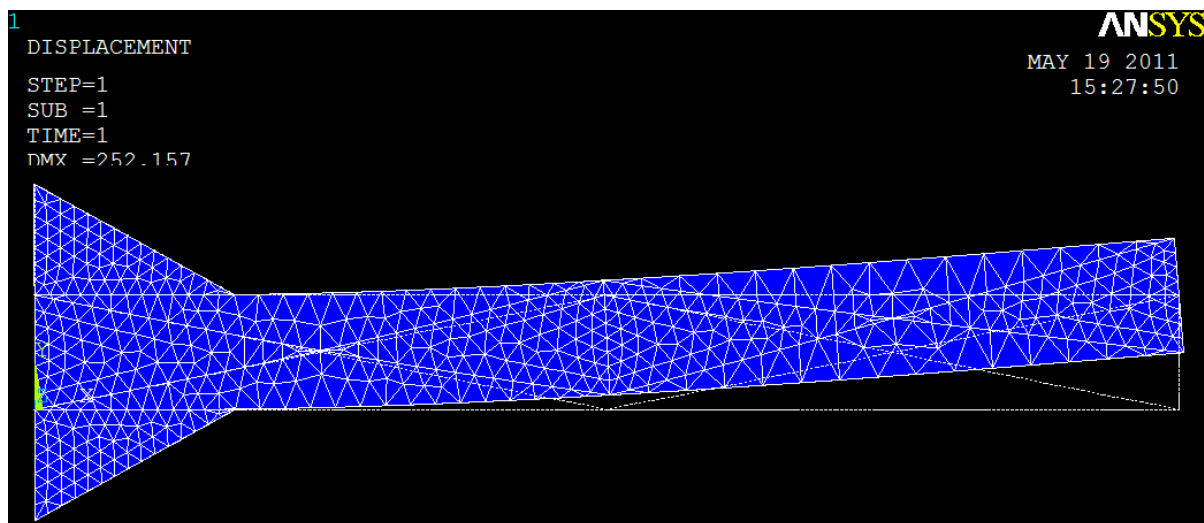


Figur 10.22: Spenninger i x-retning

Spenningskonsentrasjonen i midtleddet skyldes at platene presses mot hverandre. Polleo Pan-platene tåler denne belastningen. Det er ikke vurdert hvorvidt metallkomponentene og boltene i midtleddet gjør det.

10.2.4 Resultat og diskusjon for Lasttilfelle 3

Dette lasttilfellet gir de største spenningskonsentrasjonene. De maksimale spenningene som oppstår er høyere enn hva man forventer at platene tåler. Ved å påføre en kraft på 12000 N fra siden på utriggerens front, blir deformasjonen 252 mm. Figur 10.23 viser hvordan deformasjonen ser ut. For en konstruksjon som er over 5 meter lang, og med tanke på at motstanden fra vannet er neglisjert, er denne deformasjonen stor som forventet.



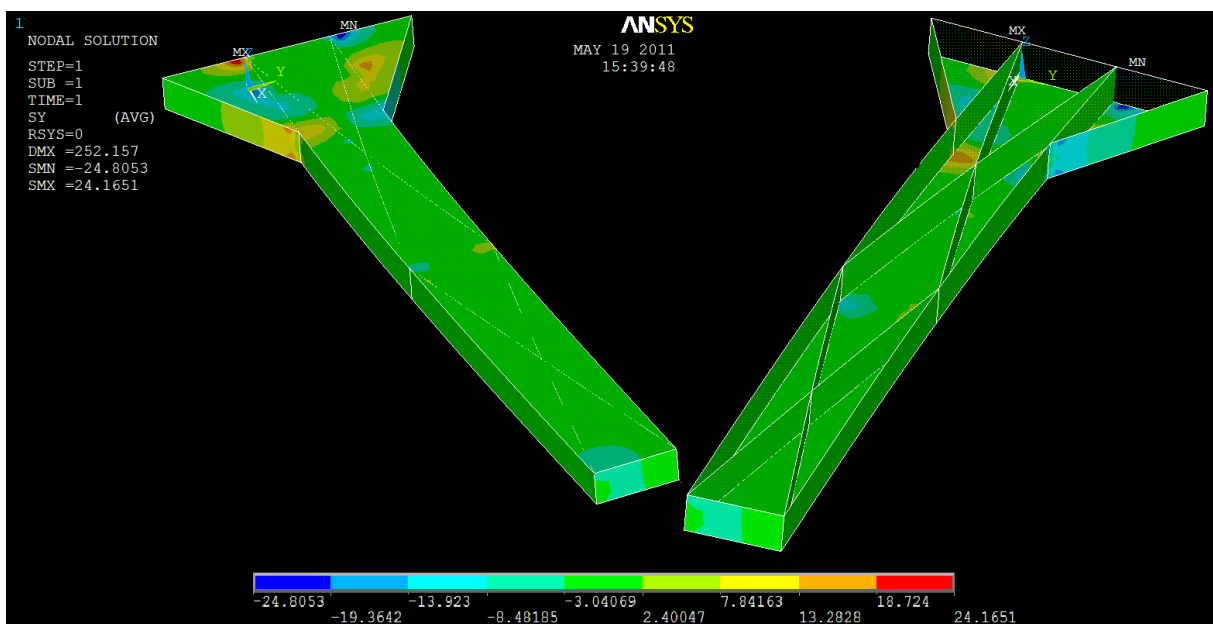
Figur 10.23: Deformasjon på 25 cm i y-retning

Kapittel 10: Analyse av utrigger

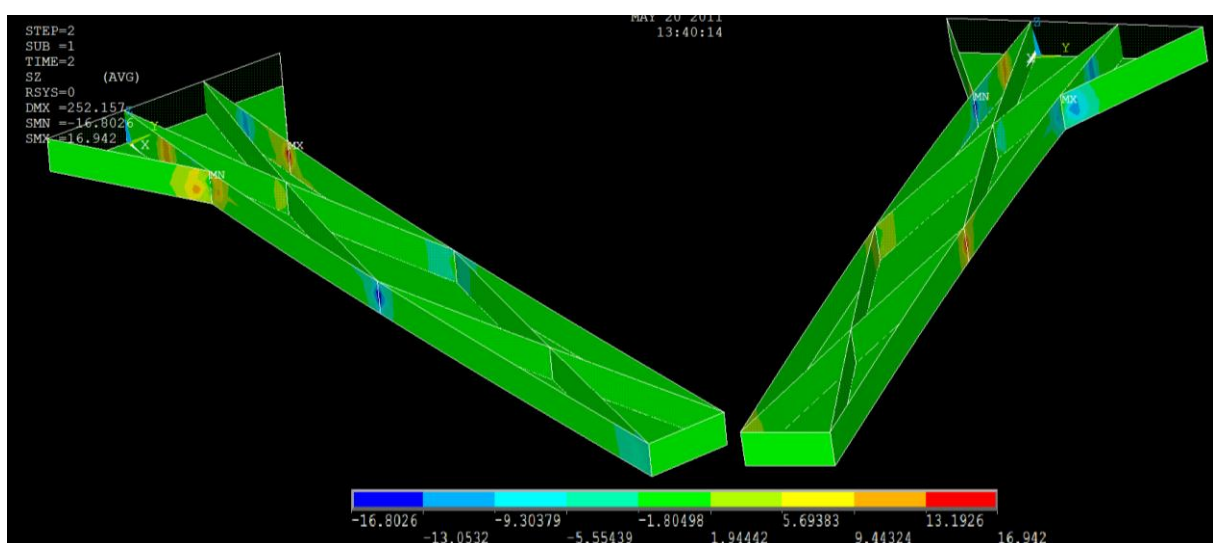
Det oppstår svært store spenninger i utriggeren ved dette lasttilfellet. Ved å sammenligne med spenningene som testanalysene knakk på, så er disse samme størrelsesorden. Spenningene blir størst i x-retning. I y- og z-retningen blir de maksimale spenningene henholdsvis 25 og 17 MPa. Dette er lavere enn forventet bruddspenning funnet i Kapittel 9.7.

Figur 10.24 viser spenningene i y-retningen for utriggeren. Høyre side av figuren viser hvordan spenningene fordeler seg med gjennomsiktig topplate. Spenningskonsentrasjonene oppstår i opplageret, kjerven, og midtleddet. Spenningene er størst i topplaten og sideplatene.

Årsaken til spenningene i y-retning ikke er større, er at kraften som er påført fordeles over de store topp- og bunnplatene. Ved innfestingen blir spenningene i y-retning størst med 25 MPa. Den maksimale spenningen på den indre forsterkningen er mindre enn 5 MPa.



Figur 10.24: Spenninger i y-retning for lasttilfelle 3

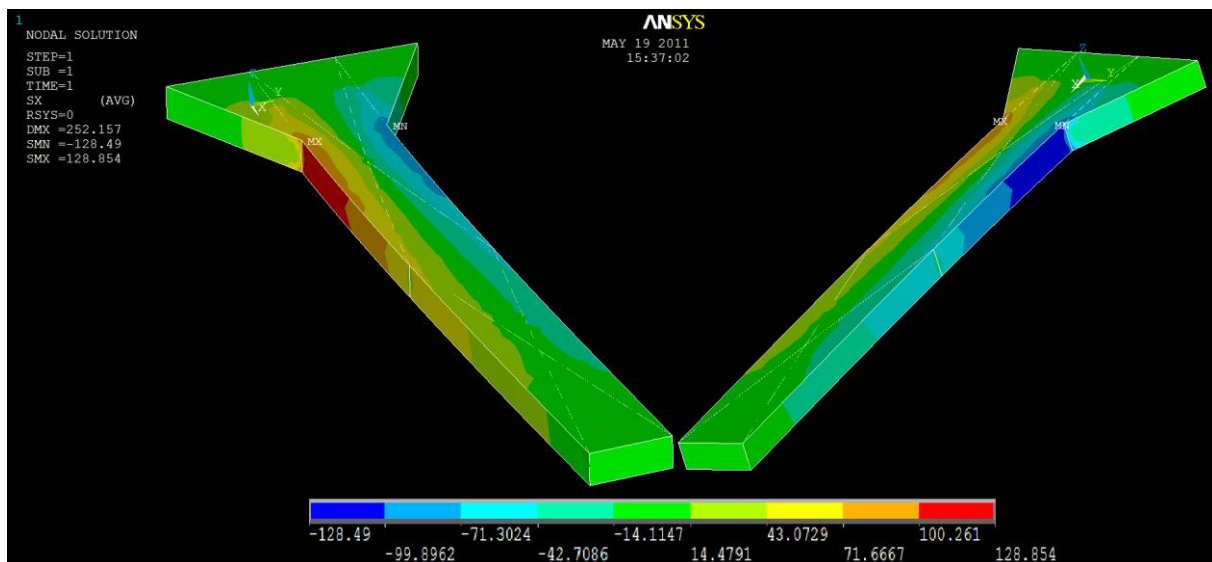


Figur 10.25: Spenninger i z-retning for lasttilfelle 3

Kapittel 10: Analyse av utrigger

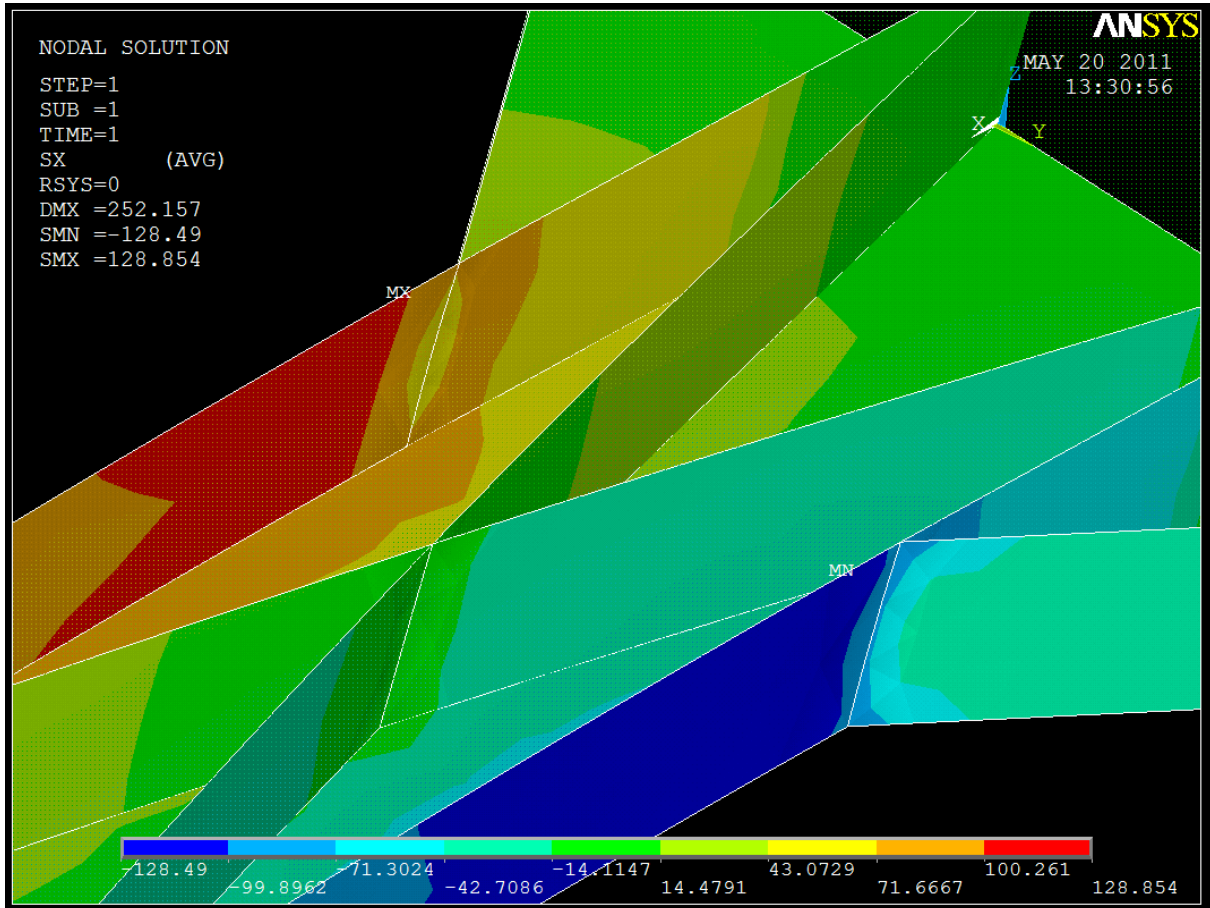
Spenningene i y og z-retning har noen felles punkter hvor de er store. Men i all hovedsak vil spenningene i x-retningen avgjøre hvor brudd eventuelt oppstår. Spenningene i x-retning er mye enklere å forutse. Figur 10.26 viser fordelingen av spenninger i x-retning. I det røde området på grafen er spenningen positiv. Det vil vi at materialet strekkes i disse områdene av utriggeren. I de blå områdene er det kompresjon. Fiberbaserte materialer tåler generelt kompresjon dårligere enn tensjon. Sideplatene vil etter all sannsynlighet ryke i det blå området. Spenning på sideplatene er i underkant av 130 MPa rett ved kjerven. Det at spenningene oppstår i et stort område rundt kjerven, tyder på at selv med avrundet kant, ville spenningene vært store i dette området. Bruddet oppstår ikke i komposittlagene da strekkfastheten er 300 MPa, og kompresjonsfastheten er 280 MPa

Plater med lengde mot breddeforhold tilsvarende sideplatene opplevde brudd ved spenninger rundt 90MPa. Påkjenningen på sideflatene er i dette tilfellet høyere, og brudd vil sannsynligvis oppstå. Det er viktig å huske at sideplatene på denne modellen er kraftig undervurdert, da det i virkeligheten er to lag med plater. Spenningen vil derfor fordeles på et større areal. Uansett er spenningene svært store, og på grensen av hva utriggeren kan tåle.



