



University of
Stavanger

DET TEKNISK NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

BACHELOROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering Bachelor Maskin ingeniør	Vår 6. Semesteret, 2023
Forfattere: Ruben Solbakk Østli Ole Fredrik Mørkved	Signatur forfattere: <i>Ruben Østli</i> <i>Ole Fredrik Mørkved</i>
Fagansvarlig: Ove Mikkelsen Veileder: Ove Mikkelsen	
Tittel på bacheloroppgaven: Utvikling av produksjonsmetode og testing av diskontinuerlig karbonfiber til bruk på spindel til ION Racing bil Engelsk tittel: Development of Production Method and Testing of Discontinuous Carbon Fiber for Use on the upright for the ION Racing Car	
Studiepoeng: 20	
Emneord: <ul style="list-style-type: none">- Diskontinuerlig karbonfiber- Spindel- Materialtesting- Formula Student	Sidetall: 102 + vedlegg/annet Stavanger 15.05.2023

Innhold

Innhold	2
1 Sammendrag.....	5
2 Forord	5
3 Innledning.....	6
3.1 Bakgrunn	6
3.2 Hensikten med oppgaven	7
3.3 Begrensinger.....	7
3.4 ION Racing UiS introduksjon	8
Lagets oppbygning	8
3.4.1 Formula Student	9
4 Litteraturstudie	11
4.1 Teori karbonfiber.....	11
4.1.1 Konvensjonell karbonfiber kompositt	11
4.1.2 Diskontinuerlig karbonfiber kompositt	14
4.1.3 Andre typer karbonforsterkede kompositter.....	17
4.1.4 Kombinasjon av konvensjonell og diskontinuerlig karbonfiberkompositt.....	17
4.2 Teori støpeform	18
4.2.1 Design på støpeform.....	18
4.2.2 Sammenligning med standard	19
4.3 Relevante tester	20
4.3.1 Strekkprøving i ulike retninger.....	20
4.3.2 3d printet og maskinert form	21
4.4 Standard for å teste diskontinuerlig karbonfiber	22
4.4.1 ISO 527- 4:2021	22
4.4.2 ISO 14125:1998	23
4.4.3 ISO 14126:1999	24
4.5 Hjulopphengs teori	25
4.5.1 Type hjuloppheng.....	25
4.5.2 Camber	26
4.5.3 Caster.....	27
4.5.4 Spindelen	28
5 Metode.....	32
5.1 Strekkprøving	32

5.1.1	Design av prøvestykker	33
5.1.2	Produksjon og design av støpeformer	34
5.1.3	Støping av prøvestykker	41
5.1.4	Utførelse av strekkprøving	49
5.2	Kompresjonstest	51
5.2.1	Design av prøvestykker	51
5.2.2	Produksjon og design av støpeformer	51
5.2.3	Støping av prøvestykker	52
5.2.4	Utførelse av kompresjonstest	52
5.3	Bøyetest	54
5.3.1	Design av prøvestykker	54
5.3.2	Produksjon og design av støpeformer	54
5.3.3	Støping og ferdigstilling av prøvestykker	55
5.3.4	Utførelse av Bøyetest	55
6	Resultater	56
6.1	Strekkprøver	56
6.2	Kompresjonstesting	64
6.3	Bøyetest	65
7	Feilkilder og mulige forbedringer	66
7.1	Porer i epoxy resinnet	66
7.2	Ujevn fordeling av masse	66
7.3	Videre testing	67
8	Diskusjon og konklusjon testing	68
8.1	Sammenlignet med resultater fra Boeing og Lamborghini	68
8.2	Testing av isotropi	69
8.3	Konklusjon	69
9	Design av spindel	70
9.1	Endringer for støping	70
9.1.1	Montering av hjullager	73
9.1.2	Brakett for nedre bærearmer	73
9.2	Dimensjonering	74
9.2.1	Redesignet spindel	74
9.3	Beregning av krefter	84
9.3.1	Vektfordeling	84
9.3.2	Forhjulbelastning ved bremsing	85

9.3.3	Maksimal last ved sving	87
9.3.4	Simulering	89
9.4	Design av støpeform.....	97
10	Diskusjon og konklusjon	100
11	Kilder.....	101
A.	Vedlegg	103
A.1	Forstudierapport	103
A.2	Spindel Sammenstilling.....	107
A.3	Spindel Splittegning	108
A.4	Arbeidstegning Spindel	109
A.5	Arbeidstegning Styrebrakett.....	110
A.6	Arbeidstegning nedre brakett	111
A.7	Arbeidstegning Foring.....	112
A.8	Arbeidstegning øvre brakett	113

1 Sammendrag

Vekt og produksjonskostnad er noen av de største utfordringene for ION Racing UiS, Universitetet i Stavanger sitt Formula Student lag. Diskontinuerlig karbonfiber har blitt vurdert som en mulig løsning på disse problemene, ettersom materialet har lav vekt og er enkelt å produsere. Denne bacheloroppgaven fokuserer på materialtesting av diskontinuerlig karbonfiber og design av spindelen på ION Racing sin Formula Student bil. Spindelen er en av de største aluminiums delene på bilen og er en god kandidat for å bli erstattet med diskontinuerlig karbonfiber.

Diskontinuerlig karbonfiber blir støpt i en negativ form som blir penslet med oppkuttet karbonfiber og epoxy resin. Delen blir deretter presset sammen i en hydraulisk presse, hvor det skal herde i 24 timer.

Materialet har blitt testet støpt i 3dprintet og maskinert form i aluminium, noe som ga små forskjeller i resultat. 3dprintet form er et billig alternativ som de fleste universiteter nå til dags har tilgang på.

Materialtestingen som ble gjort i oppgaven består av strekkprøving, bøyetesting og kompresjonstesting. Resultatene konkluderte med at diskontinuerlig karbonfiber er en god erstatning for aluminiumsdeler med en fleksibel produksjonsmetode for lag med begrensede økonomiske ressurser.

Etter det ble konkludert at materialet var brukbart ble det gjort design av ny spindel som ble tilpasset produksjon i karbonfiber. Denne ble deretter simulert i inventor for å forsikre om at den tåler belastningene den vil bli påført under kjøring av bilen.

2 Forord

Vi vil først takke vår veileder Ove Mikkelsen for verdifull støtte og veiledning gjennom hele denne prosessen. Motivasjonen til denne oppgaven kom gjennom nysgjerrige og løsningsorienterte tanker for videreutviklingen av ION Racing UiS sin Formula Student bil. Bachelor oppgaven gir en oversikt over materialtesting av diskontinuerlig karbonfiber samt design av spindel til Formula Student bilen.

Opgaven har sine begrensninger, da det finnes lite litteratur på temaet. Mye er derfor funnet ut ved egen forskning. Håper denne oppgaven vil være nyttig for fremtidige medlemmer i ION Racing UiS og vi vil gjerne takke leseren for deres interesse i arbeidet vårt.

3 Innledning

3.1 Bakgrunn

Ideen startet med at det ble eksperimentert med å ha ett annet type dempesystem på ION Racing sin Formula Student bil. Denne type dempesystem krevde en kraftigere nedre bæream enn den som tidligere har vært konstruert av karbonfiberrør. Det nye designet krevde et mer isotropisk materiale, som karbonfiber vanligvis ikke er. Det var likevel ønskelig å fortsette å bruke karbonfiber for å spare vekt.

Det ble så oppdaget at det nylig var blitt utviklet en tilvirkingsmetode av diskontinuerlig karbonfiber av Easy Composites, som er en nettbutikk for kompositter. Diskontinuerlig karbonfiber er et relativt nytt kompositt materiale som er etablert og tatt i bruk av Lamborghini og Callaway Golf Company og varemerket Forged Composites®. Lamborghini har brukt dette materialet til å produsere bæreamer til bilmodellene sine. Dette ble da sett på som det perfekte materialet å bruke til bæream på ION Racing sin bil.

Det ble designet bæream i semesteroppgave og praksisfag. I praksisfaget ble det også gjort test støpinger og strekktester av materialet der det ble konkludert at materialet var sterkt nok til å brukes og gjøre videre undersøkelse på. Det ble riktignok konkludert med å holde seg til det gamle designet på hjuloppheng og dempesystem av andre praktiske grunner. Selv om designet på ny bæream ikke ble brukt, ble det konkludert med at det kunne brukes til mye annet på bilen og nærmest erstatte aluminium i mange tilfeller. Dette er til stor vektfordel da diskontinuerlig karbonfiber har en tetthet på nesten halvparten av aluminium.

Siden dette er et lite dokumentert kompositt materiale, ble det sett på som en perfekt mulighet til å gjøre grundigere testing og dokumentasjon for å kunne bruke det til diverse applikasjoner på ION Racing sin Formula Student bil og andre prosjekter i framtiden.

For å illustrere bruken av materialet i oppgaven, ble det valgt å fokusere på spindelen til hjuloppheng foran på ION Racing sin Formula Student bil. Denne delen ble sett på som en god kandidat da det er en av de største delene i aluminium på bilen, og det kunne dermed gjøres store vektbesparelser av å lage denne i karbonfiber. Spindelen er også en del under store dynamiske belastninger. Det vil si at det må gjøres utregninger for å beregne kreftene som går inn i delen. Dersom delen ender opp med å fungere bra vil det legge et godt grunnlag for å bruke materialet i andre applikasjoner med tilsvarende høy belastning. Spindelen er også en relativt komplisert del å støpe i karbonfiber, så den vil også sette støpeprosessen på prøve.

3.2 Hensikten med oppgaven

Oppgaven kan sees på som en todelt oppgave der det først skal gjøres materialtesting og dokumentasjon på materialet. Deretter skal det designes en spindel til ION Racing sin Formula Student bil, som skal kunne lages av materialet som er testet og dokumentert tidligere i oppgaven. Hensikten med oppgaven er å utrede dokumentasjon på diskontinuerlig karbonfiber. Gjøre nødvendige undersøkelser for å utrede egenskapene til materialet og gjøre rede for materialets begrensinger. Spindelen skal deretter designes og dimensjoneres etter materialets egenskaper og med støpeprosessen i tankene.

3.3 Begrensinger

Det er noe begrenset med litteratur på diskontinuerlig karbonfiber. Oppgaven er begrenset av mengde litteratur og tidligere rapporter å sammenligne med. Dette er et nytt materiale som fram til nå ikke har vært brukt av andre enn noen få store selskaper. Det er likevel mye litteratur på konvensjonell karbonfiber og andre kompositter som er i høyeste grad relevant.

Det er mange variabler å ta høyde for når man utfører materialtesting. Siden denne rapporten ikke er bare på materialet i seg selv, men også bruk av materialet i en spesifikk applikasjon, er det viktig å begrense testingen til det som er relevant til oppgaven.

Bruk av analyseprogrammer for simulering av materialer er også en stor begrensning. Det er ingen i gruppen som har hatt emnet elementmetoder. Det vil derfor være for omfattende å skulle gjøre en grundig analyse på materialet i seg selv, da det er svært begrenset forståelse for faget i gruppen. En enkel analyse i Autodesk Inventor kan likevel være relevant for å få en anelse av spenningene som oppstår i delen.

3.4 ION Racing UiS introduksjon

ION Racing er det største student prosjektet ved Universitetet i Stavanger. Prosjektet går ut på å delta i Formula Student, som er Europas største ingeniørkonkurranse. Konkurransen går ut på å bygge en Formula Student bil og konkurrere med denne på sommeren.

ION Racing UiS består av 40 medlemmer. De fleste er ingeniør studenter, men det er studenter på tvers av andre studieretninger. ION Racing UiS er derfor den mest tverrfaglige studentorganisasjonen ved Universitetet i Stavanger.

Laget blir testet både teknisk og teoretisk. Mange av dommerne er fra Formel 1 og gir poeng til lagene ut fra hvor godt studentene klarer å forsvare valg av design, gjennomføre de statiske øvelsene og hvor gode de dynamiske kjøreegenskapene på bilen er.

Med hjelp fra Universitetet og det lokale næringslivet blir prosjektet mulig. Det danner jobbmuligheter for studentene samtidig som det gir studentene god praktisk erfaring og relasjoner med lokale bedrifter.

Lagets oppbygning

Organisasjonen er delt opp i flere grupper. Disse er:

- Styret
- Administrasjon/ Mediearbeid
- Mekanisk
- Elektronisk
- Data

Styregruppen leder organisasjonen. De planlegger møter for teamet, setter opp en plan og budsjett for sesongen og tar ansvar for at dokumentasjon til «Formula Student» blir sendt inn til riktig tid. Styret blir valgt inn av medlemmene om høsten.

Administrasjon/ Mediearbeid er gruppen som står til ansvar for å snakke med bedrifter i lokalmiljøet. De har også kontroll over de sosiale plattformene og passer på at forholdene mellom organisasjonen og bedriftene blir ivaretatt.

Maskingruppen har ansvar for design og produksjon av alle de mekaniske komponentene på bilen.

Gruppen er delt inn i flere grupper, hvor medlemmer får et utdelt ansvar på bilen. Disse er:

- Hjuloppheng
- Karosseri
- Ramme
- Aerodynamikk
- Ergonomi og brann sikkerhet
- Kjølesystem
- Styring og pedalsystem
- Drivverk

Elektrogruppen har ansvar for design og produksjon av de elektroniske komponentene på bilen.

Gruppen er delt inn i disse ulike gruppene:

- Lavspent system
- Høyspent system
- Motorstyrings enhet
- Elektronisk kontrollenhet

3.4.1 Formula Student

Formula Student er Europas største ingeniørkonkurranse. Konkurransen blir arrangert av «Institution of Mechanical Engineers» i samarbeid med industribedrifter og høyprofilerte ingeniører. Vinnerlaget har flest poeng av 1000. Dette er poeng som blir samlet inn i både statiske og dynamiske øvelser.

Konkurransen består av lag fra over 130 forskjellige Universiteter i fra hele verden og finner sted på Silverstone Circuit i Storbritannia.

3.4.1.1 Statiske øvelser

De statiske øvelsene er den teoretiske ingeniør delen av konkurransen. Den er delt opp i 5 deler. Disse er:

- Design
- Produksjonskostnad
- Bedriftspresentasjon
- Teknisk inspeksjon og driftssikkerhet
- Vippetest

Design er en gjennomgang med dommerne hvor designerne bak bilen forsvarer valgene som har blitt tatt. Dommerne vil spørre om hvorfor dette designet er valgt, men også hva designeren mener kunne ha blitt gjort annerledes om ressursene og pengene var til stedet. Hele denne statiske øvelsen er bare en samtale med dommerne og blir poengbasert deretter.

Produksjonskostnad er en presentasjon foran dommerne om hvordan pengene innad i laget har blitt brukt og våre tanker om hvordan pengene kunne ha blitt brukt bedre. Oppgaven går også ut på å vise forståelse av hvordan bilen kunne ha vært mer bærekraftig og hvor på bilen man kunne kuttet i CO₂-avtrykket.

Bedriftspresentasjonen holdes foran dommerne om hvordan laget kunne ha tjent penger på racerbilen og solgt dette som et produkt. Hvordan deltakerne presenterer blir også satt på prøve.

Teknisk inspeksjon og driftssikkerhet (Scrutineering) er den viktigste og kanskje den vanskeligste delen av konkurransen. Hvert år er det flere titalls lag som ryker ut av konkurransen siden de ikke klarer å komme seg igjennom den tekniske inspeksjonen. Her vil dommerne gå gjennom om bilen møter kravene som er satt av Formula Students regelverk. Hvis det er enkle feil, kan lagene gå tilbake til garasjen for å fikse feilen og prøve på nytt, men hvis problemet er i større omfang, kan det være at laget blir diskvalifisert og ikke får lov til å delta på de dynamiske øvelsene.

Vippetesten er en enkel test hvor bilen blir satt i et stativ og vippet 60 grader. Testen består om bilen ikke vippes ned og blir stående på stativet.

3.4.1.2 Dynamiske øvelser

De dynamiske øvelsene er de praktiske øvelsene i konkurransen. Her skal Formula Student bilen kjøre på bane. Konkurransen er delt inn i 4 løp:

- 75m akselerasjonsløp
- Åttetallskjøring
- Sprint
- 22km utholdenhetsløp

75m akselerasjons løpet tester bilens akselererings evne. Den høyeste poengsummen blir gitt til bilen som fullfører på raskeste tid.

Åttetallskjøring er en dynamisk øvelse for å teste bilens håndtering med vei. Bilen skal kjøre i åttetall 4 runder før slutt. Hvis en kjegle velter eller blir berørt av kjøretøyet blir laget diskvalifisert.

Sprint løpet finner sted på samme bane som det 22km lange utholdenhetsløpet. Laget som kjører en runde raskest vinner.

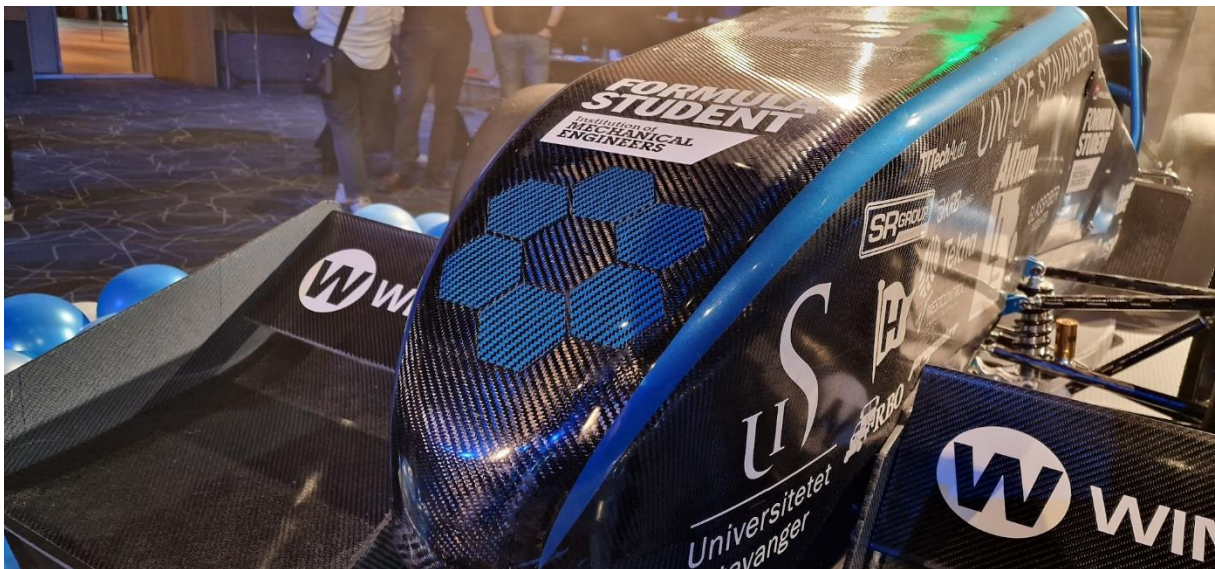
Det 22km lange utholdenhetsløpet er det tøffeste og gjeveste å vinne på konkurransen. Her blir mye av det mekaniske testet på bilen. Laget som vinner denne konkurransen får 300 poeng.

4 Litteraturstudie

4.1 Teori karbonfiber

4.1.1 Konvensjonell karbonfiber kompositt

Konvensjonell karbonfiber er et materiale som har blitt brukt i mange år i alt fra romfart og Formel 1 til kajaker og turutstyr. Thomas Edison var en av de første til å lage karbonfiber i 1879. Det tok likevel nesten 80 år før lignende type fibre og tilvirkningsmetoder man er kjent med i dag, ble utviklet av Roger Bacon på tidlig 60 tallet. Det var opprinnelig et veldig kostbart materiale med en produksjonsmetode utviklet for romfart og flyindustrien. Det ble fort tatt i bruk i Formel 1 og andre typer racing, men de siste 20 årene har det blitt mer og mer tilgjengelig for sivil bruk. ION Racing har og brukt det til diverse deler på Formula Student bilen sin i flere år vist i bilde 4.1. [1]



Bilde 4.1. Konvensjonell karbonfiber i karosseriet til årets bil støpt av ION Racing UiS.

Karbonfiber består av omtrent 92% rent karbon. Dette er en av de reneste formene av karbon som brukes i materialer. Karbonfiber starter i begynnelsen av prosessen som organiske fibre kaldt polyacrylonitrile (PAN). Prosessen for å gjøre PAN til karbonfiber består av 3 trinn. Stabilisering, karbonisering og overflatebehandling.

Stabilisering er en kjemisk prosess for å konvertere bindingene til lineære bindinger. Etter fibre er kjemisk stabile utføres karbonisering. Fibrene varmes opp til omtrent 1000-3000°C i en ovn uten oksygen. Mangelen på oksygen gjør at fibre ikke brenner opp. Når fibre varmes opp mister de nesten alle ikke-karbonatomene sine i form av gasser som vanndamp, karbondioksid, hydrogen og nitrogen med flere. De gjenstående karbonatomene krystalliseres og legger seg på langs med fiberretningen. Etter karboniseringen, overflatebehandles fibre for å kunne få bedre bindinger med bindemiddelet for eksempel epoxy resin. Dette gjøres vanligvis ved oksidering, dette gir fibre en grovere overflate, men også et lag med oksygenatomer som gir bedre kjemiske bindinger mellom epoxy resin og fibre. Til slutt blir fibre coated i en prosess kalt sizing for å beskytte fibre under fremtidige prosesser med å legge de på rull osv. Det ferdige karbonfiberet blir så tred på en rull som blir sendt til videre produksjon slik som vist i bilde 4.2. Detaljene i produksjonsprosessen av karbonfiber holdes som regel hemmelig av produsentene. [2]



Bilde 4.2. Ferdig behandlet karbonfiber tred på rull. [3]

Den mest brukte formen av karbonfiber er sammenvevd duk vist i bilde 4.3. Dette gir en sterk struktur der styrken fordeles i hele planet istedenfor i bare en retning. Duken kan legges i forskjellige retninger i de ulike lagene for å oppnå ulike mengder stivhet og fleksibilitet. For applikasjoner med krefter som påvirker materialet i spesifikke retninger, er det vanlig å bruke duk der fibre er rettet i samme retning. Fordelen med konvensjonell karbonfiber er at fiberretningen kan tilpasses til hver enkelt del etter hvor kreftene går. Dette gjør konvensjonell karbonfiber til et anisotropisk materiale.



Bilde 4.3. Standard karbonfiberduk som brukes til diverse på ION Racing bil.

Det er flere ulike bindemidler som brukes i karbonfiberkompositt, men det mest brukte er epoxy resin. Det er flere måter fibret kan bli impregnert med resin på. Den mest vanlige er vakuuminfusjon, der resinet blir sugd gjennom fibrene med vakuumpressur vist i bilde 4.4. Fibrene og formen blir forseglet i en lufttett vakuumpose. En vakuumpumpe brukes til å suge resinet gjennom fibrene samtidig som luften blir sugd ut og fibrene former seg perfekt til i formen. Dette gir et veldig bra resultat uten luftbobler og ujevnheter. Det er også vanlig å bruke prepreg karbonfiber, dette er fiber som er ferdig impregnert med resin. Her brukes samme vakuumprosess for å forme fibre til formen, bare uten flytende resin. Etter det er satt vakuumpressur på formen blir formen satt inn i en ovn for å herde resinet. Fordelen med prepreg er at det er enklere å støpe deler med mer avansert geometri, med mer avansert geometri kan det bli vanskelig å få flytende resin til å trekke inn i alle fibre.



Bilde 4.4. Vakuuminfusjon utført på Universitetet i Stavanger av ION Racing.

Med denne produksjonsmetoden er det mulig å oppnå høyere styrke enn stål samtidig som det er omtrent 5 ganger lavere vekt. Det er også mulig å fordele fibermengden basert på hvor det er høyest spenninger, ved å ha flere lag med fiber der det er høye spenninger for å oppnå høyere styrke, så kan det brukes færre lag der det er lave spenninger for å spare vekt. Måten fibre legges og støpes på gjør at konvensjonell karbonfiber er mest egnet for hule eller relativt tynne platekonstruksjoner. [4]

4.1.2 Diskontinuerlig karbonfiber kompositt

Diskontinuerlig karbonfiber er en kompositt som består av oppkuttet karbonfiber og epoxy resin. Dette er i utgangspunktet samme fibre som brukes i en konvensjonell karbonfiber duk, men kuttet opp i korte biter vist i bilde 4.5. Fibrene og resinet blir blandet sammen i en form. Formen består av to eller flere deler, med overflødig volum som er konstruert slik at den kan presses sammen for å komprimere fibrene og resinet sammen til det endelige volumet med ønsket tetthet.



Bilde 4.5. Oppkuttet karbonfiber til diskontinuerlig karbonstøping.

Lamborghini var en av de første til å gjøre materialet allmenkjent. Det er publisert en rapport fra 2011 på *LAMBORGHINI "FORGED COMPOSITE®" TECHNOLOGY FOR THE SUSPENSION ARMS OF THE SESTO ELEMENTO*. Lamborghini tok i bruk benevnelsen forged karbonfiber. Grunnen til at Lamborghini startet utviklingen av forged karbonfiber var å finne en måte å produsere karbonfiber på som var mer egnet for masseproduksjon enn konvensjonell karbonfiber, som krever mye håndarbeid. [5]



Bilde 4.6. Lamborghini sin forged karbonfiber bæream til bilmodellen Sesto Elemento. [5]

Selv om Lamborghini gjorde materialet kjent, har det blitt brukt i lignende sammenhenger tidligere. Det er publisert en rapport fra 2008 av Boeing, *Characterization of Discontinuous Carbon Fiber/Epoxy Systems for Aerospace Application*. Boeing kalte materialet for “discontinuous carbon fiber”. Som er benevnelsen som er oversatt til norsk i denne rapporten. Materialet hadde en lignende struktur som Lamborghini sitt “forged composite”. Boeing brukte diskontinuerlig karbonfiber til vindusrammene på flymodellen 787 dreamliner. [6]

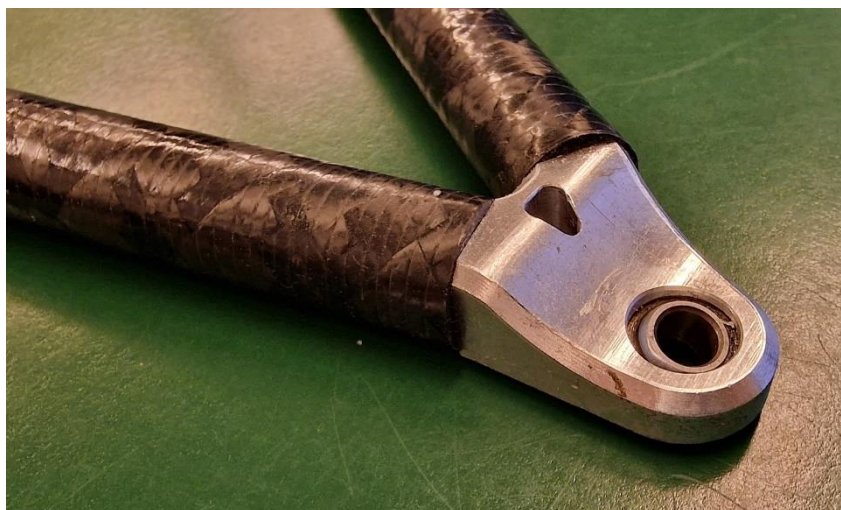


Bilde 4.7. Boeing 787 vindusramme i “discontinuous carbon fibre”. [6]

Konklusjonen til Boeing var at diskontinuerlig karbonfiber hadde svakere bruddstyrke i strekk og kompresjon enn konvensjonell karbonfiber som forventet. Det som derimot var mer uventet var at diskontinuerlig karbonfiber hadde like høy elastisitetsmodul i både strekk og kompresjon som konvensjonell karbonfiber. Under bøyning hadde diskontinuerlig karbonfiber både høyere bruddstyrke og elastisitetsmodul enn konvensjonell karbonfiber. Boeing konkluderte også med at fiberlengde hadde mye å si. Lengre fibre var sterkere og stivere både i strekk, kompresjon og bøyning. Dermed, ble det også nevnt at lengre fibre kunne føre til komplikasjoner, som ujevn fordeling av resin, større luftlommer i resinet, ujevn massetetthet og at det kom til å føre til mindre isotropiske egenskaper. Boeing konkluderte og med at diskontinuerlig karbonfiber er noe anisotropisk, trolig på grunn av fasongen på støpeformen, men at styrken kan forutses i ulike retningen ut fra fasongen på formen. [6]

Easy Composites som selger karbonfiberet som blir brukt i oppgaven har og en rapport på diskontinuerlig karbonfiber, *How do 'forged' carbon fibre components compare to cast aluminium, continuous carbon fibre, Markforged 3D printed carbon, and 3D printed 'onyx'?* De har sammenlignet diskontinuerlig karbonfiber med aluminium og karbonforsterket 3d printet plast. Easy Composites har også utviklet støpeprosessen som oppgaven er inspirert av. [7]

Det har vært vanlig å kombinere konvensjonell karbonfiber limt sammen med deler maskinert i aluminium eller stål der det trengs mer solide geometrier istedenfor hule, som konvensjonell karbonfiber er egnet for, for eksempel slik som vist i bilde 4.8. Både Lamborghini, Boeing og Easy Composites som har brukt materialet har selv sammenlignet styrke og mulige applikasjoner med aluminium. Siden styrken til diskontinuerlig karbonfiber i mange tilfeller kan sammenlignes med aluminium, kan det tenkes at karbonfiberet er en god erstatning for aluminium med sin lavere vekt.



