

KOMPOSITTMATERIALER - VERIFISERING AV MATERIAL- OG STYRKEEGENSKAPER TIL BRUK I MOTORSYKKELCHASSIS

COMPOSITES - VERIFICATION OF MATERIAL- AND STRENGTH PROPERTIES FOR USE IN MOTORCYCLE CHASSIS

ESPEN KULTORP

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP
INSTITUTT FOR MATEMATISKE REALFAG OG TEKNOLOGI
MASTEROPPGAVE 30 STP, 2012





PROSJEKT ROSKVA

Komposittmaterialer - Verifisering av material- og styrkeegenskaper til bruk i motorsykelchassis

Av Espen Kultorp



Mastergradsarbeide ved Universitetet for miljø- og biovitenskap
Institutt for matematiske realfag og teknologi
Vårsemesteret 2012



FORORD

Denne masteroppgaven er det avsluttende kapitelet på en to år lang prosess med byggingen av en elektrisk motorsykkel. Oppgaven er en del av studieprogrammet Maskin-, Prosess- og Produktutvikling ved Institutt for matematiske realfag og teknologi (IMT) ved Universitetet for miljø- og biovitenskap (UMB).

Jeg har alltid vært interessert i maskinteknikk, og bestemte tidlig at det var siv. ing. i maskin jeg skulle bli. Etter nesten fem år med studier ønsker jeg derfor å bruke masteroppgaven til noe jeg alltid har hatt lyst til og har vært interessert i, nemlig å kunne konstruere og bygge en motorsykkel med bruken av moderne dataprogrammer og materialer. Min interesse for motorsykler ble vekket etter at jeg startet med motocross, som har gjort meg fascinert og interessert i teknologien som gjør det mulig å kombinere høye ytelser med kjøre glede og lav vekt.

Motivasjonen og drivkraften bak prosjektet er ikke bare egen motorsykkelinteresse, men også muligheten til å få være med på å utvikle noe som ingen andre tidligere har gjort, nemlig byggingen av en elektrisk motorsykkel med et selv bærende karosseri bestående utelukkende av komposittmaterialer. Dette er unikt i motorsykkelsammenheng og vil vise dagens motorsyklister at elektrisk drift kan være et seriøst alternativ.

Parallelt med arbeidet med oppgave vil jeg også ta del i byggingen av motorsykkelen, hvilket vil kreve god disponering og planlegging av arbeidstiden, da det er et svært tidkrevende arbeid. Jeg mener prosjektet er unikt i mastersammenheng da det kobler teoretisk kunnskap med praktisk gjennomføring; det å kunne konstruere for deretter å bygge vil kreve løsninger som ikke bare ser bra ut på papir, men også må fungere i praksis, akkurat slik som i en sivilingeniørs arbeidsdag.

Komposittmaterialer er et omfattende område med tung teori, og jeg vil derfor takke Bendik Sagsveen ved Forsvarets forskningsinstitutt, 1.amanuensis Geir Terjesen og tidligere student Eirik L. Hånes for hjelp til datamodeller og teori. Jeg ønsker også å utrette en takk min veileder 1. amanuensis Jan Kåre Bøe for gode råd til skriving, overingeniør Andreas Flø og IMTs verksted for hjelp i forbindelse med materialtesting, og gruppe medlem Odd Arne Skjong for fotografering av testing, i tillegg til de andre gruppe medlemmene for godt samarbeid denne travle våren.

For økonomisk og annen støtte til gjennomføringen av Prosjekt Roskva ønsker jeg først og fremst å takke min veileder 1. amanuensis Jan Kåre Bøe, administrerende direktør ved UMB Siri M. Løksa, instituttstyret - og verkstedet ved IMT i tillegg til alle sponsorer og samarbeidspartnere. Uten denne støtten hadde ikke Prosjekt Roskva blitt noe annet enn et elektrisk motorsykkelkonsept inneklemt mellom to permer.

Espen Kultorp, Ås den 15.05.12

Espen Kultorp



SAMMENDRAG

For å sikre målet om kjøreglede, rask akselerasjon og god rekkevidde skal Roskva bygges i komposittmaterialer, hvilket har et høyere styrke/vekt forhold sammenlignet med metaller.

Denne oppgavens problemstilling er hvordan komposittmaterialer skal benyttes til konstrueringen av et motorsykelchassis slik at styrke/vekt forholdet holdes optimalt. Målet med oppgaven er å analysere og verifisere material- og styrkeegenskaper til komposittmaterialer til bruk i motorsykelchassis.

Et komposittmateriale er et ortotrop materiale, dvs. ulike egenskaper i ulike retninger pga. fiberretningen. Karbonfiber er ekstremt sterkt dersom det blir belastet parallelt med fiberretningen, men svakt dersom det blir belastet normalt på fibrene. Dette krever at fiberretningen tilpasses belastningene i chassiset, hvilket gjøres ved bruken av laminater, som består av fiberlag med ulike fiberretninger limt sammen slik at styrken blir høy i ønskede retninger. Den valgte fiberkonfigurasjonen består av åtte lag i rekkefølgen $[0^\circ, 90^\circ, +/- 45^\circ]_s$, hvilket har høy kapasitet til å ta opp strekk-, bøyning- og torsjonskrefter kombinert med lav fare for at fiberlagene skilles fra hverandre (delaminering). Rundt bolthull vil en sandwichkonfigurasjon benyttes bestående av Divinycell kjernemateriale omgitt av fiberkonfigurasjonen $[90^\circ, 0^\circ, +/- 45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, +/- 45^\circ]$ på hver side. I drivakslingen vil det kun benyttes lag med retningene $+/- 45^\circ$ da disse er gunstige til å ta opp momentlast.

Karbonfiberarmert plast er det vanligste komposittmaterialet på markedet i dag til bruk der hvor lav vekt og høy styrke er viktig. Siden karbonfiber tåler slagarted påkjenning dårlig kan det ytterste laget byttes ut med Kevlarfiber da dette har høy slagfasthet. I deler av chassiset hvor det er mye vibrasjoner kan også den miljøvennlige fibertypen Flax benyttes. For alle fibertypene benyttet i Roskva benyttes epoxy som matrisemateriale grunnet dets gode egenskaper mtp. styrke, vekt og fleksibilitet.

FEM - analyse av karbonfiberarmert plast (og andre komposittmaterialer) er ikke tilstrekkelig til dimensjonering av et motorsykelchassis grunnet variablene knyttet til bla. støpeprosessen og bearbeidingen. Tre ulike tester ble derfor valgt ut. For verifisering av datamodell ble det utført en strekktest hvilket ga en dimensjonerende spenning på 337 MPa. I den andre testen ble det utført en utrivning/bolttest i sandwichkonfigurasjon for å teste innfestninger og i den tredje torsjonstesting av drivaksling. De dimensjonerende spenningene ble på henholdsvis 200 MPa i hullkanttrykk for utrivningstesten, mens den tillatte skjærspenningen for akslingen ble på 70,4 MPa.

Styrkeberegning i et FEM program foregår ved at en konstruksjon deles opp i elementer, mesh, hvis resultat avhenger av kvaliteten på meshet. Bruken av FEM - analyse krever at brukeren setter seg inn i begrensninger denne metoden har, og hva en bør være ekstra oppmerksom på: singularitetsfeil, konvergenskriteriet, spenningskonsentrasjoner og kontroll vha. håndberegning. Dersom en tynnvegget del blir meshet bør skallelementer benyttes.

Testresultatene ble til slutt sammenlignet med analyser. For strekktesten stemte resultatene overens, og datamodellen ble dermed verifisert. For utrivningstesten samsvarte ikke testresultatet med analysen da det ga en for høy sikkerhetsfaktor mot brudd, mens det for drivakslingen kun var et mindre avvik. Dette viser nødvendigheten med bruk av testing når det dimensjoneres i komposittmaterialer sammenlignet med metaller.



ABSTRACT

In order to achieve our goal of combining the enthusiasm of driving with rapid acceleration and adequate range Roskva will be made out of composites, which have a greater strength/weight ratio compared to metals.

The problem of this thesis is how composites should be used in a motorcycle chassis to keep the strength/weight ratio as high as possible. The goal is to verify and analyze the material- and strength properties of composites for use in a motorcycle chassis.

A composite material is an orthotropic material, which means that its mechanical properties depends upon the angle of the fibers; carbon fiber is very strong if loaded parallel to the fiber direction, but weak when loaded normal to the fiber direction. This means that the direction must be chosen in a way which accommodate for the different loads in a chassis. This can be done by the use of a laminate which consists of layers of fiber on top of each other with varying fiber angles. This results in the achievement of high strength in the preferred direction(s). The stacking sequence, or configuration, chosen is eight layers in the order $[0^\circ, 90^\circ, +/- 45^\circ]_s$, due to its good mechanical properties when subjected to forces in tension, bending and torsion. Another important quality is that the risk of delamination is low (separation of the layers). Around bolt holes a sandwich configuration consisting of Divinycell core material surrounded by carbon fiber with a configuration of $[90^\circ, 0^\circ, +/- 45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, +/- 45^\circ]$ is used on either sides. For the drive shaft layers of $+/- 45^\circ$ will be used due to their high strength when subjected to torsional loads.

Of the composites currently on the market today carbon fiber reinforced plastics is the preferred choice in applications where high strength and low weight are important. Since carbon fiber has a low impact resistance the outer layer can be replaced by Kevlar which is well known for its high impact resistance. In parts of the chassis where vibrations can be a problem the environmentally friendly Flax fiber is suitable. For all the different fiber materials used in Roskva epoxy is the matrix material of choice due to its combination of strength, weight and flexibility.

FEA - analysis of carbon fiber (and other composites) is not sufficient enough when dimensioning a motorcycle chassis because of the many variables involved in the molding- and machining process among others. Three different test were therefore chosen. For verification of the computer/material model a standard tension test was used, which resulted a tensile stress of 337 MPa. The second test was a bolt test in a sandwich configuration for testing fastening points and the third a torsion test of a drive shaft. The critical stresses were respectively a maximum bearing stress of 200 MPa for the bolt test and a torsional shear stress of 70,4 MPa for the drive shaft.

An FEA - analysis works by dividing a structure into elements, a mesh, in which the results depend upon the quality of. In order to be used properly the FEA - analysis requires its user to pay attention to the following: error due to singularity, criteria of convergence, stress concentration and control calculate the results. If a thin walled structured are going to be meshed, shell elements should be used

At the end the test results were compared to the analysis. The results from the tension test corresponded to the analysis and the computer/material model was therefore verified. The analysis of the bolt test gave a too high safety factor compared to the test, but the analysis of the drive shaft corresponded with only a minor difference. This shows the necessity of doing tests when working with composites.



INNHold

	Side
FORORD	III
SAMMENDRAG	IV
ABSTRACT	V
1 INNLEDNING	9
1.1 Bakgrunn	9
1.2 Tidligere arbeid	10
1.3 Ansvarsområder	11
1.4 Problemstillinger	12
2 PROSJEKTPLANLEGGING	13
2.1 Målsettinger	13
2.1.1 Hovedmålsetting	13
2.1.2 Prosesstrinn og delmål	13
2.2 Begrensninger	14
2.3 Arbeidsmetoder	15
2.4 Drøfting av prosenstrinn	16
3 TERMINOLOGI	17
3.1 Begreper	17
3.2 Symboler	18
3.3 Formler	20
4 KOMPOSITTMATERIALER	23
4.1 Kompositteori	23
4.1.1 Fiberarmert plast – et ortotrop materiale	23
4.1.2 Matrisemateriale - epoxy	24
4.1.3 Laminatteori	25
4.2 Karbonfiberarmert plast	34
4.2.1 Struktur og oppbygning	34
4.2.2 Karbonfiber – et sprøtt materiale	35
4.2.3 Noen viktige svakheter ved bruken av karbonfiberarmert plast	36
4.2.4 Utmatting i karbonfiberarmert plast	40
4.2.5 Oppsummering av fordeler/ulemper	46



4.3	FLAX – det grønne alternativet	46
4.3.1	Mekaniske egenskaper	46
4.3.2	Implementering av FLAX i laminat.....	47
4.4	Kevlar/aramid fiber.....	48
4.4.1	Mekaniske egenskaper	48
4.4.2	Implementering av Kevlar i laminat	49
4.5	Valg av fiberkonfigurasjon og duktype.....	51
4.5.1	Fiberkonfigurasjon i chassis.....	51
4.5.2	Fiberduker – biaksiale vs. uniaksiale	52
4.6	Kjernemateriale – Divinycell.....	54
4.6.1	Mekaniske egenskaper	55
4.6.2	Implementering i ramme.....	55
5	FORSØKSOPPLEGG OG TESTING	56
5.1	Måling av strekkfasthet.....	56
5.1.1	Formål.....	56
5.1.2	Utforming	56
5.1.3	Testprosedyre	58
5.1.4	Resultat.....	59
5.1.5	Konklusjon	65
5.2	Utrivning/bolttest	66
5.2.1	Formål.....	66
5.2.2	Utforming av prøvebiter - Sandwich	66
5.2.3	Testprosedyre.....	67
5.2.4	Resultat.....	69
5.2.5	Konklusjon	72
5.3	Torsjonstesting av drivaksling.....	72
5.3.1	Formål.....	72
5.3.2	Teori.....	73
5.3.3	Utforming	74
5.3.4	Testprosedyre.....	76
5.3.5	Resultat.....	77
5.3.6	Konklusjon	81
6	FEM - ANALYSE AV MATERIALTESTER.....	82
6.1	Mesh	82
6.1.1	Elementtyper	83
6.1.2	Krav til elementer	85
6.2	Vanlige feil i FEM analyse	85



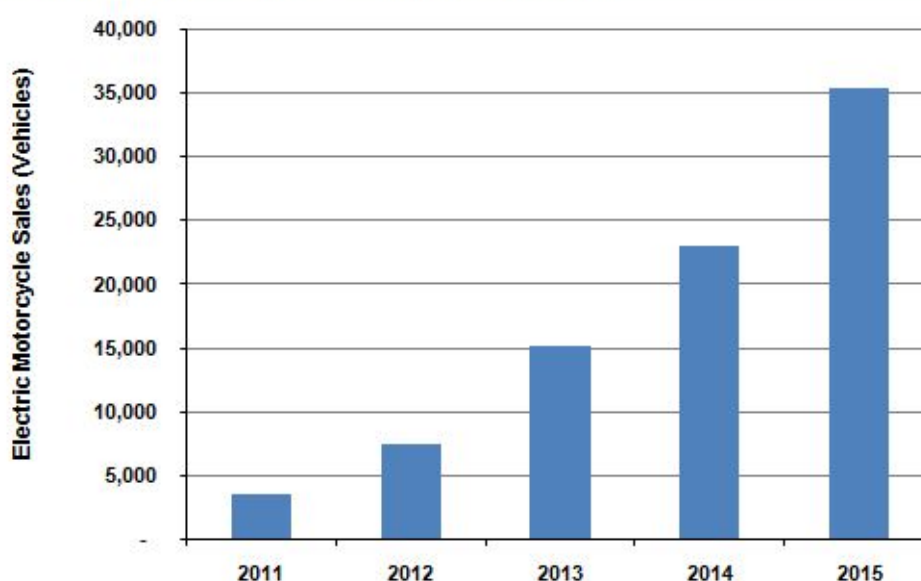
6.2.1	Singularitetsfeil	85
6.2.2	Konvergenskriteriet	86
6.2.3	Håndberegninger og gjennomsnittspenninger	86
6.2.4	Antall elementer i tykkelse	87
6.3	Input til datamodell	89
6.4	Analyse av prøvestaver	90
6.5	Analyse av bolttest.....	92
6.5.1	Spenningsplot	93
6.5.2	Tsai - Wu bruddkriteriet	94
6.5.3	Interlaminære skjærspenninger	96
6.6	Analyse av torsjonstest	97
6.7	Oppsummering	100
7	ØKONOMI.....	101
8	PROSESSDISKUSJON.....	103
9	KONKLUSJON	104
9.1	Resultater og anbefalinger	105
9.2	Videre arbeid	107
10	REFERANSER	108
VEDLEGG.....	111

1 INNLEDNING

1.1 Bakgrunn

Det er ingen tvil om at forbrenningsmotoren er på vei ut og at elektriske motorer er kommet for å bli. Etterhvert som batteriteknologien blir bedre og rekkevidden kan konkurrere med bensinmotoren vil elektriske biler og motorsykler bli et vanlig syn langs norske veier. I dag er elektriske biler langt fremme med biler som Mitsubishi MiEV og Nissan Leaf de to siste årene som seriøse alternativer. På motorsykkelfronten er det svært lite utbredt med elektrisk drift (noen få produsenter finnes i USA), men historien har vist at motorsykelindustrien følger trendene til bilindustrien, og forskningen viser at den kommer til å gjøre det også i fremtiden (Figur 1-1).

Annual Electric Motorcycles Sales, United States: 2011-2015



Figur 1-1: Anslått antall elektriske motorsykler solgt i USA. En stor økning er ventet [60]

Denne masteroppgaven er en avslutning på et to år langt studentprosjekt ved UMB. Våren 2010 bestemte undertegnede seg sammen med medstudentene Odd Arne Skjong og Hans Ola Krog for å konstruere og bygge vår egen elektriske motorsykel ved navn Roskva, grunnet egen interesse og det faktum at vi ville gjøre noe praktisk på universitetet. I 2011 ble medstudentene Lars Norberg og Erik Olsvik med på laget.

Kort fortalt skal Roskva være et alternativ til dagens bensindrevne motorsykler; noe som motorsykelinteresserte kunne tenke seg og kjøpe. Dagens elektriske motorsykler lider ofte av dårligere chassis, bremses og demping sammenlignet med de bensindrevne alternativene. Sammen med de fire andre medstudentene på prosjektet vil vi vise at kjøreglede og elektrisk drift faktisk lar seg kombinere. Fremtiden er elektrisk – fremtiden er Roskva.

Forfatteren vil med denne masteroppgaven ta del i denne utviklinga. Roskva skal være lett slik at kjøregleden og rekkevidden blir størst mulig, og vil derfor bli bygget hovedsakelig i karbonfiberarmert plast. Problemet med komposittmaterialer er at en FEM - analyse ikke er tilstrekkelig til dimensjonering da det er mange variabler som støpeprosessen, bearbeiding og fiberretninger m.m. Det vil derfor kreve mye



materialtesting. Mitt område er materialer og forfatteren vil gjennom lesing, regning, FEM - analyse og testing av materialer gi råd og tips til mine gruppemedlemmer om hvordan komposittmaterialer bør implementeres i motorsykkelen på en optimal måte.

1.2 Tidligere arbeid

Det hele startet som nevnt i 2010 og det har derfor blitt utført en del arbeid som omhandler Roskva før masteroppgavene. Dette er på totalt rundt 60 studiepoeng fordelt mellom ulike fag ved universitetet. Med unntak av markedsføringsoppgaven som er skrevet ved institutt for økonomi ressursforvaltning (IØR) er oppgavene skrevet ved institutt for matematiske realfag og teknologi (IMT).

- Roskva, TIP200 - Produktutvikling og produktdesign (10 p) (IMT, høsten 2010)
 - Utredning av motorsykelkonsept.
 - Av Hans Ola Krog [4].

- Roskva - Et forprosjekt, Frie emner (5 p) (IMT, våren 2011)
 - Utredning av målgruppe, konkurrenter, tekniske løsninger og enkel analyse.
 - Av Espen Kultorp og Odd Arne Skjong [14].

- Roskva - Finally, It's Fun to be Green, AOS 120 - Markedsføring (5 p) (IØR, våren 2011)
 - Markedsføringsprosjekt, utredning av målgruppe, slagord m.m.
 - Av Espen Kultorp og Odd Arne Skjong [13].

- Roskva - An Aerodynamical Analysis, TMP 261 - Varme og strømnings simulering (5 p) (IMT, våren 2011)
 - Aerodynamisk analyse av konsepttegning fra forprosjektet.
 - Av Espen Kultorp og Odd Arne Skjong [12].

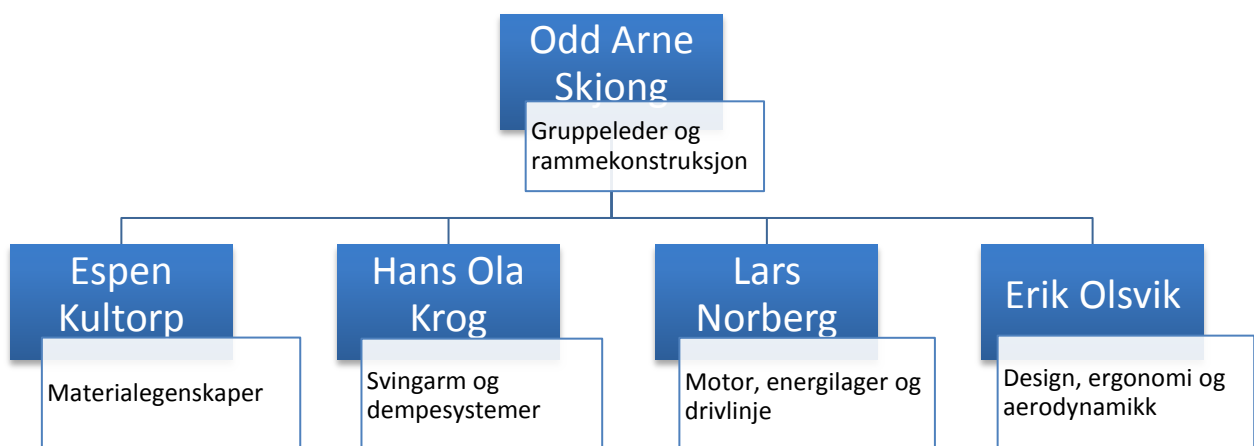
- Prosjekt Roskva i faget TIP300 - Konsept og Produktrealisering (10 p) (IMT, høsten 2012) bestående av tre delprosjekter:
 - Ramme av Odd Arne Skjong [11].
 - Dempersystemer av Hans Ola Krog [3].
 - Konseptutredning motor, energilagring og drivlinje av Lars Norberg [8].

1.3 Ansvarsområder



Figur 1-2, Gruppebilde av Roskva. F.v: Lars Norberg, Erik Olsvik, Hans Ola Krog, Odd Arne Skjong og Espen Kultorp (forfatter)

Gruppas fem medlemmer (Figur 1-2) har ulike ansvarsområder som vist på Figur 1-3. Dette betyr at det leveres fem individuelle masteroppgaver. Mitt ansvarsområde ble kompositter og dets materialegenskaper da dette sto igjen som en viktig del av prosjektet. Dette bør gjøres som en egen masteroppgave, da dette er et omfattende og viktig emne.



Figur 1-3: De fem ulike ansvarsområder til gruppemedlemmene [23]



1.4 Problemstillinger

Bruken av komposittmateriale i Roskva medfører en rekke teoretiske og praktiske utfordringer. De teoretiske er bla. beregningsgrunnlaget, tilnærminger og det å sette begrensningene. Når det gjelder de praktiske er utfordringene de mange variablene som støpeprosess og bearbeiding m.m., samt arbeidet med å finne ut hvilke tester som lar seg gjennomføre med testutstyret som er til disposisjon på universitetet, og hva som evt. må kjøpes inn av komponenter. Videre må testresultatene tolkes og sammenlignes med FEM - analyse. I tillegg er det en rekke bruddårsaker som må undersøkes ved testing, mtp. komposittmaterialenes fysiske egenskaper og urenheter/kjerver ved støping og bearbeiding. Dette er delt opp i følgende problemstillinger:

- **Hovedproblemstilling**
Hvordan implementere komposittmaterialer til å konstruering av motorsykelchassis slik at høy styrke og lavest mulig vekt kombineres på en optimal måte. Dette medfører bruken av FEM programmer og materialtesting til verifisering av datamodell m.m.
- **Materialer og dets egenskaper**
Hvilke materialer og materialkonfigurasjoner er best egnet til bruk i et chassis med spesiell vekt på de ortotropiske egenskapene til karbonfiberen? Dette gjelder for områder med kun karbonfiberarmert plast og der hvor det benyttes kjernemateriale og/eller andre komposittmaterialer.
- **Støping og sammenstilling**
På hvilken måte bør chassiset støpes, mtp. fiberretninger og implementering av festepunkter for å unngå materialsvikt og holde konstruksjonen innenfor gitte kriterier med tanke på styrke og vekt?
- **Sikkerhet**
Hvilke dimensjonerende spenninger bør benyttes mot brudd og utmatting og hvilke parametere skal benyttes i materialmodellen i FEM - analysene?
- **Økonomi**
Utarbeide regnskap for egeninnsatsen benyttet i de ulike delene av oppgaven, samt et eget regnskap for forsøksdelen med oversikt over innkjøp, verkstedsarbeid og bruk av testmaskin.

2 PROSJEKTPLANLEGGING

Etter problemstillingene ble definert hoved- og delmålsettinger.

2.1 Målsettinger

I dette prosjektet er det satt en hovedmålsetting som er delt inn i fem delmålsettinger. Dette vil gi en oversikt over de viktige delen av oppgaven og dermed sørge for at tiden disponeres riktig og at alle punkter blir utført.

2.1.1 Hovedmålsetting

Hovedmålsettingen utarbeidet i samarbeid med veileder er: **Å analysere og verifisere material- og styrkeegenskaper i komposittmaterialer til bruk i motorsykkelkonseptet Roskva Electric slik at styrke/vekt forholdet blir optimalt.**

2.1.2 Prosesstrinn og delmål

Følgende prosesstrinn og delmålsettinger inngår i arbeidet med å oppfylle hovedmålsettingen for prosjektet:

Tabell 2-1: Hovedmålsettingen er delt opp i fem delmålsettinger som følges gjennom arbeidet med oppgaven

Mål	Delmålsettinger	Utgreiing
1	Tilegne kunnskap om bruken av karbonfiberarmert plast i ulike belastningssituasjoner	<ul style="list-style-type: none"> - Bøyning, torsjon, kompresjon, utmatting - Bruddårsaker som delaminering, matrisebrudd - Vurdere ulike fibermaterialer
2	Velge fiberkonfigurasjon til ulike belastningssituasjoner	<ul style="list-style-type: none"> - Ta beslutning på fiberkonfigurasjon for ulike belastningssituasjoner som hull, aksling m.m
3	Testing av ulike belastningssituasjoner	<ul style="list-style-type: none"> - Finne egnede testmetoder - Innkjøp av komponenter - Støping av prøvestykker - Utgreie nødvendig teorigrunnlag
4	Bygge opp en materialmodell i SolidWorks Simulation (FEM - analyse) og sammenligne analysene med de ulike testresultatene	<ul style="list-style-type: none"> - Testing utføres som i delmål 3 - Materialparametere fra produsent og andre kilder - Ved tilegnet kunnskap utregnes stivhet, spenninger, bruddkriterier m.m.
5	Økonomisk overslag	<ul style="list-style-type: none"> - Gi et grovt anslag av kostnadene i arbeidstimer og materialer m.m.



I Tabell 2-2 vises en milepælplan med de ulike aktivitetene delmålene innebærer. Videre er estimert tidsbruk markert med rødt.

Tabell 2-2, Milepælplan m/Gantskjema for de ulike delmålsettingene. Hver måned er delt inn i tre felter

Delmål	Milepæl/prosesstrinn	Januar			Februar			Mars			April/Mai		
		Uke 2 - 5			Uke 5 - 9			Uke 9 - 13			Uke 13 -18		
1. Forberedelser	• Tilegne kunnskap om komposittermaterialer og dets egenskaper	■	■	■	■	■	■						
	• Komponentinnkjøp	■	■	■	■	■	■	■					
	• Andre forberedelser						■	■	■	■			
2. Fiber-konfigurasjon	• Velge fiberkonfigurasjon baser på ulike belastningssituasjoner				■	■	■	■					
3. Testing	• Tilegne kunnskap om testmetoder			■	■	■							
	• Støping av prøvestykker				■	■	■	■	■	■			
	• Tolkning av testresultater							■	■	■	■	■	
4. Analyse	• Bygge opp en materialmodell			■	■	■							
	• Finne egnet FEM program til komposittbruk			■									
	• Sammenligne analyser med testresultat og håndberegninger							■	■	■	■		
5. Økonomi	• Oversikt over komponentinnkjøp og arbeidstimer												■
	• Lage regnskap												■

2.2 Begrensninger

Under arbeidet med problemstillinger og målsetting ble det bestemt at oppgaven skal inneholde teori, materialtesting og analyse. Innenfor disse tre områdene må det settes begrensninger. Disse er som følger:

- Teorien utledes ikke for et sammensatt laminat, men kun for hvert enkelt lag.
- Vurdering av ulike støpeprosesser er utelatt.
- For å sikre et optimalt produkt av kompositt må omfattende testing gjøres da karbonfiberens egenskaper er vanskelig å gjenskape korrekt i et FEM program, og analysene blir derfor et grovt anslag. Dette betyr at deler av chassiset og/eller hele chassis bør lages og testes mot statisk, dynamisk og utmattende lasttilfeller. Utmattningstesting og testing av hele chassiset utelates, og materialtesting blir derfor kun utført statisk på mindre prøvebiter (med unntak av aksling i normal størrelse).
- Testing av utrivning og drivaksling gjøres på et lite antall prøvebiter grunnet ressursbruk.



- Testing av bøyning, kompresjon og andre viktige belastningstilfeller utføres ikke.
- Valg av epoxy gjøres på grunnlag av anbefalinger hos leverandør og beskrivelse av ulike typer epoxy utelates, samt påvirkning av luftfuktighet.
- Analyser vil bli utført med karbonfiberarmert plast og ikke eventuelle andre komposittmaterialer.
- Ulineær analyse av fibre utføres ikke, da en lineær analyse vil være på konservativ side.

2.3 Arbeidsmetoder

Dette prosjektet har ulike kildetyper, programvare og arbeidsmetoder:

- **Litteraturstudier**

Som kjent blir bruken av komposittmaterialer dokumentert gjennom ulike tester. I denne oppgaven er derfor mye informasjon hentet fra vitenskapelige artikler på nettsteder som www.sciencedirect.com m.fl. På disse sidene ligger tester utført ved ulike forskningsinstitusjoner rundt i verden innenfor emner som utmatting, temperatur, utrivning, m.m. I tillegg er troverdigheten høy og resultatet fra disse kildene kan brukes uten risiko for feilinformasjon. Bruken av slike tester krever likevel at testprosedyren leses nøye og forstås, og at eventuelle svakheter ved resultatene kommer fram.

- **Nettsøk**

Google har blitt benyttet til å søke på testresultater (slik som over), i tillegg til tips til støping, bearbeiding, svakheter ved kompositter, materialverdier og annen informasjon som ikke har latt seg finne i artikler eller i bøker.

- **Bøker**

Det finnes en rekke bøker og annen litteratur om emnet, men mange er ofte vanskelig å sette seg inn i (beregninger av komposittmaterialer kan være komplekst). Forfatter har funnet bøker som forklarer teorien på en pedagogisk måte, og disse er benyttet hovedsakelig i teoridelen.

- **Samtaler**

Teoretiske spørsmål/løsninger vil diskuteres med faglærere og evt. andre personer. Andre personer med kunnskap innenfor den praktiske siden ved støping og bruken av karbonfiber har blitt kontaktet.

- **Håndberegninger**

For å kontrollere testresultater og FEM - analyse har håndberegning blitt utført der hvor det lar seg gjøre (bla. spenninger i ulike materialer og materialprøver).

- **Programvare**

3D modellering har blitt utført i SolidWorks og FEM - analyse i SolidWorks sitt tilleggsprogram Simulation, grunnent dets innebyggede komposittfunksjon. Til håndberegninger, milepælplan og behandling av testresultater har Excel blitt brukt.

- **Rapportering**

Skrivingen har foregått i MS Word 2007, mens kilder har blitt behandlet i EndNote.



2.4 Drøfting av prosesstrinn

I Tabell 2-3 vises en mer detaljert beskrivelse av milepælene beskrevet på s. 14. Innenfor de ulike punktene er det en rekke punkter som må utføres for å kunne besvare delmålene i tillegg til en huskeliste for forfatteren både mtp. faglig og administrativt arbeid.

Tabell 2-3, Utdypning av milepæplan med beskrivelse av punktene

Del	Milepæl/prosesstrinn	Kommentar
1. Forberedelser	<ul style="list-style-type: none"> • Tilegne kunnskap om komposittermaterialer og dets egenskaper 	Bøyning, torsjon, trykk, utmatting, temperaturendringer. Bruddårsaker som delaminering, matrisebrudd
	<ul style="list-style-type: none"> • Komponentinnkjøp 	Vakuumpumpe, materialer til støping m.m.
	<ul style="list-style-type: none"> • Andre forberedelser 	Div. organisering av testing osv.
2. Fiberkonfigurasjon	<ul style="list-style-type: none"> • Velge fiberkonfigurasjon baser på ulike belastningssituasjoner 	Ta beslutning på endelig fiberkonfigurasjoner (hull, aksling m.m.)
3. Testing	<ul style="list-style-type: none"> • Tilegne kunnskap om testmetoder 	Se på ulike standarder, finne egnet testmetode med tilgjengelige ressurser
	<ul style="list-style-type: none"> • Støping av prøvestykker 	Med varierende fiberretninger, m.m.
	<ul style="list-style-type: none"> • Tolkning av testresultater 	Sammenligning med FEM analyse (som senere utføres) og finne dimensjonerende spenninger
4. Analyse	<ul style="list-style-type: none"> • Bygge opp en materialmodell 	Materialparametere fra produsent og andre kilder
	<ul style="list-style-type: none"> • Finne egnet FEM program til komposittbruk 	Undersøke ANSYS, SW Simulation, Nastran m.fl.
	<ul style="list-style-type: none"> • Sammenligne analyse med testresultat og håndberegninger 	Data fra testing av ulike egenskaper
5. Økonomi	<ul style="list-style-type: none"> • Oversikt over komponentinnkjøp og arbeidstimer 	Gå igjennom kvitteringer, gi et grovt estimat av antall arbeidstimer
	<ul style="list-style-type: none"> • Lage regnskap 	Basert på summene over lages et regnskap for oppgaven

3 TERMINOLOGI

3.1 Begreper

Nedenfor er det listet opp noen viktige begreper som er benyttet i denne rapporten. Begreper som spenning, forlengelse m.m. er ikke listet opp da det forutsettes at leseren er kjent med disse begrepene.

Tabell 3-1, Begreper med forklaring omkring FEM analyse og kompositter

Parameter	Forklaring
Ortotropt	Ulike egenskaper i ulike retninger
Lag	Et lag med fiber i en bestemt retning
Laminat	To eller flere lag limt sammen
Matrise	Materialet som skal ligge rundt fibre og holde dem sammen, f.eks epoxy
Longitudinal	Parallelt med fiberretning
Transverst	Normalt på fiberretning
Transformasjon	I et lag med fiberretning med vinkelen θ i forhold til x - akse, er det ønskelig å transformere spenningen til spenninger som virker parallelt eller normalt på fiberretningen
Bruddkriteriet	En matematisk måte å forutsi om brudd vil forekomme i et laminat. Til karbonfiber er Tsai - Wu best egnet
Interlaminære spenninger	Spenninger som oppstår mellom lagene i et laminat som følge av at lagene beveger seg i forhold til hverandre. Kan føre til delaminering
Delaminering	De ulike lagene løsner fra hverandre som følge av for høye interlaminære spenninger
In - plane shear	Skjærspenning langs planet, virker inne i lagene og ikke imellom slik som interlaminære spenninger
Fiberkonfigurasjon	Rekkefølgen på de ulike retningene i et laminat
Sandwich	Konstruksjon med et komposittmateriale i ytterkantene og et kjernemateriale i midten
Kjernemateriale	I sandwich konstruksjoner benyttes et lett materiale for og bla. gi økt bøyestivhet
Divinycell	Kjernemateriale av polymerskum
Transvers sprekktetthet	Tettheten av sprekker normalt på belastningsretningen
R - verdi	Forholdet min og maks spenning $\left(\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{maks}}\right)$
Flax	Plantebasert fibermateriale
Hybridduk	Fiberduk bestående av to eller flere ulike fibermaterialer
Ensrettet	Fiberduk med fiber i kun en retning



Tabell 3-1 forts.

Biaksial duk	Fiberduk med fiber i to ulike retninger
Selvbærende karosseri	Motorsykkelens kåpe er en del av ramma og vice versa. Dagens biler m.m. blir bygget slik. Gir økt styrke og lav vekt
Kritisk knekkmoment	Ved et moment over denne verdien vil en aksel knekke ut før torsjonsbrudd oppstår
Mesh	CAD modell deles opp i elementer som utgjør et mesh
Konvergens	FEM analyse må gå mot en verdi etterhvert som meshet forfines, for å kunne se hvorvidt resultatet er troverdig
Skallmodell	Dersom en modell er for tynn til og kunne meshes innenfor kriteriet gjøres modellen om til skall hvis tykkelse plottes inn i analysen
SolidWorks Simulation	FEM - program benyttet til analyser

3.2 Symboler

Til dimensjoneringen benyttes enheter basert på SI - systemet. Disse vises i Tabell 3-2 nedenfor:

Tabell 3-2, Symboler med forklaring

Parameter	Forklaring	Enhet
E	Det ukjente eksakte deformasjonsarbeidet	J
E_h	Deformasjonsarbeidet utregnet i FEM - analyse	J
h	Størrelse på elementene	m^3
θ	Vinkelen på fiberretning	–
σ_{LL}	Spenning parallelt med fiberretning	MPa
σ_{TL}	Spenning normalt på fiberretning	MPa
σ_f	Spenning i fibre	MPa
σ_m	Spenning i matrisematerialet	MPa
σ_{xx}	Spenning i x - retning i et lag med fiberretning på vinkel θ	MPa
σ_{yy}	Spenning i y - retning i et lag med fiberretning på vinkel θ	MPa
σ_{11}	Spenning parallelt med fiberretning	MPa
σ_{22}	Spenning normalt på fiberretning	MPa
σ_1	1. Hovedspenning	MPa
σ_2	2. Hovedspenning vinkelrett på hovedspenning 1	MPa
$\sigma_{t,11}, S_{Lc}$	Trykkfasthet i x – retning/ parallelt med fiberretning	MPa



Tabell 3-2 forts.

$\sigma_{t,22}, S_{Tc}$	Trykkfasthet i y – retning/ normalt på fiberretning	<i>MPa</i>
S_{Lt}	Strekkfasthet parallelt med fiberretning	<i>MPa</i>
S_{Tt}	Strekkfasthet normalt på fiberretning	<i>MPa</i>
τ_{xy}, τ_{xz}	Skjærspenning i xy og xz - planet	<i>MPa</i>
τ_{12}	Transformert skjærspenning	<i>MPa</i>
S_{LTs}	Skjærkapasiteten i planet	<i>MPa</i>
V_f	Volumfraksjon av fiber	–
V_m	Volumfraksjon av matrisematerialet	–
E_{LL}	E - modul parallelt med fiberretning	<i>MPa</i>
E_{TL}	E - modul normalt på fiberretning	<i>MPa</i>
E_f	E - modul til fiber	<i>MPa</i>
E_m	E - modul til matrisematerialet	<i>MPa</i>
E_{xx}	E - modul i x - retning i et lag med en fiberretning på vinkel θ	<i>MPa</i>
E_{yy}	E - modul i y - retning i et lag med en fiberretning på vinkel θ	<i>MPa</i>
E_{11}	E - modulen parallelt med fiberretning	<i>MPa</i>
E_{22}	E - modulen normalt på fiberretning	<i>MPa</i>
G_{xy}	Skjærmodul i xy - planet	<i>MPa</i>
G_{12}	Skjærmodul i 12 - planet	<i>MPa</i>
G_{23}	Skjærmodul i 23 - planet	<i>MPa</i>
G_{13}	Skjærmodul i 13 - planet	<i>MPa</i>
ϵ_{LL}	Relativ forlengelse parallelt med fiberretning	–
ϵ_{TL}	Relativ forlengelse normalt på fiberretning	–
ϵ_f	Relativ forlengelse i fiber	–
ϵ_m	Relativ forlengelse i matrisematerialet	–
ϵ_{xx}	Relativ forlengelse i x - retning i et lag med fiberretning på vinkel θ	–
ϵ_{yy}	Relativ forlengelse i y - retning i et lag med fiberretning på vinkel θ	–
ϵ_{11}	Relativ forlengelse parallelt med fiberretning	–
ϵ_{22}	Relativ forlengelse normalt på fiberretning	–
γ_{xy}	Vinkel ved skjærdeformasjon i xy - planet	–
γ_{12}	Vinkel ved skjærdeformasjon i 12 - planet	–

Tabell 3-2 forts.

ν_{12}	Poissons' tall i 12 – planet	–
ν_{23}	Poissons' tall i 23 – planet	–
ν_{13}	Poissons' tall i 13 – planet	–
$F_1 \Rightarrow F_{66}$	Styrkekoefisienter til bruk i bruddkriteriet	–
p	Hullkanttrykk	MPa
V_R	Kraften på bolten	N
A	Areal	mm ²
R	Forholdet mellom min og maks spenning ($\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{maks}}$)	–
\bar{x}	Forventningsverdi	–
σ	Standardavvik	–
n	Antall prøver	–
T	Torsjonsmoment	Nm
J	Polart treghetsmoment	mm ⁴
r	Radius	m
T_{cr}	Kritisk knekkmoment	Nm
C	Innspenningskoeffisient	–
D_{22}	Parameter i bøyestivhetsmatrise	Nm
A_{11}	Parameter i stivhetsmatrise	N/m

3.3 Formler

Formlene benyttet i denne rapporten er listet opp i Tabell 3-3.

Tabell 3-3, Formler brukt i rapport

Nr.	Formel	Forklaring
(4.1)	$\sigma_{LL} = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m$	Spenning parallelt med fiberretning i et komposittmateriale
(4.2)	$\sigma = E\epsilon$	Hooks lov
(4.3)	$E_{LL} = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$	E - modul parallelt med fiberretning i et komposittmateriale



Tabell 3-3 forts.

(4.4)	$\epsilon_{TL} = \epsilon_f V_f + \epsilon_m V_m$	Relativ forlengelse parallelt med fiberretning i et komposittmateriale
(4.5)	$E_{TL} = \frac{E_m E_f}{(1 - V_f) E_f + E_f E_m}$	E - modul normalt på fiberretning i et komposittmateriale
(4.6)	$\sigma_{11} = \sigma_{xx} \cos^2 \theta + \sigma_{yy} \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \cos \theta \sin \theta$	Spenning parallelt med fiberretning for et fiberlag med vinkelen θ i forhold til x - aksen
(4.7)	$\sigma_{22} = \sigma_{xx} \sin^2 \theta + \sigma_{yy} \cos^2 \theta - 2\tau_{xy} \cos \theta \sin \theta$	Spenning normalt på fiberretning for et fiberlag med vinkelen θ i forhold til x - aksen
(4.8)	$\tau_{12} = (-\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$	Skjærspenning i 12 - planet for et fiberlag med vinkelen θ i forhold til x - aksen
(4.9)	$\epsilon_{11} = \epsilon_{xx} \cos^2 \theta + \epsilon_{yy} \sin^2 \theta + 2\gamma_{xy} \cos \theta \sin \theta$	Relativ forlengelse parallelt med fiberretning for et fiberlag med vinkelen θ i forhold til x - aksen
(4.10)	$\epsilon_{22} = \epsilon_{xx} \sin^2 \theta + \epsilon_{yy} \cos^2 \theta - 2\gamma_{xy} \cos \theta \sin \theta$	Relativ forlengelse normalt på fiberretning for et fiberlag med vinkelen θ i forhold til x - aksen
(4.11)	$\gamma_{12} = (-\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) \sin \theta \cos \theta + \gamma_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$	Skjærdeformasjon i 12 - planet for et fiberlag med vinkelen θ i forhold til x - aksen
(4.12)	$v_{12} = -\frac{\epsilon_{22}}{\epsilon_{11}}$	Poissons tall: relativ forlengelse normalt på fiberretning dividert med relativ forlengelse parallelt på fiberretning
(4.13)	$G_{12} = \frac{G_m G_f}{(1 - V_f) G_f + G_f E_m}$	Skjærmodul i et komposittmateriale i xy - planet
(4.14)	$G_{23} = \frac{E_{22}}{2(1 + v_{23})}$	Skjærmodul yz - planet
(4.15)	$v_{21} = v_{12} \left(\frac{E_{22}}{E_{11}} \right)$	Poissons tall for 21
(4.16)	$v_{23} = v_{12} \left(\frac{1 - v_{12}}{1 - v_{21}} \right)$	Poissons tall for 23
(4.17)	$\frac{1}{E_{xx}} = \frac{\cos^4 \theta}{E_{11}} + \frac{\sin^4 \theta}{E_{22}} + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2v_{12}}{E_{11}} \right) \sin^2 2\theta$	E- modul i x - retning for et fiberlag med vinkelen θ i forhold til x - aksen



Tabell 3-3 forts.