Figur 10.26: Spenninger i x-retning

Kapittel 10: Analyse av utrigger



Figur 10.27: Nærbilde av spenninger, usynlig topplate

Figur 10.27, viser hvordan spenningene ser ut dersom topplaten var usynlig. Den indre forsterkningen tar opp en god del av spenningene, men den største lastbæreren er uansett sideplatene. Dette er helt i tråd med hva man forventer av en slik konstruksjon. Den indre forsterkningen aldri høyest belastet, uansett lasttilfelle. Det er derfor mulig å bruke plater med lavere kvalitet på den indre forsterkningen

11 Konklusjon

De fleste mener komposittmaterialer har et større bruksområde enn hva vi ser i dagens industri. Etter all sannsynlighet vil det stadig dukke opp nye komposittmaterialer, og nye produkter som benytter seg av disse materialene. Sandwichkompositter er en av de nye metodene å utnytte komposittmaterialenes gode mekaniske egenskaper.

Elementanalysen av innfestingsmekanismen i uttriggeren viste at den er godt dimensjonert. Skruene brukt til å feste uttriggeren til bryggen er overdimensjonert dersom M6 skruer i kvalitet 8.8 brukes. Beregninger viste at det totalt er nødvendig med 4 skruer i denne kvaliteten. Siden den virkelige skruerkvaliteten og størrelsen er ukjent, bør det gjøres en tilsvarende analyse med gjeldende verdier

I rapporten er det lagt stor vekt på mulige beregningsmetoder på et sandwichmateriale som bruker komposittmaterialer i skallene. Det som kalles klassisk sandwichteori viste seg å ikke fungere godt for å finne nedbøyninger av plater. Med en kraft på 1100 N, ble avvik fra virkelig nedbøyning 30%. Dette gjelder for en plate med dimensjoner 200x100mm og totaltykkelse på 16 mm. Mye tyder på at årsaken til at metoden ikke fungerer er neglisjering av bøyestivheten til kjernen og at komposittskallene antas å være isotropiske.

Per i dag er det enklere og raskere å teste sandwichkomposittmaterialer, framfor å gjøre detaljerte analyser. I rapporten er det fokusert på hvordan man ved hjelp av ANSYS kan utføre detaljerte analyser. Det viktigste for resultatet i en ANSYS-analyse er hvilken elementtype som brukes. SHELL181-elementet gir de mest nøyaktige spenningsverdiene. Ved bruk av dette elementet kan man derimot ikke se på spenninger i materialets tverrsnitt. Det kan man gjøre ved å bruke SOLID45-elementer, eller ved å kombinere SHELL181 og SOLID45-elementer. Både SOLID45-elementet, og kombinasjonen av elementer gir korrekte spenninger på lange plater, men svært unøyaktig for korte.

Kombinasjonen av de nevnte elementtypene er en uvanlig metode som kun kan brukes for sandwichmaterialer, og ikke vanlige komposittmaterialer. Metoden baserer seg på å bruke SOLID45-elementer i kjernen som er isotropisk, og SHELL181-elementer i skallene som er av kompositt. Metoden er krevende å bruke. Den enkleste elementtypen er å bruke SHELL181. Dette er også den elementtypen som er anbefalt i ANSYS-hjelpefil for sandwichkompositter og vanlige komposittmaterialer.

Når det kommer til nedbøyninger gir SOLID45 og SHELL181 nesten identiske, og svært gode resultater. Kombinasjonen av disse gir høyere nedbøyning grunnet at tverrsnittsarealet blir mindre enn hva det burde. Alle elementtypene gir feil nedbøyninger rett før brudd. Årsaken til dette er at analysen ikke har feilkriterer. I virkeligheten mister enkelte komponenter i sandwich sin styrke og skaper en ekstra stor nedbøyning rett før brudd.

Etter at det ble kartlagt hvordan man kan bruke ANSYS for å beregne sandwichkompositter, og hvilke elementer som gir best resultat, ble uttriggeren fra Green Bay Systems analysert. Det

Kapittel 11: Konklusjon

mest vesentlige i forkant av analysen av uttriggeren er at den ses på som en utkrager. Grunnen er at det vil være verste mulige tilfelle som kan oppstå. Krefter påført fra siden på fronten skaper de største spenningene i uttriggeren. Ved en kraft på 12000 N er det svært sannsynlig at det oppstår brudd ved kjerven på uttriggeren.

På indre forsterkningen i uttriggeren blir spenningene mindre enn for sideplatene og topplaten uavhengig av hvordan krefter blir påført. Det kan derfor være mulig å bruke en lavere kvalitet på forsterkningen.

For best mulig utnyttelse av denne rapporten anbefaler jeg at Universitetet I Stavanger gjør mer forskning på hvordan man kan finne riktige skjærspenninger i sandwichkompositter. Når dette blir funnet, er det kort vei for å finne ut hvor og når et eventuelt brudd i materialet oppstår. Når dette er løst har man på mange måter en fullstendig metode for analyse for disse materialene.

Når det kommer til analysen av uttriggeren er det nødvendig å finne ut mer om sveise og bolteforbindelsene. Dette kan være svake punkt i konstruksjonen. Også metallkomponenter i midtleddet bør analyseres med krefter som er oppgitt i denne rapporten.

Litteraturliste

- [1] <http://www.cramster.com> 26.05.11
- [2] <http://www.greenbay-systems.no> 18.02.11
- [3] Røisæth, M. M., Torp, A. K., og Hermansen A. L. (2009), *Styrkeberegning av sandwichpanel*, Høgskolen i Telemark, Norge
- [4] <http://www.lincah.com> 02.02.11
- [5] <http://www.highresolutiontextures.com> 02.02.11
- [6] <http://whatafy.com> 03.02.11
- [7] Daniel I. M., og Ishai, O. (1994), *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Oxford University Press, New York
- [8] Lucas A.,(1948), *Ancient Egyptian Materials and Industries*, 3rd ed, The St Ann's Press Timperley, Altrincham, Storbritania
- [9] Strong, B. A., *History of Composite Materials*, Brigham Young University, Provo, USA
- [10] <http://www.dsm.com> 21.02.11
- [11] <http://authors.library.caltech.edu> 21.02.11
- [12] <http://www.air-and-space.com> 22.02.11
- [13] <http://www.tecnics.it>
- [14] Bothello, E. C. (2006), *A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures*, vol 9 no 3, Sao Carlos, Brazil
- [15] <http://siag.project.ifi.uio.no/problems/grandine/> 25.02.11
- [16] <http://www.newscientist.com> 25.02.11
- [17] <http://www.netcomposites.com> 28.02.11
- [18] <http://mmc-assess.tuwien.ac.at> 01.06.11
- [19] <http://www.sandwichpanels.org> 27.02.11
- [20] <http://www.diabgroup.com> 14.03.11

Litteraturliste

- [21] <http://www.grc.nasa.gov> 01.03.11
- [22] <http://www.lenntech.com> 29.03.11
- [23] NS-EN 1990:2002+NA (2008), *Eurokode - Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner*, Standard Norge
- [24] <http://www.rosta.ch/> 28.03.11
- [25] <http://www.bellaboats.fi/service.cntum?pageId=133052> 29.03.11
- [26] NS-EN 1993-1-8:2005+NA:2009, *Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner Del 1-8: Knutepunkter og forbindelser*, Standard Norge
- [27] Foggi, J. H. (2010), Masteroppgave; *Finite Element Based Stress Prediction for Design og Composite Materials*, Universitetet I Stavanger, Stavanger, Norge
- [28] Monoforton, G. R., og Schmit Jr, L. A., *Finite Element Analysis of Sandwich Plates and Cylindrical Shells with Laminated Faces*, Western Reserve University, Ohio
- [29] <http://www.kxcad.net/ansys/ANSYS/ansyshelp/index.htm> 14.04.11
- [30] Tekle, S. (2003), Masteroppgave; *Experimental and numerical studies of impact behavior of GRP reinforced composite sandwich materials*, Universitetet i Oslo, Oslo, Norge

Liste over vedlegg

- I) Forstudierapport
- II) Materialdata: Twintex T-PP
- III) Materialdata: Airex T92
- IV) Matlabkode for analyse av innfesting
- V) ANSYSkode for Testanalyse 1: SHELL181
- VI) ANSYSkode for Testanalyse 2: SOLID45
- VII) ANSYSkode for Testanalyse 3: SOLID/SHELL
- VIII) Resultater for alle testanalyser
- IX) ANSYSkode for nedbøyning av topplate
- X) ANSYSkode for hele uttriggeren

Vedlegg I: Forstudierapport



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

FORSTUDIERAPPORT TIL MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Konstruksjoner og materialer Maskinkonstruksjoner	Vårsemesteret, 2011 Konfidensiell
Forfatter: Safet Kurtovic (signatur forfatter)
Fagansvarlig: Hirpa L. Gelgele Veileder(e): Hirpa L. Glegele	
Tittel på masteroppgaven: Modellering og elementanalyse av komposittmaterialer for utriggere Engelsk tittel: Modelling and finite element analysis of composite materials for boat docking	
Studiepoeng: 30	
Emneord: Forstudierapport Komposittmaterialer Analyse	Sidetall: 22 + vedlegg/annet: 0 Stavanger, 17/02/2011 dato/år

Forord

Dette er en forstudierapport til en masteroppgave i studiet konstruksjoner og materialer, ved Universitetet i Stavanger, våren 2011. Studiets fordypning er maskinkonstruksjoner. Oppgaven skrives for bedriften Green Bay Systems AS som holder til i Kongsberg.

Oppgaven handler først og fremst om avanserte komposittmaterialer og vil ta for seg en del teori rundt temaet, beregninger og datamodellering av komposittmaterialer. Hovedmålet med denne oppgaven er å styrke universitetets kunnskap om disse materialene, samt utføre beregninger og analyser for bedriften Green Bay Systems. Green Bay Systems lager uttrigger til båter. Utriggeren blir laget av komposittmaterialer, med noen komponenter i stål. Oppgaven vil også ta for seg enkle beregninger av de delene som ikke er laget av komposittmaterialer på uttriggeren.

Takk til Hirpa L. Gelgele som ga meg muligheten til å skrive denne oppgaven, og for god hjelp på besøket til Green Bay Systems i Kongsberg. Også takk til Odd Christian Sandengen, eier av Green Bay Systems, for all informasjon og hjelp så langt.

Stavanger
12. januar 2011

Safet Kurtovic

Innholdsfortegnelse

1	Innledning.....	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Green Bay Systems.....	1
1.3	Rapportstruktur.....	2
2	Litteraturstudie	3
2.1	Avanserte komposittmaterialer.....	3
2.2	Oppbygging av komposittmaterialer	4
2.3	Bruk av komposittmaterialer	5
2.3.1	Framtidig bruk.....	6
2.4	Beregning og datamodellering.....	7
3	Utrigger av Green Bay Systems	8
3.1	Analyse av krefter.....	8
3.3	Materialer.....	10
3.3.1	Rustfritt stål.....	10
3.3.2	Polleo Pan.....	10
4	Oppgavebeskrivelse	12
4.1	Målsettinger	12
4.1.1	Teoretisk arbeid.....	12
4.1.2	Analyse av ytre krefter	12
4.1.3	Beregning av deler som ikke er komposittmaterialer.....	12
4.1.4	Analyse og beregning av komposittmaterialer.....	13
4.2	Begrensninger.....	13
4.2.1	Teoretisk arbeid.....	13
4.2.2	Analyse av ytre krefter	14
4.2.3	Beregning av deler som ikke er komposittmaterialer.....	14
4.2.4	Begrensninger i analysen av komposittmaterialer	14
5	Planlegging.....	15
5.1	Oversiktstre.....	16
5.2	Tidsplan	17
6	Litteraturliste	19

1 Innledning

Dette kapittelet vil ta for seg en enkel forklaring av hva komposittmaterialer er, litt informasjon om bedriften som oppgaven skrives for og rapportstrukturen.

1.1 Bakgrunn

Et komposittmateriale er et materiale som består av to eller flere separate materialer. Det kan på mange måter sammenlignes med en legering. En legering består av et hovedmateriale og ett eller flere legeringsmaterialer som skal forsterke materialet. Komposittmaterialer vil på samme måte bestå av flere separate materialer hvorav et av materialene er et grunnmateriale, eller matriks. Det andre materialet vil være en fiberforstekning. Hovedforskjellen på en legering, og et komposittmateriale er at en legering vanligvis er en blanding mellom materialer med relativ lik kjemisk sammensetning, mens et komposittmateriale ofte består av svært forskjellige komponenter. En annen forskjell er at legering er en jevn blanding av grunnstoffer, hvorav minst et av grunnstoffene er et metall. En jevn blanding gjør at grunnstoffene ikke kan skilles på makroskopisk nivå. I et komposittmateriale vil det være mulig å skille grunnmaterialet fra fiberforstekningen med det blotte øyet. Man kan lese mer om hva et komposittmateriale er i kapittel 2.1.

En av de aller vanligste legeringene som finnes er stål. Dette er essensielt en blanding av jern og karbon. Et komposittmateriale består svært ofte av vidt forskjellige materialer, et eksempel på dette er herdeplast og glassfiber.

1.2 Green Bay Systems

Green Bay Systems AS er et lite firma som holder til i Kongsberg. De skal produsere en uttrigger for båter rundt 20 fot. En av deres viktigste visjoner er å ha stor fokus på miljø. Samtidig skal uttriggeren være markedsleder når det kommer til kvalitet. Store deler av uttriggeren skal lages av et komposittmateriale som heter Polleo Pan. Polleo Pan blir produsert av Ekro AS i Porsgrunn.

Green bay systems har allerede laget fungerende versjoner av uttriggeren, men trenger flere kalkulasjoner for å være trygge på at deres produkt er godt nok for markedet. De ønsker også å se på mulighetene for å få ned vekten, samt gjøre konstruksjonen billigere. Uttriggeren skiller seg fra andre på markedet ved å bruke disse materialene, men også ved det som kalles "foldback"-funksjon. Denne funksjonen gjør at den ytterste delen av uttriggeren vippes tilbake, for å unngå at den ligger i vannet med flyteelementet. Figur 1 viser hvordan uttriggeren ser ut. Vippemekanismen vises også tydelig på denne figuren.



Figur 1: Uttriggere laget av Green Bay Systems AS

1.3 Rapportstruktur

Denne forstudierapporten inneholder informasjon som hovedrapporten vil bygge videre på. Forstudierapporten består av 6 kapitler i tillegg til innholdsfortegnelsen og forordet. Det første kapitlet er denne innledningen

Kapittel 2 i denne rapporten er en litteraturstudie hvor det er meningen at leseren skal få et innblikk i hva komposittmaterialer egentlig er, hvordan de er bygd opp og hva de brukes til.

I kapittel 3 kan man få et innblikk i materialene som blir brukt i Green Bay Systems uttrigger. Her kan man finne materialdata og lignende. I tillegg er det en enkel analyse av hvordan krefter virker inn på uttriggeren. Det er kun tatt hensyn til krefter på grunn av egenvekten i denne forstudierapporten.