Bilde 4.8. Maskinert del i aluminium bruk til å koble sammen karbonfiberrør på bærearmer til ION racing sin Formula Student bil.

En fordel med diskontinuerlig karbonfiber og konvensjonell karbonfiber er at en kan produsere det hjemme med overkommelig utstyr. Det går an å 3d printe former selv, prisen er også overkommelig på hobbybasis. Dette gjør at man relativt enkelt og billig kan produsere deler i karbonfiber som er like sterkt som aluminium, uten at det koster mange tusen å få maskinert eller produsert av en bedrift.

4.1.3 Andre typer karbonforsterkede kompositter

Det finns flere andre karbonforsterkede kompositter. De siste tiårene har det blitt mer fokus på bærekraftige og fornybare materialer. Det har dermed blitt vanlig å forsterke termoplast med oppkuttet resirkulert karbonfiber. En måte å resirkulere karbonfiber på er å brenne av resinet, dette er mulig fordi karbonfiberet i seg selv er tilvirket på høye temperaturer og er derfor ikke brennbart.

Mitsubishi Chemical Group er en stor produsent av både termoplast og karbonfiber, de produserer flere ulike typer kompositter med resirkulert karbonfiber. KyronMAX er en termoplast forsterket med korte oppkuttete fibre av resirkulert karbonfiber. Det skal være like sterkt som stål og halvparten av vekta til aluminium. KyronMAX bruker termoplast som bindemiddel og blir produsert med induksjonsforming. Dette er en kostbar produksjonsmetode, som krever dyre former og er bedre egnet for større industriell produksjon. Dette er også et nytt materiale som det finnes lite informasjon om, men interessant å sammenligne andre typer diskontinuerlig karbonfiber med. [8]

Det har også blitt mer vanlig å forsterke 3d printet plast med resirkulert karbonfiber. En av disse er Markforged Onyx, den har en bøye styrke på 71 MPA, det er 10 MPa sterkere en ABS plast som er en av de sterkeste standard materialer for 3d printing. [9]

4.1.4 Kombinasjon av konvensjonell og diskontinuerlig karbonfiberkompositt

Det er også mulig å kombinere diskontinuerlig karbonfiber med konvensjonell karbonfiber. Konvensjonell karbonfiber har høyere bruddstyrke enn diskontinuerlig karbonfiber. Det går derfor an å legge hele fibre eller duk sammen med diskontinuerlig karbonfiber som forsterkning på områder i delen der det oppstår ekstra høye spenninger. Easy Composites har testet dette og fikk opp til 800 MPA i bruddstyrke. Dette krever derimot mer testing og beregninger på fibermengde. Det er også vanskelig å simulere på da det blir anisotropiske egenskaper i enkelte områder. Det tas derfor ikke med i denne rapporten. Det åpner likevel muligheten for å lage deler med de beste egenskapene fra begge karbonfiber typene. [7]

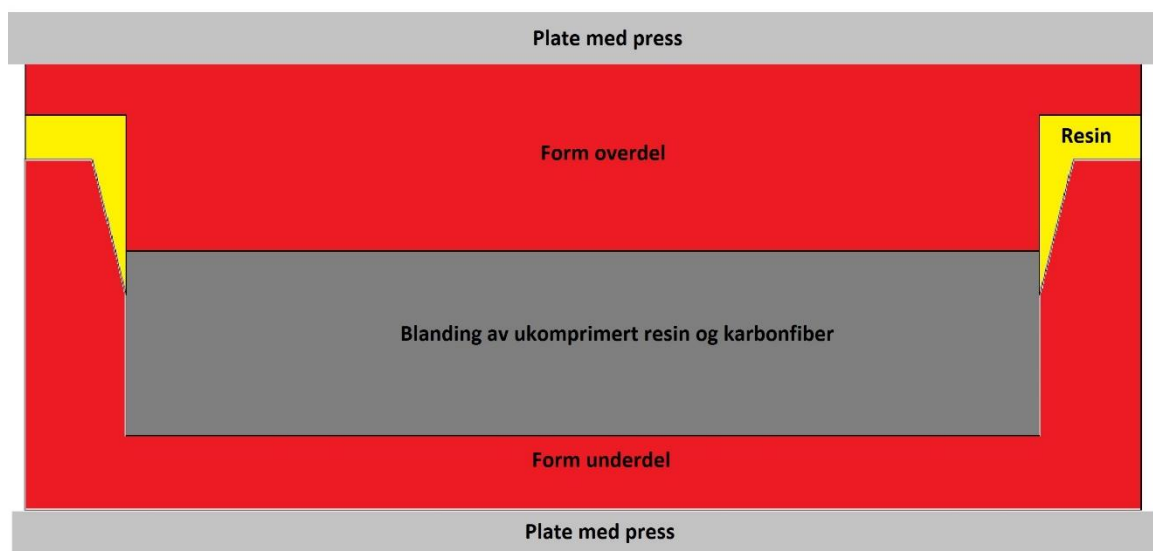
4.2 Teori støpeform

Selv om det ikke foreligger detaljer om støpeprosessen i rapportene til Lamborghini, kan det antas at de bruker en relativt avansert prosess med utstyr som ikke er tilgjengelig på et vanlig verksted. Det var riktig nok nevnt at de brukte prepreg. Prepreg må herdes i ovn på høyere temperaturer og krever dermed en støpeform som tåler det, for eksempel i aluminium. Ifølge rapporten til Boeing ble det brukt oppkuttet prepreg som ble presset sammen i en aluminiums form med 5.5 MPa trykk og herdet på 132°C. [6]

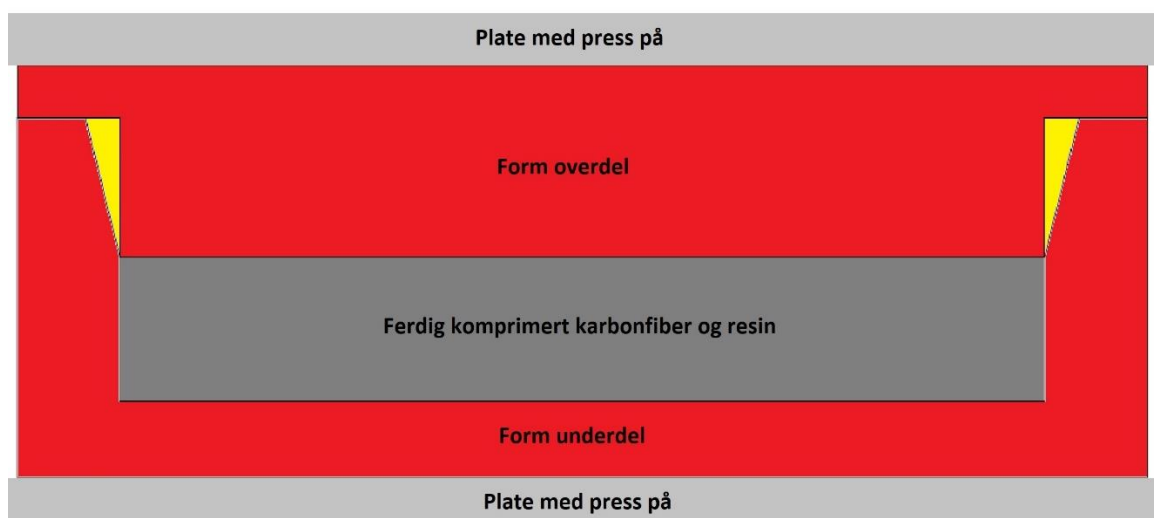
Easy Composites brukte en enklere støpeprosess enn Lamborghini og Boeing. Ved å bruke konvensjonelt flytende resin som herder ved romtemperatur, er det mulig å bruke en støpeform i materialer som tåler lavere temperaturer, som diverse typer plast. For å blande resin med karbonfiberet, pensles formen med resin, så legges det lagvis med resin og karbonfiber for å fordele fibre og resinet best mulig. Mengden karbonfiber måles opp nøyaktig med vekt. Det blir blandet en overflødig mengde med resin, dette er for å sikre en god fordeling med resin og fiber på det ukomprimerte volumet for å forsikre at ingen fibre forblir tørre. Det overflødig resin renner ut av formen når den komprimeres til det ferdige volumet. [7]

4.2.1 Design på støpeform

I denne oppgaven blir det brukt metode basert på metoden til Easy Composites. Det er flere faktorer å vurdere når formen skal designes. Formen må lages slik at det overflødig resin kan renne ut, den må også designes slik at den kan splittes uten å ødelegges og at den ferdige delen kan tas ut enkelt. For at resin skal kunne renne ut må det være en åpning mellom de to delene under kompresjon av formen vist i figur 4.1. Samtidig må åpningen ikke være så stor at det tillater store mengder fibre å slippe gjennom. Når formen er ferdig komprimert må denne åpningen være lukket slik at den ferdige delen får rett fasong i kantene vist i figur 4.2. Derfor lages denne kanten skrå på bunndelen vist i figur 4.2. Denne skrå kanten gjør det også enklere å presse ut den ferdige delen. For å presse ut den ferdige delen kan det plasseres hull i bunnen av formen for å presse den ut med bolter.



Figur 4.1. Illustrasjon av støpeform under kompresjon.



Figur 4.2. Illustrasjon komprimert form.

4.2.2 Sammenligning med standard

I standarden til strekkprøvingen som blir benyttet, ISO 527-4 [10] nevnes det at prøvestykkene skal produseres etter ISO 1268-3 eller annen spesifisert metode. Denne standarden spesifiserer at fibrene skal være i form av ark lagt lagvis. Dette er problematisk da hovedteorien i oppgaven går ut på å bruke løse fibre med en egendefinert støpeprosess. Formålet med oppgaven er å teste denne egendefinerte metoden for støping, det blir derfor i henhold til ISO 527-4 [11] brukt “annen spesifisert metode “. ISO 1268-3 er likevel relevant da det brukes samme prinsipp med å komprimere fibre og resin sammen.

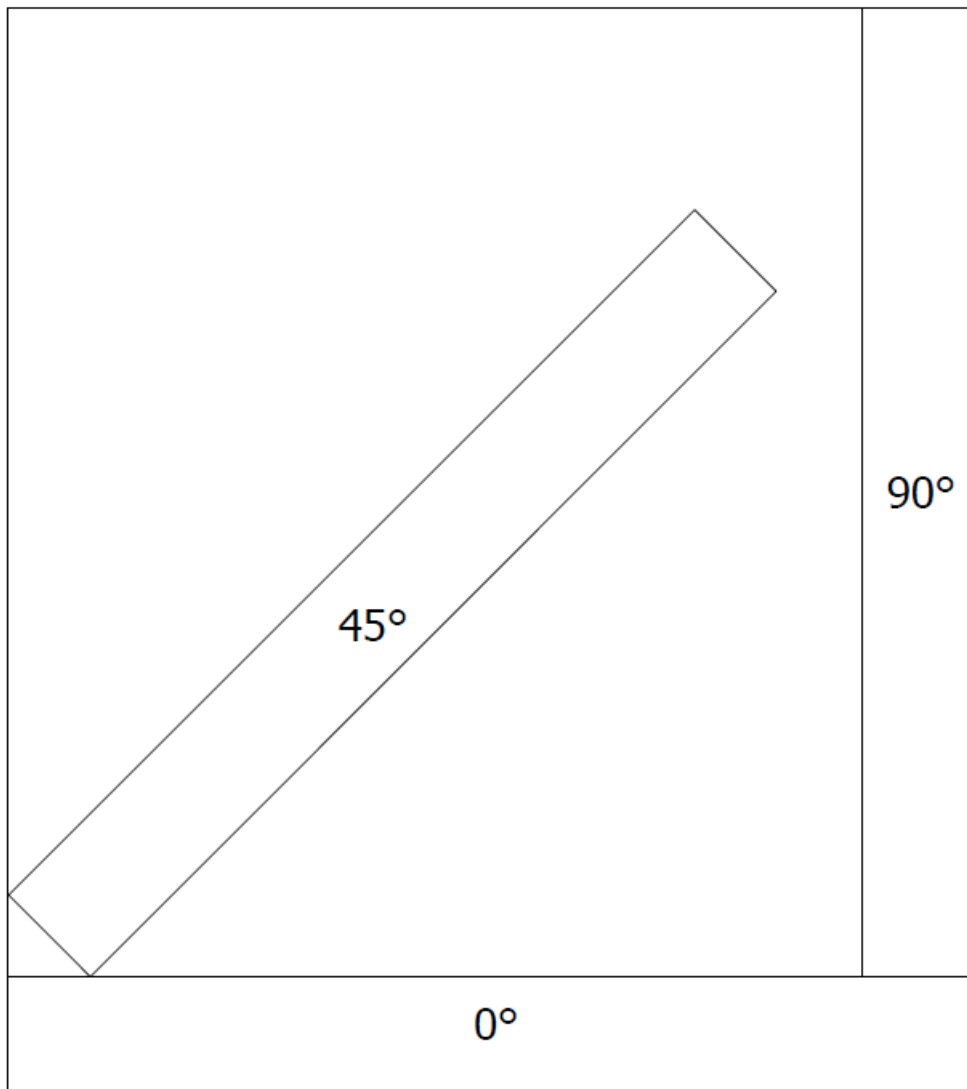
4.3 Relevante tester

De mest grunnleggende testene for styrke er strekkprøving, bøyetesting og kompresjonstesting. Disse testene utføres for å teste styrken til materialet i alle mulige lastsenarioer. Ut ifra disse testene kan det kartlegges et bilde av hvor mye materialet tåler i ulike lastsenarioer. Boeing baserte også sin testing på disse tre testene. [6]

4.3.1 Strekkprøving i ulike retninger

Delen som skal lages i oppgaven blir påkjent krefter i ulike retninger. Det er derfor ønskelig å teste hvor sterkt materialet er i de ulike retningene, i forhold til retningen de er støpt og komprimert. Dette gjøres ved å ta strekkprøver i forskjellige retninger av samme støping. Boeing gjorde en lignende test, men det var i planet til en tynn plate. De fikk noe varierende resultater, men det må regnes med noe varierende resultat da styrken påvirkes av tilfeldigheter på hvordan vei fibre legger seg. I denne oppgaven antas det at i et plan som er større enn lengden på fiberen, vil det være isotropt i planet, da dette er avhengig av fibrenes vilkårlig sammensatte orienteringer i planet.

Det er av interesse å undersøke om det forekommer variasjoner i styrken i høyden i forhold til kompresjonsretningen under støping, og om fibre blir orientert mer langs kompresjonsretningen enn i høyden når de presses sammen. Dette gjøres med å støpe et større emne som kan maskinere flere strekkprøver ut fra i forskjellige vinkler i forhold til støperetningen. Det blir valgt å lage emnet slik at det kan maskineres ut strekkprøver i 0° , 45° og 90° . Det må også være tykt nok til å lage flere prøver fra hver vinkel. Oppsett av utskjæring av tester fra emnet vist i figur 4.3



Figur 4.3. Illustrasjon av oppsett av utskjæring av tester fra emnet.

4.3.2 3d printet og maskinert form

For å teste om 3d printet form er sterk nok, lages det former i både 3d printet plast og maskinert aluminium for å sammenligne styrken med. Siden 3d printet plast er et mykere materiale er det en større usikkerhet om den blir deformert under støping som kan ha innvirkning på tettheten i det støpte karbonfiberet. For å teste dette ble det maskinert en form i aluminium og tre identiske former i 3dprintet plast. Ved å gjennomføre slike tester kan man undersøke både forskjellene på prøvene fra de ulike formene, samt eventuelle forskjeller mellom prøvene støpt i gjenbrukte former.

4.4 Standard for å teste diskontinuerlig karbonfiber

For å kunne gjennomføre forsøk for karbonfibret, brukes flere ISO standarder. En ISO-standard gir testingen mer kredibilitet og siden det finnes ISO-standarder for disse forsøkene blir disse tatt i bruk.

ISO standardene er:

- ISO 527- 4:2021 Prøvebetingelser for isotropiske og ortotropiske fiberforsterkede plastkompositter
- ISO 527- 1:2019 Bestemmelse av strekkeegenskaper
- ISO 14126:1999 Bestemmelse av kompresjonsegenskaper i planets retning
- ISO 14125:1998 & ISO 14125:1998/Amd 1: 2011 Bestemmelse av bøyeeenskaper
- ISO 2818:2018 Tillaging av prøvelegemer ved maskinering

4.4.1 ISO 527- 4:2021

ISO 527- 4:2021 er standarden som er mest relevant for strekktesting av isotropiske kompositter. Standarden oppgir flere testeksemplarer. Type 1B, Type 2, Type 3 og Type 4. Diskontinuerlig karbonfiber bruker et temperaturherdende resin, type 2 brukes derfor da den er beregnet for temperaturherdende kompositt. [11]

Den skal ikke ha endestykker og har spesifikasjonene:

Tabell 4.1. Dimensjoner for type 2

Navn	Dimensjoner for Type 2 (mm)
Distanse mellom endestykkene	-
Bredde	$25 \pm 0,5$
Tykkelse	2 - 10
Målområde	50 ± 1
Nominell avstand mellom grepene	150 ± 1

Standarden ISO 527- 4:2021 viser til en annen standard for produksjon av former, men viser at det også er mulig å bruke andre metoder. [11]

Forsøket skal ha 5 identiske test stykker for å være gyldig, i henhold til ISO 527- 1:2019. Tester som slipper i gripepunktet blir sett på som ugyldige. [11]

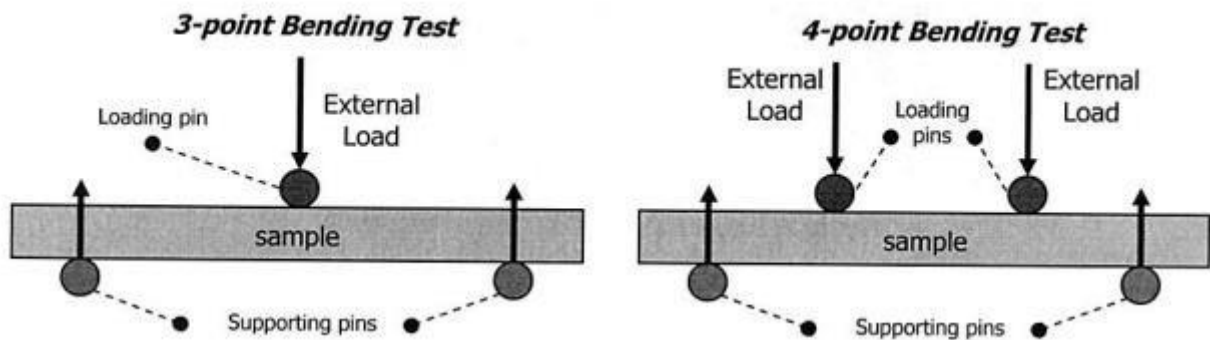
Strekk hastighetene skal være:

- 5 mm/min for rutine kvalitets kontroll
- 2 mm/min for kvalifiserings testene
 - o Maks forlengelse
 - o Strekkmodul for elastitet

4.4.2 ISO 14125:1998

Standarden rettet mot bestemmelse av bøyegenskaper viser til to metoder å bøye plastkompositt.

Metode A er en tre punkts bøyetest, hvor stykket blir holdt oppe på begge sidene også presset ned på midten. Metode B er en fire punkts bøyetest, hvor stykket blir holdt oppe på begge sidene også presset ned på 2 punkter. Se figur 4.4. [12]



Figur 4.4. Illustrasjon av Metode A og B [13]

Metode A og B har ulike dimensjoner på test stykkene. De er oppgitt i tabell 4.2.

Tabell 4.2. Dimensjoner for Bøyetest [12]

	Lengde (l)	Ytre spenn (L)	Indre spenn (L')	Bredde (b)	Tykkelse (h)
Metode A	80	64	-	10	4
Metode B	80	66	22	10	10

Forsøket skal ha 5 identiske test stykker for å være gyldig.

Standarden viser til 2 formler for å fullføre forsøket. Disse er forskjellige fra metode A og B.

Formlene gir bøyehastighet og bøyespennning. Disse er gitt i tabell 4.3. [12]

Tabell 4.3. Formel for bøyehastighet og bøyespennning. [12]

	Bøyehastighet	Bøyespennning
Metode A	$V = \frac{\varepsilon' L^2}{6h}$	$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}$
Metode B	$V = \frac{\varepsilon' L^2}{4,7h}$	$\sigma_f = \frac{FL}{bh^2}$

Alle tegnene i formlene er dimensjoner fra tabell 4.2. Unntak av de nedenfor:

- ε' er tøyings raten på 0,01 (1% i minuttet).
- F er lasten i Newton (N)

4.4.3 ISO 14126:1999

Kompresjon av fiberforsterkede plastkompositter skal gjøres i henhold til ISO 14126:1999.

Dimensjonene på prøven er gitt i tabell 4.4:

Tabell 4.4. Dimensjoner for kompresjonsprøver. [14]

Dimensjoner	Symbol	Mål (mm)
Lengde	L_0	110 ± 1
Tykkelse	h	$2 \pm 0,2$
Bredde	b	$10 \pm 0,5$
Distanse mellom grepene	L	10
Lengde av endestykket	L_t	50

Forsøket skal ha 5 identiske test stykker for å være gyldig.

Kompresjons hastighet:

- 1 mm/min \pm 0,5 mm/ min

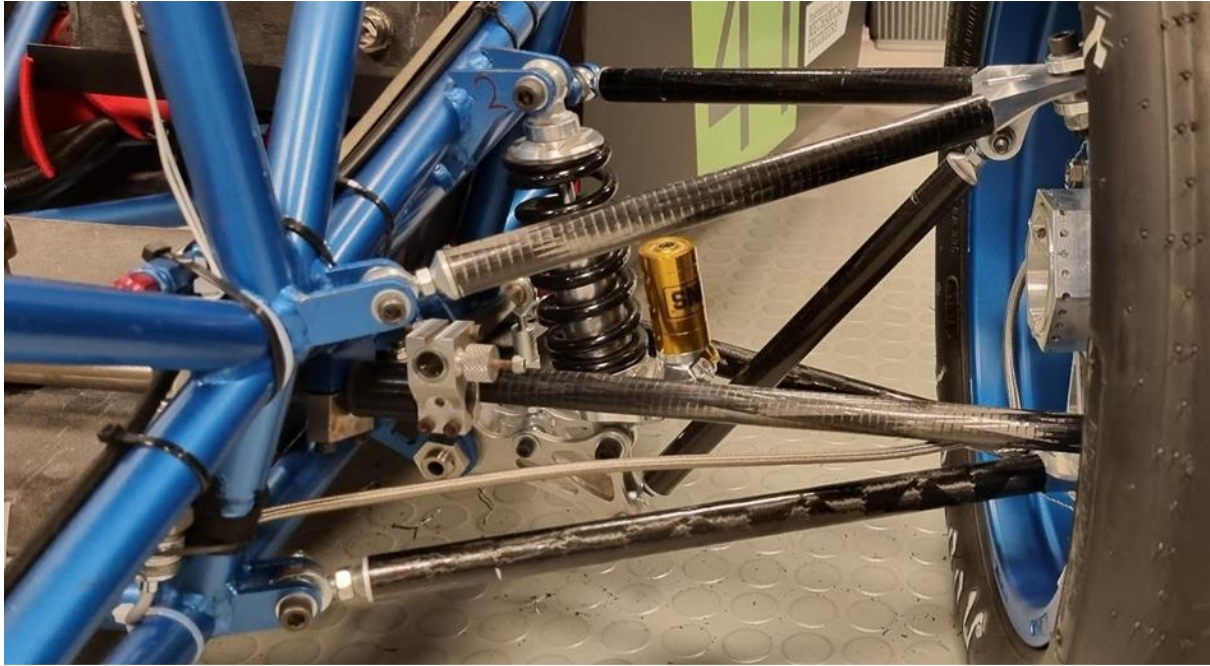
Prøven kan ikke ha brudd i endestykkene. Hvis dette skjer, må testen gjøres på nytt. [14]

4.5 Hjulopphengs teori

Spindelen er en av hovedkomponentene i hjuloppheng. Hjulopphengets hovedfunksjon er å koble hjulene sammen med rammen og opprettholde maksimal kontakt med veibanen samt å dempe bilens bevegelse over dumper og ujevnheter i veien. For å opprettholde best mulig grep og kontakt med veibanen under vektoverføring i svingene, er det viktig at hjulet holder en optimal vinkel med underlaget for å maksimere kontaktflaten.

4.5.1 Type hjuloppheng

Det har gjennom tiden blitt brukt mange typer hjulopphengdesign på både personbiler og racing biler. Valg av type hjuloppheng blir gjort basert på hvilke egenskaper som er ønskelig. Noen typer er optimalisert for komfort på veien og produksjonskostnad, mens andre er optimalisert for raskest mulig rundetid rundt banen. På racing biler har det vært double wishbone hjuloppheng som har blitt mest brukt og det er dette som brukes på ION sin racing bil. Dette er fordi det er enkelt design der alle elementene enkelt kan justeres individuelt. Det er enkelt å produsere og lett anvendelig på ulike typer rammedesign. Det vil ikke bli gått gjennom design av hjuloppheng i detalj annet enn selve spindelen som oppgaven omhandler da det vil bli brukt samme geometri som tidligere. Til tross for at det blir brukt samme geometri som tidligere er det viktig å ha forståelse for hvordan hjuloppheng fungerer og hvorfor geometrien er som den er, da dette i høyeste grad påvirker kreftene som går inn i spindelen.

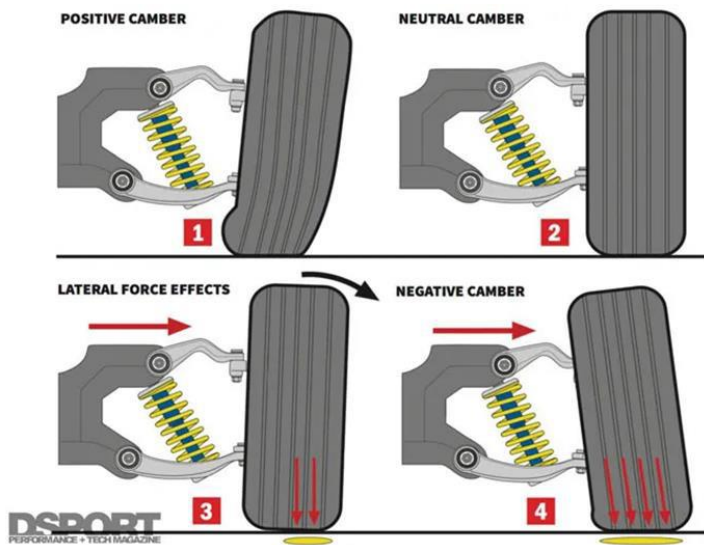


Bilde 4.9. Hjuloppheget foran på ION Racings Gullfakse.

4.5.2 Camber

Cambervinkelen er vinkelen på hjulet i forhold vertikalaksen. Dekket på bilen har mest grep når denne vinkelen er 0, det er derfor alltid ønskelig å oppnå å ha denne vinkelen lik null når det oppstår høyest last på dekket. Denne vinkelen endres naturlig i svinger på grunn av vektoverføring som oppstår fra sentripetalkraften og bevegelse i hjuloppheget. Det er derfor ønskelig å ha noen få grader med negativ camber i utgangspunktet, da vil vinkelen rette seg opp under vektoverføring.

