



# Sjøkrigsskolen

## Bacheloroppgave

### Fiberkomposittpropeller

En ny æra for propulsjon?

av

Torstein Ræstad Karlsen & Sigve Helfred Steingrimsen

Lvert som en del av kravet til graden:

BACHELOR I MILITÆRE STUDIER MED FORDYPNING I MASKINFAG

Innlevert: Mai 2018

**Godkjent for offentlig publisering**

## Publiseringsavtale

### En avtale om elektronisk publisering av bachelor/prosjektoppgave

Kadetten(ene) har opphavsrett til oppgaven, inkludert rettighetene til å publisere den.

Alle oppgaver som oppfyller kravene til publisering vil bli registrert og publisert i Bibsys Brage når kadetten(ene) har godkjent publisering.

Oppgaver som er graderte eller begrenset av en inngått avtale vil ikke bli publisert.

Vi gir herved Sjøkrigsskolen rett til å gjøre denne oppgaven tilgjengelig elektronisk, gratis og uten kostnader	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nei
Finnes det en avtale om forsinket eller kun intern publisering? (Utfyllende opplysninger må fylles ut)	<input type="checkbox"/> Ja	<input checked="" type="checkbox"/> Nei
Hvis ja: kan oppgaven publiseres elektronisk når embargoperioden utløper?	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nei

## Plagiaterklæring

Vi erklærer herved at oppgaven er vårt eget arbeid og med bruk av riktig kildehenvisning. Vi har ikke nyttet annen hjelp enn det som er beskrevet i oppgaven.

Vi er klar over at brudd på dette vil føre til avvisning av oppgaven.

**Dato: 25 – 05- 2018**

Torstein Ræstad Karlsen  
Kadett navn

\_\_\_\_\_  
Kadett, signatur

Sigve Helfred Steingrimsen  
Kadett navn

\_\_\_\_\_  
Kadett, signatur

---

## Forord

Denne oppgaven er en bachelor studie av fiberkomposittpropeller. Studien er todelt, hvor det er gjennomført en litteraturstudie og materialstudie. Studiet ble gjennomført ved Sjøkrigsskolen vårsemesteret 2018. Oppgaven skrives på vegne av Sjøforsvaret som en kartleggingsstudie av fiberkomposittpropeller. Det forventes at leser har et bachelor-nivå innenfor relevant fag, og har god kjennskap til faguttrykk.

### **Vi ønsker å rette en spesiell takk til:**

Førsteamanuensis Per Fredrik Thuvander, Høgskulen på Vestlandet  
For god hjelp under materialstudien

Mechanical Engineer, PhD Reidar Kvale Joki, Fireco AS  
For å komme med gode betraktninger om fiberkompositter og marked

Umoe Mandal As  
For materiale og prøvestykker til materialstudie

Høgskulen på Vestlandet  
For fasiliteter og utstyr til materialtesting

Bergen, Sjøkrigsskolen, 25-05-2018

(Signatur)

---

## Oppgaveformulering

Så mye som 90% av verdens varer transporteres på kjøll. Samfunnet setter stadig høyere krav til optimalisering av konstruksjoner. Nye materialer blir tatt i bruk i applikasjoner hvor de gamle materialene er utdaterte. For sjøforsvaret er det viktig å hele tiden søke ny teknologi som kan gi et stridsteknisk fortrinn, senke utgifter og øke effektiviteten. Flytting av vann ved hjelp av en skrue er en gammel oppfinnelse, hvor Arkimedes flyttet vann til en høyere elevasjon. Skipspropeller har tradisjonelt blitt produsert i metall, slik som nikkaluminiumsbronse(NAB). Disse propellene har utfordringer med blant annet vibrasjon og galvanisk korrosjon. Ved å studere fiberkompositt som propellmateriale ønskes det å kartlegge om dette kan være fremtidens propellteknologi for Sjøforsvaret.

---

## Sammendrag

I denne oppgaven har en litteraturstudie og en materialstudie blitt gjennomført. Litteraturstudiens hensikt har vært å sjekke hvor komposittpropeller står i det sivile markedet i dag. Våre funn er todelt. På den ene siden har vi inntrykk av at det er en vilje i propulsjonsindustrien til å utvikle komposittpropeller for markedet. Denne viljen er særlig drevet av marinefartøys søken etter et fortrinn innenfor propulsjon. På den andre siden er det en stor skepsis rundt bruken av komposittpropeller som et alternativ til det vel-etablerte NAB materialet. Denne skepsisen er trolig en følge av manglende kunnskap om anisotropien til fiberkompositter. Den gjennomførte material studien har gitt interessante resultater, som har bygd en grunnleggende forståelse for hvordan karbonfiber oppfører seg under bøyning. Det faktum at fiberkompositter ikke må behandles som isotropiske materialer er her en viktig lærdom. Dette må i videre studier vektlegges i særlig grad, for bedre å forstå fiberkomposittets retningsbestemte egenskaper.

Fiberkomposittpropeller innehar en rekke egenskaper, og noen av dem er dekket i denne studien. Produktet har etter vår mening få klare fordeler sammenliknet med konvensjonelle NAB propellere. Propellenes evne til self pitching, kan redusere belastninger på maskineri og aksling, ved at propellbladet depitches under belastning. Dette kan gi en fordel i grov sjø. Videre kan propellvirkningsgraden kunne økes litt, fordi en større diameter kan oppnås. På alle skipspropeller er kavitasjon et problem. Fiberkompositter har generelt dårlig motstandsdyktighet mot kavitasjon, og dette gjør det mer aktuelt til fartøyer som kaviteter lite, slik som undervannsbåter. Produksjonen av fiberkompositt propeller kan ved riktig produksjonsteknikk være tidsmessig fordelaktig ovenfor produksjonen av en tilsvarende NAB propell. Fiberkompositt har egenskaper som er retningsbestemte. Hvilken bestanddel av materialet som svikter kan være svært vanskelig å bestemme. Dette gjør at styrkeberegning av komplekse konstruksjoner med mange lag i laminatet blir tidkrevende. Propeller er en slik konstruksjon.

Fiberkompositt ser ut til å inneha gode dempningsegenskaper. Dette bør studeres videre, da gode dempningsegenskaper vil gi en lavere signatur. For undervannsbåter vil redusert signatur gi en stridsteknisk fordel. Siden fiberkomposittpropeller viser seg å ha et begrenset bruksområde, som følge av lav motstandsdyktighet mot kavitasjon, vil det ikke være særlig aktuelt for overflatefartøy. Vår anbefaling er at fiberkomposittpropeller vurderes som propulsor for undervannsbåter, hvor kavitasjonen er liten, og signatur er av stor betydning.

# Innholdsfortegnelse

<b>Figurer .....</b>	<b>1</b>
<b>Tabeller .....</b>	<b>3</b>
<b>Forkortelser .....</b>	<b>4</b>
<b>1 Introduksjon .....</b>	<b>5</b>
1.1 Bakgrunn .....	5
1.2 Problemstilling: .....	6
1.3 Mål.....	6
1.4 Struktur .....	6
1.5 Begrensninger.....	7
1.6 Metode.....	7
<b>2 Bakgrunn og teori.....</b>	<b>8</b>
2.1 Kompositter og deres egenskaper.....	8
2.1.1 Fibre.....	8
2.1.2 Matrise.....	10
<b>3 Litteraturstudie.....</b>	<b>12</b>
3.1 Propellstudie .....	12
3.1.1 Self pitching og defleksjon .....	12
3.1.2 Belastningsvariasjoner.....	14
3.1.3 Sammenlikning mellom konvensjonell og ny propellteknologi.....	14
3.2 Dempningsegenskaper.....	17
3.3 Produksjon og kostnader .....	18
3.3.1 Produksjon .....	18
3.3.2 Kostnader.....	21
3.4 Vedlikehold .....	21
3.4.1 Kavitasjonserosjon .....	22
<b>4 Kartlegging av egenskapene til et karbonfiberlaminat.....</b>	<b>24</b>
4.1 <u>Bakgrunn</u> .....	24
4.2 Sammendrag .....	24
4.3 Hypotese .....	25
4.4 Teori .....	26
4.4.1 Hva er spesielt med fiberkompositter? .....	26
4.4.2 Feilmodi i kompositter .....	33
4.5 Valg av testmetoder .....	35
4.5.1 Valg av testverktøy.....	36

---

4.5.2	Prøvestykker .....	41
4.6	Gjennomføring av maks bøyetest .....	42
4.7	Resultater fra Maksimal bøyetest .....	51
4.7.1	Prøveserie 1: .....	51
4.7.2	Prøveserie 2: .....	54
4.7.3	Prøveserie 3: .....	57
4.8	Gjennomføring av stegvis bøyetest .....	60
4.9	Resultater stegvis bøyetest .....	61
4.9.1	Varig endring av egenskaper .....	67
4.10	Diskusjon og betraktninger av bøyetest .....	68
4.10.1	Hastighet .....	68
4.10.2	Endringskarakterestikker .....	70
4.10.3	Fiberorientering .....	71
4.10.4	Svar på hypotese .....	72
<b>5</b>	<b>Feilkilder .....</b>	<b>73</b>
<b>6</b>	<b>Anbefaling til videre studie.....</b>	<b>74</b>
<b>7</b>	<b>Konklusjon .....</b>	<b>75</b>
<b>8</b>	<b>Bibliografi.....</b>	<b>76</b>
<b>9</b>	<b>Vedlegg .....</b>	<b>78</b>

---

## Figurer

Figur 1- Spenning ved strekk(tensile) og trykk(compressive) av tre vanlige kompositter (Gurit).....	9
Figur 2-Bend twist prinsipp.....	13
Figur 3- Virkningsgrad for M/S Taiko Maru propell, modellert som wageningen serie-B .....	15
Figur 4- Tykkelse av innfestning .....	19
Figur 5- Vakuuminjeksjon .....	20
Figur 6- Eksempel på hvordan bytte av propellblader kan gjennomføres med dykkere.	22
Figur 7- Bøyepening i isentropisk materialet .....	25
Figur 8- Iso-tøyning og iso-spenning .....	26
Figur 9- Diagramoversikt over spenningsdistribusjonen fra matrise til fiber. Spenning på y-aksen og fiberlengde på x-aksen. Merk hvordan pålastsonene i begge ender kan overlape hverandre ved korte fibre. Pålastsonen er halve den kritiske lengden.	29
Figur 10- Variasjon av E-Modul som en funksjon av fiberorientering.....	31
Figur 11-Illustrasjonen viser fiberdefekt, hvor fibre fraviker fra lastretning. ....	31
Figur 12- Forskjellige meilmodi i fiberkompositter, fiber kinking .....	33
Figur 13- Grafisk fremstilling av mekaniske egenskaper for bestanddeler og komposit	34
Figur 14: Interlaminær delaminering .....	35
Figur 15- Testverktøy overdel.....	37
Figur 16-testverktøy, innspenningsmekanisme for prøvestykke.....	38
Figur 17-testverktøy, innspenningsmekanisme, låsebrakett .....	38
Figur 18- En prototype av det endelige designet gjennomgår en Spenningsanalyse i SOLIDWORKS .....	39
Figur 19-Vidreutvikling av testverktøy .....	40
Figur 20- Fiberorientering 2. Orientering 1 og 3 kan bestemmes ved hjelp av koordinatsystemet. Orientering 1 står 45°, og orientering 3 står 90° grader på prøvestykke på bildet.....	41
Figur 21- Midten måles opp, slik at prøvestykket ligger sentrert mellom rullene. ....	42
Figur 22- Maksimal bøyetest prøvebit 1-4 .....	45
Figur 23- Graf som viser bøyepeningen ved utbøying for prøvestykke 1-3.....	47
Figur 24- Den deriverte av spenningen vises her som brun linje. Denne linjen er brukt for å identifisere endringen i stigningstallet til spenningskurven .....	48
Figur 25-Figuren viser hvordan den deriverte(brune) linjen er brukt for å bestemme om spenningsgrafen er lineær eller ikke lineær. Den svarte vertikale hjelpelinjen viser hvordan spenningen (blå graf) kan bestemmes der den deriverte avtar. Videre kan spenningen leses av ved hjelp av den horisontale hjelpelinjen. Trendlinjer er tegnet inn for å lette avlesning fra derivasjonsgrafen. X-aksen er i [mm] og Y-aksen i [MPa]. Den deriverte av spenningen har samme X-akse, men egen Y-akse. ....	49
Figur 26- eksempel på drastisk endring i spenningens stigning, her vist ved hurtig og varig endring i derivasjonskurven .....	50
Figur 27- Bøyepening prøvebit 1-2 .....	52



---

Figur 28- Bøyesspenning prøvebit 1-3 .....	53
Figur 29- Bøyesspenning prøvebit 1-4 .....	53
Figur 30- Bøyesspenning prøvestykke 2-2 .....	54
Figur 31- Bøyesspenning prøvestykke 2-3 .....	55
Figur 32- Bøyesspenning prøvestykke 2-4 .....	56
Figur 33- Bøyesspenning prøvestykke 3-2 .....	57
Figur 34- Bøyesspenning prøvestykke 3-3 .....	58
Figur 35- Bøyesspenning prøvestykke 3-4 .....	59
Figur 36- Nedbøyningssteg .....	60
Figur 37- 15mm nedbøyning av prøvestykke 2-6, X-akse er [mm] nedbøyning og Y-akse er [KN] kraft. ....	61
Figur 38-15mm nedbøyning av prøvestykke 2-5, , X-akse er [mm] nedbøyning og Y-akse er [KN] kraft. ....	62
Figur 39-16mm nedbøyning av prøvestykke 2-6, X-akse er [mm] nedbøyning og Y-akse er [KN] kraft. ....	63
Figur 40-16mm nedbøyning av prøvestykke 2-5. X-akse er [mm] nedbøyning og Y-akse er [KN] kraft. ....	63
Figur 41-18mm nedbøyning av prøvestykke 2-6. X-akse er [mm] nedbøyning og Y-akse er [KN] kraft. ....	64
Figur 42-17mm nedbøyning av prøvestykke 2-5. X-akse er [mm] nedbøyning og Y-akse er [KN] kraft. ....	65
Figur 43-18mm nedbøyning av prøvestykke 2-6. X-akse er [mm] nedbøyning og Y-akse er [KN] kraft. ....	65
Figur 44-18mm nedbøyning av prøvestykke 2-5. X-akse er [mm] nedbøyning og Y-akse er [KN] kraft. ....	66
Figur 45- Stivhet for prøvestykke 2-5 ved 14mm nedbøyning .....	67
Figur 46-Stivhet for prøvestykke 2-6 ved 14mm nedbøyning .....	67
Figur 47- Karakteristikk 1: slak avbøyning. Brun linje er inntegnet for å se spenning-nedbøyningskurvens avbøyning grafisk. X-akse er [mm] nedbøyning og Y-akse er [N] kraft. Figuren er et utsnitt fra testing av prøvebit 2-6, steg 7 (16mm).....	70
Figur 48- Karakteristikk 2: Hurtig endring. Brun linje er inntegnet for å se spenning-nedbøyningskurvens endring grafisk. X-akse er [mm] nedbøyning og Y-akse er [N] kraft. Figuren er et utsnitt fra testing av prøvebit 2-6, steg 8 (17mm).....	71

---

## Tabeller

Tabell 1- Oversikt over mest brukte fibre. Pris er hentet fra (William D Callister & Rethwisch, 2015, s. 561) .....	10
Tabell 2- Oversikt over mest brukte matriser. Pris er hentet fra (William D Callister & Rethwisch, 2015, s. 561) .....	11
Tabell 3-Tykkelse og bredde for prøvestykkene .....	44
Tabell 4- presentasjon av spenning ved linearitetsavvik og volumfraksjon fiber.....	51
Tabell 5- Sammenlikning av påtrykt kraft ved 14mm nedbøyning for maksimal bøyetest (grønn) og stegvis bøyetest (gul) for et utvalg prøvebiter med orientering 2. ....	69

---

## Forkortelser

CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer/Plastic
FRP	Fiber Reinforced Polymer/Plastic
HM	High Modulus
HS	High Strength
IM	Intermediate modulus
$K_Q$	Dreiemoments koeffisient
$K_T$	Trustkoeffisient/ Skyvkoeffisient
NAB	NikkelAluminiumBronse
P/D	Pitch diameter forhold
Prepreg	Pre-impregnated Composite fibers
UD	Unidirectional
UHM	Ultra high modulus

---

# 1 Introduksjon

## 1.1 Bakgrunn

Kompositt materialer har lenge vært i bruk i den maritime verden. Følger man historien tilbake, er det brukt i maritime konstruksjoner siden rett etter 2. verdenskrig. Sjøforsvaret har lang erfaring med bruk av komposittmaterialer i skipskonstruksjon. Med fartøysklasser som OKSØY og SKJOLD, mineryddere og kystkorvetter, er fiberkomposittmaterialer brukt i skrogkonstruksjon og maskindeler.

Fiberkompositter åpnet muligheter innenfor propulsjonsbransjen, hvor man i prinsippet kunne få sterke og lettere skipspropeller. Fra en studie (Wozniak, 2005) ved U.S Navy, var forskning rundt komposittpropeller allerede påbegynt i 2001. Hensikten var å overbevise den Amerikanske marinen om at komposittpropeller var verdt å undersøke videre. Ser man på markedet for skipspropeller i dag er det derimot få som har tatt i bruk skipspropeller laget av fiberkomposittmateriale. Fiberkomposittpropeller er etter vår viten ikke tatt i bruk i norsk konvensjonell skipsfart. Dette bærer preg av usikkerhet rundt bruken av komposittpropeller. I tillegg er det usikkert om fiberkomposittene som er på markedet i dag har gode nok egenskaper til å matche NAB.

Sett bort i fra skepsisen, eksisterer komposittpropeller på markedet, og militære aktører tester ut ulike konsepter. Blant annet har Royal Navy installert en komposittpropell på en Triton-klasse minerydderfartøy. En propell på 2.9 meter i diameter som er utviklet av blant andre QinetiQ, et firma som driver med utvikling av militærteknologi (Marsh, 2004, ss. 34-38). Det Japanske firmaet Nakashima Propellers har produsert, og i samarbeid med ClassNK, klasset komposittpropeller (ClassNK, 2014). Selv om komposittpropeller er i bruk på større fartøy i dag, er lite informasjon rundt driftserfaringer tilgjengelig. Det er derfor ønskelig å gjennomføre en bachelor-studie ved Sjøkrigsskolen omhandlende kompositt propeller. Hensikten er å undersøke om en skipspropell laget av fiberkomposittmateriale er noe som kan anbefales til marine.

---

## 1.2 Problemstilling:

Grunnet manglende driftserfaring og skepsis rundt mekaniske egenskaper til fiberkompositt materialer, later det til at fiberkompositt propeller ennå ikke er et naturlig valg i det maritime miljø. Denne oppgaven skal undersøke hvilke egenskaper en fiberkompositt propell må inneha, samt en anbefaling om hvorvidt fiberkompositt propellere egner seg til bruk på marinenes fartøyer.

## 1.3 Mål

- Ved å studere litteratur:
  - 1) Kartlegge fordeler og ulemper med fiberkompositt propell, for å kunne gi en anbefaling om videre studie til Sjøforsvarsstaben.
  
- Gjennom en materialstudie med testing:
  - 1) Finne relevante testmetoder for å kunne gi validitet i en anbefaling.
  - 2) Kartlegge mekaniske egenskaper til valgt fiberkompositt materiale.

## 1.4 Struktur

Oppgaven starter med en innføring i ulike fiberkompositter. Dette er for å gi leseren en kort innføring i fiberkompositter og hvilke som er vanlig å bruke. Dette går videre over i en litteratur studie som er gjort om fiberkomposittpropeller. Hvor det brukes litteratur for å kartlegge egenskaper, studere ytelse og se på produksjon og kostnader. Videre i oppgaven kommer det en materialstudie, som omhandler bøyeprovning av karbonfiber. Hensikten med studiet er å kartlegge egenskaper til ulike prøvestykker av karbonfiber. Materialstudien tar for seg valg av testmetode, relevant teori og resultater med diskusjon og betraktninger. Etter materialstudien diskuteres fremtidig studier og videre anbefalinger. Til slutt presenteres konklusjon og videre anbefaling til studier.

---

## 1.5 Begrensninger

### 1. Litteraturstudie:

En begrensning i arbeidet rundt kunnskapsinnhenting er industriens tilbakeholdenhet. Informasjon rundt eksisterende produkter og teknologi er å anse som bedriftshemmeligheter. Den publiserte informasjonen er i stor grad gammel, og dette gjør at vi går inn i oppgaven med en skepsis til arbeidet som er publisert. Mange av studiene som legges til grunn er helt eller delvis finansiert av industrien, og må behandles med et kritisk blikk. Litteraturgrunlaget er også produsert av et begrenset antall forfattere.

### 2. Teststudie:

Ideelt vill det være ønskelig å skaffe en ferdiglaget propell og teste den mot en NAB i kavitasjonstank. Dette viste seg å være svært kostbart å fremskaffe, og kan derfor begrense omfanget av oppgaven.

Høyskolen på Vestlandets material lab har stilt med utstyr til bøyepøver. Maskinens programvare gjorde at et utmattingsforsøk ikke kunne gjennomføres.

Materialtesting er tidkrevende, og dette begrenser omfanget og antallet tester som kan gjennomføres i tidsrommet tilgjengelig. Tilgangen på testmateriale har vært vanskelig, og kvaliteten på materialet som er testet i studien er beregnet på skrogkonstruksjoner. Nøyaktigheten i materialet er derfor ikke tilfredsstillende for en komposittpropell.

Komposittpropeller har mange aspekter som er verdt å studere, men tiden begrenset oss til å fokusere på bøyetesting.

## 1.6 Metode

For å bedre forstå kompositt propellere, har vi tilnærmet oss problemet fra to vinkler.

1. Gjennom en litteraturstudie vil det som kommer frem bli samlet og analysert. Dette vil gi en bred forståelse av mulighetene og utfordringene vedrørende kompositt propeller.
2. Ved å fysisk teste mekaniske egenskaper hos et kompositt materiale, vil ulike karakteristikk kartlegges. Dette vil gjøres gjennom å utsette prøvestykker for standardiserte tester slik at resultatet blir sammenlignbart med andre publiseringer. Gjennom samtaler med fagpersoner innen kompositt området, vil testene bli analysert.

---

## 2 Bakgrunn og teori

### 2.1 Kompositter og deres egenskaper

Definisjonen av et komposittmateriale er to eller flere distinkt forskjellige materialer som er kombinert sammen i en struktur. Dette blir gjort for at det kombinerte produktet skal kunne få egenskaper ut over det en av materialene ville individuelt hatt alene. Komposittmaterialer kan være så mangt, alt fra stålførsterket betong til metaller som inneholder fibre med høy styrke. Fiberkompositter vil bli dekket i denne studien. Ulike fiberkompositter har ulike egenskaper. Disse egenskapene er knyttet til fibrene, retningen på fibrene og bindemiddelet. Det er viktig å ha oversikt over disse faktorene, for bedre å forstå fiberkomposittmaterialer.

#### 2.1.1 Fibre

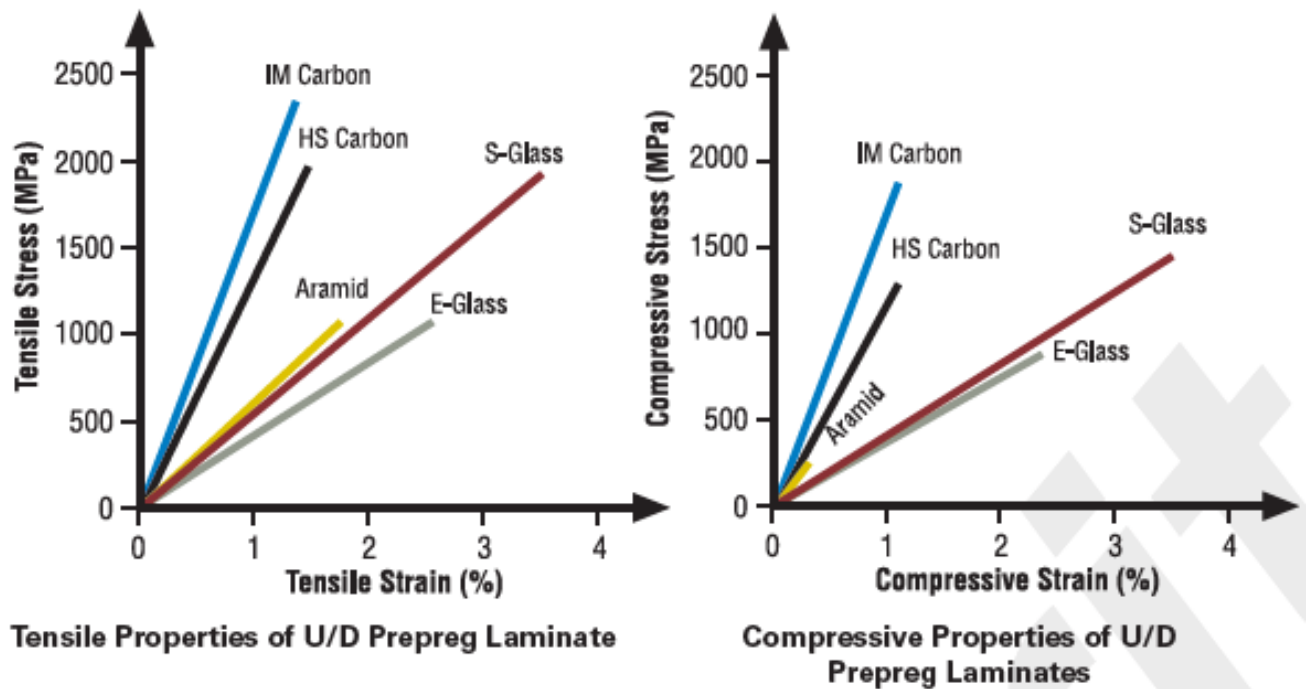
Fibre kan deles inn i to hovedgrupper:

1. Korte fibre med tilfeldig orientering i matrisen. Disse er gjerne kuttete fibre og brukes i konstruksjoner med lite krav til styrke. Her oppnås en plan-isotropisk egenskap ved at fibrene er tilfeldig orientert (A & F, 1993, s. 189).
2. Lange kontinuerlige fibre, som gir retnings-spesifikke egenskaper som følge av orienteringen (courtney, 2005, s. 251). Disse fibrene er aktuelle i propeller, da fiberorienteringen kan tilpasses etter de faktiske spenningene, og unødig materiale (parasitt materiale) unngås. Hvis det er ønskelig er det også mulig å lage en kvasi-isotropisk kompositt i planet med lange fibre. En kvasiisotropisk kompositt har fiberorienteringen jevnt fordelt i planet (minimum 3 lag), og egenskapene likner de av et isotropisk materiale (A & F, 1993, s. 191).

For at fibrene skal kunne ta opp flere-aksede spenninger, torsjon og bøyning må de ha en orientering ut fra  $0^\circ$ . Dette gjøres ved at kompositten blir produsert av fibre som orienteres i forskjellige retninger. Ensrettede (Engelsk:Unidirectional) betyr at fibermattene kommer med majoriteten av fibrene i samme retning, mens vevde matter har flere orienteringer, slik som;

0°/90°, ±45° eller andre konfigurasjoner. Vevingen kan være av forskjellig design ut ifra applikasjonen som de skal brukes til. Fibrene som veves er ofte buntet sammen til større enheter for enklere håndtering. Fibre med høy E-modul har lavt tverrsnitt, og få defekter. Det lave tverrsnittet muliggjør tett pakking av fibre som gir større adhesjonsflate og fibertetthet.

Tre hovedtyper av fibre er brukt i marine konstruksjoner. Disse er Glassfiber(GFRP), Aramid-fiber(AFRP) og karbonfiber(CFRP). Glassfiber er i hovedsak brukt til fritidsbåter og større konstruksjoner, da prisen er relativt lav. Av FRP markedet utgjør glassfiber den største andelen. Karbonfiber og aramid er mer kostbare materialer, og er derfor ikke så vanlige som glassfiber. En generell oversikt over egenskapene til de forskjellige fibrene er vist i Figur 1- Spenning ved strekk(tensile) og trykk(compressive) av tre vanlige kompositter.



Figur 1- Spenning ved strekk(tensile) og trykk(compressive) av tre vanlige kompositter (Gurit).