(4.18)	$\frac{1}{E_{yy}} = \frac{\sin^4 \theta}{E_{11}} + \frac{\cos^4 \theta}{E_{22}} + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} \right) \sin^2 2\theta$	E- modul i y - retning for et fiberlag med vinkelen θ i forhold til x - akse
(4.19)	$\frac{1}{G_{xy}} = \frac{1}{E_{11}} + \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} - \left(\frac{1}{E_{11}} + \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} - \frac{1}{G_{12}} \right) \cos^2 \theta$	Skjærmodul i y - retning for et fiberlag med vinkelen θ i forhold til x - akse
(4.20)	$E_L = \frac{1}{n} \sum E_n$	E - modul i et laminat med n fiberlag
(4.21)	$F_1 \sigma_{11} + F_2 \sigma_{22} + F_6 \tau_{12} + F_{11} \sigma_{11}^2 + F_{22} \sigma_{22}^2 + F_{66} \tau_{12}^2 + 2F_{12} \sigma_{11} \sigma_{22} = 1$	Tsai - Wu bruddkriteriet for å forutsi brudd i et ortotrop materiale
(4.22)	$F_1 = \frac{1}{S_{Lt}} - \frac{1}{S_{Lc}}$	Input i Tsai - Wu bruddkriteriet
(4.23)	$F_2 = \frac{1}{S_{Tt}} - \frac{1}{S_{Tc}}$	"
(4.24)	$F_{11} = \frac{1}{S_{Lt} S_{Lc}}$	"
(4.25)	$F_{22} = \frac{1}{S_{Tt} S_{Tc}}$	"
(4.26)	$F_{66} = \frac{1}{S_{Lts}^2}$	"
(4.27)	$-\frac{1}{2} \sqrt{F_{11} F_{22}} \leq F_{12} \leq 0$	"
(4.28)	$\sigma_{null} = K_T \sigma$	Maksimalspenning ved hull
(5.1)	$\bar{x} \pm 1,96 \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right)$	95 % konfidensintervall
(5.2)	$p = \frac{V_R}{A}$	Hullkanttrykk
(5.3)	$\tau_{xy} = \frac{T}{Jr}$	Skjærspenning i xy - planet som følge av påført moment
(5.4)	$T_{cr} = 24,4CD_{22}^{\frac{5}{8}} A_{11}^{\frac{3}{8}} r^{\frac{5}{4}} L^{-\frac{1}{2}}$	Kritisk knekkmoment
(5.5)	$f_{cr} = \frac{\pi}{L^2} r \sqrt{\left(\frac{E_{xx}}{2\rho} \right)}$	Egenfrekvensen til en roterende aksel
(5.6)	$\tau = \frac{V}{A}$	Skjærspenning
(6.1)	$\lim_{h \rightarrow 0} E - E_h = 0$	Konvergenskrav til bruk i meshforfining

4 KOMPOSITTMATERIALER

Ved konstrueringen av et motorsykelchassis er det som kjent viktig å holde vekten lav uten at dette går utover stivheten i ramma. Chassiset på en moderne motorsykel består utelukkende av aluminium (med unntak av noen få produsenter), da dette gjør at det kan brukes profiler med større tverrsnitt (og dermed økt stivhet) sammenlignet med stål¹ uten at det går på bekostning av vekt.

I tillegg til aluminium kan også karbonfiberarmert plast² være en god løsning. Dette er et langt mer krevende materiale å dimensjonere, men fordelene i form av den lave vekten kombinert med høy styrke gjør likevel at dette er et bra alternativ (fra Tabell 4-1 går det frem at karbonfiberarmert plast har en spesifikk styrke 8 ganger høyere enn stål og 4 ganger høyere enn aluminium). I tillegg vil bruken av materialet også medføre at sykkelen skiller seg ut i dagens marked, da bruken av karbonfiber i chassis er lite utbredt, samtidig som det designmessig ser bra ut. Dette er grunnene til at vi har bestemt oss for at Roskvas chassis skal bestå av komposittmaterialer (hovedsakelig karbonfiber). Stål og aluminium (aluminium vil bli brukt ved innfestninger og braketter) blir derfor ikke vurdert i denne oppgaven.

Tabell 4-1, Tettheten til karbonfiberarmert plast sammenlignet med stål og aluminium. Den spesifikke styrken er utregnet av forfatter

Materiale	Tetthet (kg/dm ³)	Spesifikk styrke (kN*m/kg)
Stål	7,9	101
Aluminium	2,7	185
Plast (her polypropylen) [38]	0,9	89
Karbonfiberarmert plast [41]	1,8*	833

*De andre fibertypene omtalt i oppgaven ligger rundt dette

4.1 Kompositteori

4.1.1 Fiberarmert plast – et ortotrop materiale

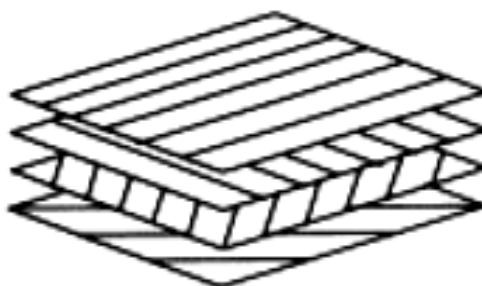
Et komposittmateriale er et ortotrop materiale, dvs. de fysiske egenskapene varierer med retningen; høy styrke dersom det blir belastet parallelt med fiberretning, men lav styrke ved belastning normalt på fibre. Dette krever at fiberretningen tilpasses belastningene i chassiset, noe som gjøres ved å lime sammen fiberlag med ulike fiberretninger slik at styrken blir høy i ønskede retninger (kalles laminat, se Tabell 4-2 og Figur 4-1).

¹ Elastisitetsmodulen til stål er som kjent omtrent tre ganger større enn for aluminium, og er derfor i utgangspunktet tre ganger stivere.

² I det dagligdagse og i denne rapporten omtales karbonfiberarmert plast ofte som kun karbonfiber.

Tabell 4-2: Ulike fiberretninger i et fiberlag. Vinkelen defineres utifra lengderetningen på konstruksjoner, f.eks fiberretningen 0° på Roskva vil gå vannrett langs sykkelens lengderetning [7]

Fiberretning ³	Beskrivelse	Egenskaper
0°	Parallelt med lengderetning	Tar opp last som virker i lengderetning
90°	På tvers av lengderetning	Tar opp last som virker på tvers av lengderetning
$\pm 45^\circ$	-	Tar opp last i skjær (torsjon)



Figur 4-1: Et laminat med de ulike lagenes fiberretningene. Fra toppen: 0° , 90° , $+45^\circ$, og -45° [18]

Det er et eget system for å beskrive rekkefølgen på de ulike lagene i laminatet. Rekkefølgen beskrives i klammerformer slik som [7]:

- $[0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ]_S$ som betyr $(0^\circ, +45^\circ, -45^\circ, 90^\circ, 90^\circ, -45^\circ, +45^\circ, 0^\circ)$. S står for symmetri om det midtre planet.

Dersom flere lag er nødvendig kan følgende konfigurasjon benyttes:

- $[0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ]_{2S}$ som betyr $(0^\circ, +45^\circ, -45^\circ, 90^\circ, 0^\circ, +45^\circ, -45^\circ, 90^\circ, 90^\circ, -45^\circ, +45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, -45^\circ, +45^\circ, 0^\circ)$. 2S betyr i tilfelle at rekkefølgen innenfor klammertegnene multipliseres med to, for deretter og speilvendes slik som over.

Det krever en del opplysninger om belastningssituasjon og testing av prøveplater for å finne den rette konfigurasjonen, spesielt dersom det er ønskelig å bruke færrest mulig lag. Ved dimensjonering er det vanlig å legge på litt ekstra og/eller bruke konservative parametere i analysen.

4.1.2 Matrisemateriale - epoxy

Et komposittmateriale består som kjent av fiber og et matrisemateriale som holder fibre sammen. Styrken og stivheten til matrisa er lav (se Tabell 4-4, materialdata), da det har som hovedoppgave å holde fibre sammen og å overføre skjærspenninger mellom de forskjellige lagene (utdypes på s.31). Dette krever høy bindingsstyrke til fibre hvilket gjør epoxy til det foretrukne valget ved bruken av karbonfiberarmert plast. Fordelene og ulempene ved bruken av epoxy er listet opp i Tabell 4-3. [29] [56]

³ Det finnes også fiberretninger på $22,5^\circ$, 60° og 80° m.m. Disse er lite utbredt og blir derfor ikke vurdert i oppgaven.

Tabell 4-3, Fordeler og ulemper ved bruken av epoxy

Fordeler	Ulemper
<ul style="list-style-type: none"> - Krymper lite under støping - God motstand mot løsemidler og omgivelsene - Binder seg svært godt til fibrene - God motstandsevne mot utmatting - Finnes i mange varianter avhengig av bruksområde m.m. 	<ul style="list-style-type: none"> - Giftig - Maks brukstemperatur 200 °C - Vanskelig å kombinere seighet/hardhet med høy temperatur - Høy termisk utvidelseskoeffisient - Lang herdetid

Det finnes en rekke typer epoxyer med varierende egenskaper på markedet. Grunnet begrensninger vurderes ikke ulike typer. Epoxyen benyttet (ESR3 fra Lindberg & Lund) til Roskva er den samme som ble brukt på bilprosjektet Ecotwin (Shell Eco Marathon) her på universitetet. Denne kan herde ved romtemperatur⁴, dog er det anbefalt at den etterherdes ved rundt 40 - 50 °C for å få maksimal styrke [20]. Epoxyen har følgende materialdata:

Tabell 4-4, Data for epoxytype ESR 3. Her er stivheten lav hvilket gir en relativ forlengelse ved brudd på 10% [20]

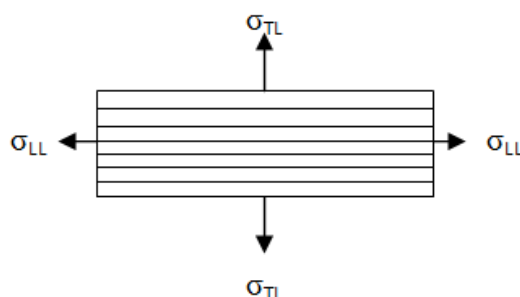
Strekstyrke:	46	MPa
Bøyestyrke:	110	MPa
Ultimat bruddforlengelse:	10,5	%
Flex/bøyemodul:	3100	MPa
Strekmodul:	3180	MPa

4.1.3 Laminatteori

Grunnet de ortotrope egenskapene vil spenningene, stivheten og forlengelsen variere med hvordan et fiberlag blir belastet. I de påfølgende avsnittet utledes og forklares de fysiske egenskapene til fiberlag på henholdsvis 0°, 90° og 45°.

A. Last belastet parallelt og normalt på fiberretning

Et lag består av fibre pluss matrisematerialet (f.eks. epoxy) som vist på Figur 4-2.



Figur 4-2: Et lag belastes med spenninger langs (σ_{LL}) og normalt på fiberretning (σ_{TL}). LL står for longitudinal loading og TL for transvers loading

⁴ Til dette anbefales det å bruke en akselerator.

Parallelt (longitudinal loading)

Dersom et lag belastes med en spenning σ_{LL} tas den opp av epoxyen og fibre og vi får:

$$\sigma_{LL} = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (4.1)$$

Hvor:

- V_f og V_m er fraksjonene av tverrsnittsarealene av henholdsvis fibre og matrisematerialet.
- σ_f og σ_m er spenningen i henholdsvis fibre og matrisematerialet [16]

Fibre og matrisa vil forlenges like mye, og ved å bruke Hooks lov blir uttrykket for E-modulen:

$$\sigma = E \epsilon_{LL} \quad (4.2)$$

$$E_{LL} = E_f V_f + E_m V_m = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (4.3)$$

Normalt på fiberretning (Transverse loading)

Ved spenning normalt på fiberretningen (σ_{TL}) blir forlengelsen til matrisa og fibre ulike: [16]

$$\epsilon_{TL} = \epsilon_f V_f + \epsilon_m V_m \quad (4.4)$$

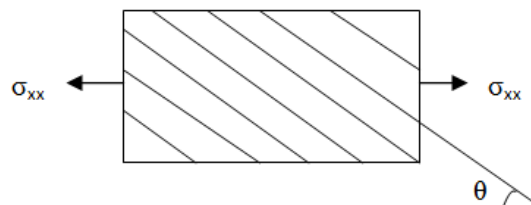
Spenningen som opptas blir lik for fibre og matrisa. Hooks lov settes inn og vi får uttrykket for E-modulen:

$$E_{TL} = \frac{E_m E_f}{(1 - V_f) E_f + E_f E_m} \quad (4.5)$$

B. Last belastet med vinkel θ på fiberretning

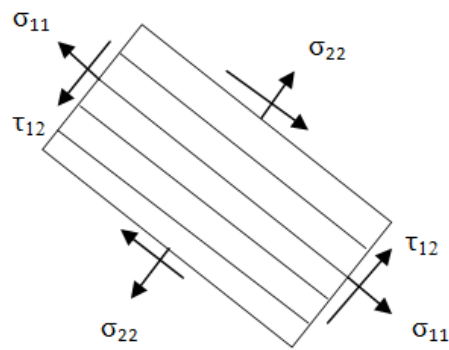
I. Spenning og forlengelse

I de fleste tilfeller med bruken av fiber vil det benyttes lag hvor fiberretning har en vinkel θ på lastretningen (se Figur 4-3), som f.eks i lag med $\pm 45^\circ$.



Figur 4-3: Lag med fiberretning θ belastes med spenningen σ_{xx}

I et slikt tilfelle er det ønskelig å transformere den påførte spenningen til spenninger normalt (σ_{22}) og langs med fibre (σ_{11}) samt skjærspenning (τ_{12}) slik som vist på Figur 4-4.



Figur 4-4: Spenningen σ_{xx} transformert til spenninger parallelt og normalt på fiberretning

Dette gjøres ved å benytte en transformasjonsmatrise, som gir følgende spenninger: [7]

$$\sigma_{11} = \sigma_{xx} \cos^2 \theta + \sigma_{yy} \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \cos \theta \sin \theta \quad (4.6)$$

$$\sigma_{22} = \sigma_{xx} \sin^2 \theta + \sigma_{yy} \cos^2 \theta - 2\tau_{xy} \cos \theta \sin \theta \quad (4.7)$$

$$\tau_{12} = (-\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (4.8)$$

Dersom spenningene byttes med forlengelsen ϵ får en forlengelsene forårsaket av de transformerte spenningene regnet ut over:

$$\epsilon_{11} = \epsilon_{xx} \cos^2 \theta + \epsilon_{yy} \sin^2 \theta + 2\gamma_{xy} \cos \theta \sin \theta \quad (4.9)$$

$$\epsilon_{22} = \epsilon_{xx} \sin^2 \theta + \epsilon_{yy} \cos^2 \theta - 2\gamma_{xy} \cos \theta \sin \theta \quad (4.10)$$

$$\gamma_{12} = (-\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) \sin \theta \cos \theta + \gamma_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (4.11)$$

Hvor γ_{xy} er vinkelen ved skjærdeformasjon (se Figur 4-6 s.32).

II. Elastisitets- og skjærmodul

For tilfellene med last parallelt eller normalt på fiberretning ble kun satt inn for å finne elastisitetsmodulen. I tilfellet med vinkelen θ må følgende prosedyre følges:

- De transformerte spenningene og forlengelsen de forårsaker utregnes
- Hooks lov benyttes og elastisitetsmodulene E_{11} og E_{22} utregnes vha. ligning (4.3) og (4.5) for utregningen av E_{LL} og E_{TL} på s. 26 da $E_{11} = E_{LL}$ og $E_{22} = E_{TL}$



- Poisson's tall⁵ ν_{12} for komposittmaterialet må vites (i likhet med for metaller benyttes 0,3 til karbonfiberarmert plast [26])

$$\nu_{12} = -\frac{\epsilon_{22}}{\epsilon_{11}} \quad (4.12)$$

- Skjærmodulen G_{12} utregnes på samme måte som transvers elastisitetsmodul (ligning (4.5) s.26):

$$G_{12} = \frac{G_m G_f}{(1 - V_f)G_f + G_f E_m} \quad (4.13)$$

Når vi kjenner E_{11} , E_{22} , G_{12} og ν_{12} kan E-modulen, henholdsvis E_{xx} og E_{yy} (jmf. Figur 4-3 s.26), for det laget med fiberretningen θ utregnes ved hjelp av følgende formler:

$$\frac{1}{E_{xx}} = \frac{\cos^4 \theta}{E_{11}} + \frac{\sin^4 \theta}{E_{22}} + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} \right) \sin^2 2\theta \quad (4.17)$$

$$\frac{1}{E_{yy}} = \frac{\sin^4 \theta}{E_{11}} + \frac{\cos^4 \theta}{E_{22}} + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} \right) \sin^2 2\theta \quad (4.18)$$

Videre kan skjærmodulen G_{xy} uttrykkes:

$$\frac{1}{G_{xy}} = \frac{1}{E_{11}} + \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} - \left(\frac{1}{E_{11}} + \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} - \frac{1}{G_{12}} \right) \cos^2 \theta \quad (4.19)$$

C. Den totale stivheten til et laminat

Når en nå vet E-modulen for hvert enkelt lag kan den totale E-modulen finnes ved hjelp av Hooks lov. I et laminat bestående av to lag settes Hooks lov opp for hele laminatet:

$$\sigma_L = E_L \epsilon_L \quad (4.2)$$

Kraften som optas gjennom lagene uttrykkes ved spenningen σ_L :

$$F_L = F_1 + F_2 \Rightarrow \sigma_L A_L = \sigma_1 A_1 + \sigma_2 A_2 \Rightarrow \sigma_L = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2)$$

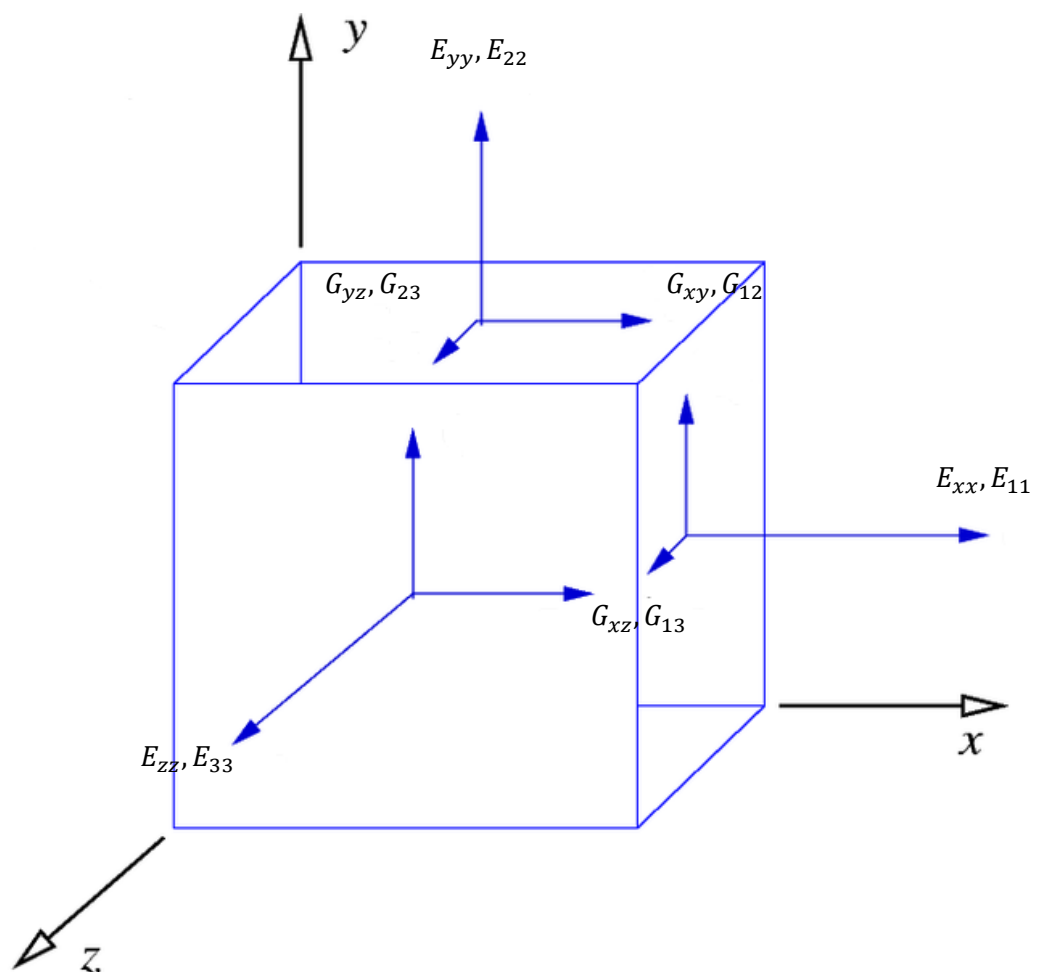
Hvor tverrsnittsarealene A_1 og A_2 er like store. Hvert lag får den samme forlengelsen og Hooks lov benyttes til å finne uttrykket for den totale E-modulen:

$$\begin{aligned} \epsilon_L &= \epsilon_1 = \epsilon_2 \\ E_L \epsilon_L &= \frac{1}{2} (E_1 \epsilon_L + E_2 \epsilon_L) \Rightarrow E_L = \frac{1}{2} (E_1 + E_2) \Rightarrow E_L = \frac{1}{n} \sum E_n \end{aligned} \quad (4.20)$$

⁵ Oppkalt etter Simeon Poisson og er forholdet mellom relativ tverrickontraksjon og relativ lengdeforandring ved små deformasjoner. Poissons effekten skjer f.eks når en stav blir strukket vil sidene bli trykket inn slik som t.h. på Figur 4-6 s.23 [5]

D. Materialegenskaper til materialmodell

Materialeegenskapene beskrevet i de foregående avsnittene beskriver E – modul og spenning i ulike fiberretninger. Til å bygge opp en materialmodell til bruk i FEM - analyse må de elastiske konstantene og spenningene i hver retning utgreies (se Figur 4-5, for spenninger se Figur 4-7 s.33). De nødvendige materialdata (inkludert de nevnt i tidligere avsnitt) vises i Tabell 4-5. Retningene i x,y og z i en materialmodell er lik de transformerte retningene 11, 22 og 33, og det er derfor vanlig å benytte denne notasjonen [7]. Videre i denne rapporten omtales derfor x, y og z retningene som dette.



Figur 4-5: Oversikt over de ulike elastiske egenskapene i x, y og z retningene. Fiberretningen er parallell med x - aksen [62]

Tabell 4-5: Materialegenskaper nødvendige til materialmodell til bruk i SolidWorks Simulation [7, 26]

Elastiske konstanter		
E – modul i x – retning:	$E_{11} = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$	Er den samme som E – modulen langs med fiberretningen
E – modul i y – retning:	$E_{22} = \frac{E_m E_f}{(1 - V_f) E_f + E_f E_m}$	Er den samme som E – modulen transversert på fiberretningen
E – modul i z – retning	$E_{33} = E_{22}$	Blir det samme som den transverse
Poissons tall for 12	ν_{12}	Finnes i tabell, settes lik den for metall (0,3)
Poissons tall for 21	$\nu_{21} = \nu_{12} \left(\frac{E_{22}}{E_{11}} \right)$	Må regnes ut for å finne i 23 – retning. Benyttes ikke direkte i modell
Poissons tall for 23	$\nu_{23} = \nu_{12} \left(\frac{1 - \nu_{12}}{1 - \nu_{21}} \right)$	
Poissons tall for 13	$\nu_{13} = \nu_{12}$	
Skjærmodul i xy – planet	$G_{12} = \frac{G_m G_f}{(1 - V_f) G_f + G_f E_m}$	Samme fremgangsmåte som for transvers E - modul
Skjærmodul i yz – planet	$G_{23} = \frac{E_{22}}{2(1 + \nu_{23})}$	
Skjærmodul i xz – planet	$G_{13} = G_{12}$	Samme som i xy - retning
Spenninger*		
Strekkfasthet i x – retning	$S_{Lt} = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m$	Normalt regnes ikke ut, oppgitt i datablad
Strekkfasthet i y – retning	S_{Tt}	Er lik strekkfastheten til epoxyen
Trykkfasthet i x – retning	S_{Lc}	Estimeres ved hjelp av datablad
Trykkfasthet i y – retning	S_{Tc}	Estimeres ved hjelp av datablad
Skjærfasthet i xy – planet (in plane shear)	S_{LTs}	Finnes i datablad/kilder

*Notasjon forklares i bruddkriteriet på s.31



E. Å estimere brudd – bruddkriterier

I. Brudd i et lag – ”Tsai-Wu” kriteriet

Det finnes flere ulike måter for å kunne beregne om det er fare for at brudd kan forekomme i et plant lag⁶, dog har forfatteren valgt å benytte den metoden som gir best resultat for ortotrope materialer med ulike egenskaper i strekk og trykk: Tsai-Wu kriteriet. Kriteriet sier at brudd oppstår dersom summen på venstre side i ligningen under overstiger 1. [7, 46]

$$F_1\sigma_{11} + F_2\sigma_{22} + F_6\tau_{12} + F_{11}\sigma_{11}^2 + F_{22}\sigma_{22}^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} = 1 \quad (4.21)$$

Hvor:

- En verdi større enn 1 gir brudd
- Spenningene i de ulike retningene regnes ut ved hjelp av ligning (4.6 - 4.8) på s.27
- F_1, F_2 osv. er styrke koeffisienter som utregnes på følgende måte:

$$F_1 = \frac{1}{S_{Lt}} - \frac{1}{S_{Lc}} \quad (4.22)$$

$$F_2 = \frac{1}{S_{Tt}} - \frac{1}{S_{Tc}} \quad (4.23)$$

$$F_6 = 0 \quad (4.24)$$

$$F_{11} = \frac{1}{S_{Lt}S_{Lc}} \quad (4.25)$$

$$F_{22} = \frac{1}{S_{Tt}S_{Tc}} \quad (4.26)$$

$$F_{66} = \frac{1}{S_{Lts}^2} \quad (4.27)$$

Hvor:

- S_{Lt} og S_{Lc} er strekk- og trykkfastheten langs med fiberretning (L står for longitudinal)
- S_{Tt} og S_{Tc} er strekk- og trykkfastheten transversert på fiberretning (T står for transverse)
- S_{Lts} er skjærkapasiteten i planet (in – plane, forklares på s.34)

Strekkfasthetene vil bli målt ved testing, mens skjærkapasiteten vil bli hentet fra datablad. F_{12} finnes ved hjelp av følgende kriterie:

$$-\frac{1}{2}\sqrt{F_{11}F_{22}} \leq F_{12} \leq 0 \quad (4.27)$$

For å ligge på konservativ velges den laveste verdien.

⁶ Kriteriet kan dermed ikke si noe om brudd som kan forekomme mellom lagene, slik som f.eks. delaminering. Kriteriet kan ikke benyttes på 3D strukturer. [7]

II. Fremgangsmåte for å forutse totalt brudd i laminat

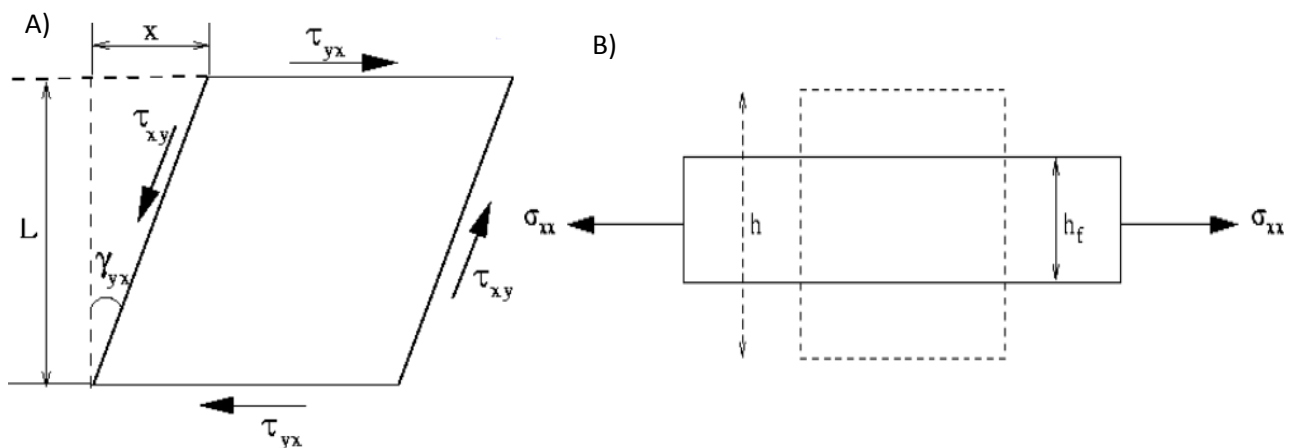
Bruddkriteriet for et lag er kjent, men for å forutse brudd i alle lagene i laminatet kan følgende prosedyre følges:

1. Finne krefter og forlengelse i laminat ved hjelp av formler forklart på s.25 - 32
2. Benytt Tsai - Wu kriteriet til å beregne hvilket lag som går til brudd først
3. Sett stivheten og styrken til dette laget til null
4. Finn spenninger og forlengelse i de gjenværende lagene
5. Gjenta 2. - 3. til å forutse brudd i neste lag
6. Gjenta 2. - 4. til brudd i alle lagene oppnås.

Brudd i det første laget referes til som FPF (First Ply Failure). Avhengig av komposittmateriale og lasttilfelle kan brudd i hele laminatet forekomme straks FPF har oppstått (spesielt i laminater med høy følsomhet for kjerv/skår). Grunnet usikkerheten velges derfor FPF som dimensjonerende spenning [7]. I kvasi – isotropiske laminater vil FPF være langt lavere enn et laminat med kun en fiberretning parallelt på lastretning.

F. Interlaminære spenninger

Interlaminære spenninger virker mellom lagene i laminatet og er de som overfører kreftene mellom lagene. Disse oppstår som følge av at Poissons' tall ikke sammenfaller med forholdet mellom deformasjonen i lengderetning og skjærtøyning mellom ulike lag⁷ (se Figur 4-6). Dette kan forklares enkelt ved at deformasjonen til et lag er litt ulikt deformasjonen til laget vegg i vegg, hvilket medfører at det vil bli dannet spenninger mellom disse lagene (som ved bla. bøyebelastning). Dersom disse blir for høye vil de ulike lagene løsne fra hverandre og vi får delaminering. I f.eks ren strekkbelastning slik som i test på s.56 er de intelaminære spenningene lave og neglisjerbare.

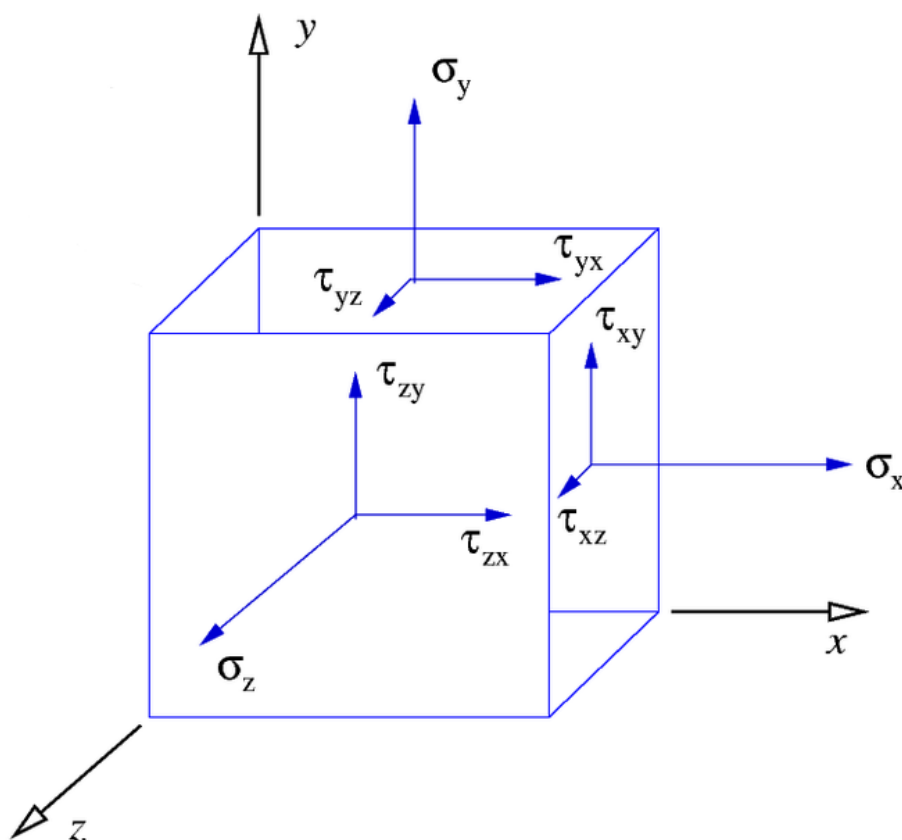


Figur 4-6: A) Skjærtøyning skjer ved at elementet blir deformert ved en endring av vinkelen (γ_{yx}). B) normal tøyning (ϵ) [58]

For enkelt å få oversikt over de ulike interlaminære spenningene kan et element tegnes opp slik som vist i Figur 4-7. Et fiberlag er parallelt med xy - planet med en tykkelse i z - retning. De interlaminære spenningene virker som sagt mellom fiberlagene, og i figuren blir dette de spenningene som er normalt på

⁷ Kalles "coefficients of mutual influence" ibid.

xy - planet. Dette er de to skjærspenningene⁸ τ_{xz} og τ_{yz} og strekkspenningen σ_z i figuren. Verdiene av de interlaminære spenningene varierer med fiberkonfigurasjonen. [7]



Figur 4-7: Alle spenningene som virker på et element. De interlaminære spenningene som virker på et element er τ_{xz} , τ_{yz} og σ_z . Disse virker normalt på planet som fibre ligger og blir dermed de interlaminære spenningene. Forøvrig er τ_{xy} , σ_y og σ_x spenninger i planet (forklares på s.34). [62]

Hvilke betydninger har disse spenningene i praksis for dimensjoneringen? [7]

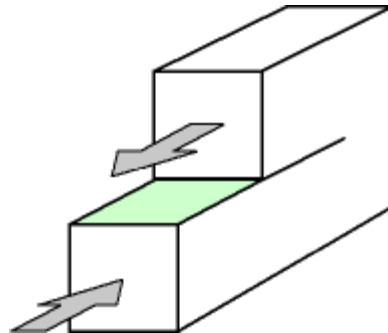
1. Dersom det skal dimensjoneres mot en bøyebelastning er de interlaminære skjærspenningene av stor betydning, da delaminering kan oppstå.
2. Verdiene av τ_{xz} og τ_{yz} øker mot endene på laminatet f.eks. rundt hull eller på endene langs et rør, og kan derfor forårsake delaminering i disse områdene (se plot på Figur 6-20 s.96). Dette er grunnen til at hull bør unngås der hvor det lar seg gjøre (jmf. sammenføyningsmetoder s.38).
3. Varierer mye avhengig av fiberretningene i laminatet. F.eks i et laminat med 0° og 90° vil de største interlaminære spenningene være τ_{yz} og σ_z . I et laminat med henholdsvis 0° , 90° , 90° og 0° vil spenningen normalt mellom de midterste lagene, σ_z , være en strekkspenning, mens det for 90° , 0° , 0° og 90° vil være trykk (dette gjelder også i laminater bestående av $\pm 45^\circ$ i tillegg, slik som $[0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ]_s$). Dette betyr at sistnevnte vil ha langt mindre risiko for delaminering da de midterste lagene vil bli trykket sammen.
4. I et laminat bestående av 0° , $\pm 45^\circ$ og 90° lag vil ulike rekkefølger påvirke de interlaminære spenningene. Der hvor lagene med $\pm 45^\circ$ ikke ligger etter hverandre (f.eks. $[90^\circ, 45^\circ, 0^\circ, -45^\circ]$) vil spenningene være lavere enn om de hadde ligget rett etter hverandre.

⁸ Disse skjærspenningene omtales som ILSS i datablad (Interlaminar shear strength)

G. Spenninger i planet

I tillegg til de interlaminære spenningsene vil det også virke spenninger i det fiberlaget ("in-plane", prinsipp vist på Figur 4-8) hvor lasten blir påført. Disse spenningsene blir dermed de som virker i xy - planet på Figur 4-7 (skjærspenningen τ_{xy} og strekkspenningene σ_y og σ_x). Dersom f.eks fiberretningen er parallell med x - aksen blir σ_x den samme σ_{LL} og σ_y den samme som σ_{TL} i Figur 4-2 på s.25.

Skjærspenningene τ_{xy} er ikke like kritiske som de interlaminære spenningsene og er av mindre betydning, men er spesielt viktig for dimensjonering der hvor det er torsjon involvert (beskrevet torsjonstest fom. s.72). [7]



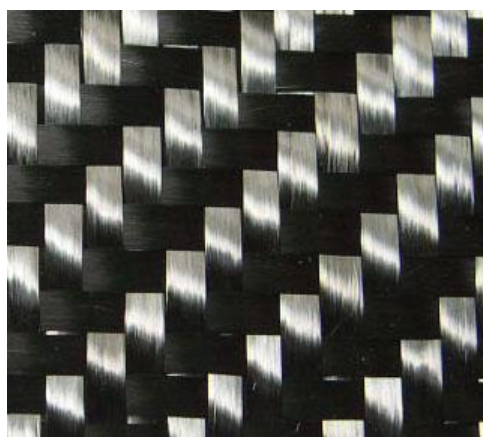
Figur 4-8: Prinsippkisse av skjærspenning i planet [28]

For f.eks karbonfibertypen T700S er skjærfastheten henholdsvis 98 MPa og 106 MPa for interlaminær og in-plane⁹ [48]. I den konservative materialmodellen blir begge skjærspenningene antatt like og redusert til 60 MPa [26]. Grunnet den lave skjærfastheten er det viktig å beskytte fiberen mot slitasje/gnisninger fra andre komponenter på Roskva.

4.2 Karbonfiberarmert plast

4.2.1 Struktur og oppbygning

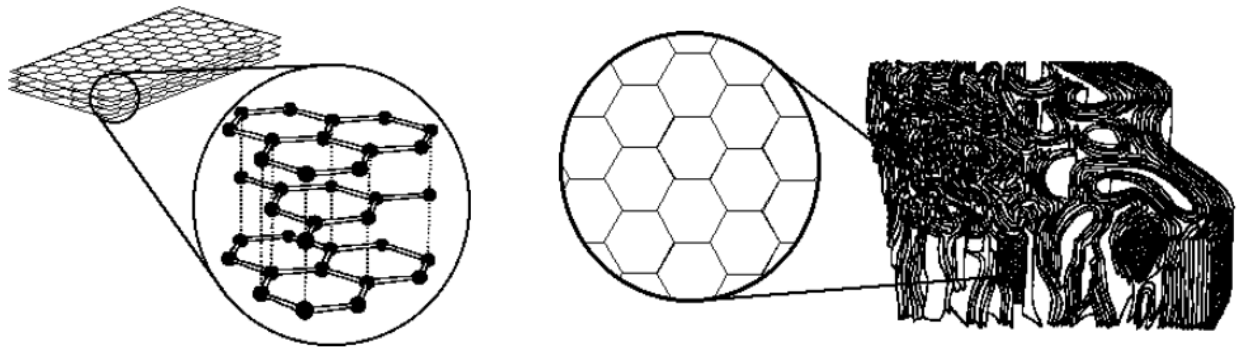
Karbonfiber er tynne fibre med en diameter på mellom 4 – 10 μm (fem ganger tynnere en et hårstrå) vevd inn i et karakteristisk mønster (Figur 4-9). Fibrene har et karboninnhold på minimum 92 %.



Figur 4-9: Utsnitt av karbonfiberduk. Det er vanlig at fibrene er vevd inn i et mønster, kalt "twill" [52]

⁹ Med Toray 350 °F Epoxy harpiks og 60 % fibervolum

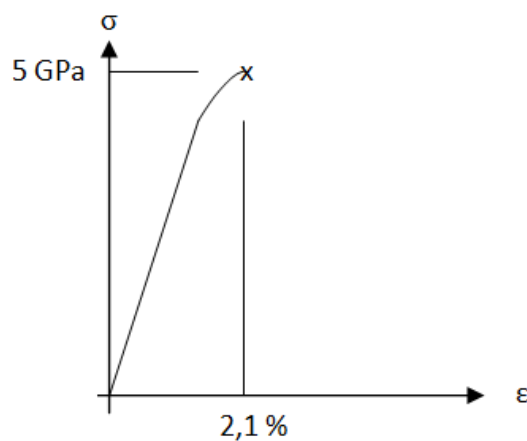
Normalt finnes karbon som grafitt, som er flak av karbonatomer i en lagvis struktur. Flakene i grafittstrukturen løsner veldig lett (se Figur 4-10), da det er svake forbindelser mellom lagene. Strukturen i karbonfiberen kan minne mye om grafitt da den består av lag med karbonatomer. Mens lagene i grafitt ligger som store parallelle flak oppå hverandre er lagene med karbonfibrene kveilet sammen til bunter og tøyler; en "rotete" struktur slik som vist på Figur 4-10. Det krever svært høy styrke å rive lagene i buntene fra hverandre, og er grunnen til den høye styrken. [51]



Figur 4-10: T.v. Karbonatomer i en parallell lag, grafitt. T.h. karbonfiber med lagene av atomer "kveilet" sammen [51]

4.2.2 Karbonfiber – et sprøtt materiale

I motsetning til for duktile materialer hvor en oppnår flyt oppfører karbonfiberen seg som et sprøtt materiale; sammenhengen mellom strekk og forlengelse er omtrent elastisk fram til brudd (se Figur 4-11). Dette medfører i praksis at karbonfiberen kan ryke uten forvarsel.



Figur 4-11: Spenningsdiagram for karbonfiber, ingen flyt oppnås. Oppførselen er tilnærmet elastisk helt til brudd

Når karbonfiberen er en del av et komposittmateriale vil fibrene i praksis strekkes noe før de tar opp spenning, da de rettes ut. Dette gir en spenningskurve slik som vist på Figur 4-11. [24]. Denne effekten tas ikke med i beregningene, samt den ulineære delen av kurva like før brudd antas elastisk. Altså antas karbonfiberen lineærelastisk og spenningen vil derfor følge Hooks lov.

Materialdata for fibertypen T700S vises i Tabell 4-6:



Tabell 4-6: Data for fibertypen T700S (hentet fra datablad vedlagt)

Strekkfasthet	4 900	MPa
E – modul	230	GPa
Bruddforlengelse	2,1	%

Disse dataene er ikke dimensjonerende da disse er uten tilsatt epoxy. Med epoxy blir dataene følgende (jmf. epoxy på s.24):

Tabell 4-7: Data for karbonfiberarmert epoxy av T700S med fiberinnhold på 60 % (hentet fra vedlagt datablad)

Strekkfasthet 0°	2 550	MPa
Strekkfasthet 90°	69	MPa
E – modul	135	GPa
Bruddforlengelse	1,7	%
Trykkfasthet	1 470	MPa
Bøyestyrke	1 670	MPa
Flex/bøyemodul	120	GPa
Strekkmodul	3180	MPa

Etter å ha vært i kontakt med Forsvarets forskningsinstitutt har forfatteren fått tilsendt dataene de benytter til sine komposittanalyser med duk av T700S fiber og epoxy (se analyse fom. s.82). Disse ligger noe lavere enn dataene i Tabell 4-7.

4.2.3 Noen viktige svakheter ved bruken av karbonfiberarmert plast

A. Trykkspenninger

Den høye bruddstyrken gjelder når fibrene blir strukket, mens ved trykkspenninger faller denne verdien noe. For fibertypen T700S er kompresjonsstyrken i fiberretning på 1470 MPa mot 2550 MPa i strekk¹⁰ [48]. Dersom en konstruksjon blir utsatt for trykkspenninger er det likevel ikke nødvendigvis kompresjonsstyrken som gir brudd, men knekkingen. Altså bør ikke 1470 MPa være dimensjonerende dersom faren for knekking er til stede, og en analyse/test av dette bør gjøres.

B. Slagfasthet

At sykkelrammer i karbonfiber plutselig knekker etter en velt er ikke ukjent, og kan skyldes den lave slagfastheten til karbonfiberen. Dets evne til å tåle slag og støt er dårlig, og hvis den skulle utsettes for dette uten at det medfører brudd er det svært viktig å undersøke karbonfiberen for sprekker med f.eks ikke destruktive metoder (utelatt grunnet begrensninger). Dersom karbonfiber skal brukes hvor det er fare for slag er en løsning å benytte Kevlar (forklares på s.48) i tillegg til karbonfiber.

¹⁰ Med Toray 250 °F Epoxy harpiks og 60 % fibervolum

C. Torsjon

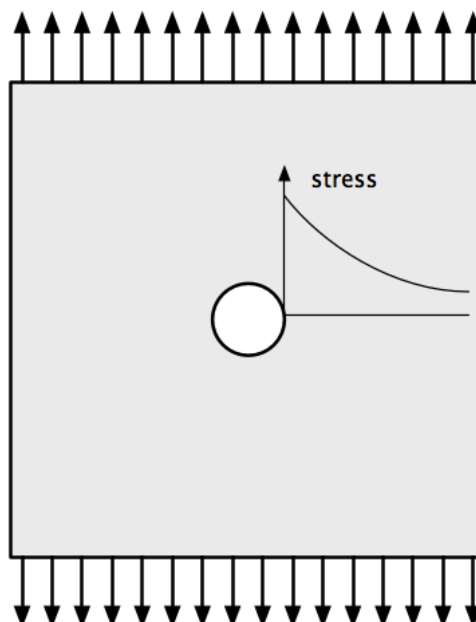
Karbonfiberen er som nevnt svak mot skjærspenninger sammenlignet med kapasiteten i strekk og trykk, og bør derfor vies ekstra oppmerksomhet ved dimensjonering. Hvis dette er tilfelle må laminatet være tilpasset dette ved å legge fiberretningen $\pm 45^\circ$ på lengderetningen [24]. Dette fordi hovedspenningene vil være størst ved denne vinkelen, og som kjent er det disse som fører til torsjonsbrudd. På denne måten blir skjærspenningen omgjort til strekk/trykk spenninger i lagene med $\pm 45^\circ$, og skjærkapasiteten blir dermed høyere enn ved 0° og 90° ¹¹. I lasttilfeller med ren torsjon (slik som i en drivaksling) består derfor konstruksjonen av flest slike lag. På Roskva vil noe torsjonskrefter oppstå i chassiset og det legges derfor inn slike lag i laminatet (beskrives nærmere på s.46).