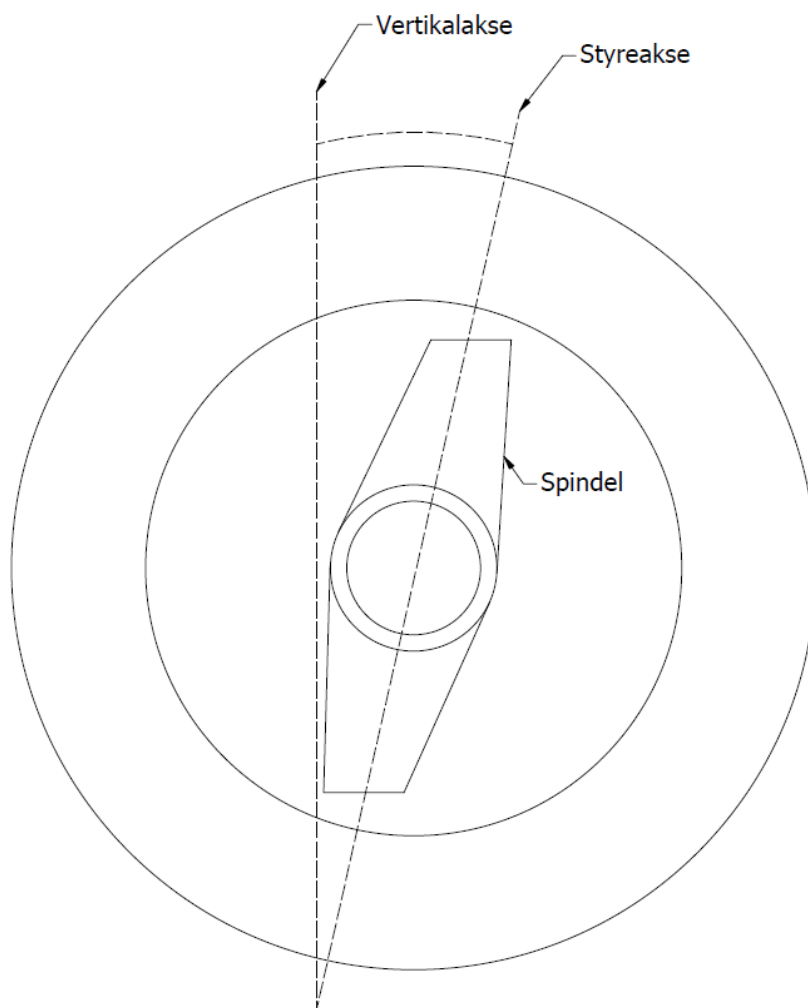
Det er vanlig å ha såkalt aktiv camber. Dette gjøres med å ha festepunktet på øvre bæream lengre inn mot rammen en på nedre bæream vist i bilde 4.9. Dette fører til at når hjuloppheget komprimeres øker cambervinkelen. Dette gjør at det er mulig å ha mindre cambervinkel i utgangspunktet, som fører til bedre grep på rettstrekker og slakere svinger. Illustrasjon av aktiv camber vist i figur 4.5. [15]



Figur 4.5. Illustrasjon av aktiv camber. Kilde [16]

4.5.3 Caster

Caster er vinkelen til vertikalaksen på linjen mellom festepunktene til øvre og nedre bæream i spindelen, som er styreaksen hjulet svinger rundt. Denne vinkelen θ vist i figur 4.6 er for å oppnå selvopprettende styring, det fører til at når man slipper rattet vil kreftene bli fordelt slik at hjulene retter seg opp. [17]



Figur 4.6. Illustrasjon av caster der θ er castervinkelen.

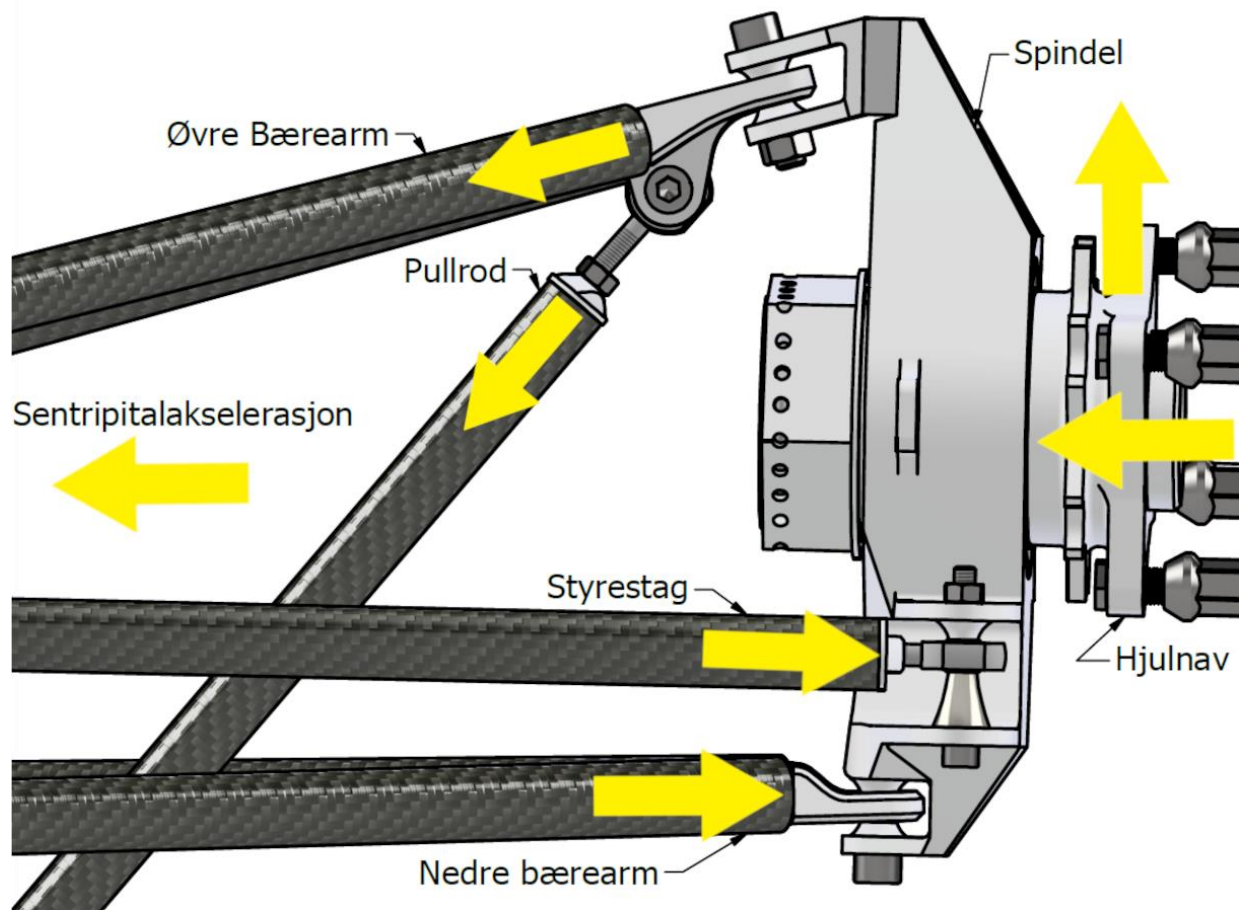
4.5.4 Spindelen

Spindelen er delen som kobler alt av hjulopphenget og styresystemet til hjulnavet og hjulet, bremsecaliperen sitter og montert på spindelen. Spindelen er en del under svært høy belastning der alle kreftene fra hjulet blir fordelt gjennom spindelen til resten av hjulopphenget. Spindelen har derfor tidligere vært laget av aluminium med høy styrke. Dette er en av de største delene på bilen i maskinert aluminium og veier 1110 gram. Gruppen valgte derfor å støpe denne i karbonfiber for å spare vekt. Tidligere brukt spindel vist på bilde 4.10.

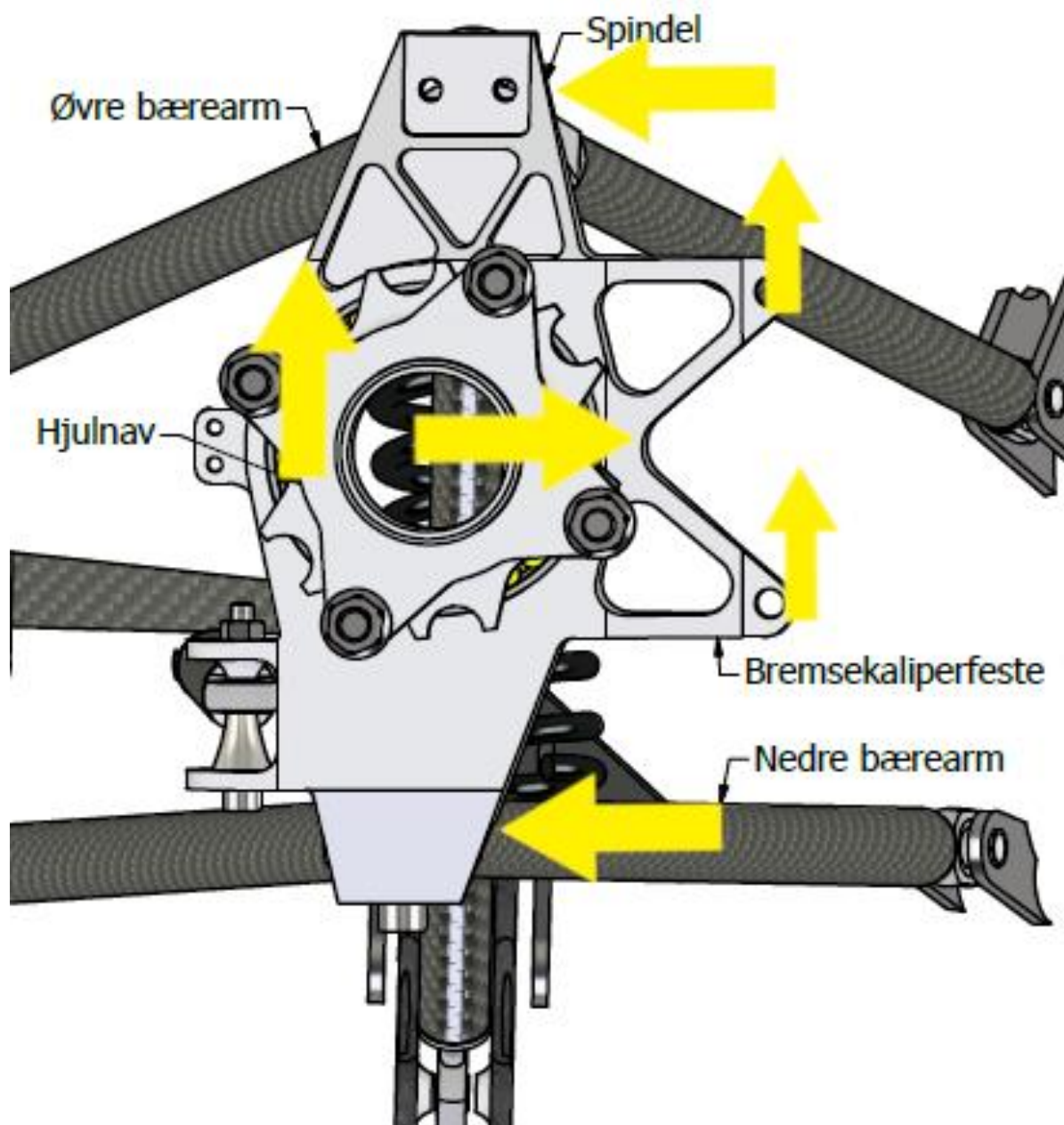


Bilde 4.10. Spindelen brukt på de 3 siste bilene til ION Racing.

Diagram av kreftene som går inn i spindelen i de største lastsenarioene under svinging og akselerasjon vist i figurene 4.7 og 4.8. Under svinging vil vektoverføringen lene seg over ut i svingen og legge mest vekt på hjulet ytterst i svingen, som fører til størst krefter i hjulopphenget til det ytterste hjulet i svingen. Under akselerasjon vil hjulopphenget foran være under størst belastning under bremsing da vektoverføringen lener seg forover.



Figur 4.7. Illustrasjon av retningen på kreftene som går inn i spindelen under svinging på hjulet ytterst i svingen.



Figur 4.8. Illustrasjon av retningen på kreftene som går inn i spindelen under nedbremsing.

5 Metode

Materialtesting brukes til å bestemme materialets egenskaper. Det ble brukt flere tester til å utføre forsøket. Disse er:

- Strekkprøving
- Kompresjonstest
- Bøyetest

Forsøkene krever 3d printet eller maskinert form og støping av alle stykkene. Forsøket dannet til sammen 35 prøvestykker.

Forsøkene danner resultater om materialets sprøhet, isotropi, strekkfasthet og e-modul.

5.1 Strekkprøving

Den første testen som ble gjennomført var strekkprøving. Prøvestykkene ble laget og gjennomført i henhold til standardene:

- ISO 527- 4:2021 (Prøvebetingelser for isotropiske og ortotropiske fiberforsterkede plastkompositter)
- ISO 527- 1:2019 (Bestemmelse av strekkegenskaper)
- ISO 2818:2018 (Tillaging av prøvelegemer ved maskinering)

Programmet som ble brukt i samsvar med strekktest maskinen var INSTRON. Det ble laget 5 prøvestykker av alle testene. Testene som skulle bli utført var:

- Diskontinuerlig karbonfiber støpt i aluminiumsform
- Diskontinuerlig karbonfiber støpt i 3d printet form
- Diskontinuerlig karbonfiber støpt i stort emne og maskinert ut i ulike vinkler.

Maskinen ble satt opp i henhold til standardene. [10] [11]

Strekkhastigheten ble satt til 2 mm/min og størrelse på stykkene var 210x25x4, i henhold til ISO 527-4:2021. Dette gir gripeområde på 30 mm da lengden på strekkområdet skulle være på 150mm. Dette ble målt opp i strekkmaskinen før hver test.

5.1.1 Design av prøvestykker

Strekprøvene ble lagd etter standard ISO 527-4 [118] Standarden består av flere ulike metoder for bruk av ulike bindemiddel i kompositten. I denne oppgaven brukes metode 2, denne metoden har mål spesifisert i tabell 5.1.

Tabell 5.1. Dimensjonene på prøvestykkene [11]

Prøve lengde	Tykkelse	Bredde	Måle lengde	Strekklengden
≥ 250	2 til 10	$25 \pm 0,5$ til $50 \pm 0,5$	50 ± 1	150 ± 1

Dimensjonene på prøvestykkene ble satt både etter kravene i standarden og av praktiske årsaker. Lengden på innfestingen i strekkmaskinen er ikke spesifisert. For å oppnå ønsket form og størrelse på formen, var det nødvendig å kunne printe den i en 3dprinter med maksimal lengde på 250 mm, og med ønsket veggtykkelse på 20 mm på hver side av formen. Lengden på teststykket ble da 210 mm. Dermed ble det 30 mm til overs på hver side for innfesting. Tykkelsen er spesifisert til å være mellom 2 og 10 mm, det var ønskelig å ha litt ekstra materiale å jobbe med på stykkene som skal maskineres, men ikke for tykt da det vil kreve høy kraft for å oppnå brudd, det velges derfor tykkelse på 4 mm som utgangspunkt. Siden en av formen maskineres i aluminium og det oppstår et indre hjørne i kantene, ble det satt på en radius på 4 mm i kantene for å gjøre det enklere å maskinere formen. Strekkstav tegnet i Inventor vist i bilde 5.1



Bilde 5.1. Strekkstav tegnet i Inventor

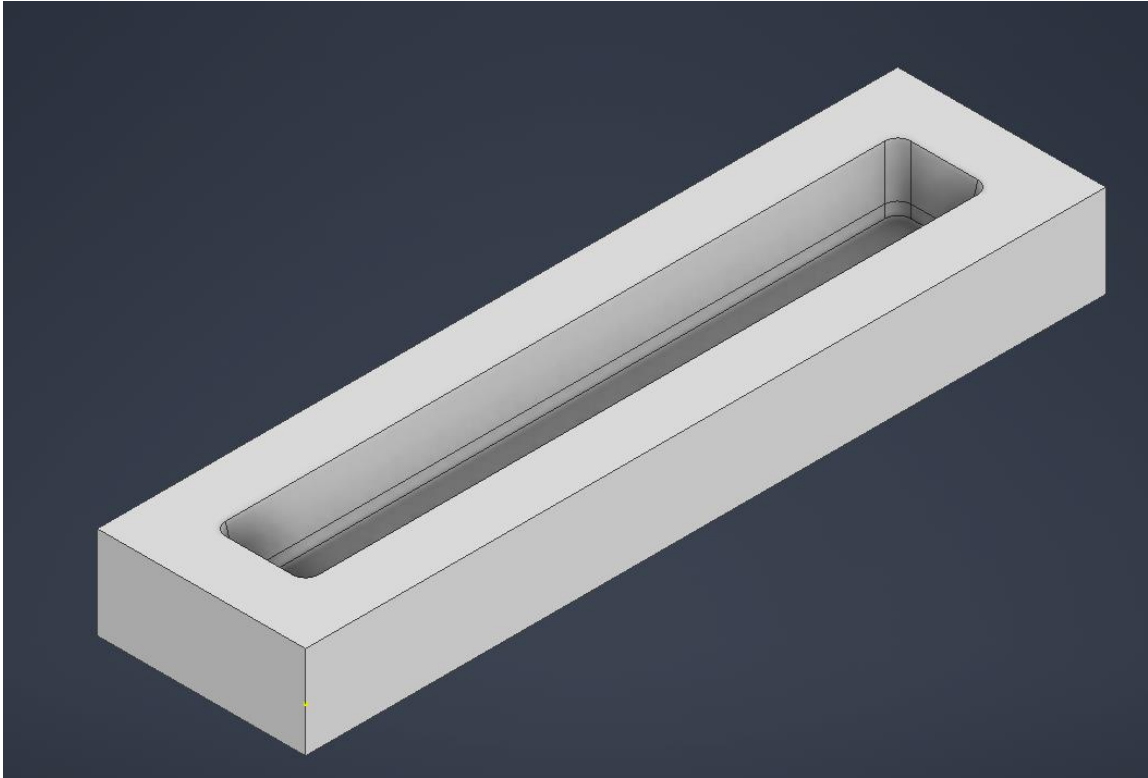
5.1.2 Produksjon og design av støpeformer

Det ble designet to forskjellige former, en til enkelttester og en for å støpe et emne for å maskinere ut prøver fra. Disse ble først tegnet i Inventor, deretter 3d printet og maskinert. Alle formene bruker samme prinsipp forklart i kapittel 4.2.1 figur 4.1 og 4.2. Den mest brukte metoden å 3dprinte på, er med såkalt delvis innfylling. Dette betyr at printen er delvis hul med en optimalisert geometri på innsiden. Det ble gjort slik av flere grunner, de fleste printerne har vanskelig for å printe større solide deler på grunn av deformasjon i den høye varmen som kreves. Det gir også en større materialkostnad å printe større deler samt at det tar lengre tid.

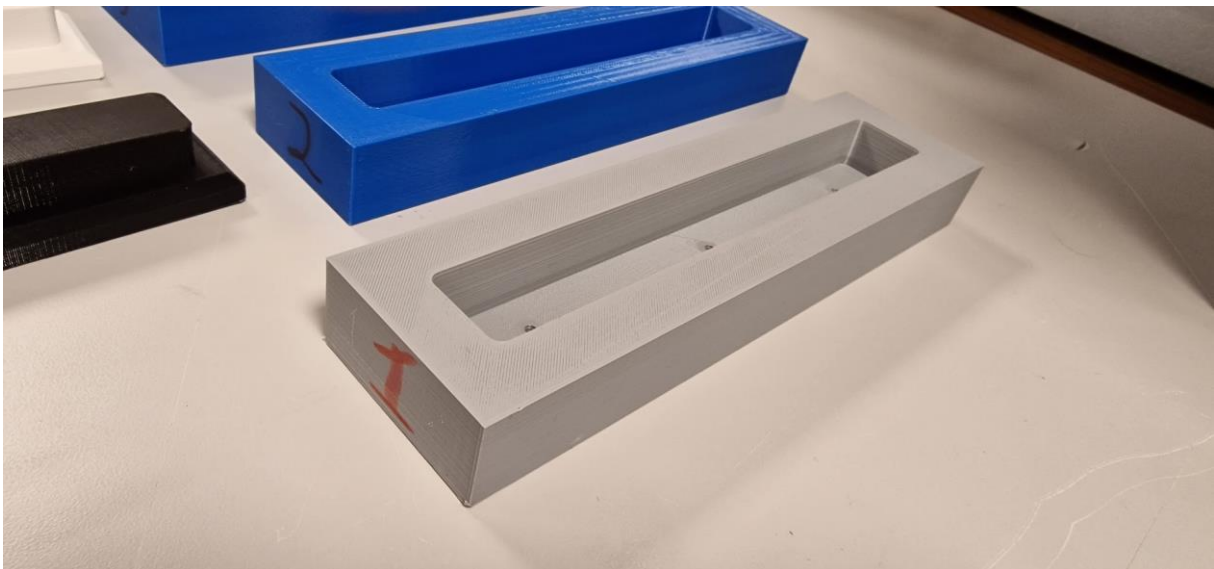
Gruppen har god erfaring med 3d printing og produksjon av former tidligere. Derfor ble formene tegnet på intuisjon basert på tidligere erfaringer. De mest vanlige egnede materialene å printe med er PLA, PETG og ABS. Samtlige av disse er forskjellige plastblandinger som kan 3dprintes i en standard hobbyprinter. ABS er det sterkeste materialet av disse, men er noe vanskeligere å få godt resultat med. PLA er det materiale universitetet har mest av på lager og er av egen erfaring sterkt nok.

På grunn av noe begrenset tilgang til printere, ble formene printet med ulike printere. Da det er mye som skal printes har gruppen fått tilgang til å få printe delene i UiS sin industrielle printer (Fortus 450mc) til de største formene, da denne kan printe raskere og større ting. Denne printer også ABS uten problem. Til de mindre formene ble det brukt Ultimaker S5 og Prusa i3 MK3S+, her ble det brukt PLA da det er mest egnet for disse printerne. Det ble valgt å printe med 40% innfylling som er noe høyere enn det mest vanlige på rundt 20-30%, på grunn av at formen utsettes for trykk.

Formen til prøvene ble tegnet med mål på indre volum lik målene satt for strekkprøven. Bunnen av formen til strekkstaven er vist i bilde 5.2. Det er også tegnet inn hull i bunnen for å enkelt kunne presse gjennom tre M4 bolter for å ta ut den ferdige strekkstaven. I bilde 5.5 av snittet gjennom midten av formen vises hullene og vinkelen på sidene som gjør at overflødig resin kan flyte ut og delen kan tas ut enklere. Høyden på sidene over volumet til strekkstaven er satt til 15mm, dette gir god plass til det ukomprimerte karbonfiberet og resin. Denne formen ble printet med PLA og 40% innfylling vist bilde 5.3. Det ble også maskinert en lik form i aluminium vist i bilde 5.4 for å sammenligne med prøvene støpt i 3dprintet form. Overdelene til formene vist i bilde 5.6 til 5.8. Snitt av sammenstilling visst i bilde 5.9 og sammenstilling av ferdig 3dprintet form vist i bilde 5.10.



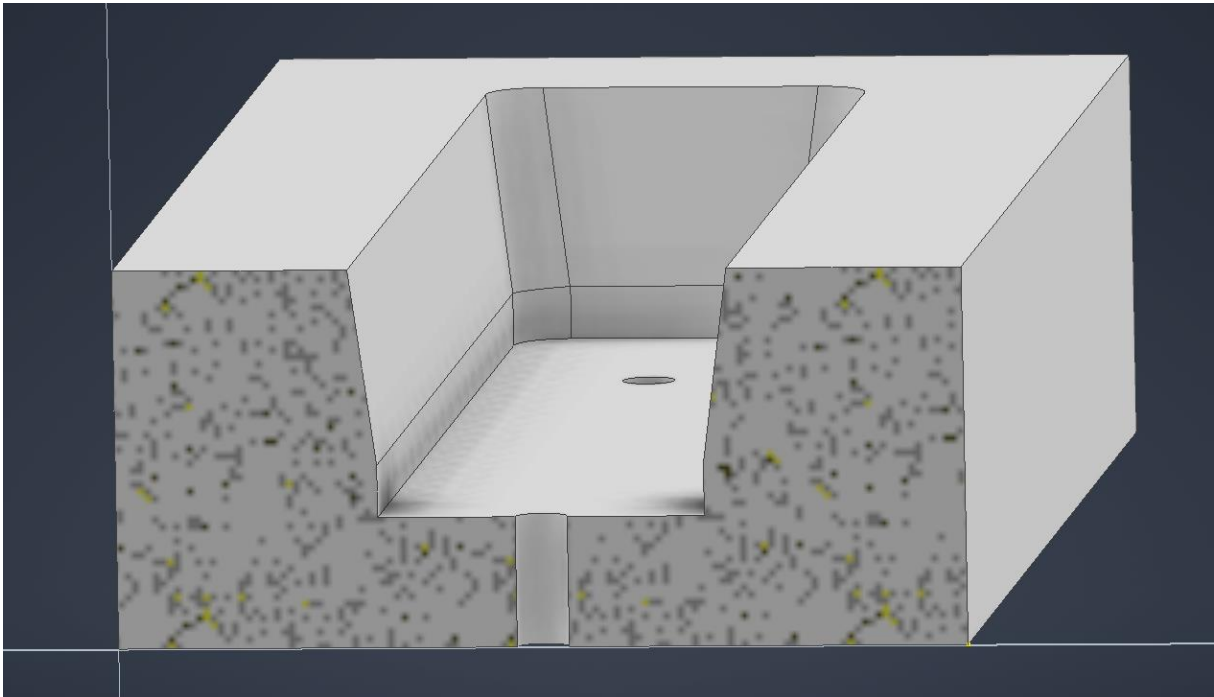
Bilde 5.2. Model fra Inventor av bunndel av form til strekkprøver.



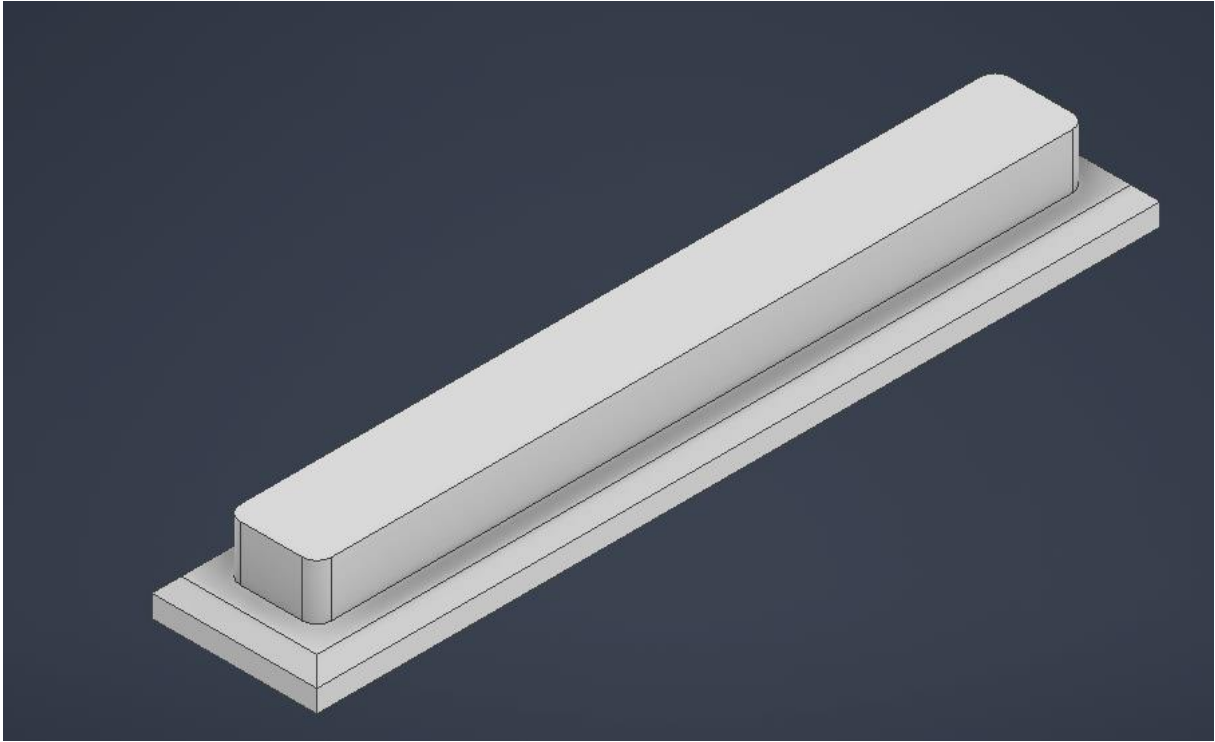
Bilde 5.3. 3dprintet bunndel av støpeform til strekkprøver.



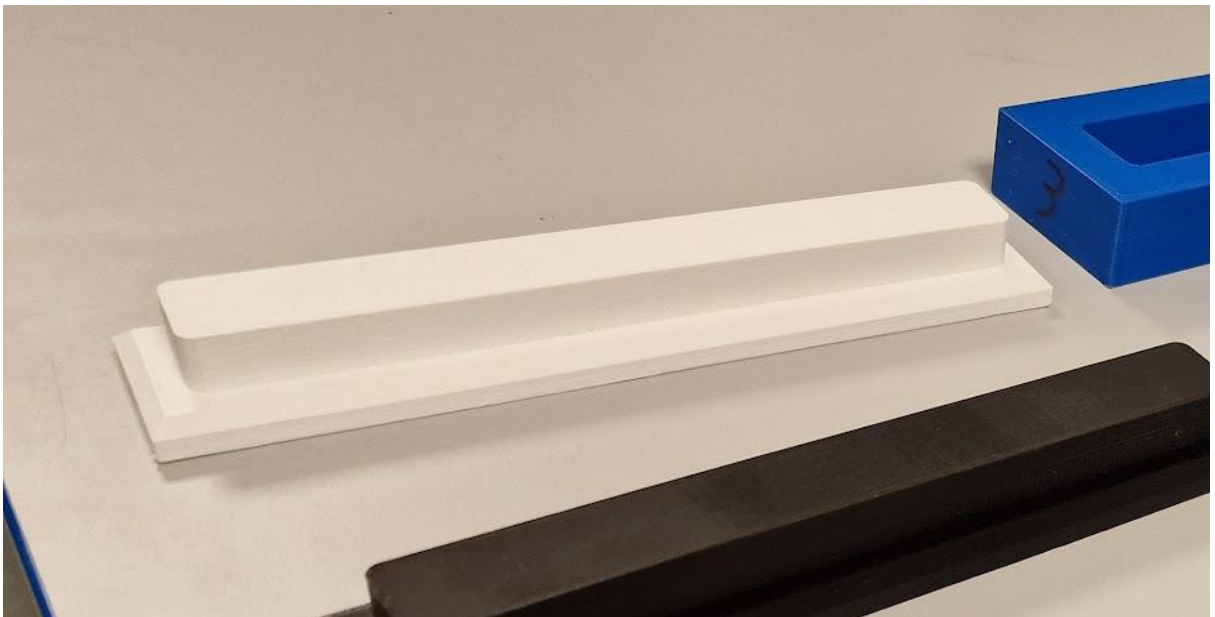
Bilde 5.4. Bunn del av støpeform maskinert i aluminium til strekkprøver.