Karbonfiber har generelt den høyeste spenningen pr tøyning og egner seg derfor til konstruksjon. Aramid tar opp mer energi ved slag enn karbonfiber og kan derfor være aktuell til overflater som er utsatt for kavitasjon (Yamatogi, Murayama, Uzawa, Mishima, & Ishihara, 2011).



Glassfiber er et rimeligere alternativ enn de to foregående, men har høyere vekt enn karbonfiber. Under følger en tabell som viser egenskaper og bruksområder ved forskjellige fiber:

Fiber	Egenskaper	Bruksområder	Pris
Aramider	Tar bedre opp energi ved slag enn GFRP og CFRP	Ballistisk beskyttelse, forsterkning av overflate	-
Glass	Billig konstruksjonsmateriale med gode mekaniske egenskaper	Fritidsbåter, vindmølleblader, ferger	2,10(\$US/Kg)
Karbon	Utmerkede mekaniske egenskaper. Pris varier ut ifra E-modul	Høy applikasjons konstruksjoner, aksler, vindmølleblader, sportsutstyr.	60-250(\$US/Kg)

Tabell 1- Oversikt over mest brukte fibre. Pris er hentet fra (William D Callister & Rethwisch, 2015, s. 561)

Disse tre hovedtypene av fibre er relativt enkel å få oversikt over, mens de forskjellige typer av matriser er vanskeligere.

### 2.1.2 Matrise

Matrisen er bindemiddelet i kompositten. De mest brukte matrisegruppene for marine applikasjoner listes i Tabell 2- Oversikt over mest brukte matriser. Det er Epoxy som viser til de beste mekaniske egenskapene hos disse matrisene, og er derfor den som er mest brukt i høy ytelses applikasjoner. Både polyester og vinylester kryper mye ved herding, og avgir mye varme, mens epoxy krymper lite. Det eksisterer utallige andre matriser på markedet som er spesial designet til mer spesiell bruk.

Matrise	Egenskaper	Bruksområder	Pris
Epoxy	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ikke reversibel herding</li> <li>- Høy styrke</li> <li>- Holdbar</li> <li>- Kjemisk motstandsdyktig</li> <li>- God adhesjon til fibre</li> </ul>	Brukes til høy ytelses applikasjoner	6 (\$ US/Kg)
Vinyl-ester	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ikke reversibel herding</li> <li>- Motstandsdyktig mot fukt</li> <li>- Høy kjemisk motstand</li> <li>- Krymper opp mot 8% ved herding</li> </ul>	Brukes gjerne i applikasjoner som er utsatt for kjemisk korrosjon eller vann. Kan brukes som overflatebehandling.	-
Polyester	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dårlig adhesjons-egenskaper</li> <li>- Krymper opp mot 8% ved herding</li> </ul>	Billige applikasjoner	-

Tabell 2- Oversikt over mest brukte matriser. Pris er hentet fra (William D Callister & Rethwisch, 2015, s. 561)

---

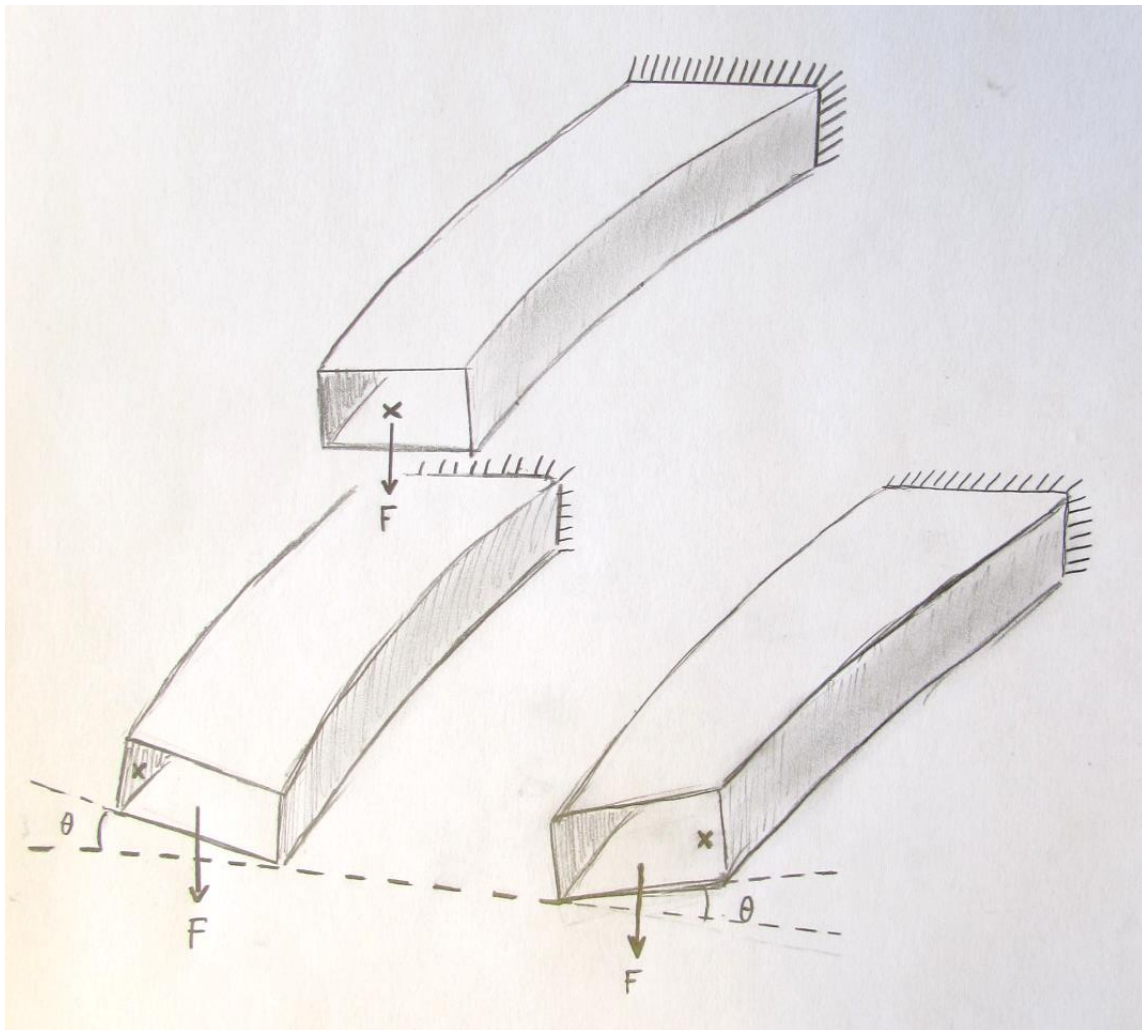
## 3 Litteraturstudie

### 3.1 Propellstudie

#### 3.1.1 Self pitching og defleksjon

Tradisjonelle propeller er laget av metall, og deres defleksjon under høy belastning er relativt liten. Dette gjør at de kan produseres med den optimale geometrien, for en belastning uten at predeformasjon er nødvendig. Fiberkomposittmateriale er derimot anisotropisk, og vil kunne få større defleksjon under belastning, avhengig av orienteringen til fibrene i laminatet. Predeformasjon av propellen er derfor ønskelig og mulig. Predeformasjonen blir motsatt rettet i forhold til deformasjonen. Ved riktig design vil propellen deformeres til optimal geometri og virkningsgrad under belastning. Denne optimale geometrien oppnås også med konvensjonelle metallpropeller, men det er området der belastningen ikke er optimal komposittpropeller kan være fordelaktig, ved at pitchen kan manipuleres.

Fiberkompositt er anisotropisk. Ved å orientere fibrene riktig kan man oppnå en effekt som er kalt «bend-twist» kobling i litteraturen (Liu & Young, 2009). Denne effekten gjør at når materialet bøyes, vil det også vri seg. Denne egenskapen er avhengig av flere faktorer. Materialets egenskaper, fibrenes orientering og antall lag i laminatet. Akkurat hva som skjer når en «bend-twist» oppstår er komplisert, og vil ikke bli dekket i denne oppgaven. En bend-twist kobling vil kunne være fordelaktig i en akselerasjonsfase, der skipet skal opp i servicehastighet. Propellen vil da ha en belastningsavhengig stigning, og med riktig design, kan den ligne en variabel pitch propell.



Figur 2-Bend twist prinsipp

I en studie (Motley & Young, 2011) ble CFRP sammenliknet med en NAB propell på et marinfartøy med dobbeltskruer. CFRP propellen hadde ved 22 knop en depitching på  $2,5^\circ$ . CFRP propellen hadde i denne testen et laminat som ga depitching under last, noe som førte til at både  $K_t$  og  $K_q$  ble lavere, og turtallet ble litt høyere for å kompensere for tapt skyv. Forskjellen mellom turtallet til NAB og CFRP ble større med økt belastning og dermed økt depitching ved det samme skyv behovet. CFRP og NAB propellen hadde ingen signifikant forskjell i virkningsgrad over hastighetsspekteret, da begge lå rundt 0,75 (Motley & Young, 2011). Den eneste fordelen i en akselerasjonsfase slik vi ser det er at dreiemomentet går ned og turtallet opp. Dette kan minske sjansen for overbelastning av for eksempel aksel og drivmotor.

---

### 3.1.2 Belastningsvariasjoner

Et område som vi ser en klar fordel med CFRP propeller er under store belastningsvariasjoner, slik som ved mye sjø. Når et fartøy går i mye sjø vil belastningen på propellen øke når skipets hastighet bremses opp av bølgene. Hvis vi ser opp mot studien til (Motley & Young, 2011), sier de at ved en økt belastning vil anisotropien sørge for en depitching (bend twist). Dette igjen gir mindre dreiemoments behov og mindre skyv. Akselen, gir og motor er utsatt for overbelastning som følge av for høyt dreiemoment. Denne depitchingen vil kunne beskytte drivlinjen mot overbelastninger i tidsrom hvor propellen jobber under høy belastning. Defleksjonen til propellbladet kan også tenkes å redusere belastningen på maskineriet.

Fartøyets medstrøms felt vil gi belastningsvariasjoner for propellbladene avhengig av hvor på rotasjonssirkelen de befinner seg (Brownlie, 1998, s. 28). I dette tilfellet (Motley & Young, 2011) hvor diameteren er 5,18m, vil maks defleksjon av CFRP bladet være på 75mm, noe som resulterer i en 2° depitch som følge av anisotropien. Den tilsvarende NAB propellen hadde en defleksjon på 25mm (Motley & Young, 2011)

Mange studier, blant annet (Blasques, Berggreen, & Andersen, 2010) er gjort på temaet rundt ytelses forbedringer av kompositt propeller. De fleste er metode studier som ser på hvordan man bedre kan forstå og utvikle et slikt design. Ingen studier som har kommet oss for hånden har tatt for seg en fullskala CFRP propell. Slike propeller fins på markedet, men noen studie på disse har ikke vært tilgjengelig for oss.

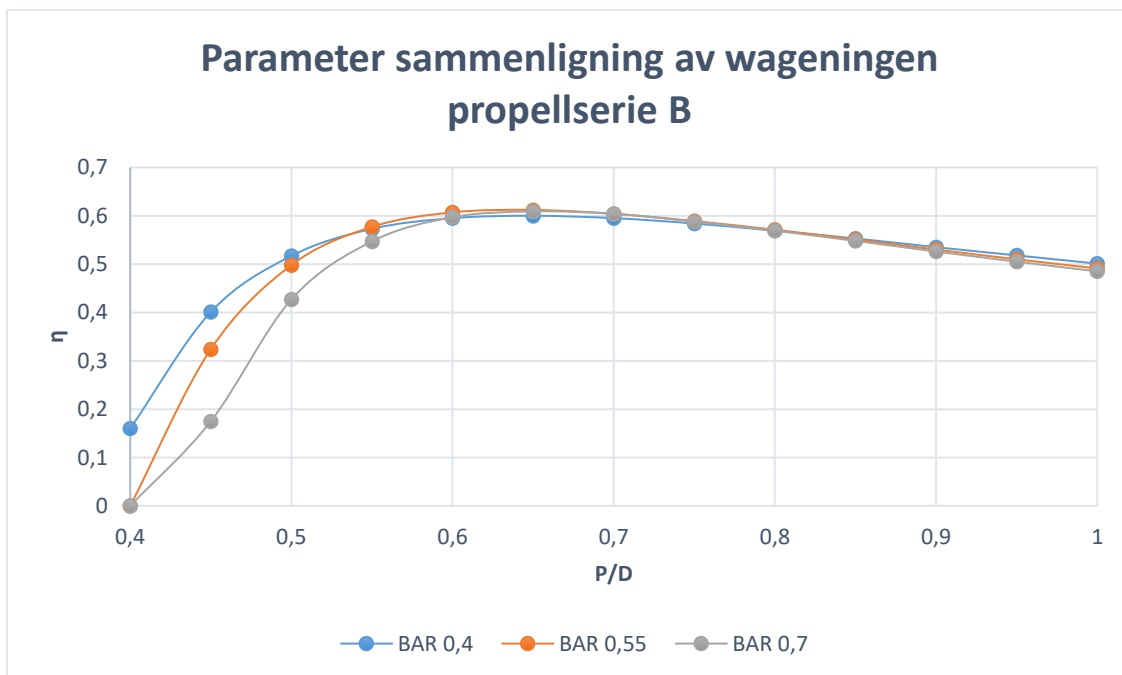
### 3.1.3 Sammenlikning mellom konvensjonell og ny propellteknologi

For å bedre forstå CFRP propeller, er en CFRP propell produsert av Nakashima propellers studert. Denne aktuelle propellen er den første CFRP propellen brukt i sivil skipsfart (ClassNK, 2014), og er montert på MS Taiko Maru. Propellen er sammenliknet med Wageningen B-serie. Propellens diameter, turtall og skipets hastighet er kjent og listet i tabellen under. Sammenlikningen tar utgangspunkt i Wageningen B-serie, og er utarbeidet ved hjelp av et Excel program (vedlegg 4). Ved å variere blad areal forholdet og stigningen på propellen og plote dette opp mot virkningsgrad, fremkommer diagrammet under. BAR=0.4, 0.55 og 0.7 ble valgt da disse er de faktiske bladareal forholdet testet av Wageningen studien

for fire bladet propell. Ved hjelp av Excel programmet, som interpolerer mellom propellkurvene, var det mulig å finne virkningsgraden for et utvalg av P/D forhold for alle tre bladarealforholdene. P/D er forholdet mellom hvor langt propellen beveger seg fremover på en omdreining, og diameteren til propellen.

n [rps]	5,91
D [m]	2,12
Vs [m/s]	5,916
Antall blader	4
Skyvet, T	Lest av Excel for P/D=0,65 og BAR=0,55
BAR	$BAR = \frac{A_E}{A_0}$
$A_E$	Effektivt bladareal
$A_0$	$0,25 * \pi * D^2 = 3,53m^2$

Tabell 3-Kjente data fra CFRP propellen til M/S Taiko Maru



Figur 3- Virkningsgrad for M/S Taiko Maru propell, modellert som wagingen serie-B

Sammenlikningen viser at en virkningsgrad på rundt 0.6 er realistisk å oppnå for alle tre blad areal forholdene. Den høyeste virkningsgraden ligger på 0.612 for BAR=0.55 og P/D=0.65. Wageningen seriens data er basert på friprøving av propellene, og skipets medstrøms felt er fraværende. For Taiko Maru er det gjort en forenkling ved at  $V_a = V_s$ , altså medstrøms feltet er neglisjert. Dette medstrøms feltet kan være fordelaktig eller negativt for propellens arbeidsforhold ved at vannets angrepsvinkel og fart i møte med propellen endres.

Hvis CFRP propellen til Taiko Maru var liknende i geometrien som Wageningen B-serie vil virkningsgraden på propellen være rundt 0.61.

$$\text{Teoretisk propellbelastningskoeffisient } C_T = \frac{T}{\frac{\rho}{2} * A_0 * V_A^2} = \frac{78778}{\frac{1025}{2} * 3.53 * 5.916^2} = 1.244$$

$$\text{Maksimal teoretisk virkningsgrad: } \eta_{ideell} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + C_T}} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + 1.244}} = 0.8$$

Fra regnestykket over blir den maksimale teoretiske virkningsgraden 0.8 for denne propellen. Virkningsgraden fra Wageningen modelleringen av Taiko Marus CFRP propell ga til sammenlikning en friprøvnings-virkningsgrad på 0,61. En propell vil aldri kunne oppnå den teoretiske virkningsgraden. Dette er grunnet en rekke forskjellige tap, slik som; propell bosssets reduksjon av diameteren, viskose tap, kavitasjonstap og et endelig antall blader (Rawson & Tupper, 2001).

$$\text{Ekspandert blad areal} = A_E = B.A.R * A_0$$

$$A_0 = \frac{\pi}{4} * D^2 = \frac{\pi}{4} * 2,12^2 = 3.53 m^2$$

$$A_E = 0.55 * 3.53 = 1.94 m^2$$

$$\text{Bladtrykket} = \frac{\text{Skyv}}{A_E} = \frac{(78778 * 10^{-3}) [KN]}{1.94 m^2} = 40.58 \left[ \frac{KN}{m^2} \right]$$

Skyvet er hentet fra Wageningen B-Serie(Excel). Et effektivt bladareal trykk på 40.58[KN/m<sup>2</sup>] er relativt lite sett opp mot et marinefartøy som gjerne har 80 [KN/m<sup>2</sup>] (Rawson & Tupper, 2001) Dette skyldes den lave farten Taiko Maru har. Slepemotstanden til et fartøy,  $R_{TS} = \rho * \frac{1}{2} * C_{TS} * V_s^2 = \text{konstant} * V_s^2$ , øker som en annenpotens til hastigheten. Slepeeffekten,  $P_E = R_{TS} * V_s = \text{konstant} * V_s^3$  øker med tredjepotens til hastigheten. Dette gjør at marinefartøy som gjerne holder opp mot 30knop, vil behøve et betydelig større skyv.

---

Dette er noe som kan begrense bruken av CFRP i marinepropeller til overflatefartøy, ved at materialet ikke tåler belastningen.

Ved å gå fra konvensjonelle materialer til fiberkompositt i propeller kan designet og geometrien endres. Skyvet en propell kan produsere er avhengig av flere faktorer, og er gitt ved formelen:  $T = K_T * \rho * n^2 * D^4$ . For skyvet er diameteren den dominerende verdien ettersom potensen er fjerde, mens også turtallet er en god bidragsyter med potens lik to. Ved å øke diameteren vil skyvet kunne økes eller turtallet senkes. En turtallssenking kan gi mindre kavitasjon og høyere virkningsgrad.

Ved å nytte momentum teori på propeller, der propellen er modellert som en disk får vi det etablerte, og generelle uttrykket for propellvirkningsgraden:

$$\eta = \frac{1}{1+a} = \frac{2}{1+\sqrt{1+C_T}}, \text{ hvor } a = \text{aksiell instrømningsfaktor.}$$

Den aksielle instrømningsfaktoren sier noe om hvor stor hastighetsøkning vannet har over propellen. For å få en høy virkningsgrad, må som vi ser i formelen, **a** være liten. For at hastighetsøkningen skal være liten må diameteren til propellen øke for å opprettholde arbeidet som propellen utfører.

## 3.2 Dempningsegenskaper

Vibrasjonskarakteristikken til et propellmateriale er viktig for marinefartøy. Dette blir avgjort av to faktorer; en gjenstands form og materialet den er laget av. Med riktig utstyr kan vibrasjoner i et propellblad fremprovoseres. Disse kan måles for å analysere vibrasjonskarakteristikk. Ved å utsette et propellblad for varierte vibrasjonsbelastninger kan dempningsegenskapene kartlegges, propellmaterialets egen evne til å dempe vibrasjoner.

En propell vil bli påført vibrasjoner av miljøet den jobber i (Brownlie, 1998, s. 28). Ved ulike frekvenser vil propellen oppleve ulik grad av vibrasjoner. Noen frekvenser kan forårsake vibrasjoner som skaper en «synging» i materialet. Dette gir en signatur som kan oppdages av for eksempel akustiske lyttestasjoner. Slår man på en propell, laget av metall, med en hammer vil man kunne høre denne effekten.



---

I en studie (Yamatogi, Murayama, Uzawa, Mishima, & Ishihara, 2011), er det gjort en test av vibrasjonskarakteristikken til en propell med tre CFRP-propellblader. Innfestningen var av NAB. CFRP-propellen ble sammenlignet med en NAB propell med lik geometri. Parametere som ble målt under testen var: resonansfrekvens, dempningsrate og mode form.

Testen var satt opp med akselerometer på tuppen av hvert propellblad, og det ble brukt en impulshammer for å framprovosere vibrasjoner. Vibrasjonskarakteristikken blir målt mellom impulshammer og akselerometer. Ved hjelp av et analyseverktøy omsettes signalene mellom de to punktene over til test-data. En interessant bemerkning med resultatene er at CFRP-propellbladene later til å ha gode dempningsegenskaper i forhold til NAB. En propell med gode dempningsegenskaper vil redusere vibrasjoner. Dette vil gi en bedre komfort, fordi vibrasjonene transmitteres fra drivlinjen og over til skroget. Store vibrasjoner er også en påkjenning for materialer generelt. Måten dette kartlagt på blir ikke dekt i oppgaven, siden analyse av vibrasjonskarakteristikk er krevende. Hensikten er å skape et inntrykk av CFRP-propeller opp mot NAB.

### **3.3 Produksjon og kostnader**

#### **3.3.1 Produksjon**

På 1960-tallet ble et nytt komposittmateriale introdusert på markedet, karbonfiber. En fiber med veldig gode retningsbestemte egenskaper, som er sterkere enn stål, og er vektbesparende. Materialet ble raskt populært på markedet, og det fant vei inn i mange forskjellige industrier. Romfartsindustri, flyindustri, sykkelindustri, maritime konstruksjoner, bare for å nevne noen. I enkelte industrier har karbonfiber snart tatt over for metaller. For eksempel i flyindustrien, der 50% av materialet som brukes på en Boeing 787, er kompositter. Det tilsvarer at flyet får en vektreduksjon på 20% (Quilter). Blant de forskjellige industriene har karbonfiber funnet vei inn i propellindustrien, som et alternativt til NAB. For at karbonfiber skal kunne være et like godt alternativ, avhenger det av en god produksjonsmetode.

Utfordringen ved produksjon av propellblad i karbonfiberlaminat er dimensjonene det produseres i. På større fartøy blir dimensjonene på en skipspropell av betydelig størrelse. Dette resulterer i at det kreves en innfestning som tåler store påkjenninger. Innfestningen er der hvor propellbladet vil få størst belastning. Ofte benyttes en innfestning hvor propellbladet skyves inn i et spor på bosset. Tykkelsen illustreres på figuren under.



Figur 4- Tykkelse av innfestning

Slike dimensjoner kan man kalle unormale ved bruk av karbonfiberlaminat. For å sammenligne, bruker man til vanlig en laminattykkelse på bare noen millimeter (Quilter). I og med at en skipspropell må tåle store påkjenninger i et tøft arbeidsmiljø, må man dimensjonere der etter. Dette byr på utfordringer i produksjon av propellblad i karbonfiberlaminat.

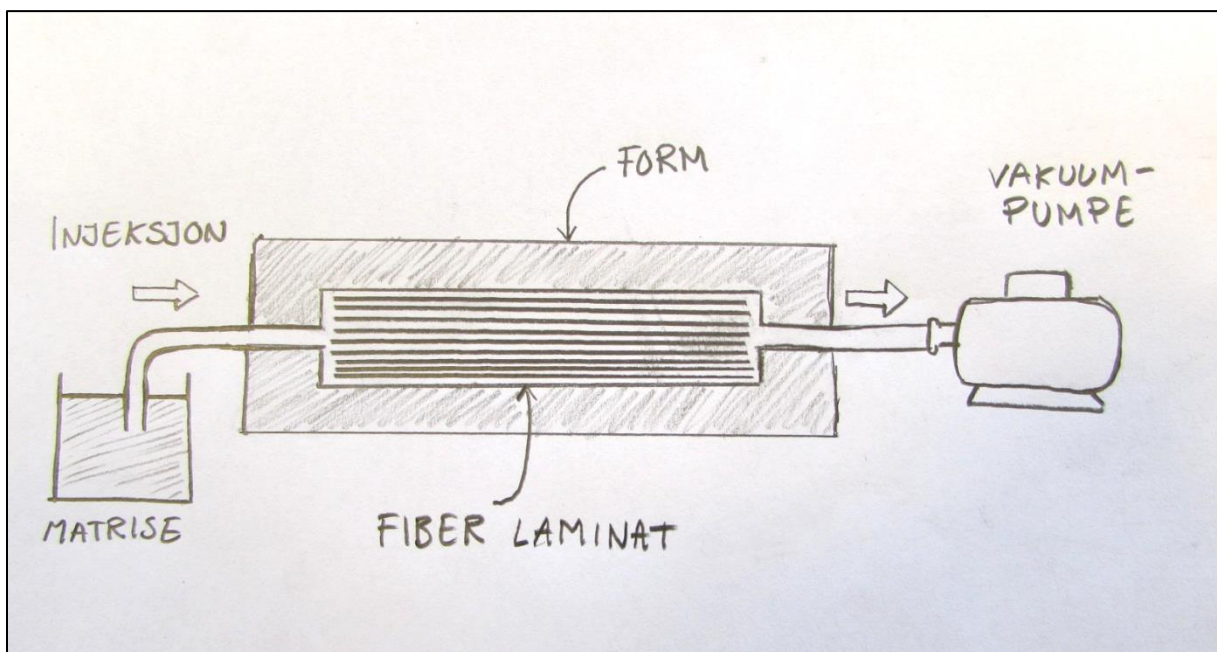
For å bedre kunne forstå utfordringer og valg av produksjonsmetode, må man forstå hva som skjer i mikrostrukturen.

Karbonfiber får man sydd sammen i matter fra ruller etter ønsket dimensjoner. Mattene kan være vevd på forskjellige måter, med forskjellig orientering. Fibrene som matten er satt sammen av kan variere etter ønsket kvalitet og pris. Man får karbonfiber med forskjellig E-modul, som gjerne avgjør hvor kostbare fibrene er. I strukturen til et propellblad kan man bruke flere forskjellige karbonfibre etter behov. For å bygge tykkelse i et propellblad trenger man ikke nødvendigvis høy kvalitet på karbonfibrene. Der det trengs forsterkninger kan man legge fibre med høy E-modul, og som kan ta opp mye last.

Måten kompositt materialet er fremstilt er ved å tilsette matrise til karbonfibernatter. I propeller vil matrisen gjerne være epoxy. For at man skal få et godt resultat under produksjon er det viktig å væte fibrene tilstrekkelig. Dette er viktig for å dekke alt fiberarealet med matrise, og

gode styrkeegenskaper for laminatet oppnås. Samtidig forsøkes det, å ikke få overskuddsmatrise, da dette vil gi reduserte egenskaper for laminatet. Det å forsikre seg om at man oppnår et slikt resultat er vanskelig, og avhenger helt av en god injeksjonsmetode av matrise. Når lagene med karbonfibermatter blir mange, blir det vanskeligere å væte fibrene gjennom hele tykkelsen. Løsningen på dette er å bruke vakuuminjeksjon.

Skal man produsere ett propellblad må det brukes en tosidig form som settes sammen etter at man har lagt karbonfibermattene. Dette vil skape tilstrekkelig trykk for å presse laminatet sammen, og vil resultere i en fin overflate som krever lite bearbeiding. Propellblader har en såpass komplisert geometri, at det vil være vanskelig å bruke noen annen produksjonsmetode. For eksempel vakuuminjeksjon ved bruk av en tett plastikkbag. En maskinert form etter propellbladets geometri brukes til å produsere flere propellblader på relativt kort tid. På formen har man innganger som er ment for tilførsel av matrise, i tillegg til en utgang hvor man monterer vakuumpumpe(r). Dette er vakuuminjeksjon. På inngangene suges epoxy igjennom formen helt til det ender opp ved vakuumpumpen. Med denne metoden kan man være fleksibel med å ha opptil flere innganger og utganger. I tillegg er det en miljøvennlig løsning siden det vil redusere avgasser under produksjon, da formen er tett.