Denne rapporten inneholder en stor del som handler om målsettinger og begrensninger av oppgaven. Dette finner man i kapittel 4 som heter oppgavebeskrivelse.

I det nest siste kapitlet finner man en tydelig oversikt over hva som skal gjøres for å løse oppgaven, og en tidsplan for når det skal gjøres. Det blir lagt stor vekt på å følge denne tidsplanen, og alle eventuelle endringer skal oppføres kontinuerlig.

I det siste kapitlet, kapittel 6 finner man Litteraturlisten.

2 Litteraturstudie

2.1 Avanserte komposittmaterialer

Mange tror at komposittmaterialer er lite utbredt, dette stemmer ikke. Et mye brukt materiale som armert betong faller innenfor kategorien komposittmateriale. Betongen er da grunnmaterialet som omringer stålarmeringen. Det finnes veldig mange forskjellige komposittmaterialer, det forekommer mange naturlige og ikke menneskeskapt komposittmaterialer. Et eksempel på dette er tre, cellulosen er fiberforsterkningen, mens ligningen er grunnmaterialet. Grunnmaterialet i en kompositt blir kalt en matriks.

Avanserte komposittmaterialer er materialer som er laget på en annen måte en for eksempel betong. Avanserte komposittmaterialer bruker fibre som er mye mindre i diameter enn armeringen i betong. I kapittel 2.2 kan man lese hvordan avanserte komposittmaterialer er bygd opp for å se forskjellene i forhold til for eksempel betong.

Selv om både tre og armert betong faller innenfor kategorien komposittmateriale, er det avanserte komposittmaterialer man ofte tenker på når man sier komposittmaterialer. Dette er også tilfelle i denne rapporten. Videre i teksten vil avanserte komposittmaterialer, bli referert til som komposittmaterialer. Figur 2 viser et eksempel på likheten mellom armert betong, tre og det avanserte komposittmaterialet epoxybelagt karbonfiber. Her ser vi at alle har et matriksmateriale, samt forstekninger. Dette er i grunn definisjonen på et komposittmateriale.

Avanserte komposittmaterialer blir ofte i dagligtale oppkalt etter hva slags fiber som brukes. Derfor vil ofte et komposittmateriale av Karbon og epoxy, kalles karbonfiber. Et korrekt navn å bruke er karbonfiberarmert epoxy. Denne rapporten vil variere mellom disse to.



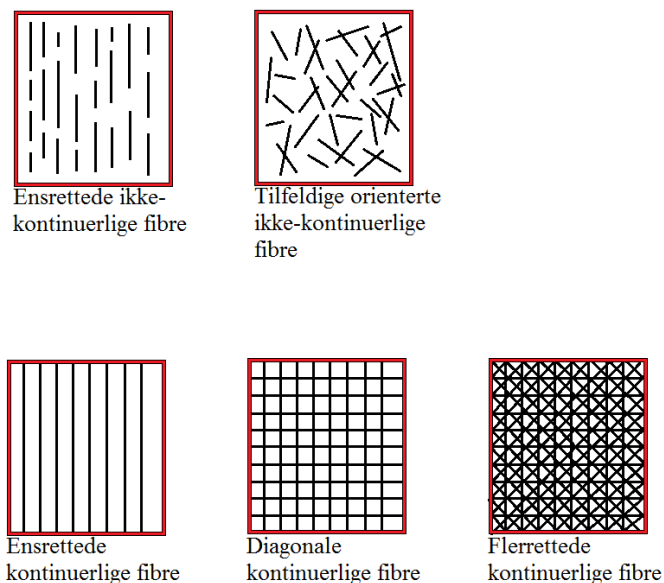
Figur 2: Fra venstre; karbonfiberarmert epoxy, trepanel og armert betong

2.2 Oppbygging av komposittmaterialer

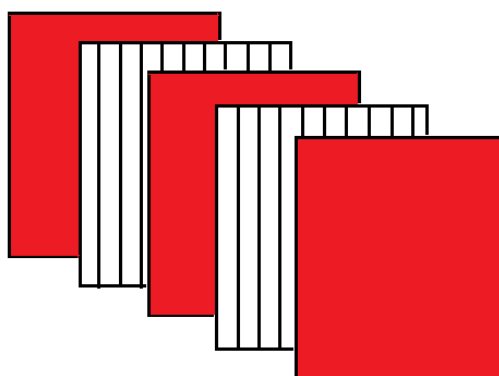
Som allerede nevnt inneholder avanserte komposittmaterialer et grunnmateriale som er forsterket med fiber. Grunnmaterialet som regel en polymer eller epoxy, mens fibreene kan være bygd opp av forskjellige materialer. De mest vanlige fibreene er glassfiber og karbonfiber.

Fibreene som forsterker matriksen kan enten være kontinuerlige eller ikke-kontinuerlige. På figur 3 ser vi hvordan disse to typene kan brukes som forstekning. Matriksmaterialet er merket som den røde rammen, mens fibreene er de svarte strekene.

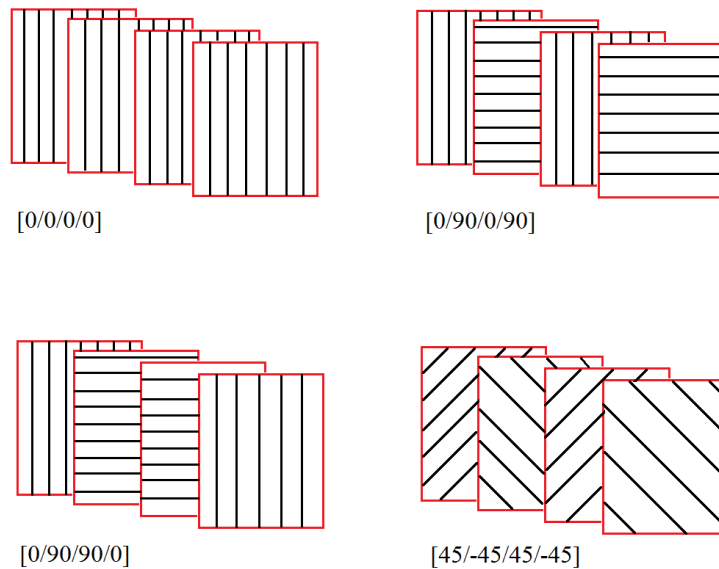
Fibreene blir som regel lagt lagvis. Først et lag med grunnmateriale, så et lag med fibre. Dette gjøres til man har oppnådd den ønskede tykkelsen av materialet. På figur 4 ser vi hvordan det vil se ut dersom man bruker ensrettede kontinuerlige fibre. Grunnmaterialet, eller matriksen er igjen merket med rødt, mens fibreene er svarte. Denne figuren viser hvordan et ferdig laminert komposittmateriale vil se ut rent skjematisk.



Figur 3: Figuren viser de to grunntypene av fibre, og hvordan de kan brukes



Figur 4: Lagvis oppbygging



Figur 5: Fiberretninger

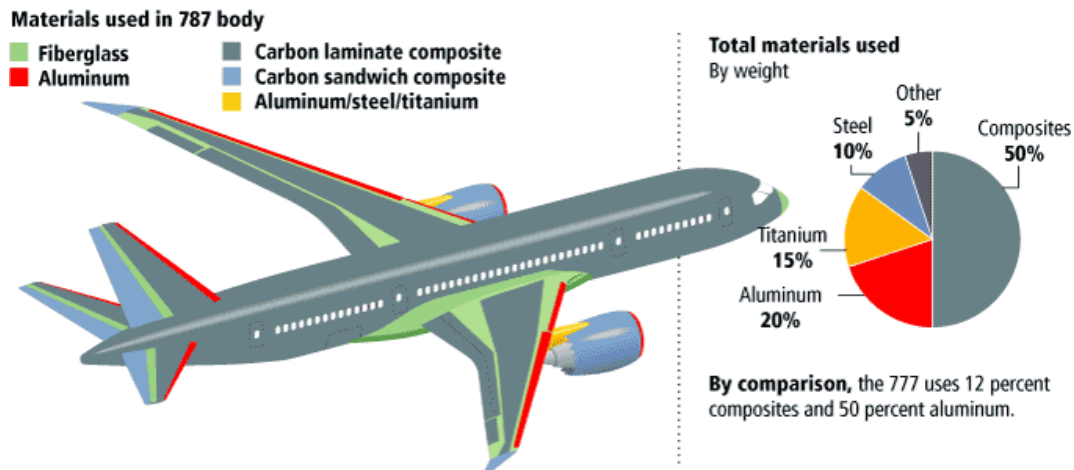
På figur 4 ser vi altså et laminat, eller lagvis oppbygd komposittmateriale. For å få fram ønskede mekaniske egenskaper i materialet er det viktig at både matriksen og fibrene er valgt i forhold til ønsket resultat. I tillegg så vil det være viktig med orienteringen av fibrene. Figur 5 viser noen typer orienteringen på fibrene. Denne figuren viser ikke lagene som utgjør matriks. Det er altså fiberlagene i et laminatet som vises på denne figuren. Teksten under de 4 tegningene i figuren er standard notasjon for å forklare orienteringene til de forskjellige lagene.

Deti tillegg mulig å laminere komposittmaterialer med andre materialer. Det vil si at man for eksempel har karbonfiberarmert epoxy, som jo er et laminat, laminert med et annet materiale som for eksempel aluminium. Disse materialene kalles også for sandwichmaterialer. I kapittel 2.4 kan man lese litt om GLARE som er et slikt materiale.

2.3 Bruk av komposittmaterialer

Komposittmaterialer blir i dag brukt i svært mange forskjellige sammenhenger. Alt fra fly, til golfutstyr kan være laget av komposittmaterialer. Grunnen til dette er nok at det finnes såpass mange forskjellige typer komposittmaterialer. Som tidligere nevnt er glassfiberarmert epoxy ett av de. Glassfiber består av fibre laget av glass, eller sand, samt en epoxy-, eller plastmatriks. Dette er et materiale som blant komposittmaterialene blir regnet som mindre godt grunnet lav stivhet, og lav utmattingsresistens. Likevel lages svært mange nye båter i glassfiber. Så å si alle moderne båter under 30 fot, og enkelte fiskebåter helt opptil 100 fot lages i dag av dette komposittmaterialet.

Karbonfiberarmert epoxy er et annet veldig kjent komposittmateriale. Dette materialet brukes i svært mange sammenhenger, akkurat som glassfiber. Alt fra moderne sportsbiler til golfkøller blir laget i karbonfiber. Dette skyldes materialets lave vekt i forhold til styrken. Den høye bruddfastheten på rundt 3000Mpa og gode egenskaper med tanke på termisk utvidelse fanget tidlig på 80-tallet interessen til Formel 1-lagene. Siden den gang har Formel 1 videreutviklet og optimalisert materialet til bruk i moderne sportsbiler. Materialets lave vekt gir muligheter for høyere hastigheter, men samtidig gir lav vekt en mulighet for å bruke



Figur 6: Bruk av komposittmaterialer på Boeing 787 Dreamliner

mindre drivstoff. Formel 1-bilenes store krav til hastighet er ikke et bruksområde for framtidlige familiebil, men det er drivstofforbruket. Ironisk nok kan karbonfiberarmert epoxy være en enkel løsning til det økende kravet om mindre drivstofforbruk. Dette er per dags dato en veldig dyr løsning, men masseproduksjon kan endre dette da råvarene ikke er kostbare. Estetisk sett appellerer komposittmaterialer til folk. Dette skyldes nok i stor grad de dyre bilenes bruk av materialene. Spesielt karbonfiber har blitt et materiale som forbindes med luksus og kvalitet, og det vil derfor være mulig å ta mer penger for en bil laget av dette materialet. Dette er et veldig viktig aspekt når det kommer til videre salg og utvikling av de avanserte komposittmaterialene.

Det relativt nye flyet Airbus A380 kan ses på som det optimale eksempelet på hva som kan oppnås ved bruk av komposittmateriale. Dette flyet består i følge en artikkel i New Scientist, skrevet av Paul Marks, av mer enn 20% komposittmaterialer. Flyet symboliserer på mange måter hva man kan oppnå ved bruk av avanserte komposittmaterialer. Boeing har brukt lignende materialer i sine nyeste fly. Spesielt deres samarbeid med NASA har ledet til deres neste fly som heter Boeing Dreamliner 787. Dette er ikke et stort fly sammenlignet med Airbus A380, men dreamlinerer til Boeing har som mål å senke drivstofforbruket drastisk når det kommer til luftfart. Så mye som 50 vektprosent av flyet er laget av moderne komposittmaterialer. Komposittmaterialer er av den grunn Boings storsatsing på neste generasjons fly. På figur 6 er det illustrert hvor store deler av skroget til Boeing 787 Dreamliner som faktisk er laget av komposittmaterialer. Siden komposittmaterialer veier mindre enn tradisjonelle materialer, vil 50 vektprosent som vi ser utgjøre en svært stor del av skroget.

2.3.1 Framtidig bruk

Mennesker har i all tid brukt tilgjengelig teknologi for å gjøre sine liv enklere og bedre. De nye og avanserte komposittmaterialene brukes i forholdsvis mange produkter allerede i dag, men i framtiden vil vi etter all sannsynlighet få en stor økning i komposittmateriales bruksområder. Isaac M. Daniel og Ori Ishai nevner i boken Engineering mechanics of composite materials fra 1994 at det er tre motivasjonsgrunner for utviklingen av komposittmaterialer i kommersielle produkter. Det første er den økte forståelsen av materialets komponenter og hvordan de oppfører seg som et felles materiale. Den andre grunnen er i følge Daniel og Ishai kravet for materialer med høy ytelse i forhold til vekt i fly- og romfartsindustrien. Og den siste grunnen moderne datamaskiners mulighet til å forenkle analyseringen av komponenter. Disse tre grunnene er per dags dato veldig viktige grunner for

økningen i bruk av komposittmaterialer. Men i framtiden vil kravet om enda lettere og bedre materialer være mer gjeldende. Dette vil føre til en enorm utvikling på de to andre punktene som handler om forståelsen av materialene og mulighetene for å gjøre kalkulasjoner. På denne måten vil komposittmaterialer få en kraftig økning i tiden som kommer.

Framtidlige produkter som kan bli laget av komposittmaterialer er familiebil, kommersielle fly og medisinske implementer. Generelt kan man si at alle konstruksjoner hvor vekt, styrke, utmattelsesmotstand og korrosjonsresistens er viktig, kan tjene på en overgang til avanserte komposittmaterialer.

2.4 Beregning og datamodellering

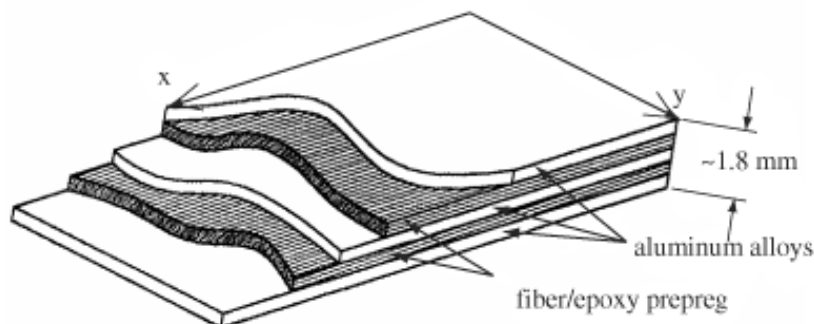
Datamodellering av komposittmaterialer er ikke like lett som for tradisjonelle materialer. Grunnen er at materialene er ortotropiske i alle lag. I tillegg til at alle lagene har forskjellige egenskaper i retninger, vil det være svakheter mellom lagene. Det vil også være svakheter mellom matriksmaterialet og fiberforsterkninger. Dette gir veldig mange variabler som man må ta hensyn til for å gjøre en god styrkeanalyse. Alle disse egenskapene vil i tillegg variere ettersom hvilken retning man ser på.