Bilde 5.5. Modell fra Inventor av snitt gjennom midten av bunn delen av form til strekkprøver.



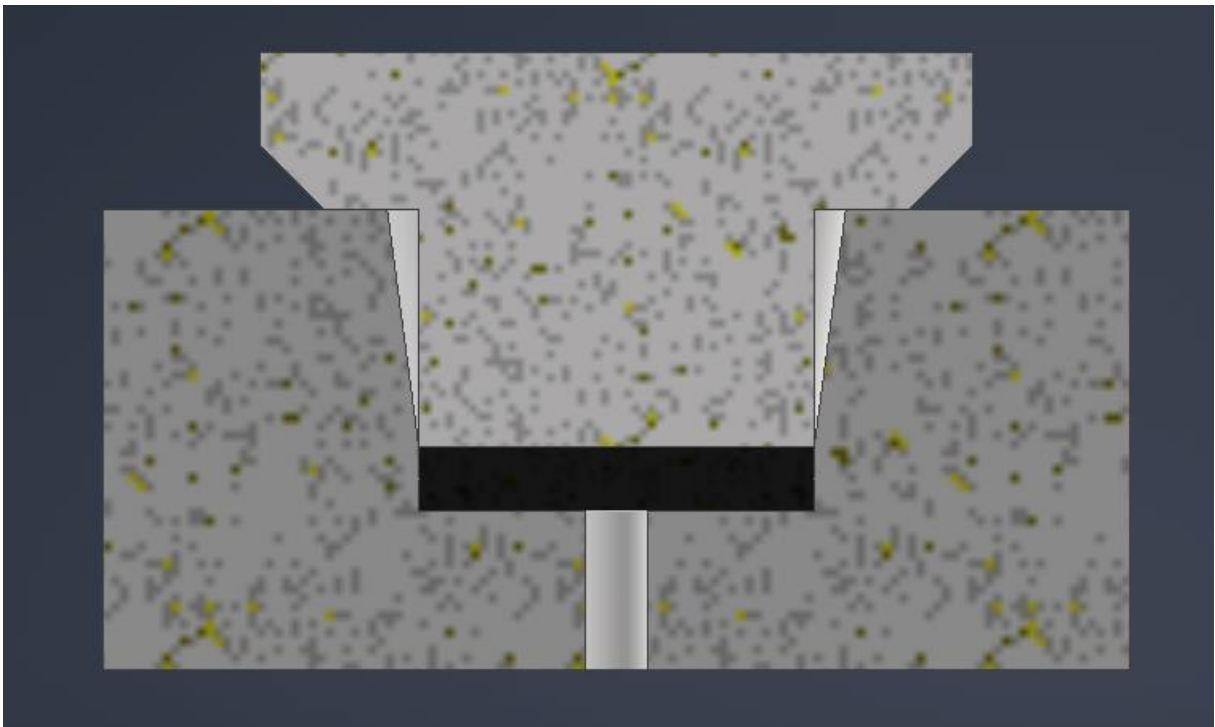
Bilde 5.6. Model fra Inventor av overdel av form til strekkprøver.



Bilde 5.7. 3dprintet overdel av form til strekkprøver.



Bilde 5.8. Overdel av form maskinert i aluminium til strekkprøver.



Bilde 5.9. Snitt gjennom midten av sammenstilling av form til strekkprøver med overdel og underdel satt sammen i komprimert stilling fra Inventor. Strekkprøve markert i svart.



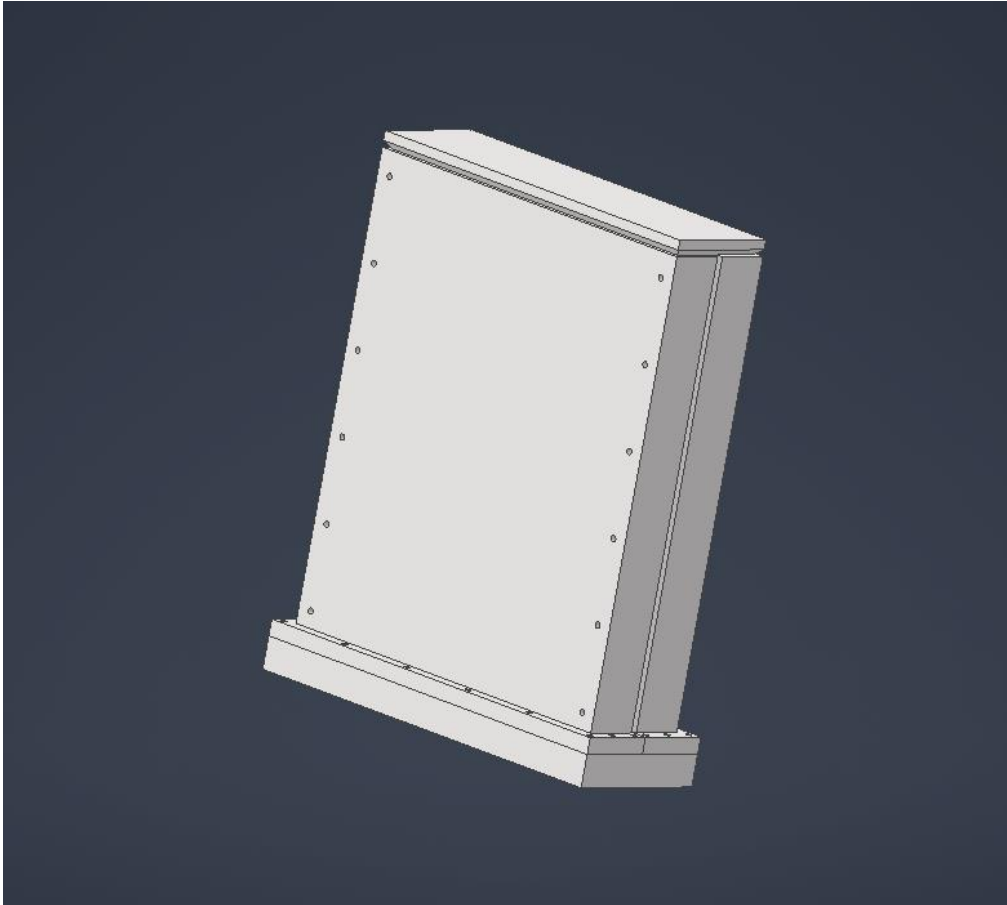
Bilde 5.10. De 2 delene av formen til strekkprøvene med overdel og underdel satt sammen i komprimert stilling. Formene er merket med nummer for å kunne studere om resultat fra strekkprøving har sammenheng med formen den var støpt i.

For å teste hvor isotropisk karbonfiberet er, ble det maskinert prøver ut fra et større emne i ulike vinkler og plan. Dette emnet måtte være så stort at det kunne skjæres ut strekkstaver i 0° , 45° og 90° slik som vist i kapittel 4.3.1 figur 4.3 i oversikt av testene. Tykkelsen måtte også være så tykk at det kunne skjæres ut minst 3 strekkstaver på 4 mm. Prøvene ble skjært ut med båndsgag som har et 1 mm tykt blad. Det måtte også være minst 2 mm ekstra for å kunne planslipe prøvene rett, da båndsgagen kan sage litt skjevt. Målene på emnet ble derfor satt til 30x210x235.

Formen til emnet ble tegnet på samme måte som formen til strekkstaven. Siden denne er en god del større, splittes bundelen i tre deler så det blir enklere å demontere den, men også for å enklere kunne 3dprinte formen. Formen skrues sammen i hullene vist på modellen i bilde 5.11 med M5 og M4 bolter skrudd direkte i plasten. Denne ble på grunn av størrelsen, printet i Fortus 450mc. Denne printereren er dyr i drift, denne ble derfor printet sammen med andre ting til andre prosjekter for å utnytte driftstid. På grunn av dette måtte den printes med 52% infill som er noe høyere en 40% som planlagt. Formen til emnet vist i bilde 5.11. Sammenstilling av formen vist i bilde 5.12.



Bilde 5.11. Bundelen av formen til emnet for strekktester.

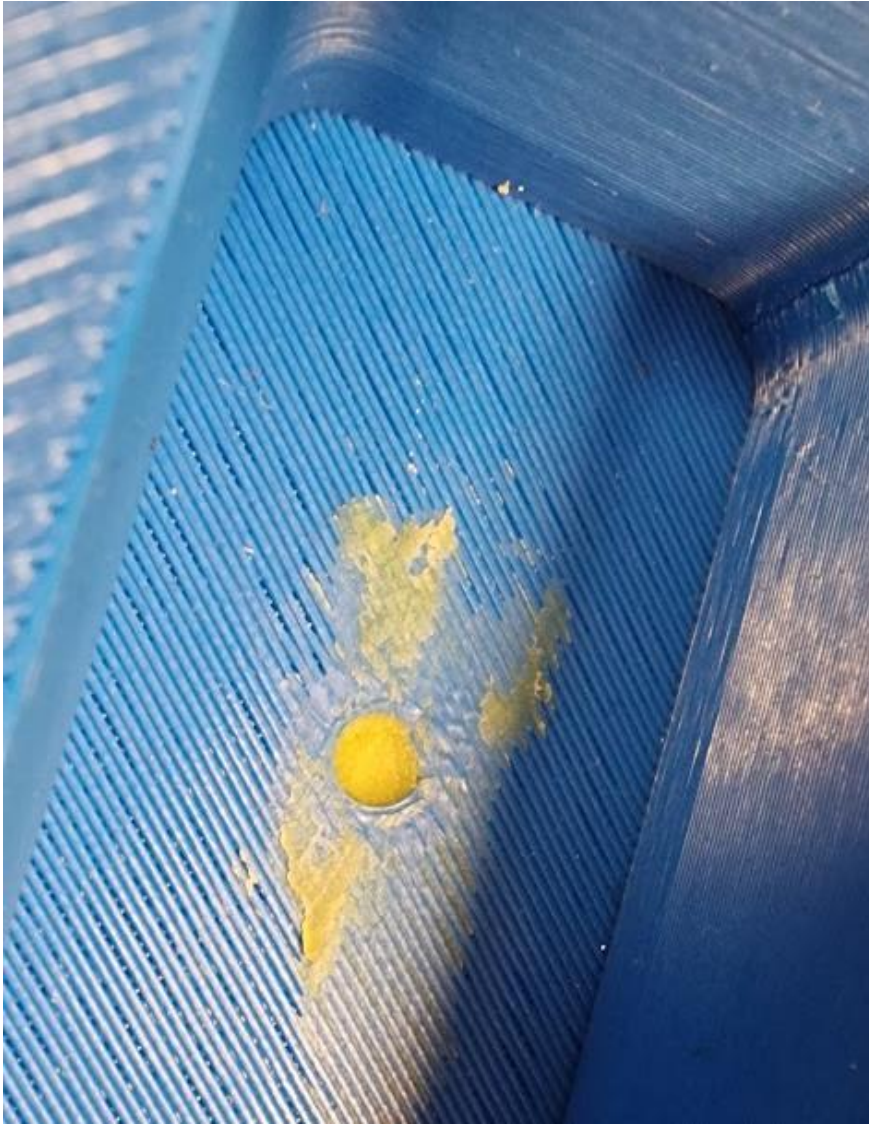


Bilde 5.12. Sammenstilling av form til emne for strekkstaver.

5.1.3 Støping av prøvestykker

Når formene var ferdig printet og maskinert kunne støpeprosessen begynne. Produksjon av prøvestykkene var en tidkrevende prosess da det var mange prøvestykker som skulle støpes. Først måtte det regnes ut mengden karbonfiber som skulle brukes. Måten dette ble gjort på er å ta volumet av delen som skulle støpes og multiplisere det med tettheten til karbonfiber. Dette gir vekten til hvert prøvestykke. 60% av vekten til prøvestykket skal være fibre og resten resin. I blandingen til resin ble det brukt 100 deler resin med 30 deler herder. Her ble det brukt IN2 Epoxy Infusion Resin fra Easy Composites. Det er vanlig å ta litt overslag på mengden resin, slik at alle fibrene blir ordentlig fuktet. Overskuddet resin vil flyte ut av formen ved trykk. Fibrene som ble brukt er oppkuttete fibre fra Easy Composites. Alle fibrene skal ha lik lengde på 12 mm.

Formene måtte så prepareres. Formene ble preparert med voks som gjør at karbonfiberet skal kunne løsne fra formen når delen skal tas ut. De 3dprintede formene sprayeres med en spray voks som fyller de grove 3dprintelagene vist bilde 5.13. Formen i aluminium smøres inn med vanlig voks som er beregnet på former med blanke overflater. Hullene i bunnen av formen fylles med innfyllings voks for at det ikke skal flyte ut epoxy resin vist i bilde 5.13.



Bilde 5.13. 3dprintet form med innfyllings voks i hullet.

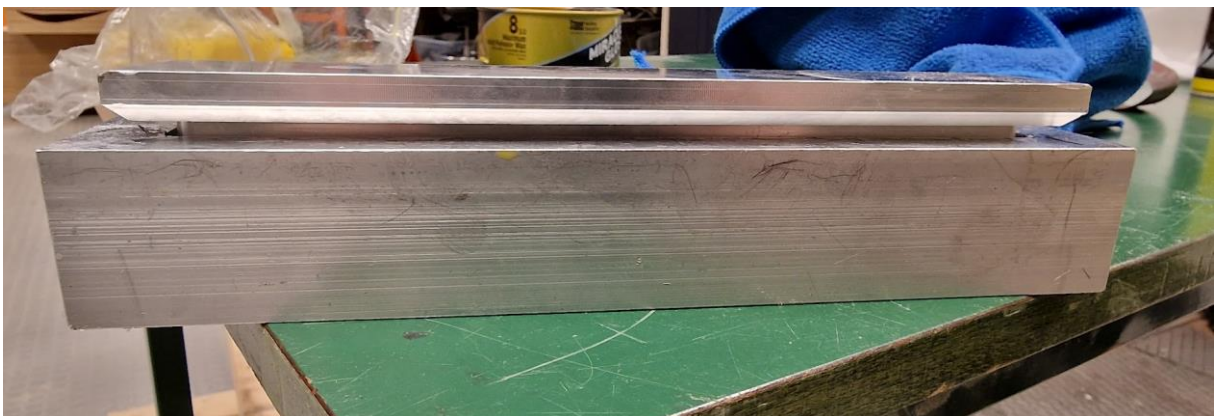
Når formene var preparert, ble det lagt epoxy og karbonfiber lagvis i formen vist i bilde 5.14. Det er viktig å legge karbonfiberet og epoxy resinet jevnt slik at det blir jevn tetthet i den ferdige prøven, vist i bilde 5.15. Når overdelen er lagt på er det viktig at det er jevn åpning mellom overdel og bunn del vist i bilde 5.16, om denne ligger skjevt tyder det på at fibrene ligger ujevnt.



Bilde 5.14. Karbonfiber og epoxy resin som blir lagt lagvis i 3dpritet form.



Bilde 5.15. Slik ser støpingen ut når fibrene er lagt jevnt og alle fibrene er helt fuktet i epoxy resin.



Bilde 5.16. Overdel plassert på ferdig bunndel fylt med resin og karbonfiber.

Formen ble deretter komprimert i en hydraulisk presse med opptil 3 tonns trykk. Det ble lagt en stålplate mellom presse og form for å fordele presset best mulig slik at fibrene komprimeres jevnt. Komprimert form i presse vist i bilde 5.17.



Bilde 5.17. Støpeform komprimert i presse.

Etter at formen har herdet i minst 24 timer (ventetiden er alt etter type herder som brukes) kunne formen åpnes og strekkprøven tas ut. Dette ble gjort ved å sette formen opp ned i pressen med to stålprofiler under bunndelen av formen slik at overdelen henger fritt. Deretter kunne det settes inn skruer i formen for å presse strekkprøven og overdelen ut. Formen ble åpnet uten noen form for skader på form eller prøvestykke og kunne gjenbrukes flere ganger. Demontering av form vist i bilde 5.18



Bilde 5.18. Demontering av støpeform i presse

Når strekkprøven var tatt ut av formen kunne den finpusses og prepareres til strekkprøving. Det blir litt skarpe kanter og litt overflødig resin der hullene i bunnen av formen var vist i bilde 5.19. Disse

måtte files ned for å gi en slett flate for strekkmaskinen å klemme på. Prøvene ble merket med navn, form og prøvenummer fra den formen. Ferdig preparert strekkprøve fra form i aluminium vist i bilde 5.20.

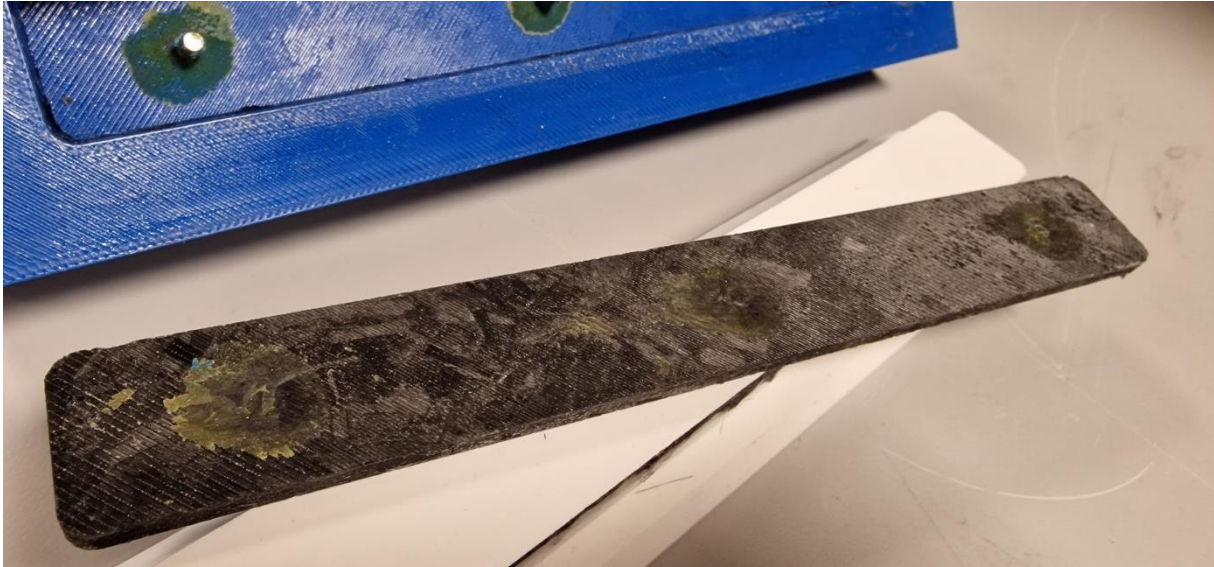


Bilde 5.19. Strekkprøve rett fra form uten noe form for bearbeiding.



Bilde 5.20. Ferdig preparert strekkprøve fra form i aluminium.

Overflaten på prøvene fra 3dprintede former er noe grovere enn på prøvene fra andre former. Dette skyldes teksturen fra lagene som 3dprintereren bygger formen opp av vist i bilde 5.21. Disse måtte pusses litt ekstra for å få en jevn flate for strekkmaskinen å klemme på. Det var likevel viktig å pusse ned resinnet og ikke selve karbonfiberet da dette kunne påvirke resultatet av strekkprøvingen. Denne formen ble åpnet uten noen form for skader og gjenbrukt flere ganger. Ferdig preparert strekkprøve fra 3dprintet form vist i bilde 5.22



Bilde 5.21. Upreparert strekkprøve fra 3dprintet form.



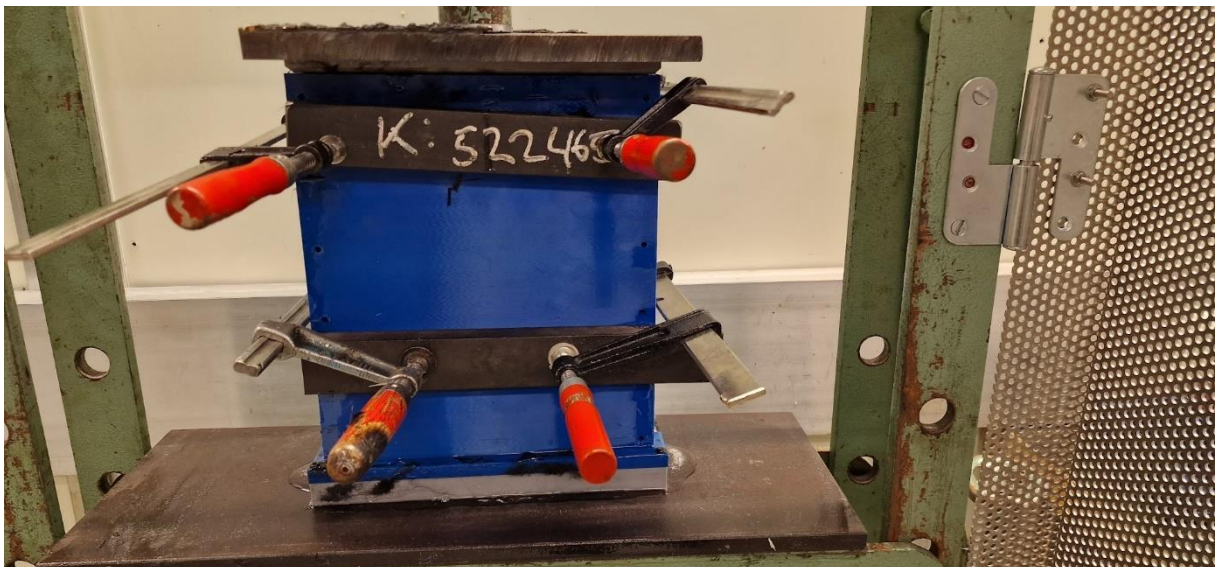
Bilde 5.22. Ferdig preparert strekkprøve fra 3dprintet form. Merket med form den er støpt i og nummer på testen.

Støpingen av emnet til å maskinere ut strekkstaver var en tidkrevende prosess da det var 2 kg med karbonfiber og epoxy resin som skulle blandes sammen. Først måtte begge halvdelene fylles, vist i bilde 5.23. Deretter måtte halvdelene av formen skrus sammen for å legge mer fiber i åpningen. Når formen var full, var den fortsatt bare fylt med halvparten av den totale mengden med fiber. Dette var på grunn av størrelsen på formen og det store volumet til karbonfiberet i ukomprimert tilstand. Dette ble løst med å sette i toppen av formen for å komprimere fibrene i flere omganger slik at det ble mer plass til å fylle på med mer fiber og resin. Det endte med at fibrene måtte komprimeres sammen totalt

ti ganger. Det viste seg at formen bulet litt ut på midten på grunn av trykket. Det ble derfor skrudd på noen stålplater med skrutinger for å tvinge den sammen. Ferdig komprimert form vist i bilde 5.24.

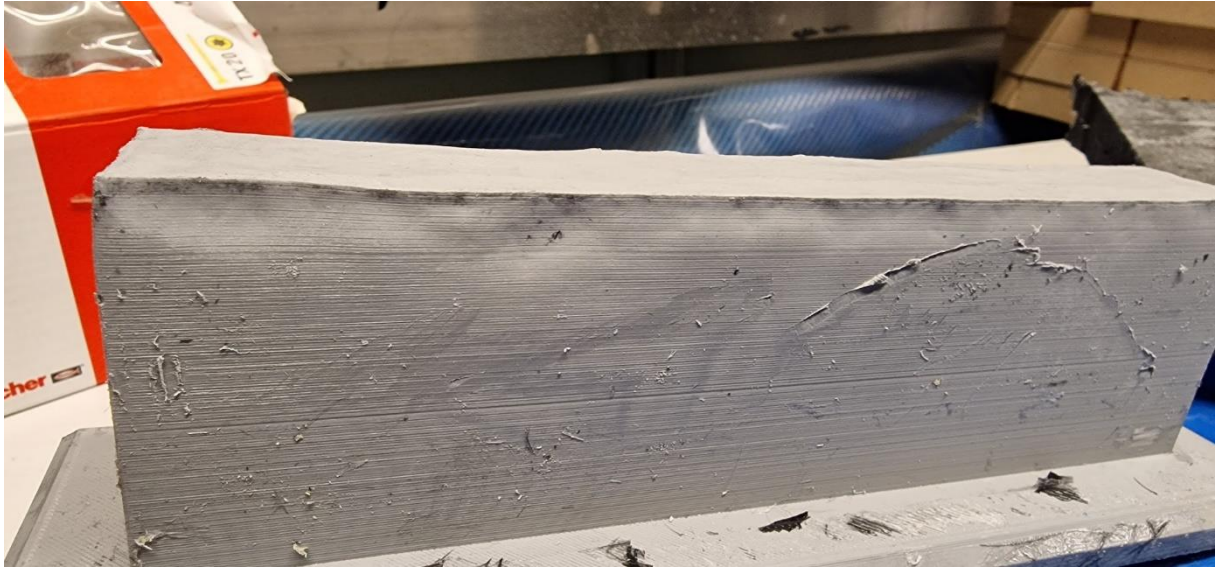


Bilde 5.23 Støping av emnet til strekkstaver.



Bilde 5.24. Støpeform til strekkstavemne komprimert i presse.

Etter at emnet hadde herdet kunne formen splittes. Formen ble åpnet uten skader på noen deler utenom bunnplaten. Formen hadde holdt godt sammen under trykk med lite til ingen deformasjon på toppdelen vist i bilde 5.25. Ferdig støpt emne vist i bilde 5,26

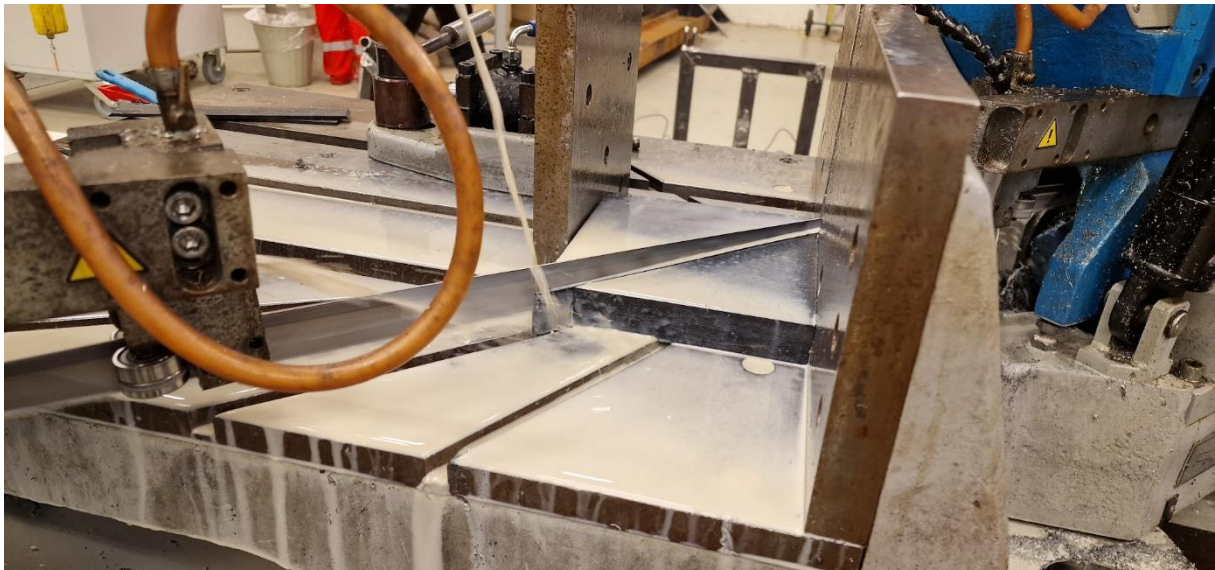


Bilde 5.25. Minimal deformasjon på toppdelen av formen.



Bilde 5.26. Splittet form med emne tatt ut.