Figur 5- Vakuuminjeksjon

---

Konsekvensene av å ikke få vætet fibrene tilstrekkelig, kan være store. Hvis det er luftlommer i strukturen mellom karbonfibermattene, kan det resultere i at man må vrake propellbladet. Strukturen i et CFRP-propellblad vil være skjør for svekkelser i strukturen. For å unngå svekkelser under produksjon, er det viktig å finne en injeksjonsmetode som gir tilstrekkelig vætting.

### **3.3.2 Kostnader**

Utvikling av en komposittpropell kan være en dyr førstegangsinvestering. Fiberkompositter er krevende å anvende som propellmateriale, ettersom det er mange faktorer som spiller inn på strukturen. Dette gjør også strukturen til fiberkompositter krevende å forstå. Tilegning av kunnskap om fiberkompositter kan både være tidkrevende og ressurskrevende. Tas det ikke hensyn til dette kan alternative løsninger være kostnadskrevende. Siden det kan resultere i ekstra materialkostnader ved feilaktig fiberorientering. Det kan også føre til dårlige produkter som er utsatt for materialsvikt under drift. For å redusere kostnadsaspektet ved komposittpropeller må man oppsøke aktører som har god erfaring og kunnskap om fiberkompositter.

## **3.4 Vedlikehold**

Propellen på et marinefartøy er en vital del, siden den står for fremdriften. Blir denne defekt vil man få redusert fremdrift, i verste fall ingen. En CFRP propell må kunne repareres eller skiftes slik at fremdrift blir opprettholdt hvis en skade skulle inntreffe. Karbonfiberlaminat kan være komplisert å reparere hvis det har fått en skade. Først om fremst fordi at det kan være krevende å gjenopprette fiberstrukturen. Reparasjon av karbonfiberlaminat være såpass kostbart at det ikke lønner seg å reparere. En gjennomgående faktor for CFRP propeller er at det vil gi en betydelig vektreduksjon i forhold til NAB propeller. Dette kan være fordelaktig hvis man må bytte propellblad hurtig i sjøen. Et propellbytte kan gjøres med NAB propeller, men operasjonen krever en del utstyr for å få justert den inn i posisjon. Her er det tiltenkt at propellbladet tilhører et fartøy av betydelig størrelse, der et propellblad vil veie mye. En betydelig vektreduksjon kan gjøre operasjonen enklere og redusere nedetid hvis propellen er ute av drift.



Figur 6- Eksempel på hvordan bytte av propellblader kan gjennomføres med dykkere

### 3.4.1 Kavitasjonserosjon

Kavitasjon oppstår når det lokale trykket på propellens overflate synker under vannets damptrykk. Det oppstår da en dampboble som vil implodere når det lokale trykket stiger. Denne implosjonen skaper en jettstråle med vann, og hvis implosjonen skjer nære propellens overflate, vil denne bli skadet. Kavitasjon emitterer også lyd, som vil være karakteristisk for den aktuelle propellen. I tillegg er det tap av energi når en propell produserer kavitasjon. En viktig faktor for marinepropeller er at den må ha gode kavitasjonsegenskaper. I den forstand at materialet også er motstandsdyktig mot erosjon som forårsakes av kavitasjon på propellbladene. Ut ifra en studie (Yamatogi, Murayama, Uzawa, Mishima, & Ishihara, 2011), sammenlignes NAB med epoxy. Epoxyen er forsterket med forskjellige fibre. I studien nyttes ultralyd for å skape kavitasjon på overflaten til prøvestykket. Hvert prøvestykke ble eksponert for kavitasjon i totalt 120 minutter. I løpet av denne tidsperioden ble prøvestykket veid hvert 15 minutt. Vekten før, underveis og etter testen avgjorde motstandsdyktighet i form av volumtap. Ut ifra

---

testresultatene er NAB mest resistent mot overflate-erosjon, mens aramid-forsterket epoxy er mest resistent av kompositt materialene, med et volumtap rundt 20 mm<sup>3</sup>. Tidsperioden prøvestykkene var under belastning var relativt liten. Fra resultatene har karbonfiber et volumtap fra 50-60 mm<sup>3</sup> og oppover, avhengig av type laminat (Yamatogi, Murayama, Uzawa, Mishima, & Ishihara, 2011, Figure 23). NAB viser ikke antydning til kavitasjonserosjon i denne testen, og viser dermed gode kavitasjonserosjonsegenskaper. Oppstår først er kavitasjonsskade, vil kavitasjon lettere kunne oppstå ved at det skapes undertrykk i materialskadene. Dette vil gi opphav til mer kavitasjonserosjon ettersom skadene blir flere og større. Skadene på overflaten av prøvestykkene som er utsatt for kavitasjon blir også studert gjennom et mikroskop i studien. Der resultatene viser at god adhesjon mellom matrise og fiber, og fibrenes evne til å absorbere sjokkbølger, gir bedre motstandsdyktighet mot kavitasjonserosjon. Testresultatene gir en indikasjon på at fiberkompositter har dårlige motstandsdyktighet mot kavitasjon. Komposittpropeller egner seg derfor best på fartøyer som ikke kaviteter nevneverdig, slik som på en undervannsbåt.

---

## 4 Kartlegging av egenskapene til et karbonfiberlaminat

### 4.1 Bakgrunn

I bacheloroppgaven vår ønsket vi å gjennomføre en testdel i tillegg til litteraturstudien. Dette gjør vi for å bedre kunne forstå karbonfiber og dets mekaniske egenskaper. Skulle vi gjennomført en mer omfattende test, ville vi valgt å teste en modellpropell av karbonfiber, for å kunne sammenligne den med en NAB-propell. I og med at vi er begrenset på tid i oppgaven blir det vanskelig å realisere en sånn test.

Valg av geometri på en testpropell er svært viktig. Før man produserer en testpropell må man vite hva den skal testes for. Her velger man gjerne en fartøystype som man ønsker å teste se på. Dette er da styrende for geometrien på testpropellen, siden forskjellige fartøy har forskjellige operasjonsområder. I den forstand, hvilken type skrog, hvilket turtall det går med, og hvilke hastighets områder fartøyet normalt jobber i. Her spiller flere faktorer inn som; forbruk av drivstoff, kavitasjon og virkningsgrad. Skulle vi fått et godt utbytte av en testpropell måtte vi valgt oss et fartøy på forhånd, og produsert en testpropell i karbonfiber med lik geometri. På den måten kunne vi sammenlignet dataene. Dette krever mye forarbeid og ressurser.

Derfor måtte vi finne en annen metode vi kunne bruke for å tilegne oss kunnskap, som var moderert etter tid og ressurser vi hadde tilgjengelig. Hvor vi kom fram til at vi kunne teste prøvestykker av karbonfiberlaminat, for å kunne si noe om hvordan strukturen i et propellblad av karbonfiber kan se ut. Karbonfiber har retningsbestemte egenskaper som gjør den ulik fra metaller som er isentropiske. Det har mye å si hvordan man bygger opp et propellblad med karbonfiber i ulike orientering, slik at den tåler belastningen den blir påtrykt, og opprettholde lang levetid.

### 4.2 Sammendrag

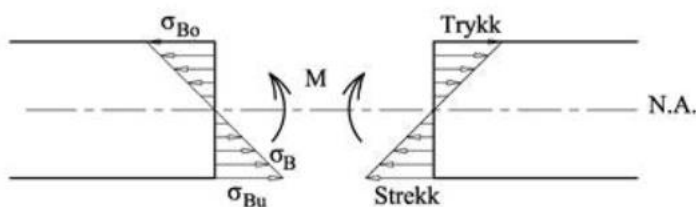
I materialstudien er det gjennomført to forskjellige bøyetesten på et karbonfiberlaminat med vinylester som matrise. Disse testene er henholdsvis en maksimal bøyetest og en stegvis bøyetest. Prøvestykkene som er brukt er fra samme laminat, men har tre ulike orienteringer. Rele-

vant teori blir presentert for å gi leseren et grunnlag til å betrakte resultatene fra testing. Videre begrunnes valg av testmetode og beskrivelse av gjennomføring. Resultat fra testing presenteres etterfulgt av diskusjon og betraktninger, og hypotesen blir besvart.

### 4.3 Hypotese

Prøveserie 2 og 3 er identiske ut ifra antall lag i hver retning. Forskjellen er plasseringen av  $A0(0^\circ)$  og  $A0(90^\circ)$  som er byttet om i strukturen (Prøvestykkene er kuttet vinkelrett på hverandre fra samme plate). Ved en strekktest tror vi at ville disse hatt tilnærmet identiske egenskaper fordi kraften fordeler seg over hele prøvestykker. Vi tenker at delaminering mellom  $0^\circ$  og  $90^\circ$  lag, kunne vært et problem under en slik test. Under bøyetesten antar vi at det vil være en forskjell i bøyepeningen som følge av at den vokser proporsjonalt med avstanden fra nøytralaksen. Kraften som de forskjellige fibrene opptar vil være avhengig av plassering, i og med at lagene med fiber ikke er symmetriske om nøytralaksen. Ideelt ville ensrettede fibre orientert i  $0^\circ$  gitt høyest bøyepening, men materialet ville da manglet egenskaper i andre retninger, og særlig ved  $90^\circ$  da matrisen vill vært eneste styrkegiver.

Det vi kan forvente er at nøytralaksen (ingen spenning) vil være forskjøvet i forhold til hverandre i prøveserie 2 og 3. Dette er fordi materialets oppbygning på trykk og strekk siden av aksens ikke er like. Det er vanskelig å vite hvor nøytralaksen ligger i hver enkelt prøvebit, men den ligger der hvor strekk går over i trykk.



Figur 7- Bøyepening i isotropisk materialet

Hypotese:

Vi tror at prøveserie 1 vil ha den største bøyepeningen før plastisk deformasjon. Dette fordi at det ligger langsgående ( $0^\circ$ ) fibre i ytterste lag på begge sider. Som vist i figuren over er spenningen proporsjonal med avstanden fra nøytralaksen, og langsgående fibre ytterst vil øke styrken til materialet. I prøveserie 2 og 3 er de ytterste lagene orientert i  $45^\circ$ , og vi tror at dette fører til plastisk deformasjon under lavere spenning enn ved  $0^\circ$ .



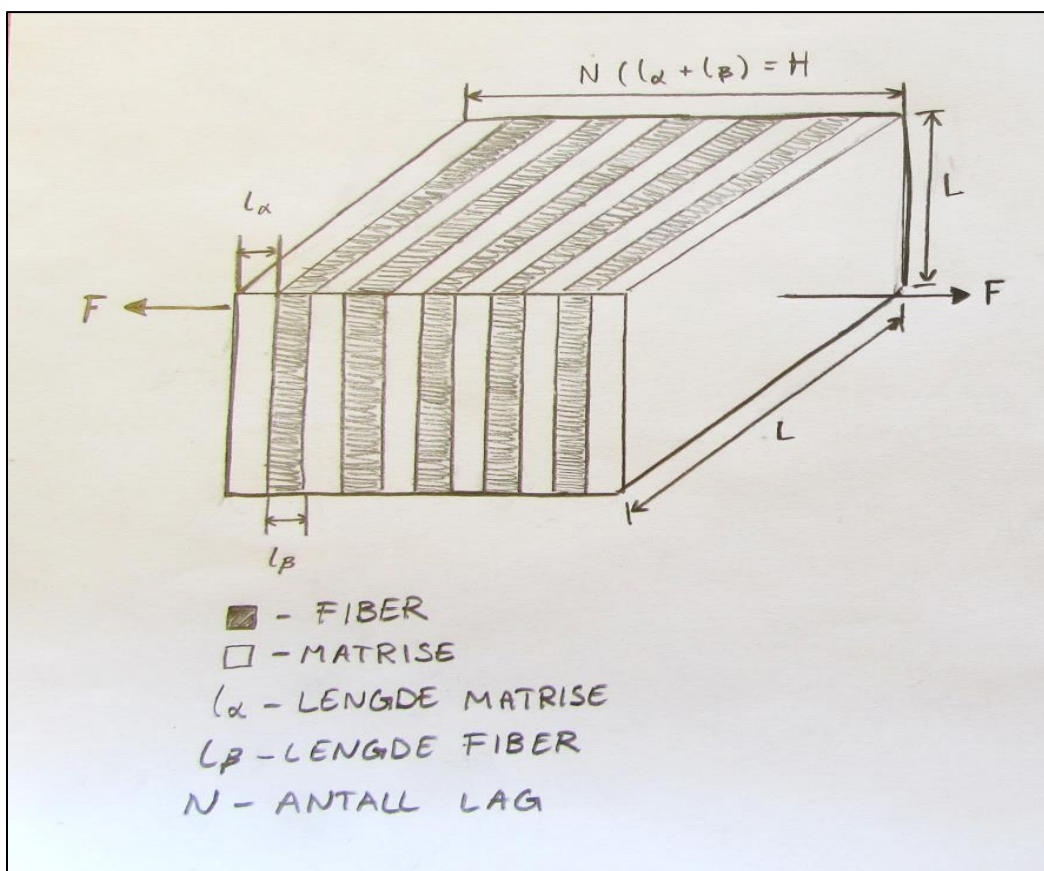
## 4.4 Teori

### 4.4.1 Hva er spesielt med fiberkompositter?

Kompositter består av to eller flere materialer som er bundet sammen, der en av fasene er kontinuerlige gjennom materialet. Fiberkompositter består av forsterkende fiber, og et bindende materiale. Når disse materialene settes sammen oppstår helt nye materialegenskaper, og de går fra å være selvstendige til å henge sammen. Kompositten har en E-modul, Poissons tall, tøyning, fiberfraksjon og bruddspenning som er mer kompliserte enn eksempelvis metaller. I dette avsnittet skal disse temaene diskuteres og sees opp mot bøyetestingen som allerede er gjennomført.

#### Iso-tøyning og iso-spenning

En kompositt kan være satt sammen i flere lag. La oss se for oss en ensrettet glassfiber prepreg, ferdig med bindemiddel. Hvis denne prepreggen ble kuttet opp i firkanter med lengde  $L * L$  og vi legger  $N$  antall prepreg oppå hverandre har vi laget et laminat med høyden  $H$ .



Figur 8- Iso-tøyning og iso-spenning

---

Dette laminatet kan bli belastet på to forskjellige måter. Den ene belastningen er langsmed laminatet. Kraften  $F$ , vil da fordele seg på tverrsnittet  $L \cdot H$ , men siden de forskjellige bestanddelene i laminatet (fiber og bindemiddel) har en ulik  $E$ -modul vil de oppleve forskjellig spenning. Dette gjør de selv om de tøyes like mye, og dette kalles iso-tøyning (courtney, 2005, s. 249).

Iso-spenning opptrer når kraften virker på tvers av lengderetningen til laminatet.  $\sigma = \frac{F}{(L \cdot L)}$  Da vil hvert enkelt lag måtte overføre lasten til neste lag, og alle vil oppleve den samme spenningen. Tøyningen vil være avhengig av  $E$ -modulen til de forskjellige lagene, og er derfor ulik fra fiber til bindemiddel. Dette kalles Iso-spenning (courtney, 2005, s. 249).

I en fiber kompositt, med designbelastning vil det typisk være iso-tøyning.

### **Fiberfraksjon**

Et Fiberkompositt består av fiber og matrise(bindemiddel). Disse kan opptre i forskjellige volumandeler, ettersom hvilken fiber som er brukt, diameteren på fibre, matrisen og støpemetoden. Denne volumandelen kalles ofte for volumfraksjon eller fiberfraksjon. Fiberfraksjonen kan regnes ut på flere måter, men den enkleste er hvis du har vekten på fibre pr kvadratmeter, og egenvekten til matrisen. Skjær ut en prøvebit, mål volumet til biten og legg den på vekten. Da har du alle parameterne for å regne ut

$$\text{volumfraksjon fiber} = \phi_f = \frac{V_{\text{Fiber}}}{V_{\text{Fiber}} + V_{\text{Matrise}}} \text{ og volumfraksjon matrise.}$$

For at kompositten skal ha høyere styrke enn matrisen, må fiberfraksjonen være over et visst nivå. Hvis man tilsette kun en fiber til en matrise, vil denne fiberen oppta mye av belastningen i starten, helt til den ryker. Den ryker fordi den har en vesentlig høyere  $E$ -modul enn matrisen, og vil derfor ta opp last ved en mindre tøyning. Det at «kompositten» nå har en defekt inni seg fører videre til svekkelse av resten av materialet fordi det vil oppstå en spenningskonsentrasjon i dette punktet. Poenget er at under en viss fiberfraksjon vil kompositten ha dårligere styrke enn om det bare var matrise. Den fiberfraksjonen kalles kritisk fiberfraksjon (courtney, 2005, s. 255). I en kompositt ønskes en så høy fiberfraksjon som mulig, men fortsatt med en kontinuerlig matrise. Med kontinuerlige ensrettede fibre kan en fiberfraksjon på rundt 70% oppnås, mens det for vevde duker er lavere. Slik som i skipskonstruksjoner, og eksempelvis teststykkene som vi har testet, varierer fiberfraksjonen en del gjennom materialet.

---

### Korte og lange fiber:

Det er mange måter å bygge opp en fiberkompositt på. Fritidsbåter kan blant andre være laget av kuttete glassfiber som sprayes på med en pistol. Disse fibre er korte og kan orientere seg tilfeldig innenfor x-y planet (A & F, 1993, s. 189), men kan også delvis orienteres i z planet. Disse fibre kan være av forskjellig lengde, og hvis de blir for korte kan dette påvirke materialet negativt. Fibere i en kompositt har noe som kalles kritisk lengde. Lasten som kompositten skal holde må fordeles fra matrisen til fibre. Hvis fibre er for kort vil de ikke kunne ta opp maks last, og fiberbrudd blir umulig. Figur 9- Diagramoversikt over spenningsdistribusjonen fra matrise til fiber. Spenning på y-aksen og fiberlengde på x-aksen. Merk hvordan pålastsonene i begge ender kan overlape hverandre ved korte fibre. Pålastsonen er halve den kritiske lengden. viser grafisk hvordan spenningen i fibre øker mot midten. Kompositten vi isteden ryke som følge av skjær i grenseflaten mellom komponentene eller i matrisen (courtney, 2005, s. 259).

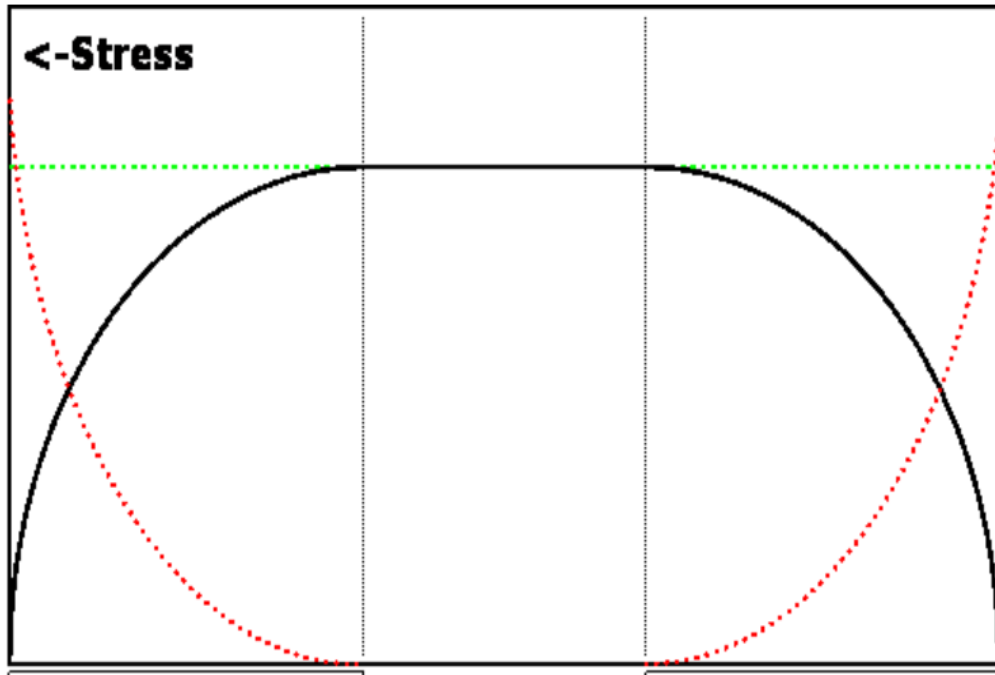
$$\text{Kritisk fiberlengde } l_c = R_f * \frac{\sigma_{11}}{\sigma'_{12}},$$

*hvor  $r$  = fiberradius*

*$\sigma_{11}$  = strekkspenning i fiber*

*$\sigma'_{12}$  = skjærkraften i grenseflaten eller i matrisen*

En fiber kan sies å være kort når pålastsonen dominerer.



Figur 9- Diagramoversikt over spenningsdistribusjonen fra matrise til fiber. Spenning på y-aksen og fiberlengde på x-aksen. Merk hvordan pålastsonene i begge ender kan overlappe hverandre ved korte fibre. Pålastsonen er halve den kritiske lengden.

### Elastisitet

Fiberkompositten vil ha en matrise som kan oppnå plastisk deformasjon, men fiberen i kompositten kan gå rett fra det elastiske området og rett i brudd, uten å ha en plastisk deformasjon. Hvis belastningen er i samme retning som fiberorienteringen er tøyningen i kompositt, matrise og fiber lik. Kraften i laminatet vil da fordeles mellom fiber og matrise, og vi får spenningen i kompositten.

$$\sigma_c = \sigma_f * V_f + \sigma_m * V_m$$

Og

$$E_c = V_f * E_f + V_m * E_m$$

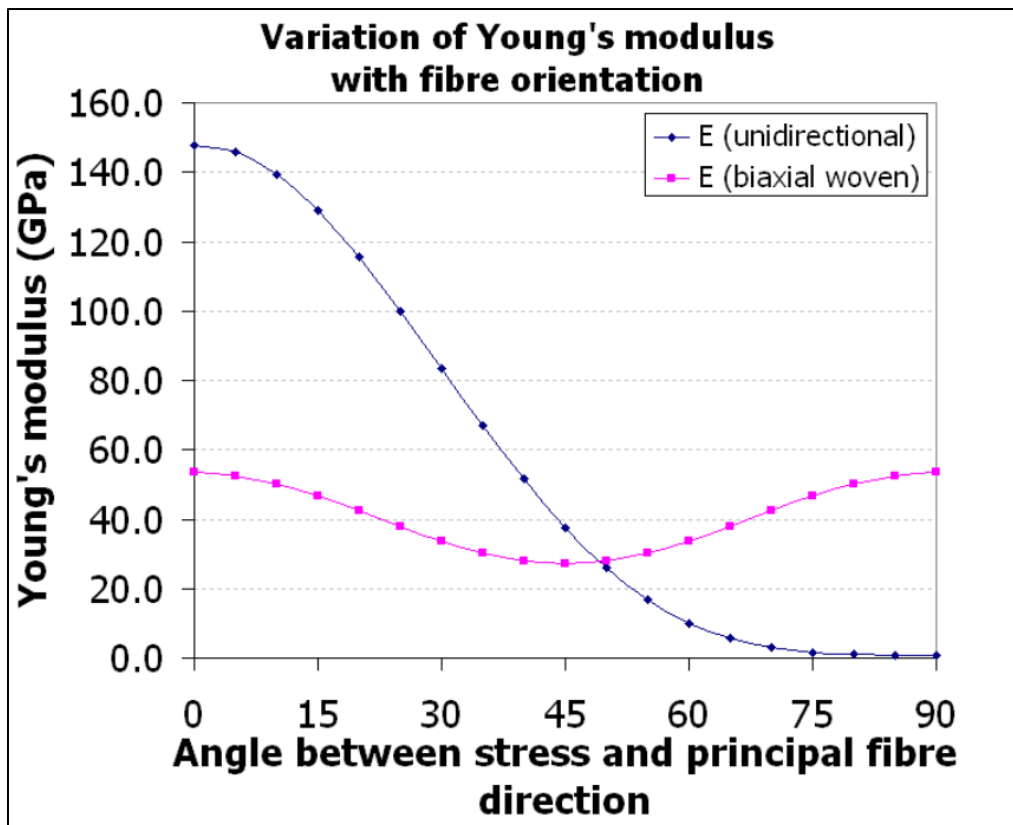
### E-Modul

E-modulen er en viktig materialegenskap. I en enkel kontinuerlig ensrettet fiberkompositt vil E-modulen være avhengig av retningen som kompositten belastes (courteney,

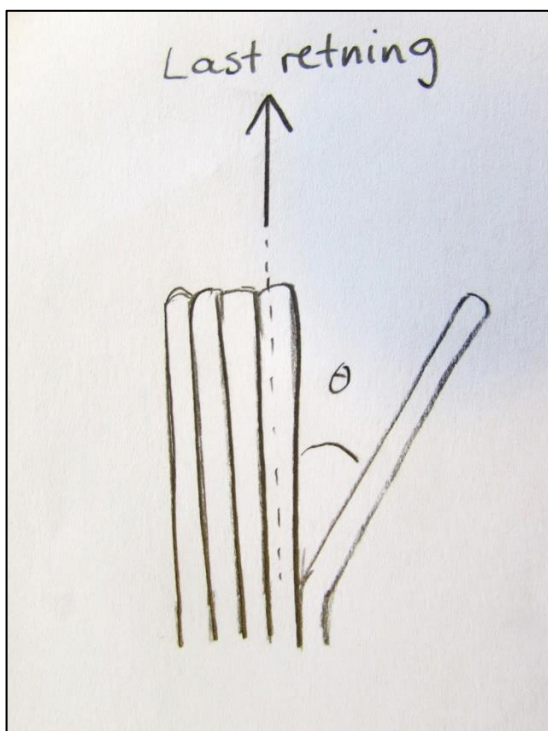
---

2005, s. 249). E-modulen til de vanlige fibre er høy i forhold til metaller som brukes i samme applikasjoner. Et eksempel er UHM karbon fiber, med en E-modul på 440+ [GPa], mens stål typisk har 200[GPa] og aluminium har kanskje bare 70[GPa]. Det skal sies at UHM fiber er dyrt. Det er klart at FRP er et potent materiale med høy E- modul, men hva om materialet ikke belastes langs fiberretningen? Under finnes en figur som forklarer hvordan E-modulen synker som en funksjon av kraftens angrepsvinkel i forhold til fiberretning. Hvis materialet belastes på tvers, vil E-modulen være lik matrisens E-modul, og fibre har ingen oppgave i materialet. Hvis fibre ikke orienteres riktig i forhold til spenningen som skal opptas vil materialet ha en dårligere E-modul. Denne negative endringen skjer etter få grader feilbelastning. Det kan være flere ting som kan forårsake dette. Det ene er rent produksjons teknisk, hvor fibermattene kan oppleve en strekk slik at det opprinnelige designet forskyves, at mattene orienteres feil i støpeformen, eller at designet er dårlig. Mattene kan for eksempel vris eller legges med feil retning, gjerne bare med noen graders forskjell fra opprinnelig plan. Det andre er de spenningene som faktisk oppstår i den ferdige komponenten. Disse er ofte vanskelige å kartlegge på forhånd, og kan dessuten være skiftene både i retning og styrke. For en propell vil spenningsbildet være svært komplekst og varierende med medstrøms felt, værforhold, fart, turtall og geometri.

I et komposittmateriale som inneholder flere kontinuerlige ensrettede lag, vevde duker og matrise, vil det bli mange E-moduler å ta hensyn til. Dette blir et særdeles komplisert regnestykke å sammenstille.



Figur 10- Variasjon av E-Modul som en funksjon av fiberorientering.



Figur 11-Illustrasjonen viser fiberdefekt, hvor fibre fraviker fra lastretning.