I kompressjon vil i tillegg knekking av fibre kunne oppstå. Dette kan skyldes at matriksmaterialet ikke er stekt nok til å holde fibre på plass.

Det finnes noen spesialprogrammer for analyse av komposittmaterialer. Disse er ofte enkle og gir få muligheter for å manipulere og tilpasse problemet. Det kan være vanskelig å forstå hva slags regneoperasjoner mange av programmene gjør. En analyse i Ansys eller Abaqus er vanskeligere, med det gir en større kontroll på at resultatet er tilfredsstillende.

Det finnes noen gode eksempler på vellykkede dataanalyser av komposittmaterialer. Problemet er at disse ofte er gjort av store firmaer som Airbus og lignende. De analysene som er gjort i mindre industrier er ofte svært forenklet, selv om de gir tilfredsstillende resultat ved tilstrekkelige sikkerhetsfaktorer.

Når det kommer til laminerte komposittmaterialer, eller sandwichmaterialer, har jeg ikke lyktes å finne en eneste analyse som er gjort fullstendig. Det er grunn til å tro at Airbus har klart dette siden de bruker materialet GLARE i allerede nevnte modellen A380. GLARE er et laminat med glassfiberarmert epoxy, og en aluminiumlegering. Oppbygningen av et slikt materiale ser vi i figur 7.



Figur 7: Skissert oppbygning av GLARE

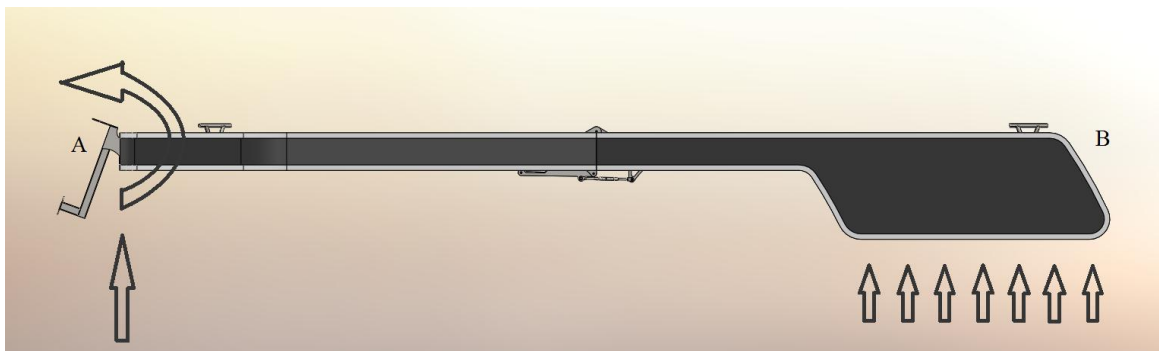
3 Utriggerer av Green Bay Systems

Dette kapittelet vil ta for seg krefter som er påført uttriggeren, og materialene som brukes. Analysen av krefter krever mange forenklinger i en så tidlig fase av oppgaven.

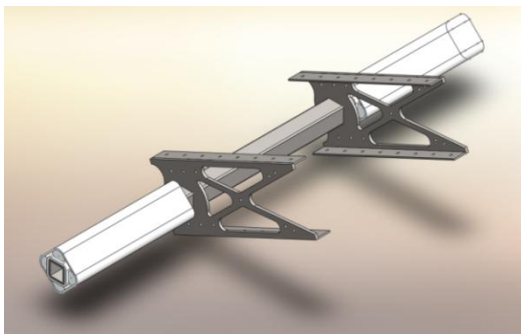
3.1 Analyse av krefter

Opplagerkreftene er fordelt som i figur 8. Som man ser i figur 8, så er tar leddet på venstre side(A) opp moment. Dette er et spesielt ledd laget av Rosta. Dette leddet kan vi se i figur 9 og 10. Det som er spesielt med dette leddet er at det tar opp moment, samtidig som det gir en vinkelendring. Jo større vinkelendringen blir, jo mer moment tar leddet opp. Dette skyldes at gummien som det er referert til i figur 10 tar opp mer krefter jo mer komprimert den blir. Figur 11 viser opplagerkreftene sett ovenfra.

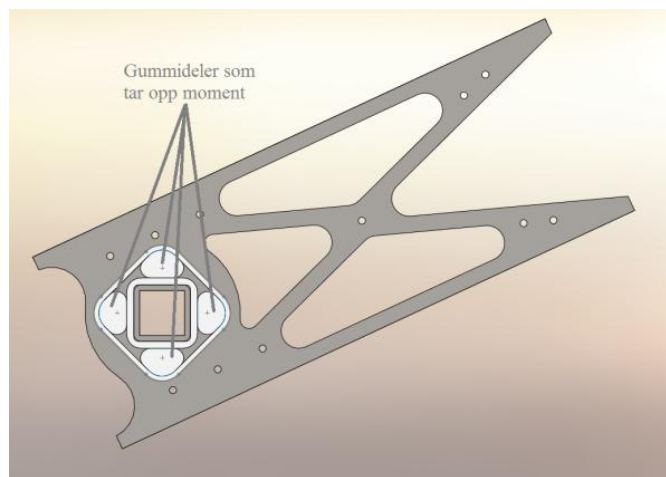
Systemet vil ha ytre påførte krefter som skyldes været, båter og mennesker. Disse kreftene vil bli analysert i hovedrapporten.



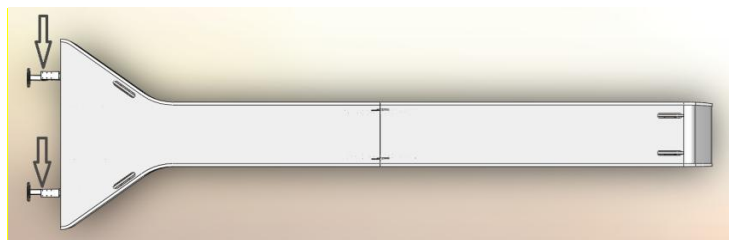
Figur 8: Opplagerkrefter sett fra siden



Figur 9: Opplageret i A



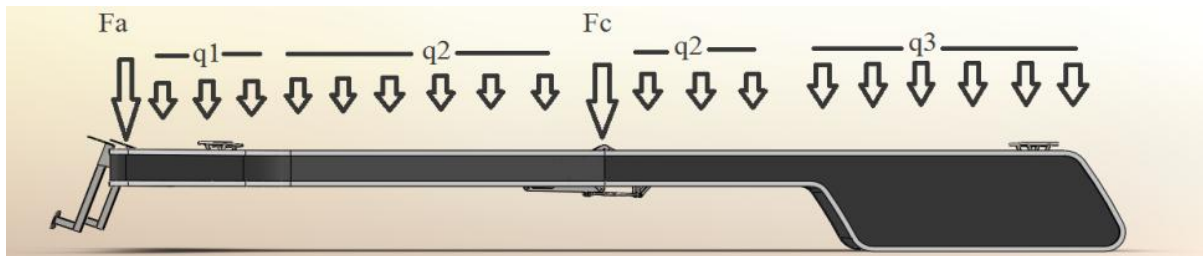
Figur 10: Gummimekanisme



Figur 11: Opplagerkrefter sett ovenfra

Dette er en tidlig analyse av påførte krefter på uttriggeren. De kreftene som skyldes egenvekt antas å bli fordelt som på figur 12. Kraftene som er påført som punktlaster på denne figuren skyldes høyere vekt enkelte plasser på konstruksjonen. Opplagerets vekt bidrar til den økte vekten i punkt A. Foldback-mekanismen på midten bidrar også til økt vekt. Alle kreftene er foreløbige overslag.

$F_a = 136,6 \text{ N}$
 $F_c = 42,6 \text{ Nm}$
 $q_1 + q_2 = 159 \text{ N/m}$
 $q_3 = 261 \text{ N/m}$



Figur 12: Fordeling av krefter på grunn av egenvekt

3.3 Materialer

Utriggeren består av to materialer. Det ene er rustfritt stål. Innfestingen og midtleddet blir laget i rustfritt stål. Det andre materialet er Polleo Pan. Polleo Pan er et laminat med glassfiber og et materiale som heter Airex.

3.3.1 Rustfritt stål

Det blir brukt rustfritt stål i kvaliteten 316L i konstruksjonen. Denne ståltypen er lik 316, men med et noe mindre karboninnhold. I tabellen nedenfor vises materialegenskapene til dette materialet. Verdiene i tabellen er hentet fra Vegas Fastener Manufacturing.

3.3.2 Polleo Pan

Alt bortsett fra midtleddet og innfestingen blir laget av dette materialet. Dette er et meget spesielt materiale som består av glassfiber på hver side av et materiale som kan ligne på skum. I tillegg til at glassfiberet er laget i flere lag som et laminat, har vi også et lag med dette skum materialet midt i som danner et laminat med glassfiberet. Dette skummaterialet heter Airex T92. Figur 13 viser hvordan disse to materialene er laminert for å få det materialet som heter Polleo Pan.

På uttriggeren blir det brukt to tykkelser av dette materialet. I følge Ekro As, som lager Polleo Pan, vil materialet ha forskjellige egenskaper etter tykkelsen.

Glassfiber materialet heter Twintex T PP og er en variant som bruker en fibertype som kalles E-Glass. Matriksen er laget av polypropylen.

Materialegenskapene som er tilgjengelig for øyeblikket vil være for glassfiberen og Airex separat. I tabell 2 ser vi egenskapene til glassfiber, og i tabell 3 for Airex. Alle verdiene i disse tabellene er hentet fra produsentenes offisielle tall.



Figur 13: Polleo Pan

Tabell 1: Materialegenskaper stålkvalitet 316L

	Enhet	Verdi
Tetthet	Kg/m ³	8027
Strekkfasthet	MPa	485
Flytgrense	MPa	170
E-modul	GPa	200
Skjærmodul	GPa	82

Tabell 2: Materialegenskaper for Airex T92

	Enhet	Verdi
Tetthet	kg/m ³	106,60
Strekkfasthet	MPa	2,27
E-modul i strekk	MPa	112,51
Kompressjonsfasthet	MPa	1,36
E-modul i kompressjon	MPa	92,50
Skjærstyrke	MPa	2,27
Skjærmodul	MPa	112,51

Tabell 3: Materialegenskaper til Twintex T PP

	Enhet	Verdi
Tetthet	kg/m ²	0,745
Strekkfasthet	MPa	300
E-modul i strekk	GPa	14
Bøyestrekfasthet	MPa	280
Bøyestrekmodul	GPa	13
Fiberinnhold i vekt	%	60
Fiberinnhold i volum	%	35

4 Oppgavebeskrivelse

Dette kapittelet beskriver mål og begrensninger for denne masteroppgaven. For en enkelere forståelse av målene kan man se i oversiktstreet og tidsplanen i kapittel 5.

4.1 Målsettinger

Her vil hovedmålene for oppgaven bli beskrevet, samt hvordan disse målene skal oppnås og suksesskriterier. Det overordnede målet for oppgaven er bygge kompetanse angående modellering og bruk av komposittmaterialer ved Universitetet i Savanger.

Målene nedenfor er ment som absolutte mål, og det er meningen at alle skal oppfylles fullstendig. Begrensninger på de følgende 4 delmålene er beskrevet i kapittel 4.2.

4.1.1 Teoretisk arbeid

Første delen av oppgaven skal inneholde en studie av komposittmaterialer, dets historie og bruksområder. Det vil bli lagt vekt på å forklare komposittmaterialers egenskaper og oppbygging.

Når det kommer til komposittmaterialenes egenskaper skal det fokuseres på de beste og mest brukte materialene på markedet. Rapporten skal inneholde en enkel guide som viser hvilke materialer som egner seg best i forskjellige sammenhenger. Det første delmålet skal i tillegg inneholde en omfattende beskrivelse av materialet Polleo Pan.

I historiedelen skal det tydelig komme fram når og av hvem de viktigste framskrittene innen teknologien ble gjort. Hvordan komposittmaterialer kan brukes i framtiden skal også dekkes og hvis mulig skal det foreslås framtidlige bruksområder av materialene.

Store deler av dette målet kan løses ved hjelp av litteratur tilgjengelig på BIBSYS. For informasjon angående Polleo Pan vil det være nødvendig å kontakte, Terje Ulltang ved EKRO AS, som produserer dette materialet.

4.1.2 Analyse av ytre krefter

Det skal bli gjort en analyse av ytre krefter som kan virke på uttriggeren fra Green Bay Systems. Denne analysen vil legge grunnlaget for de neste delmålene.

Denne analysen vil omfatte det å snakke med diverse båtbrukere, og produsenter av uttriggerer. I tillegg vil det være nødvendig å observere hvordan småbåter legger til uttriggeren.

Krefter som blir påført på grunn av mennesker skal regnes med sikkerhetsfaktorer fra Norsk Standard. Egenvekten vil derimot brukes direkte uten sikkerhetsfaktorer fordi den ikke har noen variasjoner fra produkt til produkt.

4.1.3 Beregning av deler som ikke er komposittmaterialer

Etter analyse av krefter som er påført uttriggeren, skal det utføres kalkulasjoner på komponenter som ikke er laget av komposittmaterialer. Det skal vurderes om det er endringer som kan gjøres for å optimalisere konstruksjonen rent dimensjoneringsmessig.

I denne delen vil hovedfokuset ligge på å regne ut hvor mye innfestingen må tåle, og hvorvidt midtleddet er konstruert for de laster som kan oppstå.

For å løse innfestingssystemet mellom bryggen og uttriggeren blir det nødvendig å bruke Matlab som verktøy for å løse store matriser. Bolteforbindelsene skal løses etter NS EN 1993-1-8, som er en norsk standard for skrue- og bolteforbindelser.

Det er foreløpig usikkert hva som er nødvendig av utregninger i midtleddet.

4.1.4 Analyse og beregning av komposittmaterialer

Denne delen av oppgaven tar for seg å mulighetene for å analysere komposittmaterialer både ved CAD(computer aided design) og tradisjonell regning. Hovedfokuset vil være å få til en god analyse ved hjelp av dataprogramvare.

Det er mulig å bruke elementmetoden for å analysere et komposittmateriale. Det vil være nødvendig å bruke Matlab for å effektivisere utregningene av større matriser.

For at dette målet skal oppfylles er det ønskelig å finne en best mulig måte å analysere konstruksjoner laget av komposittmaterialer. Utgangspunktet for å finne den beste måten å regne på komposittmaterialene på uttriggeren fra Green Bay Systems. Dette skal gjøres ved å regne på komposittmaterialer og ved å bruke dataverktøy som ANSYS. Andre programvarer som det kan bli nødvendig å bruke er Solid Works analysemodul, The Laminator, Composite Star 2.0 og Abaqus.

Denne analysen krever at vi har tilgang til materialeegenskapene til Polleo Pan. Dersom det ikke skulle lykkes å skaffe materialdata kan det bli nødvendig å gjøre noen forenklinger, eller finne materialeegenskapene. Disse kan finnes enten ved tester, eller å finne en slags sammenheng mellom glassfiber og Airex. Det er også mulig å se på lignende materialer for å finne materialeegenskapene. Dersom dette blir nødvendig vil dette bli en stor del av oppgaven, og andre aspekter ved oppgaven kan bli mindre viktige.