D. Punktlaster

Siden karbonfiber består av fibre i en vevet duk vil den ikke ha den samme evnen til å motstå punktlaster som et isotropt materiale. Fibrene er svært sterke dersom de belastes i lengderetning, men ved punktlaster blir lasten påført et lite område/punkt fra en ugunstig retning (f.eks. en spiss gjenstand som presser på laminatet rett ovenfra). I tillegg vil også spenningen bli tatt opp i kun noen få fibre. Det skal lite energi til for å bryte bindingen mellom fibrene (som holdes sammen av epoxyen). I en karbonfiberkonstruksjon bør derfor festepunkter o.l. utformes slik at punktlastene holdes lave (f.eks. festing av batteripakke bør brakettene være store nok til å fordele lasten på et tilstrekkelig område). [37]

E. Spenningskonsentrasjoner

Siden karbonfiberarmert plast er et sprøtt materiale må spenningskonsentrasjoner tas med i dimensjoneringen. Spesielt ved utmattende belastning kan disse bli et problem da en vil få sprekkvekst, rundt festepunkter (jmf. sammenføyningsmetoder i neste avsnitt). Spenningsforløpet med spenningstopp i en plate med hull utsatt for strekkspenning vises i Figur 4-12.



Figur 4-12: En plate med hull utsatt for strekkspenning. Fra grafen ved hullet kan en se spenningen øker inn mot hullet hvor vi får en spenningstopp [63]

¹¹ Dette gir en økning av skjærkapasiteten fra 90 (ved 0°) til 310 MPa (ved $\pm 45^\circ$) [31]

Spenningstoppen uttrykkes på følgende måte:

$$\sigma_{hull} = K_T \sigma \quad (4.28)$$

Hvor K_T og σ er henholdsvis spenningskonsentrasjonsfaktor og gjennomsnittspenning. Denne faktoren varierer mellom 2 - 7 i karbonfiberlaminater for ulike fiberkonfigurasjoner (fra [7] er det anbefalt å bruke 3).

I en studie utført ved Universitetet i Toulouse har det blitt målt en 30 % økning av strekkfastheten i prøvebiter (lik Figur 4-12) med støpt hull vs. biter med borret hull¹². [19]

F. Sammenføyningsmetoder

Dersom noe skal festes til karbonfiberen finnes det to metoder, mekanisk og limt sammenføyning.

I. Mekanisk sammenføyning

Enkelte plasser på chassiset til Roskva (bla. svingarm- og styrekronefestet) må det benyttes mekanisk sammenføyning (bolter e.l). En har følgende muligheter:

- Maskinere ut større deler i aluminium og støpe disse i karbonfiberen, noe som vil gi økt tyngde.
- Støpe inn aluminiumshylser eller borre hull etter støping og deretter lime inn hylsene som boltene går igjennom.

Fra FFI ble forfatteren anbefalt å bore hull grunnet vanskeligheter med posisjonering, til tross for at dette er svakere enn støping (jmf. spenningskonsentrasjoner). Ved å bore hull bør det legges på ekstra lag rundt hullene på følgende måte: dersom det er f.eks 10 lag med fibre i en retning rundt hullet bør det lokalt legges på lag i retningene 90°, 45° og - 45° innimellom de lastbærende lagene. På denne måten kan det også i enkelte steder hvor lasten er lav ikke benyttes hylser [26].

Utmatting blir beskrevet under avsnitt om utmatting på s.45.

Testresultater fra bolttester med varierende fiberkonfigurasjon

Det har blitt utført en rekke tester av utrivningen av bolter i karbonfiberlaminat uten kjernemateriale med varierende fiberkonfigurasjoner. Data fra slike tester er beskrevet i [7]. Konklusjonen fra disse forsøkene er følgende:

1. For laminater med kun ensrettede fibre (0°) har brudd oppstått ved at fibre har blitt revet fra hverandre ved et relativt lavt trykk.
2. Bruken av lag i retningene 90° og +/- 45° har størst effekt dersom de blir benyttet nær eller på overflaten. Målinger har vist at konfigurasjonen [90°, +/- 45°, 0°]_s tåler 30 % mer enn [0°, 90°, +/- 45°]_s.
3. Forholdene mellom antall lag med 0° og +/- 45° har betydning for styrken, og ved et forhold på 60 : 40 er styrken høyest.
4. Styrken kan bli forbedret dersom det benyttes skiver på hver side av laminatet og passende klemkraft påføres. Skivene hindrer spredning av sprekker i laminatet og gjør at delamineringen skjer på et større område og blir dermed mindre kritisk.

¹² Det ble også observert at bruddet i den borrede biten skjedde plutselig, mens det for den støpte var gradvis.

Ved bruken i Roskva vil det i tillegg til karbonfiber også være kjernemateriale av Divinycell, hvilket også medfører noen krav til innfestninger (forklares på s.54).

Grunnet de mange usikkerhetene blir vi nødt til å teste utrivningen av bolter for å se hvilke spenninger, og typen brudd, som opptrer. Dette er omtalt på s.66.

Fordelene og ulempene ved bruken av boltforbindelser er oppsummert i Tabell 4-8.

Tabell 4-8, Fordeler og ulemper ved bruken boltforbindelser i karbonfiberarmert plast

Fordeler	Ulemper
<ul style="list-style-type: none"> - Metoden er tidsbesparende da den krever lite overflatebehandling - Montering/demontering rask og enkel 	<ul style="list-style-type: none"> - Krever ekstra bruk av karbonfiber rundt hull - Hullet vil stoppe de sammenhengende fibrene i området og dermed redusere bruddspenningen betraktelig. Det vil da bli områder med spenningskonsentrasjoner rundt hullene som kan føre til brudd. - Ved innstøping av større deler øker vekta i motsetning til limte forbindelser

II. Limt sammenføyning

Denne metoden brukes bla. til å sette sammen de ulike delene av chassiset etter støping, og ellers der hvor deler skal festes permanent. Limet som benyttes er av typen Spabond 345 fra Gurit. Dette er sterkt og kan brukes ved sammenføyning av chassiset, uten bruk av overlappende karbonfiber. I tillegg benyttes limet ved liming av metallhylser inne i sandwichkonstruksjonene ved innfestninger av svingarm m.m. Ved dimensjonering må ikke skjærspenningen overstige 40 MPa [40]. Fordelene og ulempene ved limte forbindelser vises i Tabell 4-9.

Tabell 4-9, Fordeler og ulemper ved bruken av limte forbindelser i karbonfiberarmert plast

Fordeler	Ulemper
<ul style="list-style-type: none"> - Fordeler kreftene over et stort område - Trenger ingen hull og en slipper derfor ulempene dette medfører - Lav vektøkning 	<ul style="list-style-type: none"> - Vanskelig å se etter skader - Kan påvirkes av fuktighet, omgivelsestemperaturen m.m. - Krever overflatebehandling før liming - Vanskelig å demontere uten å ødelegge karbonfiberen

G. Temperaturendringer

Bruken av denne typen komposittmateriale krever undersøkelser av de fysiske egenskapene ved ulike temperaturer dersom bruk i varmere/kaldere strøk er aktuelt. Det er ikke fibrene som er problemet, men epoxyen som setter begrensningene; ved en temperatur på rundt 90 °C kan fibrene løsne fra epoxyen (varierer med typen benyttet, står beskrevet i datablader). Dersom sykkelen kjøres en varm sommerdag i sydligere strøk og blir utsatt for en høy belastning kan hele chassiset gi etter [24]. Test av dette forklares under testing mot utmatting på s.43.



4.2.4 Utmatting i karbonfiberarmert plast

Til bruk i motorsykelchassis er det hovedsakelig utmattingsegenskapene som er dimensjonerende, da Roskva skal kunne kjøres tusenvis av km på varierende underlag. Utmattingsegenskapene til karbonfiber er gode, og sammenlignet med de fleste metaller er utmatningsfastheten høyere [10]. I metaller vil en sprekke vokse jevnt opp til kritisk sprekkelengde for deretter å vokse raskt og til slutt plutselig medføre brudd, noe som kan være svært vanskelig å oppdage på forhånd (selv ved bruk av ikke-destruktive metoder). Fordelen med karbonfiber er at sprekker kan være lett synlige, og gjerne oppstå etter få antall lastsykluser, uten at materialet blir svekket av den grunn. Sprekken vokser jevnt hele tiden og fører derfor til at stivheten gradvis minker uten et plutselig brudd [7]. Likevel bør dimensjonering være på konservativ side, da utmatningsbrudd kan få fatale konsekvenser.

Testing av utmatting vil ikke bli utført grunnet begrensninger og dimensjoneringsdata vil derfor hentes fra kilder. I dette avsnittet blir tre tester beskrevet: bøyetest for å finne utmatningsfasthet, utmatting vs. temperaturendring og til slutt utmatting i boltforbindelser.

A. Bøyetest av fibertyper for å finne utmatningsfasthet

En utmattingstest i en roterende bøyemaskin ble utført med fire forskjellige duker fra produsenten Toray torayca, hvorav den ene er T700S som benyttes i Roskva. Nedenfor beskrives en liten del av denne omfattende testen som kan sees i sin helhet på kilde [18].

I. Materialdata og metode

Elastisitetsmodulene og bruddstyrken for de ulike fibertypene er listet opp i Tabell 4-10.

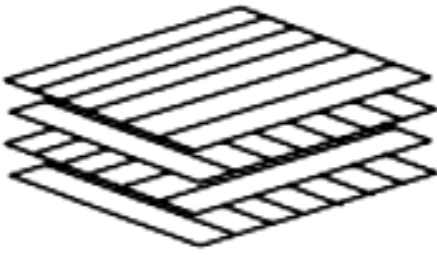
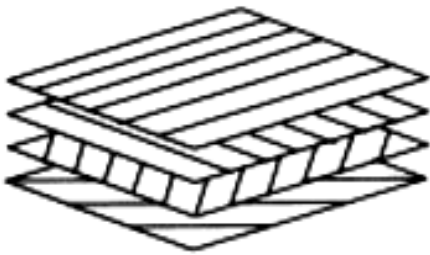
Tabell 4-10: Testdata gjengitt fra kilde for fire ulike fibertyper brukt sammen med epoxy¹³

	Epoxy resin	Carbon fiber			
	Toray epoxy	Toray torayca	Toray torayca	Toray torayca	Toray torayca
	Number 2500	T800H	T700S	M40J	T300
Tensile stress	54.88 MPa	5,5 GPa	5,0 GPa	4,4 GPa	3,5 GPa
Young's modules (GPa)	3,724	294	230	377	230

For å teste fiberretningens påvirkning på testresultatet ble det laget to plater per type med ulike fiberkonfigurasjoner slik som vist på Figur 4-13.

¹³ Bruddstyrken i tabellen er her for kun fiberen og epoxyen hver for seg. Den faktiske bruddstyrken i fiberretningen i kompositt er rundt halvparten (se vedlegg 2) [48]

Figur 4-13: De to platekonfigurasjonene benyttet til testingen [18]

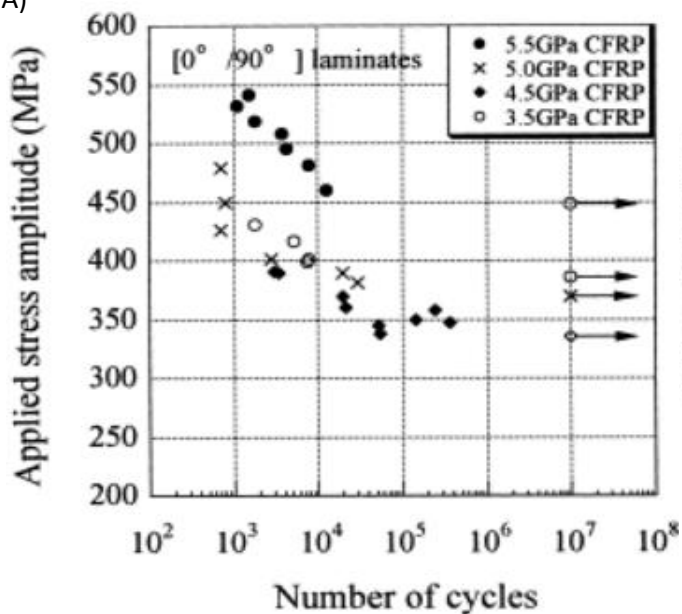
Test 1	Test 2
	
<p>Annenhver plate med fiberretning endret 90° [0°/90°]</p>	<p>Fire plater/lag med hver sin fiberretning med [0°, +45°, -45°, 90°] (feil på figur, denne viser [0°, 90°, +45°, -45°])</p>

Lasten ble påført med en frekvens på 30 Hz. Ulike laster ble påført for hver fibertype og antall sykluser til brudd ble registrert.

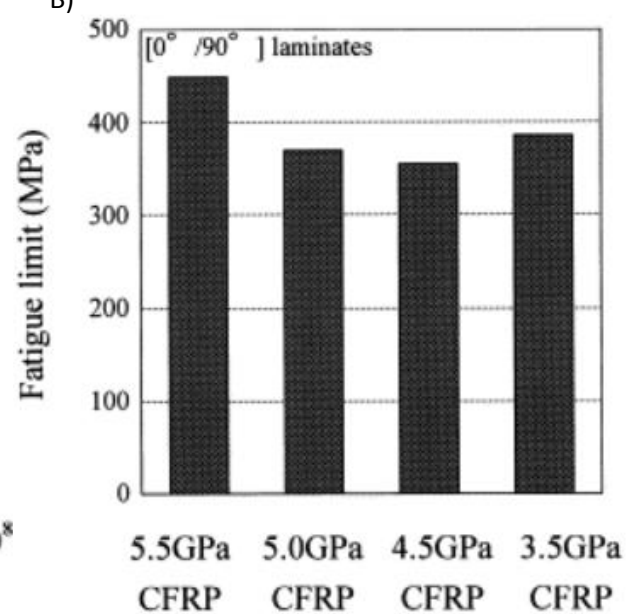
II. Resultat

Resultater for plater i test 1 er illustrert ved Figur 4-14.

A)

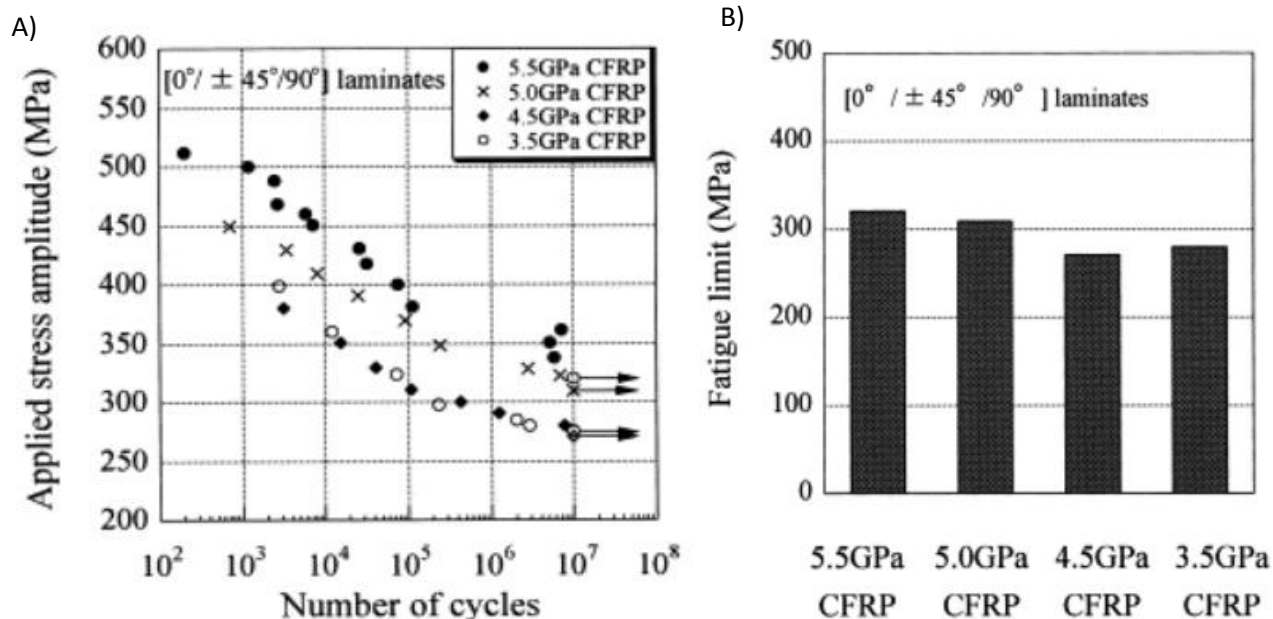


B)



Figur 4-14: A) S-N kurve for test 1 med konfigurasjonen [0°/90°]. B) Utmattingsfasthet for de forskjellige fibertypene [18]

Resultater for platene i test 2 er illustrert ved Figur 4-15.



Figur 4-15: A) S-N kurve for test 2 med konfigurasjonen $[0^\circ, +45^\circ, -45^\circ, 90^\circ]$. B) Utmattingsfasthet for de forskjellige fibertypene, med rundt 300 MPa for fibertypen T700S [18]

Fra de to testene går det tydelig frem at fiberretningen er av betydning. Test 2 ga jevnt over en lavere utmattingsfasthet enn i test 1. Videre viser målingene at det ikke er en tydelig sammenheng mellom strekkfasthet og utmattingsfastheten (i spesielt test 2 er dette synlig med kun rundt 50 MPa forskjell mellom den sterkeste og den svakeste fiberen). I test 1 skiller den sterkeste fiberen seg noe ut i forhold til de øvrige, men forskjellen er dog så liten til at det ikke får betydning for videre arbeid.

III. Konklusjon

De viktigste punktene fra konklusjonene i rapporten [18]:

1. For fibertypen T700S blir den dimensjonerende utmattingsfastheten 300 MPa.
2. Utmattingsfastheten avhenger av trykkspenningene i lagene med 0° fiberretning (altså i lengderetningen av prøvestav). Utmattingsfasthet avhenger ikke av strekkfastheten til fibre.
3. Ved bruk av fiberkonfigurasjon som i test 1 påvirkes utmattingsfastheten av varmeutvikling.

I tillegg er det viktig å nevne at utmattingsfastheten for bøyebelastning er lavere enn ved en ren strekkbelastning grunnet deler av laminatet blir utsatt for trykkspenninger ved bøyning [7]. Derfor er utmattingsfastheten fra denne testen dimensjonerende.

Dataene til materialmodellen fra Forsvarets forskningsinstitutt (Tabell 6-3 s.89) er for den samme fibertypen (T700S) benyttet i denne testen. I tillegg vil forfatteren få statiske data fra testing. Dermed er grunnlaget tilstrekkelig til å kjøre både statiske og utmattingsanalyser med denne fibertypen (sistnevnte utføres ikke av forfatter).

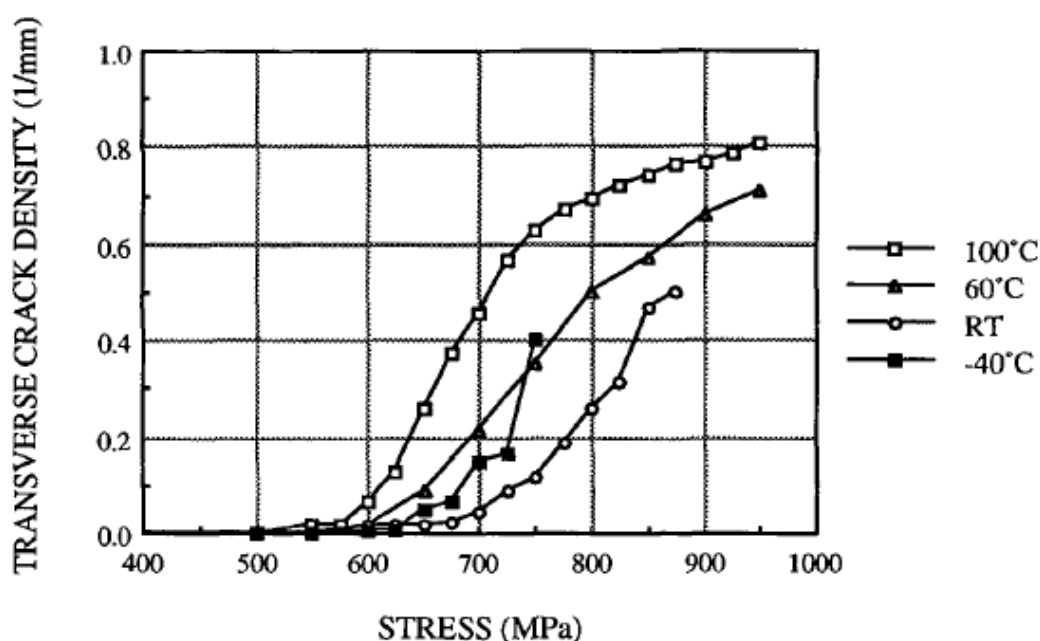
B. Test av utmatting vs. temperaturendringer

I en studie utført av Toray Industries og University of Cambridge i 1993 [17] ble karbonfiberarmert epoxy testet for utmatting (pulserende strekk) ved ulike temperaturer (– 40 °C til 100 °C). Dette ble deretter sammenlignet med resultatet av statisk lasttilfelle. I tillegg ble også temperaturen forandret underveis i enkelte av testene. Duken benyttet er av typen T800H¹⁴ (Tabell 4-10 s.40) og epoxyen av typen 3631 med en herdetemperatur på 180 °C. Prøvebitene hadde en lengde på 140 mm, med et tverrsnitt på 1,6 x 25 mm.

Nedenfor vises et utdrag av testen med de viktigste punktene.

I. Resultat

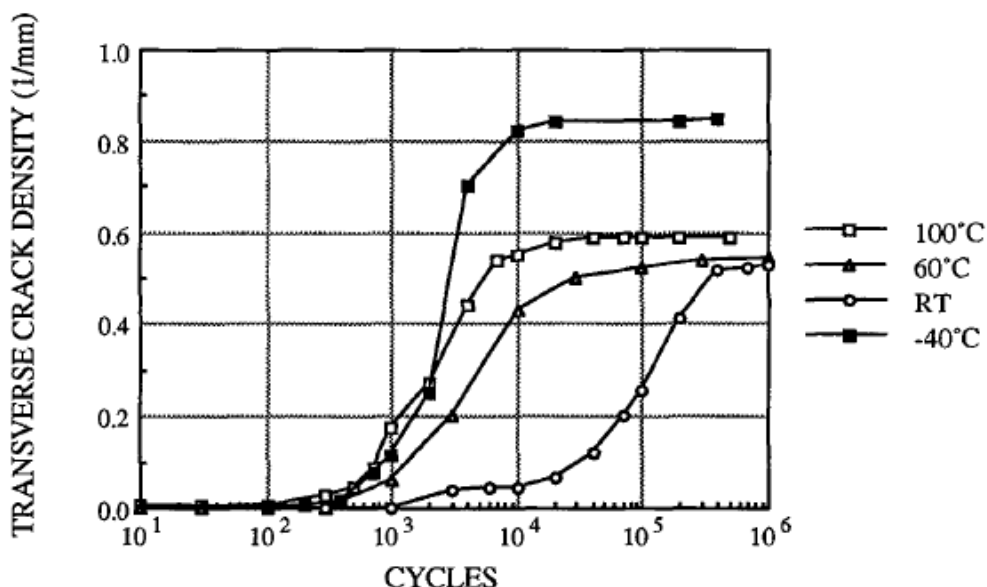
Kort fortalt viste testen med statisk last at mengden epoxy på fibrene var mindre ved 100 °C enn ved lavere temperaturer. Dette resulterer i flere sprekker på tvers av lengderetning ved høyere temperaturer enn ved lave. Den transverse sprekktettheten fra testen er plotet i Figur 4-16.



Figur 4-16: Transvers sprekktetthet ved statisk belastning. RT = rom temperatur [17]

Ved utmatting ble det observert flere sprekker på tvers av lengderetning ved – 40 °C enn ved 100 °C (se Figur 4-17) sammenlignet med statisk. Ved 100 °C oppsto det delaminering på hele prøvestykket, hvilket ikke skjedde under den statiske testen ved høyere temperaturer. Et plot av den transverse sprekktettheten på prøvene er vist i Figur 4-17.

¹⁴ En sterkere fibertype enn T700S som benyttes i Roskva



Figur 4-17: Transvers sprekketthet ved utmattende belastning [17]

Videre viste det seg at temperaturendringer mens testingen pågikk ikke påvirket resultatet og derfor kan neglisjeres i forhold til utmatting.

II. Konklusjon

De viktigste punktene fra konklusjonene i rapporten [17]:

1. Skadeomfanget varierer med temperaturen, med ulike resultater for statisk og utmatting.
2. Endringene i temperatur ved adhesjon mellom fibre og epoxyen påvirker resultatet.
3. Den største forskjellen mellom testene var dannelsen av sprekker på tvers ved - 40 °C og delaminering ved 100 °C.
4. Delaminering ved utmatting ved høye temperaturer skyldes at epoxyen begynner å mykne og dermed mister grepet på fibre.

Sammenligningen av resultatene og grad av alvorlighet vises i Tabell 4-11.

Tabell 4-11: Sammenligning av de ulike testresultatene [17]

		- 40 °C	RT	100 °C
Monotonic	Transverse	√√	√√√	√√√√
	Longitudinal	√√√	√	0
	Delamination	√	√	0
Fatigue	Transverse	√√√√	√√	√√√
	Longitudinal	√√	√	0
	Delamination	√	√	√√√√√

Her går det fram at delamineringen ved 100 °C er den mest alvorlige skaden og at det ved romtemperatur er liten fare for skade (med unntak av transvers sprekkdannelse ved statisk last). Ikke uventet er det ytterpunktene på temperaturskalaene som har størst påvirkning, og temperaturendringene Roskva kan bli utsatt for er dermed i mindre grad kritiske (som 0 - 50 °C). Jeg mener derfor at det ikke behøves å ta

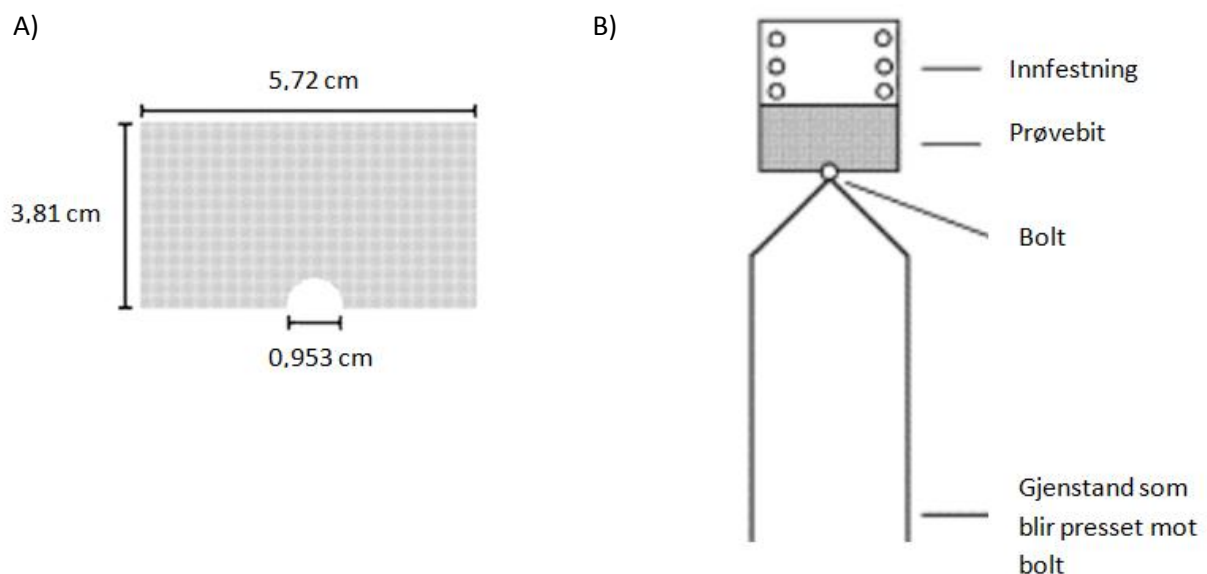
spesielle hensyn ved dimensjonering i forhold til temperatur, utenom at det i sydligere strøk bør sjekkes hyppigere for delaminering og transvers sprekkdannelse.

C. Utmatting i boltforbindelser

Ved Georgia Institute of Technology [15] ble det utført en test av utmatting i bolthull på prøvestykker bestående av 64 kvasi - isotropiske lag ($[\pm 45^\circ/90^\circ/0^\circ]_{8s}$).

I. Testprosedyre

Prøvestykket blir spent fast, og en spiss gjenstand presser på en bolt som ligger i hullet slik som vist på Figur 4-18. Lasten har verdien $R = 0,1^{15}$ med frekvensen 10 Hz.



Figur 4-18, Testoppsett for utmatting av bolthull. A) viser prøvestykket med dimensjoner, legg merke til hullet hvor bolten skal være. B) viser testoppsettet med prøvestykket og bolt innspent [15]

Fibertypen og epoxyen benyttet har nesten helt identiske egenskaper som T700S m/ESR3 epoxy.

II. Konklusjon

De viktigste resultatene fra testen er følgende:

- Den kritiske spenningen etter utmatting lå på omlag 70 % av den statiske hvilket for denne prøva var på 325 MPa mot 461 MPa statisk. Ved belastning lavere enn 325 MPa ble det ikke brudd ved 1 million sykler, og dette blir derfor den dimensjonerende spenningen der hvor det er fare for utmattingsbrudd.
- Lastfrekvensen har liten/ingen effekt på levetiden.
- Økning av R - verdien øker maksimal spenning hullet kan oppta.
- Bruddårsakene er delaminering, utknekking av lag og brudd i lagene.

¹⁵ R-verdien er forholdet min og maks spenning ($\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{maks}}$)

4.2.5 Oppsummering av fordeler/ulemp

I Tabell 4-12 vises en oversikt over fordelene og ulempene ved bruken av karbonfiberarmert plast.

Tabell 4-12, Fordeler og ulemper ved bruken av karbonfiberarmert plast

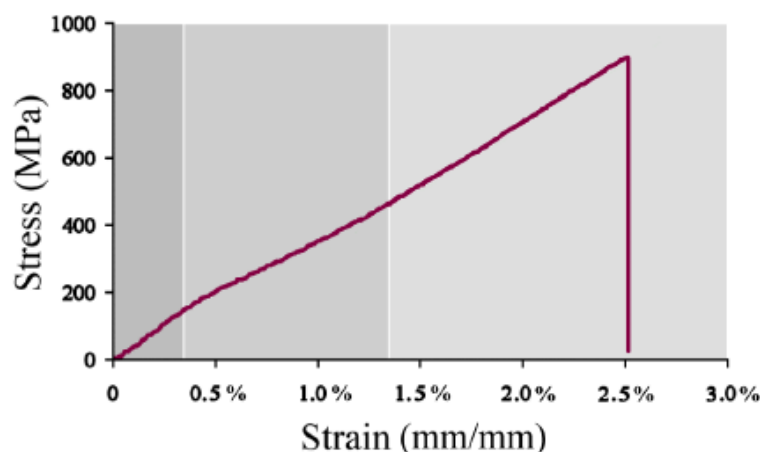
Fordeler	Ulemper
<ul style="list-style-type: none"> - Meget høy stivhet og styrke i forhold til vekt - Kan tilpasses mange ulike lasttilfeller ved å variere fiberretningene - Ikke påvirket av fuktighet og en rekke syrer og løsemidler ved romtemperatur [16] - Gode utmattingssegenskaper (dersom sprekker unngås under støping og bearbeiding) 	<ul style="list-style-type: none"> - Dyrt sammenlignet med aluminium og andre metaller - Svakt mot trykkspenninger - Lav skjærkapasitet - Lite slagkraftig - Utsatt for sprekker/kjerv o.l. under støping og bearbeiding - Vanskelig å kjøre FEM analyse på grunnnet ortotrope egenskaper - Sammenføyningsmetoder kan bli et problem - Sprøtt materiale, kan gå til brudd uten noe forvarsel

4.3 FLAX – det grønne alternativet

Karbonfiber er ikke et miljøvennlig produkt, og det finnes derfor alternativer. Roskva skal være et miljøvennlig alternativ til dagens motorsykler og det kan derfor være gunstig å bruke miljøvennlig fibermateriale i enkelte deler av konstruksjonen. En av disse miljøvennlige erstatningene er fibertypen FLAX fra produsenten Lineo som består av fibre fra planter med samme navn.

4.3.1 Mekaniske egenskaper

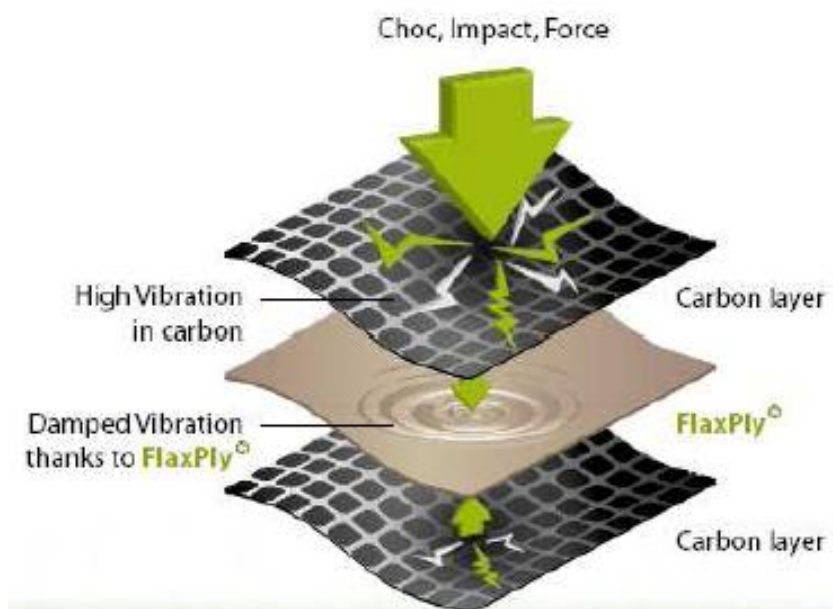
Sammenlignes spenningskurven med den for karbonfiber på s. 35 er oppførselen omtrent lik, dog er karbonfiberen stivere (ca. 200 mot 55 GPa). Flaxfiberen oppnår ikke flyt, men går tilnærmet lineært til brudd slik som for karbonfiberen (se Figur 4-19).



Figur 4-19: Spenningskurve til Flax fiber. I likhet med karbonfiber er det her heller ingen flyt, og oppførselen er tilnærmet elastisk og følger dermed Hooks lov [1]

Bruddstyrken ligger rundt den for glassfiber, altså ca. 1000 MPa (altså omtrent en femtedel av karbonfiber), men er rundt 40 % lettere hvilket gir den samme tettheten som karbonfiber.

Den største fordelen med bruk av Flax sett ut fra dimensjoneringshensyn er dets evne til å ta opp vibrasjoner. Ved å ha et lag mellom de mange lagene med karbonfiber vil vibrasjoner hindres fra å forplante seg videre og dermed svekke karbonfiberen. [43]



Figur 4-20: Flax har god evne til å ta opp vibrasjoner før de forplanter seg videre ned i laminatet og dermed kan svekke karbonfiberen [43]

Fordelene og ulempene ved denne fibertypen er oppsummert i Tabell 4-13.

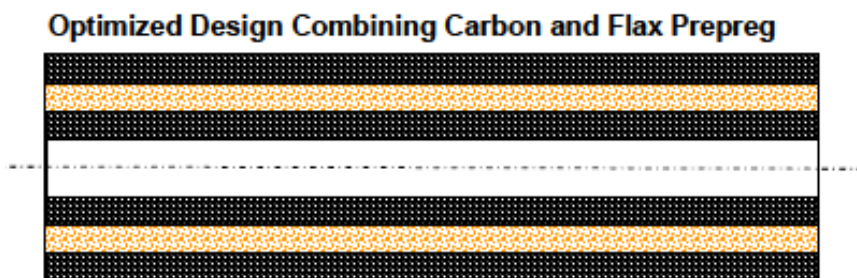
Tabell 4-13, Fordeler og ulemper ved bruken av Flax fiber

Fordeler	Ulemper
<ul style="list-style-type: none"> - Miljøvennlig - Vibrasjonsdempende 	<ul style="list-style-type: none"> - Lavere styrke enn karbonfiber - Vil medføre noe høyere vekt på konstruksjonen pga. lav styrke

4.3.2 Implementering av FLAX i laminat

Flax fiber vil bli benyttet i hele chassiet med unntak av rundt styrehodet, svingarmsinnfestning og andre kritiske områder. Produsenten oppgir at mellom 15 – 25 % av karbonfiberen kan erstattes med Flax.

For å maksimere vibrasjonsdempingen bør lagene plasseres i mellomliggende lag slik som vist på Figur 4-21 med en fiberretningen på 60°. [43]



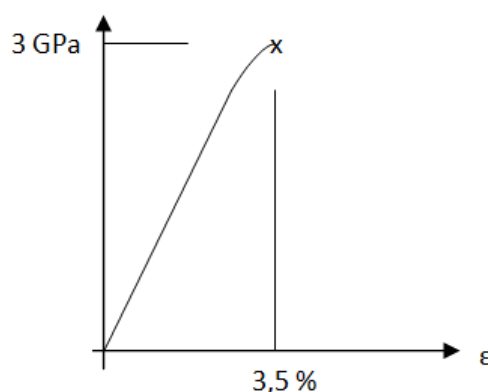
Figur 4-21: Laminatkonfigurasjon med Flax fiber. Bør plasseres midt mellom karbonlagene for maksimal vibrasjonsdemping. Det hvite området er kjernemateriale [43]

4.4 Kevlar/aramid fiber

Karbonfiberarmert plast har som nevnt tidligere en lav slagfasthet (jmf. slagfasthet på s.36). For å motvirke disse egenskapene kan lag med Kevlar¹⁶/aramid fibre benyttes.

4.4.1 Mekaniske egenskaper

Strekkurven (Figur 4-22) er i likhet med karbonfiberen lineærelastisk og ingen flyt oppnås før brudd.



Figur 4-22: Lineærelastisk strekkurve for Kevlar fiber (laget utifra vedlegg)

Fiber av aramid har følgende data:

Tabell 4-14: Data for aramid fiber (fra vedlegg)

Strekfasthet	2 800 – 3 400	MPa
E – modul	58 – 82	GPa
Bruddforlengelse	3,3 – 3,7	%

Sammenlignet med karbonfiberen fra Tabell 4-6 s.36 har Kevlar 40 % lavere strekkfasthet og 65 % lavere E – modul. Dersom det skulle oppstå brudd i karbonfiberen vil den lave stivheten medføre at Kevlaren holder konstruksjonen intakt. Kevlar er derfor en betydelig sikkerhet der hvor det er fare for sprekkdannelse og brudd.

¹⁶ Kevlar er navnet på fibertypen fra produsenten DuPont, som på 60 - 70 tallet utviklet materialet. DuPont var på utkikk etter et materiale som kunne erstatte stål i bildekk. Aramid er den generelle betegnelsen. [42]

Den største fordelen ved bruken av Kevlar er dets høye slagfasthet. I konstruksjoner hvor slag kan oppstå bør derfor Kevlar benyttes sammen med karbonfiberen. Et eksempel på dette er motorsykelhjelmer av karbonfiber: ved en relativ liten kollisjon vil hjelmen bli helt smadret dersom den var laget av kun karbonfiber¹⁷. Ved bruk av Kevlar blir den høye styrken til karbonfiber kombinert med høy slagfasthet, og blir dermed en svært godt egnet kombinasjon til bruk hjelmer. [42]

En ulempe med bruken av Kevlar er dets høye motstand mot kutting hvilket medfører bruken av dyrt spesialutstyr. I tillegg er det vanskelig å bearbeide etter støping da det ved sliping vil få en hårete overflate. [21]

Ved bruk må ikke Kevlaren eksponeres for lys da det ikke tåler UV – stråling og vil bli betydelig svekket av dette. Derfor må enten overflaten behandles eller andre lag med fiber legges over. Ved bruk i Roskva vil det uansett av utseendemessige årsaker ikke være eksponert for UV – lys (Kevlarfibrene er gule slik som vist på Figur 4-23).

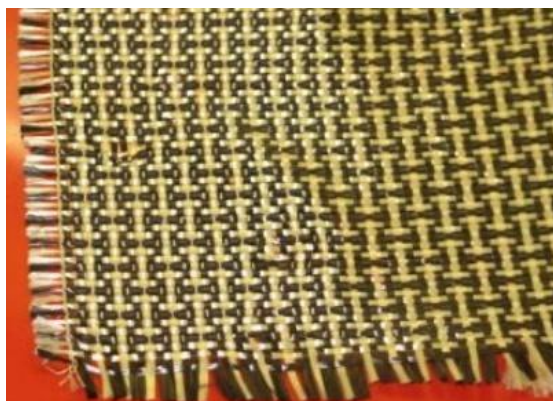
I Tabell 4-15 er fordelene og ulempene ved bruken av denne fibertypen oppsummert.

Tabell 4-15, Fordeler og ulemper ved bruken av Kevlarfiber

Fordeler	Ulemper
<ul style="list-style-type: none"> - Høy slagfasthet - Høy strekkfasthet (men lavere enn karbonfiber) - Lav vekt - Flammebestandig - Motstand mot kjemikalier 	<ul style="list-style-type: none"> - Vanskelig å arbeide med - Lav trykkfasthet - Absorberer fuktighet - Tåler ikke UV – stråling - Designmessig uegnet - Dyrt

4.4.2 Implementering av Kevlar i laminat

Det vanligste i karbonfiberkonstruksjoner er å benytte lag vevet av både karbon og Kevlar (hybridduk) slik som vist på Figur 4-23. Dette for å spare vekt og kombinere begge materialenes fordeler i en og samme duk.

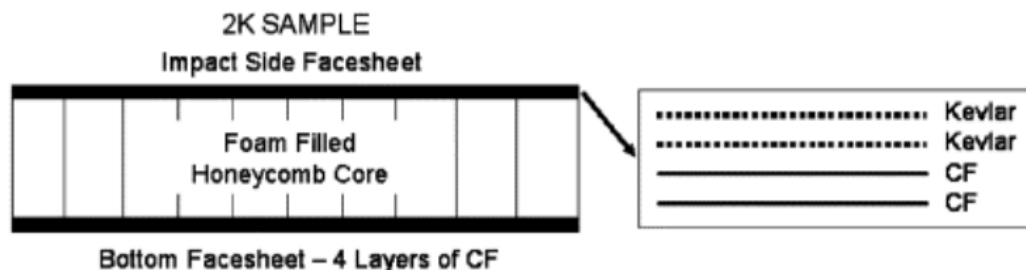


Figur 4-23: Biaksial hybridduk av karbonfiber og Kevlar (gult) [55]

¹⁷ En hjelm av kun karbonfiber ville derfor aldri ha blitt godkjent i bruk.

A. Test av slagfasthet ved lav hastighet med Kevlar/karbon sandwich

I en amerikansk studie ble sandwicher med ulike kombinasjoner av Kevlar- og karbonfiber testet ved slag, både i hybrid- og rene Kevlar duker (begge biaksiale, forklares på s.52). Målet var å finne den mest optimale kombinasjonen. Testen kan leses i sin helhet på [2].



Figur 4-24: Sandwich benyttet i test. På slagsiden benyttes en eller flere Kevlar duker ytterst [2]

I. Resultater

Resultatet av testen vises i Tabell 4-16 og Tabell 4-17.

Kevlar

Tabell 4-16: Slagenergi og slagkraft ved Kevlar duk. Legg merke til at den maksimale slagkraften synker ved bruken av mer enn et lag [2]

Antall duker	Økning absorbert slagenergi (%)	Økning maksimal slagkraft (%)
1	11,3	11,3
2	8,7	9,0
3	7,1	8,3
4	7,1	7,5

Hybrid

Tabell 4-17: Slagenergi og slagkraft ved hybrid duk [2]

Antall duker	Økning absorbert slagenergi (%)	Økning maksimal slagkraft (%)
1	0,9	-0,8
2	18,2	22,5
3	14,3	9,7
4	36,5	25,6

II. Konklusjon

Den mest gunstige bruken av hybrid duker er ved to duker, da dette gir en betydelig økning i slagenergien og slagkraften uten at det går på bekostning av stivheten.

Dersom det benyttes ren Kevlar duk er det best å benytte kun en duk, da egenskapene blir dårligere ved flere duker i tillegg til at stivheten synker betraktelig. Bruken av ren Kevlar er dårligere egnet enn hybrid duker.