---

**Poissons tall:**

Poissons tall er et forholdstall som sier noe om tøyningen i tverretning i forhold til lengderetning når belastningen er i lengderetning. For kompositter kan denne ofte variere gjennom de forskjellige lagene i laminatet men også i forhold til retningen som lasten påtrykkes.

$$\nu_{12} = \phi_f * \nu_f + (1 - \phi_f) * \nu_m, \text{ der } \phi = \text{fiberfraksjon}$$

**Retningsorientering:**

Tidligere er det nevnt at orienteringen til fibrene i kompositten er av ytterste viktighet for å oppnå best mulig egenskaper. Dette skal nå eksemplifiseres gjennom at det sammenlignes kontinuerlige ensrettede mot tilfeldig orientert 1plan og tilfeldig 2 plan kompositter.

$$E_1 = E_2 \approx \frac{3}{8} * E_{maks}$$

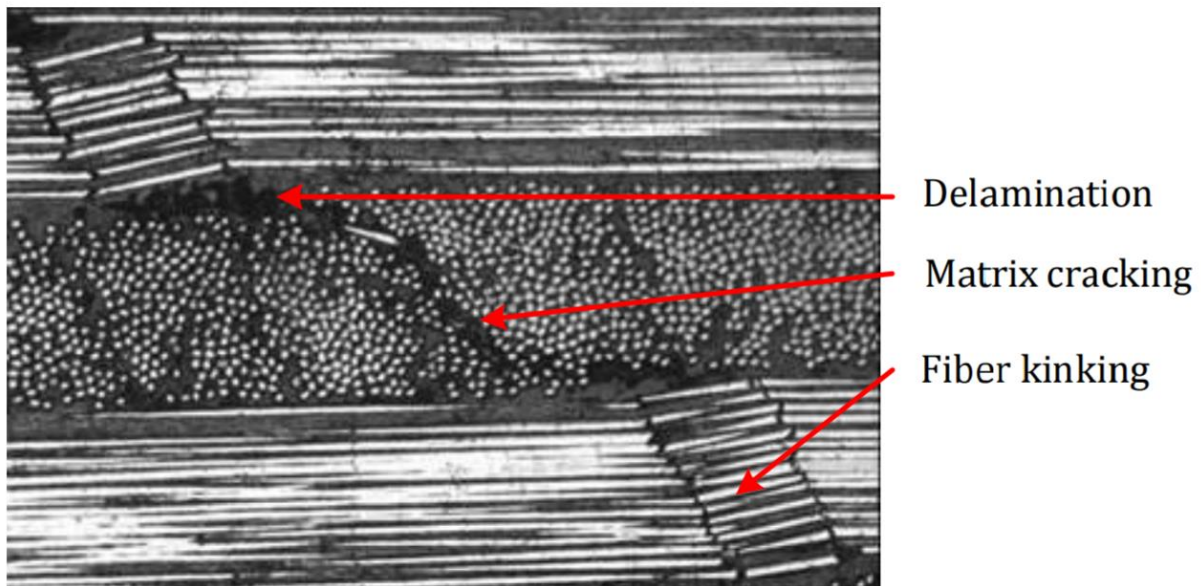
$$E_1 = E_2 = E_3 \approx \frac{1}{5} * E_{maks}$$

*Der  $E_{maks}$  er E – modulen i lengderetning*

Slik som det framgår av regnestykke over, vil E-modulen ved tilfeldig orientering i tre plan, være så mye som  $1/5=20\%$  av E-modulen i lengderetning. Ved å feil konstruere en kompositt kan dårlige egenskaper oppnås for en dyr penge. Det er derfor minst like viktig å bruke ressurser på oppbygningen av kompositten, som innkjøp av gode fibere og matrise. (eksempelet er hentet fra forelesning i fiberkompositter ved høghskolen på Vestlandet)

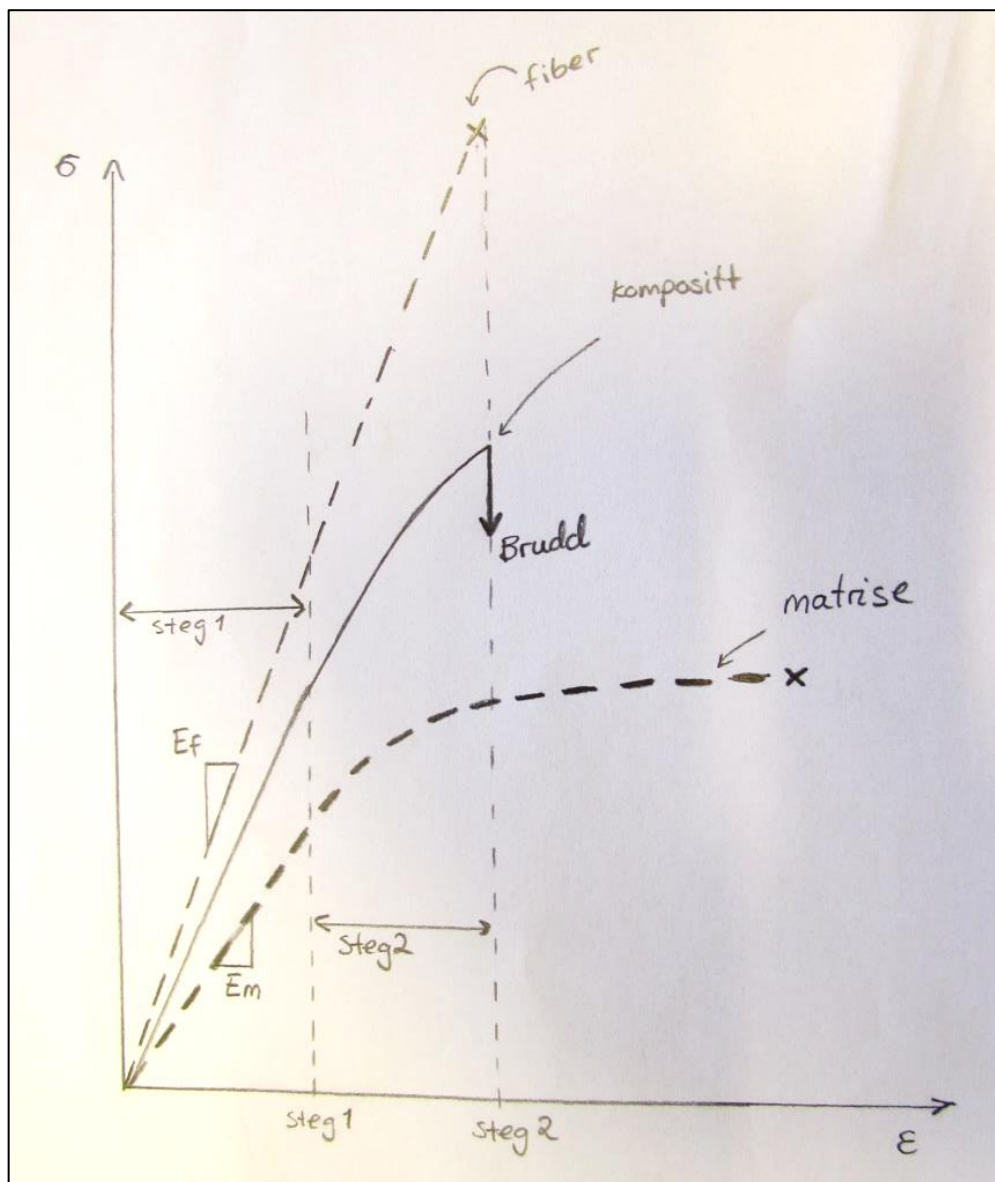
#### 4.4.2 Feilmodi i kompositter

For å forstå hvilken svikt som skjer i et kompositt under en bøyetest vil numerisk analyse være nødvendig. Dette er ikke gjort i vårt tilfelle, og vi kan derfor ikke si noe sikkert om hva som skjer inne i prøvebitene når vi observerer varig endring. Det vi derimot kan gjøre er å diskutere rundt hvilken svikt som kan oppstå. Kompositter kan miste sine egenskaper i flere forskjellige feilmodi, litt som med metaller som kan ha seigbrudd eller sprøbrudd. I bøyetesten har gjennomført vil materialet bli utsatt for både strekk og trykk. Dette gir mulighet for flere feilmodi. For strekk kan vi få brudd i fibere. Dette vil skje gradvis, ettersom noen fibere naturlig vil være plassert og orientert slik at de tar opp mer last enn andre. Fiberbrudd vil høres ut som en hel pakke spagetti som knekkes. Uansett hvor fort du gjør det vil noen spagetti strå ryke før andre. Bindingssvikt mellom fiber og matrise vil kunne oppstå, og dette er ofte referert til som delaminering. Matrisen kan sprekke, for eksempel i områder med høy spenningskonsentrasjon (Shenoi & Wellicome, 1993, ss. 178-196) Under trykk kan det oppstå noe som på engelsk heter «fiber kinking». Dette er en knekkmodi der fibrenes ujevnheter sammen med matrise svikt fører til feil i et felt slik som vist i figuren under.



Figur 12- Forskjellige feilmodi i fiberkompositter, fiber kinking

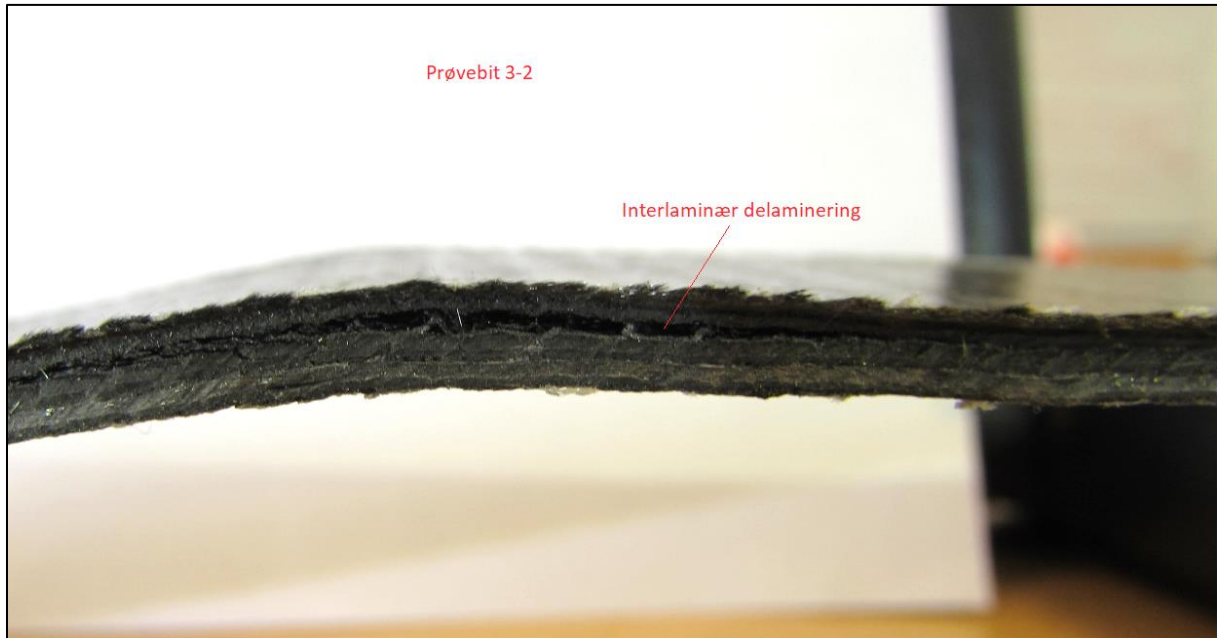




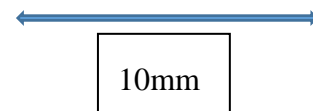
Figur 13- Grafisk fremstilling av mekaniske egenskaper for bestanddeler og kompositt

Nå som fibersvikt er dekket må vi se på matrisen. Forskjellige matriser har forskjellige egenskaper. Felles for de alle, er at den strukturelle integriteten til kompositten er avhengig av matrisens egenskaper. Matrisen har som regel lavere strekkfasthet enn fiberen, men høyere elastisitet. I en kompositt er matrisens oppgave å holde fibre sammen, og fordele lasten utover. Matrisen kan få flere typer svikt når materialet blir belastet. Når matrisen mister sin adhesjon til fibre, kalles dette delaminering, og dette skjer som følge av skjærkreftene som oppstår i grensesjiktet. Delaminering illustreres i figur 12. Etter delaminering klarer ikke lenger matrisen å fordele last til eller fra det rammede fibre og komposittens egenskap er svekket. Interlaminær delaminering er en delaminering hvor matrisen mellom to eller flere lag med fiber

svikter. Da vil disse lagene miste kontakten og styrken i materialet er kompromittert. Interlaminær bruddseighet er derfor en viktig egenskap hos en matrise. Kohesjonen i matrisen er en annen måte å beskrive selve styrken til matrisen.



Figur 14: Interlaminær delaminering



#### 4.5 Valg av testmetoder

For å bygge god kunnskap rundt materialet karbonfiber, burde det gjøres varierte og omfattende tester. Ved å gjennomføre flere forskjellige og relevante materialtester gir dette en bredere forståelse av materialets mekaniske egenskaper. Testene burde gjøres på prøvestykker med forskjellige orientering, og på mange prøvestykker for hver orientering. Dette er avgjørende for å kunne forstå materialet. Materialtestingen i dette bachelor studiet er en begrenset kartlegging av et karbonfiberlaminat, grunnet tid og ressurser som var tilgjengelig. Testingen i studiet gjøres for å skape en grunnleggende kunnskap om karbonfiber, for videre å skape et miljø for dette i Sjøforsvaret.

For å velge en testmetode er det viktig å forstå belastningen en propell opplever. Dette gjøres best ved å studere spenningsanalyser av skipspropeller, og forstå miljøet propellen jobber i. Sentripetalakselerasjonen forårsaker et strekk i propellbladet. Strekket vil være proporsjonal til akselerasjonen og variere med turtall.

---

$$F = m * \alpha \quad , \quad \alpha = \omega^2 * r$$

Hvert propellblad produserer et skyv ved å gi vannet en hastighetsøkning. Denne skyvekraften vil etter Newtons tredje lov ha en lik, men motsatt rettet motkraft. Denne motkraften vil bøye propellbladet, og det vil oppstå en bøyespenning som vokser mot roten av bladet. Denne spenningen kan variere etter hvordan vannets innstrømningshastighet og retning endres, og kan være brutal mot en skipspropell. Her vil materialet oppleve både strekk og trykk under bøying. Karbonfiber egner seg ikke særlig godt under trykkbelastning. Derfor må det tas spesielt hensyn til trykkbelastninger under en design-fase av en kompositt propell.

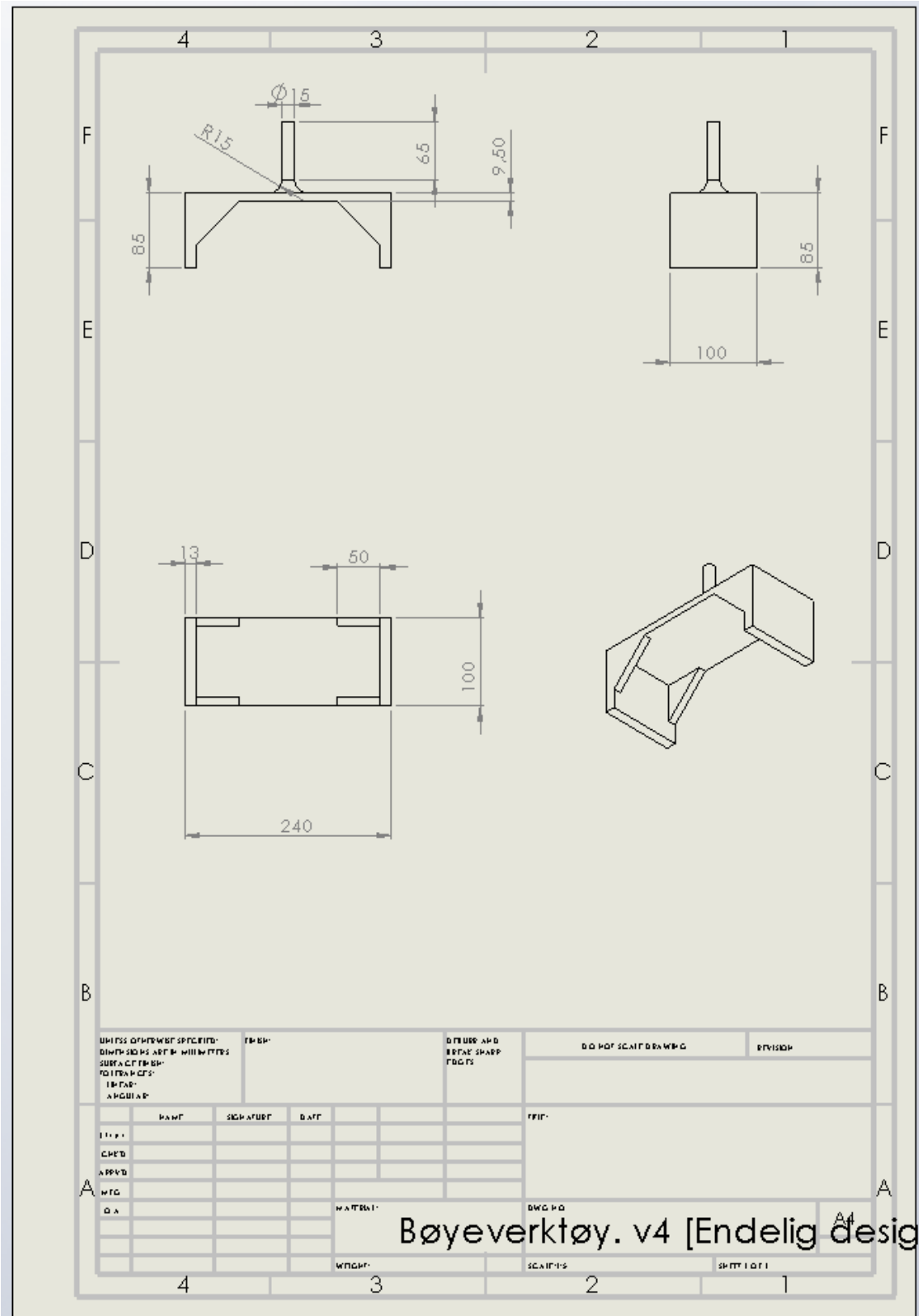
Spenningsbildet til en skipspropell er komplekst og krevende å kartlegge. Dette med tanke på at en propell kan befinne seg i mange forskjellige driftssituasjoner.

Spesielle forhold der propellen opplever unormal stor belastning, slik som fra forover til fullt akterover, må også tas hensyn til når man tester spenningsgrensene til materialet. Slike manøveren er et marinefartøy helt avhengig av å kunne mestre.

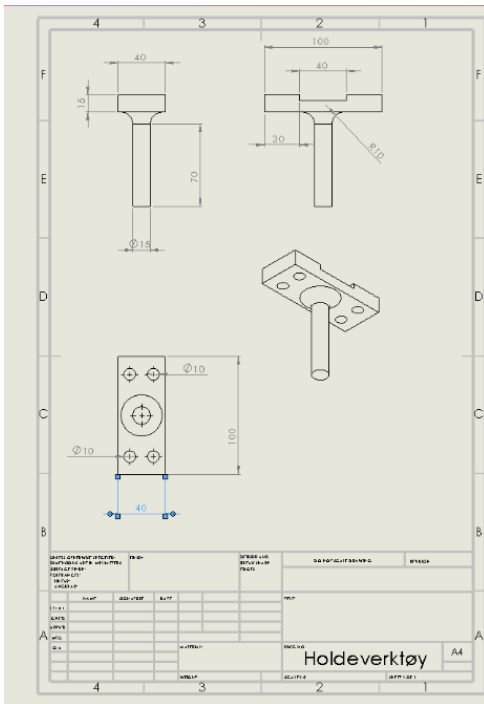
I denne materialstudien legges det vekt på bøyespenning. Dette er et valg basert på tilgjengelig tid og ressurser, men også hvilke resultater vi får ut av testing. Under bøyeprøving blir prøvestykker utsatt for både strekk og trykk, det gir muligheter til å studere hva som skjer med materialet under begge tilfeller. Dette gjøres ved å bruke et forholdvis enkelt oppsett med test maskin og test verktøy.

#### **4.5.1 Valg av testverktøy**

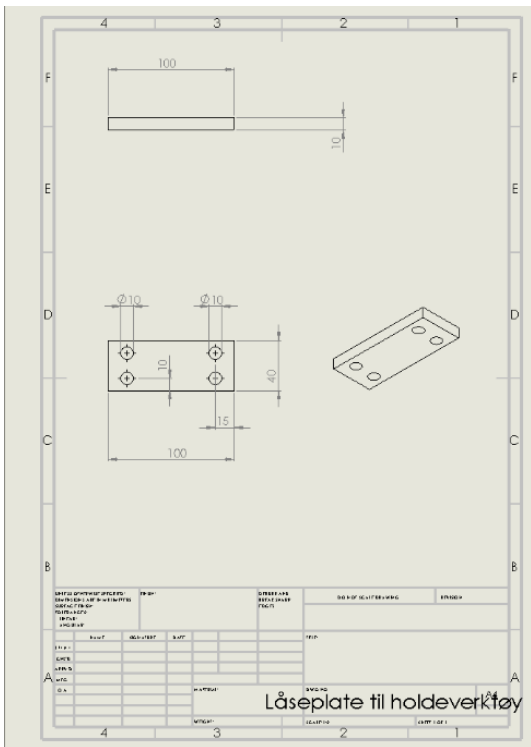
Ressursene brukt til testing i materialstudien er utstyr som står på materiallaben til Høgskolen på Vestlandet. Maskinen brukt under testing er en INSTRON 8801, en hydrauliskdrevet testbenk som kan brukes til strekk og trykk testing. Maskinen kan spenne opp prøvestykker eller testverktøy ved hjelp av en hydraulisk kjoks. Vi har designet og produsert vårt eget verktøy som kan brukes til bøye test. Verktøyet baserte seg på å enkelt kunne spennes opp i maskinens hydrauliske kjoks. Anordningen for innspenningen av prøvestykkene skulle simulere innfestningen et propellblad ville ha i et propellboss.



Figur 15- Testverktøy overdel



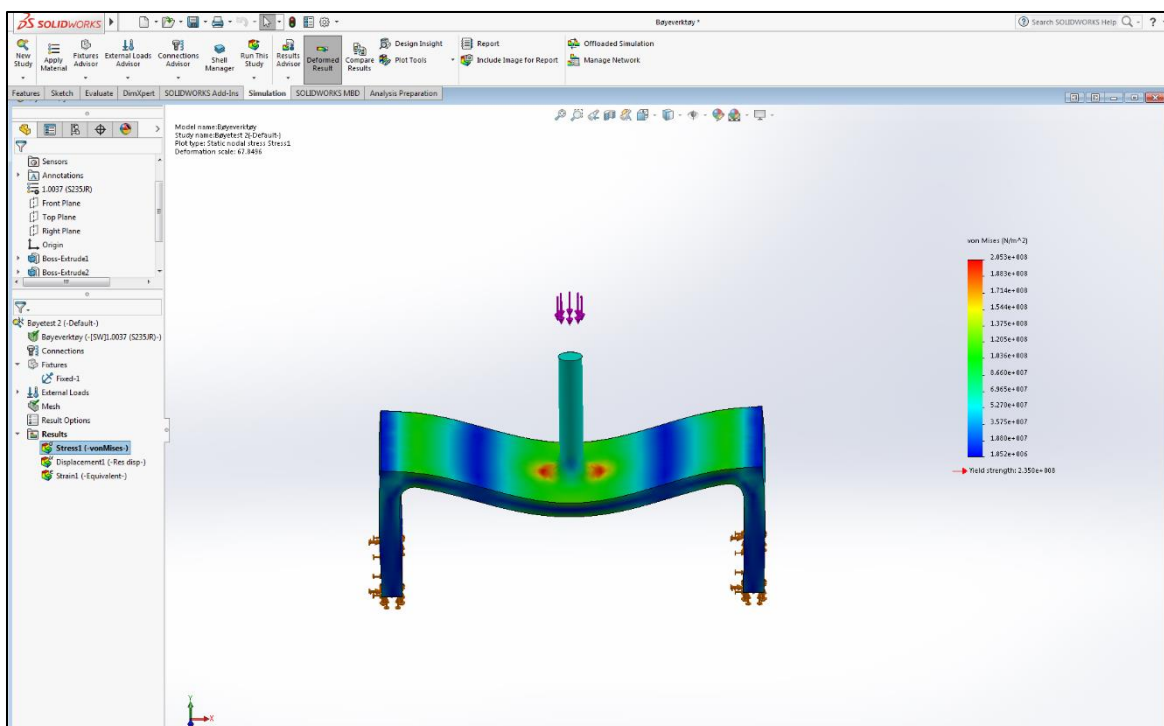
Figur 16-testverktøy,  
innspenningsmekanisme for prøvestykke



Figur 17-testverktøy, innspenningsmekanisme, låsebrakett

På bildene ovenfor vises designet på testverktøyet som var tiltenkt testen i første omgang. Figur 15- Testverktøy overdel, viser også hvordan verktøyet spennes opp i maskinen ved hjelp av en 15mm aksling.

Testverktøyet ble designet i SolidWorks, hvor belastningen verktøyet vil få, enkelt kunne simuleres. Simuleringen ble brukt for å komme fram til et design der verktøyet ville være sterkt nok til å håndtere 10KN trykk

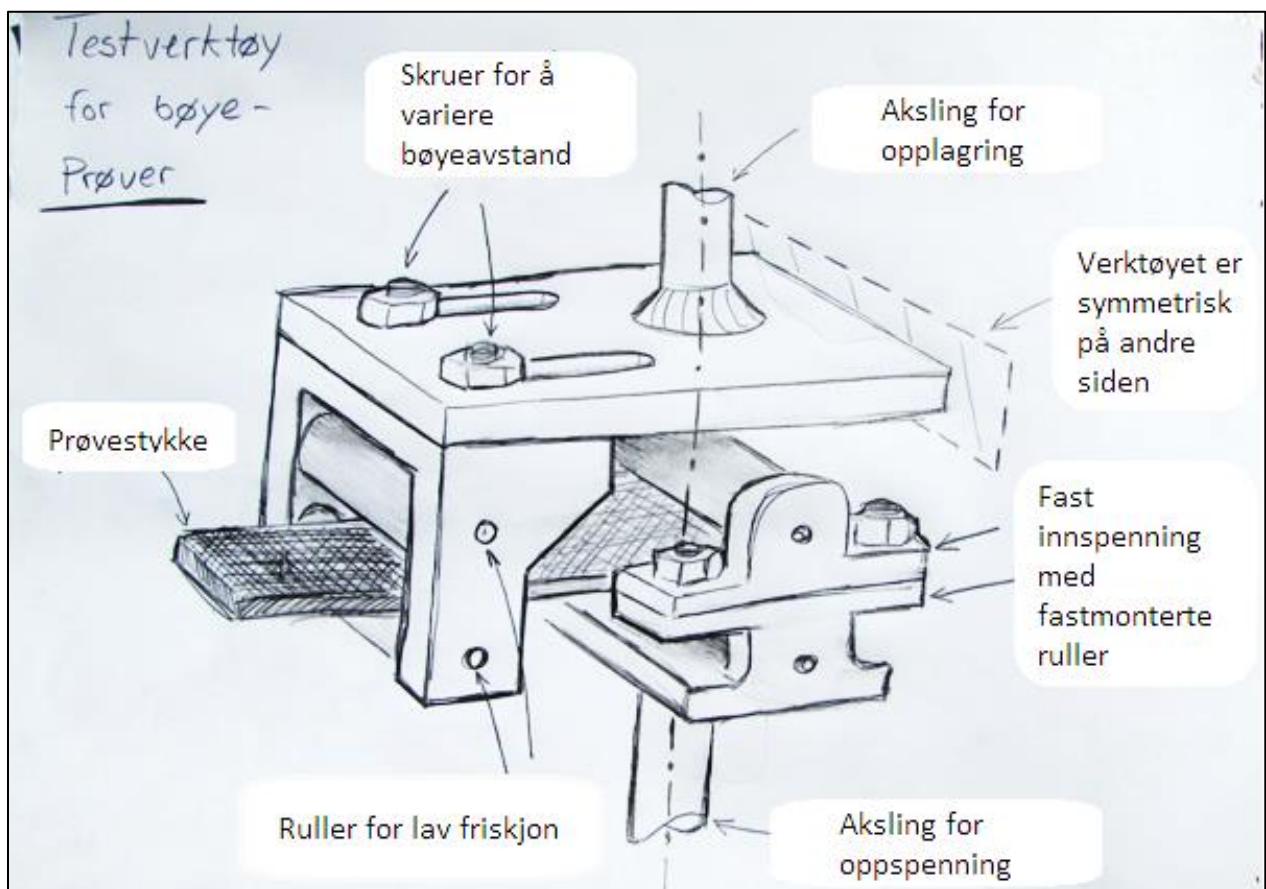


Figur 18- En prototype av det endelige designet gjennomgår en Spenningsanalyse i SOLIDWORKS

Testverktøyet som ble designet viste seg å ikke være tilfredsstillende for testene som skulle gjennomføres. Problemet var at opplagringen ville gi for stort friksjonsbidrag. I og med at et propellblad er fast innspent ved bosset, men fritt opplagret ved tuppen av bladet. Blir det for stort friksjonsbidrag i opplagringen, kan det holde igjen prøvestykket og gi uønsket belast-

ning. Det ble konkludert med at kontaktflatene på prøvestykket måtte bestå av ruller med finmaskinerte overflater. Videreutvikling av det egendesignede testverktøyet eksemplifiseres i skissen under.