Det ferdige emnet ble deretter kappet opp i individuelle strekkprøver. Dette ble gjort i båndsag etter standard ISO 2818. I standarden var det spesifisert at det skulle kappes uten kjølevæske. Dersom man kapper karbonfiber uten kjølevæske blir det mye karbonfiberstøv som kan spre seg i hele verkstedet. Karbonfiberstøv er ikke anbefalt å verken puste inn eller få i kontakt med hud. Det ble derfor på grunn av mengden som skulle kappes, avgjort å kappe med kjølevæske. Typen kjølevæske som ble brukt var veldig utvannet og skal ikke være skadelig for karbonfibret eller epoxy resinnet som materialet består av. Kapping av strekkprøver vist i bilde 5.27 og ferdige strekkprøver vist i bilde 5.28. [18]



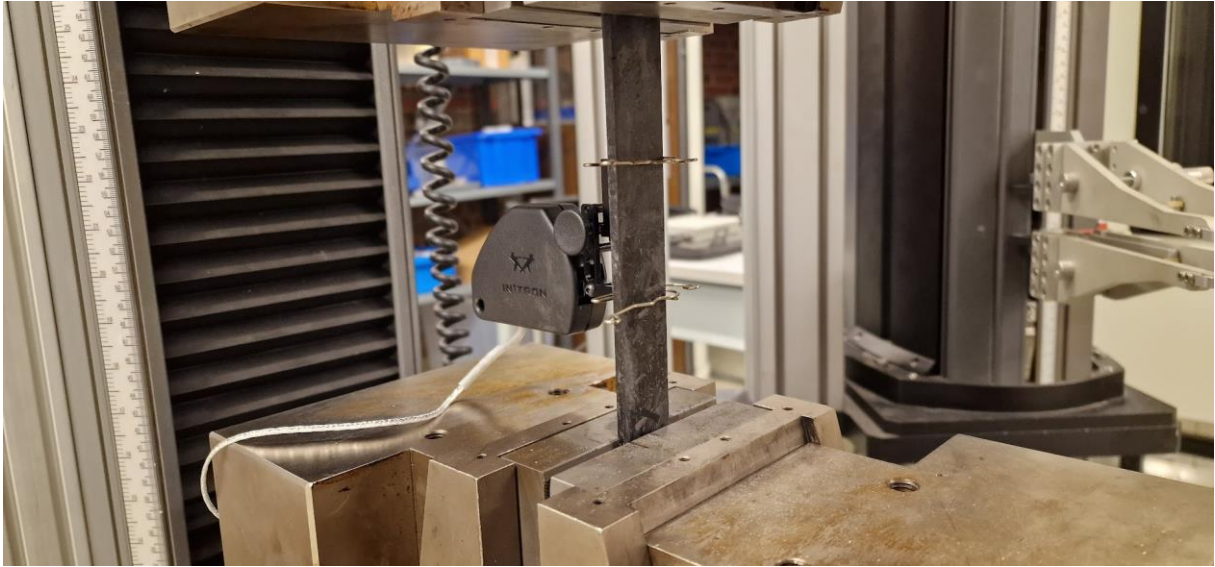
Bilde 5.27. Kapping av strekkprøver i båndsg.



Bilde 5.28. Ferdigkappede strekkprøver, merket med grader de er kappet i.

5.1.4 Utførelse av strekkprøving

Etter at prøvestykkene var laget, ble strekkprøvingen utført etter standard ISO 527- 4:2021. Det ble brukt eksternt ekstensiometer klippet på testen for å få en større nøyaktighet en det innebygde ekstensiometeret, som er mindre nøyaktig på materiale med lite forlengelse. Utførelse av strekkprøving vist i bilde 5.29. Alle utførte strekkprøvene vist i bilde 5.30



Bilde 5.29. Strekkprøve spent opp i strekkmaskin med ekstensiometer klipset på.



Bilde 5.30. Alle strekkprøvene utført.

5.2 Kompresjonstest

Etter strekkprøvingen ble det gjennomført kompresjonsprøver. Prøvestykkene ble laget og gjennomført i henhold til standard:

- ISO 14126:1999 (Bestemmelse av kompresjonsegenskaper i planets retning)

Maskinen som ble brukt er INSTRON 5985 og er i henhold til standard. Det ble laget 5 prøvestykker, hvor alle er støpt i 3dprintet form.

Kompresjonshastigheten ble satt til 1 mm/min. Hvor testen ble komprimert til brudd.

5.2.1 Design av prøvestykker

Kompresjonsprøvene ble laget etter standard ISO 14216:1999. Dimensjonene som ble valgt er fra Type B1 i standarden. Grunnen til dette var for å slippe å støpe prøvestykker med endestykker. Type B1 har et rektangulært tverrsnitt og er gitt ved dimensjonene i tabell 5.2. Prøven endte med dimensjonene 110x2x10.

Tabell 5.2. Dimensjoner for kompresjonsprøven. [14]

Prøve lengde	Tykkelse	Bredde	Distanse mellom grepene
110 ± 1	2 ± 0,2 til 10 ± 0,2	10 ± 0,5	10

5.2.2 Produksjon og design av støpeformer

Formene ble laget på samme måte som formene til strekkprøvene etter dimensjonene til kompresjonstesten. Støpeform brukt vist i bilde 5.31



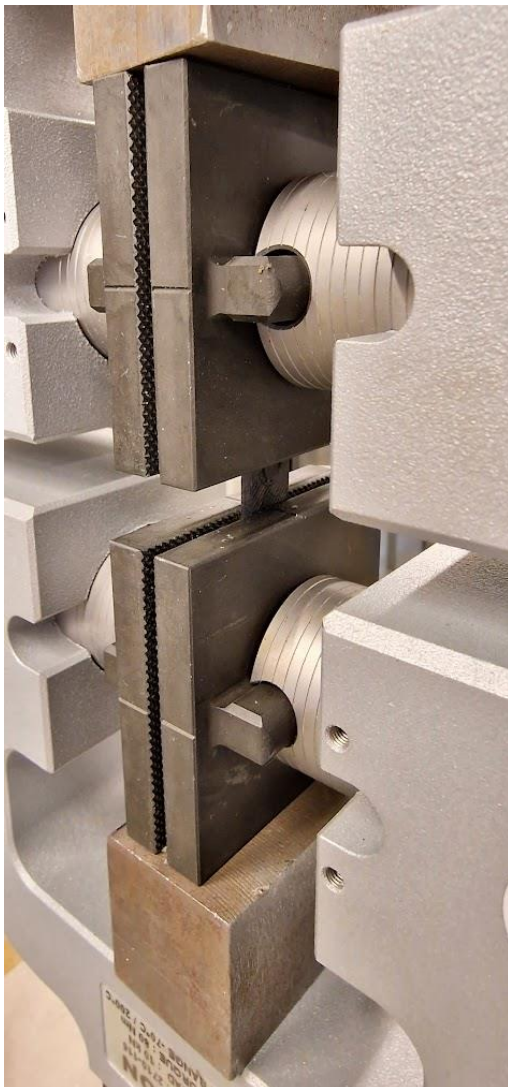
Bilde 5.31. Støpeform brukt til å lage prøvestykker for kompresjonstest.

5.2.3 Støping av prøvestykker

Metoden for støping er lik som den for strekkprøvene vist i kapittel 5.1.3. På grunn av størrelsen til kompresjonsstykkene, ble det nødvendig å bruke en mer nøyaktig vekt. Stykket trengte 1,85 gram fibre. Ved en så liten mengde er feilmarginen med flere gram betydelig. Tettheten til karbonfiberet kan derfor tas som en feilkilde. Mengden resin prøven trengte var så liten at nesten alt forsvant i penselen. Det ble derfor nødvendig å gjøre et overslag. Dette vil ikke ha noe utslag på tettheten siden alt overflødig resin flyter ut av formen når den er under trykk.

5.2.4 Utførelse av kompresjonstest

Etter at prøvestykkene var laget, ble testingen utført etter ISO 14126:1999. Utførelsen av testen vist i bilde 5.32 og alle utførte prøvene vist i bilde 5.33



Bilde 5.32. Kompresjonsprøve spent opp i maskin.



Bilde 5.33. Alle utførte kompresjonstester.

5.3 Bøyetest

Bøyetest var den siste testen som ble gjennomført. Testen ble gjennomført i henhold til standardene:

- ISO 14125:1998 (Bestemmelse av bøyeegenskaper)
- ISO 2818:2018 (Tillaging av prøveemner ved maskinering)

Maskinen som ble brukt er INSTRON 5985 og er i henhold til standard. Det ble laget 6 prøvestykker, men på grunn av deformasjon under maskinering ble det kun gjennomført 5 gyldige tester.

Testen som ble utført var en 4 punkts bøyetest, da dette er mest egnet for isotropiske materialer.

5.3.1 Design av prøvestykker

Bøyetestene ble laget etter standard ISO 14125:1998. Dimensjonene ble gitt utfra at det møter kriteriene for ikke kontinuerlig karbonfiber for 4 punkts bøyetest. Disse er gitt i tabell 5.3.

Tabell 5.3. Dimensjonene er gitt i millimeter. [129]

Prøve lengde	Ytre spenn	Indre spenn	Bredde	Tykkelse
80	66	22	10	4

Prøvene kunnen ikke ha dimensjoner som varierte mer enn 2% fra de oppgitte målene. Bredden på prøven kunne variere opp til 3%.

5.3.2 Produksjon og design av støpeformer

Formene ble laget på samme måte som dem i strekk og kompresjonstestene etter dimensjonene til bøyetesten. Støpeform brukt vist i bilde 5.34.



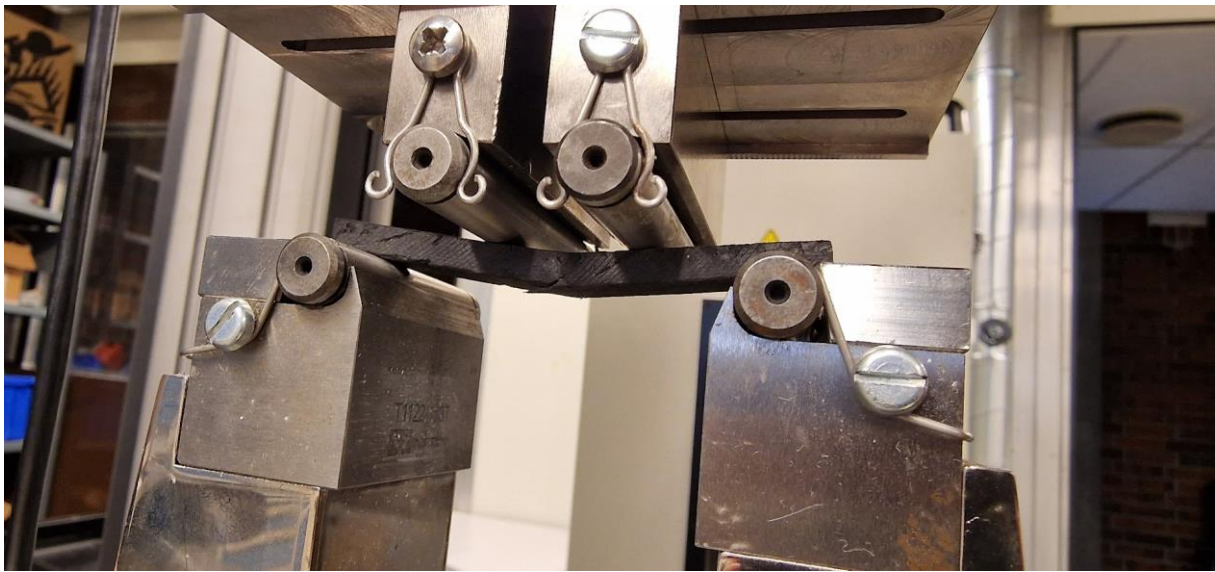
Bilde 5.34. Støpeform brukt til å lage prøvestykker for bøyetest.

5.3.3 Støping og ferdigstilling av prøvestykker

Metoden for støping var lik som den for strekkprøvene og kompresjonstestene i 5.1.3. Når prøvene var ferdig støpt, ble det gjort en feilberegning på dimensjonene på prøvestykkene, disse måtte derfor maskineres noe ned. På grunn av metoden for maskinering, ble ikke alle testene innenfor målene til standarden, men opptil 1 mm større. Dette ble nøye målt når styrken ble beregnet og burde derfor ha minimal påvirkning på resultatet

5.3.4 Utførelse av Bøyetest

Etter at prøvestykkene var laget utføres bøyetestene etter ISO 14125:1998. Utførelse av bøyetest vist i bilde 5.35 og alle bøyetestene utført vist i bilde 5.36



Bilde 5.35. Bøyetest spent opp i maskin under bøying.



Bilde 5.36. Utførte bøyetester.

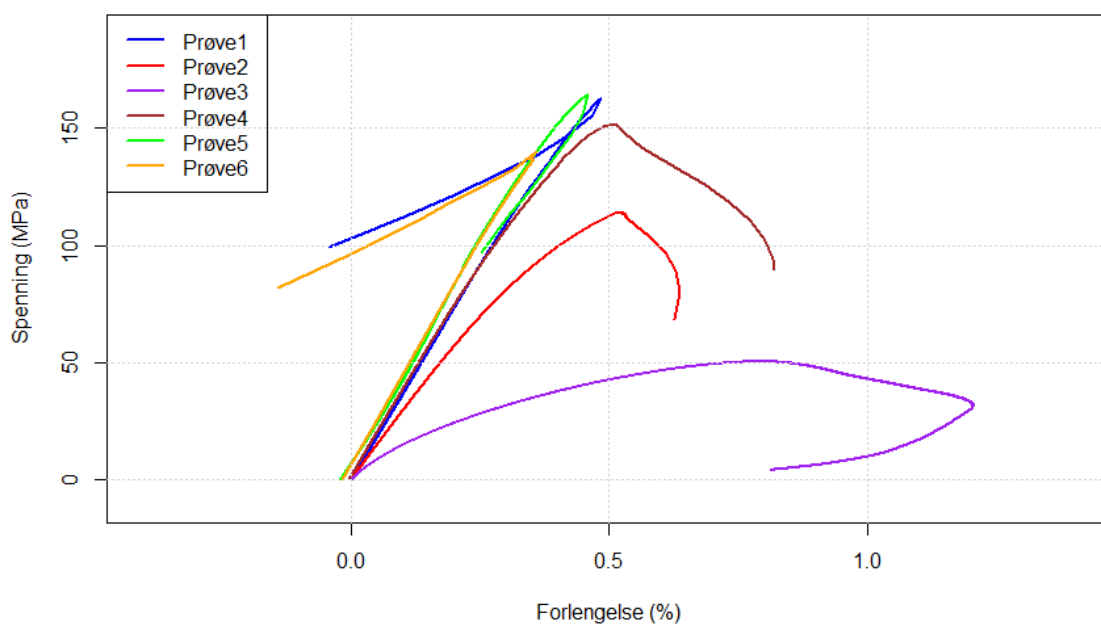
6 Resultater

6.1 Strekkprøver

Resultatene fra strekkprøvene vist i figur 6.1 til 6.7 med grafene til de 5 prøvene av hver variant delt opp i hver sin figur. Resultatene fra 3dprintet form og aluminiumsform er å anses som relativt like, selv om det kanskje er minimalt mer spredning på resultatene fra de 3dprintede formene, men dette anses som neglisjerbart da det er bare en prøve som avviker, som kan være av andre variasjoner en type støpeform. Prøve nummer 3 fra 3dprintet form regnes ikke med da den fikk skade under bearbeiding og det ble derfor laget en ekstra prøve for å få 5 gyldige prøver. Bruddflate fra 3dprintet og aluminiumsform prøvene vist i bilde 6.1 og bilde 6.2 Bruddflaten tyder på at fibre ligger i tilfeldig retning som antatt som fører til isotropiske egenskaper i planet. Gjennomsnittet av bruddspenning og elastisitetsmodul på alle strekkprøvene vist i tabell 6.1 til 6.5. Prøve 3 fra 3dprintet form er ikke regnet med her, da den er ugyldig.

Resultatene fra prøvene maskinert ut av emnet i forskjellige vinkler hadde varierende resultater. Prøvene maskinert ut i 0° vist i figur 6.3 endte opp med en god del lavere styrke en prøvene støpt direkte. Alle prøvene røk i grepene på strekkmaskinen. I bilde 6.3 kan man tydelig se at bruddflaten viser at materialet er porøst, noe som resulterer i en svekkelse av materialet. Disse porene har mest sannsynlig oppstått på grunn av den store størrelsen på støpen. Prøvene maskinert ut i 45° var enda svakere vist i figur 6.4 en prøvene i 0° . I bilde 6.4 av bruddflaten vises det tydelig at fibre ikke ligger i strekkretningen, men på tvers. Dette gjør at materialet mister nesten all styrke fra fibre. Prøvene maskinert ut i 90° var enda svakere enn dem i 45°

Strekprøvning 3d printet form



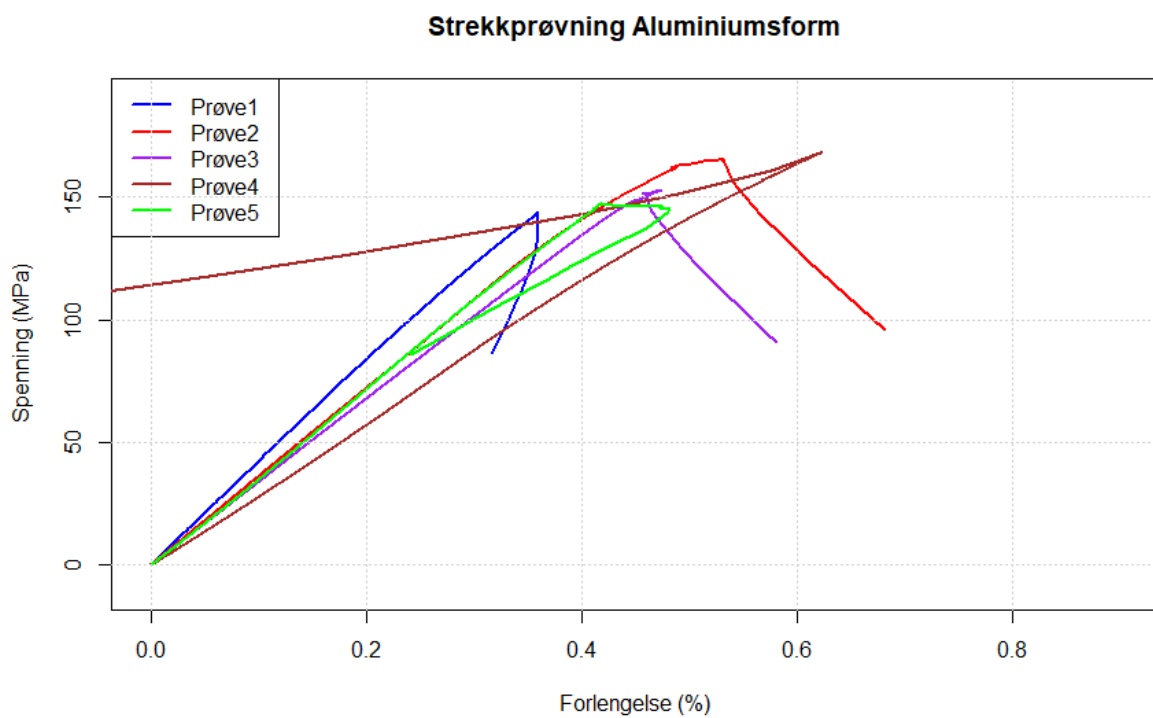
Figur 6.1. Bruddspenning og forlengelseskurve for strekkprøver fra 3dprintet form.

Tabell 6.1. Resultater fra 3d printet form.

Prøve navn	Bredde (mm)	Tykkelse (mm)	Elastisitetsmodul (GPa)	Bruddspenning strekk (MPa)	Forlengelse (%)
Prøve 1	25,20	4,10	37,04	157,57	0,48
Prøve 2	25,20	4,20	29,37	109,15	0,52
Prøve 3	24,70	4,90	15,41	48,99	0,83
Prøve 4	25,32	4,20	37,23	151,28	0,51
Prøve 5	24,82	4,22	41,80	164,27	0,46
Prøve 6	25,22	4,40	38,75	139,48	0,36
Gjennomsnitt			33,27	144,35	



Bilde 6.1. Bruddflate på strekkprøve fra 3dprintet form.



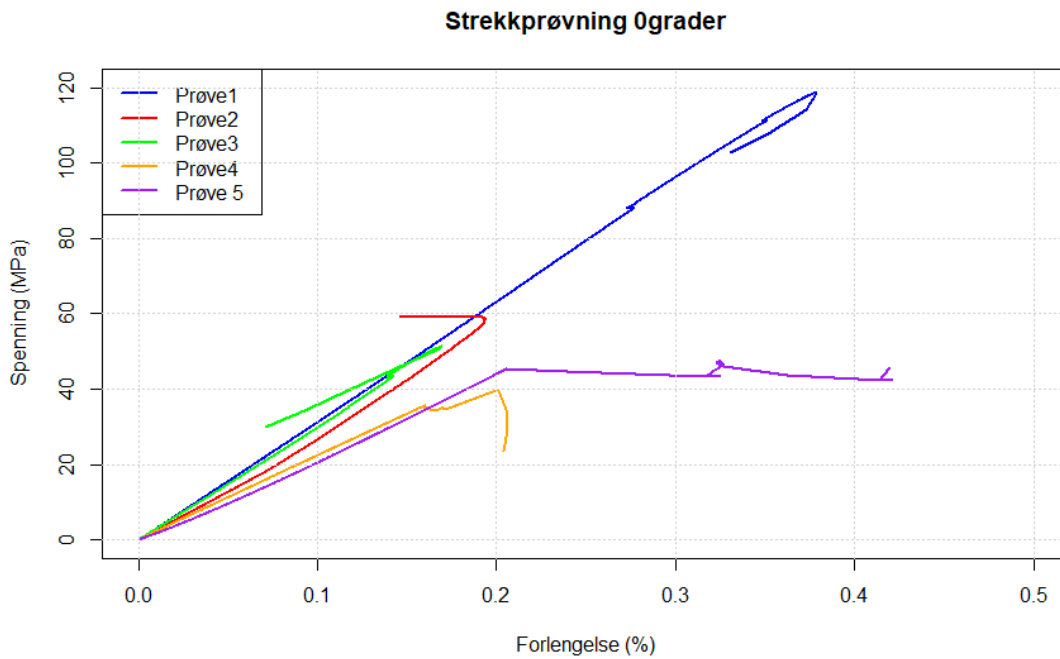
Figur 6.2. Bruddspenning og forlengelseskurve for strekkprøver fra aluminiumsform

Tabell 6.2. Resultater fra aluminiumsform.

Prøve navn	Bredde (mm)	Tykkelse (mm)	Elastisitetsmodul (GPa)	Bruddspenning strekk (MPa)	Forlengelse (%)
Prøve 1	25,00	4,00	42,60	135,27	0,36
Prøve 2	25,00	4,00	36,11	165,04	0,51
Prøve 3	25,03	4,15	34,07	152,50	0,44
Prøve 4	25,00	4,00	30,63	168,24	0,64
Prøve 5	25,00	4,30	37,17	147,10	0,42
Gjennomsnitt			36,2	153,63	



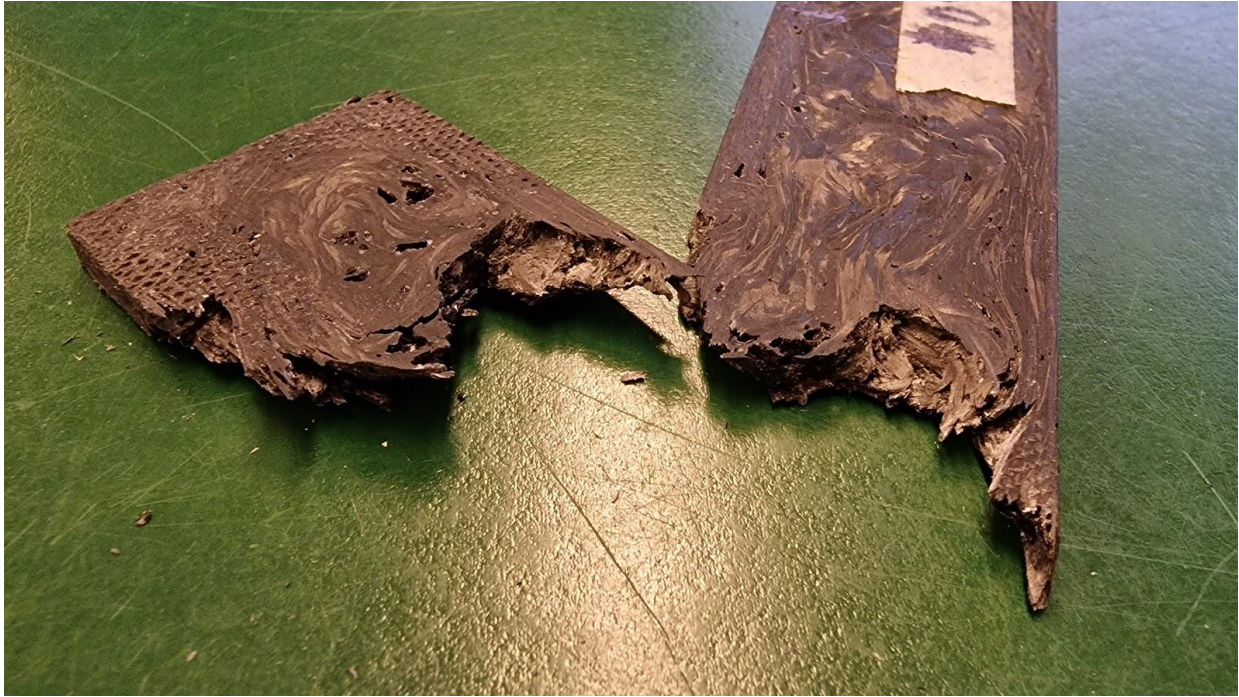
Bilde 6.2. Bruddflate på strekkprøve fra aluminiumsform.



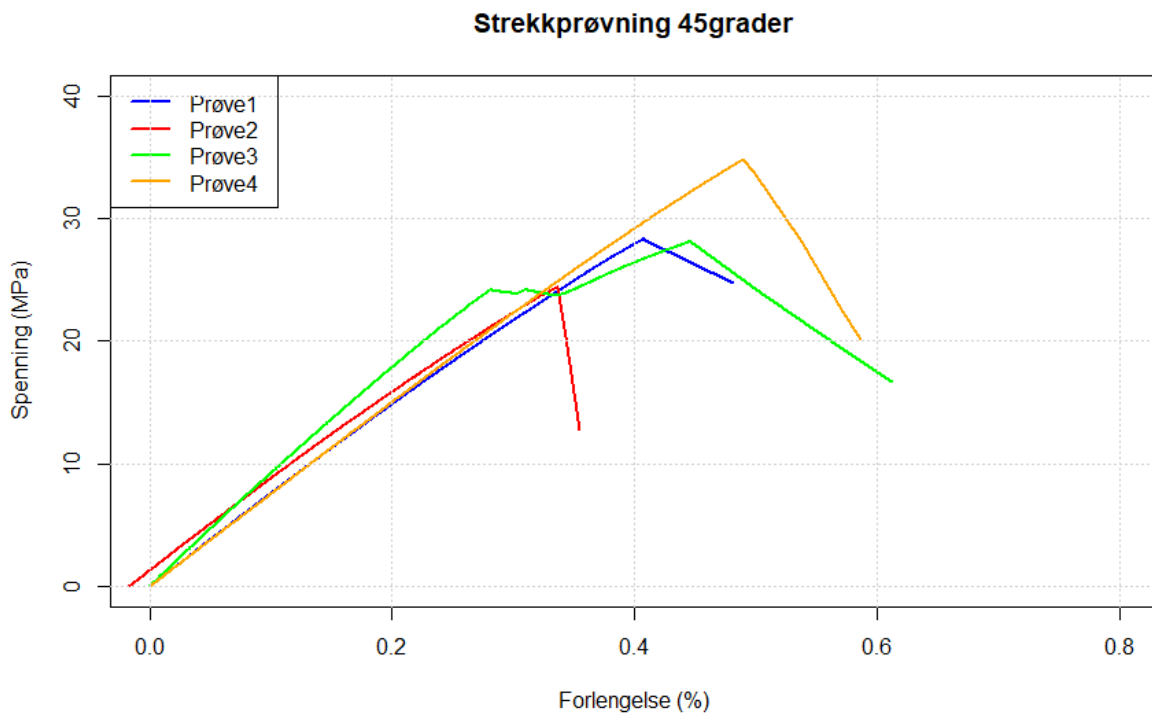
Figur 6.3. Bruddspenning og forlengelseskurve for strekkprøver maskinert ut av emne i 0°

Tabell 6.3. Resultater fra Strekkprøving 0 grader.

Prøve navn	Bredde (mm)	Tykkelse (mm)	Elastisitetsmodul (GPa)	Bruddspenning strekk (MPa)	Forlengelse (%)
Prøve 1	31,12	4,50	33,91	118,63	0,38
Prøve 2	30,94	3,70	33,11	64,12	0,18
Prøve 3	30,76	4,30	31,91	51,36	0,16
Prøve 4	30,60	3,46	22,64	39,73	0,20
Prøve 5	30,56	2,90	24,09	47,35	0,32
Gjennomsnitt			29,13	64,2	



Bilde 6.3. Bruddflate på strekkprøve maskinert ut av emne i 45°.



Figur 6.4. Bruddspenning og forlengelseskurve for strekkprøver maskinert ut av emne i 45°.