Forøvrig er det viktig å merke seg at ved bruken av Kevlar/hybrid synker trykkfastheten med rundt 10 % sammenlignet med karbonfiber.

4.5 Valg av fiberkonfigurasjon og duktype

4.5.1 Fiberkonfigurasjon i chassis

Nedenfor velges fiberkonfigurasjon basert på tester og teori forklart i de foregående avsnittene.

Grunnet de mange ulike belastningssituasjonene på Roskva har forfatteren i første omgang valgt å gå for et laminat som inneholder fiberretningene 0° , $+45^\circ$, -45° og 90° (jmf. Figur 4-1 s.24). Denne kombinasjonen er anbefalt der hvor det råder usikkerhet om belastningssituasjon [7]. Dette er en kvasi-isotropisk konfigurasjon, hvilket betyr at laminatet har nesten de samme egenskapene som et isotropt materiale.

I enkelte kritiske deler av chassiset vil det i de fire øverste lagene (to duker) bli benyttet hybridduk slik som nevnt på s.50. I mindre kritiske områder vil en av dukene i karbonfiber bli byttet ut med Flax fiber (jmf. Figur 4-21 s.48). I beregningene utført vil dog ikke Kevlar eller Flax bli regnet med (jmf. begrensninger s.14).

Nedenfor er det listet opp noen mulige konfigurasjoner med sine respektive fordeler og ulemper¹⁸:

Tabell 4-18: Ulike fiberkonfigurasjoner (jmf. beskrivelse av konfigurasjonene på s.23) med sine respektive fordeler/ulemper basert på data i kilde [7] ved strekkbelastning. Lagene med Kevlar og Flax er utelatt

Konfigurasjon	Fordeler	Ulemper	Valg
$[90^\circ, 45^\circ, 0^\circ, -45^\circ]_s$	<ul style="list-style-type: none"> - Lavest interlaminære spenninger og midtre lag blir trykket sammen - Bra for boltforbindelser 	Dårlig mot bøyespenning grunnet 90° i ytterste lag	Utelukket grunnet bøyespenning
$[90^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]_s$	<ul style="list-style-type: none"> - Midtre lag trykket sammen - Bra for boltforbindelser 	<ul style="list-style-type: none"> - Samme som over - Noe høye interlaminære spenninger 	Utelukket grunnet bøyespenning
$[0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ]_s$	<ul style="list-style-type: none"> - Bra for bøyespenning - Lav skjærspenning langs planet (in – plane shear) 	<ul style="list-style-type: none"> - Høye interlaminære spenninger og de midtre lagene blir strukket fra hverandre 	Utelukket grunnet delamineringsfare
$[0^\circ, -45^\circ, 90^\circ, 45^\circ]_s$	<ul style="list-style-type: none"> - Bra for bøyespenning 	<ul style="list-style-type: none"> - Midtre lag blir strukket fra hverandre - Høye interlaminære spenninger 	Utelukket grunnet delamineringsfare
$[0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, -45^\circ]_s$	<ul style="list-style-type: none"> - Bra for bøyespenning og midtre lag trykket sammen - Lav skjærspenning langs planet (in – plane shear) 	<ul style="list-style-type: none"> - De interlaminære skjærspenningene er noe høye - Dårligst mot boltforbindelser 	Det beste alternativet

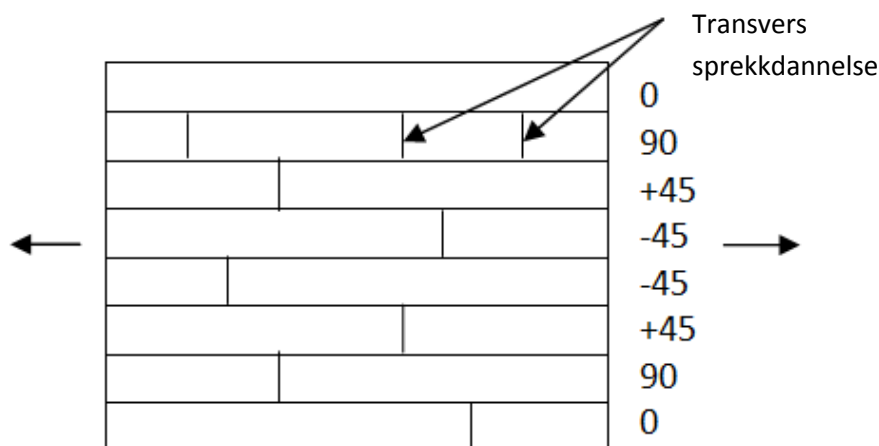
¹⁸ Det finnes en rekke målinger av ulike spenninger med ulike lasttilfeller, og det er derfor lett og rote seg bort i data og ikke bestemme seg for en endelig konfigurasjon. Denne utgreiingen er basert på enkelte data gjort med belastning av prøvestykker lastet i en retning beskrevet i [7]

Det finnes også fiberkonfigurasjoner som ikke er symmetrisk om tykkelsens senterlinje (midtre plan), men ved en belastning kan laminatet vri eller bøye seg og høye skjærspenninger forekomme. Symmetri har derfor blitt satt som krav [32].

Løsninger med 90° i ytterste lag er utelukket grunnet bøyespenninger, da disse vil virke transvers på fiberretningene og dermed utgjøre en fare for brudd.

Videre velges lagene hvor det er en positiv σ_z (jmf. punkt 3 s.33) bort da det er fare for delaminering mellom de midterste lagene.

Valget en sitter igjen er dermed $[0^\circ, 90^\circ, +/- 45^\circ]_s$ (evt. $[0^\circ, 90^\circ, -/+ 45^\circ]_s$) som gir den beste kombinasjonen av interlaminære spenninger og bøyespenninger. Denne er også gunstig med tanke på bruken av biaksial duk som består av to fiberretninger vevet 90° på hverandre (utdypes på s.52). En biaksial duk kan dermed ikke benyttes i tilfeller hvor det ikke er 90° mellom lagene (slik som ved $[0^\circ, -45^\circ, 90^\circ, 45^\circ]_s$). I tillegg er dette gunstig da det vil være lave skjærspenninger i planet i laminaer hvor $+/- 45^\circ$ ligger etter hverandre [45]. En strekktest gjort av [7] av et laminat med $[0^\circ, 90^\circ, +/- 45^\circ]_s$ ga resultatet vist på Figur 4-25.



Figur 4-25: Strekktest av laminatet ga kun transvers sprekkdannelse. Figuren er gjengitt fra [7]

På bakgrunn av disse opplysningen velger forfatteren derfor å gå for konfigurasjonen $[0^\circ, 90^\circ, +/- 45^\circ]_s$.

A. Forsterkning rundt bolthull

I enkelte områder med høy belastning og/eller ved boltforbindelser kan det være ønskelig å legge på flere lag for forsterkning i de retningene hvor kreftene virker. Ulempen med denne konfigurasjonen er at det ved boltforbindelser bør benyttes ekstra lag med retningene 90° og $+/- 45^\circ$ øverst rundt hullene (gir en styrkeøkning slik som beskrevet på s.38). Basert på testresultatene på s.38 vil forfatteren derfor gå for $[90^\circ, 0^\circ, +/- 45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, +/- 45^\circ]^{19}$ på hver side av kjernematerialet. Denne konfigurasjonen er også valgt av praktisk hensyn, da hele chassiset først kan støpes i konfigurasjonene valgt under forrige avsnitt, og det deretter kan legges på forsterkningen rundt hullene.

4.5.2 Fiberduker – biaksiale vs. uniaksiale

Ved beregninger og analyse består et fiberlag av kun en fiberretning. I praksis er bruken av duker med kun en fiberretning, uniaksiale, lite utbredt sammenlignet med duker hvor en har to retninger, biaksiale.

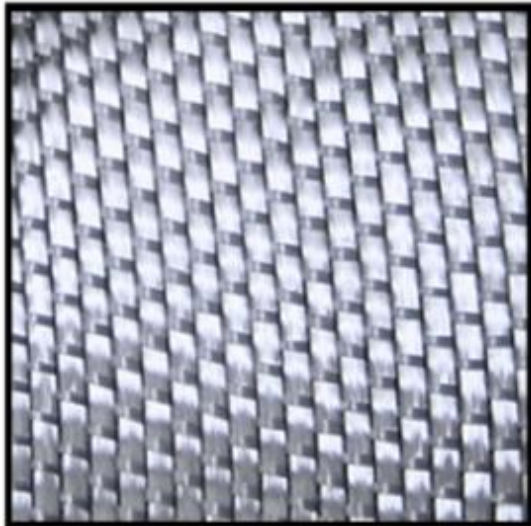
¹⁹ $[90^\circ, 0^\circ, +/- 45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, +/- 45^\circ]$ Det uthevede laget er sannsynligvis ikke nødvendig, men må benyttes grunnet bruken av biaksial duk.

Biaksiale duker består av fibre to retninger som er vevet sammen (se Figur 4-26). Det finnes også duker med fibre i både tre og fire retninger, men bruken av disse er mindre utbredt enn biaksale grunnet at de er stivere og dermed vanskeligere å forme ved støping.

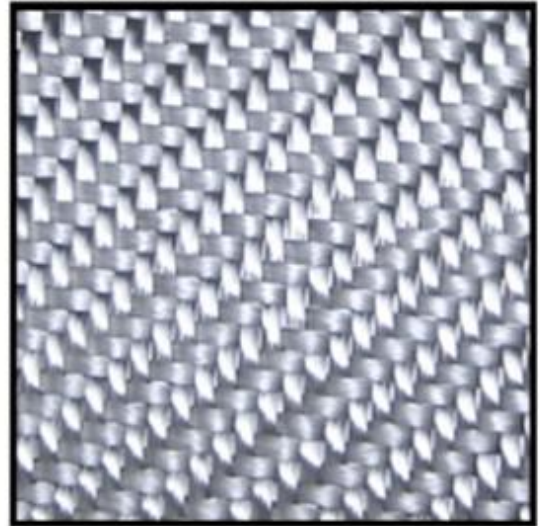
Ved dimensjonering av biaksale (eller flere retninger) duker hvor fibre er vevet i hverandre (B, Figur 4-26), må det tas ekstra hensyn ved dimensjonering av følgende grunn: dersom et laminat utsettes for en strekkspenning vil vevingene medføre at fibre først må rettes ut før de kan oppta stor belastning. En stor del av spenningen vil dermed bli tatt opp i epoxyen hvilket kan medføre sprekke dannelse under relativt lave laster. Dette vil svekke laminatet og data for fibertype bør derfor reduseres ved bruk i materialmodell. I tillegg blir fibre utsatt for belastning under veveprosessen og vil dermed være noe svekket av dette. [7]

For å utnytte styrken til karbonfibre bør derfor ensrettede duker benyttes dersom ikke økonomien setter begrensninger. I kritiske deler av en karbonfiberkonstruksjon er det derfor vanlig å benytte mindre ensrettede duker i laminatet i tillegg til den vanlige biaksiale duken. Dersom ensrettede duker benyttes over større områder bør det vises forsiktig da det er lett å ødelegge disse dukene grunnet de tynne trådene som holder fibre sammen (jmf. Figur 4-26). [21]

A)



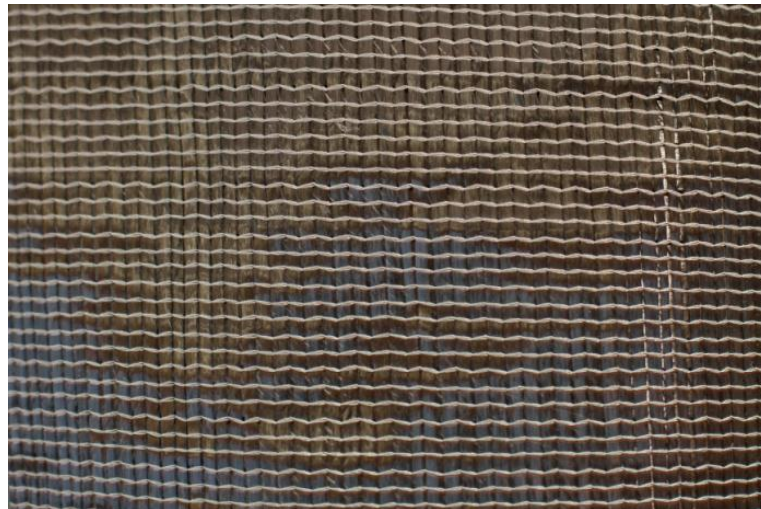
B)



Figur 4-26: A) Ensrettet duk hvor fibre er holdt sammen av tynne tråder. B) Biaksialduk type twill (0° og 90°) [56]

A. Duktyper benyttet i Roskva

Av nevnte grunner vil det i Roskva benyttes biaksial duk med en fiberretning på 0° og 90° . Siden det ved støping av ramme vil være krumninger osv. er det viktig å velge å en relativt lett duk slik at den enkelt kan tilpasses støpeformen. Derfor falt valget på en duk laget av T700S fiber med en fibervekt på 420 g/m^2 fra produsenten AMT Devold (se Figur 4-27).

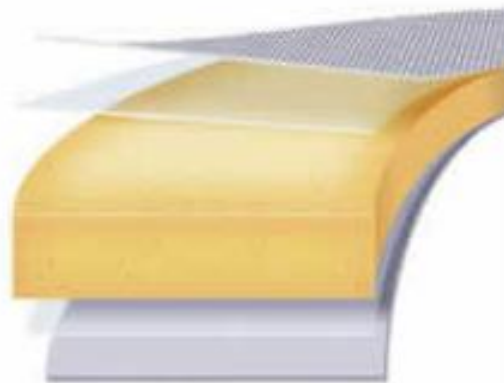


Figur 4-27: LT 0°/90° fra AMT Devold [23]

I denne duken er ikke de ulike fiberretningene vevet inn i hverandre, men lagt oppå hverandre og sydd sammen med en tynn tråd. Dette gjør at problemene med strekking av fibre i en twill duk beskrevet i forrige avsnitt blir redusert. Ulempen er at den designmessig ikke ser bra ut, hvilket medfører at det ytterste laget må være i twill for å få det karakteristiske karbonfiberutseendet der hvor dette er ønskelig (slik som på Figur 4-9 s.34).

4.6 Kjernemateriale – Divinycell

Et tynt karbonfiberlaminatet har lav bøye- og torsjonsstivhet grunnet det lave arealreghehetsmomentet. Til å øke tverrsnittsarealet bør det benyttes en sandwichkonfigurasjon (karbonfiberlaminat over og under, kjernemateriale i midten slik som på Figur 4-28). På denne måten økes stivheten, mens vekta holdes lav grunnet den lave tettheten til kjernematerialet.



Figur 4-28: Sandwich bestående av kjernemateriale og karbonfiberlaminater [57]

Kjernematerialer som blir benyttet i Roskva er laget av polymerskum av typen Divinycell fra produsenten DIAB Group.

4.6.1 Mekaniske egenskaper

Bruken av Divinycell er utbredt i sandwichkonstruksjoner innen båt-, forsvars- og vindmølleindustrien m.m. Det er derfor et godt utprøvd materiale.

Divinycell leveres i en rekke ulike varianter avhengig av belastningen og/eller andre krav. Etter samtaler med Odd Berglund hos DIAB ble typen H (High Performance) anbefalt. Denne er laget med hensyn på bruken i konstruksjoner utsatt for utmatting, høy belastning, fuktighet og støtbelastning [21]. Det vil bli benyttet to typer, H80 og H250 med egenskaper vist i Tabell 4-19.

Tabell 4-19: Data for H80 og H250. Utsnitt av datablad vedlagt

	H80	H250	
Tetthet	80	250	kg/m ³
Strekkfasthet	2,5	9,2	MPa
Trykkfasthet	1,4	7,2	MPa
E – modul (strekk)	95	320	MPa
E – modul (trykk)	90	400	MPa

Som det fremgår av tabellen er Divinycellen myk, med lav styrke og vekt. Grunnet vekt vil H80 benyttes i de mindre kritiske delene av chassiset, mens H250 vil bli benyttet i kritiske områder ved boltinnfestninger (forklares i neste avsnitt).

Oppsummert har bruken av Divinycell følgende fordeler og ulemper:

Tabell 4-20, Fordeler og ulemper ved bruken av Divinycell kjernemateriale

Fordeler	Ulemper
<ul style="list-style-type: none"> - Høyt styrke/vekt forhold - God dynamisk styrke - Høy motstand mot fuktighet - Lett å bearbeide 	<ul style="list-style-type: none"> - Kan bli dyrt grunnet høy pris og at det ved fresing vil gå mye materiale til spille

4.6.2 Implementering i ramme

I deler av chassiset vil det ikke være høy nok stivhet med kun karbonfiber, og det må derfor støpes inn Divinycell der hvor det er nødvendig. Størrelsen og utformingen vil bli beregnet av de gruppemedlemmene det måtte gjelde.

I tillegg til økt bøye- og torsjonsstivhet vil også kjernematerialet ha en annen viktig funksjon, nemlig ved innfestninger. Der hvor f.eks svingarmen skal boltes til ramma vil det være vanskelig å bolte fast i kun det tynne laminatet (jmf. sammenføyninger på s.38). En løsning på dette er derfor å bore hull igjennom en sandwich m/Divinycell, og deretter lime inn aluminiumshylser som bolten går igjennom (se Figur 5-11 s.66). Ved denne metoden er det anbefalt følgende: [21]

- Hylse må ha kontaktflate på karbonfiberlaminatet på hver side, og ikke kun i Divinycellen.
- Tverrsnittsarealet til hylsa bør være tre ganger større enn boltens.
- 1/10 av tykkelsen til sandwichen bør være karbonfiberlaminater.



5 FORSØKSOPPLEGG OG TESTING

Bruken av karbonfiberarmert plast i bærende konstruksjoner byr på en rekke utfordringer i form av variabler under bla. støpeprosessen som påvirker styrken og stivheten til det ferdige laminatet. Disse er følgende:

- Fiberretning
- Den valgte epoxyens egenskaper
- Volumfraksjon av fiber og epoxy
- Støpe/herdeprosess (oppnopning av fiber, temperatur og vakuum)
- Bearbeiding (kjerver, brudd i fiber m.m.)

Grunnet de ulike variablene kan en FEM - analyse gi et feilaktig resultat, og tre viktige tester har derfor blitt utført: strekk-, utrivning/bolt- og torsjonstest. Disse har deretter blitt sammenlignet med FEM - analyse. Ideelt sett burde det lages to chassiser hvorav det ene testes til brudd, men grunnet begrensede ressurser blir ikke dette utført. Analysene er samlet opp i eget avsnitt (del 6 s.82).

Når det gjelder kalibrering av strekkmaskin til bruk i testene så utføres det ikke en kalibrering i forkant, da den blir kalibrert ved jevnlige servicer [25].

5.1 Måling av strekkfasthet

For å verifisere datamodellen må prøvestaver med ønskede fiberkonfigurasjoner strekkes til brudd, for deretter og sammenlignes med datamodellen. Dette er en av de enkleste materialtestene, men også den viktigste, da den forteller hvor stivt og sterkt et materiale er ved å måle kraft og forlengelse.

Til testingen har forfatteren valgt å følge standarden for strekktesting av komposittmaterialer ASTM D3039 [10].

Testen utføres i en strekkmaskin med datalogget lastcelle i romtemperatur på 21,6 °C med en luftfuktighet på 66 %²⁰.

5.1.1 Formål

Testen har følgende formål:

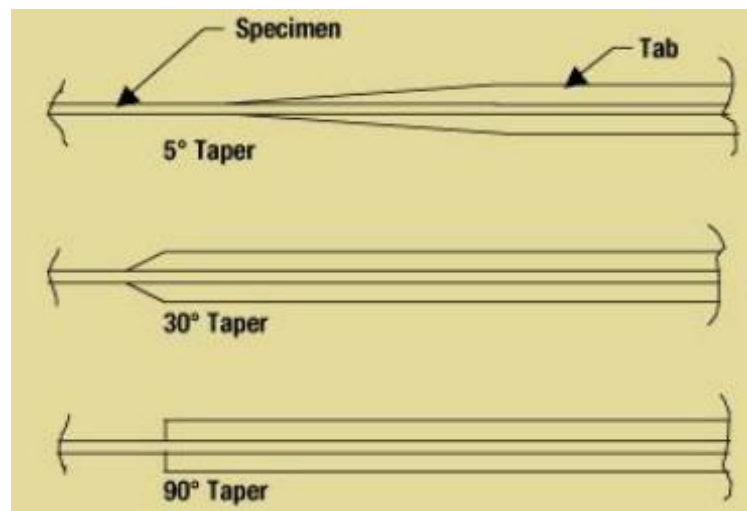
- Verifisering av datamodell
- Måling av strekkfasthet

5.1.2 Utforming

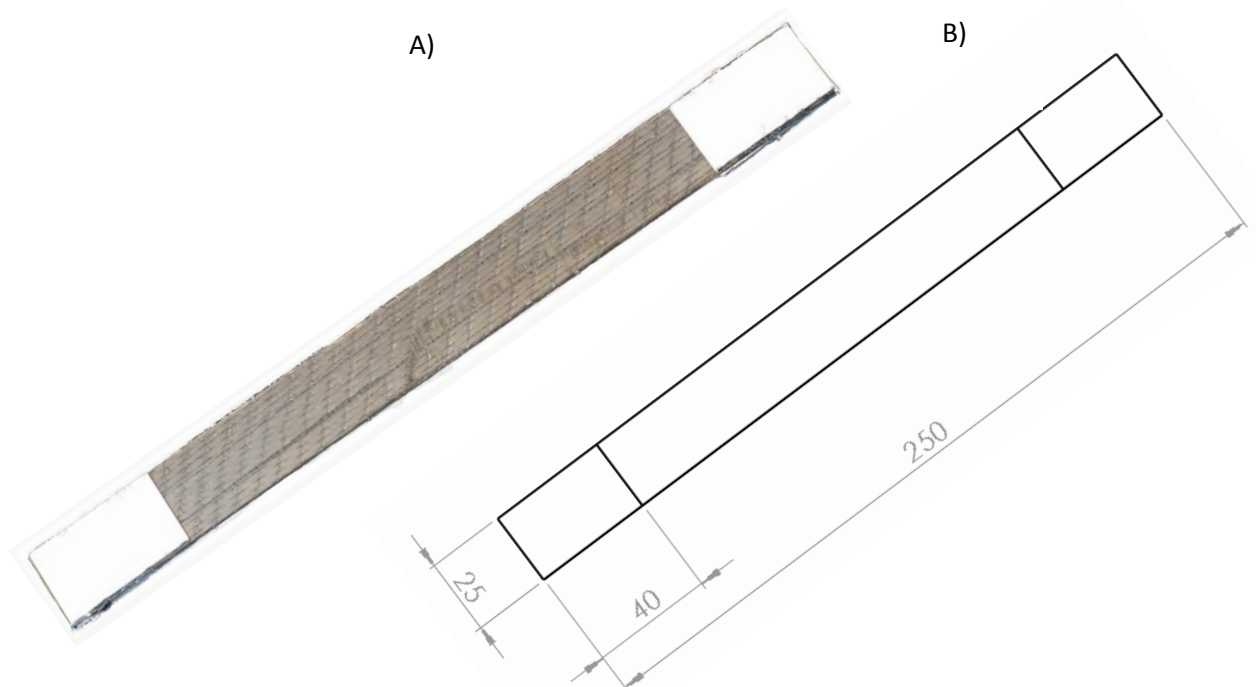
Ved strekktesting av metaller er det vanlig å innskrenke tverrsnittet slik at brudd ikke oppstår i opplagringene. Ved testing av komposittmaterialer vil en slik innskrenkning medføre brudd i områdene hvor tverrsnittet endres og derfor gi et feilaktig resultat. Det må derfor benyttes rektangulære prøvestaver (se Figur 5-2) med dimensjonen 250 x 25 mm. Prøvene har blitt skjært ut ved hjelp av en mal og avviket er derfor målt til +/- 0,2 - 0,4 mm, hvilket har liten betydning for resultatet.

²⁰ Utført i en lab for testing av trevirke hvilket krever høy luftfuktighet. Karbonfiber påvirkes i liten grad av dette, og har trolig ingen påvirkning for resultatet [16]. Epoxy kan dog påvirkes av dette, men er utelatt grunnet begrensninger

En utfordring ved en slik utforming er opplagringene grunnet de store kreftene involvert. Det anbefales derfor at det limes på biter av aluminium eller komposittmateriale utenpå prøvestaven slik som vist på Figur 5-2. I standarden forklares det at disse bitene bør ha en vinkel på 5° eller mindre slik som vist øverst på Figur 5-1. Dette kan være vanskelig å maskinere da tykkelsen på biten er rundt 1 – 2 mm. Enkelte andre standarder sier imidlertid at firkantede biter er å anbefale (nederst på Figur 5-1) da en får mer overflate til innspenning hvilket medfører at prøvebitene ikke vil krummes like mye ved strekking²¹ som ved 5° [35]. Hovedsakelig av hensyn til maskinering velges en slik utforming.



Figur 5-1: Pålimte biter av ulik utforming ved innfestning. Typen med 90° velges for testen [35]



Figur 5-2: A) Støpt prøvebit med pålimte aluminiumsbiter [23]. Fiberretningen sees tydelig i 0°. B) prøvebit i henhold til ASTM D3039 (utdrag fra vedlegg)

²¹ Som nevnt på s.30 så vil det benyttes symmetriske laminaer og krumming blir dermed ikke et problem under testing.

A. Fiberkonfigurasjon, materiale og støpeprosess

På s.51 ble fiberkonfigurasjonen $[0^\circ, 90^\circ, +/- 45^\circ]_s$, valgt for konstruksjonen. Det vil derfor bli utført testing på 8 prøvestaver med denne konfigurasjon. Dette laminatet vil tåle høy kraft, og kan medføre fare for at innfestningene kan gi etter. Det samme antallet prøvebiter støpes derfor også i konfigurasjonen $[0^\circ, 90^\circ]_s$. To ulike prøver er også gunstig mtp. verifisering av datamodellen. I tillegg kan det måles hvor stor betydning lagene på $+/- 45^\circ$ har for strekkfastheten.

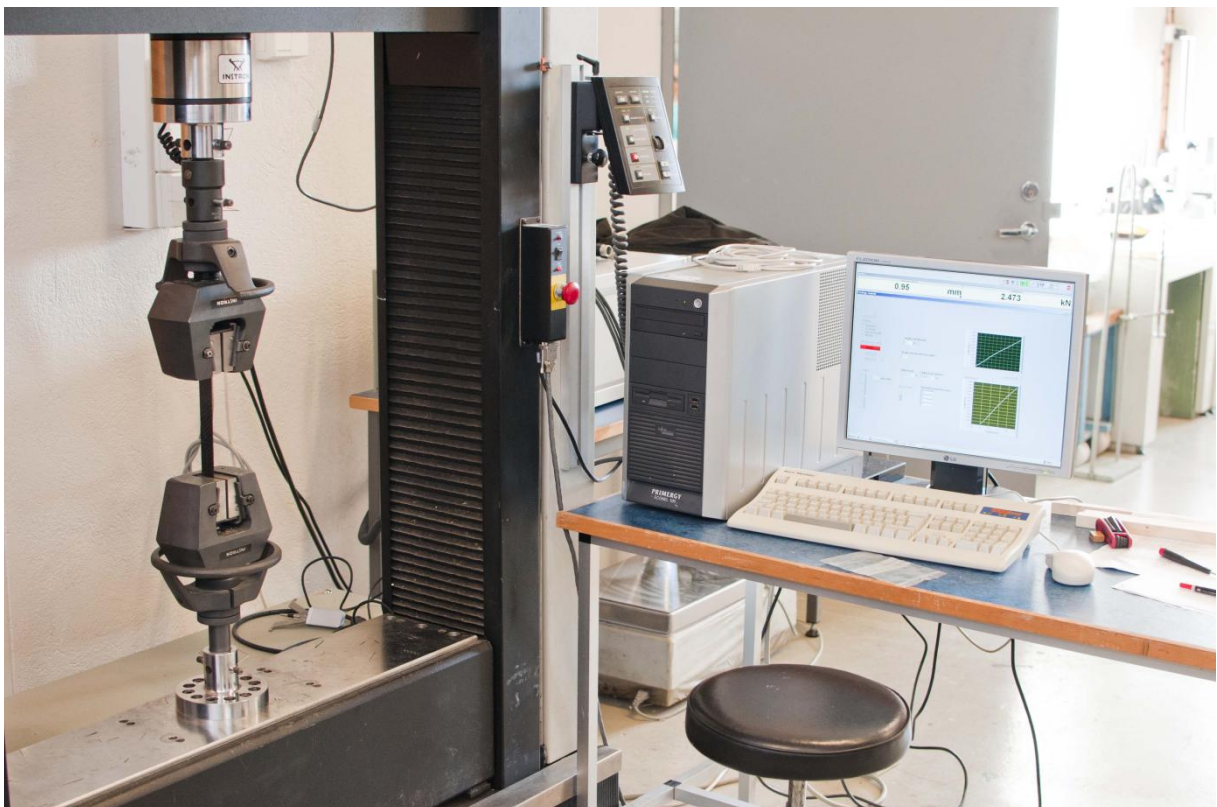
Data for prøvebitene:

- Fiberkonfigurasjon: 8 stk. $[0^\circ, 90^\circ, +/- 45^\circ]_s$ og 8 stk. $[0^\circ, 90^\circ]_s$
- Duktype: LT $0^\circ/90^\circ$ fra Devold AMT på 300 g/m^2
- Epoxy: ESR 3 fra Lindberg & Lund med akselerator og ESH 3 herder
- Fiberinnhold veiet til 60 %²²
- Herdeprosess: 8 timer ved 35°C ved konstant vakuum

Dette er den samme prosedyren som ved støping av chassis, med unntak at en duk²³ på 420 g/m^2 benyttes.

5.1.3 Testprosedyre

Prøvestavene vil bli innspent ved hjelp av klemmer sideveis på bitene slik som vist på Figur 5-3. Dette er en svakhet ved testing av kompositter med høy strekkfasthet, og det anbefales derfor å holde tykkelsen på laminatet lav. [35]



Figur 5-3: Strekkmaskin med innspent karbonprøve [23]

²² Fiberinnholdet er angitt som volumprosent, men da fiberen og epoxyens tetthet er omtrent like ($1,6$ mot $1,2 \text{ kg/dm}^3$) ga veiing et tilfredstillende resultat.

²³ Denne lettere duken ble benyttet siden duken på 420 g/m^2 ikke var tilgjengelig.



Prøvene blir strukket med en hastighet på 3 – 5 mm/min²⁴. Forlengelsen blir målt og kraften avlest for hver prøve.

A. Testforutsetninger

Under testen har det blitt satt følgende forutsetninger:

- Det forutsettes at fibreene har blitt lagt i den spesifiserte fiberretningen.
- Luftfuktighetens påvirkning på epoxyen er neglisjerbar.
- Klemkraften fra innfestningen er utelatt fra beregninger.
- Kjerv fra bearbeiding av prøvebiter har liten/ingen påvirkning.
- Fra test av karbonfiberens påvirkning på temperatur på s.43 har det blitt konkludert med at temperaturendringer har liten betydning i vanlig brukstemperatur, og det tas derfor ikke hensyn til dette.

5.1.4 Resultat

Under testingen viste det seg at limet mellom aluminiumen og karbonfiberen var for svakt, da flere prøver løsnet i innfestningen ved belastning over 10 kN. I Tabell 5-1 vises oversikt over antall prøvebiter.

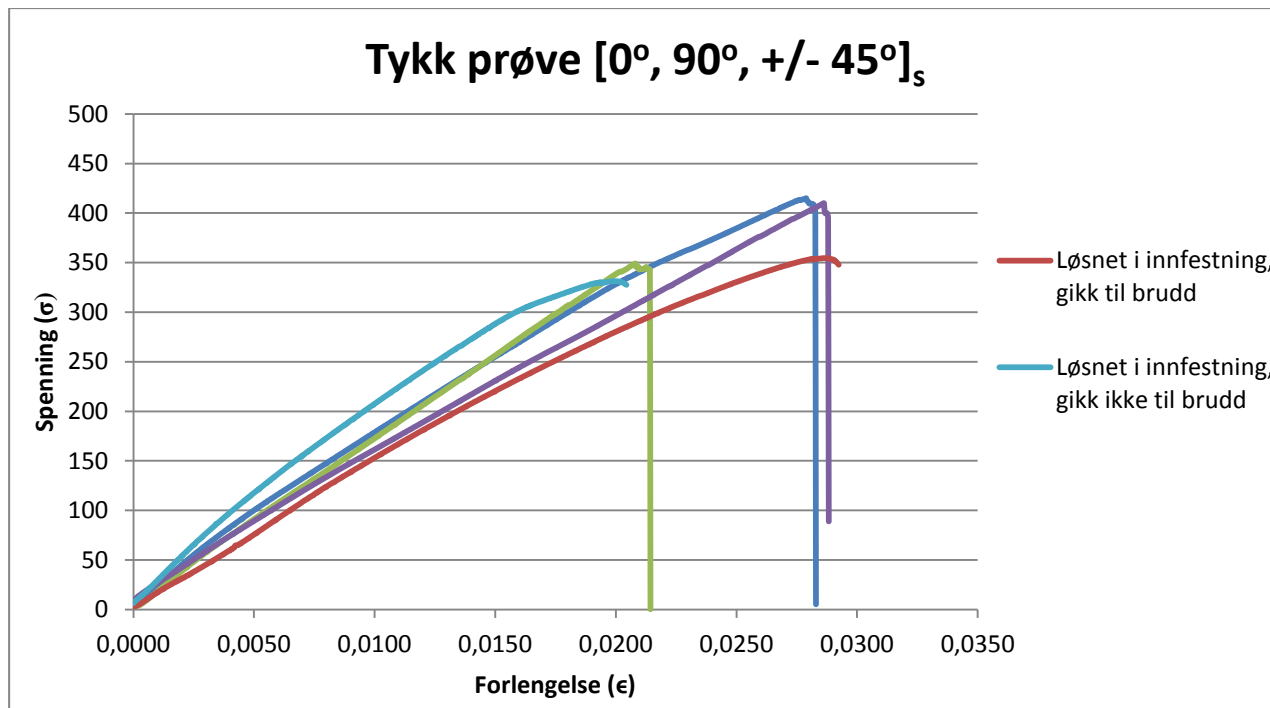
Tabell 5-1: Oversikt over prøvebiter

	Tykk: [0°, 90°, +/- 45°] _s	Tynn: [0°, 90°] _s
Brudd	3	3
Løsnet i innfestning like før brudd	1	x
Løsnet i innfestning, men gikk til brudd	1	2
Løsnet i innfestning*	3	3

*Ekskludert, ga ikke resultat

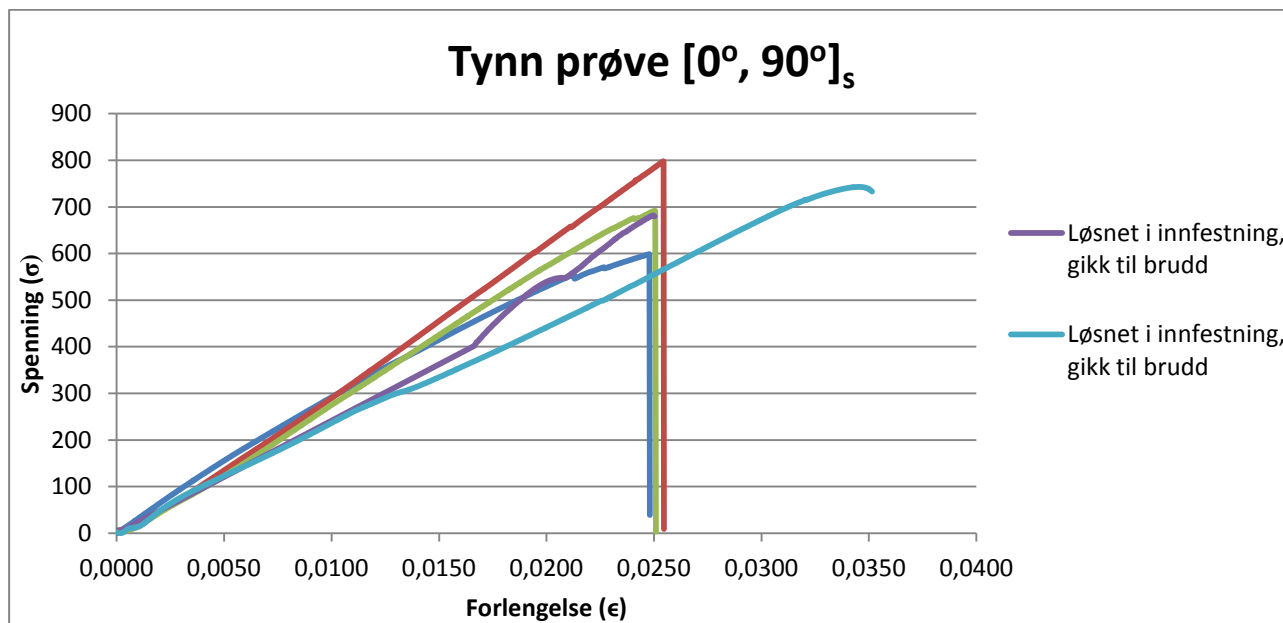
Resultatene fra målingene av de tykke prøvene er vist på Figur 5-4. Målingene er illustrert med ulike farger. Plotene av prøvene som løsnet i innfestningen, men som ga målinger er tatt med. Den ene av prøven gikk ikke til brudd, men utifra observasjon er det riktig og anta at brudd var nært forestående. For begge prøvene som løsnet er ikke forlengelsen korrekt. Prøvene dette gjelder er markert på figuren.

²⁴ Denne hastigheten har liten betydning for sprø materialer [22]



Figur 5-4: Spenningsplot av testresultat fra tykk prøve. Prøvene er illustrert med ulike farger. To av prøvene løsnet i innfestning, og forlengelsen deres gir derfor ikke et korrekt resultat

I Figur 5-5 vises plot av testresultatene fra de tynne prøvene. To av prøvene (markert på figuren) løsnet i innfestningen, og forlengelsen er derfor ikke korrekt.



Figur 5-5: Spenningsplot av testresultat fra tynn prøve. To av prøvene løsnet i innfestningen, og deres forlengelse er derfor feilaktig

A. Kommentarer til grafene

For begge konfigurasjonene er det relativt liten variasjon i resultatene, med unntak av der hvor innfestningen ga etter.

Tykke prøver:

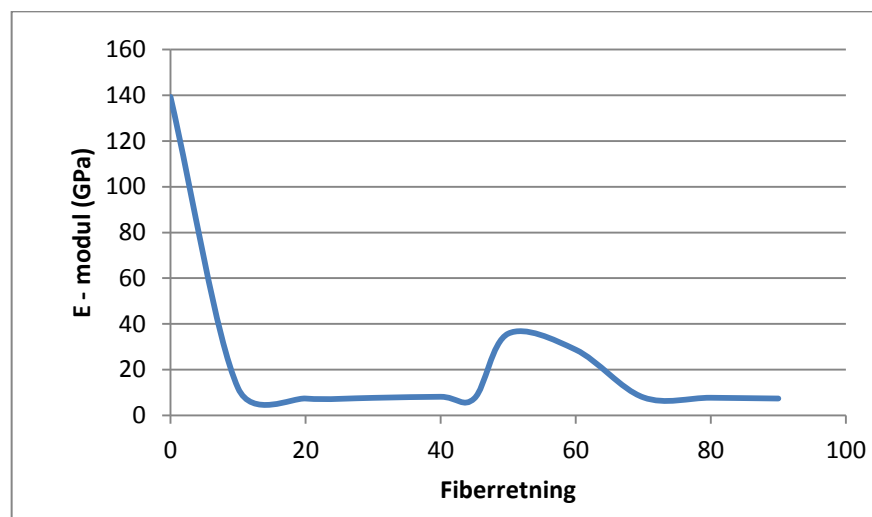
- Bruddspenninga ligger på omkring 350 – 400 MPa for fire av fem prøver. I den ene som ikke gikk til brudd ga limet etter i det den nærmet seg brudd.
- Når det gjelder den relative forlengelsen så ligger denne på omkring 2,8 % hvilket er noe høyere enn verdien i Tabell 4-7 på s.36. Dog ligger kun to av prøvene rundt dette området, da det spesielt i de tykke prøvene, var problemer med innfestningne. Pga. tynt grunnlag har forfatteren valgt og ikke ta med denne verdien i videre beregninger.

Tynne prøver:

- Bruddspenningen ligger på mellom 600 – 800 MPa.
- Den relative forlengelsen for alle prøvene ligger på omtrent 2,5 %. Det fremgår av Figur 5-5 at forlengelsen her er nøyaktigere enn for de tykke, med tre målinger som samsvarer.

Som forventet er grafene lineære til brudd, men avtagningen rett før brudd (slik som på Figur 4-11 s.35) er ikke tilstede. Videre kan det se ut som om den tykke prøva har en noe mer ulineær stigning i motsetning til den tynne, men det statistiske grunnlaget er ikke godt nok til å fastslå dette nøyaktig.

Videre var det en av de tynne prøvene som tålte mest kraft (15 kN), mens de andre tynne lå på 12 – 14 kN. De tykke prøvene jevnt over røk på rundt 13 kN. Dette betyr at bidraget til lagene på +/- 45° til å ta opp strekkrefter er neglisjerbart; det er altså kun fibre i 0° som har betydning. Dette kan vises ved å plote E - modul vs. fiberretning (Figur 5-6).



Figur 5-6: E - modul vs. fiberretning. Lagene med +/- 45 har lav E - modul hvilket medfører at deres bidrag til å ta opp spenning er lite

E – modulen synker ned mot 7 GPa ved rundt 10° og bidraget fra lagene med +/- 45° til å ta opp strekkreftene er derfor lite.

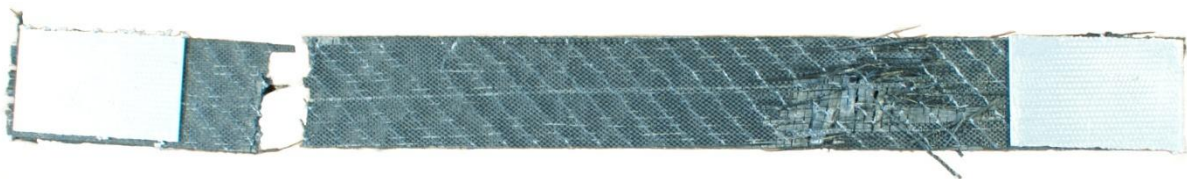
Oppsummert fra målingene har vi følgende:

- Bruddspenning for tykk og tynn på henholdsvis 350 – 400 MPa og 600 – 800 MPa
- +/- 45° lagene har liten eller ingen betydning for strekkfastheten
- Omtrent helt lineær stigning, ulineariteten før brudd er ikke tilstede

B. Analyse av brudd

Tynn prøve

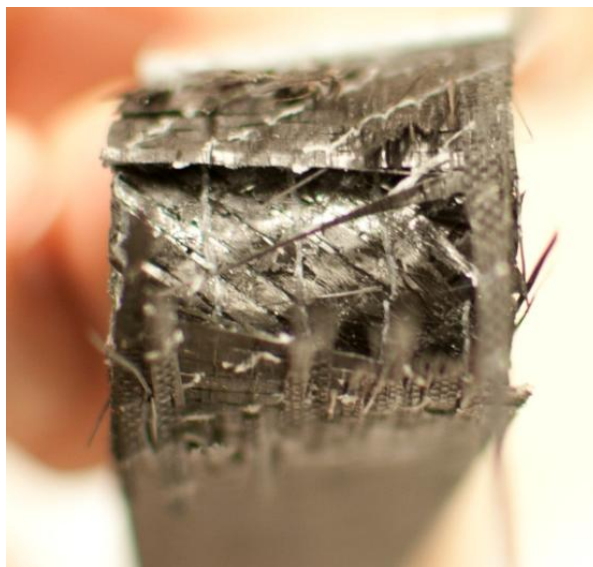
I de tynne prøvene oppstår det et brudd rundt 30 mm fra festepunktene. Trolig har bruddet oppstått i epoxyen i laget med 90°, som igjen har medført at belastningen på fibrene i 0° har gitt etter slik som vist på Figur 5-7. Deretter har biten blitt revet av ved den andre innfestningen, uten antydning til at fibrene i 0° (ytterse laget) gradvis har gitt etter slik som bruddet til høyre i figuren. Dette kan skyldes støtet/sjokket som har oppstått i de fibrene til høyre på figuren har gitt etter. Alle prøvebitene bar preg av dette bruddet, dog var det bare en prøve som ble fullstendig delt.



Figur 5-7: Brudd i tynn prøve. Først har det oppstått et brudd i fibrene (til høyre) hvor fibrene gradvis har blitt revet fra hverandre. Deretter oppsto et plutselig brudd hvor alle fibrene i 0° ble kuttet av (til venstre) [23]

Tykk prøve

I de tykke prøvene oppstår det også her brudd på rundt 30 mm fra en av innfestningene (t.h. Figur 5-7). Det oppsto ikke et plutselig brudd i noen av prøvene, og det var derfor ingen av de tykke prøvene som ble delt i to. Trolig har også her laget med 90° først gitt etter, som igjen har medført brudd i fibrene i 0°. Ved fysisk å kjenne på de ulike prøvene er bruddet i de tykke prøvene langt stivere enn for de tynne; biten er fortsatt delvis intakt da det ikke har oppstått fullstendig brudd i lagene på +/- 45° (se Figur 5-8 som viser et lag med 45°). I denne testen har det derfor blitt vist at det ikke bare er gunstig å ha fiberretninger med +/- 45° for å ta opp skjærspenninger, men også som en ekstra sikkerhet dersom brudd oppstår. Spesielt i kjøretøy er dette en gunstig effekt.