Siden designet på testverktøyet ikke var tilfredsstillende, ble det brukt ISO-standard bøye-verktøy under materialtesting. Dette ga en ønskelig opplagring, i tillegg til at testen er lettere å reproducere med et standard verktøy.



Figur 19-Vidreutvikling av testverktøy

## 4.5.2 Prøvestykker

Karbonfiberlaminatet vi bruker i testen er produsert av Umoe Mandal AS. Et firma som driver med produksjon av båtskrog i komposittmaterialer, og som blant annet har produsert skroget til Skjold- klassen og Hinnøy-klassen.

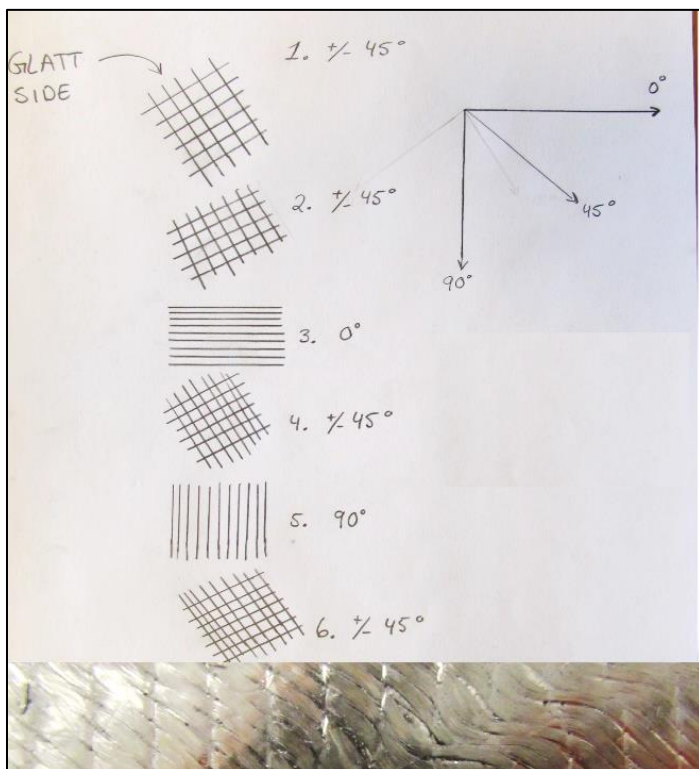
Karbonfiberlaminatet vi fikk tildelt av Umoe Mandal er produsert med Vinylester. Dette er en matrise som er ofte brukt innenfor båtbygging i karbonfiber og har god bestandighet mot kjemikalier. Produsenten som leverer karbonfiber mattene er SAERTEX. Laminatet er bygd opp av to forskjellige karbonfibermatter:

A0 – Sydd ensrettede-karbonfiber matte:  $450 \text{ g/m}^2$ .

AS – vevd karbonfiber matte  $\pm 45^\circ$ :  $450 \text{ g/m}^2$ .

Alle prøvestykkene vi bruker kommer fra samme laminat, som er bygd opp av seks lag med fiber.

Laminatet har oppbygning: AS – AS – AO ( $0^\circ$ ) – AS – AO ( $90^\circ$ ) – AS



Figur 20- Fiberorientering 2. Orientering 1 og 3 kan bestemmes ved hjelp av koordinatsystemet. Orientering 1 står  $45^\circ$ , og orientering 3 står  $90^\circ$  grader på prøvestykke på bildet.



---

De ulike prøvestykkene er skjært ut på følgende måte, ved Umoe Mandal AS: (orienteringen i figur 20 brukes som referanse)

Serie – 1: 45°

Serie – 2: 0° (referanseretning)

Serie – 3: 90°

Matrisen som er brukt er:

DION 9102, vinylester, fra produsent; Reichold

#### 4.6 Gjennomføring av maks bøyetest

Testingen startet med maksimal bøyetest. Testoppsettet er slik at det vil oppstå gliding mellom prøvestykket og de to rullene som det ligger på. Friksjonen som prøvestykket vil ha med glideflaten på opplagringsrullene burde være så liten som mulig. Derfor ble den glatte flaten på prøvestykket lagt mot glideflaten. Testmaskinen ble stilt inn av operatøren slik at hastighe-ten var 5mm/s frem til maskinhodet møtte 20N motstand i prøvestykket, for at den deretter skulle senke farten til 5mm/min. Distansen mellom opplagringsrullene ble justert til 170mm, ettersom dette var et passende mål til de 250mm lange prøvestykkene.



Figur 21- Midten måles opp, slik at prøvestykket ligger sentrert mellom rullene.

Første testen ble kjørt, og vi oppdaget raskt at hastigheten som maskinhode hadde etter 20N motstand var mye høyere enn 5mm/min. Det viste seg at operatøren hadde sett feil, og stilt inn farten til 5mm/s også i nedbøyningsfasen. 5mm/min var hastigheten som (Yamatogi, Murayama, Uzawa, Mishima, & Ishihara, 2011) brukte i sin studie av komposittpropeller, og ønsket var å kunne sammenlikne med disse. Testserien med 5mm/s ble gjennomført med alle tre orienteringene. Fartsfeilen førte til diskusjon i gruppen rundt hvilken nedbøyningshastighet som var riktig å bruke. En propell vil oppleve en varierende belastning i løpet av en omdreining. Bøyningen som skjer ved denne varierende belastningen vil skje hurtig, og ble derfor ansett som uaktuell å gjenskape. Et viktig moment som kom opp i diskusjonen var hvordan observasjoner av lyd, sprekker og deformasjon i materialet skulle gjøres. Disse observasjonene ville bli lettere med lavere nedbøyningshastighet, og derfor ble 1mm/s valgt.

Det ble underveis observert et glassfiberlag på overflaten(oversiden), og denne antas å være en offerduk. Denne kom til syne når materialet fikk brudd, da fibre tydelig var hvite.

Prøvestykkene ble målt, og inspisert for skader som kunne påvirke testresultatet.

1-x, 2-x og 3-x er henholdsvis orientering 1, 2 og 3.

Tykkelsen ble målt på seks punkter og et gjennomsnitt ble regnet ut. Punktene besto av 4 hjørner og begge sider midt på prøvestykket.

Prøvestykke	Tykkelse[mm]	Bredde[mm]
1-1	3,05	40,5
1-2	3,05	40,55
1-3	3,05	40,56
1-4	3,00	40,40
1-5	3,00	40,45
1-6	3,10	40,30
1-7	3,00	40,60
1-8	3,00	40,50
1-9	3,00	40,55
1-10	3,05	40,40
2-1	3,65	40,00
2-2	3,35	40,00

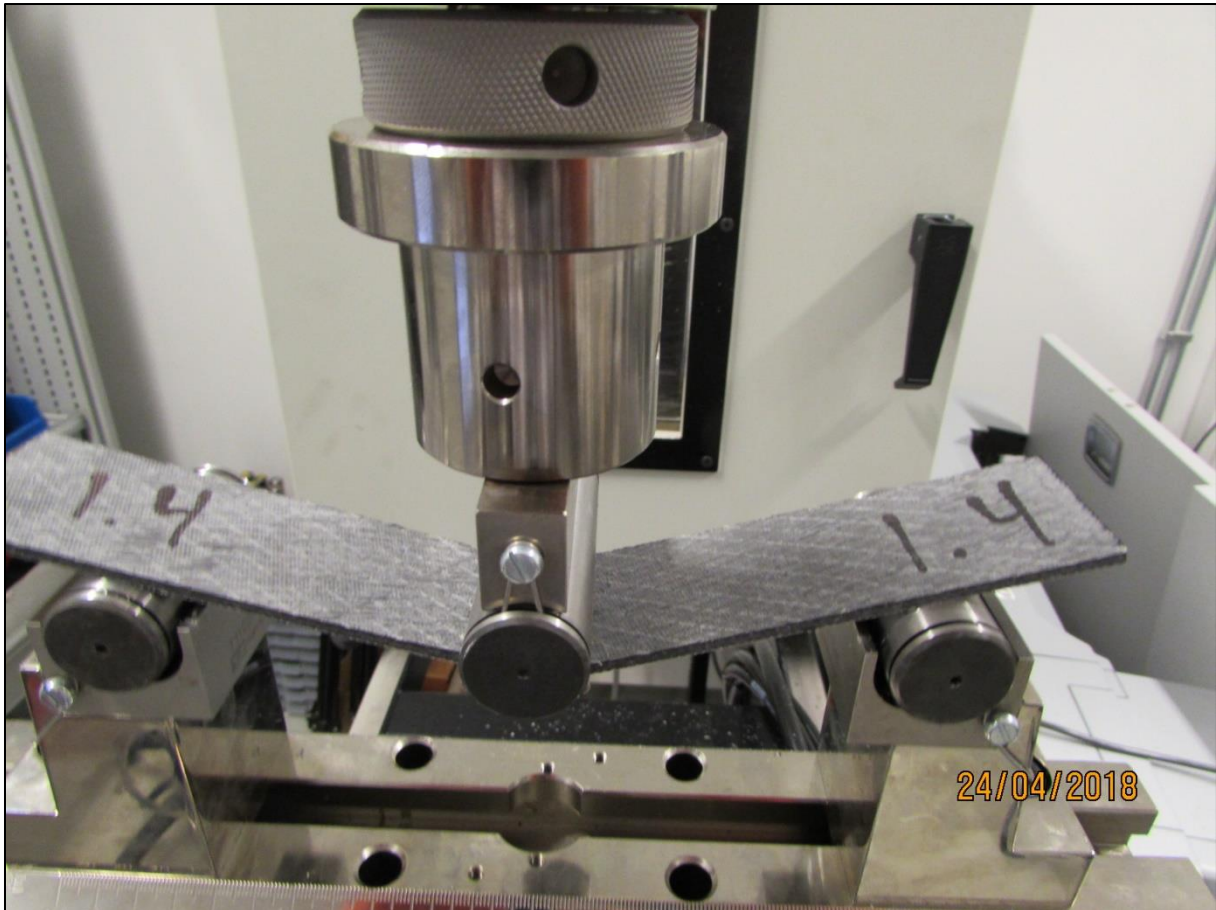
2-3	3,40	39,75
2-4	3,00	39,60
2-5	4,20	40,00
2-6	3,80	39,95
2-7	3,05	39,85
2-8	3,75	40,00
2-9	3,10	38,35
2-10	4,30	40,00
3-1	3,00	39,55
3-2	3,00	39,90
3-3	2,90	39,70
3-4	2,80	39,50
3-5	3,25	40,00
3-6	3,25	39,80
3-7	2,79	39,00
3-8	2,75	40,30
3-9	2,80	39,60
3-10	3,18	39,60

Tabell 3-Tykkelse og bredde for prøvestykkene

Prøvestykkene viste ved måling stor variasjon i tykkelse, enda de kom fra samme plate. Platen var bygd opp av 6 lag med karbonfiber og vinylester. Dette ga indikasjoner på at fiberfraksjonen var forskjellig fra prøvestykke til prøvestykke, men også forskjellig innad i prøvestykket. Fiberfraksjonen ble antatt lik gjennom prøvestykket for enkelhets skyld.

Det ble foretatt i alt ni tester av maks nedbøyning:

Tre prøvestykker fra hver orientering ble bøyetestet med 1mm/s.



Figur 22- Maksimal bøyetest prøvebit 1-4

Testene ga ut rådata i form av en Excel-fil for hver kjøring av maskinen. Her var kraft og distanse registrert.

Både kraften og distansen ble plottet med negativ verdi. For å få en graf på positive akser måtte begge disse dataseriene inverteres. Dette ga en kraft-nedbøyning graf. For å måle nedbøyningen av prøvestykkene ble utbøyningens nullpunkt satt ved 20N kraft. Etersom nedbøyningsmålingene ble startet lenge før dette punktet, ble det lagt til en korrigerende konstant i distanse kolonnen i all test dataene. For å ta hensyn til prøvestykkenes varierende tykkelse, ble kraften gjort om til spenning ved formelen:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{M*6}{b*h^2}, \quad W = \frac{b*h^2}{6}, \quad M = \frac{1}{4} * F * L$$

---

W = motstandsmoment mot bøyning

F = påtrykt kraft på prøvestykket

L = lengden mellom opplagringene

M = momentet som påtrykker prøvestykket

$\sigma$  = bøyespenning

h = tykkelsen på prøvestykket

b = bredden på prøvestykket

Volumfraksjonen var en naturlig del av forberedelsene til tolkning av resultatene. Volumfraksjonen fiber har en stor innvirkning på materialegenskapene til et fiberkompositt. For mye matrise vil resultere i et svakere materiale, og da kanskje særlig lokalt i enkelte konstruksjoner, slik som innvendige hjørner.

Fiberfraksjonen ble regnet ut ved hjelp av følgende:

- Vekten til prøvestykke
- Egenvekten til matrisen, SG=1,05
- Dimensjonene til prøvestykke
- Arealvekten til karbonfibermattene

$$SG_m = 1,05$$

$$\rho_m = \frac{1,05}{\rho_{H2O}}$$

$$\text{Arealvekt fiber} = 450 \frac{g}{m^2}$$

$$m_f = L * B * 6 [\text{lag}] * 450 \left[ \frac{g}{m^2} \right]$$

$$m_m = m_{tot} - m_f$$

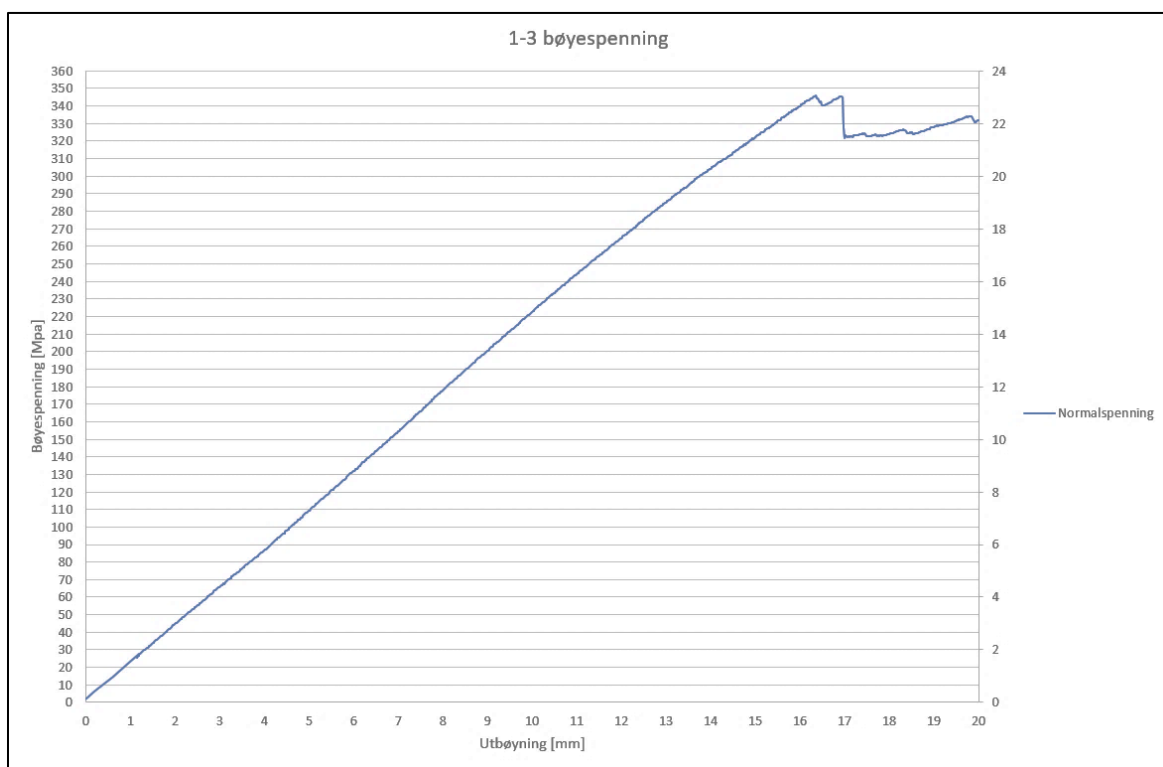
$$V_m = \frac{m_m}{\rho_m}$$

$$V_f = V_{tot} - V_m$$

$$\phi_f = \text{fiberfraksjonen} = \frac{V_f}{(V_f + V_m)}$$

Under forsøkene var det vanskelig å observere på den løpende grafen hva som faktisk skjedde. Oppløsningen var ikke tilstrekkelig god, og aksene endret seg kontinuerlig. Under forsøket var det usikkerhet rundt hva som var viktig å observere på grafen, så dette arbeidet ble gjort etter alle forsøkene var gjennomført. Det ble ved noen utvalgte forsøk notert ned knekkelyder og synlig sprekkdannelse mellom lag i laminatet.

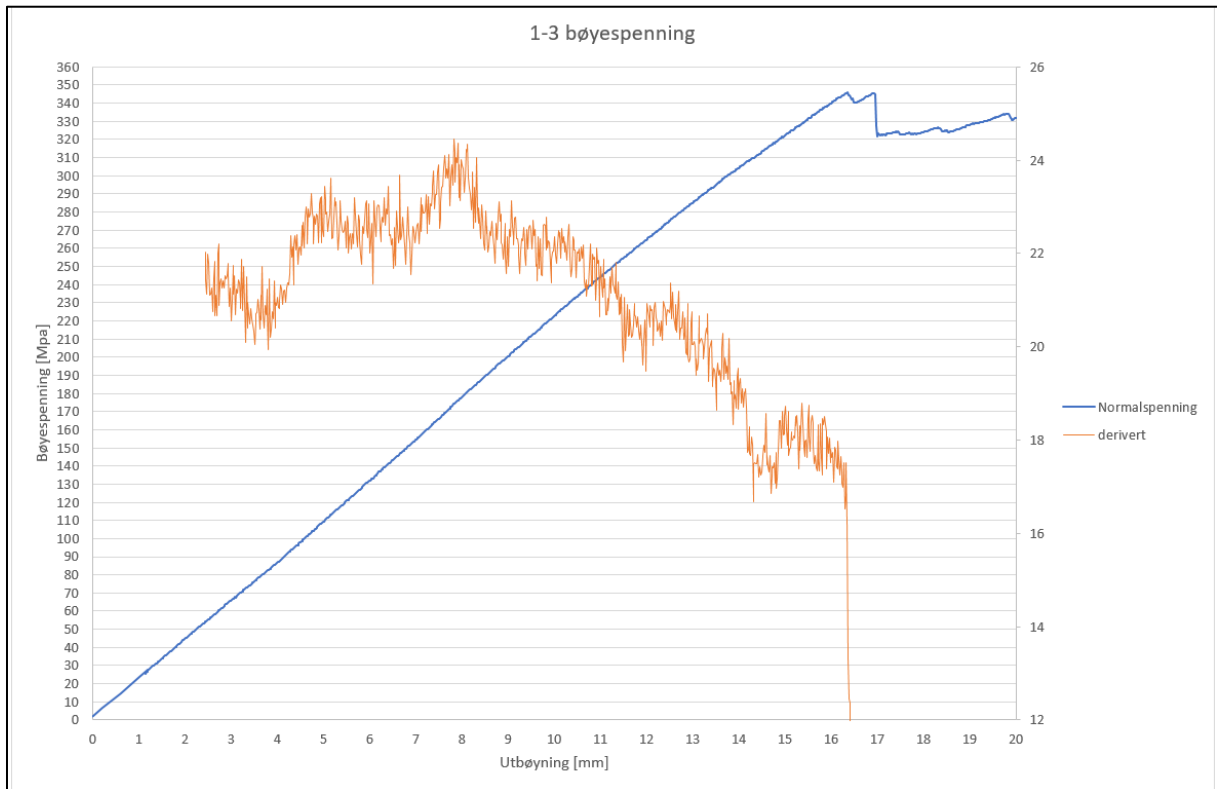
Ved å plote spenningen mot utbøyningen fremkommer grafen slik:



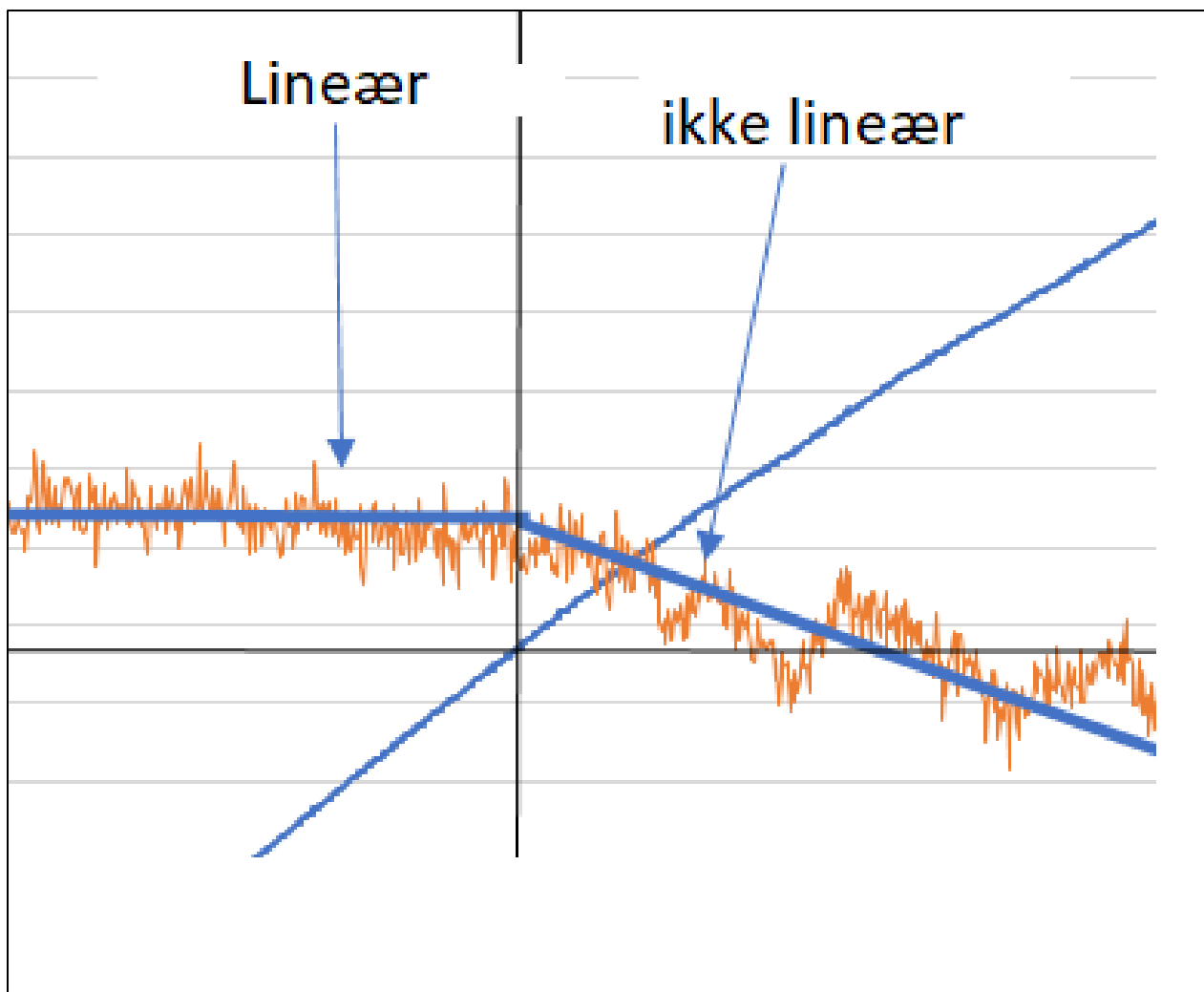
Figur 23- Graf som viser bøyespenningen ved utbøyning for prøvestykke 1-3

På denne grafen er det vanskelig å observere noe endring i stigningen til spenning-utbøyingslinjen i grafen. Dette ble forsøkt gjort grafisk ved å legge på en rett linje og observere avbøyning fra denne. Dette viste seg å være vanskelig da oppløsningen ble dårlig ved høy forstyrrelse, og definisjonen av når lineariteten stoppet bar preg av skjønsmessig vurdering. En derivert ble lagt inn i samme graf for å studere stigningstallet til tangentlinjen i hvert punkt. Derivertlinjen ble for detaljert og støyete når hvert punkt på grafen ble inkludert. Endringen mellom hvert tjuende punkt ble derfor valgt for å lette avlesningen. Dette tilsvarte omtrent 0,3mm nedbøyning, og endringen i stigningen av spenningslinjen ble da tydeligere som vist i Figur 234.

Derverte kurve =  $\frac{d\sigma}{dS}$ , hvor  $S =$  Nedbøyning i mm



Figur 24- Den derverte av spenningen vises her som brun linje. Denne linjen er brukt for å identifisere endringen i stigningstallet til spenningskurven

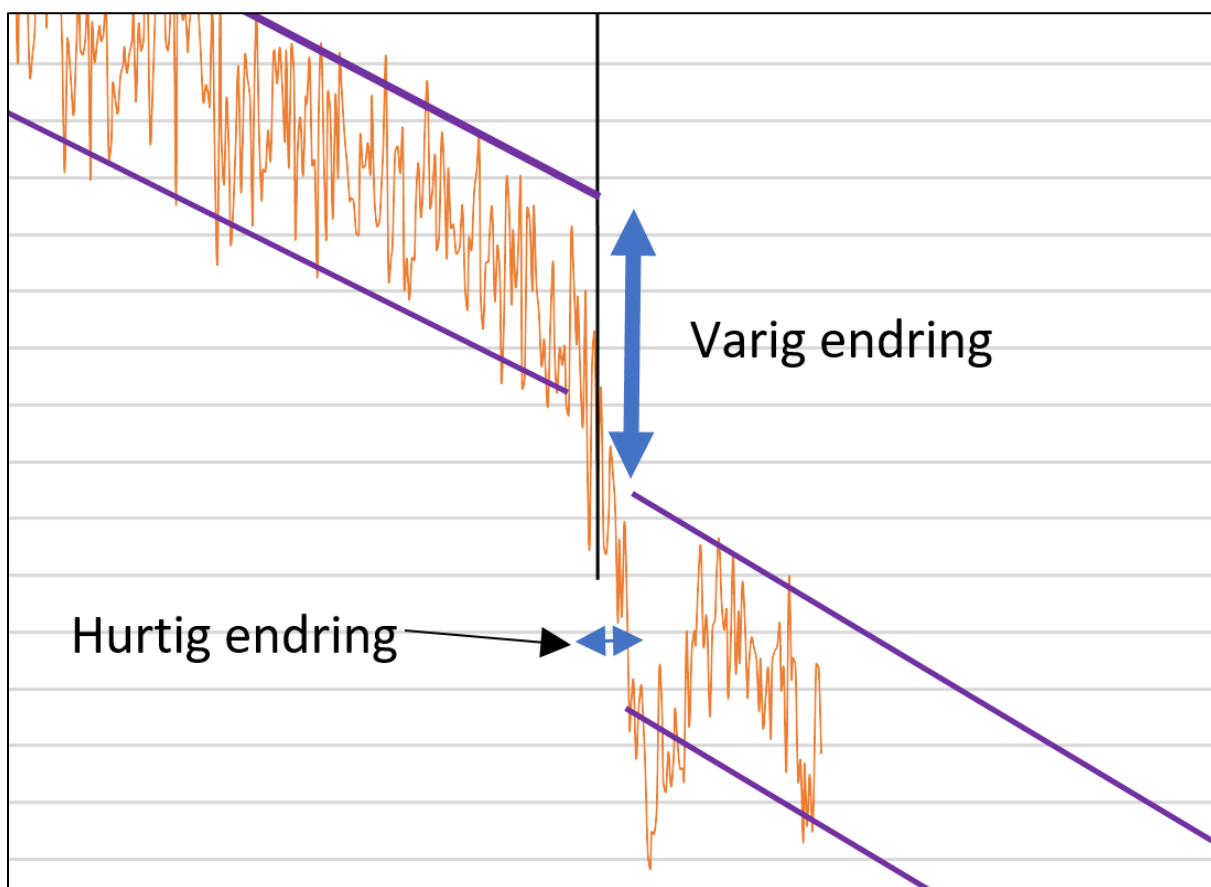


Figur 25-Figuren viser hvordan den deriverte (brune) linjen er brukt for å bestemme om spenningsgrafen er lineær eller ikke lineær. Den svarte vertikale hjelpelinjen viser hvordan spenningen (blå graf) kan bestemmes der den deriverte avtar. Videre kan spenningen leses av ved hjelp av den horisontale hjelpelinjen. Trendlinjer er tegnet inn for å lette avlesning fra derivasjonsgrafen. X-aksen er i [mm] og Y-aksen i [MPa]. Den deriverte av spenningen har samme X-akse, men egen Y-akse.