I tillegg vil det være nødvendig å se på hvor god sammenheng det er mellom dataanalysen av materialet, og tester som er utført.

4.2 Begrensninger

Det er vanskelig å forutse hindringer og problemer en oppgave av denne størrelsen kan by på. Det faktum at teknologien rundt komposittmaterialer er forholdsvis ny, og at forståelsen av materialene ikke er utbredt fører til at det kan bli vanskelig å finne informasjon. Det kan tenkes at det vil være nødvendig å ta noen antagelser som ikke har blitt tatt tidligere for å kunne komme videre i oppgaven.

4.2.1 Teoretisk arbeid

Den første og mest naturlige begrensningen vil være det faktum at komposittmaterialer ikke har en standardproduksjon. Dette fører til at egenskaper og oppbygging av materialene vil variere fra produsent til produsent. Egenskapene til materialer vil derfor hentes fra store produsenters tall. Eventuelle yrkeshemmigheter angående oppbygging og egenskaper av komposittmaterialer vil også være en naturlig begrensning.

Det er usikkerhet rundt hvor mye EKRO AS vet om materialeegenskapene til Polleo Pan. Dersom de ikke har utført tester på materialet for å finne egenskapene, skal det vurderes om det er nødvendig å gjøre enkelte tester for å finne materialeegenskapene.

4.2.2 Analyse av ytre krefter

Siden dette er en ganske liten konstruksjon, så vil det ikke bli utført tester for å finne ut hvor store krefter som vil virke på konstruksjoner. Det ville krevd mye utstyr for å finne ut av hvordan bølkekrefter vil fordeles på konstruksjonen.

Det vil heller ikke gjøres undersøkelser for å finne ut hvordan båter kan komme borti uttriggeren. I stedet skal problemet forenkles, og kun værste mulige tilfelle vil bli analysert.

4.2.3 Beregning av deler som ikke er komposittmaterialer

Begrensningen på denne delen av oppgaven vil være tiden. Da dette ikke er hovedfokuset i selve oppgaven, vil det ikke være bli lagt vekt på eventuelle designendringer i innfestingen og midtleddet.

Hvis Green Bay Systems ønsker en videre analyse av innfestingen, vil det bli vurdert hvorvidt dette er relevant for oppgaven.

4.2.4 Begrensninger i analysen av komposittmaterialer

I og med at Green Bay Systems har kommet langt i utviklingsprosessen av sitt produkt, vil det ikke bli lagt stor vekt på å foreslå store endringer i designet av uttriggeren.

Det faktum at det ikke finnes gode analyser av materialet tidligere vil gjøre at det kan bli nødvendig med antagelser og forenklinger av både materialet og designet av uttriggeren for denne analysen.

Denne delen av rapporten forutsetter at det finnes tilstrekkelig med materialdata for Polleo Pan. Hvis dette eventuelt skulle være et problem så er det forklart i målsettingen hva som skal gjøres.

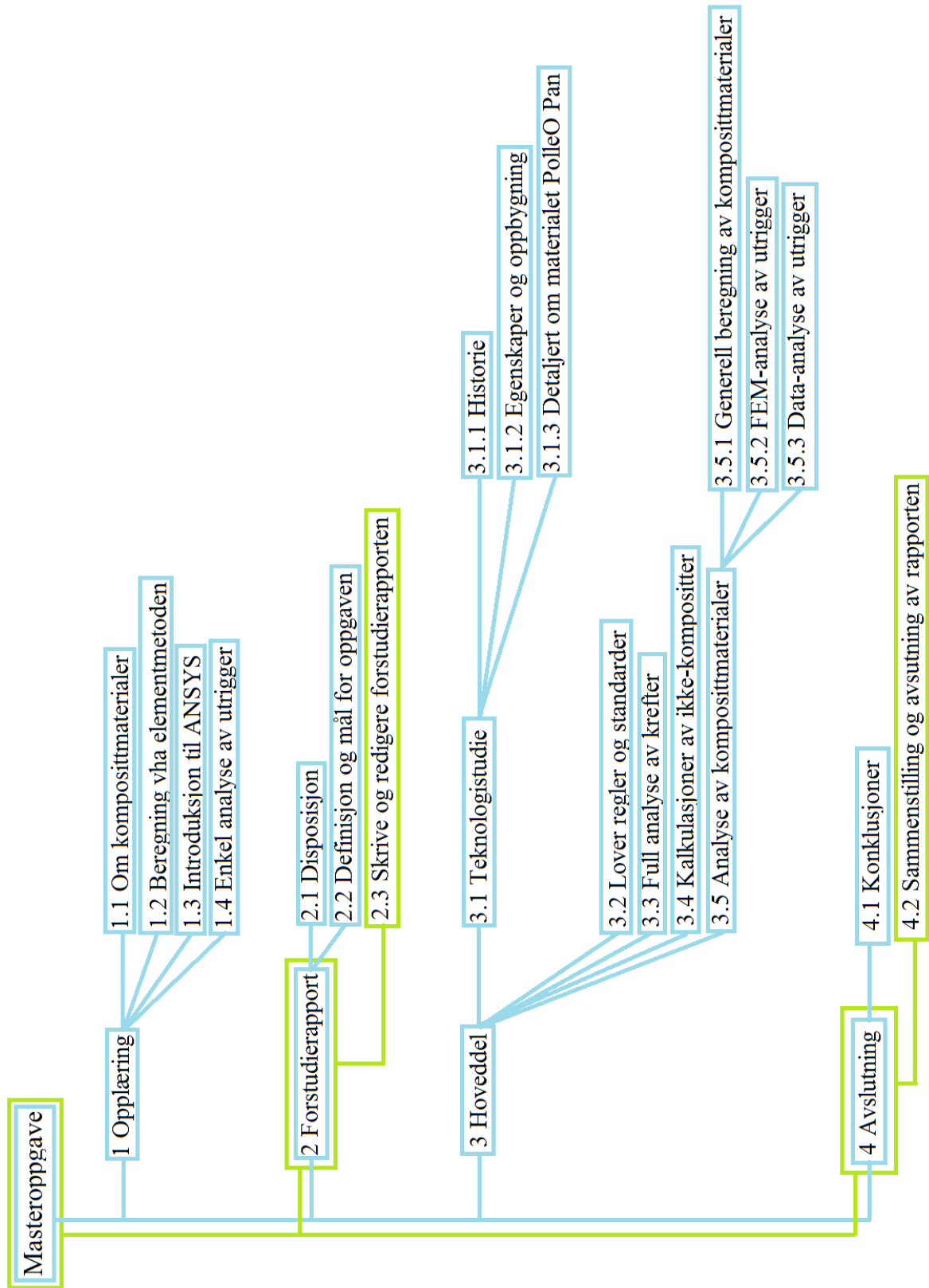
5 Planlegging

Denne delen inneholder et Gantt-diagram og et oversiktstre. Gantt-diagrammet vil kontinuerlig oppdateres for å forsikre at den oppsatte tidsplanen blir fulgt, og at eventuelle avvik oppdages.

På neste side finnes et oversiktstre som har de samme overskriftene som framdriftsplanen. Oversiktstreet vil gi en generell oppfatning av hva som skal gjøres, og i hvilken rekkefølge, mens framdriftsplanen inneholder spesifikke datoer for framdriften.

Tilgjengelige helger og andre fridager vil regnes som halve arbeidsdager i framdriftsplan. Dette er det ikke tatt hensyn til i kolonnen "DURATION". I denne kolonnen regnes altså ikke lørdager og søndager.

5.1 Oversiktstre

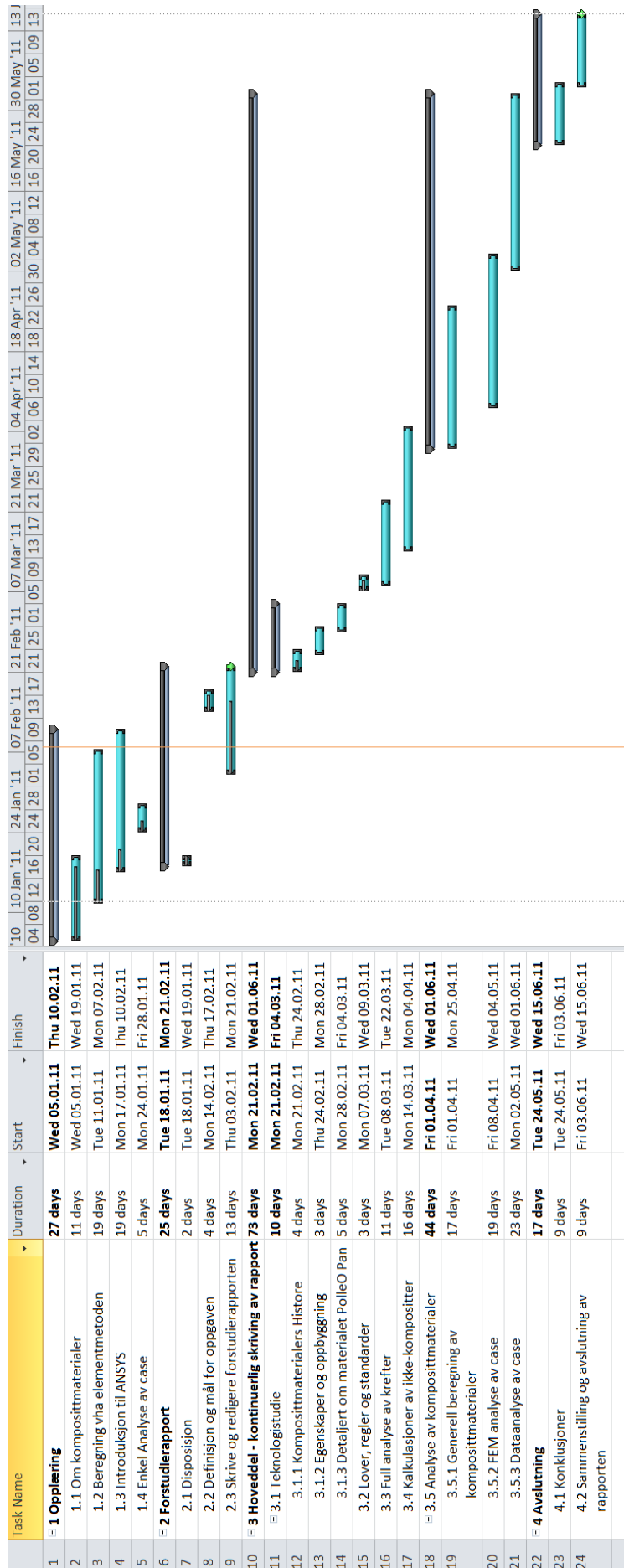


5.2 Tidsplan

Tabell 4 er kun et utdrag fra Gantt-skemaet på neste side.

Tabell 4: Utdrag av tidsbruken i Gantt-skjemaet

Task Name	Duration	Start	Finish
1 Opplæring	28 days	Wed 05.01.11	Fri 11.02.11
1.1 Om komposittmaterialer	11 days	Wed 05.01.11	Wed 19.01.11
1.2 Beregning vha elementmetoden	18 days	Tue 11.01.11	Fri 04.02.11
1.3 Introduksjon til ANSYS	17 days	Thu 20.01.11	Fri 11.02.11
1.4 Enkel Analyse av case	5 days	Mon 24.01.11	Fri 28.01.11
2 Forstudierapport	25 days	Tue 18.01.11	Mon 21.02.11
2.1 Disposisjon	2 days	Tue 18.01.11	Wed 19.01.11
2.2 Definisjon og mål for oppgaven	4 days	Mon 14.02.11	Thu 17.02.11
2.3 Skrive og redigere forstudierapporten	12 days	Sat 05.02.11	Mon 21.02.11
3 Hoveddel - kontinuerlig skriving av rapport	73 days	Mon 21.02.11	Thu 02.06.11
3.1 Teknologistudie	10 days	Mon 21.02.11	Mon 07.03.11
3.1.1 Komposittmaterialers Histore	3 days	Mon 21.02.11	Wed 23.02.11
3.1.2 Egenskaper og oppbygging	4 days	Thu 24.02.11	Tue 01.03.11
3.1.3 Detaljert om materialet PolleO Pan	4 days	Wed 02.03.11	Sun 06.03.11
3.2 Lover, regler og standarder	3 days	Mon 07.03.11	Wed 09.03.11
3.3 Full analyse av krefter	11 days	Tue 08.03.11	Tue 22.03.11
3.4 Kalkulasjoner av ikke-kompositter	16 days	Mon 14.03.11	Mon 04.04.11
3.5 Analyse av komposittmaterialer	44 days	Fri 01.04.11	Wed 01.06.11
3.5.1 Generell beregning av komposittmaterialer	17 days	Fri 01.04.11	Mon 25.04.11
3.5.2 FEM analyse av case	19 days	Fri 08.04.11	Wed 04.05.11
3.5.3 Dataanalyse av case	23 days	Mon 02.05.11	Wed 01.06.11
4 Avslutning	17 days	Tue 24.05.11	Wed 15.06.11
4.1 Konklusjoner	9 days	Tue 24.05.11	Fri 03.06.11
4.2 Sammenstilling og avslutning av rapporten	9 days	Fri 03.06.11	Wed 15.06.11



6 Litteraturliste

Bøker

Isaac M. Daniel og Ori Ishai(1994), *Engineering Mechanics of Composite Materials*. Oxford University Press Inc., New York, USA

A. Lucas og J. Harris(1948), *Ancient Egyptian Materials and Industries*, 3rd ed. Kessinger Publishing, Whitefish, MT, USA

Internetsider

<http://www.nasa.gov/multimedia/podcasting/nasa360/nasa360-0217.html>

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/45/Fractured_reinforced_concrete_column.JPG: 20.01.11

http://www.highresolutiontextures.com/textures/move/wood_panel_1.jpg 20.01.11

<http://www.lincah.com/wp-content/uploads/2011/01/2011-Mercedes-Benz-C63-AMG-Affalterbach-Edition-Carbon-fibre-Mirror-View.jpg> 20.01.11

http://authors.library.caltech.edu/5456/1/hrst.mit.edu/hrs/materials/public/composites/Composites_Overview.htm: 26.01.11

http://www.solarnavigator.net/composites/composite_materials.htm: 26.01.11

http://www.air-and-space.com/20050514%20Minter/DSC_0825%20BT-15%20N65364%20left%20side%20taxiing%20l.jpg :28.01.11

<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/11014/airplane/64169/Use-of-composite-materials>:28.01.11

www.netcomposites.com: 05.02.11

<http://www.vegasfastener.com/stainless-steel-316L.php>: 15.02.11

Vedlegg II: Materialdata: Twintex T-PP



TWINTEX® T PP

PP Glass Fabrics

PRODUCT DESCRIPTION

TWINTEX® T PP is a fabric made of TWINTEX® R PP 60 1870 N or B roving (commingled E-glass and polypropylene filaments). Consolidation is done by heating above melting temperature of PP matrix (180°C-230°C / 360°F-450°F) and applying a low pressure (1-30 bars), before cooling step under pressure.