Figur 5-8: Brudd i tykk prøve. Her kan en tydelig se at lagene på 45° holder igjen og er nesten intakt [23]



I. Bruddkriteriet

Ved å benytte Tsai – Wu bruddkriteriet på s. 31 blir resultatene som vist i Tabell 5-2. Verdiene brukt til utregning er hentet fra datablad (se vedlegg)

Tabell 5-2: Utregning av Tsai - Wu bruddkriteriet. Verdier over 1 gir brudd

Retning	Tykk	Tynn
0	0,14	0,17
90	1,17	1,24
45	0,82	x
-45	0,82	x

I følge teorien vil det altså oppstå brudd i 90°, hvilket underbygger observasjonene av bruddet. For å finne hvilket lag som ryker neste gang følges prosedyren for brudd i et laminat på s.32. Dette blir da lagene på +/-45° da Tsai – Wu kriteriet gir 1,3 mot 0,5 i 0°. Altså er det ifølge teorien lagene med 0° som ryker til sist, hvilket ikke stemmer med det observerte på Figur 5-8.

C. Statistiske beregninger

Det er ønskelig å finne en dimensjonerende spenning for de ulike fiberkonfigurasjonene basert på bruken av normalfordeling og konfidensintervall. Totalt ble det gjort 10 målinger, 5 per prøvetype (se Tabell 5-3). Utifra målingene beregnes forventningsverdien og standardavviket hvilket er input til normalfordelingskurver og konfidensintervallene. De utregnede verdiene vises i Tabell 5-4.

Tabell 5-3, Målte bruddspenninger fra testing for de 10 prøvene

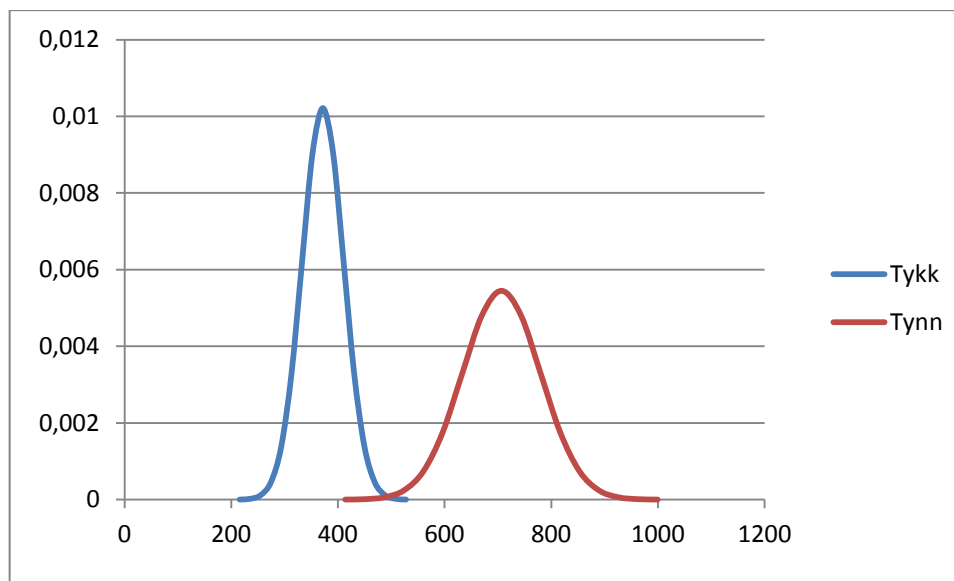
Tykk (MPa)	Tynn (MPa)
415	800
412	700
352	740
350	600
330	693

Tabell 5-4, Oversikt over antall prøver, forventningsverdi og standardavvik til bruk i normalfordelingskurve²⁵

	Tykk	Tynn
Antall, n	5	5
Forventningsverdi, \bar{x} (MPa)	372	707
Standardavvik, σ (MPa)	39	73

Disse dataene plotes inn i normalfordelingsfunksjonen slik som vist på Figur 5-9.

²⁵ Utregningene av disse verdiene er utelatt i denne rapporten



Figur 5-9: Normalfordeling av testresultatene utifra fem målinger per prøvetype

Et 95 % konfidensintervall regnes ut ved hjelp av følgende formel [6]:

$$\bar{x} \pm 1,96 \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \tag{5.1}$$

Dette gir konfidensintervallene:

Tabell 5-5: Konfidensintervall av strekkprøver

Tykk	Tynn
[337,406]	[642,771]

Det kan dermed sies at det er 95 % sannsynlig at den faktiske verdien ligger innenfor disse intervallene for de ulike prøvetypene.

D. Håndberegninger av laminatene

De høyeste bruddspenningene i konfidensintervallene for de to prøvetypene på henholdsvis 406 og 771 MPa benyttes til å finne spenningene og E – modulene i de ulike lagene slik som vist i Tabell 5-6 og Tabell 5-7:

Tykk prøve

Tabell 5-6: Håndberegninger av E - modul og spenninger i de ulike lagene for tykk prøve

Lag	Fiberretning	E_{11} (MPa)	σ_{11} (MPa)	σ_{22} (MPa)	τ_{12} (MPa)
1	0	139272	1396	x	x
2	90	7788	78	x	x
3	45	8604*	85	42,5	-42,5
4	-45	8604*	85	42,5	42,5

*Kilder [7] tyder på at E - modulen i to lag med +/- 45° påvirker hverandre slik at den totale E - modulen er rundt det dobbelte av dette. Utregnet i SW Simulation er denne rundt 14,5 GPa, men kilder oppgir denne til



17,1 GPa [7, 31]. Dette er dermed verdien som vil bli benyttet videre i rapporten der hvor det er fiberretning på +/- 45°.

Tynn prøve

Tabell 5-7: Håndberegninger av E - modul og spenninger i de ulike lagene for tynn prøve

Lag	Fiberretning	E_{11} (MPa)	σ_{11} (MPa)
1	0	139272	1460
2	90	7788	82

Her går det tydelig frem at bidragene fra de andre lagene enn 0° til å oppta strekkrefter er lite.

Den totale stivheten er utregnet ved hjelp av ligning (4.20) til henholdsvis 49 og 73,5 GPa.

5.1.5 Konklusjon

Til tross for at det var en del prøver som løsnet fra innfestningen, og det statistiske grunnlaget derfor ble noe tynt, er det liten variasjon mellom de prøvene som ikke løsnet. Grunnlaget er dermed godt nok til å angi en dimensjonerende strekkfasthet for laminatene. For å være på den konservative siden velges den laveste verdien av konfidensintervallene, 337 MPa for tykt laminat og 642 MPa for tynt²⁶. Ved byggingen av Roskva vil ikke sistnevnte konfigurasjon bli brukt da det tynneste laminatet vil være på [0°, 90°, +/- 45°]_s.

Fra testen går det frem at lagene med +/- 45° holder igjen og hindrer fullstendig brudd, hvilket er gunstig i Roskva mtp. sikkerhet.

Det oppstår noen uklarheter i testen, da det ved brudd ble observert at lagene på 45° fortsatt var delvis intakt, mens det var brudd i 0° lagene. Ifølge bruddkriteriet skulle ikke dette stemme, da bruddet vil oppstå i 45° før 0°. Dette kan skyldes feilaktig observasjoner eller støt/sjokk som følge av brudd i laget på 90°.

Analysen av strekkprøven (forklart på s. 90) stemte bra med testresultatet med følgende Tsai – Wu verdier (hentet fra Tabell 5-2 s.63):

- 1,17 mot 0,91 i analyse for tykk
- 1,24 mot 1,16 i analyse for tynn

Ifølge modellen vil det dermed ikke oppstå brudd i den tykke prøva, noe som er feilaktig mtp. at ingen av de tykke prøvene tålte 15 kN. Likevel er ikke avviket stort, og dimensjoneringen vil dermed være på konservativ side ved bruk av parametrene fra FFI (bekreftet i Figur 6-14 s.92), dog bør det i tillegg benyttes en sikkerhetsfaktor på 2 eller tilsvarende ved dimensjonering. Videre bekrefter analysen teorien om at bruddet oppstår i lagene med 90°. Det kan dermed konkluderes med at datamodellen er troverdig.

En annen uklarhet var spenningen i x - retning i +/- 45° som iflg. analysen ga en verdi på 216 MPa, mens det i håndberegningen ble 75 MPa. Grunnen til dette er ukjent, og siden analysen ga et ellers riktig resultat er dette av mindre betydning. Dette skyldes mest sannsynlig det at lagene påvirker hverandre og sammen gir en høyere stivhet enn hver for seg.

²⁶ I tilsvarende test beskrevet i kilde [7] er bruddspenningene henholdsvis 413 og 689 MPa for tykt og tynt.

5.2 Utrivning/bolttest

Det vil bli utført en strekktest av bolter m/hylser i et sandwichlaminat med karbonfiber og Divinycell grunnet de mange innfestningene på et motorsykelchassis.

I motsetning til for testing av strekkfastheten vil det her ikke følges noen standard da det er viktig å teste innfestningene slik de blir benyttet på sykkelen.

I likhet med for strekktesten utføres testen på en strekkmaskin med datalogget lastcelle, i romtemperatur på 21,6 °C med en luftfuktighet på 66 %.

5.2.1 Formål

Testen formål er følgende:

- Bruddet sammenlignes med spenningene fra FEM analysen for å se om spenningskonsentrasjonene rundt hullene som vises i modellen er årsaken til bruddet og/eller om det er eventuelle andre årsaker til bruddet.
- Finner dimensjonerende spenning dersom spenningene i analysen ligger under bruddspenningen.
- Se om kantavstanden er tilstrekkelig mot å hindre utrivning

5.2.2 Utforming av prøvebiter - Sandwich

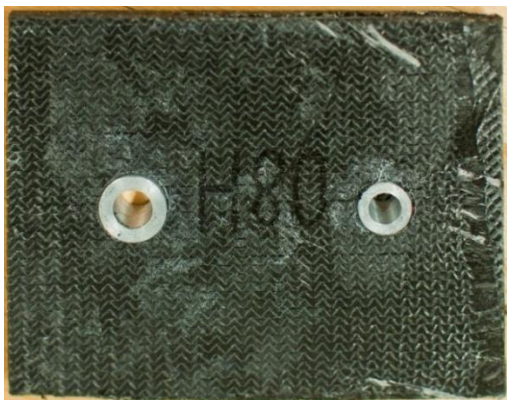
Prøvebitene vil være i et sandwichlaminat bestående av Divinycell med karbonfiber på hver side slik som vist på Figur 5-10.



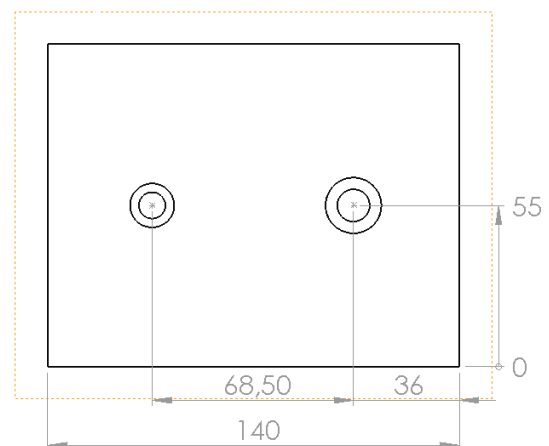
Figur 5-10: Divinycell omgitt av karbonfiber. Mål i mm

Prøvebiten opplagres i en M8 og M10 bolt slik at brudd oppstår i det minste hullet. Dette resulterer i boring av hull på henholdsvis 15 og 19 mm for å få plass til aluminiumshylser etter anbefalingen fra DIAB beskrevet på s.55. Avstanden fra senter av hull til kanten er 36 mm. Prøvebiten vises på Figur 5-11.

A)



B)



Figur 5-11: A) Prøvebit med limte aluminiumshylser [23]. B) Tegning med målsettinger, utdrag fra vedlegg



A. Fiberkonfigurasjon, materiale og støpeprosess

I. Fiberkonfigurasjon

Fra valg av fiberkonfigurasjon s.51 er det bestemt at konfigurasjonen $[90^\circ, 0^\circ, +/- 45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, +/- 45^\circ]$ skal benyttes rundt bolthull m/Divinycell. Grunnet begrensede ressurser tilgjengelig ble dette noe redusert i prøvene til 6 lag i rekkefølgen $[0^\circ, 90^\circ, +/- 45^\circ, +/- 45^\circ]$. Dette resulterer i at de dimensjonerende spenningene fra testen vil være på konservativ side grunnet bruken av de to ekstra lagene i chassiset, hvilket gir en ekstra sikkerhet mot brudd. Det ligger dog ingen beregninger bak dette valget, da dette er komplekst matematisk.

Data for prøvebit:

- Fiberkonfigurasjon: 4 stk. $[0^\circ, 90^\circ, +/- 45^\circ, +/- 45^\circ]$
- Duktype: LT $0^\circ/90^\circ$ fra Devold AMT på 420 g/m^2
- Epoxy, herdeprosess og fiberinnhold tilsvarende det for strekkprøvene

II. Divinycell

Grunnet begrenset mengde med Divinycell vil det kun bli testet 4 biter, hvorav to består av H80 Divinycell og to med den sterkere HCP50²⁷ (tilsvarende H250 som blir benyttet på Roskva). Ideelt sett burde det vært testet mange prøver med ulike fiberkonfigurasjoner og flere varianter av kjernemateriale, men grunnet begrenset tilgang på plater av mindre størrelse og høye kostnader ved kjøp av store plater blir det ikke slik.

Tabell 5-8: Data for HCP50 og H250. Utsnitt av datablad vedlagt

	HCP50	H250	
Tetthet	250	250	kg/m^3
Strekfasthet	9,2	9,2	MPa
Trykkfasthet	7,2	7,2	MPa
E – modul (strek)	400	320	MPa
E – modul (trykk)	400*	400	MPa

*Ikke tilgjengelig,
antatt lik H250

Fra Tabell 5-8 kan en se at det har omtrent like egenskaper som H250, med unntak av noe lavere E - modul i strekk.

5.2.3 Testprosedyre

Egne innspenninger er tilpasset til prøvene, og prøven blir deretter festet i boltene slik som vist på Figur 5-12. Dette er annen type innfestning enn testene brukt til å finne resultatene på s.38 hvor boltene ble skrudd fast til laminatet med et gitt moment. Dette lar seg ikke gjøre i denne testen, grunnet bruken av aluminiumshylser.

²⁷ Ideelt sett skulle H250 vært brukt, men dette var ikke tilgjengelig hos leverandør. HCP50 er beregnet til bruk subsea og har nesten identiske mekaniske egenskaper.



Figur 5-12: Innspenning av prøvebit [23]

Hastigheten er satt til 6 mm/min.

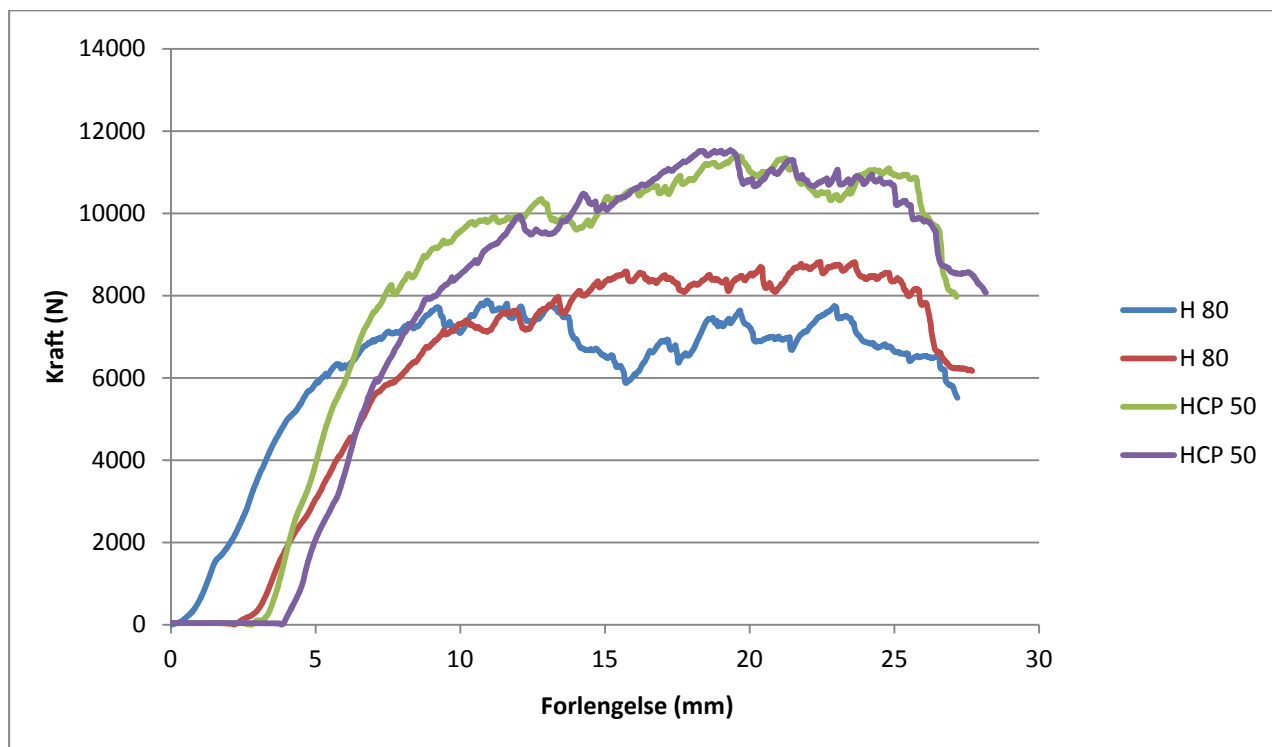
A. Testforutsetninger

I denne testen settes følgende forutsetninger:

- Det forutsettes at fibrene har blitt lagt i den spesifiserte fiberretningen
- Luftfuktighetens påvirkning på spesielt epoxyen er utelatt
- Kjerv fra bearbeiding av prøvebiter har liten/ingen påvirkning
- Temperaturendringer sees bort ifra av samme grunn som i strekkfasthetstesten
- Hullene i prøvene er boret på linje med lik kantavstand for begge
- Aluminiumshylsene antas å være vinkelrett på sideflatene, med 1 mm av hylsa utenfor karbonfiberen på hver side

5.2.4 Resultat

Deformasjon i sandwichen oppsto rundt hylsa til M8 bolten mens hylsa til M10 bolten holdt seg i ro i alle prøvene. På Figur 5-13 vises et plot av kraft vs. forlengelsene for alle prøvebitene.



Figur 5-13: Plot av kraft vs. forlengelse av prøvebitene. Her går det tydelig fram forskjellen mellom kjernematerialene

A. Kommentarer til grafene

Fra Figur 5-13 går det fram at oppførselen for alle prøvene er omtrent like: hvor en bratt stigning opp til en plastifisering av hullkanten [27], hvor den minste aluminiumshylsen begynner å bli dratt igjennom sandwichen. Målingene ble avsluttet når kraften til slutt sank til 60 % av den maksimale.

H 80

I prøvene med H80 ble den maksimale kraften målt til henholdsvis 8805 og 7641 N. Forskjellen på nesten 1000 N er overraskende med tanke på at den samme støpeprosessen ble benyttet. Dette skyldes da mest sannsynlig bearbeidingen av prøvebitene ved boring av hull og innliming.

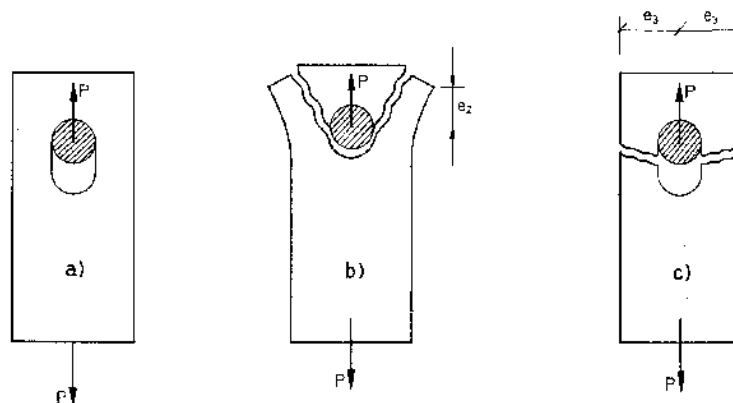
HCP50

Forskjellen mellom H80 og HCP50 var betydelig, med målinger på henholdsvis 11 126 og 11 013 N, altså omtrent 3000 N mer enn for H80.

B. Analyse av brudd

I. Hullkanttrykk

I alle prøvene ble hylsene dratt igjennom sandwichen og sammenlignet med Figur 5-14 går det frem at det er hullkanttrykket som overstiges og fører til brudd i prøvene. Det kan dermed konkluderes med at kantavstanden på rundt $2 \cdot$ hulldiameter er tilstrekkelig, hvilket er viktig da faren for utrivning (b, i Figur 5-14) kan medføre plutselig kollaps.



Figur 5-14, F.v. Hullkantrykk, utrivning og brudd i grunnmateriale. Her går det tydelig frem at det er hullkantrykket som er kritisk for prøvene [61]

Hullkantrykket uttrykkes på følgende måte:

$$p = \frac{V_R}{A} \tag{5.2}$$

Hvor:

- V_R er kraften på bolten
- A er hullets tverrsnittsareal (platetykkelse*diameter)

Resultatet av hullkantrykket for prøva er i de ulike delene av sandwichen er vist i Tabell 5-9 og Tabell 5-10.

Tabell 5-9: Utregnede krefter i sandwich ved hjelp av datablad for Divinycell vedlagt

	H80		HCP50	
Prøvebit	1	2	1	2
Karbonlaminat (N)	8724,4	7669,1	10564,9	10673,3
Divinycell (N)	80,6	70,9	448,1	452,7

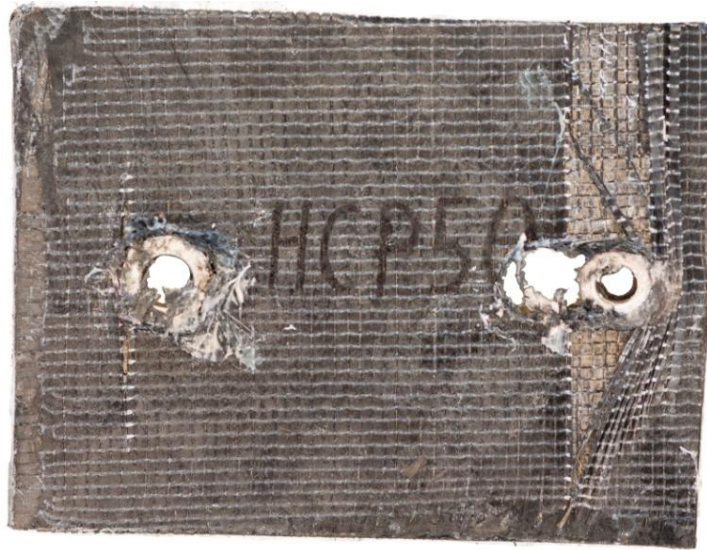
Tabell 5-10: Utregnede spenninger i sandwich

	H80		HCP50	
Prøvebit	1	2	1	2
Karbonlaminat (MPa)	223,7	196,6	270,9	273,7
Divinycell (MPa)	0,7	0,6	3,7	3,8

Sammenlignes de to Divinycelltypene ser en at HCP50 opptar rundt 6 ganger mer kraft enn H80, hvilket utgjør nesten 400 N mer. Dette er ikke spesielt mye mtp. at lasten er på rundt 10 kN. Likevel medfører HCP50 til en økning i bruddstyrken på rundt 3 kN (eller 50 - 60 MPa). Dette kan skyldes at den økte stivheten/styrken til Divinycellen gjør at karbonfiberlaminatene blir utsatt for mindre kompresjon, som følge av at Divinycellen er stivere og holder karbonfiberen "på plass" fremfor å knekke ut.

II. Karbonfiberlaminat - fiberkonfigurasjon

I Figur 5-15 vises resultatet av prøve med HCP50.



Figur 5-15: Sandwich m/HCP50 etter test. Legg merke til laget på 90° som blir dratt med av hylsa. Fibrene rundt hylsa t.v. skyldes ikke testen, men bearbeidingen av prøvebiten [23]

I denne prøven kan en tydelig se at brudd har oppstått i laget med 90° som dermed har blitt dratt nedover av hylsa. Hvorvidt dette er en fordel/ulempe for konstruksjon kan ikke vites utifra denne testen, men utifra testresultatene av bolttester på s.38 har 90° ytterst en gunstig påvirkning²⁸. Med fiberkonfigurasjonen benyttet i denne testen kan det være ugunstig å ha 90° ytterst, da det kan se ut som at 0° ytterst hindrer fibrene å bli dratt ned av hylsa, og dermed kan gi økt styrke (se Figur 5-16). Dette er kun en teori og for bedre dokumentasjon må flere tester med ulike fiberkonfigurasjoner gjøres. Forfatter har derfor valgt å følge resultatene på s.38 med 90° ytterste lag.



Figur 5-16: Sandwich m/H80 etter test [23]

²⁸ Fra disse testresultatene har konfigurasjonen [90°, +/- 45°, 0°], blitt sammenlignet mot [0°, 90°, +/-45°], og ikke [90°, 0°, +/- 45°, +/- 45°] m/Divinycell slik som i denne testen



5.2.5 Konklusjon

Bruken av de to ulike Divinyelltypene ga overraskende en forskjell på omtrent 3 kN hvilket medfører at det rundt innfestninger blir benyttet H250/HCP50 slik som anbefalt av DIAB. Grunnen til den økte styrken lot seg ikke vise gjennom analyse utført på s.92, noe som kan skyldes at den økte stivheten/styrken til Divinyellen holder karbonfiberen "på plass" framfor å knekke ut.

Denne testen ga et dimensjonerende hullkantrykk på 196,6 MPa med H80, og 270 MPa hvor HCP50/H250 blir brukt. Dette er lavere enn testen beskrevet i utmatting i boltforbindelser på s.45 hvor utmattingsfastheten ble funnet til 325 MPa. Den dimensjonerende spenningen rundt hull blir derfor satt til 200 MPa selv om det er H250/HCP50 som vil bli benyttet. Vi har dermed en sikkerhetsfaktor på rundt 1,35 mot overskridelse av hullkantrykket.

Kantavstanden benyttet på 2*hulldiameter fra senter av hull til kanten var tilstrekkelig da hylsene ble dratt igjennom sandwichene. Dette er en ekstra sikkerhet mot kollaps, da det ikke blir et plutselig brudd, men isteden oppnås plastifisering av hullkanten; en slags "flyt". Denne kantavstanden settes derfor som et minimum ved kritiske innfestninger på chassiset.

Resultatene fra analysene utført på s.92 av prøvebitene samsvarte ikke med testresultatet, da det her kun oppstod brudd i et lite område. I området like under hullet hvor hylsa ble dratt igjennom sandwichene viste ikke analysene at dette ville skje. Dimensjonering skal derfor baseres på tillatt hullkantrykk og ikke sikkerhetsfaktor.

Denne testen viser viktigheten av å teste når en har med komposittmaterialer å gjøre. Hadde ikke denne testen blitt utført, og dimensjonering blitt gjort i henhold til analyseresultater kunne Roskva ha kollapse som følge av svikt i innfestningene.

5.3 Torsjonstestning av drivaksling

Gruppemedlem med ansvaret for drivverket, Lars Norberg, har bestemt at effektoverføringen til bakhjulet skal gjøres ved hjelp av drivaksling [9]. For å holde rekkevidden optimal er det viktig å holde den roterende massen lav, i tillegg til sykkelens totale vekt. Drivakslingen vil derfor bli laget i karbonfiber.

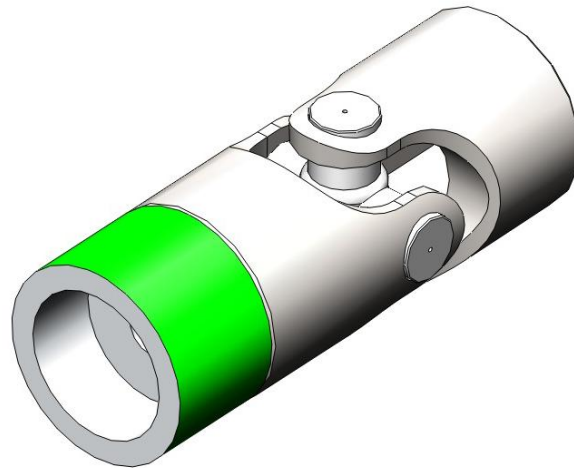
Siden akslingen kun blir utsatt for et moment vil testen foregå ved at akslingen utsettes for et rent torsjonsmoment til brudd oppstår. I Roskva vil akslingen utsettes for et maksimalt moment på 84 Nm [9].

I likhet med for bolttesten er ikke denne testen i henhold til noen standard, da det er viktig å teste akslingen slik den vil bli benyttet i sykkelen. Grunnet begrensede ressurser testes kun to akslinger.

5.3.1 Formål

Testen har følgende formål:

- Bekrefte/avkrefte om karbonfiberduk kan benyttes til støping av drivaksling.
- Bekrefte/avkrefte om valgt fiberkonfigurasjon er tilstrekkelig ved bruk av en sikkerhetsfaktor på 2 (168 Nm).
- Undersøke om limfugene holder (målet er at brudd vil oppstå i karbonfiberen før limfugene gir seg). Grunnet drivakslingsdeler fra donorsykel er det ønskelig med en limfuge med en lengde på 20 mm dersom dette lar seg gjøre (se Figur 5-17).
- Sammenligne med FEM analyse.



Figur 5-17: I den ene enden av akslingen et universalledd være limt inn (grønt område viser limfuge) [9]

5.3.2 Teori

Fra mekanikken har vi uttrykket for skjærspenning forårsaket av et moment:

$$\tau_{xy} = \frac{Tr}{J} \quad (5.3)$$

Hvor:

- T : er torsjonsmoment
- J : det polare treghetsmomentet
- r : rørets radius

Ved bruken av lange rør er det fare for at røret vil knekke ut som følge av momentet, og skjærspenningen blir dermed ikke dimensjonerende. Til å finne det kritiske momentet hvor knekkingen oppstår brukes følgende formel: [7]

$$T_{cr} = 24,4CD_{22}^{\frac{5}{8}}A_{11}^{\frac{3}{8}}r^{\frac{5}{4}}L^{-\frac{1}{2}} \quad (5.4)$$

Hvor:

- C : Innspenningskoeffisient (1,03 for fast innspent opplagring)
- D_{22}, A_{11} : Parametere²⁹ fra matrise for henholdsvis bøyestivhet og strekkstivhet
- r, L : rørets radius og lengde

Videre må akslingen kontrolleres mot egenfrekvens:

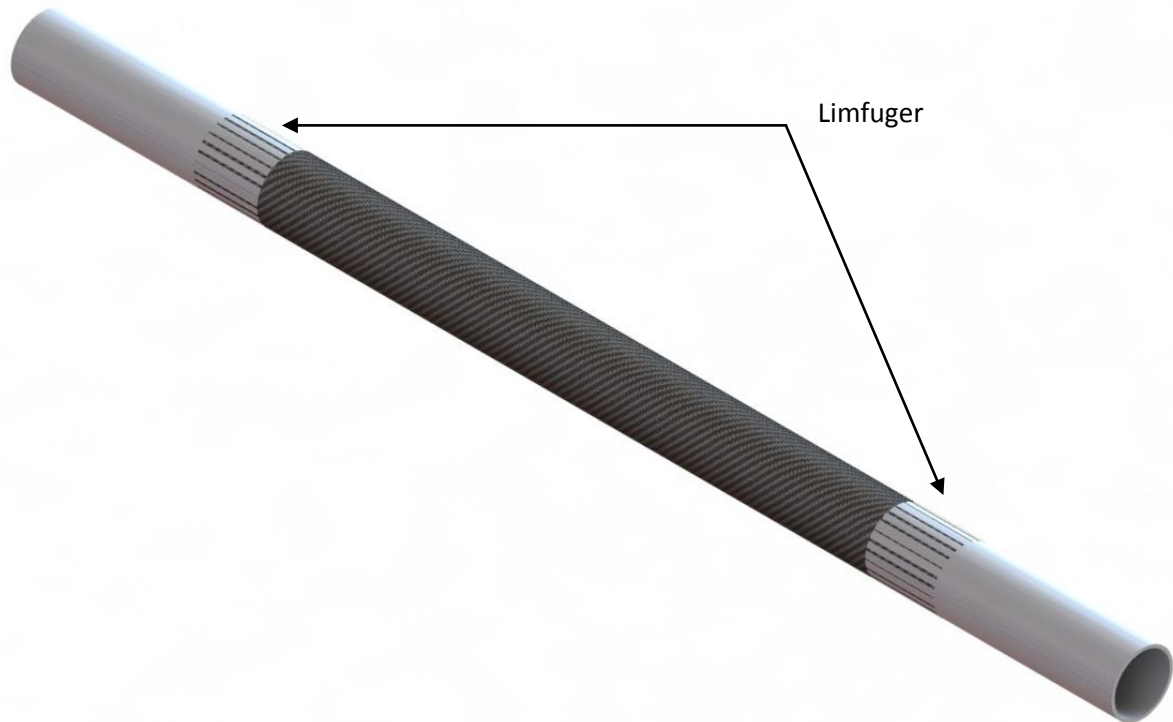
$$f_{cr} = \frac{\pi r}{L^2} \sqrt{\left(\frac{E_{xx}}{2\rho}\right)} \quad (5.5)$$

²⁹ Disse matrisene regnes ut for hånd, men utregningene er ikke med i denne rapporten da de er plasskrevende

Hvor E_{xx} er E - modulen i x retning og ρ rørets tetthet.

5.3.3 Utforming

I denne testen blir to drivakslinger testet. I hver ende er det limt inn stålhylser med Spabond 345 (beskrevet på s.39), og testakslingen blir derfor slik som vist på Figur 5-18.



Figur 5-18: Testaksling med innlimte hylser. De skraverte områdene viser limfugene

Test 1, Aksling på \varnothing 25 mm

Akslingen er 300 mm lang, og har en indre diameter på 25 mm. Dette stemmer ikke med målene den endelig akslingen vil ha, noe som skyldes begrenset tilgang på støpeform (aluminiumsrør). Limfugene har en lengde på 25 mm da dette gir den samme limflaten som 20 mm ved en diameter på 32 mm.

Test 2, Aksling på \varnothing 32 mm

Akslingen er 400 mm lang, med en indre diameter på 32 mm. Dette tilsvarer diameteren som vil bli benyttet på sykkel, dog vil lengden trolig bli noe lengre, rundt ca 500 mm. I skrivende stund er dette ikke helt avklart. Tegning med målsettinger er vedlagt.

A. Fiberkonfigurasjon, materiale og støpeprosess

I. Fiberkonfigurasjon

Som kjent vil et torsjonsbrudd oppstå 45° på lastretning (jmf. torsjon s.37). Fiberkonfigurasjonen i akslingen blir derfor bestående av fiberretningene $\pm 45^\circ$. Akslingen i test 1 vil ha fiberkonfigurasjonen $[\pm 45^\circ]_{2S}$ hvilket gir 8 lag (4 duker). I test 2 ble dette doblet til 16 lag og 8 duker ($[\pm 45^\circ]_{4S}$). Data for de to akslingene er gitt i Tabell 5-11.

Tabell 5-11, Data for testakslinger

	Test 1	Test 2
Diameter (mm)	25	32
Lengde (mm)	300	400
Fiberkonfigurasjon	[+/- 45°] _{2S}	[+/- 45°] _{4S}
Lengde på limfuge (mm)	25	20/40*

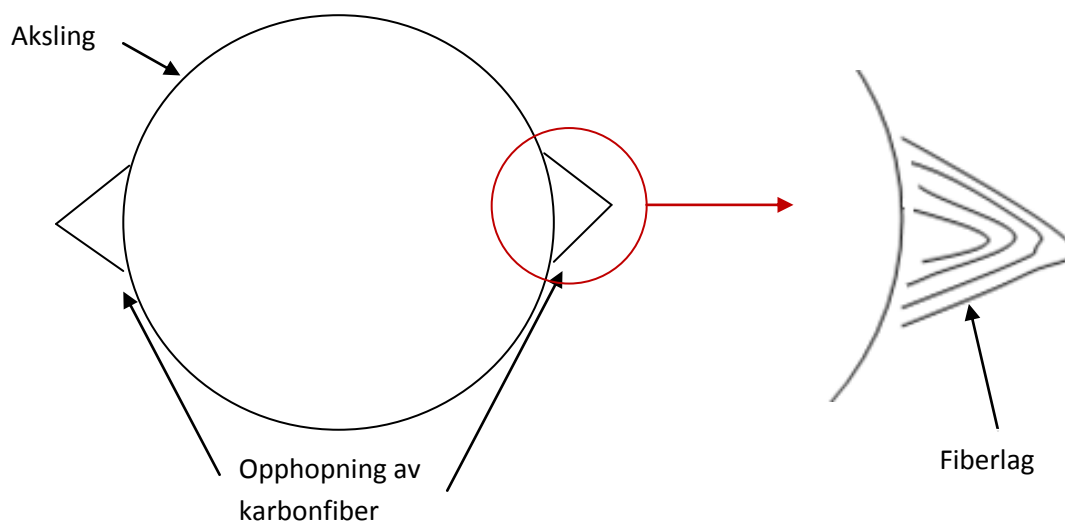
*Sendere endret til 40 mm

II. Støpeprosess

Siden akslingene støpes i vakuum vil ikke karbonfiberen være jevnt pakket rundt røret slik som vist på Figur 5-19 og Figur 5-20. For å unngå ubalanse må noe av det ytterste laget dreies ned til akslingen er helt jevn,. Dette kan føre til svakheter i akslingen³⁰.



Figur 5-19: Karbonaksling før bearbeiding. Fra støping blir karbonfiber strukket enkelte steder grunnet vakuomet (se Figur 5-20). Disse kantene dreies ned og hylser limes inn [23]



Figur 5-20: De ulike lagene med karbonfiber blir dratt utover av vakuomet, her illustrert som trekanter på hver sin side av akslingen. Det forstørrede området viser hvordan fiberlagene ligger pakket i disse områdene. Ved dreining fjernes opphopningene og svakheter oppstår derfor i disse fiberlagene som følge av at fibrene kuttet

³⁰For den første akslingen som ble støpt (ikke med i denne testen) resulterte feilaktig støping til at karbonfiberen pakket seg for mye enkelte steder, og ble dratt ut fra røret. Ved dreining ble akslingen derfor på enkelte steder så svekket at fibertykkelsen var rundt 0,5 mm. I tillegg løsnet løsnet denne fra formen/røret grunnet bruken av stål istedenfor aluminium.

Epoxy, duktype, herdeprosess og fiberinnhold i begge testene er tilsvarende det for bolttesten.

5.3.4 Testprosedyre

Akslingen ble testet i en dreiebenk, grunnet muligheten til fast innspenning i ende, og momentfri opplagring i den andre enden. Dreiebenken vil også sørge for at akslingen er helt rett mellom innspenningene. Dette gjør dermed at kun vridning blir testet og ikke bøyning, slik at testresultatet blir korrekt.

I den fritt opplagrede enden ble flattstål med en lengde på 1,10 m sveiset fast på stålhylsa, og en kraftcelle montert på ved hjelp av tau slik som vist på Figur 5-21. Tauet/lastcella dras av forfatter, mens kraften avleses vha. en medhjelper.



Figur 5-21: Aksling innspent i dreiebenk med påsveiset arm. Armen blir belastet med en vertikal kraft hvilket medfører at akslingen blir belastet med et moment. Kraften økes sakte til torsjonsbrudd oppstår. Vha. en lastcelle festet til tauet t.h. i bildet avleses den påførte kraften, og bruddmomentet måles [23]

A. Testforusetninger

Testen har følgende forutsetninger:

- Det forutsettes at fibrene har blitt lagt i den spesifiserte fiberretningen
- Kraften påføres vinkelrett på flattstålet
- Kraften avleses korrekt av medhjelper
- Flattstålet er vinkelrett sveiset på hylsa

5.3.5 Resultat

Fra testens formål på s.72 må akslingene min. tåle et moment på 168 Nm, og testresultatet bør derfor overstige dette. Testresultatene for de to akslingene vises i påfølgende avsnitt.

A. Test 1

Flattstålet ble løftet før kraftcella ble påmontert og brudd oppsto i akslingen. Momentet er anslått til å ligge på rundt 40 Nm, altså ikke tilstrekkelig. Bruddet oppsto langsmed røret slik som vist på Figur 5-22, hvilket ikke skal være tilfelle ved et rent torsjonsbrudd. Dette skyldes sannsynligvis svakheter i støpingen og/eller kjerv fra bearbeidingen (jmf. Figur 5-20 s.75).



Figur 5-22: Brudd i aksling på lav belastning. Bruddet oppsto i rørets lengderetning, og skyldes trolig feil i støpeprosess/bearbeiding (Figur 5-22) [23]

Den skadede delen ble derfor fjernet, hylse limt inn på nytt, og en ny test gjennomført. Bruddmomentet ble målt til 164 Nm hvilket er noe under kravet på 168 Nm. Bruddet er målt til omlag 45° på kraftretningen og er dermed et torsjonsbrudd, hvilket tyder på en vellykket test (se Figur 5-23). Dette bekrefter trolig teorien om at det første forsøket skyldtes svakhet ved bearbeiding/støping.



Figur 5-23: Brudd i aksling. Her oppsto bruddet 45° på fiberretningen, og er dermed et torsjonsbrudd [23]



B. Test 2

Denne testen innebar i likhet med test 1 mye prøving og feiling før korrekt måling ble tatt (se Tabell 5-12). Dette medførte bla. til at limfugene ble økt til 40 mm samt en økning i klaringen mellom hylser og aksling slik som vist i Tabell 5-12.

Tabell 5-12, Oversikt over de ulike målingene utført i test 2

Forsøk	Bruddforløp	Årsak	Måling (Nm)	Endringer
1	Røk i limfuge	For lite klaring mellom hylse og aksling	141	Økning av klaring. Limfuge økt til 40 mm
2	Lim herdet ikke i ny limfuge	For lite herder	60	Blandingsforhold endret
3	Røk i den andre limfugen	Trolig av samme grunn som forsøk 1	162	Økning av klaring. Limfuge økt til 40 mm
4	Røk i forsterket limfuge	Momentkapasitet oversteget	377	Lastfaktor på 4,5, ingen endringer nødvendig

Etter alle forbedringene ble utført endte testen med at limfugen røk og ikke brudd i akslingen slik som ønsket.

C. Håndberegninger

Basert på teorien fra kapittel 4 utføres håndberegninger av akslingen. Utrekningene av kritisk moment og egenfrekvens gjøres kun på akslingen i test 2 da denne har de korrekte målene.

I. Spenninger

Tsai - Wu kriteriet kan ikke benyttes på 3D strukturer, hvilket medfører at spenningene må utregnes og resultatet vurderes utifra dette. Fra mekanikken har vi at ren skjærspenning vil påføre brudd 45° på lastretning, siden hovedspenningen er størst i denne retningen (jmf. torsjon s.37). Det er derfor ved dimensjonering mot torsjon hovedspenningen som er av interesse.

Først regnes skjærspenningen ut vha. ligning (5.3), for deretter og bli transformert til hovedspenning.

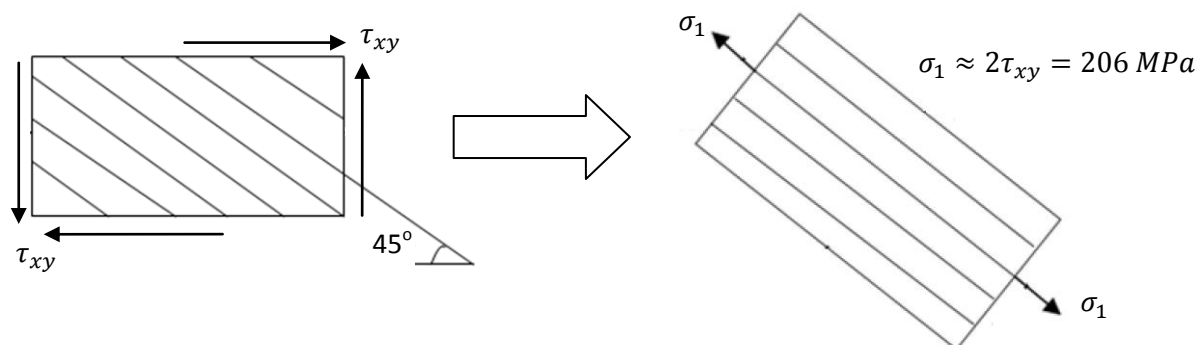
Test 1

Resultatet fra akslingen i test 1 utregnet ved hjelp av formler vises i Tabell 5-13.