I bøye prosessen er det i hovedsak to fenomener som er verdt å merke seg.

I figur 25 kan det observeres at den deriverte først har et stigningstall rundt 0, for så å få negativt stigningstall. Dette forteller at spenningskurven ikke lenger stiger lineært, men begynner å flate ut. Dette er en viktig observasjon som sier oss med sikkerhet at det har skjedd en endring i materialet.





Figur 26- eksempel på drastisk endring i spennings stigning, her vist ved hurtig og varig endring i derivasjonskurven

Det andre bildet viser hvordan den deriverte plutselig synker. Dette er interessant fordi det skjer hurtig og derivasjonskurven etablerer seg på det nye nivået. Dette vil gi en knekk på spenningskurven, hvor den brått vil flate litt ut.

---

## 4.7 Resultater fra Maksimal bøyetest

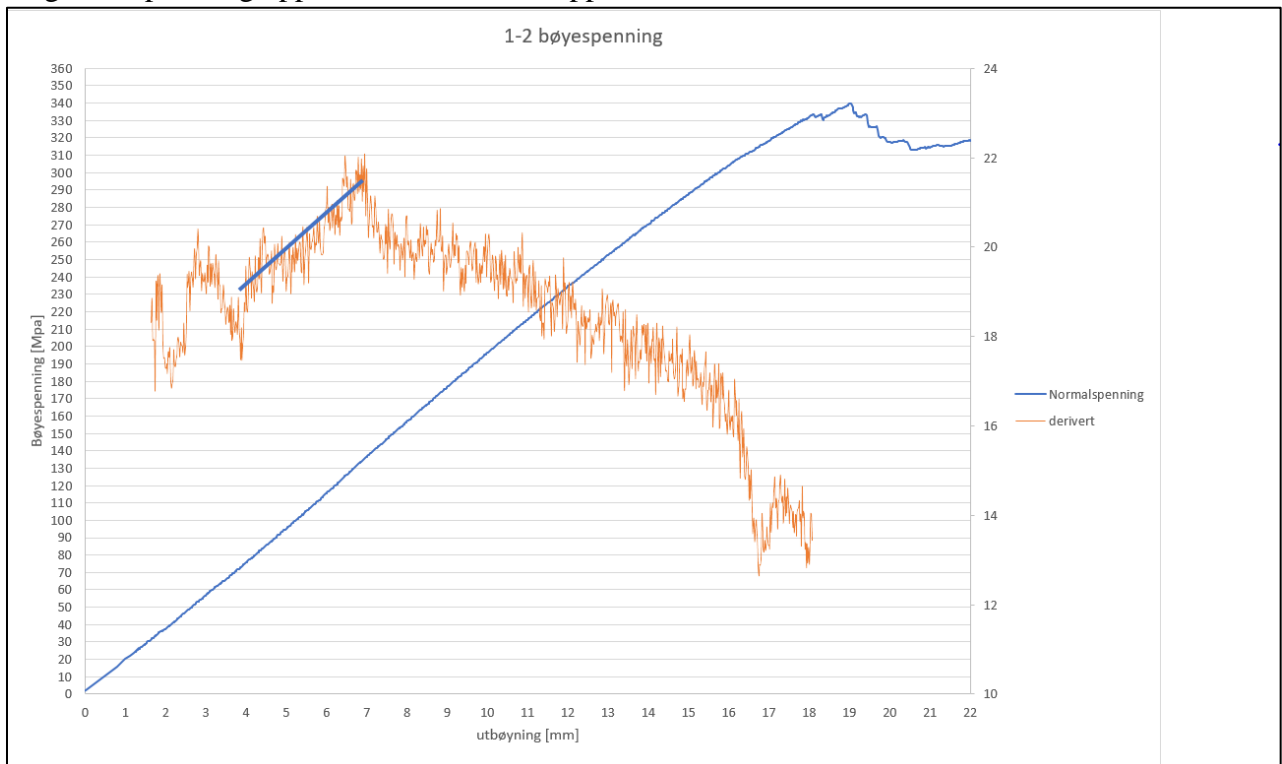
### 4.7.1 Prøveserie 1:

Resultatene fra bøyetesten vil bli presentert og diskutert i dette avsnittet. Prøveserie 1, 2 og 3 vil bli gjennomgått hver for seg, for deretter å bli sammenlignet tilslutt.

Prøvestykke	Linearitetsavvik [MPa]	Volumfraksjon fiber
1-2	-	0,458
1-3	-	0,460
1-4	-	0,450
2-2	146	0,444
2-3	121	0,418
2-4	162	0,445
3-2	95	0,528
3-3	119	0,490
3-4	128	0,531

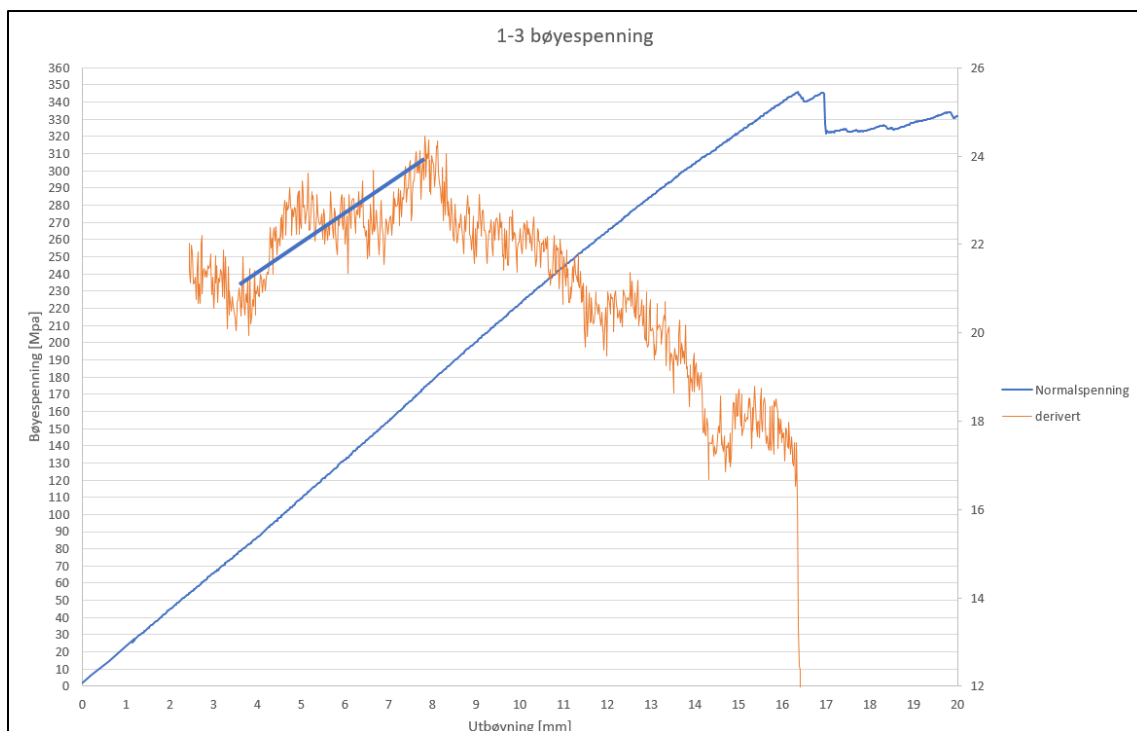
Tabell 4- presentasjon av spenning ved linearitetsavvik og volumfraksjon fiber.

Prøveserie 1 består hovedsakelig av lag med en vinkel i forhold til lengderetningen. Denne vinkelen skulle vært  $\pm 45^\circ$ , men ved en feiltagelse ved kapping av prøvebitene ble denne  $30^\circ$ - $60^\circ$ . Under testingen ble det observert at prøvestykkene vridde seg litt under nedbøyning. Dette gjaldt for alle tre prøvebitene. Spenning-nedbøyingsgrafene som viser forløpet i testen er vanskeligere å si noe om enn de to andre testseriene. Spenningslinjens stigningstall øker generelt for alle de tre prøvestykkene frem til den deriverte når en topp rundt 6-8mm nedbøyning. Derfra avtar stigningen relativt konstant frem til rundt 14-16mm nedbøyning hvor stigningstallet plutselig opplever et markant dropp.

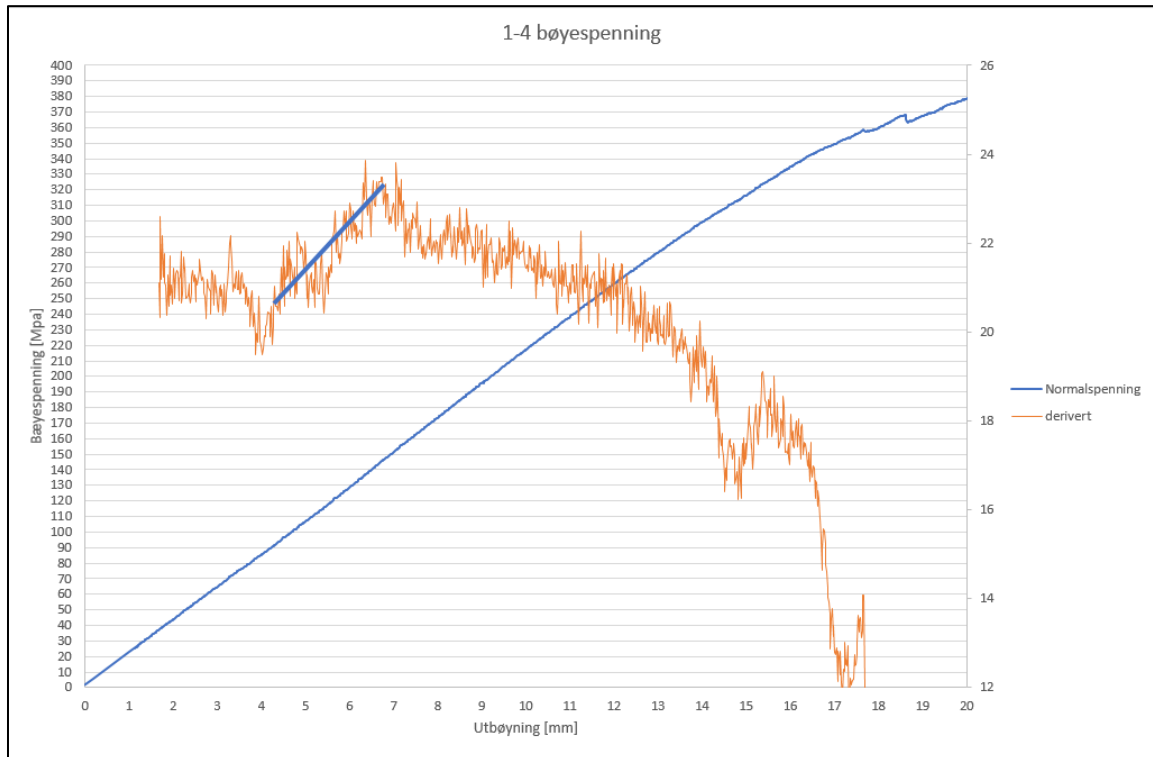


Figur 27- Bøyespenning prøvebit 1-2

Det interessante med denne prøveserien er at resultatene blir veldig annerledes enn prøveserie 2 og 3. Mens prøveserie 2 og 3 viser til linearitet frem til stigningstallet begynner å synke, kan ikke dette sies å være tilfelle for prøveserie 1. Som figurene viser oppfører alle tre prøvebitene seg etter samme trenden. Med dataene som er tilgjengelig er det vanskelig å si noe mer konkret om hva som skjer inne i materialet. Det er stor usikkerhet rundt denne prøveserien ettersom stykkene er kappet i  $30^\circ$ - $60^\circ$ , de vrir seg under testen, og grafen gir lite håndfast informasjon.



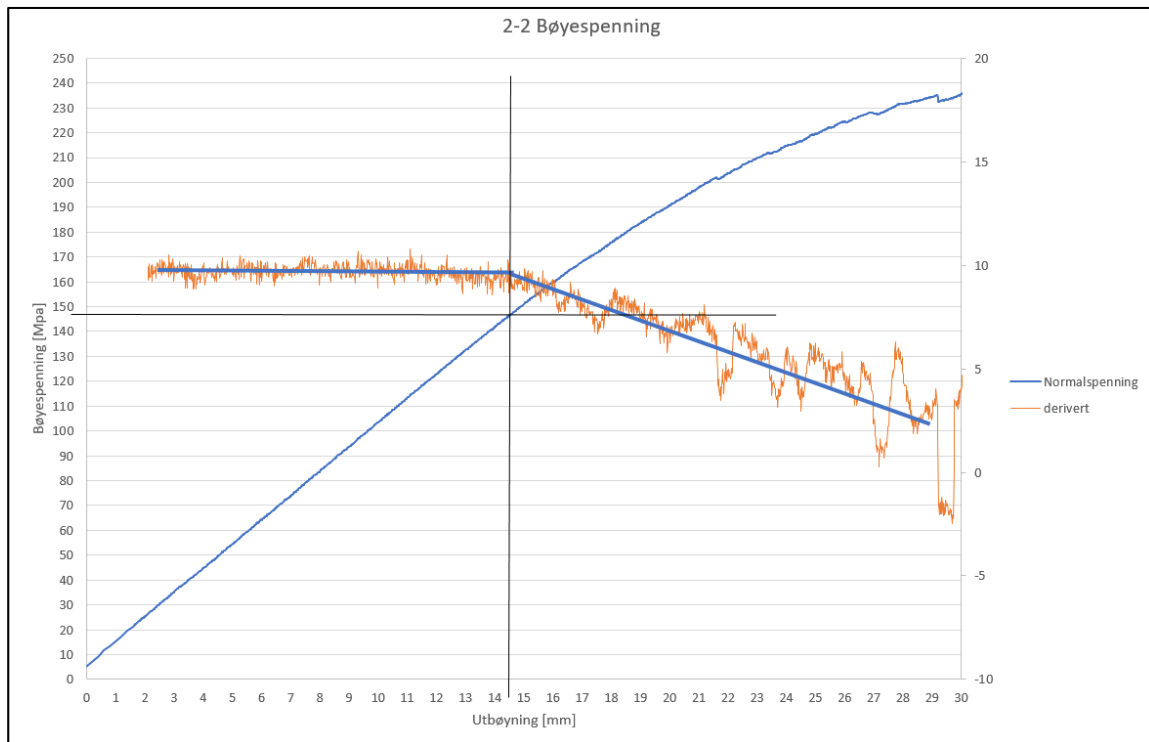
Figur 28- Bøyespenning prøvebit 1-3



Figur 29- Bøyespenning prøvebit 1-4

## 4.7.2 Prøveserie 2:

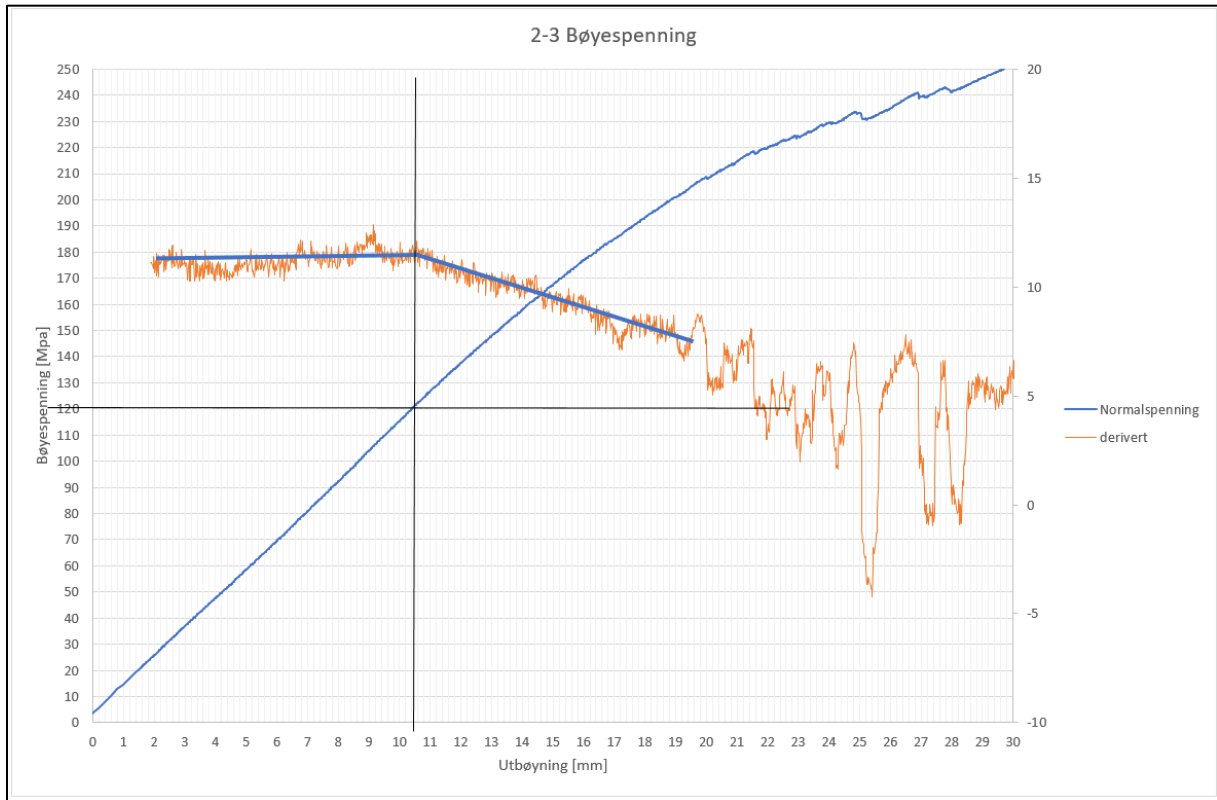
Visuelt kan brudd observeres på oversiden av alle prøvestykkene. Ved å bøye prøvestykkene for hånd observeres det at strukturen i de nederste lagene er svekket og gir etter. De ytterste lagene ser derimot ut til å være intakte i bit nr. 1 og 4.



Figur 30- Bøyespenning prøvestykke 2-2

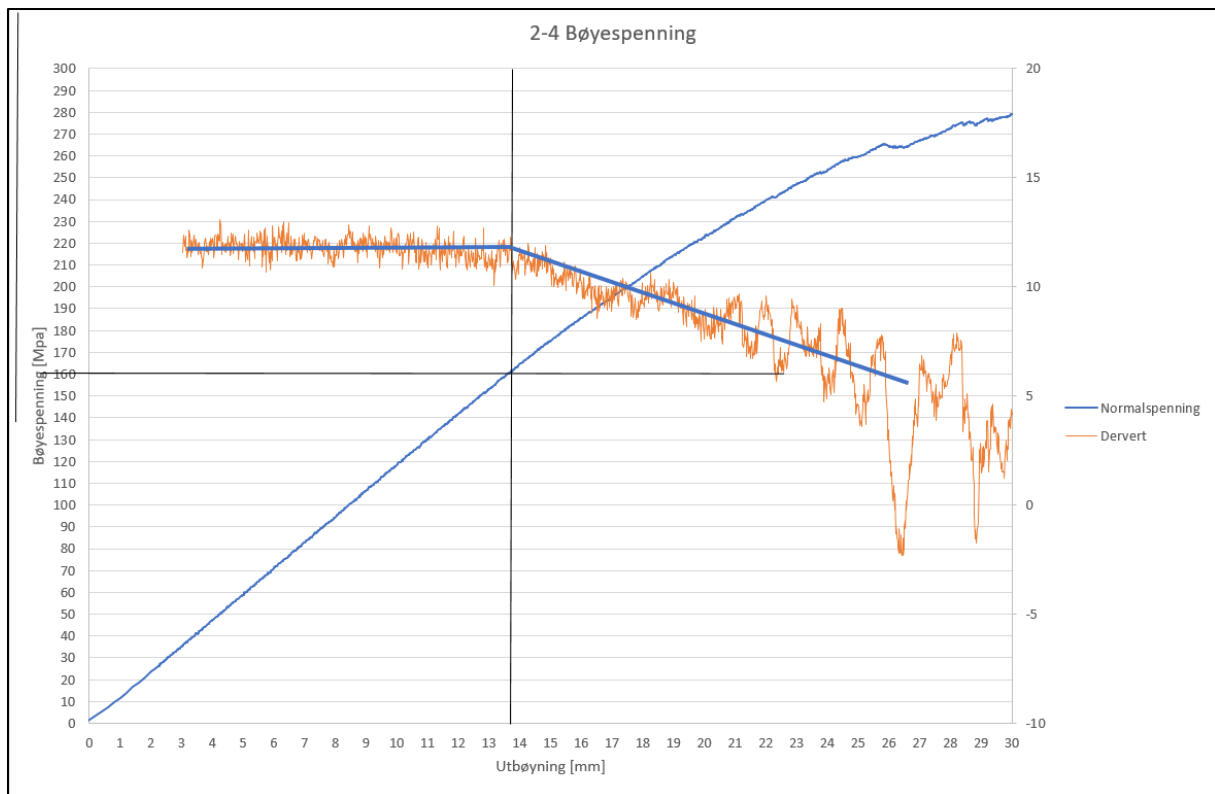
I bøyeprobe 2-2 kan vi se på derivasjonskurven at prøvestykket bøyer seg lineært som en funksjon av kraften frem til 14,5 mm nedbøyning. I dette punktet begynner den deriverte å synke, og bøyekurven flater ut. Det er dette punktet som i første omgang forteller at materialet går over i en annen tilstand eller fase. Det er vanskelig å si sikkert hva som skjer, men ved regning er det mulig å bestemme hva som svikter i kompositten. Videre synker den derivert kurven, men gjør stadig små svingninger. Disse svingningene mistenker vi for å være matriser-svikt, ettersom vi ikke hørte noen knitring i fibre på dette punktet. Om det er bindemiddel-rike områder som svikter, delaminering av fiber og matrise eller interlaminær delaminering som foregår er usikkert. Prøvestykket ble målt til å ha en bøyespenning på 146[MPa] ved utgangen av lineært område. Prøvestykket har en volumfraksjon med fiber som er  $0,444=44,4\%$ , noe som ikke er nevneverdi høyt. Dette er gjennomgående for alle prøvestykkene. Ved en lav fiberfraksjon får vi en tilsvarende høy volumfraksjon vinylester. Dette kan føre til at laminatet

blir både tyngere og svakere. Dette ekstra bindemiddelet kalles ofte for parasittvekt, fordi det ikke innehar noen positiv funksjon.



Figur 31- Bøyespenning prøvestykke 2-3

I bøyeprobe 2-3 vises samme tendensen som i prøvestykke 2-2. Her er en lineær bøyekurve frem til 10,5mm nedbøyning, og deretter flater den ut. Nedbøyningen er noe lavere enn for prøvestykke 2-2. Det samme er spenningen ved utgangen av lineært område, som ligger på 121[MPa]. Mønsteret til den deriverte er tilsvarende som for hele prøveserie 2, og innehar en oscillerende karakteristikk. Ved å se på bøyekurven i de punktene hvor den deriverte synker kraftig observeres det at bøyespenningen synker drastisk. Under bøyetesten hørtes spraking/knitring først ved 33mm nedbøyning, og materialet emitterte generelt lite lyd under knekking. Dette tyder på at oscilleringen som den deriverte viser, sannsynligvis ikke er fiberbrudd.



Figur 32- Bøyespenning prøvestykke 2-4

I bøyeprobe 2-4 observeres det samme som for 2-2 og 2-3.

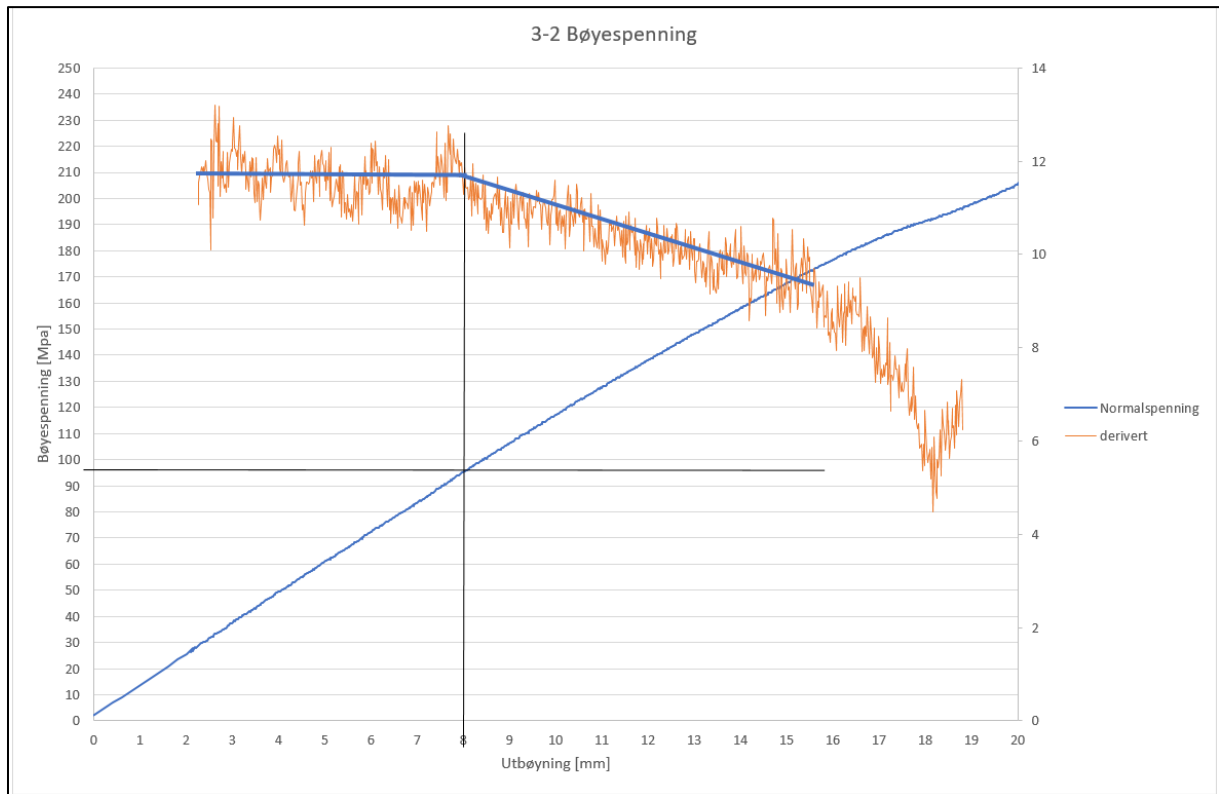
Denne bøyetesten viste lineært område frem til en spenning på 162[MPa], noe som er høyere enn de to andre tilsvarende prøvebitene. En volumfraksjon fiber på 0,446=44,6%, skiller seg ikke nevneverdig fra de andre bitene i serien.

Sammenlikning av resultater fra serie 2:

Hvis vi ser på volumfraksjon fiber i de tre prøvebitene er 2-3, med sine 41,8%, lavere enn 2-2 og 2-4 med henholdsvis 44,4 og 44,6 %. Maks spenning i lineært område er også lavere for 2-3, med 121, mot 146 og 162 [MPa]. Dette kan tyde på at parasittisk bindemiddel har en negativ effekt på de mekaniske egenskapene til materialet. Med det lave antallet tester er det vanskelig å si om dette er en sammenheng, men ved en mer omfattende test burde dette tildeles oppmerksomhet. Gjennomsnittlig spenning ligger på 143[MPa].