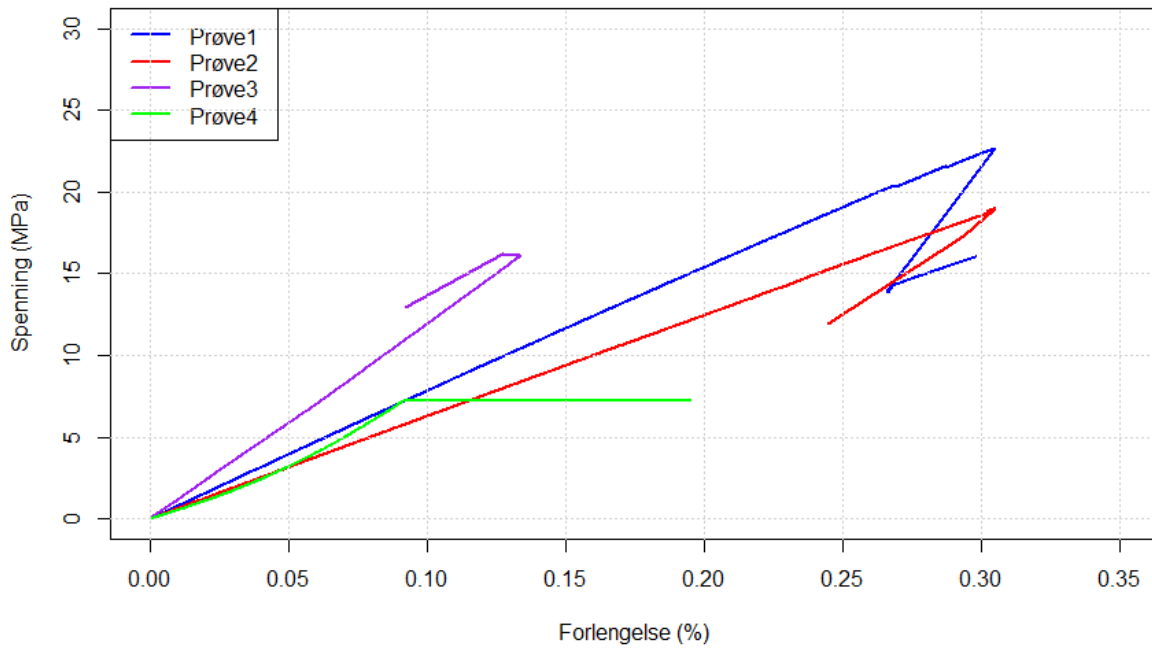
Tabell 6.4. Resultat fra Strekkprøving 45 grader.

Prøve navn	Bredde (mm)	Tykkelse (mm)	Elastisitetsmodul (GPa)	Bruddspenning strekk (MPa)	Forlengelse (%)
Prøve 1	31,50	2,50	7,67	28,30	0,41
Prøve 2	31,24	2,42	7,64	24,41	0,34
Prøve 3	31,24	2,42	7,64	28,10	0,44
Prøve 4	30,81	4,00	9,41	34,75	0,48
Gjennomsnitt			8.09	28,89	



Bilde 6.4. Bruddflate på strekkprøve maskinert ut av emne i 45°.

Strekprøving 90grader



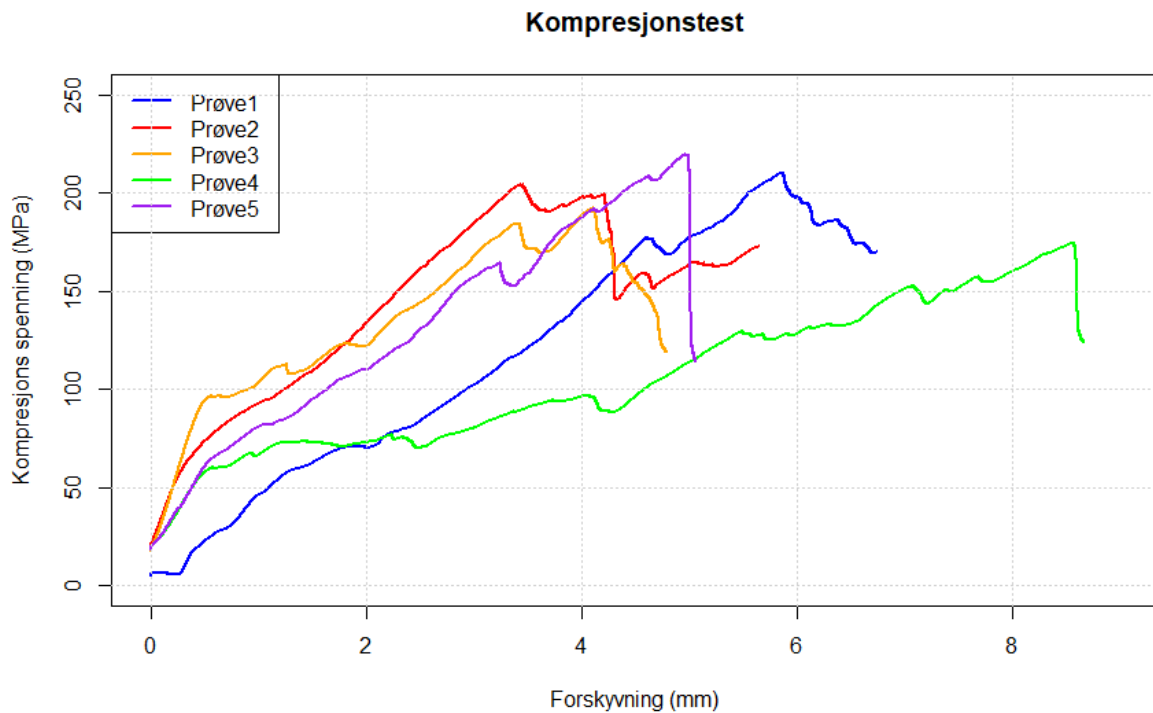
Figur 6.5. Bruddspenning og forlengelseskurve for strekkprøver maskinert ut av emne i 90°.

Tabell 6.5. Resultat fra strekkprøving 90 grader.

Prøve navn	Bredde (mm)	Tykkelse (mm)	Elastisitetsmodul (GPa)	Bruddspenning strekk (MPa)	Forlengelse (%)
Prøve 1	30,55	4,00	7,89	22,63	0,31
Prøve 2	30,50	4,06	6,27	18,99	0,31
Prøve 3	30,66	4,11	12,99	16,23	0,13
Prøve 4	30,76	4,10	10,14	26,58	0,08
Gjennomsnitt			9,32	21,11	

6.2 Kompresjonstesting

Resultatene fra kompresjonstesting vist i figur 6.6 og tabell 6.6. Her er resultatene relativt stabile med noe høyere styrke enn de fra strekkprøvene.



Figur 6.6. Bruddspenning og forlengelseskurve for kompresjonstesting.

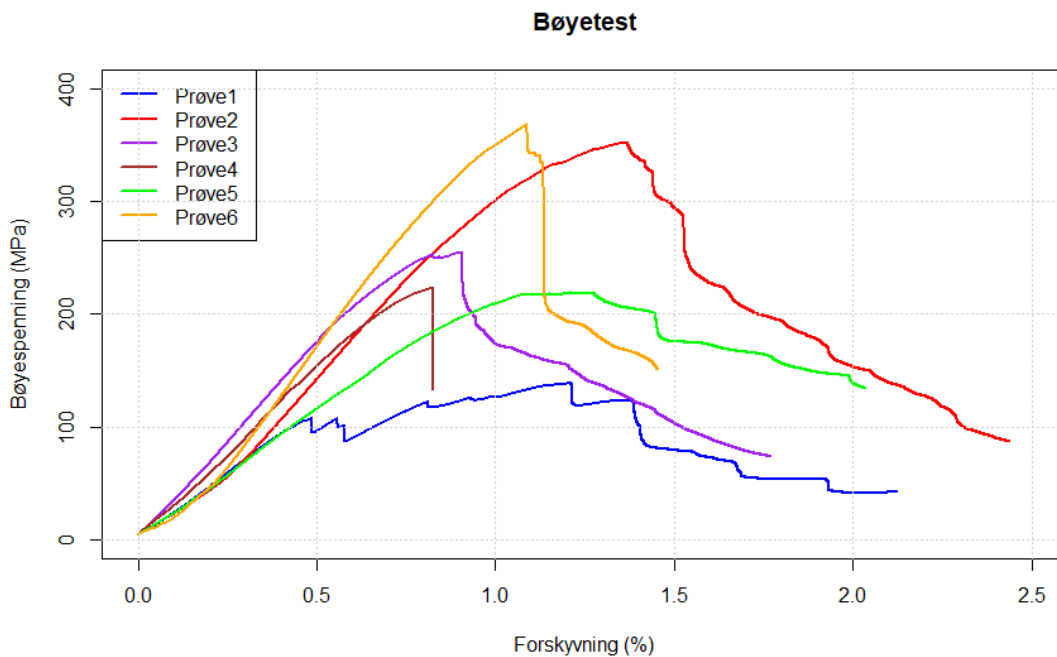
Tabell 6.6. Resultat fra kompresjonstest.

Prøve navn	Bredde (mm)	Tykkelse (mm)	Bruddspenning kompresjon (MPa)
Prøve 1	2,10	10,00	210,03
Prøve 2	2,10	10,00	204,21
Prøve 3	2,20	10,00	192,69
Prøve 4	2,20	10,10	174,34
Prøve 5	2,10	10,10	219,68
Gjennomsnitt			200,2

På grunn av noen tekniske problemer under testing, ble ikke elastisitetsmodulen utregnet av maskinen. Denne dataen er derfor borte og ikke med i rapporten.

6.3 Bøyetest

Resultatene fra bøyetestene 6.7 og tabell 6.7 er også relativt stabile hvis man ser bort fra den blå grafen som ble skadet under bearbeiding. Det ble derfor også her laget en ekstra prøve for å få 5 gyldige prøver.



Figur 6.7. Bruddspenning og forlengelseskurve for bøyetesting.

Tabell 6.7. Resultater fra bøyetest.

Prøve navn	Bredde (mm)	Tykkelse (mm)	Bruddspenning bøyning (MPa)	Elastisitetsmodul (GPa)
Prøve 1	9,17	3,50	138,49	24,59
Prøve 2	10,40	4,00	351,58	36,17
Prøve 3	10,30	4,01	254,47	36,45
Prøve 4	10,02	3,80	222,95	34,16
Prøve 5	9,95	4,45	219,12	24,29
Prøve 6	10,03	5,50	368,39	44,13
Gjennomsnitt			259,17	33,3

7 Feilkilder og mulige forbedringer

Som vist i resultatene fra testingen i tabellene fra 6.1 til 6.7 er det en del variasjon i resultatene mellom prøvene. Dette kan være på grunn av ulike feil i støpingen av prøven som påvirker styrken. Dette er feilkilder som kan føre til at prøven ryker tidligere enn den skal og i fastspenningen i strekkmaskinen.

7.1 Porer i epoxy resin

Siden karbonfiberet blir støpt uten noe form for vakuum som suger ut luften fra prøven vil det bli noen porer i epoxy resinet på størrelse på opptil 1mm vist i bilde 7.1. Disse kan antas å være jevnt fordelt i alle prøvene, disse porene er fra luftbobler som oppstår under blandingen av epoxy resin og kompresjonen under støping.



Bilde 7.1. Porer på størrelse under 1mm kan ses i overflaten av strekkprøven.

Noen ganger viser det seg å oppstå større porer slik som vist i bilde 6.3. Dette kan oppstå av at karbonfiberet ikke har vært godt nok fuktet i epoxy resin under støpingen. Disse oppstår som oftest i ytterkanten av støpingen.

Disse porene kan trolig unngås med å bruke et vakuumkammer. Det kan gjøre at det blir et mer forutsigbart resultat av støpingen og styrken på materialet.

7.2 Ujevn fordeling av masse

Fordelingen av fibre under støpingen har stor påvirkning på tettheten i materialet. Dersom fibre blir lagt ujevnt i formen blir densiteten ulik i materialet som gjør at styrken blir ujevn. Dette fører til at prøven feiler på feil sted utenfor målområdet.

7.3 Videre testing

Det er flere tester som ikke har blitt tid eller mulighet å utføre. Dette er tester som videre kan dokumentere egenskapene til materialet som kan hjelpe med å sette opp beregninger for senere applikasjoner.

En mulighet for å øke styrken til materialet er å bruke en annen lengde på fibret som brukes i produksjonen. Dette er en faktor som ikke er kjent på forhånd, og det kan være interessant å teste ulike fiberlengder for å finne den optimale løsningen. En slik testing kan gi verdifull informasjon om kvaliteten på støpingen og hvordan dette påvirker materialets isotropi. I tillegg kan det være interessant å teste en kombinasjon av ulike fiberlengder og å inkludere både kontinuerlige karbonfibre og konvensjonell karbonfiberduk for å øke styrken i spesifikke områder.

Det er foreløpig ukjent hvordan styrken blir påvirket i deler av støpinger der fibrene er lengre enn bredden på formen, der det kan antas at fibrene legger seg på langs. Dette kan testes med å lage tynnere prøvestykker i ulike dimensjoner.

Utmatting er noe som kan testes for å se hvor holdbart materialet er. For å bruke karbonfiber i deler med høyere dynamisk belastning er man avhengig av å vite hvordan materialet blir påvirket av utmatting.

8 Diskusjon og konklusjon testing

Fra testene som er gjort kan man se at karbonfiberet er et materiale med en styrke mye høyere enn 3d printet plast med styrke over dobbelt så sterk som 3dprintet ABS. Tabell med gjennomsnitts styrke sammenlignet med andre materialer vist i tabell 8.1

8.1 Sammenlignet med resultater fra Boeing og Lamborghini

Boeing gjorde tester med flere ulike fiberlengder, men hvis man sammenligner resultatene direkte med den nærmeste fiberlengden Boeing brukte på 0.5 tommer (12.7 mm) som er veldig lik fiberlengden på 12 mm som ble brukt i oppgaven, er resultatene veldig like. Tabell med gjennomsnitts styrke sammenlignet med andre materialer vist i tabell 8.1. Lamborghini hadde fått en god del høyere bruddspenning, men de hadde også brukt fibre med 25,4 mm lengde, som ifølge rapporten til Boeing har mye å si på styrken. Elastisitet modul var ganske lik i oppgaven og rapporten til Lamborghini. Dette er bra sammenlignet med at både Boeing og Lamborghini har brukt en mye mer avansert produksjonsmetode enn metoden brukt i oppgaven. Det som er interessant er at elastisitetsmodulen er relativt lik på alle de 3 diskontinuerlige karbonfibre sammenlignet. Elastisitetsmodulen er også relativt lik aluminium og nærmer seg elastisitetsmodulen til konvensjonell karbonfiber.

Tabell 8.1. sammenligning av diskontinuerlig karbonfiber med andre materialer. [6] [19] [20]

Materiale	Strekfasthet/bruddstyrke (MPa)	Elastisitetsmodul (GPa)
Diskontinuerlig karbonfiber fra testing	144	33
Forged karbonfiber fra Lamborghini	246	34
Diskontinuerlig karbonfiber fra Boeing 12,7 mm fiberlengde	124	40
Konvensjonell karbonfiber av vevd duk	655	45
Markforged Onyx, 3dprintet karbonfiber	71	Ukjent
3dprintet ABS plast	60	Ukjent
6061 aluminium	240/290	36

8.2 Testing av isotropi

Testene som ble maskinert fra det store emnet i karbonfiber i 45° og 90° tyder på at materialet ikke er isotropisk i alle retningene. Dette er fordi at styrken er avhengig av at retningene på karbonfibrene ligger på langs i strekkretningen. Kompresjonsretningen gjør at fibrene legger seg flat i formen som gjør at få fibre legger seg i retningene 45° og 90°. Dette fører til en nærmer ubetydelig styrke i disse retningene. Når det gjelder antagelsen av isotropitet i planet er det viktig å poengtere at dette er basert på at fibrene legger seg tilfeldig retning, som gjør at det ligger like mange fibre i hver retning. Dette er også noe som kan videre testes.

8.3 Konklusjon

Konklusjonen er da at diskontinuerlig karbonfiber er en god erstatning for aluminium da det har en 40% lavere bruddspenning, men er 50% lettere i vekt, regnet ut fra snittet på strekkprøvene fra 3dprintet form. Dette gjør at det totale forholdet mellom bruddstyrke og vekt er 103 som er 14% høyere en aluminium med forhold på 89. Det er derimot viktig å huske på at dette er beregnet ut fra de svakeste tallene fra testingen, som også er satt opp mot en høykvalitets aluminium. Det burde derfor være mulighet å få disse resultatene enda bedre. Karbonfiberet er også enklere og billigere å produsere enn maskinert aluminium. Diskontinuerlig karbonfiber er også et mye bedre alternativ enn 3dprintet plast da det er mulig å oppnå en mye høyere styrke med karbonfiber og det kan produseres relativt enkelt med former som er 3dprintet. Alt dette gjelder derimot kun om belastningen påført er i de sterke retningene i forhold til støperetningen.

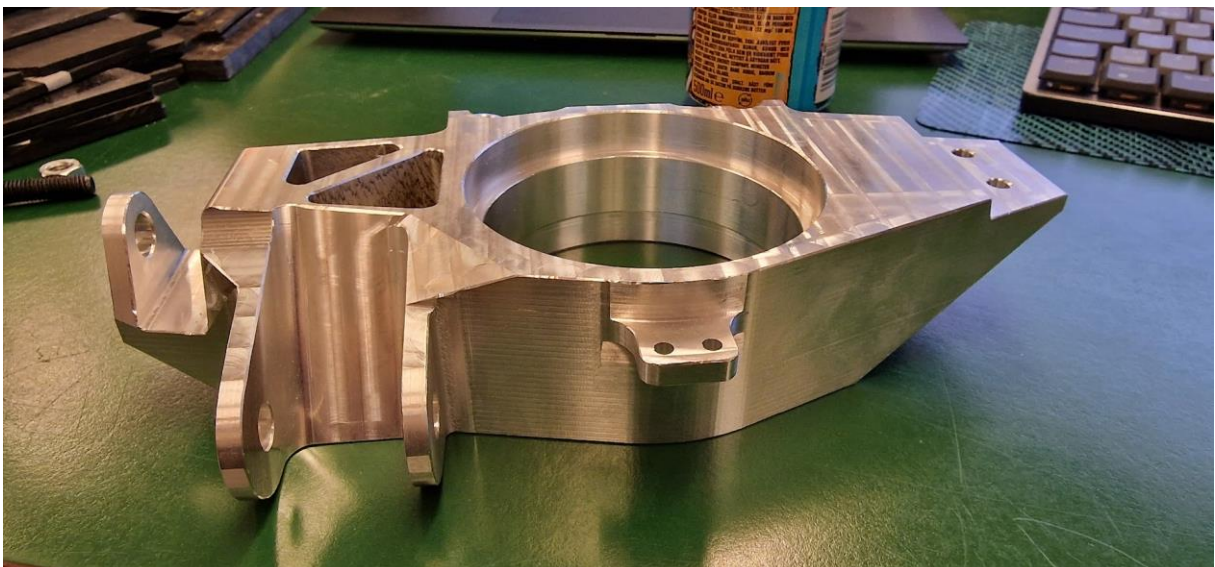
Diskontinuerlig karbonfiber kan derfor regnes som egnet for å produsere spindel til ION Racing sin bil. Det anbefales riktig nok mer grundig testing som utmattingstesting, testing av flere ulike størrelse prøvestykker, forsterket med kontinuerlig karbonfiber og annen fiberlengde.

9 Design av spindel

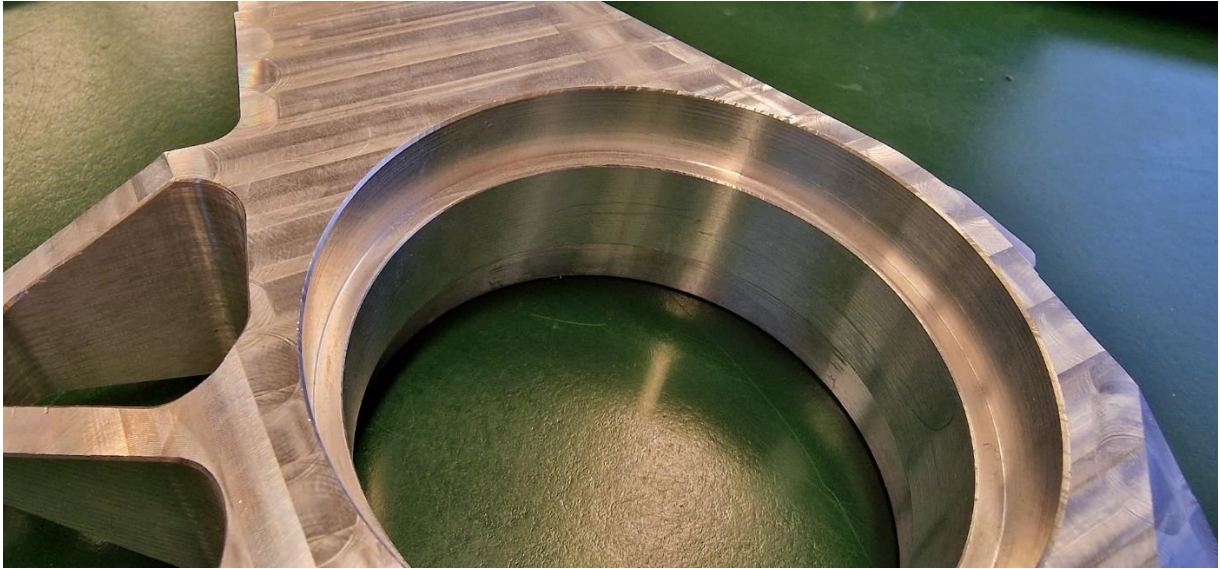
Etter styrken på materialet er testet kan spindelen designes. Designet på den nye spindelen blir basert på det gamle designet. Spindelen skal støpes på samme måte som alle prøvestykkene. Det er en rekke designendringer som må gjøres for å tilpasse spindelen for at den skal være egnet for å støpes i karbonfiber. Den må også dimensjoneres på nytt da karbonfiberet har andre egenskaper enn aluminium, her må også fiberretningen tas i betraktning. Etter første design er gjort kan spindelen simuleres i Inventor. Når det endelige designet er klart, kan det designes en støpeform som kan 3dprintes.

9.1 Endringer for støping

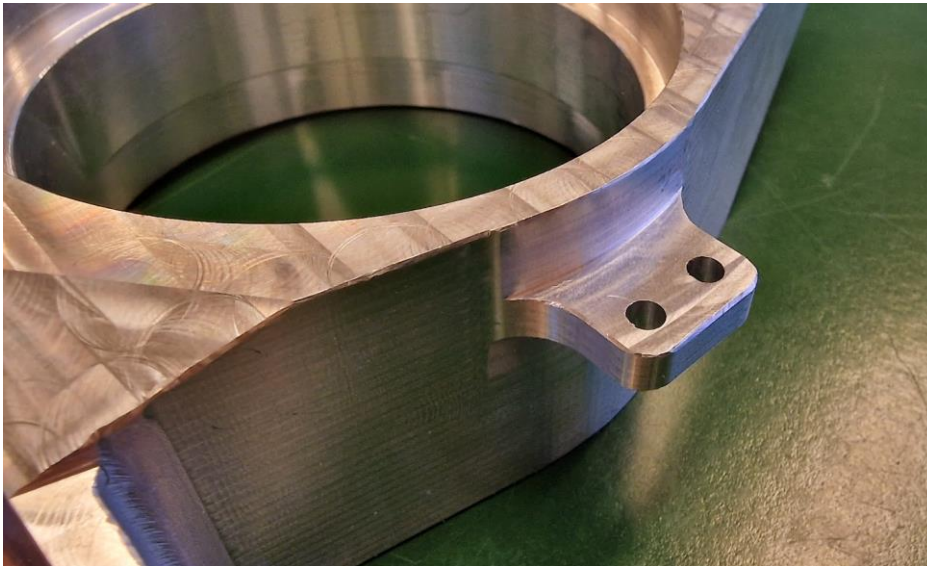
Når delen skal støpes i den type støpeform som brukes her, er geometrien noe begrenset. Det er planlagt å støpe delen liggende med press ovenfra slik som i bilde 9.1, både av praktiske grunner og for at fibre skal ligge i en gunstig retning med tanke på styrke. Delen må designes slik at karbonfiberet kan komprimeres sammen fra en side, her er delen grei i utgangspunktet bortsett fra utfresingen til lageret vist i bilde 9.2, braketten på siden for hjulhastighetssensor er heller ikke helt ideell med tanke på dette vist i bilde 9.3. Begge disse kan være mulig å støpe slik dem er, men det kan bli ujevnt trykk på grunn av den de ekstra profilene og høydeforskjellen på planene som er under press.



Bilde 9.1. Spindelen liggende i retningen den støpes i.

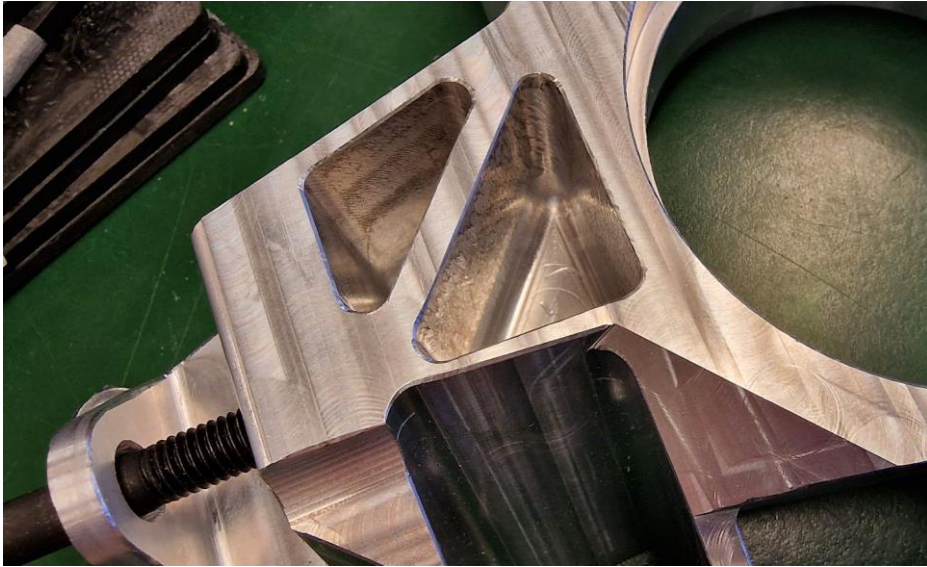


Bilde 9.2. Utfresing for montering av lager.

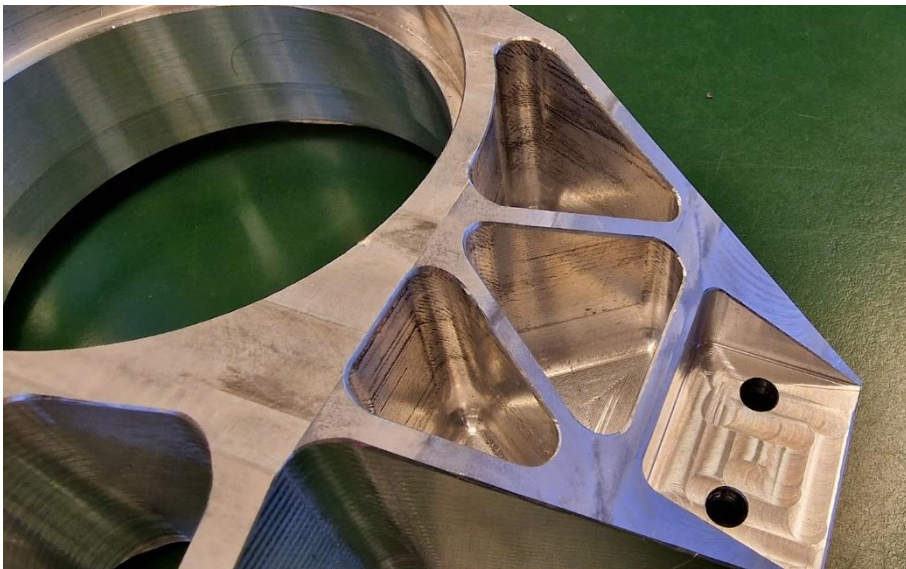


Bilde 9.3. braket for montering av hjulhastighetssensor.

Det er heller ikke gunstig å ha utfresingene for veksparing på to forskjellige sider slik som det er på den gamle vist i bilde 9.4 og bilde 9.5 da det ikke er gunstig å ha slike utfresinger på overdelen av formen for å få fibrene jevnt fordelt rent praktisk.



Bilde 9.4. Utfresing for vekstsparing.



Bilde 9.5. Utfresing for vekstsparing.

9.1.1 Montering av hjullager

Det skal monteres to hjullagre i spindelen som skal koble sammen navet og spindelen. Det er igjennom disse lagrene alle kreftene kommer fra. Disse lagrene skal monteres med en spesifikk pasning oppgitt av produsenten SKF, dette skal være en lett presspasning. Det er lite gunstig å ha pasninger med så fine toleranser i karbonfiber, både med tanke på produksjon, men også på grunn av at i en presspasning vil det oppstå ekstra spenninger i materialet som er ukjent hvordan karbonfiberet tåler. Dersom man skulle hatt en presspasning rett i karbonfiberet måtte man maskinert ut en nøyaktig pasning. Dersom pasningen er for stram vil det oppstå høye spenninger som kan føre til at karbonfiberet sprekker. Om pasningen blir for løs vil lageret kunne gli noe som skaper friksjon og varme som kan skade karbonfiberet.