Tabell 5-13, Utregnede spenninger i aksling i de ulike fiberretningene

Vinkel	45°	-45°	
τ_{xy}	103,2	103,2	MPa
σ_1	206,4	206,4	MPa

Spenningene som blir tatt opp normalt på fibre, σ_2 , er neglisjerbar grunnet den lave E - modulen. All spenning vil derfor bli tatt opp parallelt med fiberretningen³¹, hvilket medfører at hovedspenningen σ_1 blir det dobbelte av skjærspenningen slik som vist på Figur 5-24 [27]. Det vil altså være ca. 206 MPa i strekk/trykk langs fiberretningen.



Figur 5-24: Skjærspenning transformert til hovedspenning som virker parallelt med fiberretningen. Spenningen σ_2 er tilnærmet null pga. den lave E - modulen. Spenningen funnet her må ikke forveksles med de transformerte spenningene på Figur 4-4 s.27, da spenning parallelt/normalt på fiberretning ikke er det samme som hovedspenning

Dette har blitt kontrollert vha. av analyse (se s.96) hvis resultater samsvarer med dette.

Test 2

Som kjent gikk ikke denne akslingen til brudd. Skjærspenningen er transformert om til hovedspenning σ_1 på samme måte som utledet for test 1, altså multiplisert med faktor to.

Tabell 5-14: Utregnede spenninger i aksling. Skjærspenningen er transformert til hovedspenninger slik som på Figur 5-24 i test 1

Vinkel	45°	-45°	
τ_{xy}	70,4	70,4	MPa
σ_1	140,8	140,8	MPa

Her går det fram at spenningen er nesten halvparten av bruddspenningen i test 1, og akslingen tåler derfor langt mer enn 377 Nm. Det estimerte bruddsmomentet er på rundt ca. 550 Nm dersom bruddspenningen antas lik den i test 1.

II. Kritisk moment

Kontrollerer mot knekking vha. ligning (5.4):

³¹ I isotrope materialer benyttes Mohrs sirkel til dette formålet, hvis utregning gir en hovedspenning lik skjærspenning dersom det kun utsettes for skjærbelastning.

$$T_{cr} = 24,4CD_{22}^{\frac{5}{8}}A_{11}^{\frac{3}{8}}r^{\frac{5}{4}}L^{-\frac{1}{2}}$$

$$= 24,4 * 1,03 * 1 Nm * \left(6,92 * 10^7 \frac{N}{m}\right)^{\frac{5}{8}} * (0,019 mm)^{\frac{5}{4}} * (0,5 m)^{-\frac{1}{2}} \quad (5.4)$$

$$T_{cr} = 220 Nm$$

Hvor lengden L er 0,5 m og ikke 0,4 m som i testen.

Dette er høyere enn 168 Nm, og det er dermed ingen fare for knekking og ekstra lag i 90° blir ikke nødvendig³².

III. Egenfrekvens

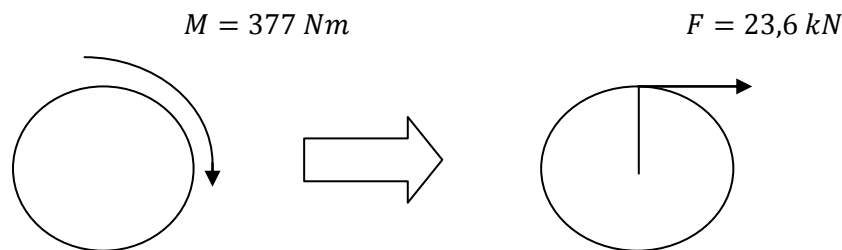
Ved hjelp av formel (5.5) blir egenfrekvensen på akselen i test 2:

$$f_{cr} = \frac{\pi}{2} r \sqrt{\left(\frac{E_{xx}}{2\rho}\right)} = \frac{\pi}{2} * \frac{0,019 m}{(0,5 m)^2} * \sqrt{\left(\frac{17,1 GPa}{2 * 1600 kg/m^3}\right)} = 265 Hz = 15\,900 rpm \quad (5.5)$$

Akslingens maksimale turtall vil være 4400 rpm, og ekstra lag i 0° blir ikke nødvendig³³.

IV. Beregning av limfuge

Fra s. 39 har vi at limet har en maksimal skjærspenning på 40 MPa. Fra test 2 ble det brudd i limfuga på 377 Nm hvilket gir:



Figur 5-25: Kraft som virker på limfuge

Ved en limfuge på 40 mm blir overflatearealet på 4020 mm². Dette gir følgende skjærspenning:

$$\tau_{till} = 40 MPa$$

$$\tau = \frac{V}{A} = \frac{23,6 kN}{4020 mm^2} = 5,9 MPa \quad (5.6)$$

Dette er langt lavere enn den oppgitte, og det er dermed åpenbart den oppgitte skjærfastheten på 40 MPa ikke har betydning. Dette skyldes trolig de mange variablene involvert som fordeling av limet, klaringen mellom aksling og hylse m.m.

³² Ved bruken av 90° vil D leddet øke og dermed gi en økning i knekkmomentet

³³ Lag i denne retningen øker E - modulen, og gir dermed høyere egenfrekvens [7]



Dersom limfuga blir utsatt for det dobbelte av lasten, 168 Nm, gir dette en skjærspenning på 2,5 MPa hvilket er under halvparten av bruddspenningen. 2,5 MPa blir dermed den dimensjonerende spenningen i limet.

5.3.6 Konklusjon

Resultatene fra testene viser at det er mulig å lage en aksling av karbonfiberduk i henhold til krav dersom 8 duker benyttes. Akslingen med denne konfigurasjonen lot seg ikke knekke grunnet svikt i limfuga på 377 Nm, hvilket er over det dobbelte av kravet på 168 Nm. Denne kan dermed med sikkerhet benyttes i Roskva. Målet om at brudd i akslingen skulle oppstå før limfuga ble ikke oppnådd.

Resultatet fra FEM - analysen utført på s.91 ga et tilfredstillende resultat, med et avvik på inntil 15 MPa. Dermed kan det bekreftes at analysen gir et korrekt resultat. I test 1 ble den maksimale skjærspenningen ved torsjonsbelastning utregnet til 103 MPa, og i test 2 (som ikke gikk til brudd) ble spenningen på rundt 70 MPa, hvilket blir dimensjonerende. Dette betyr at akslingen i test 2 er overdimensjonert og at bruken av 8 duker dermed er mer enn tilstrekkelig, da den vil feile på et moment tilsvarende ca. 6,5 ganger den maksimale lasten på 84 Nm.

Under testingen oppsto en rekke problemer relatert til støping og limfuger. Ved den første konfigurasjonen på 4 duker ($[+/- 45^{\circ}]_{2S}$) ble først svekkelsen betraktelig stor (dog ikke målt grunnet problemer med å få løsnet formen), mens det i andre måling lå like under en sikkerhetsfaktor 2. Det oppsto óg en del problemer med å få limet til å holde belastningen, hvilket resulterte til en dobling av limflaten fra 20 til 40 mm.

Sammenlignet med håndberegninger stemte ikke limfugens styrke, da bruddspenningen i skjær ble 5,9 MPa mot 40 MPa oppgitt i datablad. Dette skyldes mest sannsynlig de mange variablene involvert som fordeling av limet, klaringen mellom aksling og hylse m.m. Den dimensjonerende skjærspenningen er satt til 2,5 MPa.

Denne testen viser igjen hvor viktig det er å gjennomføre grundig testing av komposittmaterialer.

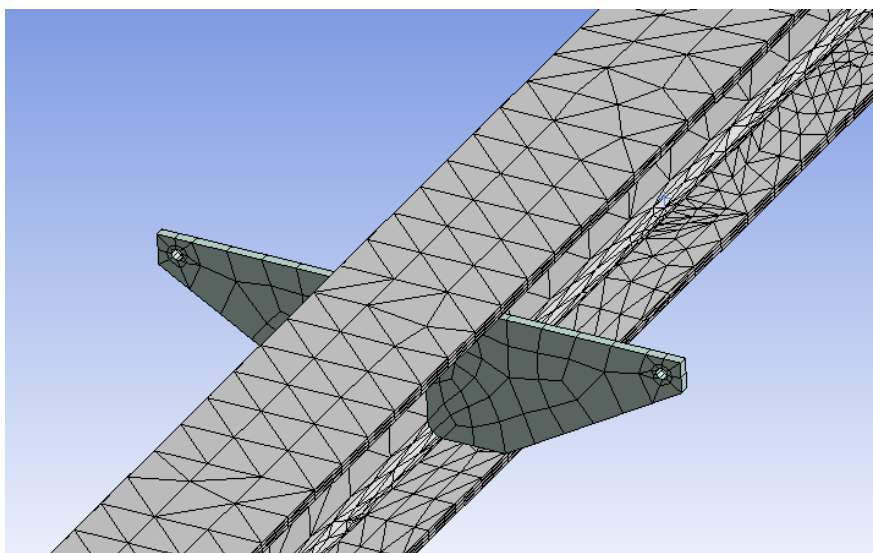
6 FEM - ANALYSE AV MATERIALTESTER

I dette avsnittet gjøres FEM - analyse på materialtestene utført i del 5. For å bruke denne metoden er det viktig å sette seg inn i elementtyper, metodens svakheter m.m. Den første delen er viet dette formålet. Deretter blir analyser utført på de ulike materialtestene.

For å begrense antall bilder har forfatteren valgt å ha med plot av bruddkriteriet i det mest kritiske laget hvis det lar seg utføre, samt spenningsplot av laget med den høyeste spenningen. I tillegg er det tatt med plot av interlaminære spenninger der hvor det er av interesse.

6.1 Mesh

En konstruksjon i en FEM - analyse består av en rekke punkter, kalt noder. Nodene er koblet sammen ved hjelp av vektorer slik at strukturen blir delt opp i et rutenett bestående av elementer, kalt mesh, slik som vist på Figur 6-1.



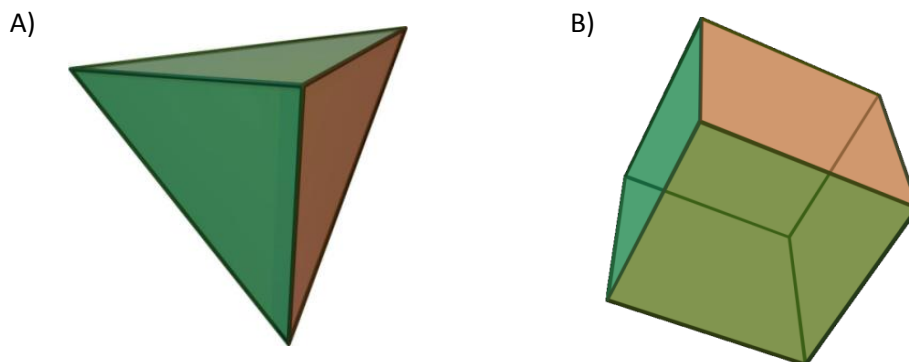
Figur 6-1: Mesh av en bjelke

I områder hvor det er antatt høyere spenning slik som rundt hull, skarpe kanter, hjørner o.l. bør tettheten av noder være større enn ellers i konstruksjonen. Rundt hjørner og skarpe kanter kan spenningen øke mot uendelig, og i andre deler av konstruksjonen kan resultatet bli feilaktig som følge av at elementer blir forvridd eller feil elementtype benyttes. Meshingen er derfor den mest kritiske delen av en FEM - analyse og brukeren må ha tilstrekkelig kunnskap om dette for å forhindre et feilaktig analyseresultat. Dersom tilstrekkelig arbeides legges ned i meshingen³⁴ og feil utelukkes får meshet høy kvalitet, og analyseresultatet kan antas troverdig. I de påfølgende avsnittene omtales de viktigste punktene om meshing i detalj.

³⁴ En amerikansk studie viser at 73 % av tiden brukt til analyse blir brukt på meshingen [47]

6.1.1 Elementtyper

Elementene kan ha ulike former avhengig av bruksområdet. I 3D modeller er de to vanligste typene tetraedriske (tetrahedral) og kubiske (hexahedral) med sine respektive fordeler og ulemper (det finnes også andre typer elementer, men disse er utelatt).



Figur 6-2: A) tetrahedrisk element. B) kubisk element [53, 59]

Tetraedrisk

Elementet har 4 noder, 4 sideflater og 6 kanter. Fordeler og ulemper er listet opp under.

Tabell 6-1, Fordeler og ulemper ved bruken av tetrahedriske elementer

Fordeler	Ulemper
<ul style="list-style-type: none"> - Lettere å forfine mesh (mesh control) i kritiske områder - Automatisk, lite manuelt arbeid ved meshingen, da den tilpasser seg lettere geometriske variasjoner - Kan generer millioner av elementer i løpet av sekunder/minutter grunnet den enkle geometriske formen [47] 	<ul style="list-style-type: none"> - På enkelte bruksområder gir typen et feilaktig svar; "The only people that use tets are those that don't care about their answers." [47] - Konvergerer ikke ved elastoplastisk problemer

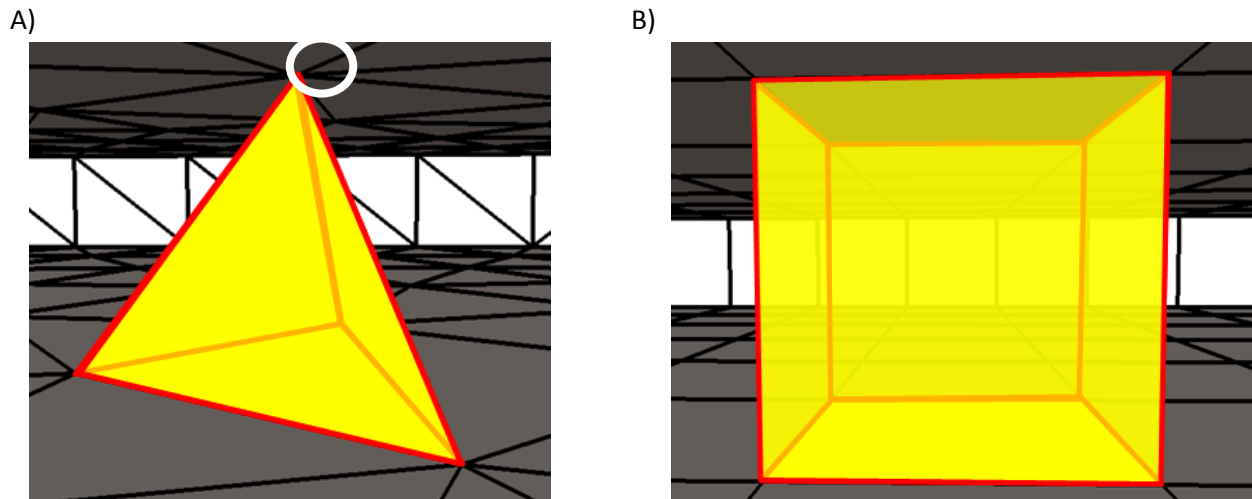
Kubisk

Det kubiske elementet har 8 noder, 6 sider og 12 kanter. Fordeler og ulemper er listet opp i under.

Tabell 6-2, Fordeler og ulemper ved bruken av kubiske elementer

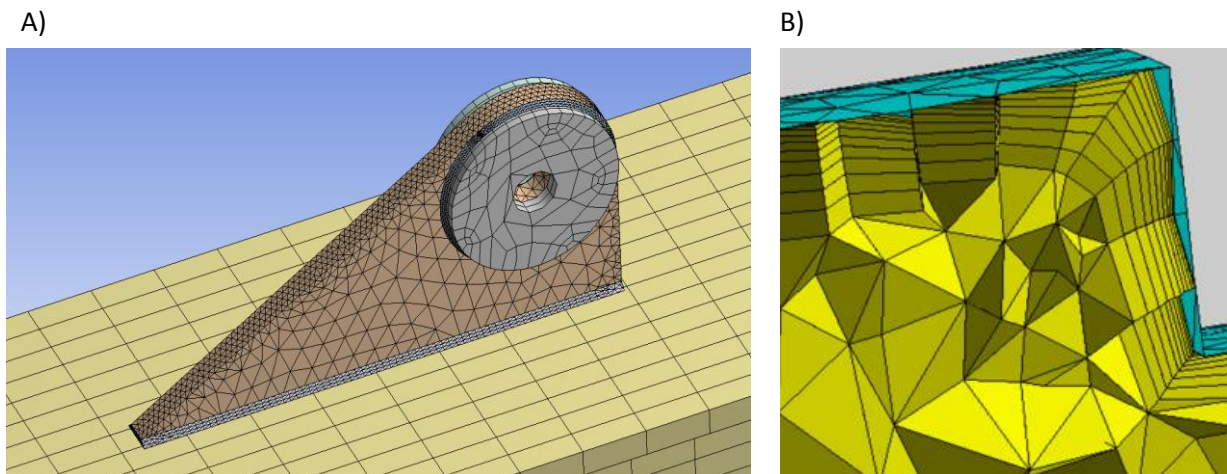
Fordeler	Ulemper
<ul style="list-style-type: none"> - Mer nøyaktig løsning enn tetrahedrisk, og derfor foretrukket blant spesialister - Konvergerer ved elastoplastiske problemer - Resulterer i færre elementer enn tetraheder - Lett å visualisere [34] 	<ul style="list-style-type: none"> - Kan være vanskelig å lage, ikke like automatisert som tetrahedrisk - Genereringen av elementer tar lang tid (millioner elementer i løpet av dager/uker/måneder) [47]

Grunnen til at det kubiske meshet er vanskeligere og tilpasses ulike geometriske former kan enkelt vises ved hjelp av Figur 6-3. For å kunne fullføre det tetrahedriske elementet kreves det kun en node (se hvit ring på Figur 6-3, A), mens det for det kubiske kreves fire noder, noe som er langt vanskeligere å modellere.



Figur 6-3: A) Tetrahedrisk element. B) Kubisk element. Det trengs kun en node for å kunne plassere det tetrahedriske elementet, mens det for det kubiske kreves fire [47]

I programmet ANSYS Workbench blir en kombinasjon av disse typene benyttet. Dette gjør at vi får et nøyaktig svar uten at regnetiden blir for lang. På Figur 6-4 ser en at tetrahedriske elementer brukes i braketten, mens bjelka deles opp i kubiske. Utformingen av meshet avhenger selvsagt av type analyse og geometri. I andre tilfeller kan de kubiske brukes nær overflaten og i kritiske områder, mens i de mindre kritiske delene benyttes store tetrahedriske elementer slik som på figuren.



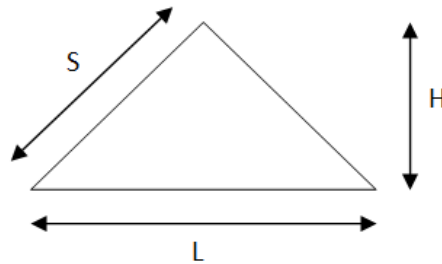
Figur 6-4: A) Hybridmesh av en bjelke med en brakett. Tetraheder fyller braketten, mens i bjelka blir kubiske elementer benyttet da de passer bra med geometrien. B) Tetraheder fyller det store tomrommet og dermed reduserer regnetiden, mens kubiske brukes nær overflaten hvor nøyaktig resultat foretrekkes [54]. De to figurene tilhører ikke samme konstruksjon

I programmet ANSYS Classic kan det velges mellom mange ulike typer elementer med forskjellig form og noder slik at meshet lettere kan tilpasses spesielle tilfeller (som f.eks komposittmaterialer), og er derfor godt egnet hvis det ønskes bedre kontroll på meshingen.

6.1.2 Krav til elementer

Formen på elementene har stor betydning for resultatet, og ved bruk av spesielt den tetrahedriske typen er risikoen stor for å få ugunstige former; ved lange og tynne elementer i meshet kan resultatet bli feilaktig. Elementene bør derfor være innenfor følgende krav [30]:

- Forholdet mellom høyden H og lengden L må være mindre enn 4
- Forholdet mellom lengden S og L bør ligge imellom 0,5 og 0,7
- Minimumsvinkel i hjørnene er 41°



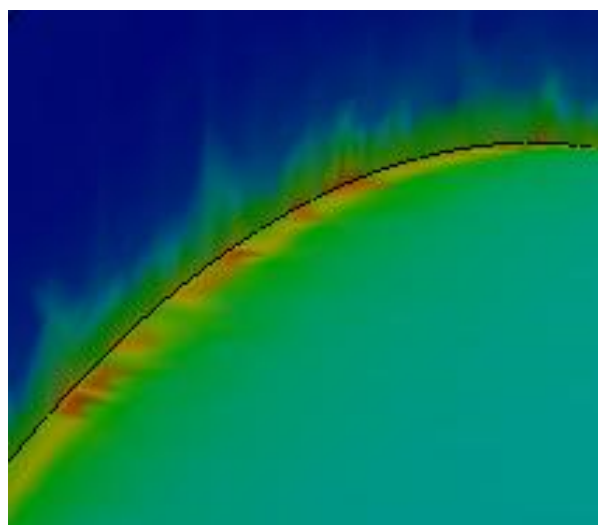
Figur 6-5: Illustrering av ulike størrelsesforhold på et tetrahedrisk element

6.2 Vanlige feil i FEM analyse

Dersom FEM - analyse kjøres og svaret virker fornuftig kan det lett bli oppfattet som det korrekte svaret. Ved FEM - analyse er det svært viktig å være kritisk til løsningen på analysen slik at feildimensjonering som kan gå ut over sikkerheten og/eller resultere i en overdimensjonert konstruksjon unngås. [33]

6.2.1 Singularitetsfeil

Et vanlig problem er at spenningen divergerer som følge av singularitetsfeil. I områder med f.eks et hjørne (Figur 6-6) kan det oppstå singularitetsfeil som følge av at arealet i hjørnet er null. Når meshet forfines (nodetettheten økes) vil arealet gå mot null hvilket resulterer i en spenning som går mot uendelig og vi får divergens. Dette problemet løses ved å avrunde hjørnet.



Figur 6-6: Spenningsplot av et hjørne med radius null. De røde områdene viser singularitetsfeil som følge av at arealet går mot null etterhvert som meshet forfines [50]

6.2.2 Konvergenzkriteriet

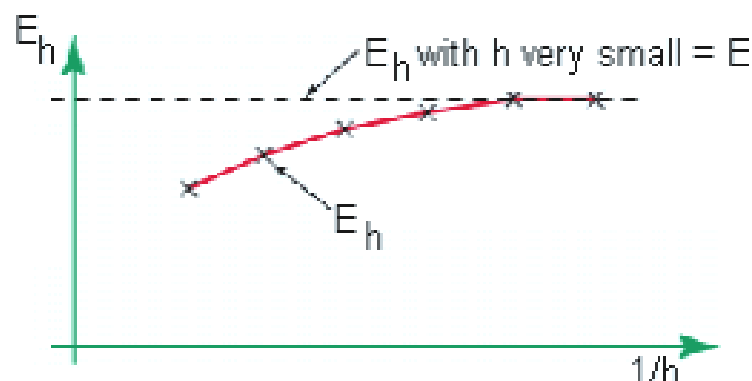
I en struktur med gitte dimensjoner, materialdata, krefter, fastlåsing og randbetingelser vil det kunne settes opp en matematisk modell med en eksakt løsning (f.eks spenningsforløpet gjennom strukturen eller deformasjonsarbeidet m.m.). Modellen består av en rekke differensialligninger med sine respektive betingelser (går ikke i detalj på dette) som vi ikke har muligheten til å løse. For å kunne finne en løsning brukes derfor FEM metoden hvor strukturen som kjent deles opp i elementer som blir regnet på.

Problemet er at det ikke er mulig å vite om resultatet av FEM analysen stemmer overens med løsningen av den eksakte løsningen fra den matematiske modellen. Til dette benyttes derfor kravet om konvergens, som kan uttrykkes på følgende måte:

$$\lim_{h \rightarrow 0} |E - E_h| = 0 \quad (6.1)$$

Hvor:

- h er størrelsen på elementene
- E er det ukjente eksakte deformasjonsarbeidet
- E_h er deformasjonsarbeidet utregnet i FEM analysen

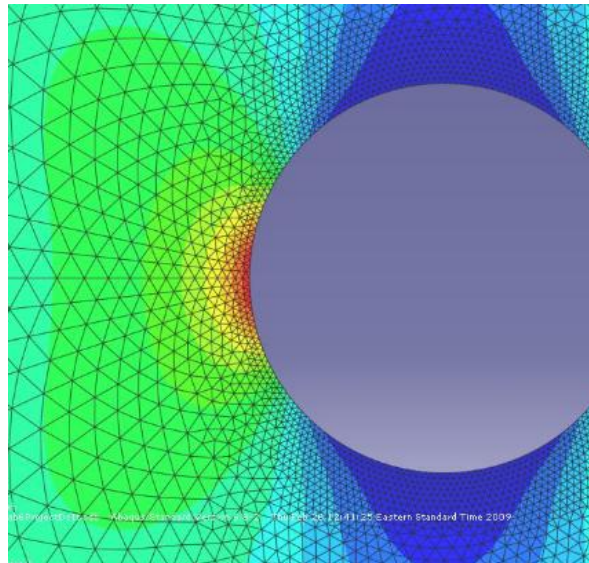


Figur 6-7: Løsningen fra FEM analysen konvergerer mot den eksakte løsningen av den matematiske modellen [33]

I ligning (6.1) skal differansen mellom de to løsningene nærme seg null når elementstørrelsen går mot null slik som på Figur 6-7. I praksis betyr dette at en analyse må kjøres flere ganger hvor elementstørrelsen gradvis minkes til løsningen når et stabilt nivå. Da stemmer løsningene overens og vi er sikre på at FEM modellen er realistisk. Dersom denne verdien på FEM analysen bare øker etterhvert som h minker har det oppstått en singularitetsfeil. Forfiningen av meshet gjøres kun i de kritiske områdene.

6.2.3 Håndberegninger og gjennomsnittsspenninger

I en FEM analyse av en struktur med bla. hull og sveiser vil analysen vise spenningskonsentrasjoner rundt disse. Ser en på en struktur med hull/bolter kan den maksimalt tillatte spenningen overstiges rundt bolthullet (se Figur 6-8) og for å sørge for at dimensjoneringene er i henhold til kravene vil fornuften si at endringer må gjøres med materialet rundt hullet. Dette er korrekt hvis materialet er sprøtt slik som karbonfiber, men i tilfeller med duktile materialer slik som metaller har ikke lokal flyting noen betydning da denne tas opp i det omkringliggende materialet; det er den gjennomsnittlige spenningen rundt hullet som har betydning. Denne viser ikke FEM analysen, og håndberegninger må derfor benyttes.



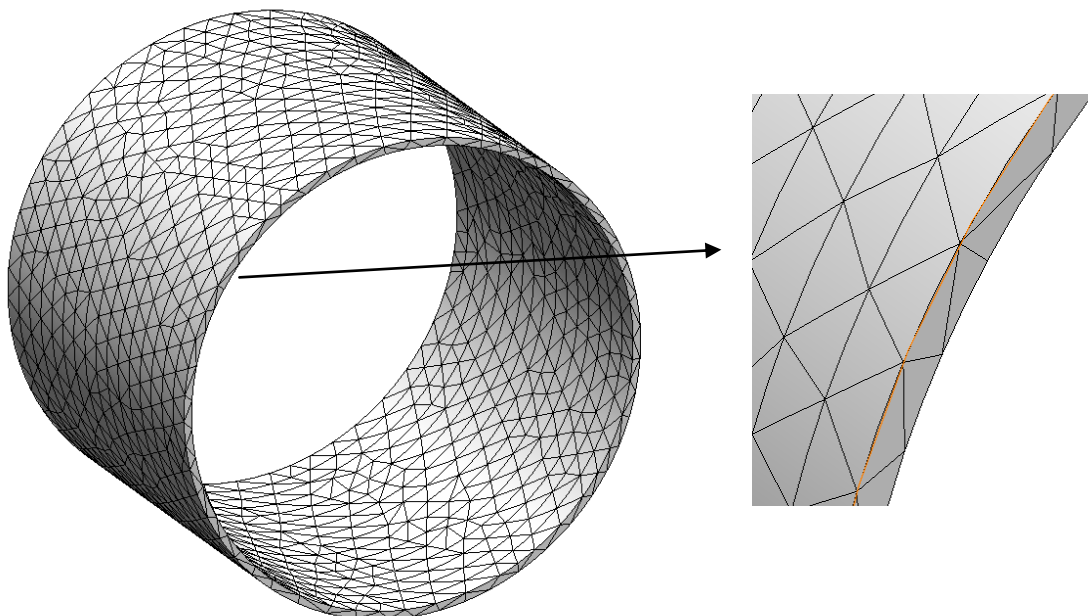
Figur 6-8: Spenningskonsentrasjon rundt et hull. Det røde og det omkringliggende grønne området kan f.eks være over den maksimalt tillatte spenningen [44]

Det samme problemet gjelder også for sveiser, hvor jevnførende spenning er dimensjonerende. [27]

Håndberegninger bør ikke bare benyttes i situasjoner som beskrevet over, men også i andre deler av strukturen for å kontrollere mot feil på inndata og evt. andre feilkilder.

6.2.4 Antall elementer i tykkelse

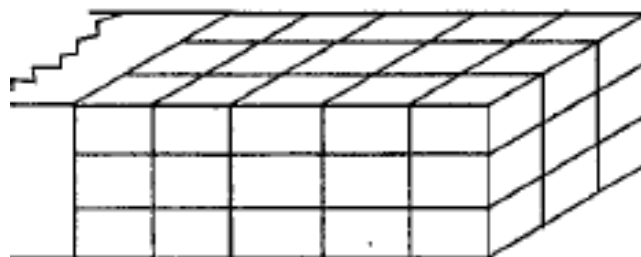
En rørprofil skal analyseres, og ved å benytte et passende mesh blir det slik som vist på Figur 6-9.



Figur 6-9: Tetragonalt mesh av en rørprofil. Legg merke til elementene i tykkelsen som ikke oppfyller kravene

I rørets vegger har elementene et høyt forhold mellom lengden og høyden (jmf. krav på s.85), hvilket kan gi et feilaktig resultat. Dersom det er ønskelig å finne deformasjon og spenning som følge av en bøyespenning må røret meshes slik at hvert element dekker 1/4 eller mindre av tykkelsen, noe som krever kraftig maskinvare dersom røret er langt og tynt. [36]

Dersom det benyttes kubiske elementer (f.eks i en H - bjelke) skal det være minimum tre elementer i tykkelsen ved bøyning og 5 ved knekkingsanalyse. [49]

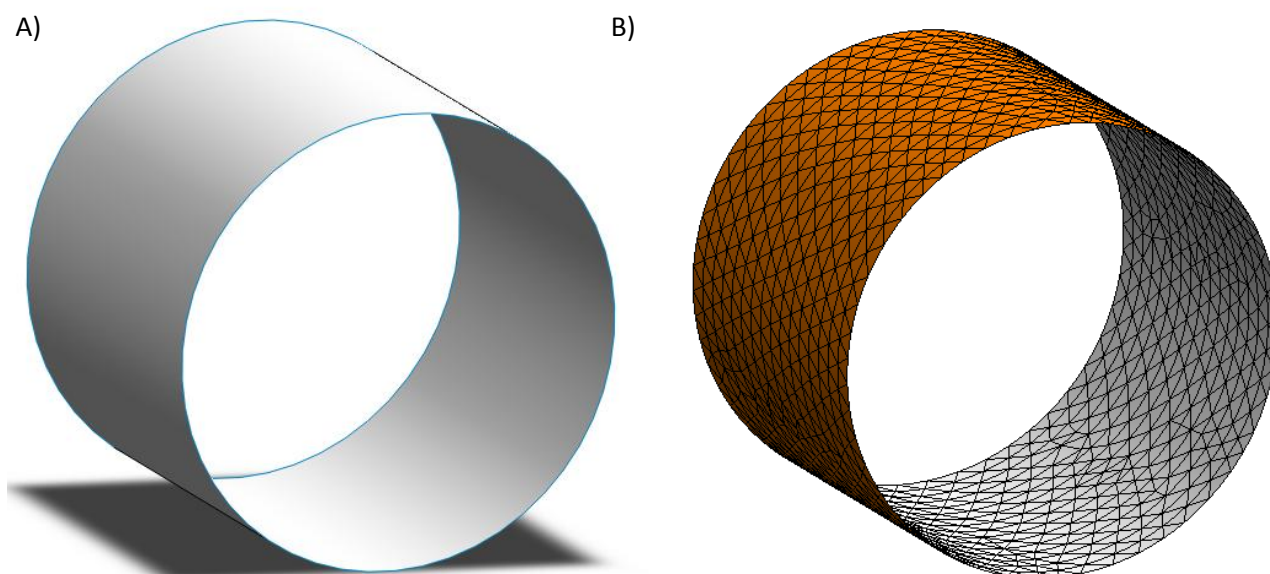


Figur 6-10: Heksagonalt mesh av en plate med tre elementer i tykkelsen [49]

For å løse dette problemet må skallelementer benyttes.

A. Skallelementer

En løsning på problemet med elementtykkelse er å konvertere røret om til et skall med null tykkelse (se Figur 6-11) . Deretter benyttes 2D/skall elementer (trekant eller kvadratisk, jmf. 3D elementer på s.83) som blir gitt en viss tykkelse i FEM programmet (lik rørtykkelsen i dette eksempelet). I komplekse strukturerer (f.eks et kranium) kan dette være tidkrevende, men for strukturene benyttet til Roskva bør dette enkelt la seg gjøre.



Figur 6-11: A) Rør konvertert til en overflate med null tykkelse. B) Mesh med trekantelementer



Det finnes andre metoder å gjøre dette på, men i bla. SolidWorks Simulation og i ANSYS Workbench benyttes denne fremgangsmåten.

Komposittanalysene som blir utført gjøres ved å benytte SW Simulations innebyggede komposittfunksjon. Denne fungerer på måten beskrevet over hvor fiberkonfigurasjon, tykkelse og materiale legges inn etter konverteringen til skall er utført.

6.3 Input til datamodell

Fra utregningene og databladet (fra vedlegg) i Tabell 4-5 s.30 får en verdiene vist i Tabell 6-3. I tillegg vises modellen benyttet ved FFI [20]. For Divinycell vil verdiene fra Tabell 4-19 s.55 bli benyttet.

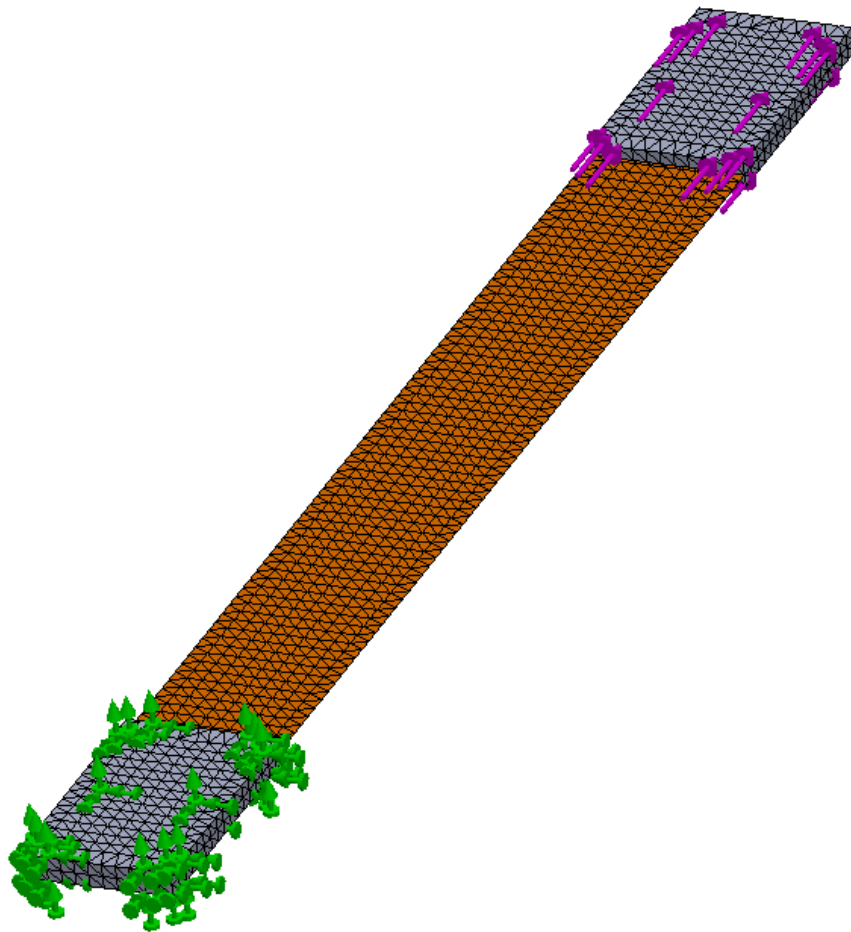
Tabell 6-3: Materialeegenskapene til karbonfiberarmert plast [7, 26]

Elastiske konstanter	Betegnelsen	Utregnede/datablad	FFI	
E – modul i x – retning	E_{11}	139	125	GPa
E – modul i y – retning	E_{22}	7,9	5,5	GPa
E – modul i z – retning	E_{33}	7,9	5,5	GPa
Poissons tall for 21	ν_{12}	0,3	0,3	–
Poissons tall for 23	ν_{23}	0,42	0,42	–
Poissons tall for 13	ν_{13}	0,3	0,3	–
Skjærmodul i xy – planet	G_{12}	2995	2000	MPa
Skjærmodul i yz – planet	G_{23}	2740	1500	MPa
Skjærmodul i xz – planet	G_{13}	2995	2000	MPa
Spenninger				
Strekkfasthet i x – retning	S_{Lt}	2500	1500	MPa
Strekkfasthet i y – retning	S_{Tt}	70	50	MPa
Trykkfasthet i x – retning	S_{Lc}	1470	1000	MPa
Trykkfasthet i y – retning	S_{Tc}	250	250	MPa
Skjærfasthet i xy – planet (in - plane shear)	S_{LTs}	98	60	MPa

6.4 Analyse av prøvestaver

Strekktesting på s.56 må sammenlignes med en FEM – modell for å se hvorvidt analyseresultatet stemmer med testresultatet. Prøvene er modellert i SolidWorks, med pålimte aluminiumsbiter og en påsatt kraft på 15 kN hvilket var den høyeste målte verdien i testingen (se Figur 6-12).

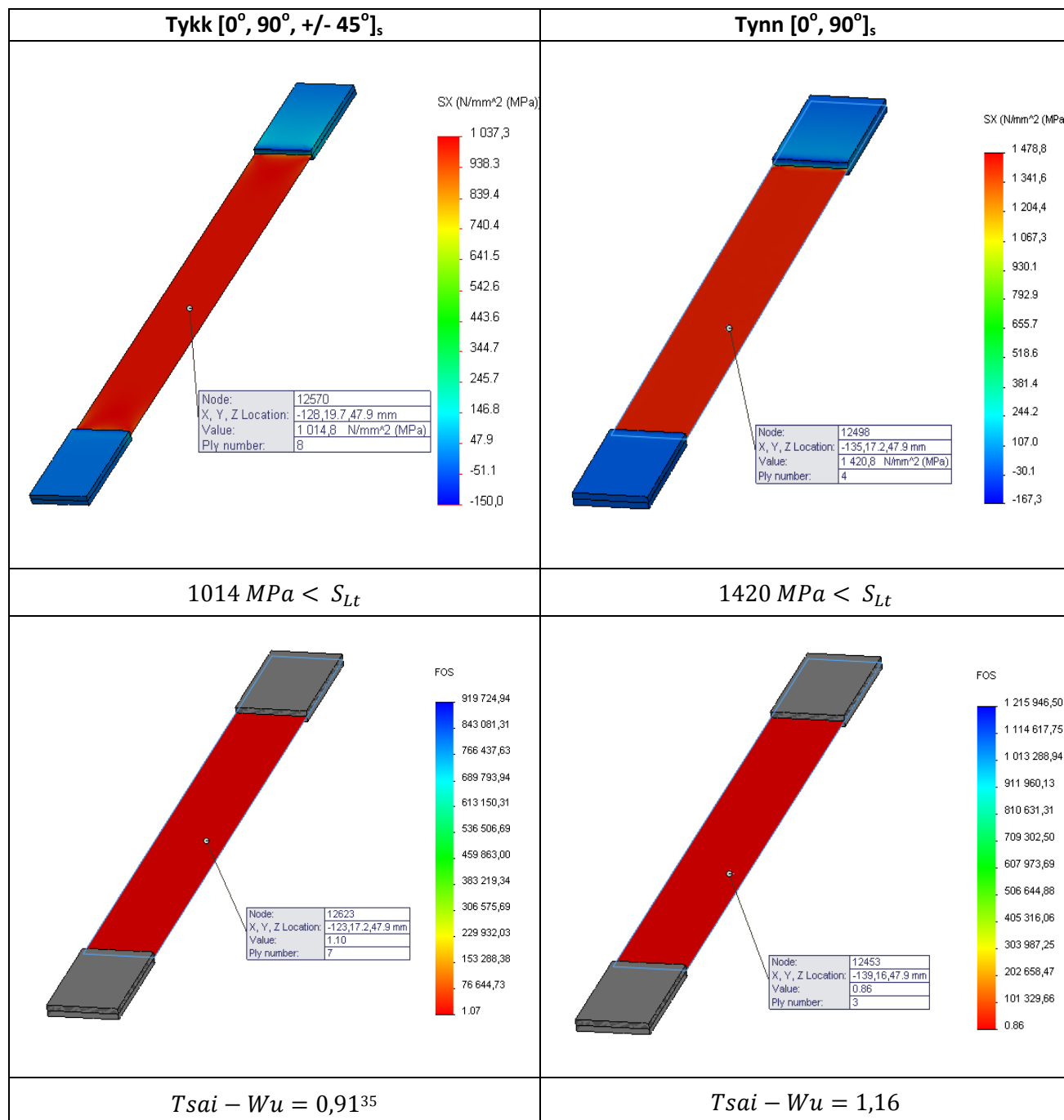
Meshet har blitt forfinet til et konvergerende resultat, med unntak av spenningskonsentrasjoner mellom aluminiumen og karbonfibren, hvor singulariteter oppstår. Dette kan utelukkes og har ingen betydning for analyseresultatet. Karbonfibren har blitt meshet med skallelementer slik som forklart på s. 88.



Figur 6-12: Mesh av prøvestav med skallelementer med opplagring i bunn og påsatt kraft i det øverst. Det tette meshet sørger for høy nøyaktighet

Videre ble tykkelsen av prøvestavene målt til henholdsvis 0,8 og 1,6 mm for tynn og tykk prøve, noe som gir en tykkelse på 0,2 mm per lag.

Et plot av henholdvis strekkspenningen og sikkerhetsfaktoren utregnet vha. av Tsai - Wu bruddkriteriet for begge prøvene ga resultatet vist i Figur 6-13.



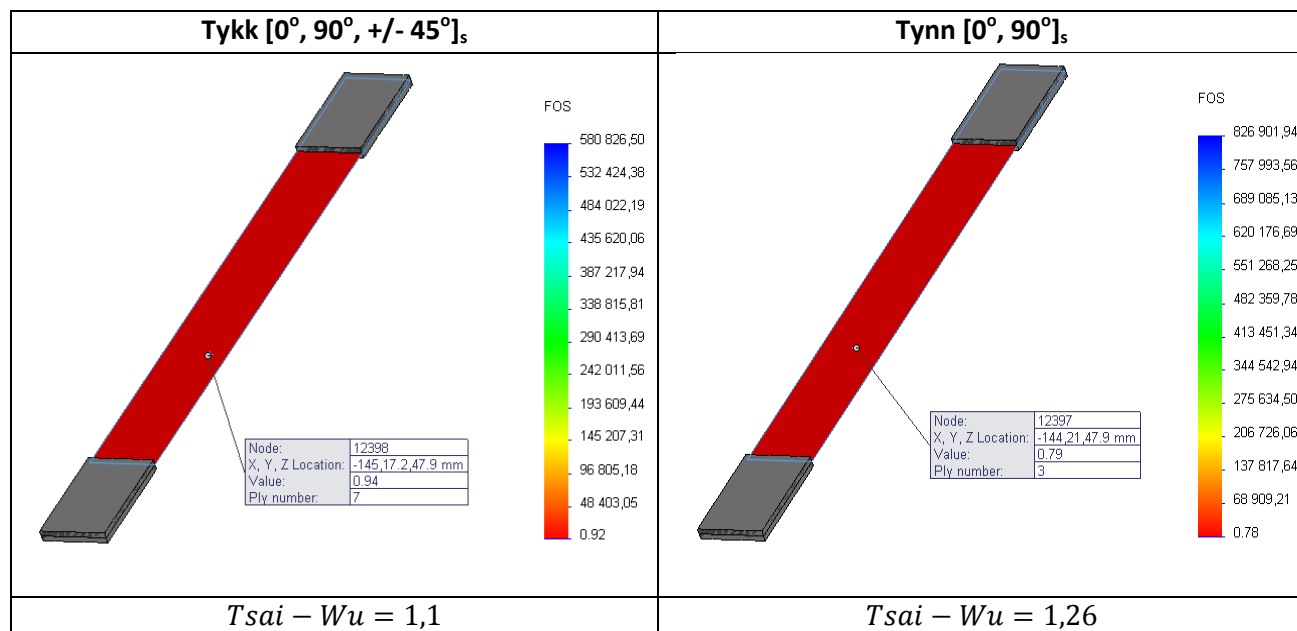
Figur 6-13: Analyseresultater med materialmodell fra utregnede/datablad i Tabell 6-3. Øverst vises spenninger, og nederst bruddkriteriet for henholdsvis tykk og tynn prøve

Den maksimale spenningen for den tykke og tynne prøve er på 1014 og 1420 MPa. Dette er under bruddspenningen på 2500 MPa, og brudd oppstår derfor ikke i disse iflg. analysen. Ved å benytte Tsai-Wu bruddkriteriet på s. 31 blir den minste verdien mot brudd lik 0,91 for den tykke prøva og 1,16 for den tynne, begge i lagene med 90°. Modellen stemmer derfor bra med virkeligheten, dog ble det som kjent ikke målt noen jevnt over høyere kraft i den tykke prøva, snarere tvert imot.