According to the size of series, the product processings are:

- Vacuum molding
- Diaphragm
- Calendering

PRODUCT REFERENCE

Example: TWINTEX® T PP 60 745 AF 152

- T: fabric
- PP: polypropylene matrix
- 60: glass content by weight (%)
- 745: nominal weight (g/m²)
- AF: natural color, heat and UV stabilizations
- BF: black color, heat and UV stabilizations
- 152: width (cm)

PRODUCT APPLICATION

TWINTEX® T PP is mainly used for the following applications:
Automotive - Marine - Transportation - Sports & leisure - Building & Construction.



FEATURES AND PRODUCT BENEFITS

- Ready to Use Product – The Thermoplastic Resin is inside
- Ease of Storage conditions
- Fast Processing Cycle Time and Low Pressure Molding
- High Mechanical Properties with Impact Resistance and Weight Saving
- No solvent Emission
- Recyclability

COMPOSITE MECHANICAL CHARACTERISTICS (AFTER MOLDING)

				PP 60 1/1	PP 60 4/1
Tensile	Strength Modulus	ISO 527	MPa (psi x 10 ³) GPa (psi x 10 ⁴)	300 (43.5) 14 (2.0)	400 / 130 (58.0 / 18.8) 20 / 6 (2.9 / 0.9)
Flexural	Strength Modulus	ISO 14125	MPa (psi x 10 ³) GPa (psi x 10 ⁴)	280 (40.6) 13 (1.9)	380 / 130 (55.1 / 18.8) 18 / 6 (2.6 / 0.9)
Charpy impact unnotched		ISO 179	kJ/m ²	160	200 / 90
Izod impact notched		ISO 180	kJ/m ²	140	205 / 85
Glass content		In weight In volume	% %	60 35	60 35

- Mechanical property data was developed in accordance with standard ISO specifications
- Relative values shown are accurate to the best of our knowledge, but should not be used for design purposes since absolute values can be influenced by processing conditions
- More specific data are available upon request

TWINTEX® T PP

PP Glass Fabrics

PRODUCT AVAILABILITY

PRODUCT AVAILABILITY				
Code	Color	Structure	Pattern*	Standard width (cm)
Twintex® T PP 60 745	natural or black	balanced	twill 2/2	130 and 152
Twintex® T PP 60 1485	natural or black	balanced	twill 2/2	152
Twintex® T PP 60 935	black	4-1	plain	101 and 152
Twintex® T PP 60 980	natural	balanced	twill	255

* Other Twintex® fabrics patterns are available

PACKAGING

Each roll of TWINTEX® PP glass fabric is wrapped in a polyethylene bag, packed in cardboard box and palletized.

STORAGE

TWINTEX® T PP must be stored in its original packaging, away from humidity and at moderate temperature.

The best conditions are:

- Temperatures between 15°C and 35°C. (60°F and 95°F)
- Humidity between 35% and 65%.

If the product is stored at low temperature (below 15°C/60°F), it is advisable to condition it in the workshop, for at least 24 hours before use, to prevent condensation.

OCV CHAMBÉRY INTERNATIONAL
767 QUAI DES ALLOBROGES
73009 CHAMBÉRY CEDEX
FRANCE
infotwintex@owenscorning.com



OCV™ Reinforcements

OWENS CORNING
COMPOSITE MATERIALS, LLC
ONE OWENS CORNING PARKWAY
TOLEDO, OHIO 43659
1.800.GET.PINK®
www.owenscorning.com
www.ocvreinforcements.com

EUROPEAN OWENS CORNING
FIBERGLAS, SPRL.
166, CHAUSSEÉ DE LA HULPE
B-1170 BRUSSELS
BELGIUM
+32.2.674.82.11

OWENS CORNING - OCV ASIA PACIFIC
SHANGHAI REGIONAL HEADQUARTERS
2F OLIVE LVO. MANSION
620 HUA SHAN ROAD
SHANGHAI 200040
CHINA
+86.21.62489922

This information and data contained herein is offered solely as a guide in the selection of a reinforcement. The information contained in this publication is based on actual laboratory data and field test experience. We believe this information to be reliable, but do not guarantee its applicability to the user's process or assume any responsibility or liability arising out of its use or performance. The user agrees to be responsible for thoroughly testing any application to determine its suitability before committing to production. It is important for the user to determine the properties of its own commercial compounds when using this or any other reinforcement. Because of numerous factors affecting results, we make no warranty of any kind, express or implied, including those of merchantability and fitness for a particular purpose. Statements in this publication shall not be construed as representations or warranties or as inducements to infringe any patent or violate any law safety code or insurance regulation.

Pub. No. 10010683-D. Owens Corning reserves the right to modify this document without prior notice. ©2010 Owens Corning

Twintex_TPP_vw_06-2008_Rev5

Vedlegg III: Materialdata: Airex T92

AIREX[®] T92

Property	Unit	Average	Std Dev	Average – 2* stddev	Proposed msmv
Sheet density	kg/m ³	106.60	0.76	105.09	102.0
Compressive strength	MPa	1.36	0.06	1.23	1.2
Compressive modulus	MPa	92.50	9.84	72.83	65.0
Shear strength	MPa	0.92	0.09	0.73	0.75
Shear modulus	MPa	20.39	0.92	18.54	18.0
Shear elong. at break	%	24.41	14.34	-4.27	10.0
Tensile strength	MPa	2.27	0.07	2.13	1.5
Tensile modulus	MPa	112.51	8.68	95.14	90.0

Table2-1: Results summary for the different properties tested of **T92.100**

Property	Unit	Average	Std Dev	Average – 2* stddev	Proposed msmv
Sheet density	kg/m ³	116.67	1.72	113.23	112.0
Compressive strength	MPa	1.82	0.09	1.63	1.45
Compressive modulus	MPa	107.77	1.62	116.3	80.0
Shear strength	MPa	1.11	0.06	0.98	0.9
Shear modulus	MPa	24.56	0.90	22.77	20.0
Shear elong. at break	%	22.45	13.29	-4.12	10.0
Tensile strength	MPa	2.90	0.09	2.73	1.8
Tensile modulus	MPa	146.48	6.99	132.5	100.0

Table2-2: Results summary for the different properties tested of **T92.110**

Property	Unit	Average	Std Dev	Average – 2* stddev	Proposed msmv
Sheet density	kg/m ³	137.03	2.20	130.76	128.0
Compressive strength	MPa	2.40	0.13	2.15	2.1
Compressive modulus	MPa	141.28	12.49	116.30	110.0
Shear strength	MPa	1.35	0.05	1.25	1.1
Shear modulus	MPa	30.58	1.37	27.83	25.0
Shear elong. at break	%	22.88	12.13	-1.37	8.0
Tensile strength	MPa	3.33	0.23	2.88	2.00
Tensile modulus	MPa	174.73	9.15	156.44	130.0

Table2-3: Results summary for the different properties tested of **T92.130**

Vedlegg IV: Matlabkode for innfesting

```
format short
```

```
%E-modul  
E=193000;
```

```
%Lengder i mm  
L1=30;  
L2=88;  
L3=133;  
L4=396;  
L5=124;
```

```
%Arealer i mm2  
A1=240;  
A2=576;  
A3=1500;  
A4=576;  
A5=576;
```

```
%Tregghetsmomenter i mm4  
I1=320;  
I2=125952;  
I3=703125;  
I4=125952;  
I5=125952;
```

```
%Lokale stivhetsmatriser til de 5 elementene
```

```
K1lokal=[E*A1/L1,0,0,-E*A1/L1,0,0;  
0,12*E*I1/L13,6*E*I1/L12,0,-12*E*I1/L13,6*E*I1/L12;  
0,6*E*I1/L12,4*E*I1/L1,0,-6*E*I1/L12,2*E*I1/L1;  
-E*A1/L1,0,0,E*A1/L1,0,0;  
0,-12*E*I1/L13,-6*E*I1/L12,0,12*E*I1/L13,-6*E*I1/L12;  
0,6*E*I1/L12,2*E*I1/L1,0,-6*E*I1/L12,4*E*I1/L1];
```

```
K2lokal=[E*A2/L2,0,0,-E*A2/L2,0,0;  
0,12*E*I2/L23,6*E*I2/L22,0,-12*E*I2/L23,6*E*I2/L22;  
0,6*E*I2/L22,4*E*I2/L2,0,-6*E*I2/L22,2*E*I2/L2;  
-E*A2/L2,0,0,E*A2/L2,0,0;  
0,-12*E*I2/L23,-6*E*I2/L22,0,12*E*I2/L23,-6*E*I2/L22;  
0,6*E*I2/L22,2*E*I2/L2,0,-6*E*I2/L22,4*E*I2/L2];
```

```
K3lokal=[E*A3/L3,0,0,-E*A3/L3,0,0;
```



```

0,12*E*I3/L3^3,6*E*I3/L3^2,0,-12*E*I3/L3^3,6*E*I3/L3^2;
0,6*E*I3/L3^2,4*E*I3/L3,0,-6*E*I3/L3^2,2*E*I3/L3;
-E*A3/L3,0,0,E*A3/L3,0,0;
0,-12*E*I3/L3^3,-6*E*I3/L3^2,0,12*E*I3/L3^3,-6*E*I3/L3^2;
0,6*E*I3/L3^2,2*E*I3/L3,0,-6*E*I3/L3^2,4*E*I3/L3];

K4lokal=[E*A4/L4,0,0,-E*A4/L4,0,0;
0,12*E*I4/L4^3,6*E*I4/L4^2,0,-12*E*I4/L4^3,6*E*I4/L4^2;
0,6*E*I4/L4^2,4*E*I4/L4,0,-6*E*I4/L4^2,2*E*I4/L4;
-E*A4/L4,0,0,E*A4/L4,0,0;
0,-12*E*I4/L4^3,-6*E*I4/L4^2,0,12*E*I4/L4^3,-6*E*I4/L4^2;
0,6*E*I4/L4^2,2*E*I4/L4,0,-6*E*I4/L4^2,4*E*I4/L4];

K5lokal=[E*A5/L5,0,0,-E*A5/L5,0,0;
0,12*E*I5/L5^3,6*E*I5/L5^2,0,-12*E*I5/L5^3,6*E*I5/L5^2;
0,6*E*I5/L5^2,4*E*I5/L5,0,-6*E*I5/L5^2,2*E*I5/L5;
-E*A5/L5,0,0,E*A5/L5,0,0;
0,-12*E*I5/L5^3,-6*E*I5/L5^2,0,12*E*I5/L5^3,-6*E*I5/L5^2;
0,6*E*I5/L5^2,2*E*I5/L5,0,-6*E*I5/L5^2,4*E*I5/L5];

%Transformeringsmatrise for element 2 og 4
L=[0,1,0,0,0,0;
-1,0,0,0,0,0;
0,0,1,0,0,0;
0,0,0,0,1,0;
0,0,0,-1,0,0;
0,0,0,0,0,1];

%Globale stivhetsmatriser for hvert element
K1global=K1lokal
K2global=L'*K2lokal*L
K3global=K3lokal
K4global=L'*K4lokal*L
K5global=K5lokal

%Global systemmatriser for stivhet
KS1=zeros(18);
KS2=zeros(18);
KS3=zeros(18);
KS41=zeros(18);
KS42=zeros(18);
KS43=zeros(18);
KS44=zeros(18);
KS5=zeros(18);

```

```

KS1(1:6,1:6)=K1global;
KS2(4:9,4:9)=K2global;
KS3(7:12,7:12)=K3global;
KS5(13:18,13:18)=K5global;
%KS4 må lages i 4 deler.
KS41(7:9,7:9)=K4global(1:3,1:3);
KS42(13:15,13:15)=K4global(4:6,4:6);
KS43(7:9,13:15)=K4global(1:3,4:6);
KS44(13:15,7:9)=K4global(4:6,1:3);
KS4=KS41+KS42+KS43+KS44;

%Lager global stivhetsmatrise
Kglobal=KS1+KS2+KS3+KS4+KS5

%Forskyvninger
%U=[U1x,U1y,U1v,U2x,U2y,U2v,U3x,U3y,U3v,U4x,U4y,U4v,U5x,U5y,U5
v,U6x,U6y,U6v] '

%Krefter
%F=[F1x,F1y,M1,F2x,F2y,M2,F3x,F3y,M3,F4x,F4y,M4,F5x,F5y,M5,F6x
,F6y,M6] '

%Utregning av forskyvninger
a=zeros(13);
a(1:12,1:12)=Kglobal(4:15,4:15);

b=zeros(13);
b1=Kglobal(17:17,4:15);
b2=Kglobal(4:15,17:17);
b3=Kglobal(17:17,17:17);

b(13:13,1:12)=b1;
b(1:12,13:13)=b2;
b(13:13,13:13)=b3;

Ku=a+b;

%Kjente krefter
Fkjent=[0,0,0,0,0,0,-6000,-1583,0,0,0,0,0];
Uukjent=inv(Ku)*Fkjent';
U=zeros(18,1);
U(4:15,1:1)=Uukjent(1:12,1:1);

```

$U(17:17, 1:1) = U_{\text{kjent}}(13:13, 1:1)$

$F = K_{\text{global}} * U$

Vedlegg V: ANSYS-kode for Testanalyse 1: SHELL181

!Forberedelser

/PREP7

ET,1,SHELL181

!Definering av konstante verdier

LENGDE=200 ! (mm)

BREDDE=100 ! (mm)

T_SKALL=1 ! (mm)

T_KJAERNE=14 ! (mm)

EX_SKALL=13000 ! (MPa)

GXY_SKALL=4000 ! (MPa)

PRXY_SKALL=0.28 !

EX_KJAERNE=100 ! (MPa)

GXY_KJAERNE=20 ! (MPa)

PRXY_KJAERNE=0.2 !