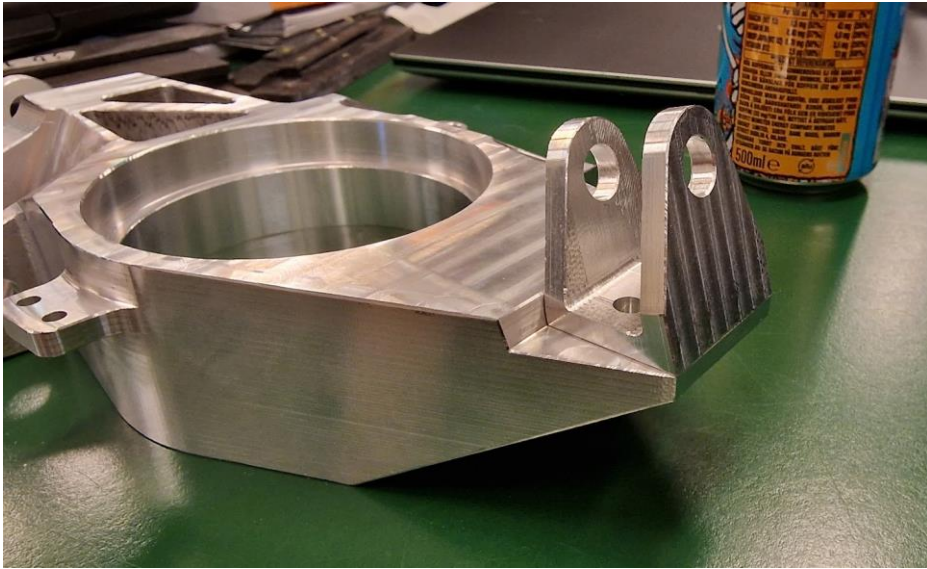
Løsningen på dette problemet er å sette inn en foring i aluminium som limes fast i karbonfiberet. Denne foringen kan enkelt maskineres i dreiebenken med rett pasning for lagrene. Da vil det være mulig å støpe spindelen med et enkelt hull til denne hylsen. Hylsen kan limes fast i karbonfiberet med Araldite AW4858 som ION har god erfaring med å lime aluminium til karbonfiber i hjulopphenget tidligere.

9.1.2 Brakett for nedre bærearm

Braketten til nedre bærearm, som vist i bilde 9.6, er vanskelig å støpe på grunn av utfordringene med å belaste karbonfiberet i den svakeste retningen. Når braketten støpes vertikalt, vil fibrene få en retning som samsvarer med den svakeste retningen, og dette kan føre til en svekkelse av brakettens styrke. Da vil denne enkelt kunne knekke av som ikke er ønskelig. Løsningen på dette er å lage braketten i en separat del slik som braketten til den øvre bærearmen er på den gamle vist i bilde 9.7.



Bilde 9.6. Brakett til nedre bærearm.



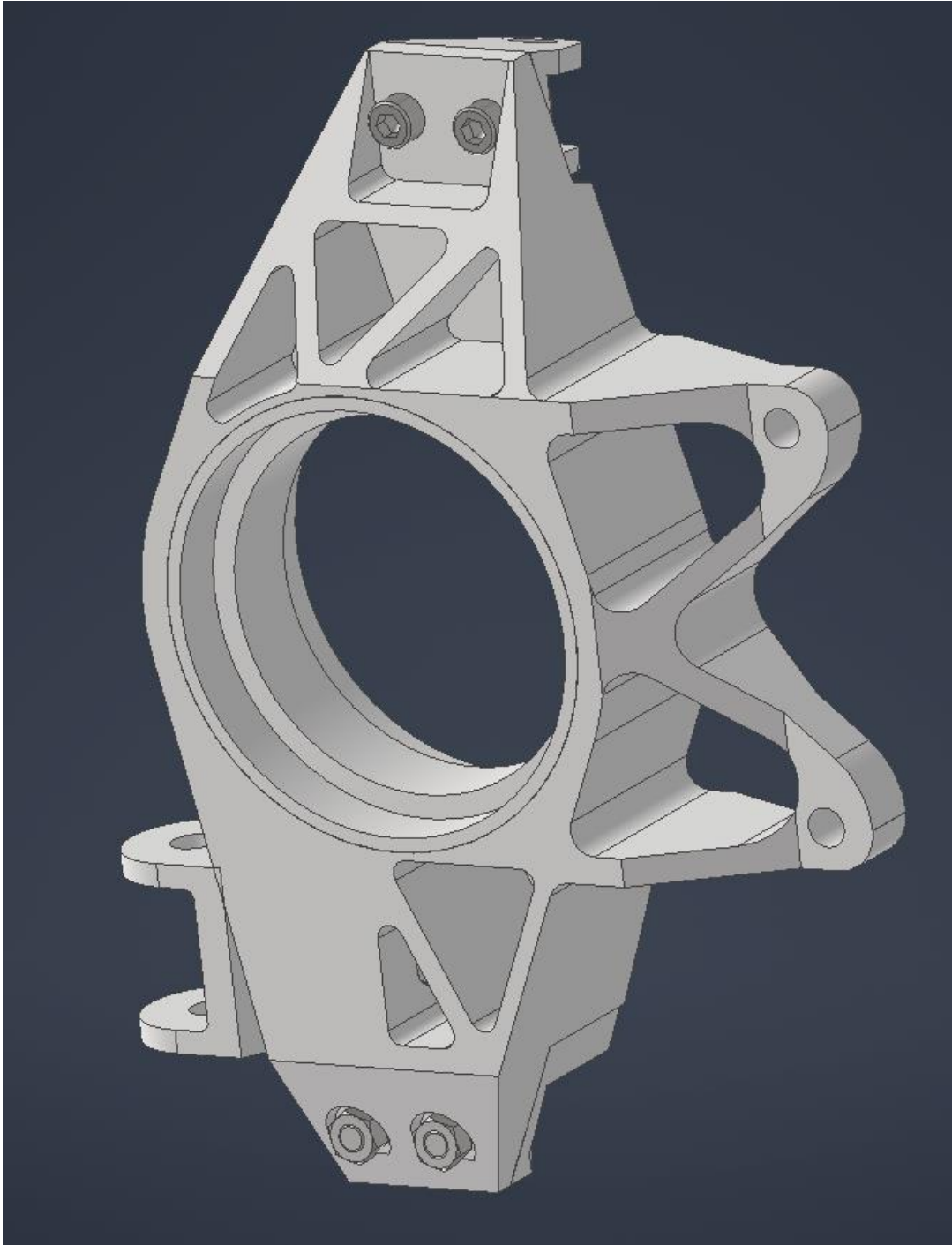
Bilde 9.7. Brakett til øvre bæream.

9.2 Dimensjonering

Det tas utgangspunkt i de samme dimensjonene som den gamle spindelen, med designendringene nevnt over. Når første designutkast er gjort kan delen simuleres i Inventor med de utregnede kreftene som går inn i spindelen. Deretter kan den dimensjoneres på nytt om den eventuelt er for svak.

9.2.1 Redesignet spindel

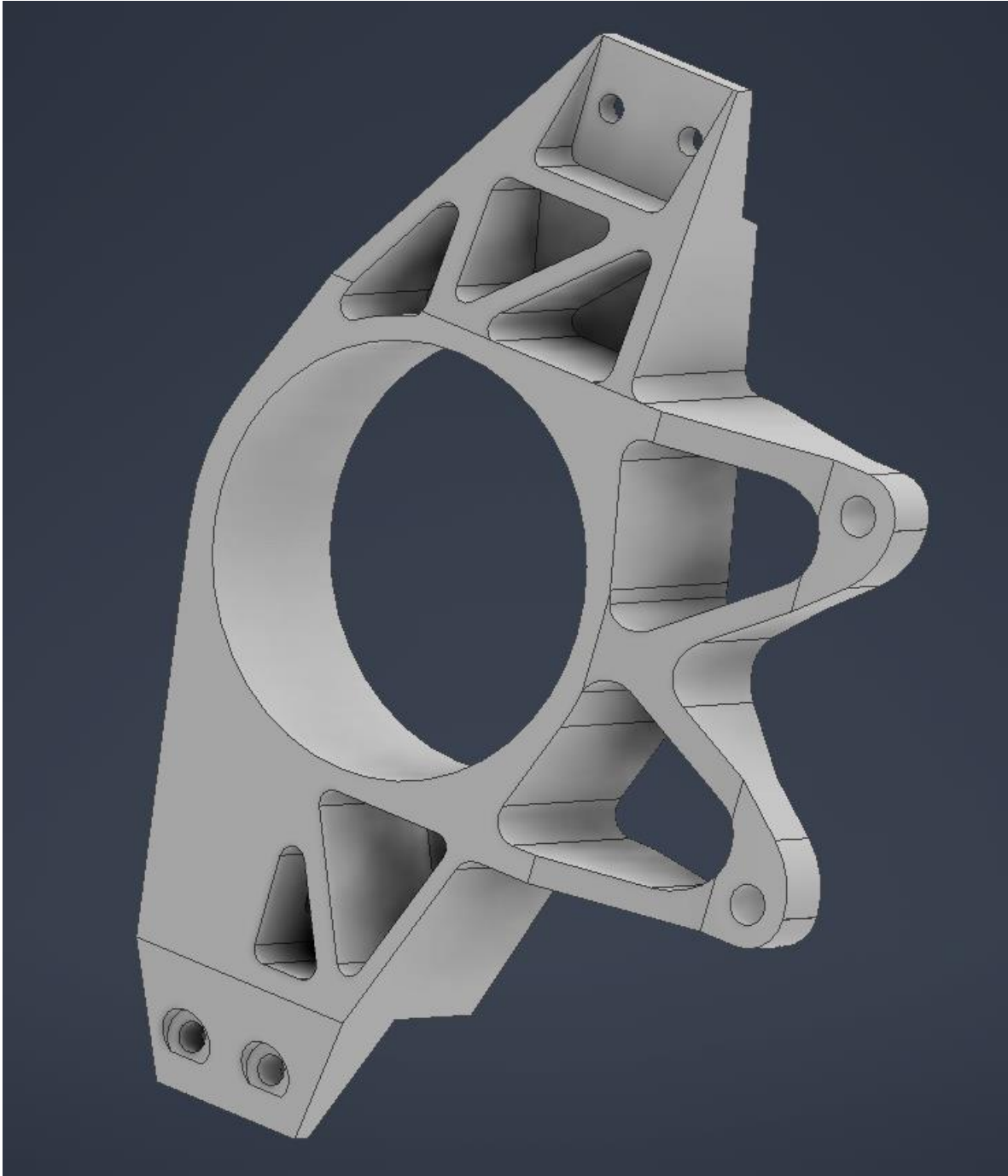
Redesignet spindel og braketter vist i bilde 9.7 til bilde 9.11. Brakettene til nedre bæream og styrestag er da delt opp i egne braketter som monteres med skruer i spindelen vist i bilde 9.13 til 9.15. I bilde 9.11 av baksiden kan man se utfresinger for montering av brakettene. Disse skrues fast med mutre som sitter i utfresingen vist i bilde 9.12, det er også lagt til 3 mm ekstra tykkelse på spindelen vist i bilde 9.10, rundt foringen til lageret som er vist i bilde 9.16. Med dette designet oppnås det en totalvekt på 750 gram. Arbeidstegninger på alle delene ligger som vedlegg i oppgaven. For arbeidstegninger se vedlegg A.2-A.8.



Bilde 9.7. Sammenstilling av ny spindel vist fra framsiden.



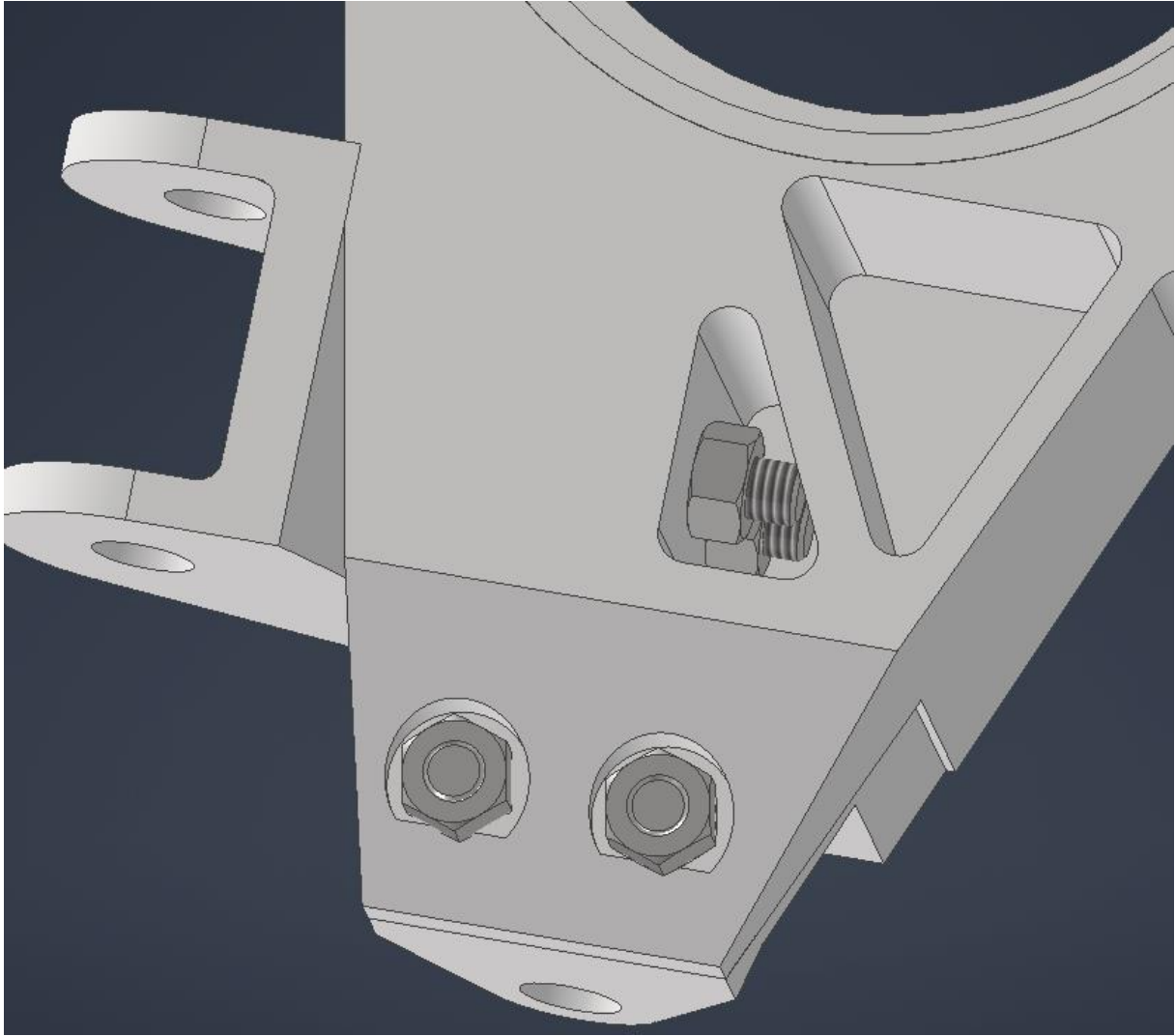
Bilde 9.8. Sammenstilling av ny spindel vist fra baksiden.



Bilde 9.10. Redesignet spindel fra framsiden.



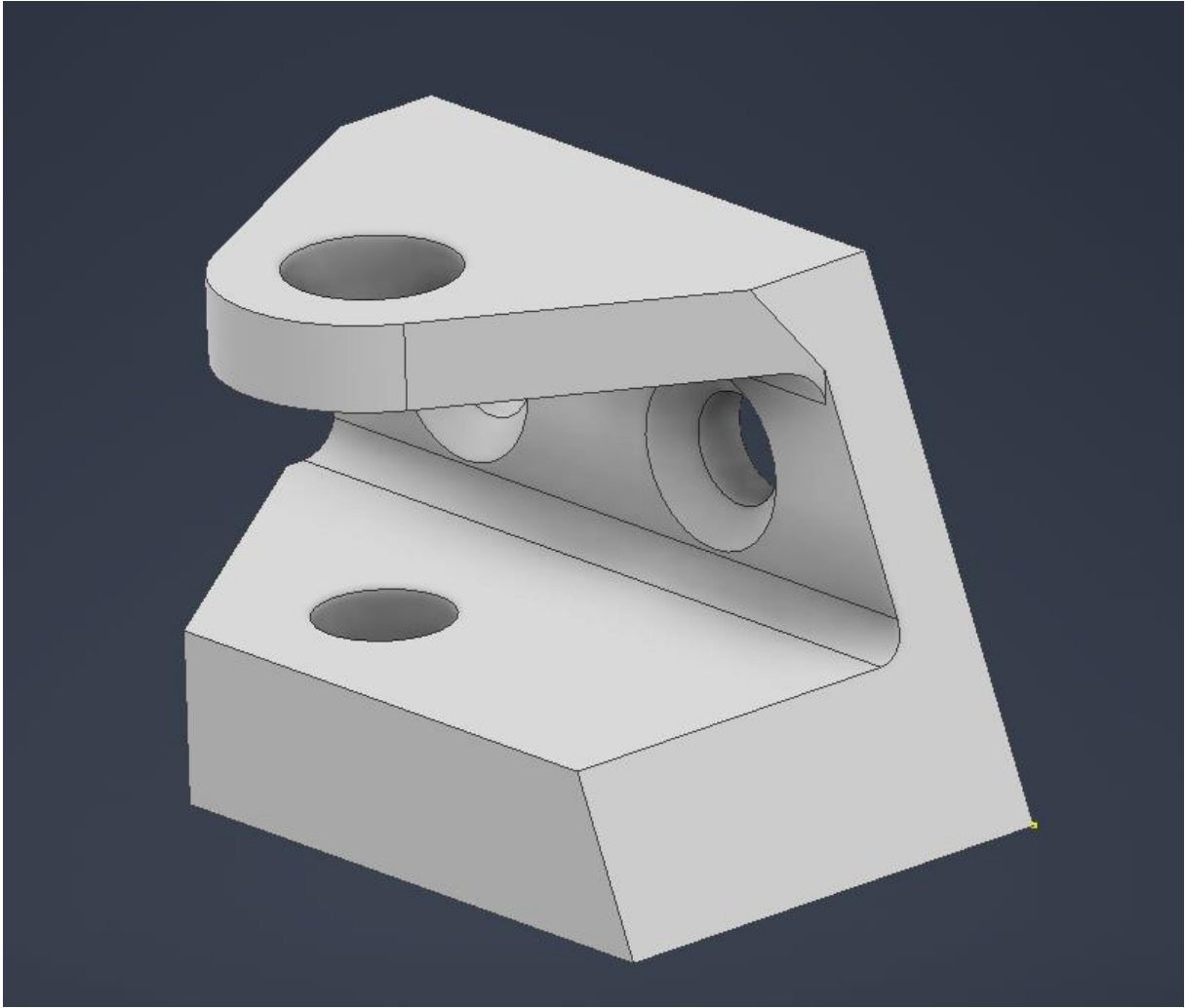
Bilde 9.11 Redesignet spindel fra baksiden.



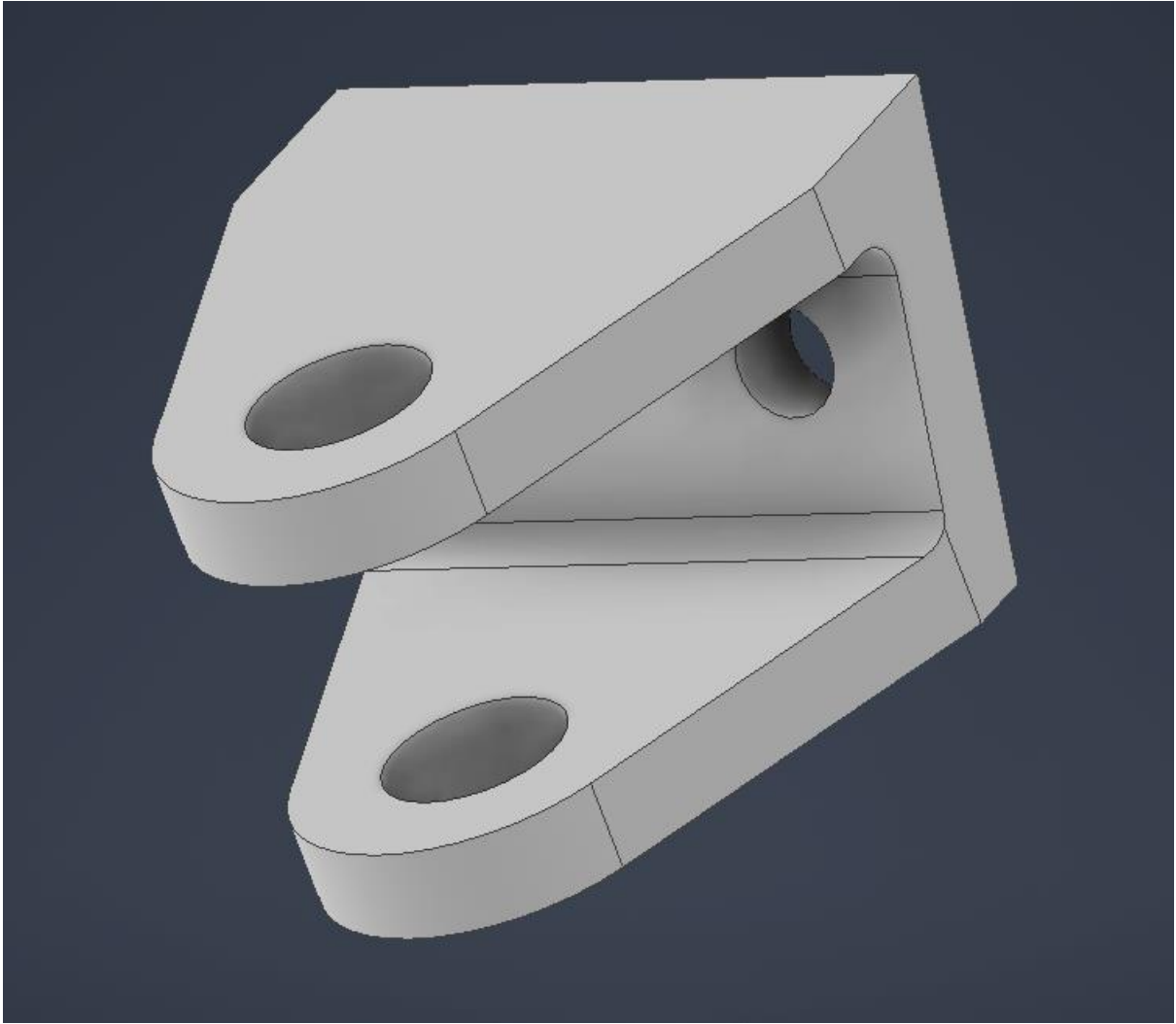
Bilde 9.12. Bolteforbindelser mellom spindel og braketter.



Bilde 9.13. Brakket til styrestag.



Bilde 9.14. Braket til nedre bærearml.



Bilde 9.15. Brakett til øvre bæream.



Bilde 9.16. Foring til lager.

9.3 Beregning av krefter

For å kunne gjøre simuleringer på spindelen må kreftene fra resten av hjulopphenget beregnes. Beregninger på kreftene i hjulopphenget blir utført stegvis fra Race Car design [21].

9.3.1 Vektfordeling

Vektfordelingen på bilen er viktig for å finne hvor mye av vektlasten som er på forhjulene. Ønsket vektfordeling er 50% foran og bak. Bilen er enda ikke veid, men det antas vekt på 270 kg basert på tidligere biler. Den totale vekten på bilen blir da: [22]

$$W_T = (M_c \times g) + D \quad (1)$$

- M_c er vekten på bilen, med fører
- g er tyngdeakselerasjonen
- D er marktrykk

Den totale vekten er da $W_T = 3884,5$ N.

For å finne vekten på forhjulene brukes formelen:

$$W_f = W_T \times \left(\frac{L-l_c}{L}\right) \quad (2)$$

- W_f = vekten på forhjulene
- L = Akselavstand, 1650 mm. Akselavstanden er funnet ved mål på bilen.
- l_c = Avstand fra massesenter til frontaksel, 924 mm. Avstanden er funnet i CAD.

Vekten på forhjulene er $W_f = 1709.2$ N.

9.3.2 Forhjulsbelastning ved bremsing

Lastoverføring er det første man må regne ved utregning av krefter i hjulopphenget. Lasten vil under akselerasjon, svinging og nedbremsing endre seg ulikt på hjulene. Ved akselerasjon, vil lasten på bakhjulene øke mer enn på fremakselen. Under svinging vil lasten øke på de ytre hjulene og minke på de indre. [23]

For å kunne regne ut bremsekraftene trenger man friksjonskoeffisienten mellom dekk og asfalt. Dette har blitt regnet ut i en bachelor på ION tidligere og ble satt til å være 2,66 ved nedbremsing. [24]

Bremsekraftene er da:

$$F_B = W_T \times \mu \quad (3)$$

- $F_B = \text{bremsekraft}$
- $\mu = \text{friksjonskoeffisienten mellom dekk og asfalt: 2,66}$

$F_B = 10332,8 \text{ N}$, men for å finne lasten i forhjulene, må den langsgående vektoverføringen først finnes.

Den er gitt ved formelen:

$$\Delta W_x = \frac{F_B \times h_m}{L} \quad (4)$$

- $\Delta W_x = \text{vektoverføring}$
- $h_m = \text{høyde til massesenter, 269 mm. Høyde til massesenter er funnet i CAD.}$

Den langsgående vektoverføringen er da $\Delta W_x = 1365,5 \text{ N}$. Med dette blir det mulig å finne forhjulsbelastningen under bremsing på hver av hjulene.

$$W_{FL}, W_{FR} = \frac{W_F + \Delta W_x}{2} \quad (5)$$

Forhjulsbelastningen er da på $W_{FL}, W_{FR} = 1537,4 \text{ N}$.

Det er vanlig å legge til en multipliseringsfaktor. Forhjulsbelastningen under bremsing kan da regnes ut med å multiplisere med *dynamic multiplication factor*. [25]

$$W_{vert} = W_{FL}, W_{FR} \times 1,3 \quad (6)$$

Forhjulsbelastningen på hvert hjul som brukes blir da $W_{vert} = 2000 \text{ N}$

W_{vert} blir deretter multiplisert med friksjonskraften på 2,66 for å finne den langsgående bremsekraften i hvert hjul

$$W_{long} = W_{vert} \times \mu \quad (7)$$

Den langsgående bremsekraften i hvert hjul blir da $W_{long} = 5316 \text{ N}$

Nå er alle tallene som er nødvendige funnet og utregningen mot kreftene i bæream kan begynne. Formelen for kraft som går igjennom øvre bæream er gitt ved:

$$F_{top} = \frac{h_1}{h_2} \times W_{long} \quad (8)$$

- h_1 er høyde mellom nedre del av spindel og bakke, 150 mm
- h_2 er høyde mellom øvre og nedre bæreams feste på spindel, 200 mm

h_1 og h_2 er vist i figur 9.1.

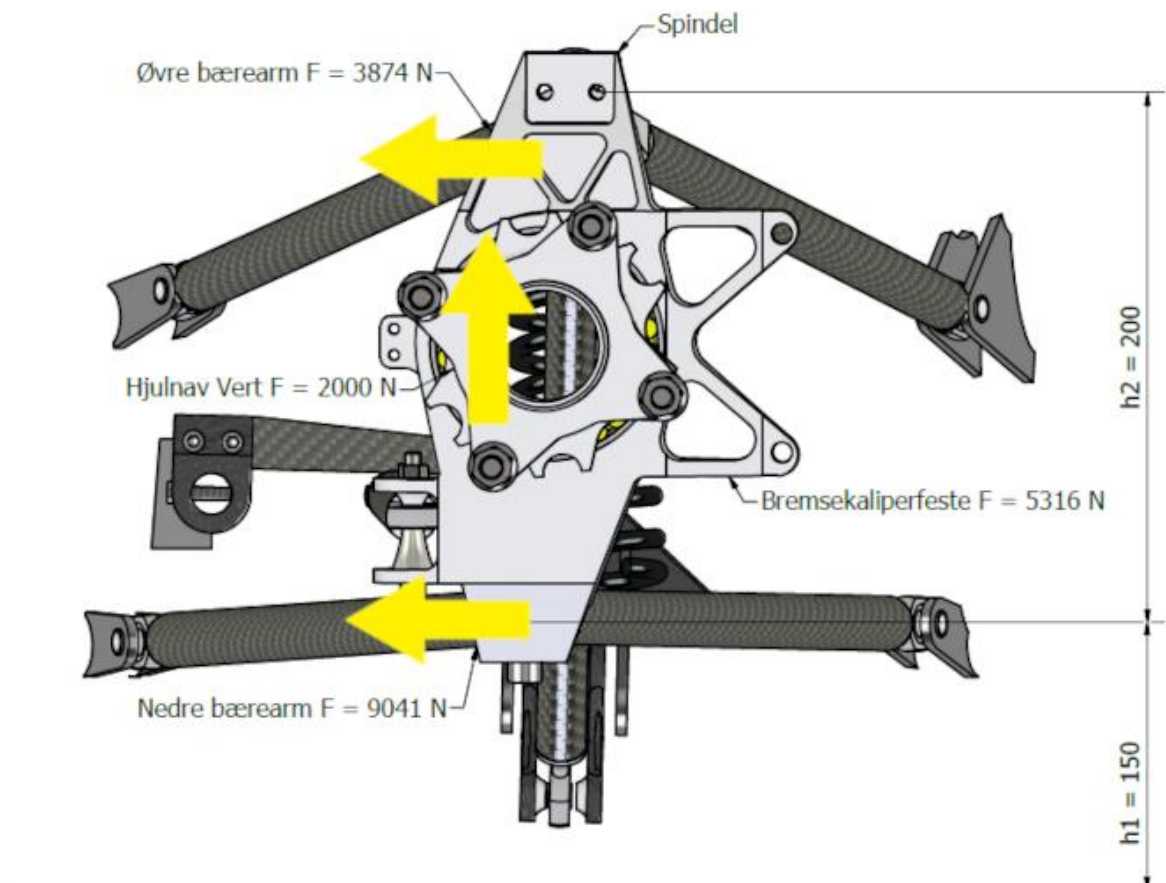
Kreftene i øvre bæream er $F_{top} = 3874$ N

Formelen for kreftene i nedre bæream er gitt ved:

$$F_{bottom} = \left(\frac{h_1 + h_2}{h_2} \right) \times W_{long} \quad (9)$$

Kreftene i nedre bæream er $F_{bottom} = 9041$ N

Kreftene som går inn i spindelen under bremsing illustrert i figur 9.1



Figur 9.1. Illustrasjon av krefter under bremsing. Merk at kreftene ikke er i likevekt på grunn av randbetingelsene.