### 4.7.3 Prøveserie 3:

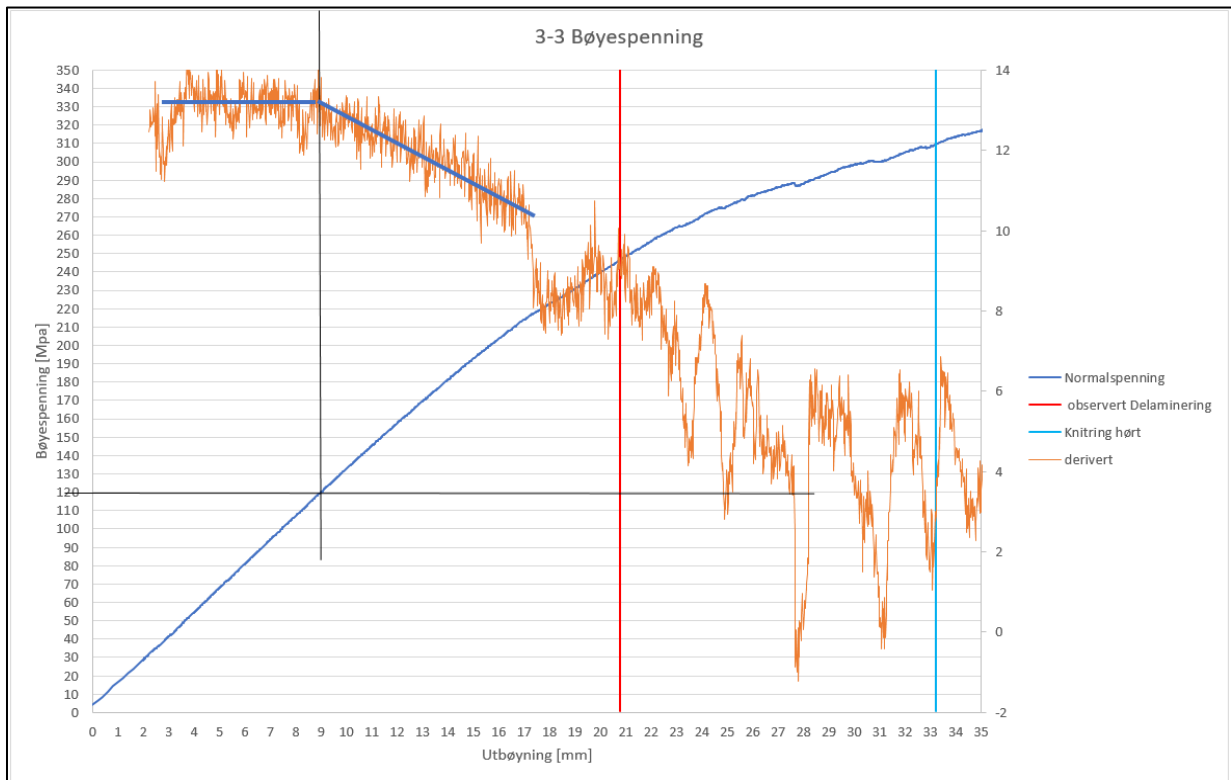
Resultatene fra Prøveserie 3 oppfører seg på liknende måte som prøveserie 2. Her er bøyekurven lineært voksende frem til kurven treffer et punkt der den avtar med en relativ konstant hastighet.



Figur 33- Bøyespennning prøvestykke 3-2



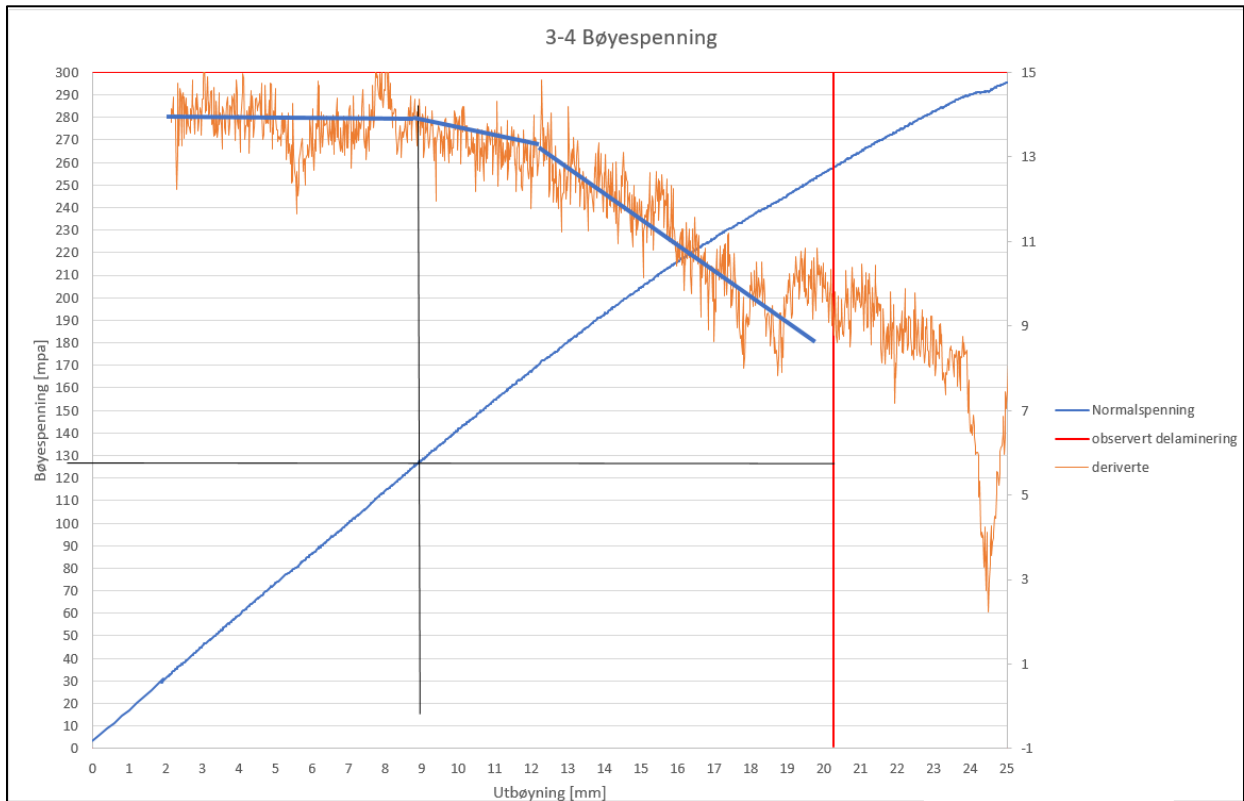
Bøyeprøve 3-3 er interessant fordi her har vi gjort observasjoner av interlaminær delaminering og knitring(fiberbrudd). Den røde streken markerer der vi med det blotte øyet klarte å observere sprekkdannelser mellom lagene i laminatet. Det vi kan si med sikkerhet er at denne delaminering begynte før vi klarte å observere det. Det naturlige punktet å se til på grafen er det plutselige droppet som den deriverte opplever rundt 17,5mm. Dette er etter vår mening en interlaminær delaminering.



Figur 34- Bøyespenning prøvestykke 3-3

Knitring ble hørt ved ca. 33mm nedbøyning, men det kan ikke utelukke at det var fiberbrudd tidligere. Det som er interessant med denne bøyeprøven er at selv om interlaminær delaminering og fiberbrudd har funnet sted, fortsetter bøyespenningen å øke. Dette viser at selv om laminatet opplever en bøyespenning som er ovenfor designområdet vil det ikke oppstå sprøbrudd, men en gradvis degradering av strukturen og tilslutt brudd.

Bøyeprøve 3-4 har samme tendens med at den starter lineært for så å avta. Overgangen fra det lineære området er her litt vanskeligere å definere grafisk, men vi mener at den deriverte begynner å synke ved 9mm nedbøyning. Interlaminær delaminering observeres her ved ca 20mm nedbøyning. Til forskjell fra 3-3 er det vanskeligere å finne spor etter denne delamineringen i grafen.



Figur 35- Bøyespenning prøvestykke 3-4

Sammenlikning av resultater fra prøveserie 3:

Ved alle tre bøyetestene har laminatet oppført seg på en liknende måte. De har en bøyekurve som stiger lineært for så å flate ut. Volumfraksjonen til de tre prøvestykkene er som tabell 4 viser, relativt lik, men hvor 3-3 ligger litt lavere i fiberandel. Dette viser ingen sammenheng med maks elastiske spenning, som er henholdsvis 95, 119 og 128 [MPa]. Gjennomsnittlig spenning ligger på 114[MPa]

## 4.8 Gjennomføring av stegvis bøyetest

Selv om det mest riktige er å kjøre hastigheten opp når man tester karbonfiberlaminatet, ble det gjennomført tester hvor hastigheten ble ytterligere redusert ned til 2 mm/min. Det ble gjennomført en stegvis nedbøyning av prøvestykket, der nedbøyningen ble økt med 1 millimeter per nedbøyning. Dette er en metode som er brukt under testing av kompositt materialer. Denne testen kan luke bort materialsvikter, som nødvendigvis ikke gir noen innvirkning på styrken til materialet. I en fiberbunt kan det befinne seg fiber som har defekter. Selv om dette er tilfellet, betyr det ikke nødvendigvis at de resterende fibrene i bunten ikke klarer å ta opp designlast. Er det fiberdefekter som fører til at fiber ryker under testing gir dette mest sannsynlig utslag på testen. Foretas det en ny nedbøyning forbi punkt man får utslag, kan utslag dobbeltsjekkes. Får man ikke likt utslag ved neste nedbøyning, kan man med større sikkerhet si at egenskapene i laminatet ikke har endret seg. Hastigheten som brukes vil gi bedre tid til å observere fenomener som skjer underveis, som delaminering og knekkelyder. Dette gir et bedre grunnlag til å kunne si hva som skjer i laminatet.

Denne bøyetesten ble kun gjort på fiberorientering 2. Denne prøveserien fra maksimal bøyetest ga det beste sammenlikningsgrunnlaget. Dette med tanke på at vi får stabile utslag på kurvene fra prøveserien. Informasjonen som var av interesse var ved første punkt på derivasjonskurven vi fikk fravik fra linearitet. Dette kunne brukes videre til å avgjøre et område hvor det var forventet å få utslag. Området ble bestemt til: fra 10 – 14 millimeter. Det vil si at første nedbøyning var på 10 millimeter, deretter ble det økt med en millimeter for hver nedbøyning. Stegene i testen vil bli referert til tabellen under.

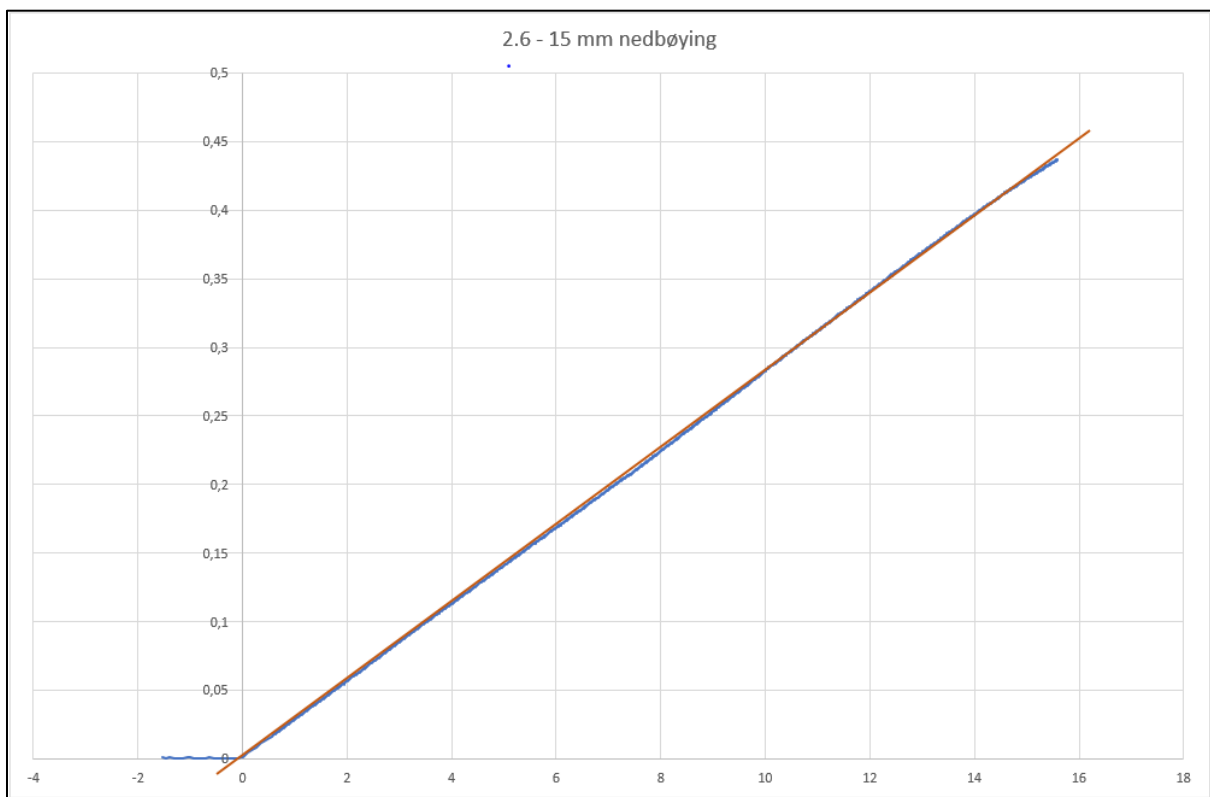
Steg	Nedbøyning [mm]
1	10
2	11
3	12
4	13
5	14
6	15
7	16
8	17
9	18
10	19

Figur 36- Nedbøyningssteg

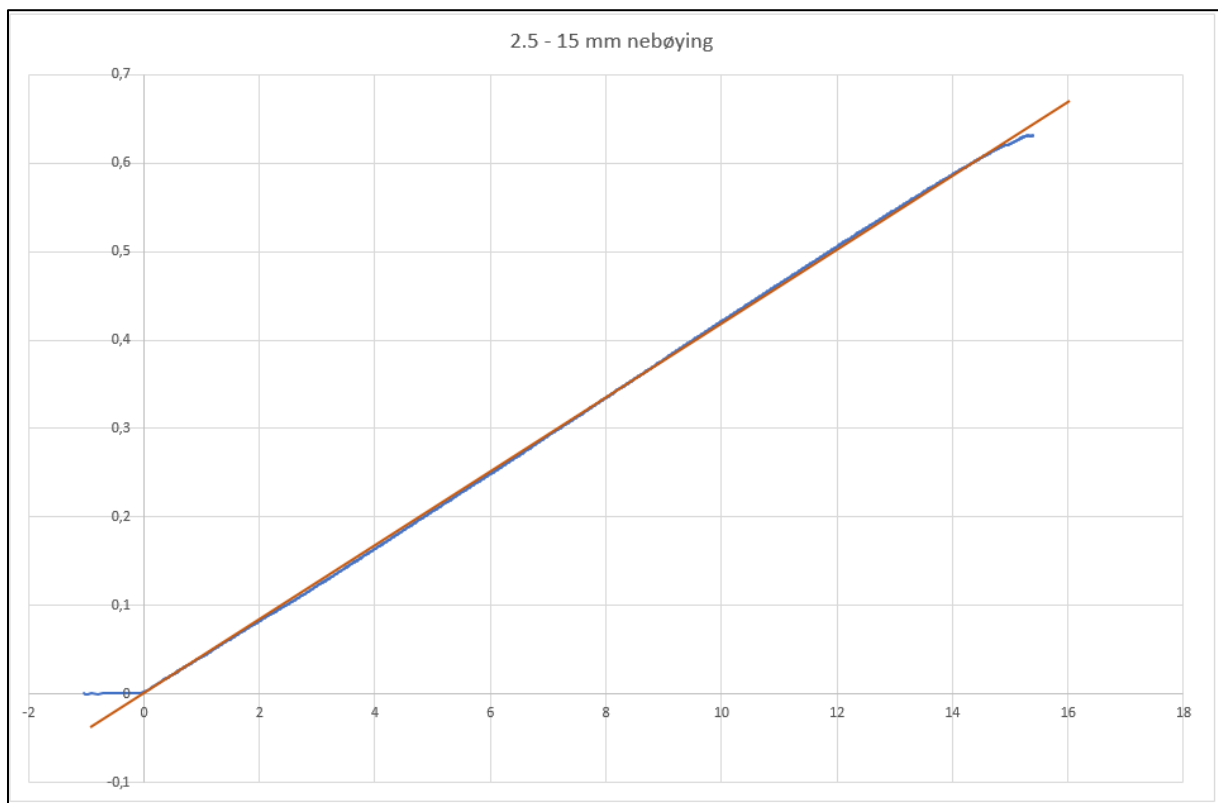
## 4.9 Resultater stegvis bøyetest

Resultatene fra den stegvise bøyetesten gir et godt tolkningsgrunnlag, hvor man med større sikkerhet kan si hva som skjer med karbonfiberlaminatet under bøyning. Ved å begrense nedbøyningen av prøvestykket, får man flere datapunkter over et mindre område sett opp mot den maksimale bøyetesten. Dette ga generelt mindre «støy» på dataene fra hver kjøring, og distinkte endringer i kurven ble mer synlige. I samsvar med at hastigheten var lav, 2 mm/min, ga dette tid til å kunne gjøre gode observasjon underveis. Resultatene som blir presentert er fra utvalgte nedbøyninger tatt av to forskjellige prøvestykker fra fiberorientering 2. Det sees på nedbøyning fra 15-18 millimeter, der de to prøvestykkene blir sammenlignet med hverandre. Aksene til kurvene viser henholdsvis nedbøyning i millimeter (x-akse) og kraft i Newton (y-akse).

Frem til 15 millimeter nedbøyning er kurvene for begge prøvestykker lineært stigende. Ved 15 millimeter observeres det første fravik fra linearitet. Ved bruk av hjelpelinjer leses dette av grafisk.

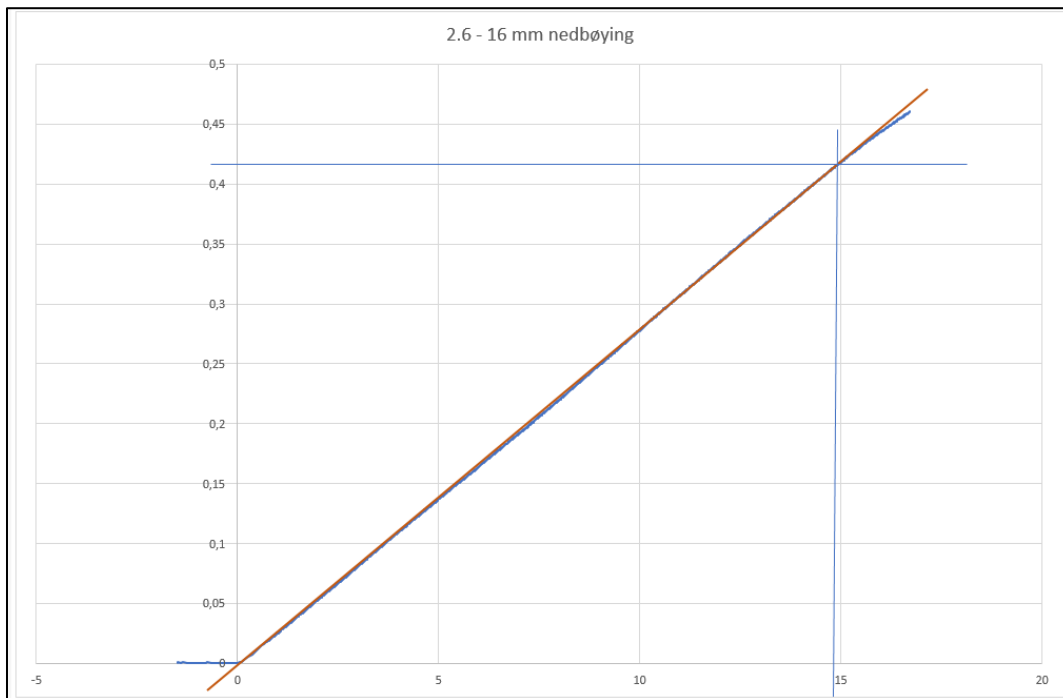


Figur 37- 15mm nedbøyning av prøvestykke 2-6, X-akse er [mm] nedbøyning og Y-akse er [KN] kraft.

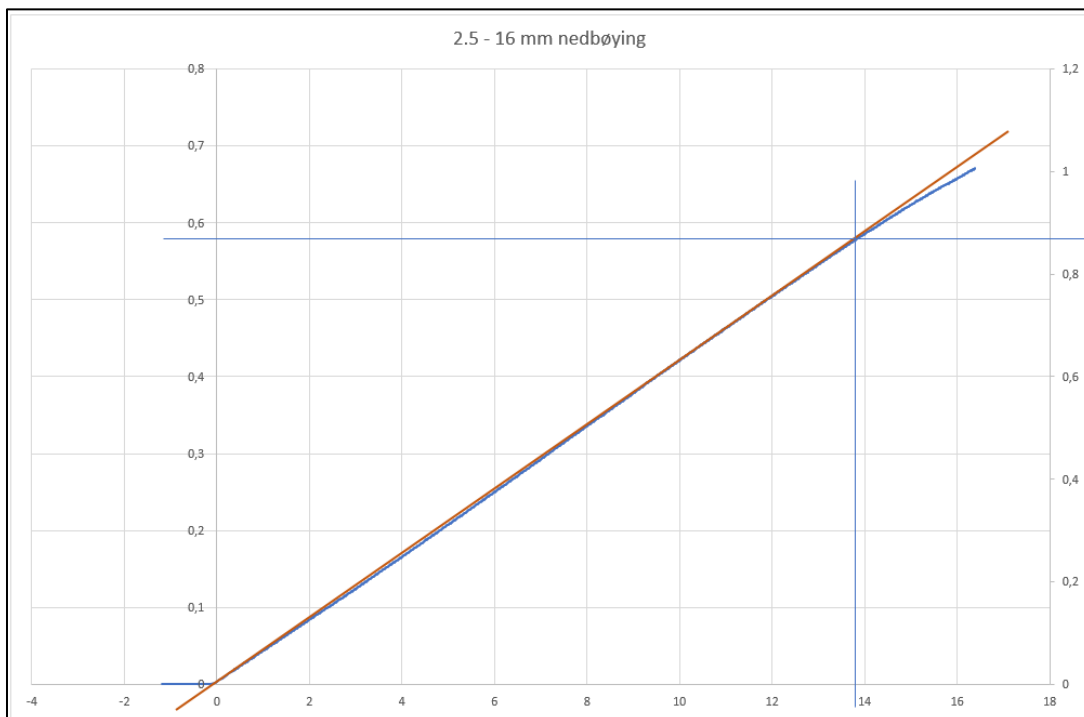


Figur 38-15mm nedbøying av prøvestykke 2-5, , X-akse er [mm] nedbøying og Y-akse er [KN] kraft.

Ved 16 millimeter nedbøying vises fravik fra linearitet tydeligere. Fravik skjer også ved lik nedbøying, 15 millimeter. Her kan det antas at laminatet vil få endrede egenskaper, eventuelt en svekkelse. Dette kan begrunnes i at fenomenet oppstår ved samme punkt som ved forrige nedbøying. Karakteristikken til fravik observeres som buet på kurven til begge prøvestykker.

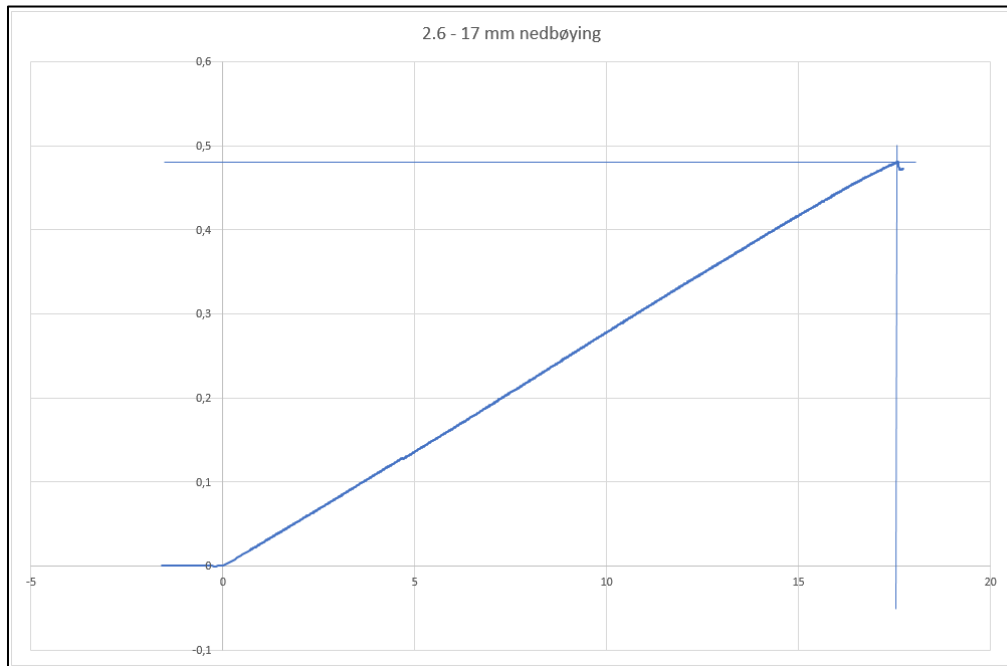


Figur 39-16mm nedbøying av prøvestykke 2-6, X-akse er [mm] nedbøying og Y-akse er [kN] kraft.

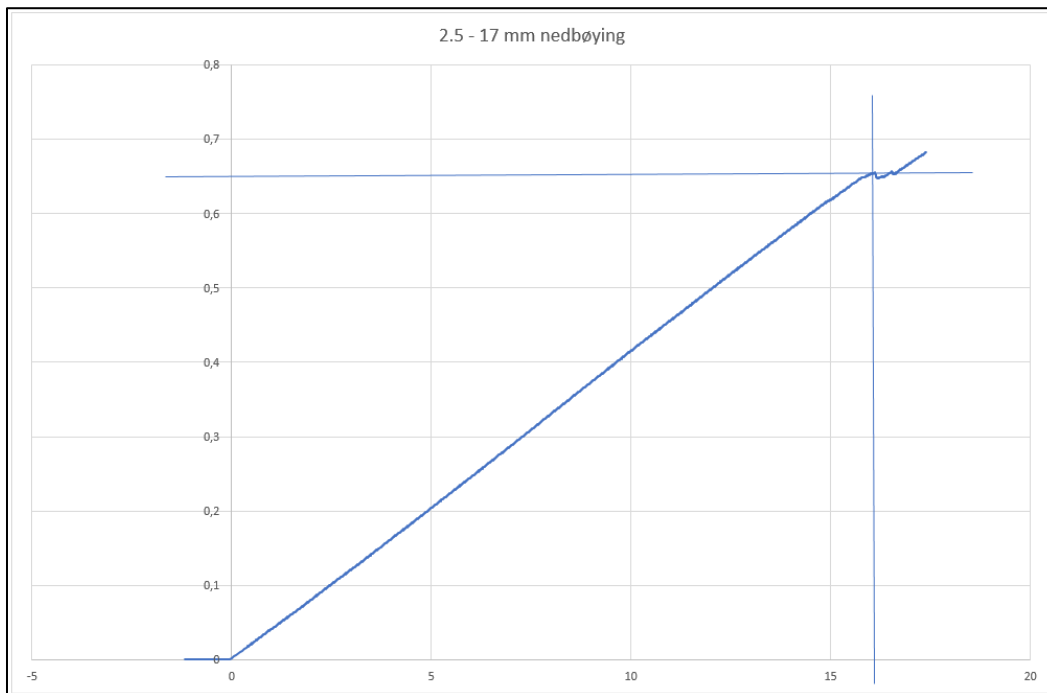


Figur 40-16mm nedbøying av prøvestykke 2-5. X-akse er [mm] nedbøying og Y-akse er [kN] kraft.