KRAFT=1100/11 ! (N)

!Materialegenskaper

!Skallmateriale

MP,EX,1,EX_SKALL

MP,EY,1,EX_SKALL

MP,EZ,1,EX_SKALL/2

MP,GXY,1,GXY_SKALL

MP,GYZ,1,GXY_SKALL/4

MP,GXZ,1,GXY_SKALL/4

MP,PRXY,1,PRXY_SKALL

MP,PRYZ,1,PRXY_SKALL

MP,PRXZ,1,PRXY_SKALL

!Kjærnemateriale

MP,EX,2,EX_KJAERNE

MP,EY,2,EX_KJAERNE

MP,EZ,2,EX_KJAERNE

MP,GXY,2,GXY_KJAERNE

MP,GYZ,2,GXY_KJAERNE

MP,GXZ,2,GXY_KJAERNE

MP,PRXY,2,PRXY_KJAERNE

MP,PRYZ,2,PRXY_KJAERNE

MP,PRXZ,2,PRXY_KJAERNE

!Geometri

K,1

K,2,LENGDE

K,3,LENGDE,BREDDE

```
K,4,,BREDDE
A,1,2,3,4
```

```
!Lagoppbygning
SECTYPE,1,SHELL,,
SECDATA,T_SKALL,1,,3
SECDATA,T_KJAERNE,2,,3
SECDATA,T_SKALL,1,,3
```

```
!Meshing
L,2,1
L,4,3
L,2,3
L,1,4
LSEL,S,LENGTH,,BREDDE
LESIZE,ALL,,,10!Antall elementer i bredderetning
LSEL,S,LENGTH,,LENGDE
LESIZE,ALL,,,20!Antall Elementer i lengderetning
AMESH,1
```

```
!Randbetingelser
NSEL,S,LOC,X,0
DSYM,ASYM,X
DSYM,ASYM,Z
```

```
NSEL,A,LOC,X,LENGDE
DSYM,ASYM,X
D,ALL,ROTZ,0
```

```
!Krefter
NSEL,S,LOC,X,0.5*LENGDE
NSEL,R,LOC,Y,0,BREDDE
F,ALL,FZ,-KRAFT
```

```
!Avslutning
/SOLU
SOLVE
/POST1
```

Vedlegg VI: ANSYS-kode for Testanalyse 2: SOLID45

!Forberedelser

/PREP7

ET,1,SOLID45

!Definering av konstante verdier

LENGDE=200

BREDDE=100

T_SKALL=1

T_KJAERNE=14

EX_SKALL=13000

GXY_SKALL=4000

PRXY_SKALL=0.28

EX_KJAERNE=100

GXY_KJAERNE=20

PRXY_KJAERNE=0.2

KRAFT=1100/11

!Materialegenskaper

!Skallmateriale

MP,EX,1,EX_SKALL

MP,EY,1,EX_SKALL

MP,EZ,1,EX_SKALL/4

MP,GXY,1,GXY_SKALL

MP,GYZ,1,GXY_SKALL

MP,GXZ,1,GXY_SKALL/4

MP,PRXY,1,PRXY_SKALL

MP,PRYZ,1,PRXY_SKALL

MP,PRXZ,1,PRXY_SKALL

!kjernemateriale

MP,EX,2,EX_KJAERNE

MP,EY,2,EX_KJAERNE

MP,EZ,2,EX_KJAERNE

MP,GXY,2,GXY_KJAERNE

MP,GYZ,2,GXY_KJAERNE

MP,GXZ,2,GXY_KJAERNE

MP,NUXY,2,PRXY_KJAERNE

MP,NUYZ,2,PRXY_KJAERNE

MP,NUXZ,2,PRXY_KJAERNE

!Geometri

K,1

K,2,LENGDE

K,3,LENGDE,BREDDE

```
K,4,,BREDDE
KGEN,2,1,4,1,,,T_SKALL
KGEN,2,1,4,1,,,T_KJAERNE+T_SKALL
KGEN,2,1,4,1,,,T_KJAERNE+2*T_SKALL
V,1,2,3,4,5,6,7,8
V,5,6,7,8,9,10,11,12
V,9,10,11,12,13,14,15,16
VGLUE,1,2,3
```

```
!Meshing
```

```
L,2,1
L,6,2
L,10,6
L,14,10
L,4,3
L,8,7
L,12,11
L,16,15
LSEL,S,LENGTH,,T_SKALL
LESIZE,ALL,,,2
LSEL,S,LENGTH,,T_KJAERNE
LESIZE,ALL,,,6
LSEL,S,LENGTH,,BREDDE
LESIZE,ALL,,,10
LSEL,S,LENGTH,,LENGDE
LESIZE,ALL,,,20
```

```
MAT,1
VMESH,1
MAT,2
VMESH,2
MAT,1
VMESH,3
```

```
!Randbetingelser
```

```
NSEL,S,LOC,X,0
NSEL,R,LOC,Z,0
DSYM,SYMM,X
DSYM,SYMM,Y
DSYM,SYMM,Z
```

```
NSEL,S,LOC,X,LENGDE
NSEL,R,LOC,Z,0
DSYM,SYMM,Z
```

```
!Krefter
NSEL,S,LOC,X,0.5*LENGDE,0.5*LENGDE
NSEL,R,LOC,Y,0,BREDDE
NSEL,R,LOC,Z,T_KJAERNE+2*T_SKALL
F,ALL,FZ,-KRAFT
```

```
!Avslutning
/SOLU
SOLVE
/POST1
```


Vedlegg VII: ANSYS-kode for Testanalyse 3: SOLID/SHELL

```
!Forberedelser
/PREP7
ET,1,SOLID45
ET,2,SHELL181

!Definering av konstante verdier
LENGDE=200
BREDDE=100
T_SKALL=1
T_KJAERNE=14
EX_SKALL=13000
GXY_SKALL=4000
PRXY_SKALL=0.28
EX_KJAERNE=100
GXY_KJAERNE=20
PRXY_KJAERNE=0.2
KRAFT=1100/11

!materialegenskaper
!Skallmateriale
MP,EX,1,EX_SKALL
MP,EY,1,EX_SKALL
MP,EZ,1,EX_SKALL/4
MP,GXY,1,GXY_SKALL
MP,GYZ,1,GXY_SKALL
MP,GXZ,1,GXY_SKALL/4
MP,PRXY,1,PRXY_SKALL
MP,PRYZ,1,PRXY_SKALL
MP,PRXZ,1,PRXY_SKALL
!Kjærnemateriale
MP,EX,2,EX_KJAERNE
MP,EY,2,EX_KJAERNE
MP,EZ,2,EX_KJAERNE
MP,GXY,2,GXY_KJAERNE
MP,GYZ,2,GXY_KJAERNE
MP,GXZ,2,GXY_KJAERNE
MP,NUXY,2,PRXY_KJAERNE
MP,NUYZ,2,PRXY_KJAERNE
MP,NUXZ,2,PRXY_KJAERNE
```

```
!Geometri
K,1
K,2,LENGDE
K,3,LENGDE,BREDDE
K,4,,BREDDE
K,5,,,T_KJAERNE
K,6,LENGDE,,T_KJAERNE
K,7,LENGDE,BREDDE,T_KJAERNE
K,8,,BREDDE,T_KJAERNE
```

```
V,1,2,3,4,5,6,7,8
A,1,2,3,4
A,5,6,7,8
```

```
!Lagoppbygning
SECTYPE,1,SHELL,,
SECDATA,T_SKALL/2,1,,3
SECDATA,T_SKALL/2,1,,3
```

```
!Meshing
L,2,1
L,4,3
L,6,5
L,8,7
L,2,3
L,4,1
L,7,6
L,8,5
L,5,1
L,6,2
L,7,3
L,8,4
LSEL,S,LENGTH,,T_KJAERNE
LESIZE,ALL,,,6
LSEL,S,LENGTH,,BREDDE
LESIZE,ALL,,,10
LSEL,S,LENGTH,,LENGDE
LESIZE,ALL,,,20
```

```
AMESH,1!shell181
AMESH,6!shell181
```

```
MAT,2
VMESH,1!solid45
```

!Randbetingelser

NSEL,S,LOC,X,0

NSEL,R,LOC,Z,0

DSYM,ASYM,X

DSYM,ASYM,Y

DSYM,ASYM,Z

NSEL,S,LOC,X,LENGDE

NSEL,R,LOC,Z,0

DSYM,ASYM,X

!Krefter

NSEL,S,LOC,X,0.5*LENGDE,0.5*LENGDE

NSEL,R,LOC,Y,0,BREDDE

NSEL,R,LOC,Z,T_KJAERNE

F,ALL,FZ,-KRAFT

!Avslutning

/SOLU

SOLVE

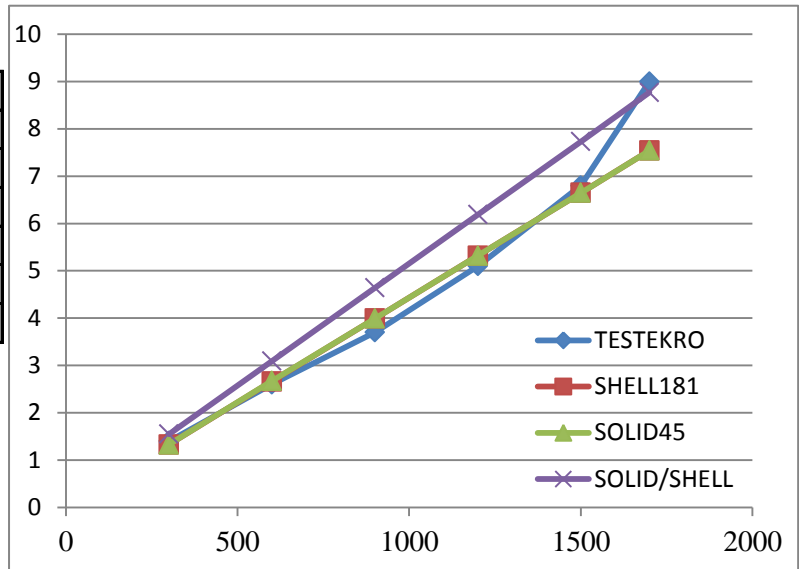
/POST1

Vedlegg VIII: Resultater for alle testanalyser

12 mm , 200x100

TEST: 4,5,6

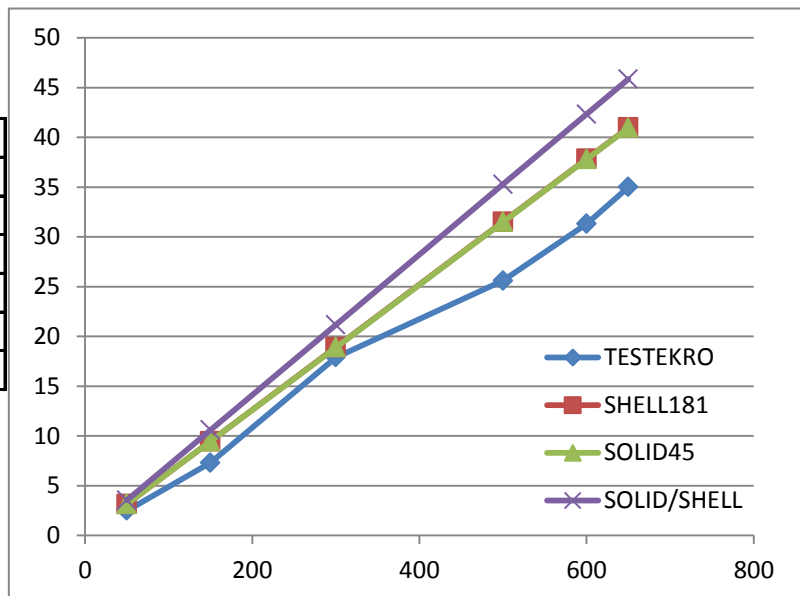
Kraft	Test Ekro	Shell181	Solid45	Solid/shell
300	1,4	1,33	1,33	1,55
600	2,6	2,66	2,67	3,09
900	3,7	3,99	3,99	4,64
1200	5,1	5,32	5,32	6,19
1500	6,8	6,65	6,65	7,73
1700	9	7,54	7,54	8,77



12 mm , 600x100

TEST: 7,8,9

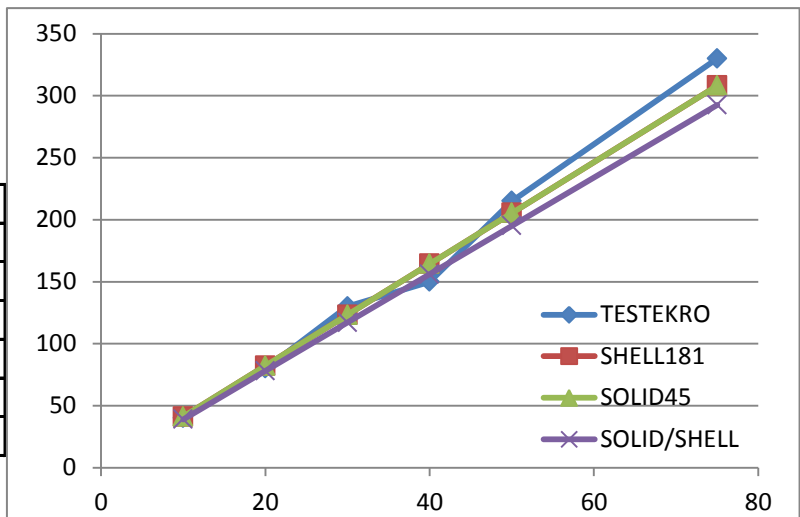
Kraft	Test Ekro	Shell181	Solid45	Solid/shell
50	2,5	3,15	3,15	3,53
150	7,3	9,46	9,45	10,6
300	17,9	18,91	18,9	21,16
500	25,6	31,52	31,5	35,27
600	31,3	37,83	37,8	42,32
650	35	40,98	40,95	45,85



12 mm , 2500x100

TEST: 10,11,12

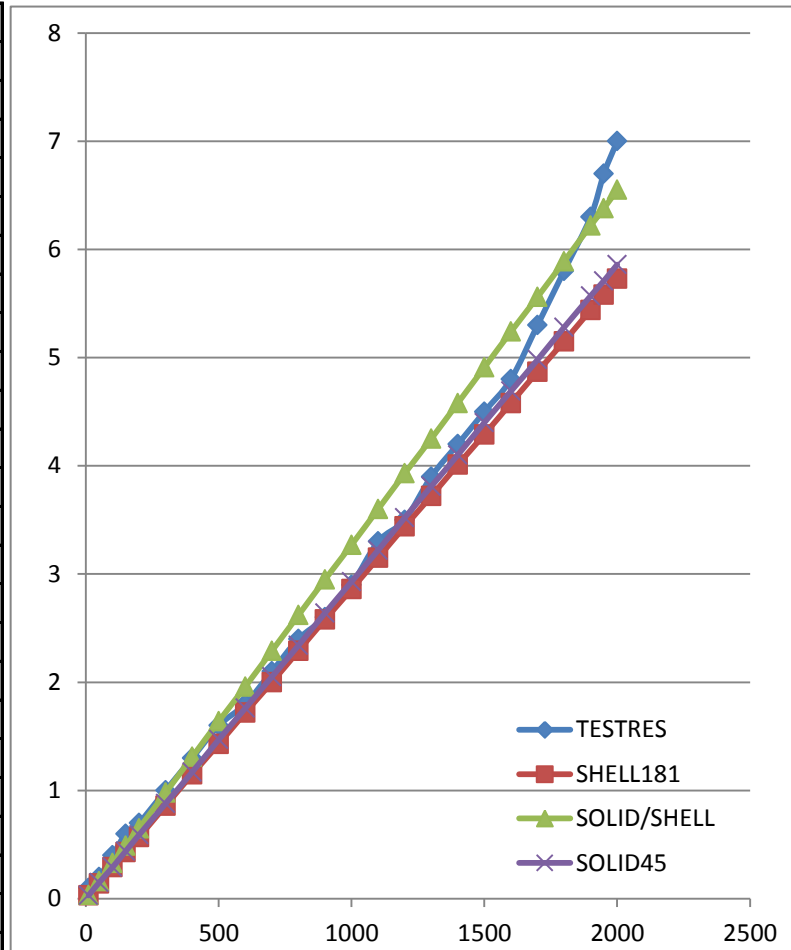
Kraft	Test Ekro	Shell181	Solid45	Solid/shell
10	40	41,09	41,09	39,01
20	80	82,18	82,18	78,02
30	130	123,27	123,3	117,03
40	150	164,36	164,4	156,05
50	215	205,46	205,4	195,06
75	330	308,18	308,2	292,59