Dersom en ser på spenningene i lagene med +/- 45° blir verdien i x - retning på 216 MPa.

³⁵ I SolidWorks Simulation blir Tsai - Wu kriteriet regnet ut som sikkerhetsfaktor (1/verdi) slik det fremgår av figuren

Til slutt er det sammenlignes datamodellen fra FFI med den utregnede/datablad for å se hvor konservativ denne er og om den stemmer bedre med testresultatet. Resultatet vises i Figur 6-14.

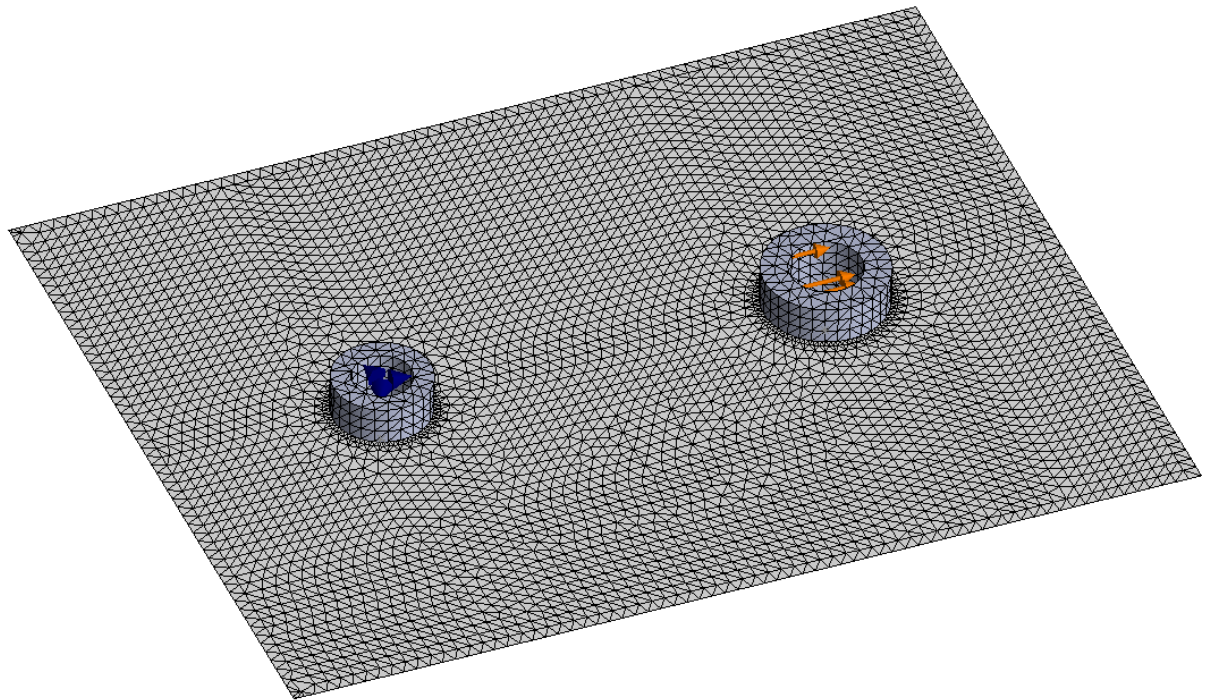


Figur 6-14: Plot av sikkerhetsfaktor med materialmodell fra FFI for henholdsvis tykk og tynn prøve

Her går begge modellene til brudd med en Tsai - Wu verdi på henholdsvis 1,1 og 1,26 for den tykke og tynne prøva. Sammenlignet med den andre modellen er det et avvik på 0,2 for tykk og 0,1 for tynn, og modellen er dermed som forventet noe mer konservativ modell. Forskjellen er liten og det er derfor sikkerhetmessig ugunstig å dimensjonere Roskva til brudd ved denne modellen, og at det derfor i tillegg bør benyttes andre sikkerhetsmarginer som en sikkerhetsfaktor på 2 eller tilsvarende.

6.5 Analyse av bolttest

I likhet med for strekktesten må bolttesten sammenlignes med en FEM modell for å finne ut om denne samsvarer med testresultatene og om det oppstår brudd. En modell eksakt lik prøvebitene fra testen på s.66 modelleres derfor i SolidWorks, og lasten fra testen påføres. I modellen er limets påvirkning neglisjert, og hylsene er dermed festet i kun den ene halvdel. På Figur 6-15 vises mesh med innfestninger og krefter. Kulelagerfunksjonen i SW Simulation benyttes til påføring av krefter, hvilket gir en sinusformet kraftfordeling mot hylsa. Meshet er forfinet rundt hullene.

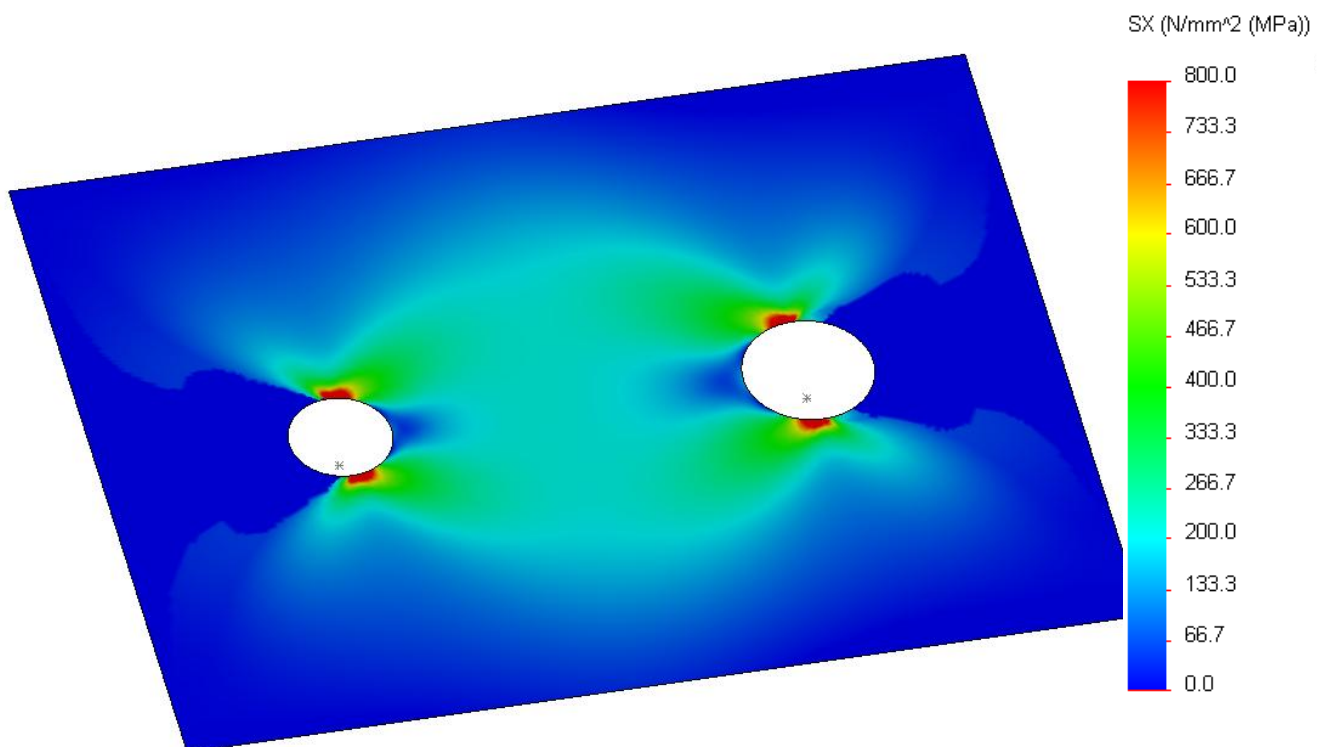


Figur 6-15: Mesh av prøvebit til bolttest med skallelementer. Meshet er forfinet rundt hullene

Tykkelsene til hvert enkelt lag er målt til ca. 0,2 mm.

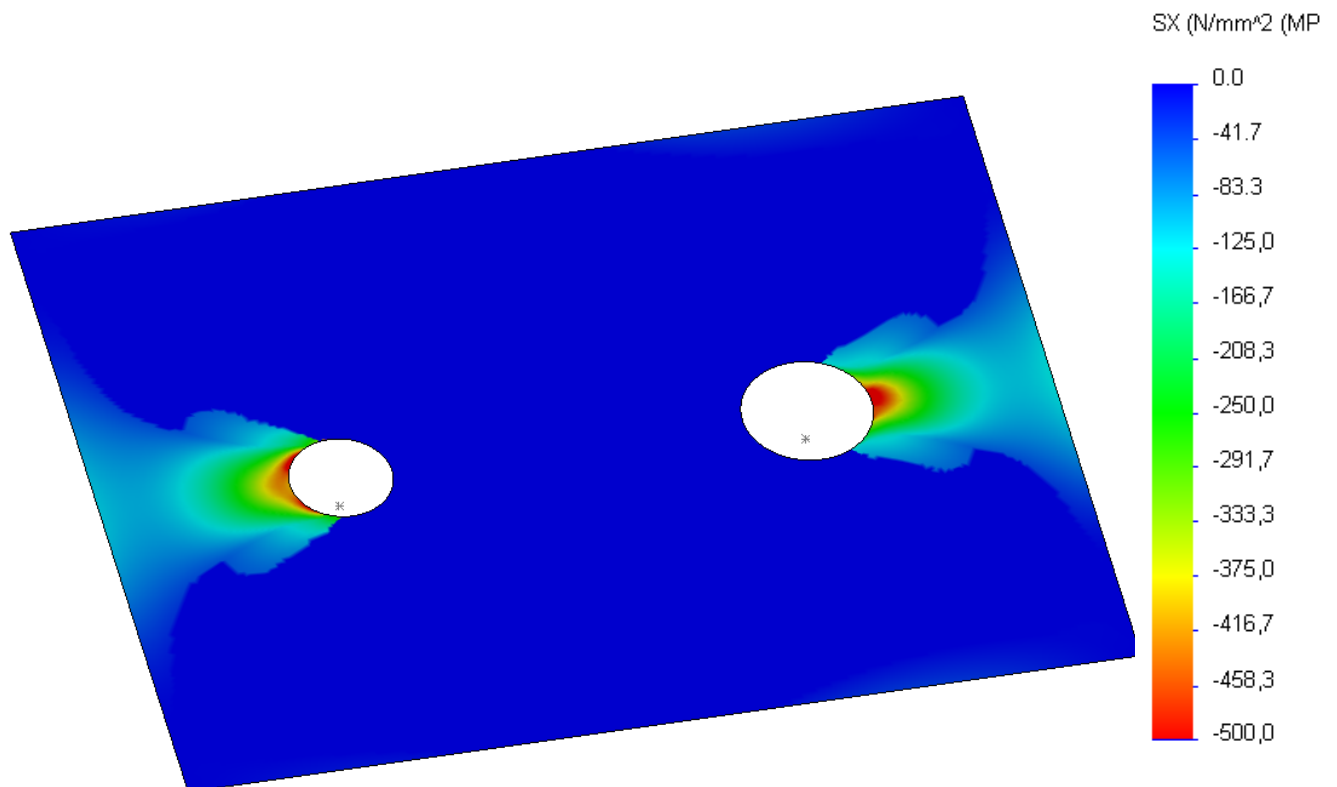
6.5.1 Spenningsplot

Et spenningsplot av de høyeste spenningene i x - retning for prøvene med HCP50 med en påsatt kraft på 11 kN er vist i Figur 6-16 og Figur 6-17.



Figur 6-16: Strekkspenning av HCP50 prøvebit i det ytterste laget (0°)

Fra plotet av strekkspenningen er maksspenningen på over 800 MPa i de røde områdene, hvilket vil medføre at det vil oppstå kjerv i dette området som følge av at hullet utvides.



Figur 6-17: Trykkspenning av HCP50 prøvebit i det ytterste laget (0°)

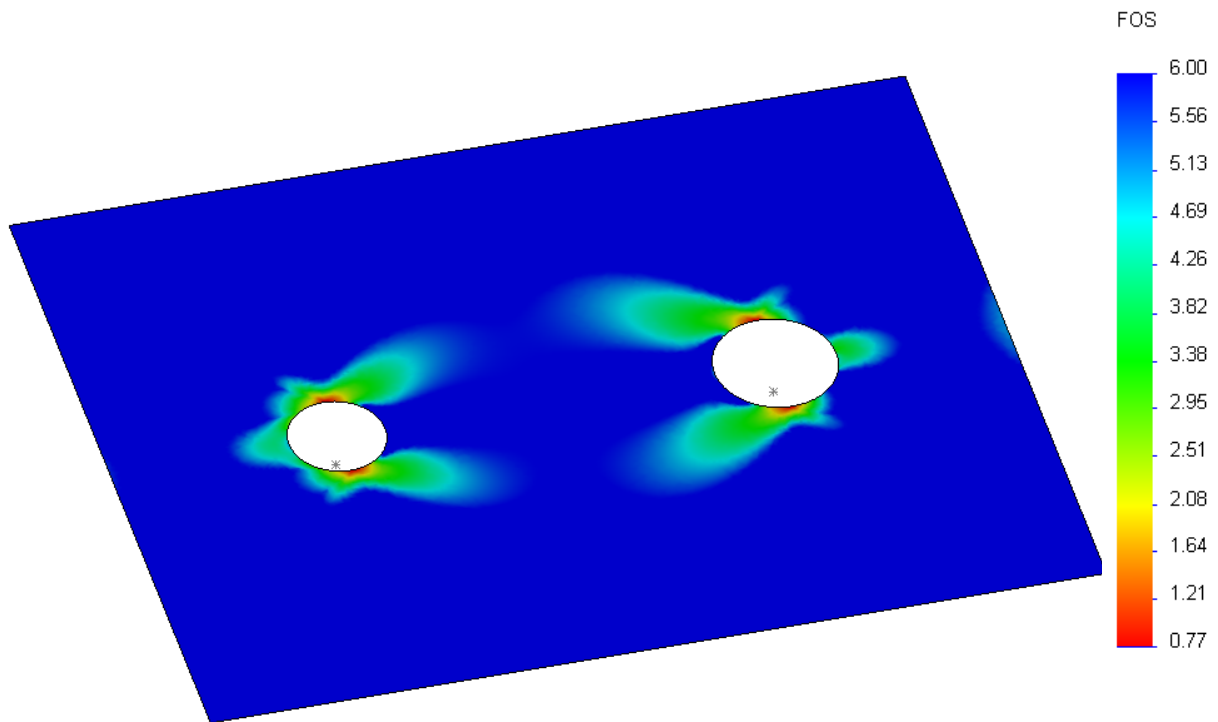
På trykksiden av hullene er det en trykkspenning på 500 MPa i et lite område. Dette er mindre enn trykkfastheten på 1470 MPa, og er derfor ikke årsaken til brudd iflg. analysen.

Spenningsene i Divinycellen var opp mot 5 MPa i de røde områdene på Figur 6-16 for HCP50, men var ellers rundt - 1,5 til 1,5 MPa i nærheten av hullene; altså en del lavere enn det håndberegningen på 3,8 MPa fra Tabell 5-10 s.70 skulle tilsi. Det samme gjelder for H80 hvor spenningen var 1 MPa i de røde områdene og mellom -0,2 til 0,3 MPa i nærheten av hullene.

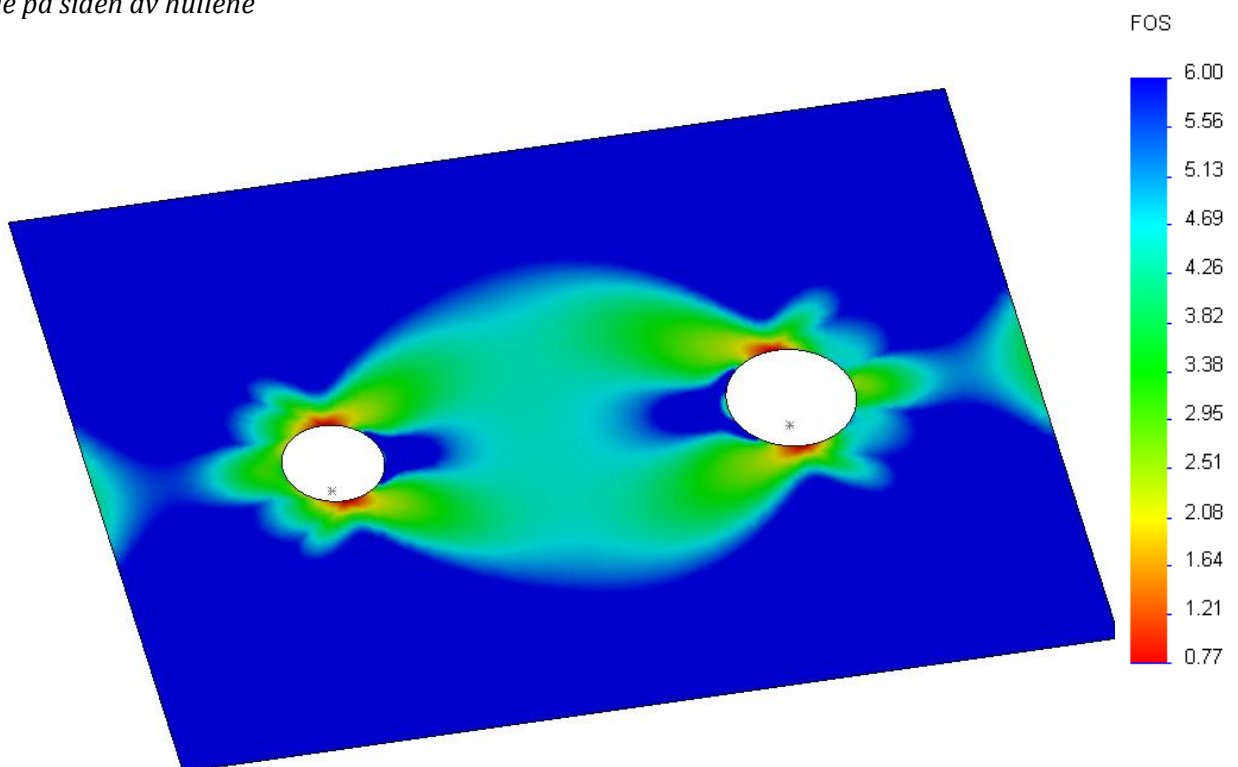
Forøvrig er også spenningen i hylsene kontrollert, hvilke ga en Von Mises spenning på rundt 220 MPa. Dette er under flytgrensa for aluminium 6082 - T6 og er dermed ikke kritisk. Dog var det spenningskonsentrasjoner der hvor karbonfiberlaminatene er i kontakt, men dette anses som ingen fare da det i små områder ikke er kritisk hvis flytspenningen overstiges (jmf. gjennomsnittspenninger s.86).

6.5.2 Tsai - Wu bruddkriteriet

Fra spenningsplotene er det vanskelig å se hvorvidt det oppstår brudd og Tsai - Wu kriteriet må derfor benyttes. Et plot av dette er vist på Figur 6-18 og Figur 6-19 for de to prøvetypene.



Figur 6-18: Sikkerhetsfaktorplot av Tsai - Wu bruddkriteriet av prøver med H80. De kritiske stedene er de røde på siden av hullene



Figur 6-19: Sikkerhetsfaktorplot av Tsai - Wu bruddkriteriet av prøve med HCP50. De kritiske stedene er de røde på siden av hullene, men virker i et større område enn for H80

Sikkerhetsfaktoren er lavest i de samme områdene hvor spenningene er høyest, og det er kun i dette området det er fare for brudd. Forskjellen mellom de to ulike kjernematerialene med de to forskjellige lastene, gir i H80 en høyere sikkerhetsfaktor enn ved HCP50. Dette er overraskende mtp. at HCP50 har

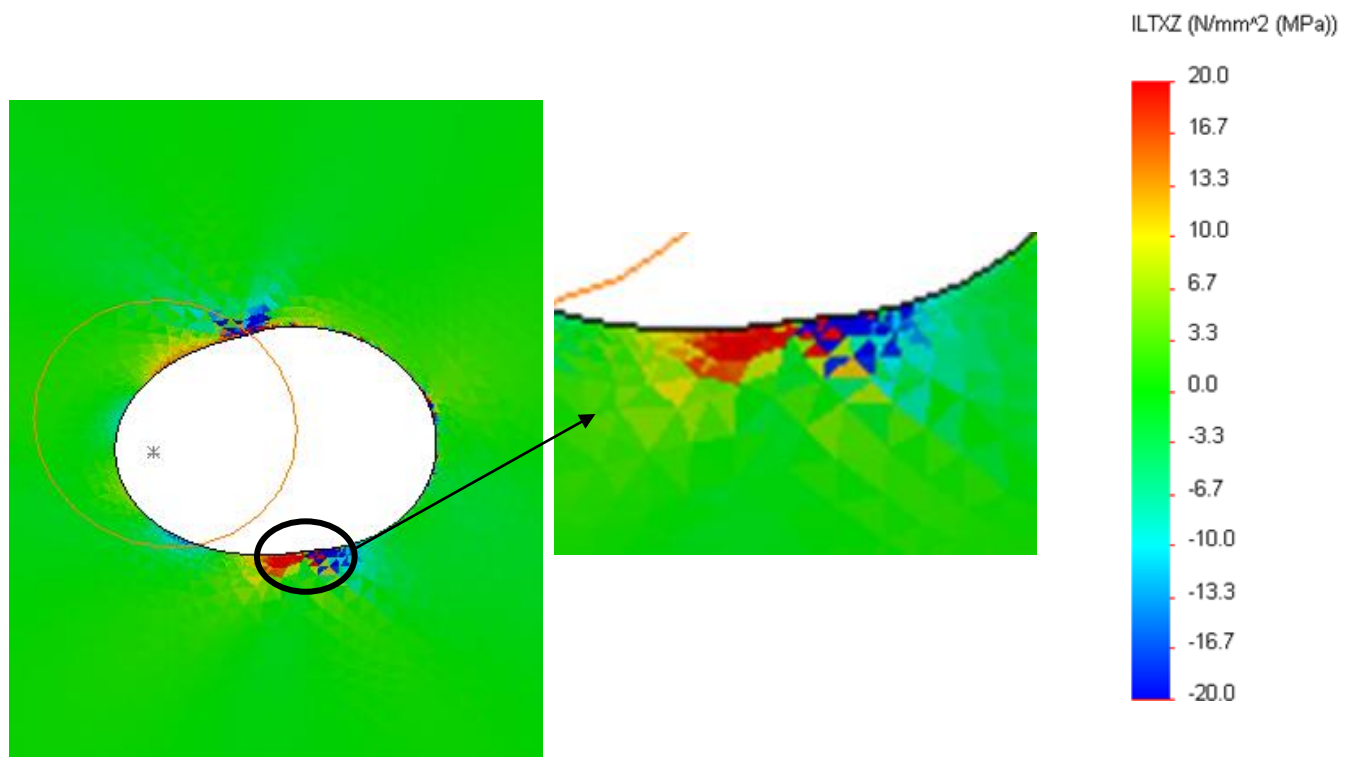
høyere fasthet enn H80, og at det i testen tålte langt mer med HCP50. Flere ulike analyser har blitt utført med det samme resultatet. Hva denne forskjellen skyldes er uvisst.

På kompresjonssiden ble det for HCP50 en sikkerhetsfaktor på rundt 2 - 3, hvilket ikke samsvarer med testen, da det i testen ble svikt i dette området med den påførte lasten på 11 kN.

I analysen er det laget på 90° som er mest utsatt, altså det samme som for strekkprøvene.

6.5.3 Interlaminære skjærspenninger

I denne testen kan det ha oppstått bevegelse mellom lagene, og dermed interlaminære skjærspenninger. Siden dette er en svakhet i komposittkonstruksjoner bør dette kontrolleres. Et plot av de interlaminære skjærspenningene rundt et hull vises på Figur 6-20.

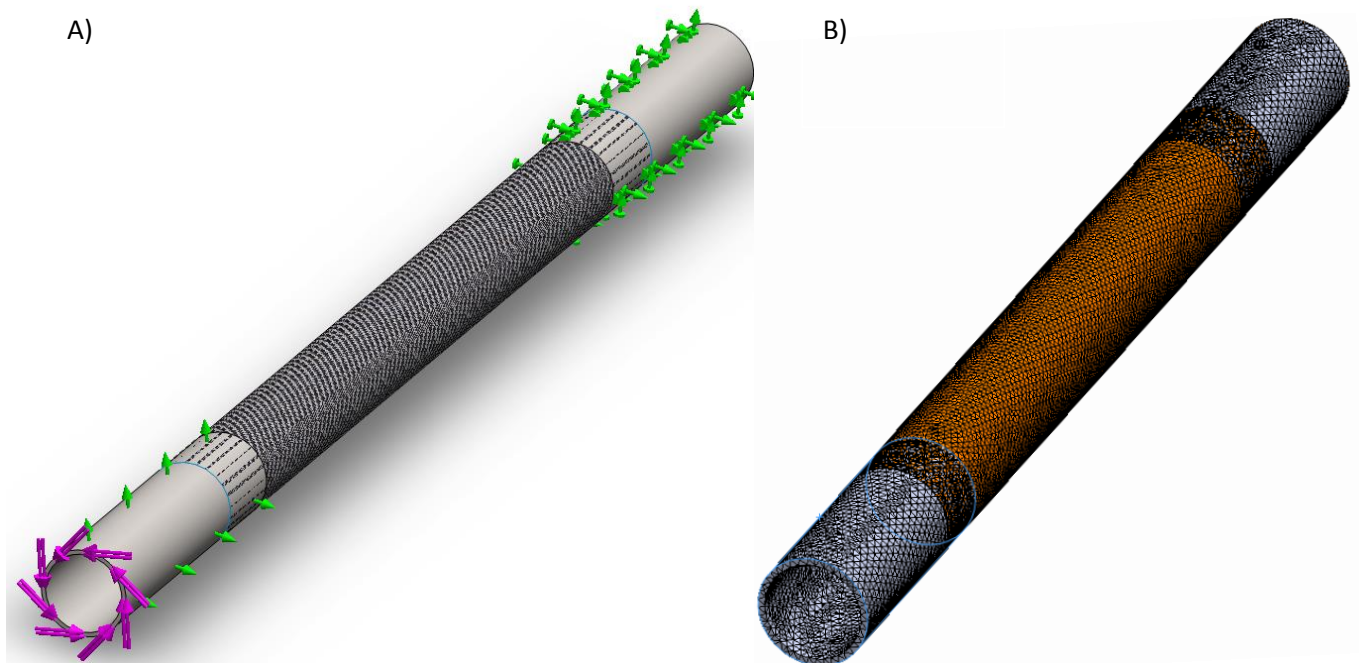


Figur 6-20: Spenningsbildet av de interlaminære skjærspenningene i xz planet (se Figur 4-7 s.33 for spenningsretninger). Det forstørrede området viser maksspenning på 20 MPa i et lite område

De interlaminære skjærspenningene ble analysert, og det er dermed noe bevegelse mellom lagene i forhold til hverandre rundt hullene slik som beskrevet i punkt 2 på s.33. Spenningene er relativt lave, med noen spenningskonsentrasjoner på opp mot 20 MPa helt i kanten. Dette er under den maksimale på 110 MPa (fra datablad vedlagt), og utgjør dermed ingen fare.

6.6 Analyse av torsjonstest

De to akslingene i testen ble tegnet inn i SolidWorks og fiberkonfigurasjonen lagt til. Akslingen ble låst fast i den ene enden og moment påført i den andre hylsa slik som vist på Figur 6-21. I tillegg ble enden hvor momentet er påført låst fast mot bevegelse i x,y,z retning slik som innspenningen i dreiebenken. Deretter ble en FEM - analyse utført og resultatet sammenlignet med håndberegningene (limfugene er ikke med i analysen).



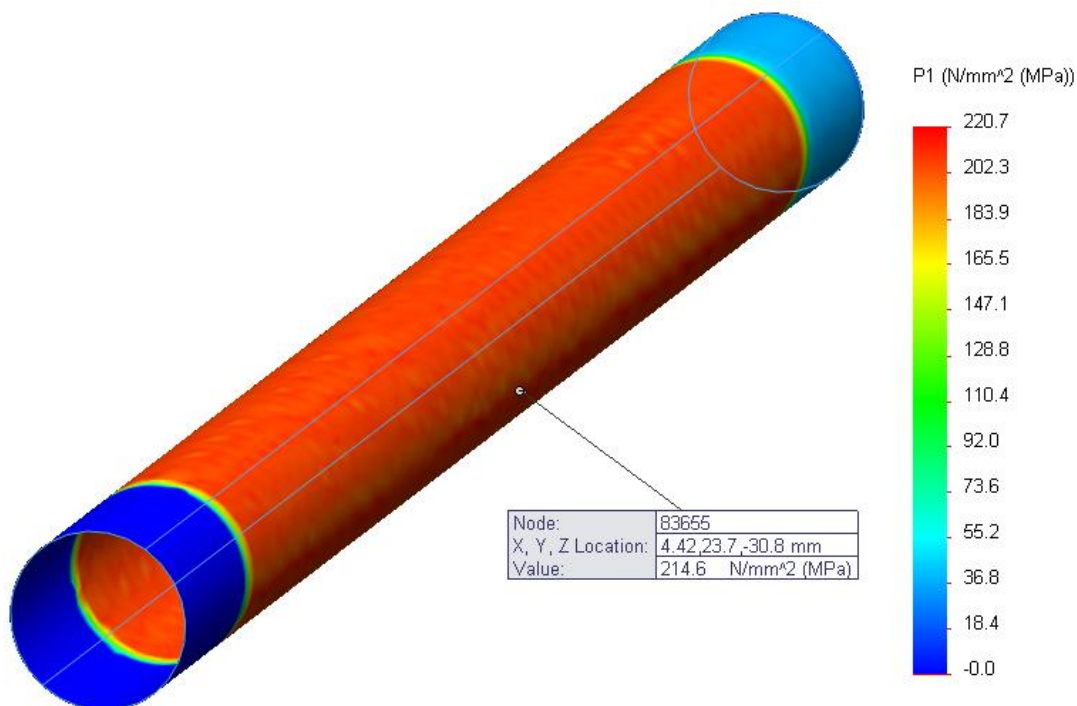
Figur 6-21: A) Aksling med last og innspenninger lik den for testingen (se Figur 5-21 s.76). I B) vises et forfinet mesh av aksling

Slik som forklart i avsnitt om spenninger på s.78 fra testen må skjærspenningen transformeres til hovedspenninger. Ifølge teorien skal hovedspenningen σ_2 være tilnærmet lik null grunnet materialets ortotrope egenskaper (jmf. spenninger s.78). Dette har blitt bekreftet gjennom analyse. Det er derfor, slik som beskrevet på s.78, kun vist plot av hovedspenningen σ_1 ³⁶. Plotene er vist for det ytterste laget, da det er dette som vil ha høyest spenning.

³⁶ Forøvrig er det heller ikke plot av skjærspenning og spenning i x,y og z retning, da det som kjent er hovedspenningen som fører til brudd ved torsjonsbelastning.

Test 1

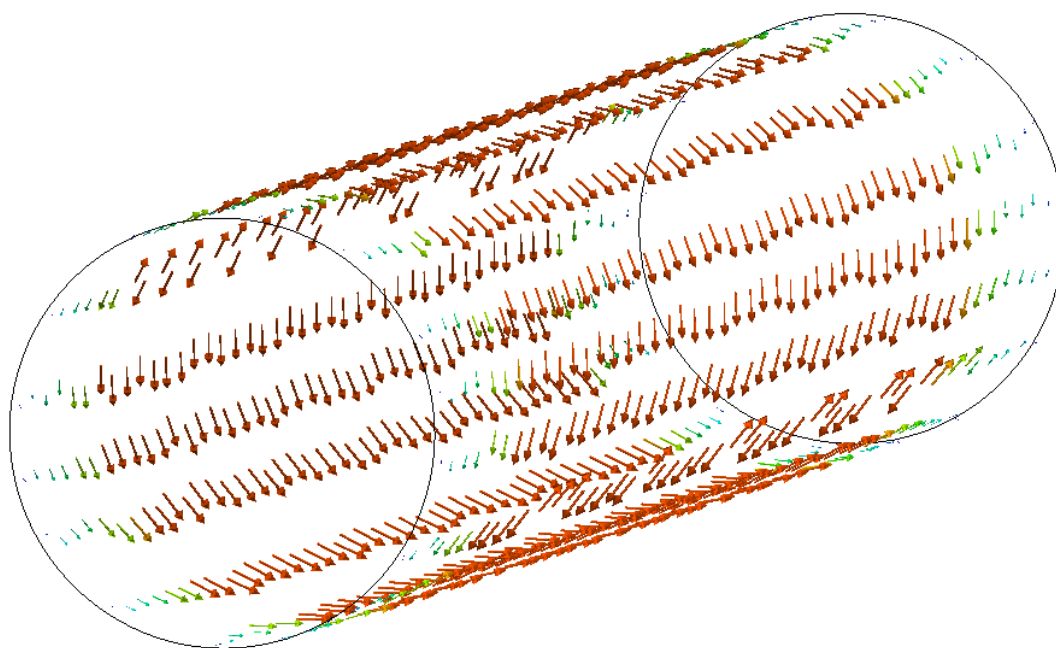
Bruddmomentet på 164 Nm ble påført og spenningsplotet ble som vist på Figur 6-22.



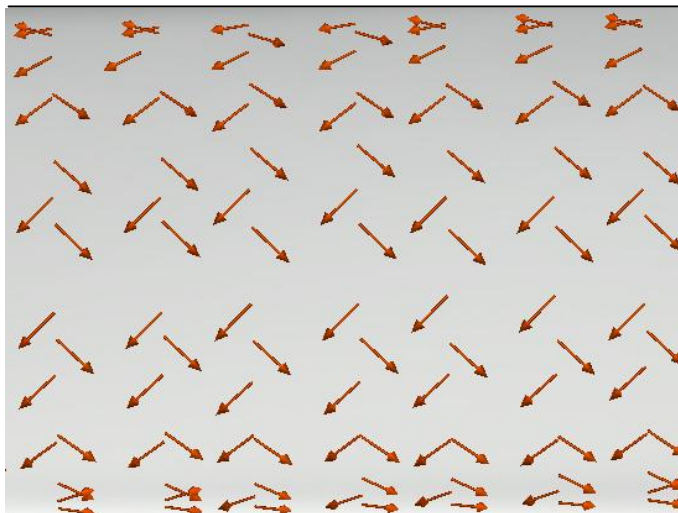
Figur 6-22: Hovedspenning σ_1 av lag 1 i aksling med 25 mm diameter (test 1). Hylsene er skjult, og det blå området viser limfugene

Den maksimale spenningen ble på 221 MPa, mens spenningen langs akslingen ligger på rundt 215 MPa. Dette stemmer bra med den beregnede verdien på 206 MPa. Dette plotet viser ikke retningen på hovedspenningen, og det ble derfor også tatt et vektorplot av spenningen i Figur 6-23.

A)



B)

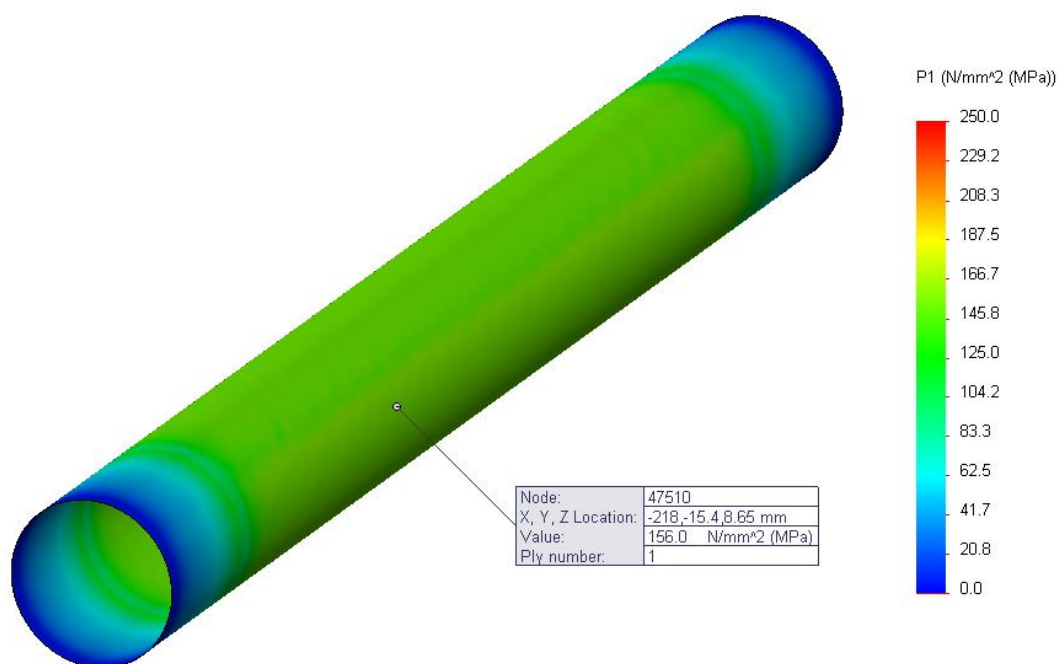


Figur 6-23: A) Vektorplot av hovedspenningen σ_1 i akslingen. B) Forstørret utsnitt av akslingen hvor det tydelig fremgår at hovedspenningen har en retning på 45° i forhold til akslingens lengderetning. De to forskjellige pilretningene skyldes rørets rørets fram- og bakside

Utfra figuren går det frem at hovedspenningsretningen stemmer med teorien om torsjonsspenning omtalt på s. 37. Analysen stemmer derfor med teorien og testresultatet.

Test 2

Lasten på 377 Nm vises på Figur 6-24.



Figur 6-24: Hovedspenning σ_1 av lag 1 i aksling med 32 mm diameter (test 2).

Spenningen σ_1 blir her 156 MPa, hvilket er noe høyere enn det utregnede resultatet i Tabell 5-14 s.79 på 140 MPa.



Det ble også tatt et plot av de interlaminære spenningene som forventet viste tilnærmet 0 MPa, og det er derfor lav eller ingen fare for delaminering.

Analysene for begge testene stemmer bra med testresultatet både mtp. plot av hovedspenningen σ_1 og dens retning på 45° på lastretningen. Sammenlignet med de utregnede spenningene var det dog et lite avvik.

6.7 Oppsummering

Analysene av strekkprøvene stemmer bra med testresultatene med kun mindre avvik. Videre viste bruken av materialmodellen fra FFI som forventet en noe mer konservativ verdi. Datamodellene ble verifisert, og kan brukes til dimensjonering.

For bolttesten stemte ikke analysen med testresultatet da det var liten forskjell mellom de to ulike Divinycelltypene, samt en sikkerhetsfaktor som tilsa at det var ingen fare for brudd. Det bør derfor ikke dimensjoneres etter analyse ved bolthull på Roskva, men benytte den dimensjonerende spenningen fra testingen.

Resultatet fra analysen av drivvakslingen bekreftet teorien om torsjonsbrudd mtp. hovedspenning og bruddtype.

Det kan dermed bekreftes at dimensjonering av konstruksjoner bestående av komposittmaterialer ikke bør baseres på FEM - analyse alene grunnet usikkerheten til resultatet. Dette kan medføre fare, og grundig testing bør derfor gjennomføres. Det er også mulig at andre FEM - programmer med tilleggsprogrampakke tilrettelagt for komposittmaterialer hadde gitt et mer nøyaktig resultat, men disse programpakkene er kostbare og har derfor ikke blitt testet i oppgaven.



7 ØKONOMI

Nedenfor vises et regnskap for arbeidet med masteroppgaven. Timene til eget arbeid er beregnet utifra antall dager hvor 5 timers effektivt arbeid per dag er satt i snitt (helgedager inkludert). Videre er rapportarbeidet lagt inn i postene, da dette ble gjort jevnt i hele perioden.

I regnskapet for egeninnsatsen er det praktiske arbeidet skilt ut for å få oversikt over hvor mye praktisk arbeid som har vært utført.

Tabell 7-1, Egeninnsats masteroppgave m/praktisk arbeid

Egeninnsats masteroppgave	Timer	Timesats	
Forberedelser			
Tilegne kunnskap om komposittermaterialer og dets egenskaper	350	600	220000
Komponentinnkjøp	20	600	11000
Andre forberedelser	35	600	16500
Fiberkonfigurasjon			
Velge fiberkonfigurasjon basert på ulike belastningssituasjoner	170	600	82500
Testing			
Tilegne kunnskap om testmetoder	10	600	2750
Tolkning av testresultater	180	600	82500
Analyse			
Bygge opp en materialmodell	25	600	13750
Finne egnet FEM - program til komposittbruk	4	600	2200
Sammenligne analyse med testresultat og håndberegninger	60	600	27500
Økonomi			
Lage regnskap	4	600	2750
Sum egeninnsats master	853		511800
Egeninnsats praktisk arbeid			
Dreining av karbonfiberaksling	4	600	2200
Bearbeiding av strekk/bolt prøvebiter	4	600	2750
Innfestninger	4	600	1650
Støping av prøvestykker	35	600	22000
Sum	47		28200
Totalsum egeninnsats	900		540000



Utgiftene u/egeninnsatsen knyttet til forsøkene er vist i Tabell 7-2. Dette innebærer hovedsakelig material-, støpe- og verkstedskostnader.

Tabell 7-2, Forsøksutgifter i masteroppgave u/egeninnsats

Innkjøp av komponenter	Antall/mengde	Veil. pris	Vår pris
Karbonfiber	5 m ²	2000	500
Vakuumpumpe		8500	2647
Slanger og koblinger		600	400
HMS utstyr		300	0
Resinfelle		170	170
Div. støpeutstyr (filt, plast m.m.)		600	200
Lim	1/2 patron à 380 mg	250	150
Epoxy m/herder	0,5 kg	75	50
Aluminium (støpeform og hylser)	5 kg*	560	250
Stål (støpeform og hylser)	2 kg	90	0
Divinycell (H80 og HCP50)	0,01 m ²	200	0
Sum		13345	4367
Arbeidstimer verksted/testlab	Timer	Timesats	
Dreining av hylser til utrivningstest	2	650	1300
Strekmaskin m/universitetsansatt	2	650	1300
Sum			2600
Total sum forsøksutgifter			6967
Total sum forsøksutgifter m/veil. priser			15945

*Et 6 m langt rør måtte kjøpes inn til støpeform

De største utgiftene i forbindelse med forsøkene er er innkjøpet av vakuumpumpa med en sum på kr 2647,- . Utgiftene med forsøkene er relativt lave, grunnet kr 10 000,- i sponing og det faktum at forfatteren har utført bearbeidingen av prøvene og laget mye av det nødvendige utstyret til testingen selv.

Den totale summen for denne oppgaven kommer på kr. 546 967,-, hvilket er noe høyere enn først antatt.



8 PROSESSDISKUSJON

Arbeidet med denne masteroppgaven har innebært mye praktisk arbeid i form av støping og bearbeiding av prøvebiter samt tilpasninger for å kunne kjøre testene i tilgjengelig utstyr. Det er derfor en rekke faktorer som påvirker måleresultatet, og ting som burde vært gjort annerledes. Det er også en del av arbeidet med denne oppgaven som jeg er fornøyd med, og gir et godt grunnlag for dimensjoneringen av chassiset. I de neste avsettene følger usikkerheter, sterke og svake sider ved arbeidet med oppgaven.

A. Usikkerheter ved testing og analyse

Det er en del usikkerhetsfaktorer relatert til de utførte testene. De viktigste er listet opp under:

- Under støping vil det oppstå svakheter i støpen som følge av kjerver, opphopning av duk pga. vakuemet m.m. For å unngå dette måtte det ha vært brukt former og/eller andre støpemetoder. Enkelte kompromisser har derfor blitt gjort grunnet begrensede ressurser (f.eks ved støping av drivakslingen burde aluminiumsformen blitt spent i dreiebenken mens fibertråd sattes spinnes på, og ikke ved bruken av duk benyttet i oppgaven).
- Grunnet kostnadsbesparelse er duken benyttet til testene B - vare hvilket medførte at den hadde flere feil som brudd og mangel på fibertråd enkelte steder. Under støping ble de beste delene av duken valgt, men mest sannsynlig var det også slike feil på en eller flere av prøvene.
- Antall prøvebiter kunne vært høyere (med unntak av strekkprøvene). I ettertid ser jeg at det burde vært utført flere utrivningstester, da det viste seg at det var tilstrekkelig materiale til å gjøre dette.

I håndberegningene utført i testene er det også knyttet noen usikkerhetsfaktor, hvilket er hovedsakelig måleunøyaktigheter ved måling av diametere, fibertykkelse og lengder.