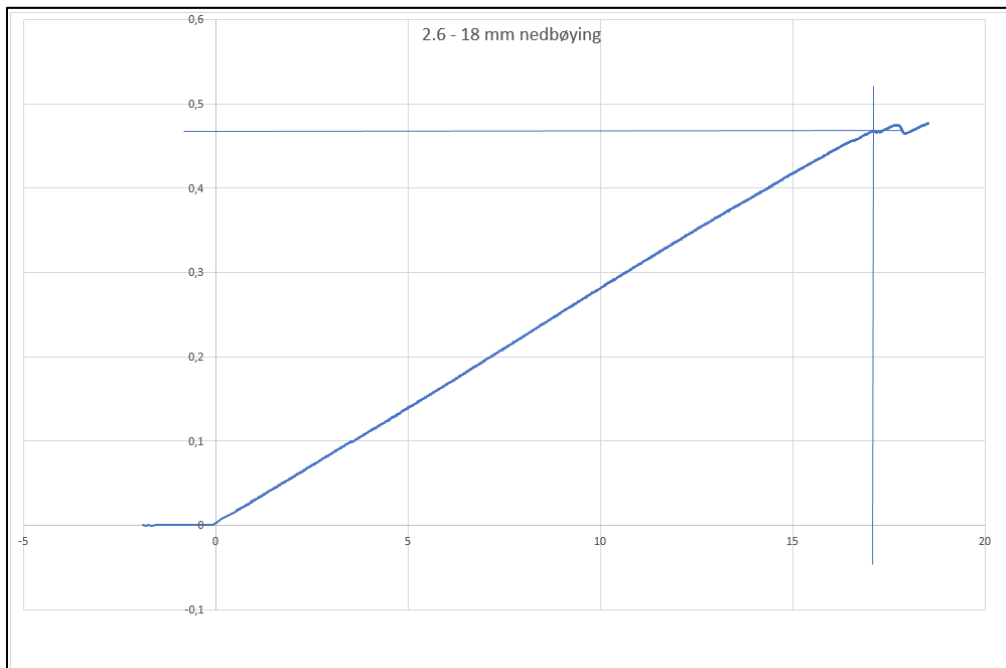
På kurvene ved 17 millimeter nedbøyning observeres den første markante og drastiske endringen på kurven. Endringen kommer rundt 16 millimeter nedbøyning på prøvestykke 2.5 og ved 17 millimeter på prøvestykke 2.6. Kraft-distanse forholdet mellom de ulike prøvebitene varierer noe, men karakteristikken observeres som tilnærmet lik. Dette går igjen ved 18 millimeter nedbøyning med små variasjoner. Hva som skylder denne drastiske endringen er det vanskelig å stadfeste. Siden ingen annen spesiell observasjon er gjort av prøvestykkene.



Figur 41-18mm nedbøyning av prøvestykke 2-6. X-akse er [mm] nedbøyning og Y-akse er [kN] kraft.

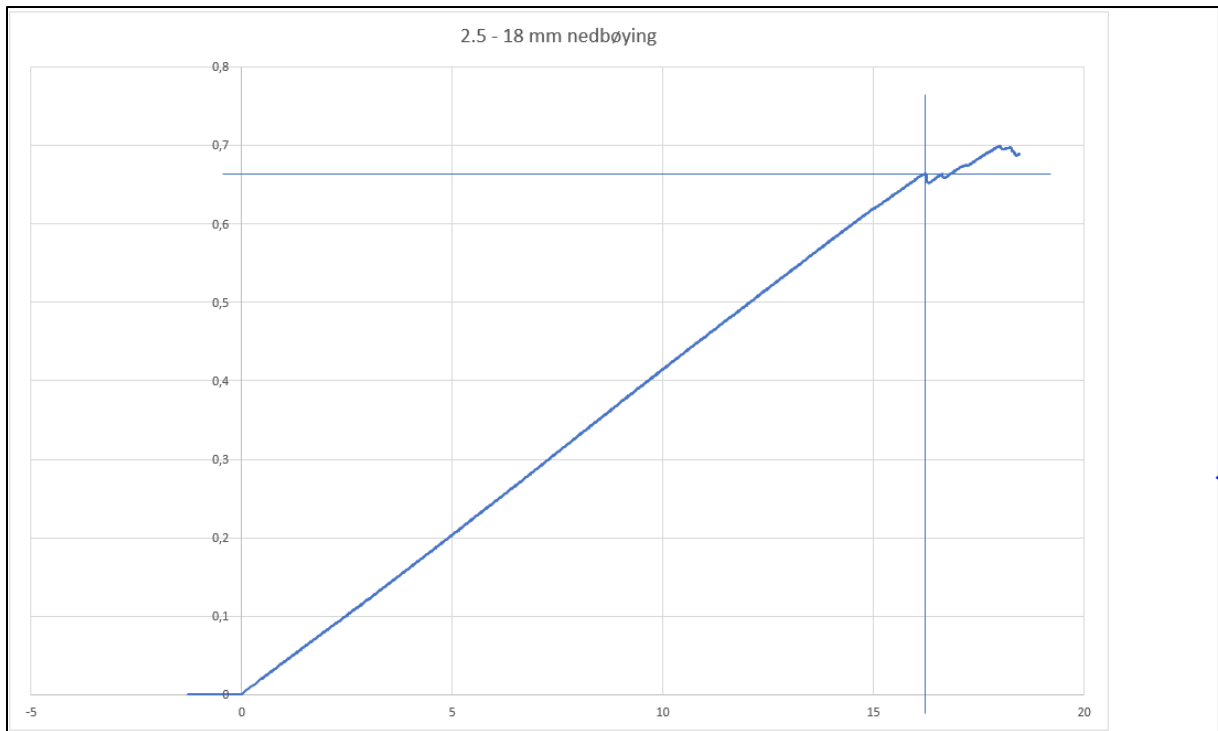


Figur 42-17mm nedbøying av prøvestykke 2-5. X-akse er [mm] nedbøying og Y-akse er [kN] kraft.



Figur 43-18mm nedbøying av prøvestykke 2-6. X-akse er [mm] nedbøying og Y-akse er [kN] kraft.





Figur 44-18mm nedbøying av prøvestykke 2-5. X-akse er [mm] nedbøying og Y-akse er [kN] kraft.

### 4.9.1 Varig endring av egenskaper

Ved å gjennomføre stegvis nedbøyning av prøvestykke 2-5 og 2-6, og plote stivheten ved 14mm nedbøyning for hvert steg fremkommer grafen under. Stivheten er her kraft per [mm] nedbøyning. Denne viser hvordan kraften som trengs for å bøye materialet 14mm ned, synker. Grafen er et uttrykk for materialets stivhet, men må ikke forveksles med E-modulen.



Figur 45- Stivhet for prøvestykke 2-5 ved 14mm nedbøyning



Figur 46-Stivhet for prøvestykke 2-6 ved 14mm nedbøyning

---

## 4.10 Diskusjon og betraktninger av bøyetest

Gjennom testing av karbonfiberlaminat på Høgskolen på Vestlandet har mye kunnskap blitt tilegnet. Testingen har gitt gode resultater som er viktige for forståelsen av fiberkompositter. Herunder må det nevnes at kompleksiteten til fiberkompositts materialegenskaper er stor når laminatet består av flere lag med ulik orientering. Testingen har på mange måter presisert viktigheten av nøyaktigheten ved valg og produksjon av prøvestykker. Kantene til prøvestykkene må poleres, slik at sprekker ikke initieres i den frynsete kuttflaten. Orienteringen av fibrene i laminatet må være korrekt og konsekvent, uten bølger, humper eller vridning. Laminatet må også ha en konsistent fiberfraksjon. Dette er informasjon som har dukket opp under testingen fra fagpersoner som kom inn i studien ved et sent tidspunkt. I lys av denne informasjonen har tallene vi får som resultat ingen vitenskapelig verdi. Det den derimot har, er en læremessig verdi, og ved å gjennomføre en slik materialtest øker forståelsen for fiberkompositter. Bøyetestingen ga økt kunnskap om feil i fiberkompositt. Egenskapene til teststykkene som ble testet, viste seg å være avhengig av orientering. Teststykkene som i hovedsak hadde langsgående fibre syntes å ha en viss forutsigbarhet i oppførselen til spenning-nedbøyningskurven. Denne var lineært voksende frem til den begynte å bøye av. Prøveserie 1, som hadde vinklede fibre i forhold til lengderetningen på prøvestykket, hadde en mer uforutsigbar kurve. Etter testene var gjennomført forklarte Per Frederik Thuvander, tilsatt ved Høgskolen på Vestlandet, hvor kompleks utregningen var, hvis det skulle bestemmes hvilken type endring eller feil som faktisk hadde opptråd når spenningskurven fravek linearitet. Av denne grunnen er det ikke mulig å identifisere hva som skjer i laminatet uten å gjøre omfattende regning. Det som er sikkert er at det skjer en endring i materialet. Denne endringen behøver ikke nødvendigvis å ha en innvirkning på de mekaniske egenskapene, men kan være en omfordeling av last og/eller utjevning av spenningskonsentrasjoner som var i materialet fra før.

### 4.10.1 Hastighet

Ved stegvis bøyetest, hvor nedbøyningshastigheten er senket betraktelig, og prøvestykke er belastet stegvis, er det gjort flere viktige observasjoner. I de stegene hvor lineariteten brytes, holdes kraften relativt lik ved samme nedbøyning i påfølgende steg. Nedbøyningen som er valgt for å eksemplifisere er 14mm. Dette vises i figur 37 og 38, under kapittel 4.9.

Kraften som påtrykkes ved 14mm nedbøyning er forskjellig for maks bøyetest med 1mm/s og stegvis bøyetest med 2mm/min.

Prøve-bit	Avlest ved test	Nedbøyningshastighet	Påtrykt kraft ved 14mm nedbøyning [N]
2-2	Maksimal bøyetest	1mm/s	250
2-3	Maksimal bøyetest	1mm/s	284,8
2-4	Maksimal bøyetest	1mm/s	230
2-5	Stegvis bøyetest, Steg 6	2mm/min	588
2-6	Stegvis bøyetest, Steg 6	2mm/min	396,2

Tabell 5- Sammenlikning av påtrykt kraft ved 14mm nedbøyning for maksimal bøyetest (grønn) og stegvis bøyetest (gul) for et utvalg prøvebiter med orientering 2.

Som Tabell 5 viser er den påtrykte kraften ved samme nedbøyning lavere ved maksimal bøyetest enn ved den stegvise bøyetesten. Dette er særlig interessant fordi det i hovedsak er to forskjeller på testene som kan tenkes å utgjøre dette. Den ene er den stegvise nedbøyningen frem til steg 6, hvor den påtrykte kraften ved 14mm nedbøyning ble lest av for prøvestykke 2-5 og 2-6. Den andre forskjellen er farten som maskinhodet beveger seg med. I den stegvise bøyetesten var farten 2mm/min, mens den i den maksimale bøyetesten var 1mm/s.

Dette er en usikker observasjon som kun støtter seg på 2 og 3 målinger i henholdsvis stegvis bøyetest og maks bøyetest. Datagrunnlaget er så lite at sannsynligheten for at dette bare er tilfeldig er høy. Selv om sammenhengene er usikre, er resultatet verdt å diskutere.

Turtallet en propeller har bestemmer hvor ofte hvert blad passerer skroget. I den øvre delen av rotasjonssirkelen vil det være lavere trykk enn i den nedre delen, og dette gjør at propellbladene opplever en endring i belastning. Frekvensen vil være proporsjonal med turtallet propellen går med. Propellbladet vil befinne seg i dette området tilnærmet  $\frac{1}{4}$  av en hel omdreining, altså 90 grader, avhengig av skrofasong. Ved å gjøre en rask kalkulering av turtallet til Taiko Maru, vil propellbladet befinne seg i dette området rundt 0,04 sekund. Propellen får da en varierende svingningsbelastning per omdreining, på grunn av området med undertrykk. Medstrøms feltet gir også denne sykliske variasjonen i belastning (Brownlie, 1998, s. 28). Sett i

---

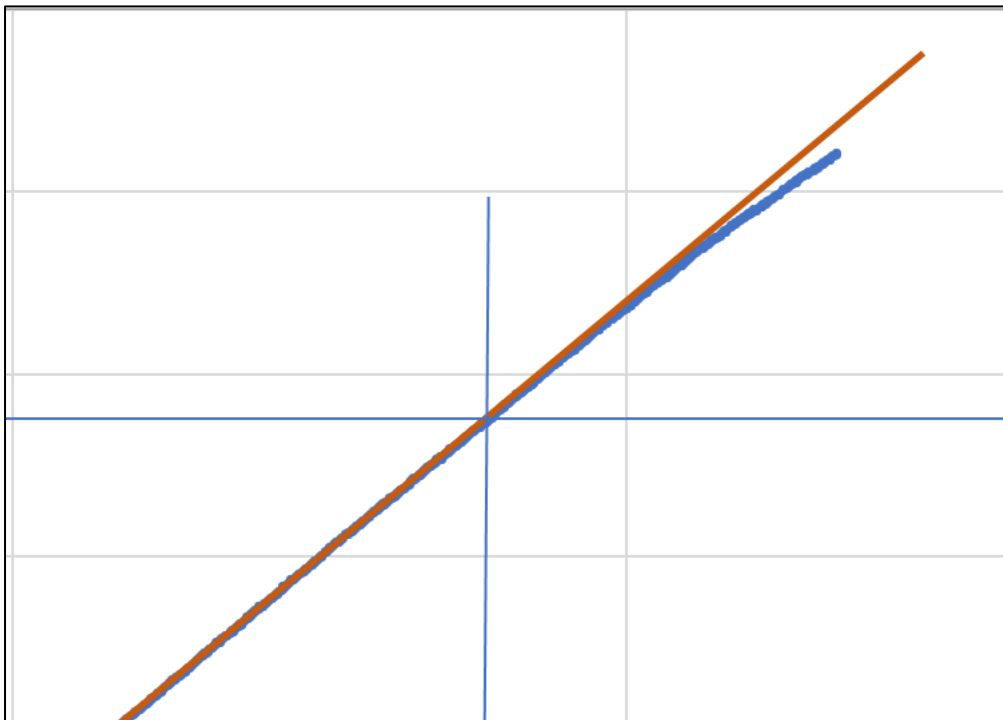
lys av sammenhengene mellom stivheten til materialet og hastigheten det bøyes med vil dette kunne ha innvirkning på styrkeberegningen av propellen. Hvis denne observasjonen stemmer for alle tilfeller, vil en hurtiggående propell i karbonfiber ha lavere stivhet ved svingningsbelastninger enn en saktere gående propell.

#### 4.10.2 Endringskarakterestikker

Den stegvise nedbøyningen gir to tydelige karakteristikker der materialet endres.

- Karakteristikk 1:

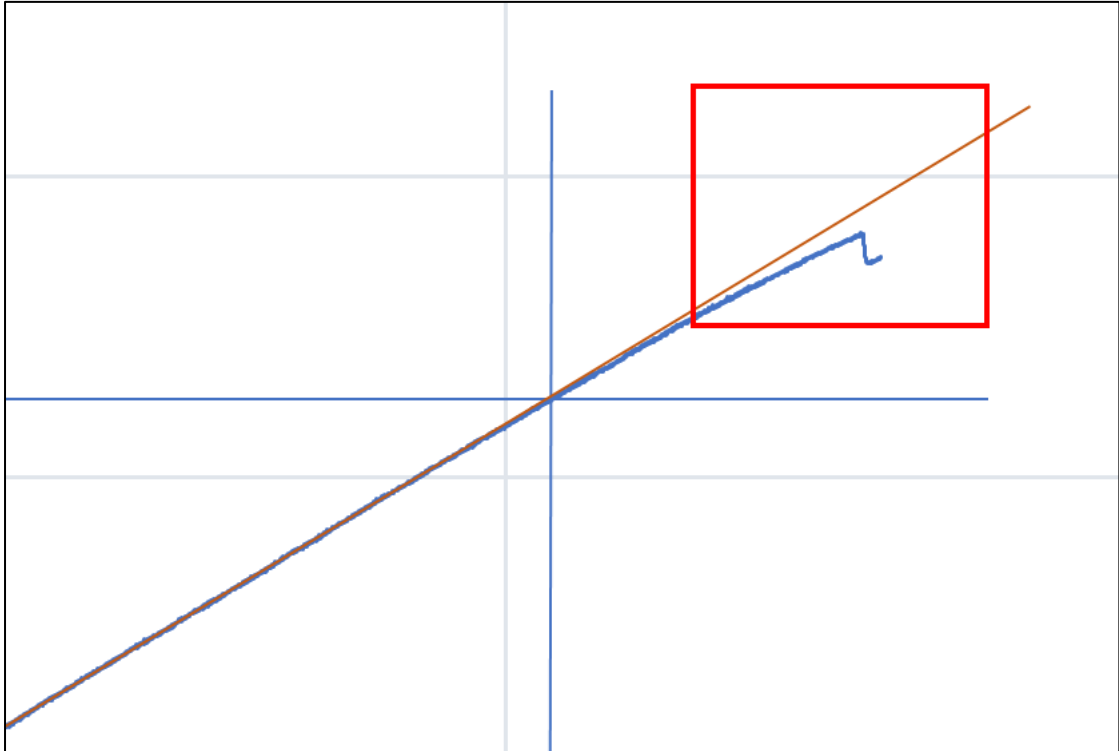
Karakteristikk 1 gir en slak avbøyning og utflating av lineær vekst. Dette tyder på at det skjer endringer i materialet som er langsomme og/eller veldig små. Dette kan være deformasjon av matrise, små delamineringer, sprekkdannelser eller enkeltfibre som ryker



Figur 47- Karakteristikk 1: slak avbøyning. Brun linje er inntegnet for å se spenning-nedbøyningens avbøyning grafisk. X-akse er [mm] nedbøyning og Y-akse er [N] kraft. Figuren er et utsnitt fra testing av prøvebit 2-6, steg 7 (16mm)

- Karakteristikk 2:

Karakteristikk 2 gir en hurtig endring, hvor kraften plutselig synker drastisk for så å øke igjen ved ytterligere nedbøyning. Dette kan være en sammensatt begivenhet, men den bærer nok preg av enten delaminering, sprekkdannelse i matrise eller fiberbrudd.



Figur 48- Karakteristikk 2: Hurtig endring. Brun linje er inntegnet for å se spenning-nedbøyningskurvens endring grafisk. X-akse er [mm] nedbøyning og Y-akse er [N] kraft. Figuren er et utsnitt fra testing av prøvebit 2-6, steg 8 (17mm)

### 4.10.3 Fiberorientering

Ut i fra orientering på prøvestykkene ser vi forskjellige resultater. Dette observeres ved at det er gjennomgående trender i prøveseriene til de ulike orienteringene. Her skiller resultatene fra orientering 1. seg ut som vanskelig å tolke. Orientering 2. gir oss derimot resultater hvor det er enklere å se en trend. En mulig årsak til at orientering 2. tåler større påkjenning, er at det nest ytterste laget er en ensrettet-karbonfiberduk som tar opp strekklasten under bøyning bedre. Dette er vanskelig å begrunne uten å ha regnet på laminatet, siden E-modulen varierer fra lag til lag. I denne materialtesting kan vi kun betrakte hvert enkelt prøvestykke som et

---

unikt materiale. Dette blir delvis gjort ved å bruke utregnet bøyespenning i maksimal bøyetest, som tar hensyn til tykkelse. En slik utregning forutsetter et isentropisk materiale. Utregningen av bøyespenning er et eksempel på at vi bruker alternative teknikker for å forstå materialet i denne testen.

#### **4.10.4 Svar på hypotese**

Hypotesen vi satt før bøyetesting er en snever tilnærming til hva som skjer i karbonfiberlaminatet under testkjøring. Det stemmer at det opprettes en nøytralakse, mellom en strekk og trykk side, men dette må forstås ved å beregne E-modul og kritiske spenninger til laminatet. Dette gjøres for hvert lag for å kunne forstå belastningenes påvirkning på lagene og laminatet. Hadde laminatet bestått av to lag med orientering  $0^\circ$  og  $90^\circ$  kan det relateres til tolkningen vår i hypotesen. Hypotesen bærer også preg av at vi prøver å forstå karbonfiberlaminatet, gjennom en isentropisk tilnærming. Vi bruker ordet plastisk deformering av matrise for å forstå formendringen materialet får. Dette blir feil, da matrisen ikke innehar egenskaper som gir plastisk deformasjon på lik linje med metaller. Retningsbestemte egenskaper gjør laminatet særegent, og det må kun betraktes som et anisotropisk materiale.

---

## 5 Feilkilder

- Spenningen i prøvestykkene i maksimal bøyetest er regnet ut som om materialet var isentropisk.
- Prøvestykkene som er testet har ikke tilfredsstillende nøyaktighet. Kantene er rufsete, orientering 1 er ikke som foreskrevet og fiberfraksjonen er varierende.
- Nøyaktigheten ved avlesning av resultatgrafer kan diskuteres ettersom mye er avlest grafisk.
- Antallet prøvestykker som er testet er lite, og dette gir rom for tilfeldigheter.
- Studiene som brukes som dokumentgrunnlag for denne oppgaven, er gamle og kan være utdaterte.
- Det er tatt flere antagelser i kapittel 3.1.3, og dette kan gi feil inntrykk av M/S Taiko Marus CFRP propell.



---

## 6   **Anbefaling til videre studie**

Denne oppgaven har tatt for seg noen egenskaper ved komposittpropeller og noen materialegenskaper hos et karbonfiberlaminat. En begrensning i studien har vært forståelsen av hva som skjer i materialet når dette svikter. Ved hjelp av regning kan dette bestemmes. Dataprogrammer som gjør disse utregningene finnes, og disse anbefales oppsøkt. Et forslag til videre studie, er å lage et slikt dataprogram som tar for seg propeller spesielt. Det hadde vært fordelaktig om et slikt program kunne omsette en spenningsanalyse til et passende laminat. Videre kartlegging av flere egenskaper hos karbonfiber, slik som motstand mot slag vil være viktig. Kartlegging av dempningsegenskapene til karbonfiber propeller vil kunne identifisere om disse fører til lavere signatur enn konvensjonelle propeller. Ved videre studier vil det være viktig å komme i kontakt med fagmiljøer tidlig. Personer som har bidratt til denne oppgaven er takket i oppgavens forord, og disse anbefales kontaktet ved videre studier. Holdes forskning om komposittpropeller på et bachelor nivå, vil det være kostnadsbesparende. Det er og en god mulighet for å etablere kunnskap og miljø for fiberkompositter i Sjøforsvaret.

---

## 7 Konklusjon

I denne oppgaven har en litteraturstudie og en materialstudie blitt gjennomført. Litteraturstudiens hensikt har vært å sjekke hvor komposittpropeller står i det sivile markedet i dag. Våre funn er todelt. På den ene siden har vi inntrykk av at det er en vilje i propulsjonsindustrien til å utvikle komposittpropeller for markedet. Denne viljen er særlig drevet av marinefartøys søken etter et fortrinn innenfor propulsjon. På den andre siden er det en stor skepsis rundt bruken av komposittpropeller som et alternativ til det veletablerte NAB materialet. Denne skepsisen er trolig en følge av manglende kunnskap om anisotropien til fiberkompositter. Den gjennomførte material studien har gitt interessante resultater, som har bygd en grunnleggende forståelse for hvordan karbonfiber oppfører seg under bøyning. Det faktum at fiberkompositter ikke må behandles som isotopiske materialer er her en viktig lærdom. Dette må i videre studier vektlegges i særlig grad, for bedre å forstå fiberkomposittets retningsbestemte egenskaper.

Fiberkomposittpropeller innehar en rekke egenskaper, og noen av dem er dekket i denne studien. Produktet har etter vår mening få klare fordeler sammenliknet med konvensjonelle NAB propellere. Propellenes evne til self piching, kan redusere belastninger på maskineri og aksling, ved at propellbladet depitches under belastning. Dette kan gi en fordel i grov sjø. Videre kan propellvirkningsgraden kunne økes litt, fordi en større diameter kan oppnås. På alle skipspropeller er kavitasjon et problem. Fiberkompositter har generelt dårlig motstandsdyktighet mot kavitasjon, og dette gjør det mer aktuelt til fartøyer som kaviteter lite, slik som undervannsbåter. Produksjonen av fiberkompositt propeller kan ved riktig produksjonsteknikk være tidsmessig fordelaktig ovenfor produksjonen av en tilsvarende NAB propell. Fiberkompositt har egenskaper som er retningsbestemte. Hvilken bestanddel av materialet som svikter kan være svært vanskelig å bestemme. Dette gjør at styrkeberegning av komplekse konstruksjoner med mange lag i laminatet blir tidkrevende. Propeller er en slik konstruksjon.

Fiberkompositt ser ut til å inneha gode dempningsegenskaper. Dette bør studeres videre, da gode dempningsegenskaper vil gi en lavere signatur. For undervannsbåter vil redusert signatur gi en stridsteknisk fordel. Siden fiberkomposittpropeller viser seg å ha et begrenset bruksområde, som følge av lav motstandsdyktighet mot kavitasjon, vil det ikke være særlig aktuelt for overflatefartøy. Vår anbefaling er at fiberkomposittpropeller vurderes som propulsor for undervannsbåter, hvor kavitasjonen er liten, og signatur er av stor betydning.

---

## 8 Bibliografi

- A, S. R., & F, W. J. (1993). *Composite Materials in Maritime Structures Volume 1, Fundamental aspects*. Cambridge University Press.
- Blasques, J. P., Berggreen, C., & Andersen, P. (2010). Hydro-elastic analysis and optimization of a composite marine propeller. *Marine Structures* 23, ss. 22-38.
- Brownlie, K. (1998). *Controllable Pitch Propellers*. London: The Institute of Marine Engineers.
- ClassNK. (2014, august 29). Press Release. *ClassNK and Nakashima Propeller Announce World's First Installation of a CFRP Propeller on a Merchant Vessel*. Tokyo, Japan.
- ClassNK. (2015). *Guidelines for composite Propellers (part on Manufacturing/Product inspection)*. Tokyo: ClassNK.
- courtney, T. H. (2005). *Mechanical Behavior of Materials second edition*. Waveland Press, Inc.
- Gurit. (u.d.). *www.gurit.com*. Hentet fra <http://www.gurit.com/-/media/Gurit/Datasheets/guide-to-composites.pdf>
- Liu, Z., & Young, Y. L. (2009). Utilization of bend-twist coupling for performance enhancement of composite marine propellers. *Journal of Fluids and Structures* 25.
- Marsh, G. (2004, desember). A new start for marine propellers? *Reinforced plastics Volum* 48, ss. 34-38.
- Motley, M. r., & Young, Y. L. (2011, august 24). Performance-based design and analysis of flexible composite propulsors. *Journal of Fluids and Structures*.
- Quilter, A. (u.d.). *Composites in aerospace applications*. Hentet fra ihsmarkit: [https://ihsmarkit.com/pdf/Composites-Aerospace-Applications-whitepaper\\_264558110913046532.pdf](https://ihsmarkit.com/pdf/Composites-Aerospace-Applications-whitepaper_264558110913046532.pdf)
- Rawson, K. J., & Tupper, E. C. (2001). *Basic Ship Theory vol 2*. Butterworth-Heinemann.
- Shenoi, R. A., & Wellicome, J. F. (1993). *Composite Materials In Maritime Structures, Volum 2: Practical Considerations*. Cambridge University Press.
- William D Callister, j., & Rethwisch, D. G. (2015). *Materials science and Engineering, Ninth Edition*. Wiley.

---

Wozniak, C. D. (2005). *Analysis, Fabrication, and Testing of a Composite Bladed Propeller For a Naval Academy Yard Patrol (YP) Craft*. Annapolis: USNA.

Yamatogi, T., Murayama, H., Uzawa, K., Mishima, T., & Ishihara, Y. (2011). Study on Composite Material Marine Propellers. *Journal of the JIME Vol. 46, No. 3*, ss. 43-53.

---

## **9 Vedlegg**

Vedlegg 1- Resultater fra maksimal bøyetest

Vedlegg 2- Resultater fra stegvis bøyetest av prøvebit 2-5

Vedlegg 3- Resultater fra stegvis bøyetest av prøvebit 2-6

Vedlegg 4- Wageningen B-serie Excel program