16 mm, 200x100

TEST: 1,2,3

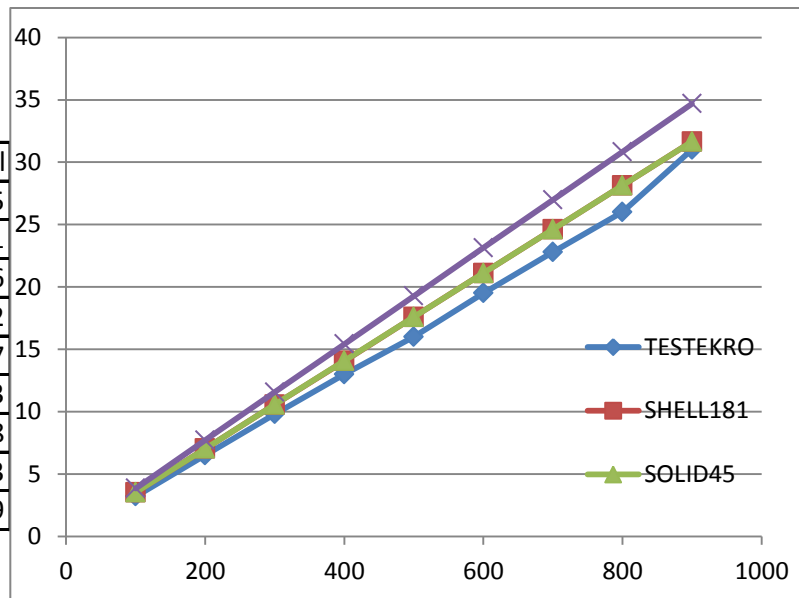
Kraft	Test Ekro	Shell181	Solid45	Solid/shell
10	0,1	0,03	0,03	0,033
50	0,2	0,14	0,15	0,16
100	0,4	0,29	0,29	0,33
150	0,6	0,43	0,44	0,49
200	0,7	0,57	0,59	0,65
300	1	0,86	0,88	0,98
400	1,3	1,15	1,17	1,31
500	1,6	1,43	1,47	1,64
600	1,8	1,72	1,76	1,96
700	2,1	2	2,05	2,29
800	2,4	2,29	2,34	2,62
900	2,6	2,58	2,64	2,95
1000	2,9	2,86	2,93	3,27
1100	3,3	3,15	3,22	3,6
1200	3,5	3,44	3,52	3,93
1300	3,9	3,72	3,81	4,25
1400	4,2	4,01	4,1	4,58
1500	4,5	4,29	4,4	4,91
1600	4,8	4,58	4,69	5,24
1700	5,3	4,87	4,98	5,56
1800	5,8	5,15	5,28	5,89
1900	6,3	5,44	5,57	6,22
1950	6,7	5,58	5,71	6,38
2000	7	5,73	5,86	6,55



16 mm, 600x100

TEST: 13,14,15

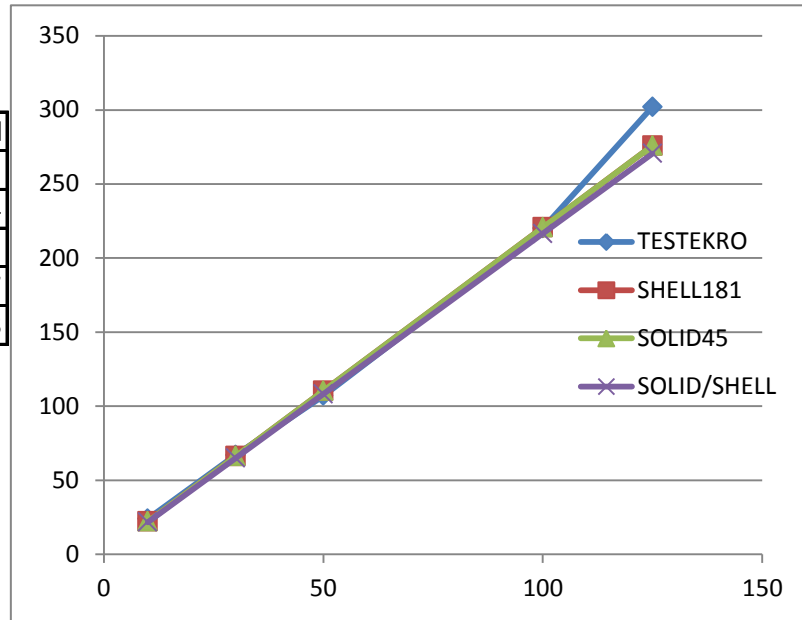
Kraft	Test Ekro	Shell181	Solid45	Solid/shell
100	3,2	3,52	3,52	3,85
200	6,5	7,03	7,03	7,71
300	9,8	10,55	10,55	11,56
400	13	14,06	14,07	15,42
500	16	17,58	17,58	19,27
600	19,5	21,1	21,1	23,13
700	22,8	24,61	24,61	26,98
800	26	28,13	28,13	30,83
900	31	31,65	31,65	34,69



16 mm , 2500x100

TEST: 16,17,18

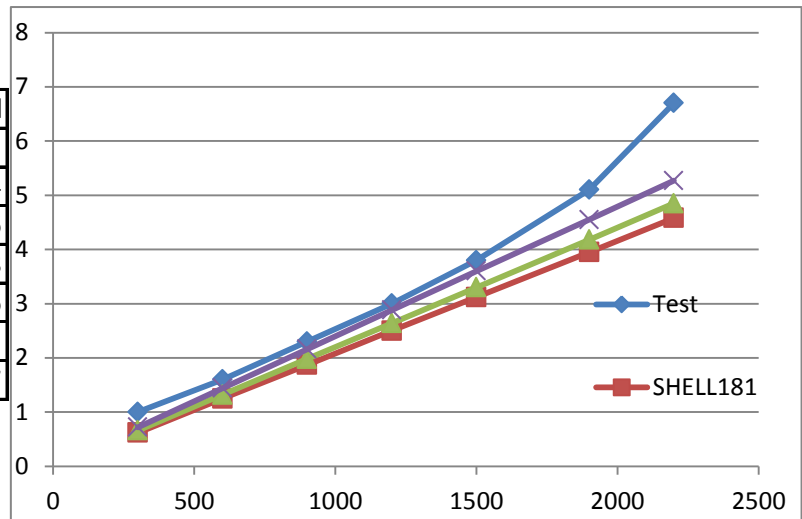
Kraft	Test Ekro	Shell181	Solid45	Solid/shell
10	24	22,07	22,07	21,65
30	67	66,22	66,21	64,94
50	107	110,36	110,4	108,23
100	220	220,72	220,7	216,47
125	302	275,9	275,9	270,58



20 mm , 200x100

TEST: 19,20,21

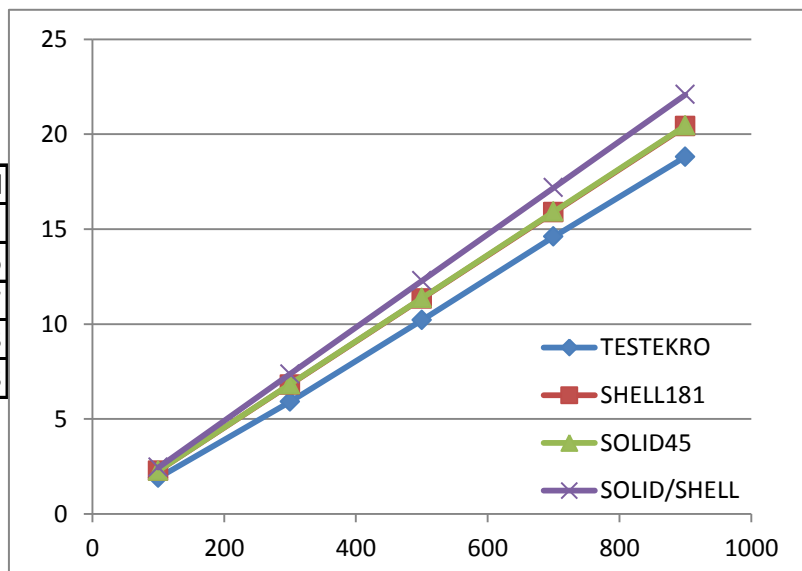
Kraft	Test Ekro	Shell181	Solid45	Solid/shell
300	1	0,62	0,66	0,72
600	1,6	1,25	1,32	1,44
900	2,3	1,87	1,98	2,16
1200	3	2,5	2,64	2,88
1500	3,8	3,12	3,3	3,6
1900	5,1	3,95	4,18	4,55
2200	6,7	4,58	4,85	5,27



20 mm , 600x100

TEST: 22,23,24

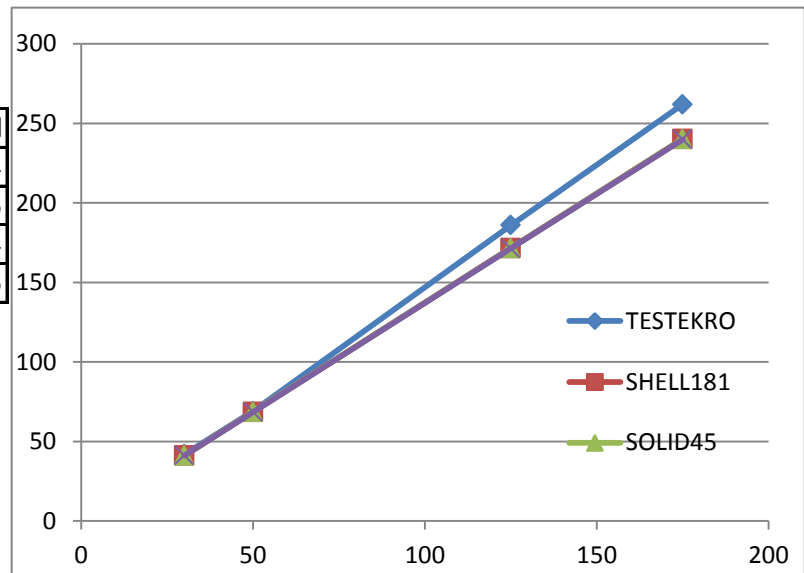
Kraft	Test Ekro	Shell181	Solid45	Solid/shell
100	1,9	2,27	2,27	2,45
300	5,9	6,8	6,82	7,36
500	10,2	11,34	11,36	12,27
700	14,6	15,88	15,91	17,18
900	18,8	20,41	20,45	22,08



20 mm , 2500x100

TEST: 25,26,27

Kraft	Test Ekro	Shell181	Solid45	Solid/shell
30	42	41,19	41,19	41,14
50	69	68,65	68,65	68,56
125	186	171,64	171,6	171,4
175	262	240,29	240,3	239,96



Vedlegg IX: ANSYS-kode for nedbøyning av topplate

```
!Forberedelser
/PREP7
ET,1,SOLID45

!Definering av konstanter
LENGDE=1250
BREDDE=500
T_SKALL=1
T_KJAERNE=14
EX_SKALL=13000
GXY_SKALL=4000
PRXY_SKALL=0.28
EX_KJAERNE=100
GXY_KJAERNE=20
PRXY_KJAERNE=0.2
KRAFT=1250/20

!Materialegenskaper
!Skallmateriale
MP,EX,1,EX_SKALL
MP,EY,1,EX_SKALL
MP,EZ,1,EX_SKALL/4
MP,GXY,1,GXY_SKALL
MP,GYZ,1,GXY_SKALL
MP,GXZ,1,GXY_SKALL/4
MP,PRXY,1,PRXY_SKALL
MP,PRYZ,1,PRXY_SKALL
MP,PRXZ,1,PRXY_SKALL

!kjærnemateriale
MP,EX,2,EX_KJAERNE
MP,EY,2,EX_KJAERNE
MP,EZ,2,EX_KJAERNE
MP,GXY,2,GXY_KJAERNE
MP,GYZ,2,GXY_KJAERNE
MP,GXZ,2,GXY_KJAERNE
MP,NUXY,2,PRXY_KJAERNE
MP,NUYZ,2,PRXY_KJAERNE
MP,NUXZ,2,PRXY_KJAERNE

!Geometri
K,1
```

```
K,2,LENGDE,BREDDE/2
K,3,LENGDE,-BREDDE/2
KGEN,2,1,3,1,,,T_SKALL
KGEN,2,1,3,1,,,T_KJAERNE+T_SKALL
KGEN,2,1,3,1,,,T_KJAERNE+2*T_SKALL
```

```
V,1,2,3,4,5,6
V,4,5,6,7,8,9
V,7,8,9,10,11,12
VGLUE,1,2,3
```

```
!Meshing
```

```
MAT,1
VMESH,1
MAT,2
VMESH,2
MAT,1
VMESH,3
```

```
!Krefter
```

```
NSEL,S,LOC,X,0.85*LENGDE,LENGDE
NSEL,R,LOC,Y,0.15*BREDDE,-0.15*BREDDE
NSEL,R,LOC,Z,T_KJAERNE+2*T_SKALL
F,ALL,FZ,-KRAFT
```

```
!Avslutning
```

```
/SOLU
SOLVE
/POST1
```

Veldegg X: Geometri til full analyse i ANSYS

```
!Forberedelser
/PREP7
ET,1,SHELL181
```

```
!Definering av konstanter
LENGDE=5000 !(mm)
BREDDE=500 !(mm)
HOYDE=200 !(mm)
T_SKALL=1 !(mm)
T_KJAERNE=14 !(mm)
EX_SKALL=13000 !(MPa)
GXY_SKALL=4000 !(MPa)
PRXY_SKALL=0.28 !
EX_KJAERNE=100 !(MPa)
GXY_KJAERNE=20 !(MPa)
PRXY_KJAERNE=0.2 !
F1=167/9 !(N)
Q3=368 !(N)
```

```
!Materialegenskaper
!Skallmateriale
MP,EX,1,EX_SKALL
MP,EY,1,EX_SKALL
MP,EZ,1,EX_SKALL/2
MP,GXY,1,GXY_SKALL
MP,GYZ,1,GXY_SKALL/4
MP,GXZ,1,GXY_SKALL/4
MP,PRXY,1,PRXY_SKALL
MP,PRYZ,1,PRXY_SKALL
MP,PRXZ,1,PRXY_SKALL
!Kjærnemateriale
MP,EX,2,EX_KJAERNE
MP,EY,2,EX_KJAERNE
MP,EZ,2,EX_KJAERNE
MP,GXY,2,GXY_KJAERNE
MP,GYZ,2,GXY_KJAERNE
MP,GXZ,2,GXY_KJAERNE
MP,PRXY,2,PRXY_KJAERNE
MP,PRYZ,2,PRXY_KJAERNE
MP,PRXZ,2,PRXY_KJAERNE
```

!Geometri

K,1

K,2,,BREDDE

K,3,LENGDE/4,BREDDE/2

K,4,LENGDE/2

K,5,LENGDE/2,BREDDE

K,6,3/4*LENGDE,BREDDE/2

K,7,LENGDE

K,8,LENGDE,BREDDE

K,17,, -485

K,18,, 985

K,19,875

K,20,875,BREDDE

KGEN,2,1,8,1,,,HOYDE

KGEN,2,17,20,1,,,HOYDE

A,1,19,23,9

A,19,4,12,23

A,4,7,15,12

A,7,8,16,15

A,8,5,13,16

A,2,20,24,10

A,20,5,13,24

A,1,3,2

A,1,19,4,3

A,2,3,5,20

A,3,4,5

A,4,6,5

A,4,7,6

A,5,6,8

A,6,7,8

A,9,11,10

A,9,23,12,11

A,10,11,13,24

A,12,14,13

A,11,12,13

A,12,15,14

A,13,14,16

A,14,15,16

A,1,3,11,9
A,2,3,11,10
A,3,4,12,11
A,3,5,13,11
A,4,6,14,12
A,5,6,14,13
A,6,7,15,14
A,6,8,16,14

A,1,17,19
A,9,21,23
A,2,20,18
A,10,24,22
A,17,19,23,21
A,18,20,24,22
A,1,17,21,9
A,2,18,22,10

!Lagoppbygning
SECTYPE,1,SHELL,,
SECDATA,T_SKALL,1,,3
SECDATA,T_KJAERNE,2,,3
SECDATA,T_SKALL,1,,3

!Meshing
MSHAPE,1,2D
AMESH,ALL