Analysene er basert på en utregnet materialmodell (i tillegg til modellen fra FFI) som igjen er basert på data hentet fra ulike kilder. Det finnes ulike data på epoxy og fibermateriale benyttet i oppgaven, som følge av forskjellige produsenter. I testen ble en fiber- og epoxytype benyttet som ikke nødvendigvis samsvarte med de typene som ble benyttet som grunnlag i utregningene av materialmodellen.

Til tross for usikkerhetene involvert mener jeg likevel at jeg har brukt tiden og ressursene fornuftig og dermed fått troverdige resultater som kan brukes til videre dimensjonering av karbonfiberarmert plast.

B. Sterke sider

Teoretisk arbeid

Utfordringen med den første delen av oppgaven, laminat- og materialteorien, er deres omfattende og komplekse teori, med matriseregning og alle de ulike spenningene som virker i et laminat. Under arbeidet med dette har jeg først fått et overblikk over emnet og deretter valgt ut de punktene som er aktuelle for oppgaven. Kildene benyttet har for det meste vært vitenskapelige bøker og artikler med unntak av noen få nettkilder. De aktuelle temaene som bla. utmatting har blitt viet ekstra oppmerksomhet da dette er svært viktig ved konstrueringen av et motorsykelchassis.

En annen sterk side ved oppgaven er under arbeidet med testene. Før arbeidet med selve testing gikk igang ble litteratur hvor ulike testmetoder sto beskrevet anskaffet. For å holde testingen vitenskapelig har jeg valgt å benytte standarder der hvor det lar seg gjøre. Videre har jeg sett på ulike belastningstilfeller i et motorsykelchassis og valgt ut tester som kan være aktuelle for dette, hvilket var grunnen til at bla. utrivning i hull i et sandwichlaminat ble valgt.



I siste del av rapporten hvor analyser av testresultatene ble utført har teorien om meshing og dets fallgruver blitt beskrevet for å sørge for at analyseresultatet er troverdig. I tillegg har jeg fått hjelp fra Forsvarets forskningsinstitutt til dimensjonering av karbonfiber ved at jeg har fått en konservativ materialmodell (som benyttes av de andre gruppemedlemmene). Den utregnede materialmodellen ble kontrollert opp mot denne og to feil ble oppdaget. Videre har analysene blitt utført rundt 4 - 5 ganger med ulike forandringer i materialmodell, mesh og utforming for å se variasjonen i resultatet og forhindre feil i analysen.

Praktisk arbeid

For å sikre et mest mulig optimalt resultat ble støpingen først utført tørt for å se at alt var i henhold til standarder og/eller mine kriterier. Under selve støpingen har jeg flere ganger vært innom støperommet under herdingen for å se at vakuemet er tilstrekkelig og temperaturen er optimal. Videre har erfaringer ved sommerjobb på Forsvaret forskningsinstitutt blitt benyttet til støpingen, i tillegg til tips og råd fra firmaer som forhandler og/eller driver med støping. Ved arbeidet med komposittmaterialer er det viktig å sikre at alle forhåndsregler tas slik at kvaliteten på støpen blir best mulig med utstyret og fasilitetene tilgjengelig.

Under bearbeidingen av prøvebitene ble bla. Martin Schanche kontaktet for råd om hvordan drivakslinger bør støpes og bearbeides. Under bearbeidingen av de ulike prøvene ble det sørget for at prøvene ble gjort identiske ved å bruke utstyret på IMTs verksted med korrekte innstillinger.

C. Svake sider

Teoretisk arbeid

Under arbeidet med det teoretiske arbeid kunne noen punkter vært utført på en annen måte. Dette gjelder spesielt matriseregning som har blitt utelatt fra denne rapporten. Matrisene benyttes til å beskrive et laminats fysiske egenskaper og ikke bare et enkelt lag slik som i denne rapporten. Jeg burde derfor ha satt meg inn i denne teorien tidlig, da dette ville styrket min kunnskap på området og blitt tatt med i håndberegningene.

Praktisk arbeid

Når det gjelder støpeprosessen er det lite som kunne vært bedre, men under bearbeidingen har jeg innsett at en del ting burde vært annerledes. Dette gjelder spesielt limingen av aluminiumsbitene på strekkprøvene hvor et for dårlig lim ble benyttet hvilket førte til at en rekke prøver løsnet i innfestningene. Et bedre lim kunne enkelt eliminert dette, slik som limet benyttet til limingen av hylsene i drivakslingen. Videre var det ved sagingen av strekk- og boltprøvene mye løse fibere og kjerver som oppsto. Det burde vært benyttet mer tid på dette og gjort med større forsiktighet.

Ved bearbeidingen av drivakslingen oppsto det ved flere anledninger svikt i limfugene, noe som skyldtes at hylsene ikke ble dreiet ned til et fastsatt mål. Slike mål bør derfor fastsettes til seinere slik at dette unngås. For at limet skal fungere er det avhengig av et par tidels mm klaring mellom drivaksling og hylse. En limepistol burde også vært anskaffet da tokomponent limet ble blandet på øyemål hvilket resulterte i at limet ved en anledning ikke herdet. Sistnevnte påvirket ikke måleresultatet da det ble limt på nytt.

De tre testene som har blitt utført i denne oppgaven er tre viktige tester, hvilket er langt ifra nok, da belastningstilfellene i et motorsykelchassis er mange. I ettertid ser jeg at det kunne ha vært utført en test til, f.eks. en bøye- eller kompresjonstest som er viktige for dimensjoneringen av et chassis.

9 KONKLUSJON

Arbeidet med denne oppgaven og dets resultater har vært en viktig del av Prosjekt Roskva, da byggingen av en motorsykkel i komposittmaterialer uten tilstrekkelig kunnskap om komposittmaterialenes egenskaper kan medføre fare. Jeg kan konkludere med at hovedmålsettingen for oppgaven har blitt besvart, og at innholdet i denne oppgaven vil gi gruppemedlemmene tilstrekkelig kunnskap til å dimensjonere Roskvas chassis med lav vekt og høy styrke uten at det går på bekostning av sikkerheten.

Gjennom arbeidet med komposittmaterialer ser en viktigheten av materialtesting, da dimensjonering kun vha. FEM - analyse og håndberegninger kan medføre fare. I motsetning til metaller krever derfor arbeid med komposittmaterialer praktisk arbeid, i form av testing og arbeid med å løse testingen på en best mulig måte uten at dette går utover resultatet.

9.1 Resultater og anbefalinger

Komposittmaterialenes material- og styrkeegenskaper har blitt analysert og verifisert gjennom valg av fiberkonfigurasjon og materialer, testing og FEM - analyse.

A. Fiberkonfigurasjon

I Tabell 9-1 vises en oversikt over fiberkonfigurasjonene til bruk i Roskva.

Tabell 9-1, Valg av fiberkonfigurasjon

Bruksområde	Fiberkonfigurasjon	Kommentar
Chassis	$[0^\circ, 90^\circ, +/- 45^\circ]_s$	- Kvasi - isotropt
Bolthull	$[90^\circ, 0^\circ, +/- 45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, +/- 45^\circ]$	- På hver side av Divinycell
Drivaksling	$[+/- 45^\circ]_{4s}$	- Ren torsjonsbelastning

B. Materialvalg

Oversikt over materialene vurdert til bruk i chassiset vises i Tabell 9-2.

Tabell 9-2, Oversikt over ulike komposittmaterialer som har blitt vurdert og kan benyttes i Roskva

Materialer	Bruksområder	Kommentar
Karbonfiber	I hele chassiset	- Høy styrke og lav vekt
Kevlar/aramid	I områder med fare for slagartet påkjenning (steinsprut o.l.)	- Et eller to lag ytterst - Hybridduk bør benyttes - Sikkerhet mot brudd grunnet lavere stivhet enn karbonfiber
Flax	I områder utsatt for vibrasjoner	- Miljøvennlig alternativ til karbonfiber - Benyttes i midten av laminatet
Divinycell	Kjernemateriale til bruk i sandwichlaminat	- Benyttes ved bla. innfestninger
Epoxy	Matrisematerialet for alle fibertyper	- God styrke og fleksibilitet



C. Testing og analyse

Resultater fra testing og analyse er listet opp nedenfor. Dimensjonerende spenninger vises i Tabell 9-3.

Strekprøving

- Resultatet viste at det er lagene med fibere i 90° på lastretningen som er svakheten.
- Datamodellene stemmer med testresultat. FFI modellen ga et noe mer konservativt resultat.
- Lag med +/- 45° hindrer fullstendig brudd.

Utrivning/bolttest

- Bruken av Divinycell HCP50/H250 tålte mer enn H80 og skal derfor benyttes rundt innfestninger.
- Kantavstanden settes til lik 2*hulldiameter.
- Analysenes resultat var en sikkerhetsfaktor på ca. 2 - 3 mot brudd. Dimensjonering etter denne skal ikke utføres, men isteden baseres på tillatt hullkantrykk.

Torsjonstest

- Karbonfiberduk til drivaksling kan benyttes. Svikt i limfuge oppsto ved 4,5 ganger det maksimale lastmomentet i Roskva, ingen tegn til svikt på akslingen.
- Klaringen mellom hylse og lim bør være på ca. 0,2 mm.

Dimensjonerende spenninger

Statistiske spenninger er fra testing utført av forfatter, utmattende spenninger er hentet fra kilder.

Tabell 9-3, Dimensjonerende spenninger fra kilder (utmattning) og egen testing (statisk)

	Belastningssituasjon	Spenning (MPa)	Kommentar
Statisk	Strekk	337	Ved dimensjonering til bøyning må fare for delaminering undersøkes
	Utrivning/bolttest (H80/HCP50)	196,6/270	Dimensjonerende hullkantrykk settes til 200 MPa
	Drivaksling	70,4	Skjærspenning
	Limfuge	2,5	Fra drivakslingstest. Kun utsatt for skjærspenning
Utmattning	Bøyning/strekk	300	Resultater fra bøyning benyttes også for ren strekk
	Boltlast	325	Uten kjernemateriale



9.2 Videre arbeid

Ved videre arbeid med material- og styrkeegenskapene til komposittmaterialer bør følgende punkter jobbes med:

- Kompositteori
 - Utlede teori for et laminat og gjøre håndberegninger med denne.
- Andre materialer:
 - Undersøke om eventuelle andre materialer enn de nevnt i rapporten, i kombinasjon med karbonfiber, kan benyttes i enkelte deler av chassiset mtp. kostnadsreduksjon og/eller forsterkning. Dette gjelder også for ulike typer epoxy.
- Støpeprosesser
 - Vurdering av ulike støpeprosesser (f.eks injeksjonsstøping m.fl.).
- Grundigere testing av testene utført i denne rapporten:
 - Mål for klaring på limfuger o.l. bør fastsettes og testes.
 - Fra bolttesten har vi at resultatene fra analysen ikke samsvarer med testresultatet. Dette bør undersøkes nærmere, og da med spesiell vekt på plastifisering av hullkanten [27]; hvordan dette oppstår sammenlignet med metaller.
 - Gjøre flere tester av bolt- og drivakseltest, for å kunne beregne et konfidensintervall slik som for strekktesten. Ulike fiberkonfigurasjoner bør også testes.
- Utmatting, analyse og testing:
 - Utmattingstester bør utføres i enkle prøvestaver og i kritiske deler av chassiset (f.eks innfestning til svingarm).
 - Utmatningsanalyser av chassiset bør utføres med utmatningsdata fra denne rapporten, men også fra utførte tester.
 - Grunnet det faktum at mange av påkjenningene på en motorsykkel er av dynamisk karakter bør også dynamiske tester og analyser utføres for å se hvorvidt dette skaper problemer.
 - Testing av bøyning og kompresjon bør utføres, da disse er viktige ved dimensjonering av en motorsykkel.
 - Utføre tester med laminater bestående av Kevlar og Flax og eventuelle andre fibertyper.
- Utarbeide prosedyrer for ikke-destruktiv testing (NDT):
 - I denne rapporten har kun destruktive testmetoder blitt utført. For å hindre at chassis (og andre deler av Roskva) er i henhold til kravene bør ikke - destruktiv testing utføres.
 - Ulike prosedyrer for NDT metoder, mtp. intervaller og metode bør utgreies (og som kan utføres i en eventuell serive hos forhandler eller av kjøper.
- Testing av komplett sykkel:
 - Før en kommersialiserbar modell må det bygges sykler som blir statisk og dynamisk belastet til brudd (i tillegg til utmattingstesting). Av økonomiske og tidsmessige årsaker lar dette seg ikke gjøre på prototypestadiet.

10 REFERANSER

1. Skriftlige kilder (vitenskapelige artikler og bøker)

1. Charlet, K. and et.al, *MORPHOLOGY AND MECHANICAL BEHAVIOR OF A NATURAL COMPOSITE: THE FLAX FIBER*, 2012, International Conference on Composite Materials: <http://www.iccm-central.org>. p. 8.
2. Gustin, J.e.a., *Low velocity impact of combination Kevlar/carbon fiber sandwich composites*, 2004, Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, North Dakota State University www.sciencedirect.com. p. 11.
3. Krog, H.O., *Dempersystemer*, in *TIP300 - Konsept og Produktrealisering* 2011, Institutt for matematiske realfag og teknologi: Universitetet for miljø- og biovitenskap. p. 59.
4. Krog, H.O., *Utreddning av motorsykelkonsept*, in *TIP200 - Produktutvikling og produktdesign* 2010, Institutt for matematiske realfag og teknologi: Universitetet for miljø- og biovitenskap. p. 28.
5. Leksikon, S.N. *Poissons tall – Store norske leksikon*. 2012 [cited 2012 14.01]; Available from: http://snl.no/Poissons_tall.
6. Løvas, G.G., *Statistikk; for universiteter og høyskoler*. 2004: Universitetsforlaget. 260.
7. Mallick, P.K., *Fiber reinforced composites*. 2008, Boca Raton: Taylor & Francis Group. 619.
8. Norberg, L., *Konseptutredning motor, energilagring og drivlinje*, in *TIP300 - Konsept og Produktrealisering* 2011, Institutt for matematiske realfag og teknologi: Universitetet for miljø- og biovitenskap. p. 97.
9. Norberg, L., *Utvikling og optimering av drivlinje for et elektrisk motorsykelkonsept*, in *Masteroppgave2012*, Institutt for matematiske realfag og teknologi: Universitetet for miljø- og biovitenskap. p. 167.
10. Paiva, J.M.e.a., *Comparison of tensile strength of different carbon fabric reinforced epoxy composites*, in *Materials Research2006*, Materials Research: <http://www.scielo.br/pdf/mr/v9n1/28576.pdf>. p. 7.
11. Skjong, O.A., *Ramme*, in *TIP300 - Konsept og produktrealisering2011*, Institutt for matematiske realfag og teknologi: Universitetet for miljø- og biovitenskap.
12. Skjong, O.A. and E. Kultorp, *Aerodynamical Analysis*, in *TMP261 - Varme- og strømningssimulering* 2011, Institutt for matematiske realfag og teknologi: Universitetet for miljø- og biovitenskap.
13. Skjong, O.A. and E. Kultorp, *Finally, It's Fun to be Green*, in *AOS120 - Markedsføring2011*, Institutt for matematiske realfag og teknologi: Universitetet for miljø- og biovitenskap. p. 15.
14. Skjong, O.A. and E. Kultorp, *Roskva - Et forprosjekt*, in *Frie emner2011*, Institutt for matematiske realfag og teknologi: Universitetet for miljø- og biovitenskap. p. 47.
15. W.A Counts, W.S.J., *Bolt bearing fatigue of polymer matrix composites at elevated temperature*, in *International Journal of Fatigue2002*, School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology: www.sciencedirect.com. p. 8.
16. William D. Callister, J., *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 2007, New York: John Wiley & Sons. 885.
17. Y. MATSUHISA, J.E.K. *Effects of temperature on monotonic and fatigue properties of carbon fibre epoxy cross ply laminates*. 1993 [cited 2012 12.01]; Available from: <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/25/18/98/PDF/ajp-jp4199303C7259.pdf>.
18. Yoshiyuki Tomita, K.M., Masayuki Iwasa, *Bending fatigue of long carbon fiber-reinforced epoxy composites*, in *Bending fatigue of long carbon fiber-reinforced epoxy composites2001*, Department of Metallurgy and Materials Science, Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University: www.sciencedirect.com. p. 4.
19. Zitoune, R.e.a., *Behaviour of composite plates with drilled and moulded hole under tensile load*, 2011, Universitetet i Toulouse: www.sciencedirect.com. p. 8.



2. Personlige meddelser

20. Arnesen, J.F., *Epoxy*, 2012, Lindberg & Lund: Ski.
21. Berglund, O., *Karbonfiber, sandwich materiale, epoxy*, 2012: Asker.
22. Høibø, P.O., *Strekprøving*, 2012: Ås.
23. Skjong, O.A., *Fotograf*, 2012.
24. Bøe, J.K., *Karbonfiber*, 2012: Ås.
25. Flø, S.A., *Kalibrering av strekkmaskin*, 2012, Universitetet for miljø og biovitenskap: Institutt for matematiske realfag og teknologi.
26. Sagsveen, B., *Materialmodell til analyse*, 2012, Forsvarets forskningsinstitutt: Kjeller.
27. Terjesen, G., *Spørsmål vedr. spenning*, 2011: Ås.

3. Nettkilder

28. *eFunda: Fracture Modes*. 2012 [cited 2012 26.01]; Available from: <http://www.efunda.com/formulae/>.
29. *Epoxy resin*. 2012 [cited 2012 16.01]; Available from: http://www.vircon-composites.com/3_2_3.asp.
30. *Finte Element Analysis (application/pdf-objekt)*. 2012; Available from: http://homepages.cae.wisc.edu/~me232/lecture_notes/fea.pdf.
31. *Mechanical Properties of Carbon Fibre Composite Materials*. 2009 [cited 2012 20.03]; Available from: http://www.performance-composites.com/carbonfibre/mechanicalproperties_2.asp.
32. *Multi directional and quasi isotropic laminates*. 2012 [cited 2012 16]; Available from: http://www.vircon-composites.com/3_1_5_2.asp.
33. *What can go wrong with FEA?* 2012 [cited 2012 04.01]; Available from: <http://www.memagazine.org/backissues/>.
34. Acharya, S.N.S. *A general survey of hexahedral mesh generation*. 2012 [cited 2012 05.01]; Available from: http://www10.informatik.uni-erlangen.de/~pflaum/pflaum/SeminarGrid_04/Refs/seminar.pdf.
35. Adams, D.D. *Unidirectional composite axial tensile specimens*. 2006 [cited 2012 08.02]; Available from: <http://www.compositesworld.com/articles/>.
36. *Biomech. FEA Basics | Biomech*. 2012 [cited 2012 05.01]; Available from: <http://www.biomech.org/fea-basics>.
37. Coffin, J. *frames - Why is carbon fiber inherently weak? Or is it? - Bicycles - Stack Exchange*. 2012 [cited 2012 13.01]; Available from: <http://bicycles.stackexchange.com/questions/2076/>.
38. Goodfellow. *Polypropylene*. 2012; Available from: <http://www.goodfellow.com/E/Polypropylene.html>.
39. Group, D. *Divinycell*. 2012 [cited 2012 19.04]; Available from: http://www.diabgroup.com/europe/products/e_prods_2.html.
40. Gurit, *Spabond 345*. 2011.
41. Kopeliovich, D.D. *Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites*. 2012 [cited 2012 25.04]; Available from: <http://www.substech.com/dokuwiki/>.
42. Kopeliovich, D.D. *Kevlar (aramid) fiber reinforced polymers*. 2012 [cited 2012 06.02]; Available from: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=kevlar_aramid_fiber_reinforced_polymers.
43. Lineo, *Powerful by Nature - FLAX*, 2012: Meulebeke, Belgium.
44. Lingane, P.J. *Small Projects*. 2012 [cited 2012 06.01]; Available from: <http://www.lingane.com/family/patrick/smallprojects.htm>.
45. Pandy, P.C. *Learning material - composite material.pdf (application/pdf-objekt)*. 2004 [cited 2012 19.01]; Available from: <http://ecourses.vtu.ac.in/nptel/courses/Webcourse-contents/>.
46. SolidWorks, *Tsai Wu criteria, Failure Analysis*. 2011.
47. Staten, M. *Why Is Hex Meshing So Hard?* 2007; Available from: http://www.scribd.com/allen_fsae/d/52824132-Why-Is-Hex-Meshing-So-Hard.



48. Torayca. *T700S DataSheet*. 2012 [cited 2012 12.01]; Available from: <http://www.toraycfa.com/pdfs/T700SDataSheet.pdf>.
49. University, G.W. *Finite Element Modeling and Mesh Quality Checks Lecture* -. 2012 [cited 2012 05.01]; Available from: http://crash.ncac.gwu.edu/pradeep/CE264/lecture_2/lecture_2.pdf.
50. Warren, R. *Divergence and Convergence for Simulation Results*. 2011 [cited 2012 26.04]; Available from: <http://www.3dvision.com/wordpress/index.php/2011/04/22/>.
51. Wisconsin, U.o. *Buckyballs, Diamond, and Graphite*. 2012 [cited 2012 10.01]; Available from: <http://www.chem.wisc.edu/~newtrad/CurrRef/BDGTopic/>.
52. *Carbon Fiber M3 GTR Hood for BMW E46*. 2012 [cited 2012 12.01]; Available from: <http://www.modbargains.com/Carbon-Fiber-M3-GTR-Style-Hood-BMW-E46.htm>.
53. *Cube - Wikipedia, the free encyclopedia*. 2012 [cited 2012 05.01]; Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Cube>.
54. *Meshing Strategies*. 2012 [cited 2012 05.01]; Available from: <http://www.centaursoft.com/meshing-strategies>.
55. *Mini Fibreglass and Carbon Fibre parts specialists in the UK*. 2012 [cited 2012 06.02]; Available from: <http://www.the-arc-angels.co.uk/viewpic.asp?ImageID=183>.
56. *New deck, DH, foam composite, cheap stuff. - Page 2*. 2012 [cited 2012 26.01]; Available from: <http://www.silverfishlongboarding.com/forum/longboard-board-building/>.
57. *Sandwich Concept - Overview*. 2012 [cited 2012 12.02]; Available from: http://www.diabgroup.com/europe/concept/e_concept_1.html.
58. *Strain*. 2006 [cited 2012 19.01]; Available from: <http://w3.gre.ac.uk/~physica/phy3.00/theory/node120.htm>.
59. *Tetrahedron - Wikipedia, the free encyclopedia*. 2012 [cited 2012 05.01]; Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Tetrahedron>.
60. Hurst, D. *Electric Motorcycles Supply Growing, Outpacing Demand?* 2010 [cited 2012 11.01]; Available from: <http://www.pikeresearch.com/blog/articles/>.
61. Johansen, H. *Nagleforbindelser Al*. 2007 [cited 2012 09.03]; Available from: <http://materialteknologi.hig.no/joining-al-andre.htm>.
62. Wikiversity. *Strength of materials/Lesson 1 - Wikiversity* 2012 [cited 2012 10.02]; Available from: http://en.wikiversity.org/wiki/Strength_of_materials/Lesson_1.
63. Drang, D. *Cracked*. 2011 [cited 2012 24.03]; Available from: <http://www.leancrew.com/all-this/2011/04/cracked/>.



VEDLEGG

Vedlagt er følgende:

Tegningsliste

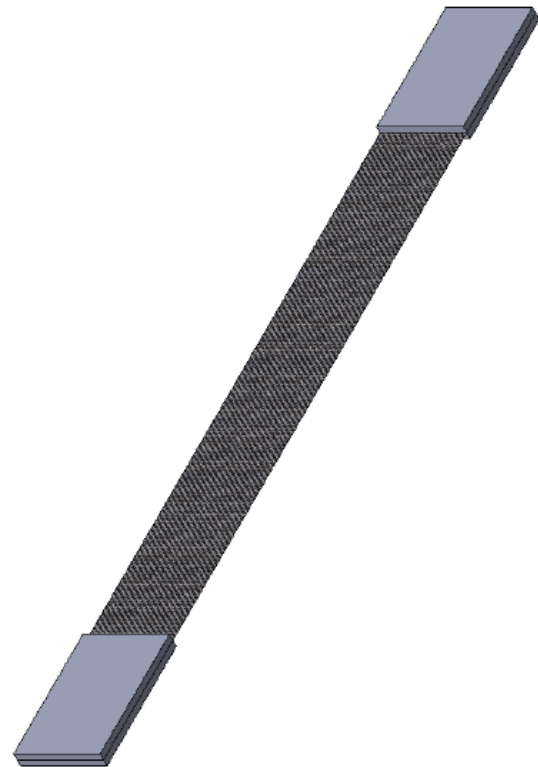
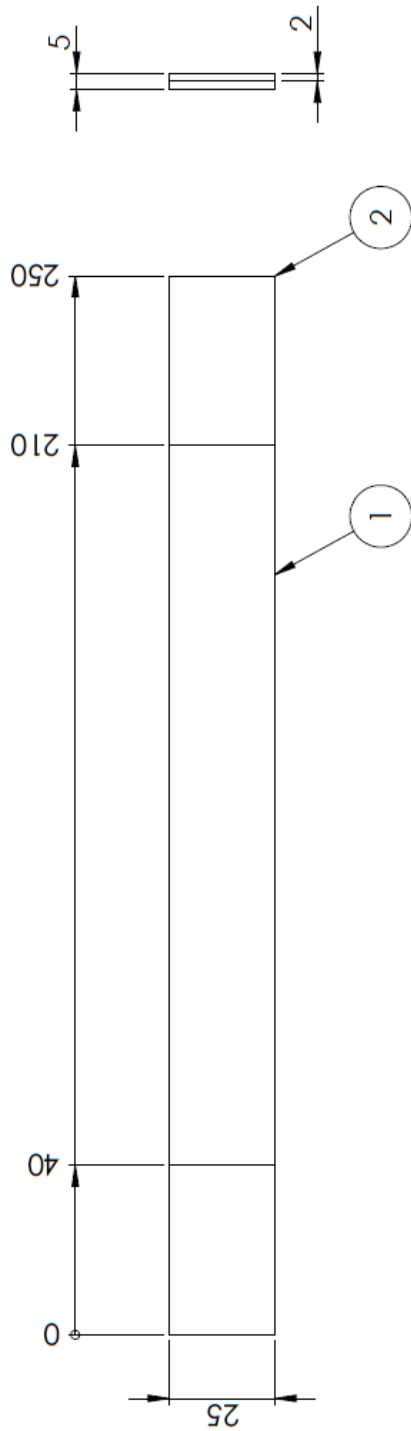
Vedlegg 1	Strekprøve
Vedlegg 2	Bolttest
Vedlegg 3	Aksling i test 2

Datablader og annet

Vedlegg 4	T700S datablad
Vedlegg 5	Styrkeegenskaper hos ulike kompositter m/epoxy
Vedlegg 6	Divinycell H80/H250 datablad
Vedlegg 7	Divinycell HCP50 datablad



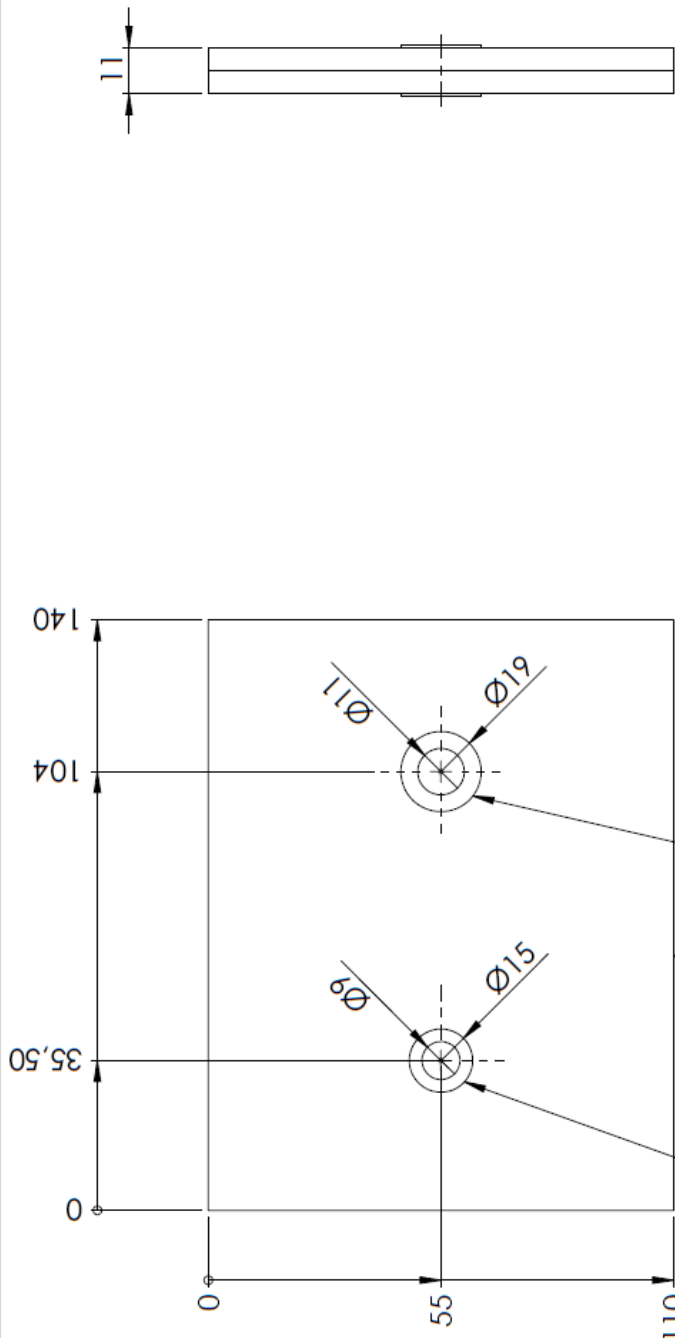
Vedlegg 1, strekkprøve



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Prøvebit	Karbonfiber	1
2	Aluminiumsbit	Aluminium 6082 - T6	4

FINISH: DEBUR AND BREAK SHARP EDGES			
NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE
			Espen Kultorp
MATERIAL:		DWG NO.	A4
WEIGHT:		SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1

Vedlegg 2, bolt/utrivningstest

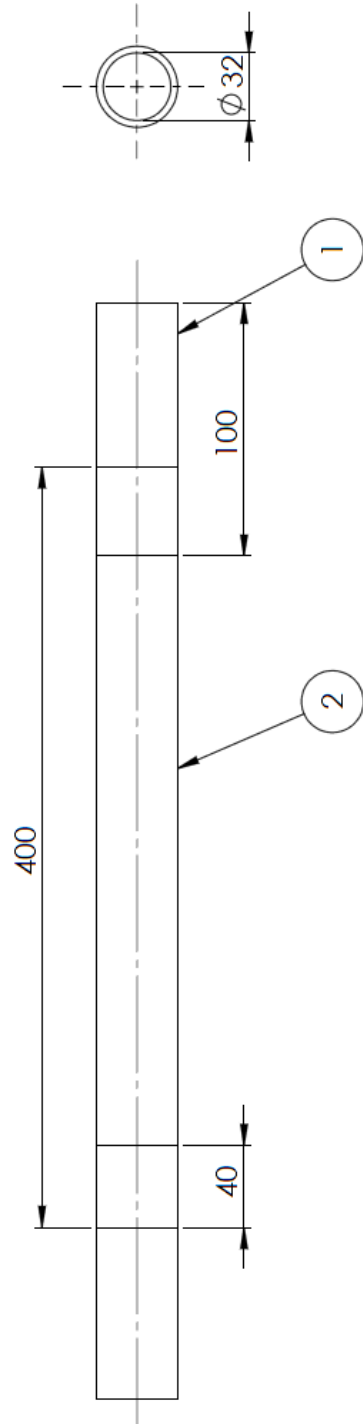


ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Plate	Divinycell og karbonfiber	1
2	Stor hylse	Aluminium 6082 - T6	1
3	Liten hylse	Aluminium 6082 - T6	1

 ROSKVA Electric Motorcycle			
NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE
			Espen Kultorp
MATERIAL:		DWG NO.	A4
		Bolttest	
WEIGHT:	SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1	



Vedlegg 3, aksling test 2



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Hylse	Stål S355	2
2	Aksling	Karbonfiber	1

		ROSKVA Electric Motorcycle	
FINISH: DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		TITLE: Espen Kultorp	
NAME	SIGNATURE	DATE	DWG. NO. Aksling Ø32
MATERIAL:		WEIGHT:	A4
SCALE: 1:1		SHEET 1 OF 1	



Vedlegg 4, T700S datablad

Hentet fra: [48]

**TECHNICAL
DATA SHEET**
No. CFA-005

TORAYCA® T700S DATA SHEET

Highest strength, standard modulus fiber available with excellent processing characteristics for filament winding and prepreg. This never twisted fiber is used in high tensile applications like pressure vessels, recreational, and industrial.

FIBER PROPERTIES

		<i>English</i>	<i>Metric</i>	<i>Test Method</i>
Tensile Strength		711 ksi	4,900 MPa	TY-030B-01
Tensile Modulus		33.4 Msi	230 GPa	TY-030B-01
Strain		2.1 %	2.1 %	TY-030B-01
Density		0.065 lbs/in ³	1.80 g/cm ³	TY-030B-02
Filament Diameter		2.8E-04 in.	7 μm	
Yield	6K	3,724 ft/lbs	400 g/1000m	TY-030B-03
	12K	1,862 ft/lbs	800 g/1000m	TY-030B-03
	24K	903 ft/lbs	1,650 g/1000m	TY-030B-03
Sizing Type	50C		1.0 %	TY-030B-05
& Amount	60E		0.3 %	TY-030B-05
	FOE		0.7 %	TY-030B-05
	Twist	Never twisted		

FUNCTIONAL PROPERTIES

CTE	-0.38 α·10 ⁻⁶ /°C
Specific Heat	0.18 Cal/g·°C
Thermal Conductivity	0.0224 Cal/cm·s·°C
Electric Resistivity	1.6 x 10 ⁻³ Ω·cm
Chemical Composition: Carbon	93 %
Na + K	<50 ppm

COMPOSITE PROPERTIES *

Tensile Strength	370 ksi	2,550 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	20.0 Msi	135 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.7 %	1.7 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	215 ksi	1,470 MPa	ASTM D-695
Flexural Strength	245 ksi	1,670 MPa	ASTM D-790
Flexural Modulus	17.5 Msi	120 GPa	ASTM D-790
ILSS	13 ksi	9 kgf/mm ²	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	10.0 ksi	69 MPa	ASTM D-3039

* Toray 250°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.

TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.



T700S

COMPOSITE PROPERTIES**

Tensile Strength	355 ksi	2,450 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	18.0 Msi	125 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.7 %	1.7 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	230 ksi	1,570 MPa	ASTM D-695
Compressive Modulus	--- Msi	--- GPa	ASTM D-695
In-Plane Shear Strength	14 ksi	98 MPa	ASTM D-3518
ILSS	15.5 ksi	11 kgf/mm ²	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	10.0 ksi	70 MPa	ASTM D-3039

** Toray Semi-Toughened 350°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.

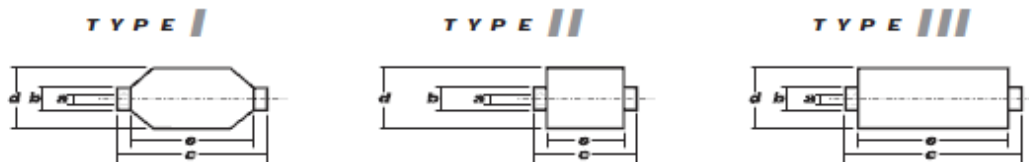
See Section 4 for Safety & Handling information. The above properties do not constitute any warranty or guarantee of values. These values are for material selection purposes only. For applications requiring guaranteed values, contact our sales and technical team to establish a material specification document.

PACKAGING

The table below summarizes the tow sizes, twists, sizing types, and packaging available for standard material. Other bobbin sizes may be available on a limited basis.

Tow Sizes	Twist ¹	Sizing	Bobbin Net Weight (kg)	Bobbin Type ²	Bobbin Size (mm)					Spools per Case	Case Net Weight (kg)
					a	b	c	d	e		
6K	C	50C	2.0	III	76.5	82.5	280	140	252	12	24
	C	50C	6.0	III	76.5	82.5	280	200	252	4	24
12K	C	60E	6.0	III	76.5	82.5	280	200	252	4	24
	C	FOE	6.0	III	76.5	82.5	280	200	252	4	24
24K	C	50C	6.0	III	76.5	82.5	280	200	252	4	24
	C	60E	6.0	III	76.5	82.5	280	200	252	4	24
	C	FOE	6.0	III	76.5	82.5	280	200	252	4	24

¹ Twist A: Twisted yarn B: Untwisted yarn made from a twisted yarn through an untwisting process C: Never twisted yarn
² Bobbin Type See Diagram below



TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.

6 Hutton Centre Drive, Suite #1270, Santa Ana, CA 92707 TEL: (714) 431-2320 FAX: (714) 424-0750
 Sales@Toraycfa.com Technical@Toraycfa.com www.torayusa.com



Vedlegg 5, Styrkeegenskaper hos ulike kompositter m/epoxy

Hentet fra: [31]



Mechanical Properties of Carbon Fibre Composite Materials, Fibre / Epoxy resin (120°C Cure)

Fibres @ 0° (UD), 0/90° (fabric) to loading axis, Dry, Room Temperature, Vf = 60% (UD), 50% (fabric)

	Symbol	Units	Std CF Fabric	HMCF Fabric	E glass Fabric	Kevlar Fabric	Std CF UD	HMCF UD	M55** UD	E glass UD	Kevlar UD	Boron UD	Steel S97	Al L65	Tit. dtd 5173
Young's Modulus 0°	E1	GPa	70	85	25	30	135	175	300	40	75	200	207	72	110
Young's Modulus 90°	E2	GPa	70	85	25	30	10	8	12	8	6	15	207	72	110
In-plane Shear Modulus	G12	GPa	5	5	4	5	5	5	5	4	2	5	80	25	
Major Poisson's Ratio	v12		0.10	0.10	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.25	0.34	0.23			
Ult. Tensile Strength 0°	Xt	MPa	600	350	440	480	1500	1000	1600	1000	1300	1400	990	460	
Ult. Comp. Strength 0°	Xc	MPa	570	150	425	190	1200	850	1300	600	280	2800			
Ult. Tensile Strength 90°	Yt	MPa	600	350	440	480	50	40	50	30	30	90			
Ult. Comp. Strength 90°	Yc	MPa	570	150	425	190	250	200	250	110	140	280			
Ult. In-plane Shear Stren.	S	MPa	90	35	40	50	70	60	75	40	60	140			
Ult. Tensile Strain 0°	ext	%	0.85	0.40	1.75	1.60	1.05	0.55		2.50	1.70	0.70			
Ult. Comp. Strain 0°	exc	%	0.80	0.15	1.70	0.60	0.85	0.45		1.50	0.35	1.40			
Ult. Tensile Strain 90°	eyt	%	0.85	0.40	1.75	1.60	0.50	0.50		0.35	0.50	0.60			
Ult. Comp. Strain 90°	eyc	%	0.80	0.15	1.70	0.60	2.50	2.50		1.35	2.30	1.85			
Ult. In-plane shear strain	es	%	1.80	0.70	1.00	1.00	1.40	1.20		1.00	3.00	2.80			
Thermal Exp. Co-ef. 0°	Alpha1	Strain/K	2.10	1.10	11.60	7.40	-0.30	-0.30	-0.30	6.00	4.00	18.00			
Thermal Exp. Co-ef. 90°	Alpha2	Strain/K	2.10	1.10	11.60	7.40	28.00	25.00	28.00	35.00	40.00	40.00			
Moisture Exp. Co-ef 0°	Beta1	Strain/K	0.03	0.03	0.07	0.07	0.01	0.01		0.01	0.04	0.01			
Moisture Exp. Co-ef 90°	Beta2	Strain/K	0.03	0.03	0.07	0.07	0.30	0.30		0.30	0.30	0.30			
Density		g/cc	1.60	1.60	1.90	1.40	1.60	1.60	1.65	1.90	1.40	2.00			

** Calculated figures

Fibres @ +/-45 Deg. to loading axis, Dry, Room Temperature, Vf = 60% (UD), 50% (fabric)

	Symbol	Units	Std. CF	HM CF	E Glass	Std. CF fabric	E Glass fabric	Steel	Al
Longitudinal Modulus	E1	GPa	17	17	12.3	19.1	12.2	207	72
Transverse Modulus	E2	GPa	17	17	12.3	19.1	12.2	207	72
In Plane Shear Modulus	G12	GPa	33	47	11	30	8	80	25
Poisson's Ratio	v12		.77	.83	.53	.74	.53		
Tensile Strength	Xt	MPa	110	110	90	120	120	990	460
Compressive Strength	Xc	MPa	110	110	90	120	120	990	460
In Plane Shear Strength	S	MPa	260	210	100	310	150		
Thermal Expansion Co-ef	Alpha1	Strain/K	2.15 E-6	0.9 E-6	12 E-6	4.9 E-6	10 E-6	11 E-6	23 E-6
Moisture Co-ef	Beta1	Strain/K	3.22 E-4	2.49 E-4	6.9 E-4				

** Calculated figures

Vedlegg 6, datablad Divinycell m/H80 og H250

Hentet fra: [39]

Divinycell® H Technical Data

Divinycell H has been widely used over many years in virtually every application area where sandwich composites are employed including the marine (leisure, military and commercial), land transportation, wind energy, civil engineering/infrastructure and general industrial markets. In its application range Divinycell H has the highest strength to density ratio. It exhibits at both ambient and elevated temperatures impressive compressive strength and shear properties. In addition the ductile qualities of Divinycell H make it ideal for applications subject to fatigue, slamming or impact loads.

Other key features of Divinycell H include consistent high quality, excellent adhesion/peel strength, excellent chemical resistance, low water absorption and good thermal/acoustic insulation. Divinycell H is compatible with virtually all commonly used resin systems (polyester, vinyl ester and epoxy) including those with high styrene contents. Its good temperature performance with high residual strength and good dimensional stability, makes Divinycell H ideal for hand laminating, vacuum bagging, RTM (resin transfer molding) or vacuum infusion.

Technical Data for Divinycell H Grade

Property	Method	Unit	H35	H45	H60	H80	H100	H130	H160	H200	H250
Compressive Strength ²⁾	ASTM D 1621	MPa	0.45	0.6	0.9	1.4	2.0	3.0	3.4	5.4	7.2
Compressive Modulus ²⁾	ASTM D 1621	MPa	40	50	70	90	135	170	200	310	400
Tensile Strength ²⁾	ASTM D 1623	MPa	1.0	1.4	1.8	2.5	3.5	4.8	5.4	7.1	9.2
Tensile Modulus ²⁾	ASTM D 1623	MPa	49	55	75	95	130	175	205	250	320
Shear Strength	ASTM C 273	MPa	0.4	0.56	0.76	1.15	1.6	2.2	2.6	3.5	4.5
Shear Modulus	ASTM C 273	MPa	12	15	20	27	35	50	73	73	97
Shear Strain	ASTM C 273	%	9	12	20	30	40	40	40	45	45
Nominal Density ¹⁾	ISO 845	kg/m ³	38	48	60	80	100	130	160	200	250
1) Typical density variation $\pm 10\%$.											
2) Perpendicular to the plane. All values measured at +23°C.											



Vedlegg 7, datablad Divinycell m/ HCP50

Hentet fra: [39]

Divinycell® HCP Technical Data

Divinycell HCP grade has been developed to meet the demand for a high-performance, lightweight buoyance material with excellent characteristics. It is widely used in floatation units, ROVs, diving bells and impact protection structures. As a result of its excellent hydraulic compressive properties and closed cell structure, it has very low buoyancy loss and water absorption under long-term loading conditions. The insulation properties of HCP are excellent.

HCP stands for Hydraulic Crush Point indicating the most important feature of this class of materials. HCP is defined as the point of pressure in Bar, where the material when subjected to an increasing pressure of 1–2 Bar/sec has lost 5% of its initial volume. The design of subsea buoyancy applications is complex and consideration has to be given to the required buoyancy loss and updrift over the expected lifetime and service conditions, with respect to long and short term hydraulic compressive creep, water absorption and hydraulic fatigue. Please contact DIAB Technical Services for design proposal.

Technical Data for Divinycell HCP Grade

Property	Test procedure	Unit	HCP 30	HCP 50	HCP 70	HCP 90	HCP 100
Hydraulic Crush Point		Bar	30-39	50-59	70-79	90-99	100-109
Compressive Strength ²⁾	ASTM D 1621	MPa	5.4	7.2	8.1	10.2	11.6
E-modulus (extensometer) ²⁾	ASTM D 1621	MPa	310	400	500	590	650
Tensile Strength ²⁾	ASTM D 1623	MPa	7.1	9.2	11.0	12.6	13.5
Shear Strength	ASTM C 273	MPa	3.5	4.5	5.2	6.5	7.3
Shear Modulus	ASTM C 273	MPa	73	97	115	147	170
Shear Strain	ASTM C 273	%	45	45	35	35	35
Density, nominal ¹⁾	ISO 845	kg/m ³	200	250	300	360	400
Thermal Conductivity	EN 12667	W/m.K	0.049	0.051	0.057	0.058	0.060
Buoyancy	Contact DIAB Technical Services for design case calculation						
1) Typical density variation ± 10%.							
2) Perpendicular to the plane. All values measured at +23°C.							