9.3.3 Maksimal last ved sving

For å finne den maksimale lasten ved sving. Er de vertikale kreftene det første som må utregnes. Bilen i år er designet for en aeropakke som ved maksimal hastighet skal generere 50 kg marktrykk. Den effektive vekten på bilen blir da: [23]

$$W_E = W_T + W_A \quad (10)$$

- $W_A =$ Vekten i newtons ved maksimalt marktrykk, 500 N

Den effektive vekten blir $W_E = 4384,5$ N.

Formelen for den maksimale kraften ved sving er gitt ved:

$$F_C = W_E \times \mu \quad (11)$$

Maksimal kraften ved sving blir da $F_C = 11662,8$ N.

Herfra kan den laterale vektoverføringen finnes ved:

$$\Delta W_y = \frac{F_C \times h_m}{T} \quad (12)$$

- T er sporvidden, 1200 mm.

Dette gir $\Delta W_y = 2614,4$ N.

Den vertikale hjul lasten er gitt ved:

$$W_{vert} = \frac{1}{2} \times W_T \times \left(\frac{L-l_c}{L}\right) + (\Delta W_y \times V_f) \quad (13)$$

$W_{vert} = 1970,9$ N. Den vertikale hjul lasten gir mulighet for å kunne regne ut de laterale kreftene i hjulene. Disse er gitt ved:

$$W_{lat} = W_{vert} \times \mu \quad (14)$$

$W_{lat} = 5242,6$ N. Nå er alle tallene som er nødvendige funnet og utregningen mot kreftene i bæream kan begynne. Formelen for kraft som går igjennom øvre bæream er gitt ved:

$$F_{top} = \frac{h_1}{h_2} \times W_{lat} \quad (15)$$

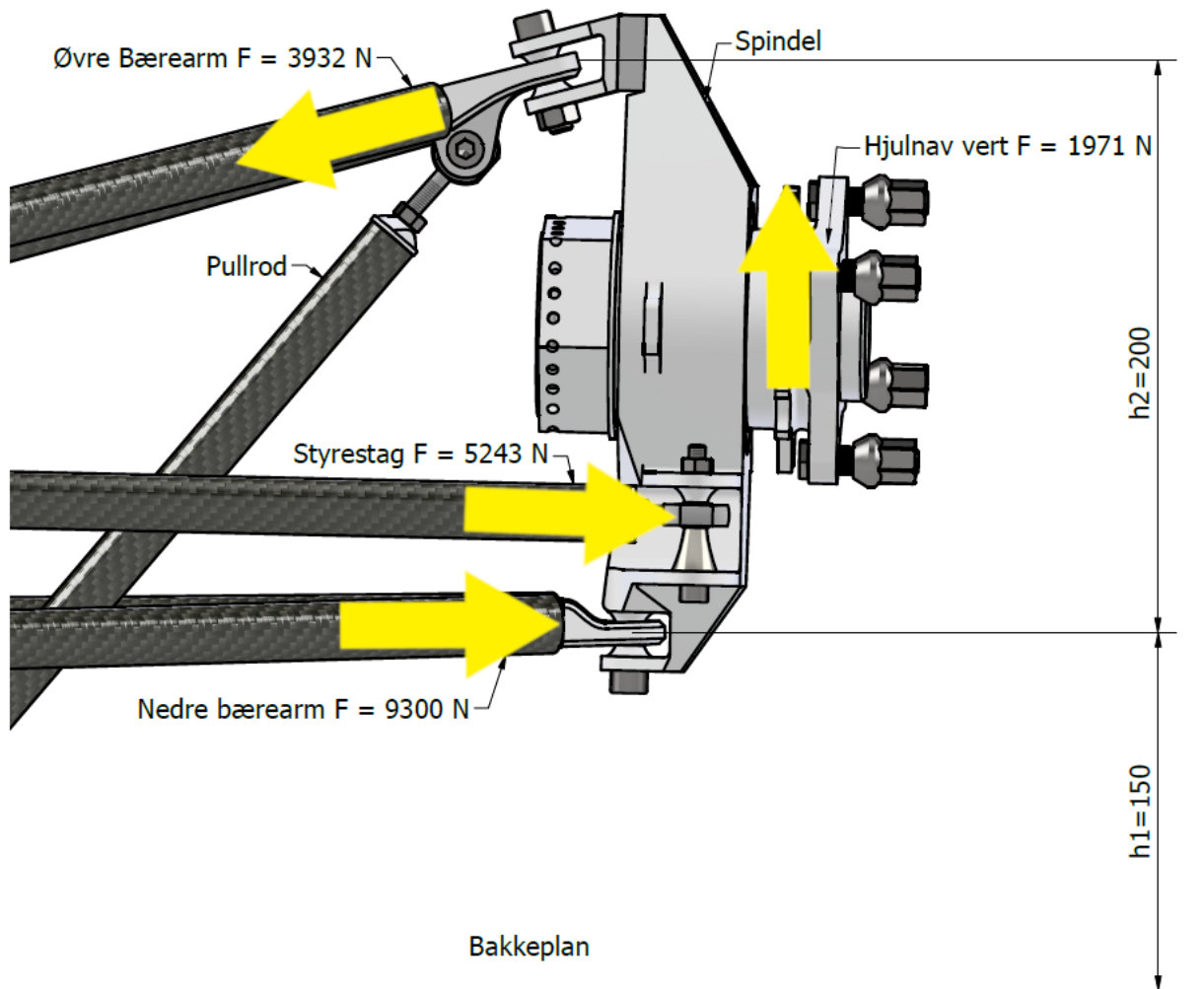
Kreftene i øvre bæream er $F_{top} = 3931,9$ N.

Formelen for kreftene i nedre bæream er gitt ved:

$$F_{bottom} = \left(\frac{h_1+h_2}{h_2}\right) \times W_{lat} \quad (16)$$

Kreftene i nedre bæream er da $F_{bottom} = 9300$ N.

Kreftene som går inn i spindelen under svinging illustrert i figur 9.2.



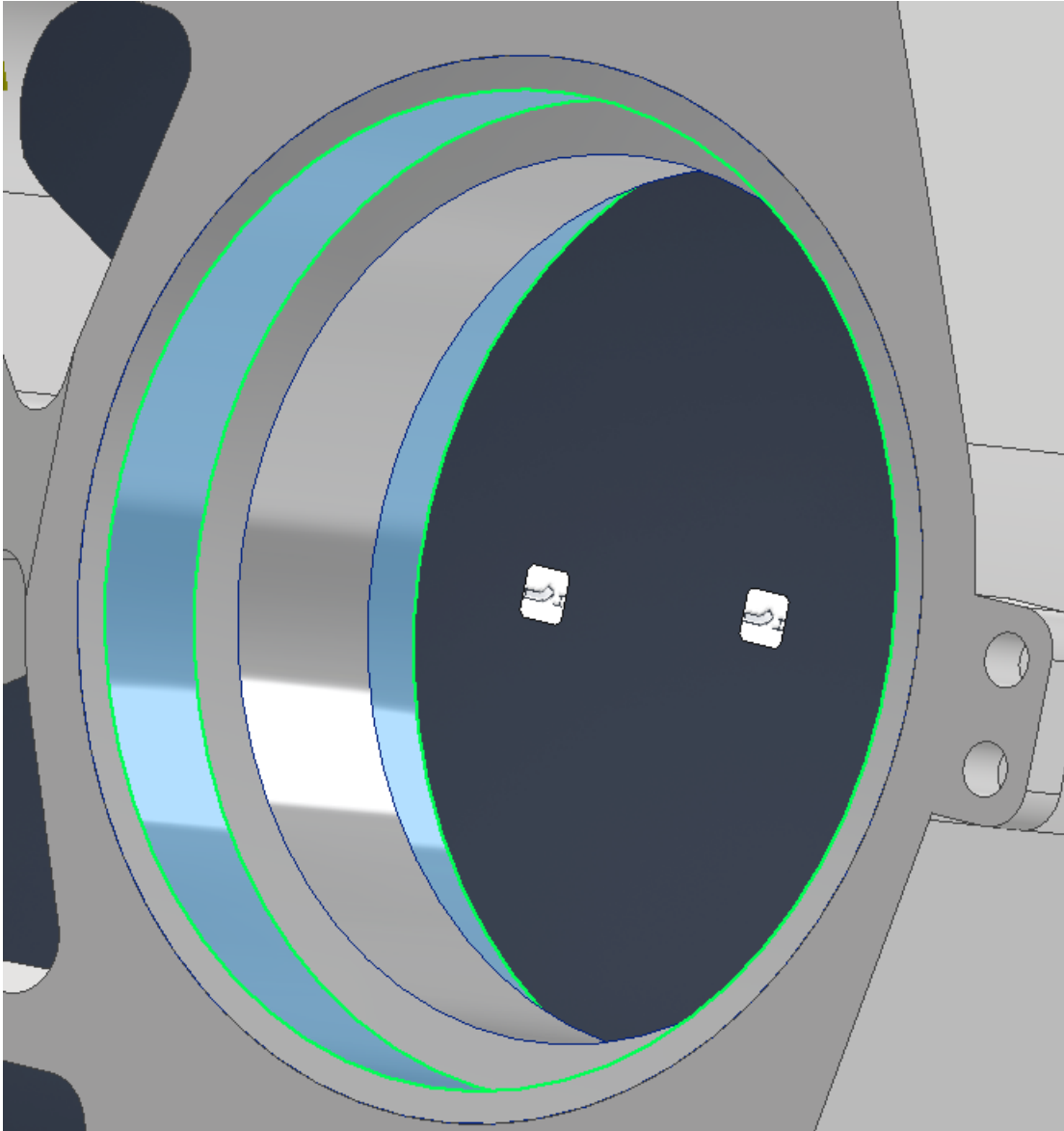
Figur 9.2. Illustrasjon av krefter under svinging. Merk at kreftene ikke er i likevekt på grunn av randbetingelsene til simuleringen.

9.3.4 Simulering

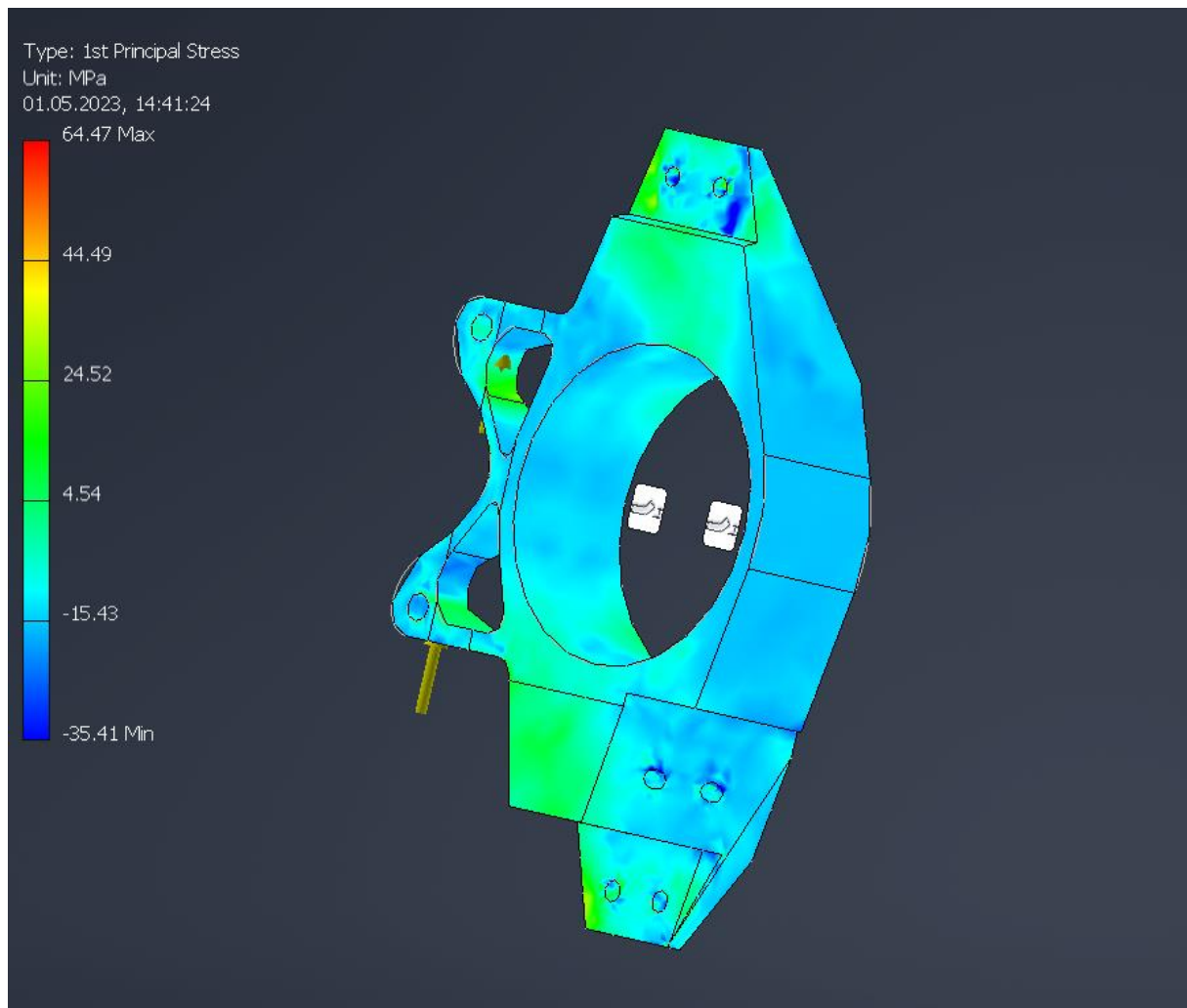
For å se om spindelen tåler belastningen den blir påført, gjøres det en simulering i Inventor. Simuleringen blir gjort på sammenstillingen med alle brakettene. Det blir lagt inn 6061 aluminium som materiale på brakettene og foringen. På selve spindelen blir det lagt inn karbonfiber, her justeres spesifikasjonene etter resultatene fra testingen, for sikkerhet skyld blir det lagt inn verdien på de svakeste gyldige prøvene. Etter at materialene er satt opp legges kreftene regnet ut i kapittel 11.2 inn i simuleringen. Det blir satt opp to simuleringer, en for bremsing vist i bilde 9.18 til bilde 9.20 og en for svinging vist i bilde 9.21 til 9.23. Randbetingelsene for simuleringene er vist i bilde 9.17

I Inventor kan det brukes flere metoder for å beregne spenninger. Siden karbonfiber er et sprøtt materiale brukes 1st principal stress metoden. Fra denne metoden vises det at høyeste spenningen som oppstår i spindelen under bremsing er 64,5 MPa vist i bilde 9.18. For å se på spenningene i brakettene og boltene, brukes Von Misses stress metoden som er egnet for duktile materialer. Dette gir høyeste spenningen i brakettene under bremsing på 227 Mpa vist i bilde 9.19 av spindelen med brakettene. Simuleringen er også gjort med bolter, høyeste spenningen i boltene under bremsing er 410 MPa vist i 9.20. [26]

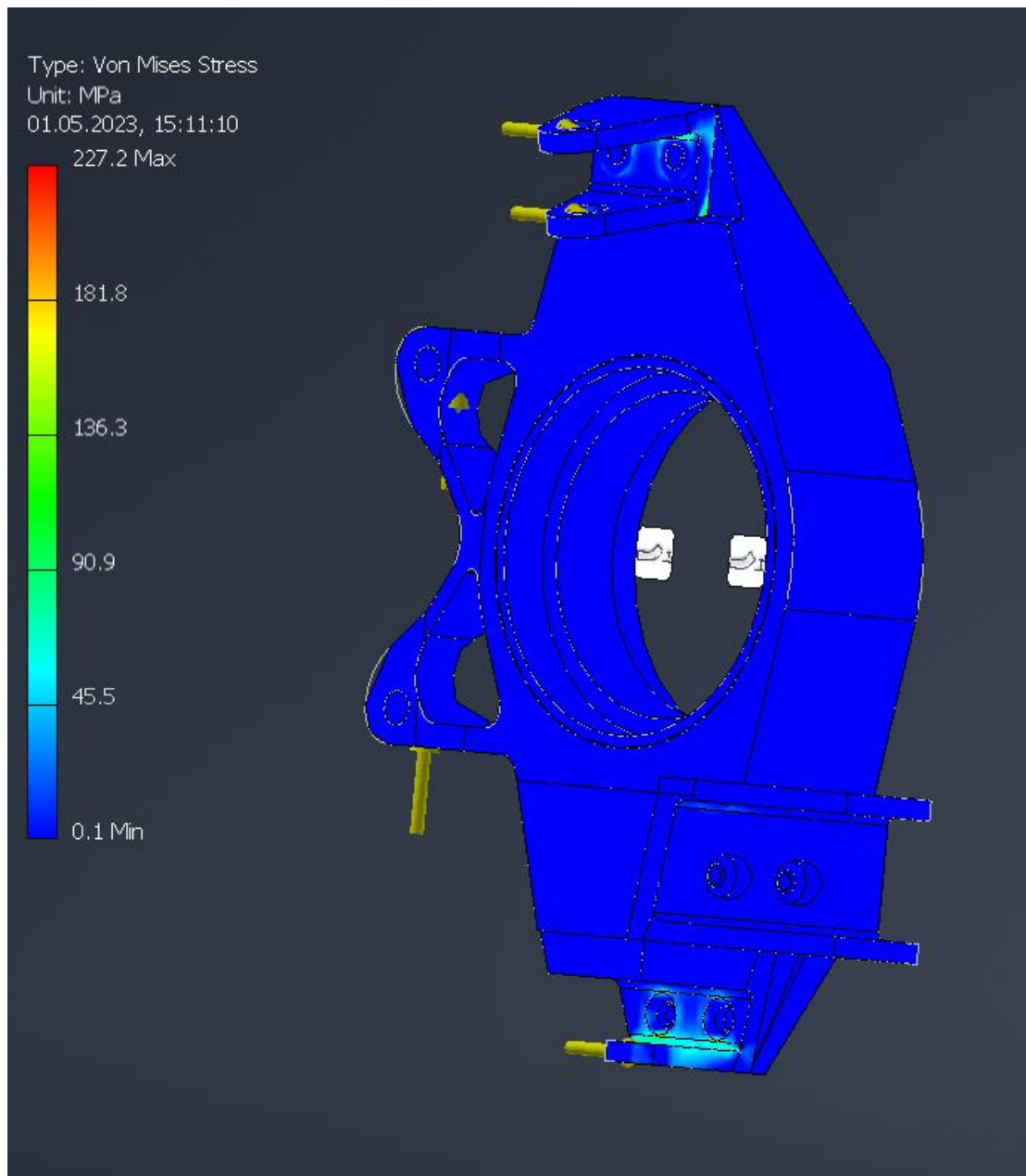
Under svinging er høyeste spenningen i spindelen 79 MPa vist i bilde 9.21. I brakettene er høyeste spenningen under svinging 184 Mpa vist i bilde 9.22. I boltene er høyeste spenning under svinging 960.6 MPa vist i bilde 9.23. Dersom den laveste gyldige spenningen fra strekkprøvene blir brukt på 120 MPa oppnås det en sikkerhetsfaktor på 1.5 og med snittet på strekktestene fra 3dprintet form, oppnås det sikkerhetsfaktor på 1,75. Dersom det brukes 6061 aluminium med strekkfasthet på 240 MPa oppnås det en sikkerhetsfaktor på 1.06 på brakettene og dersom det brukes bolter med kvalitet 12.9 med strekkfasthet på 1100 MPa oppnås det en sikkerhetsfaktor på 1.15. [19] [27]



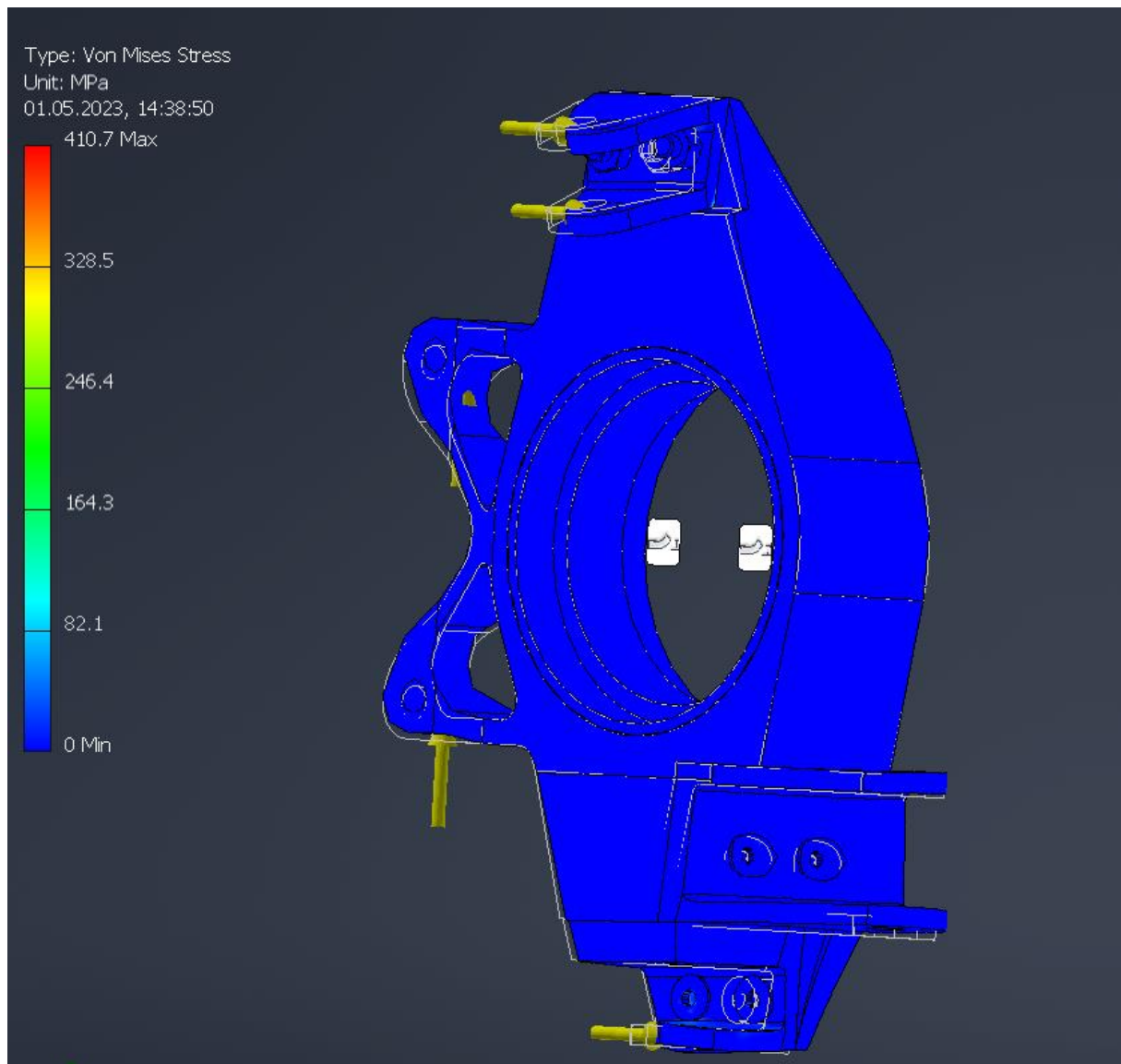
Bilde 9.17. Her vises randbetingelsene, det er brukt "fixed constrain" på det blå feltet, dette er brukt i alle simuleringene.



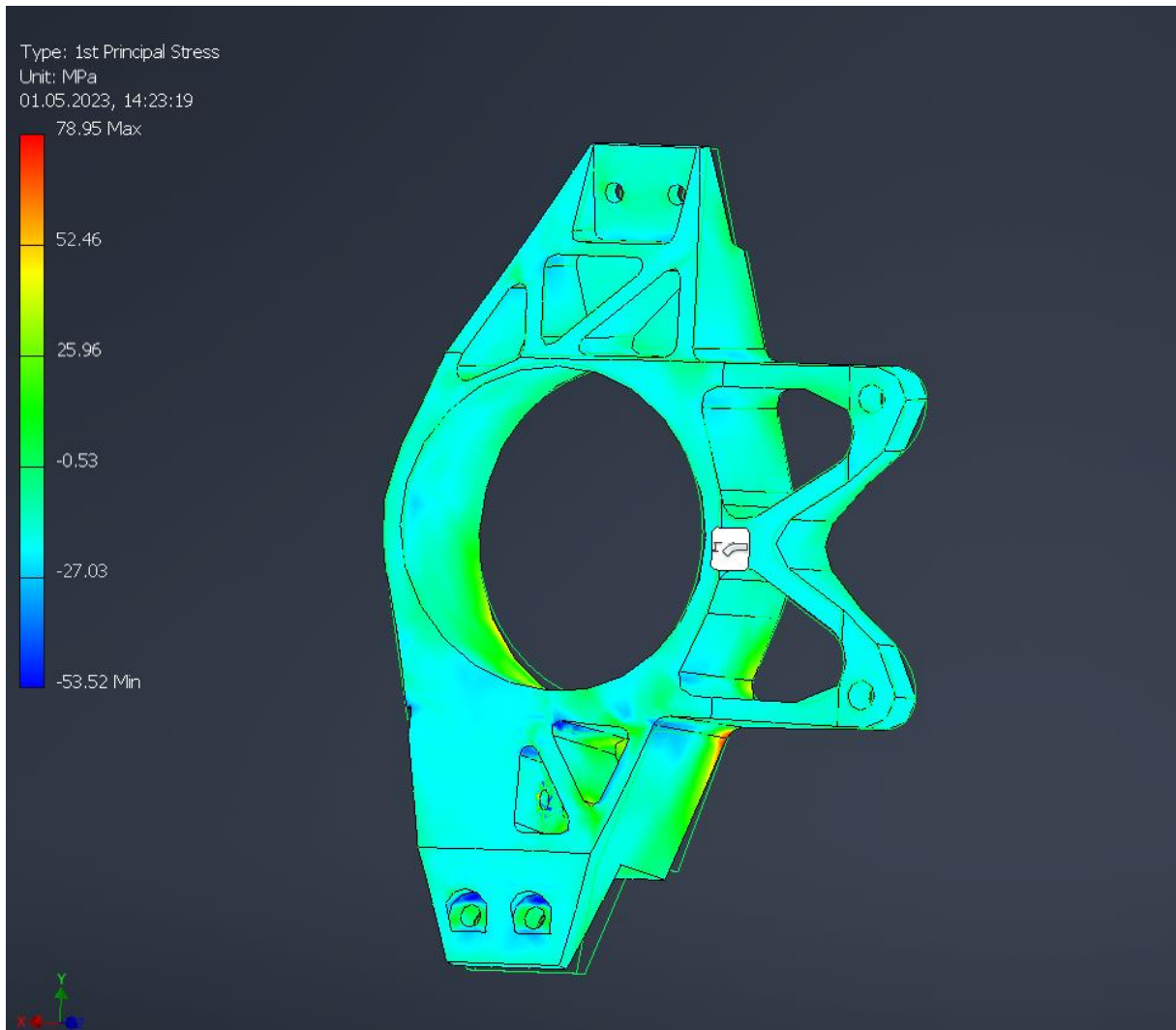
Bilde 9.18. Simulering av spindel under bremsing, brakettene og boltene er en del av simuleringen, men her vises bare spindelen for å ikke få med de høyere spenningene i brakettene og boltene.



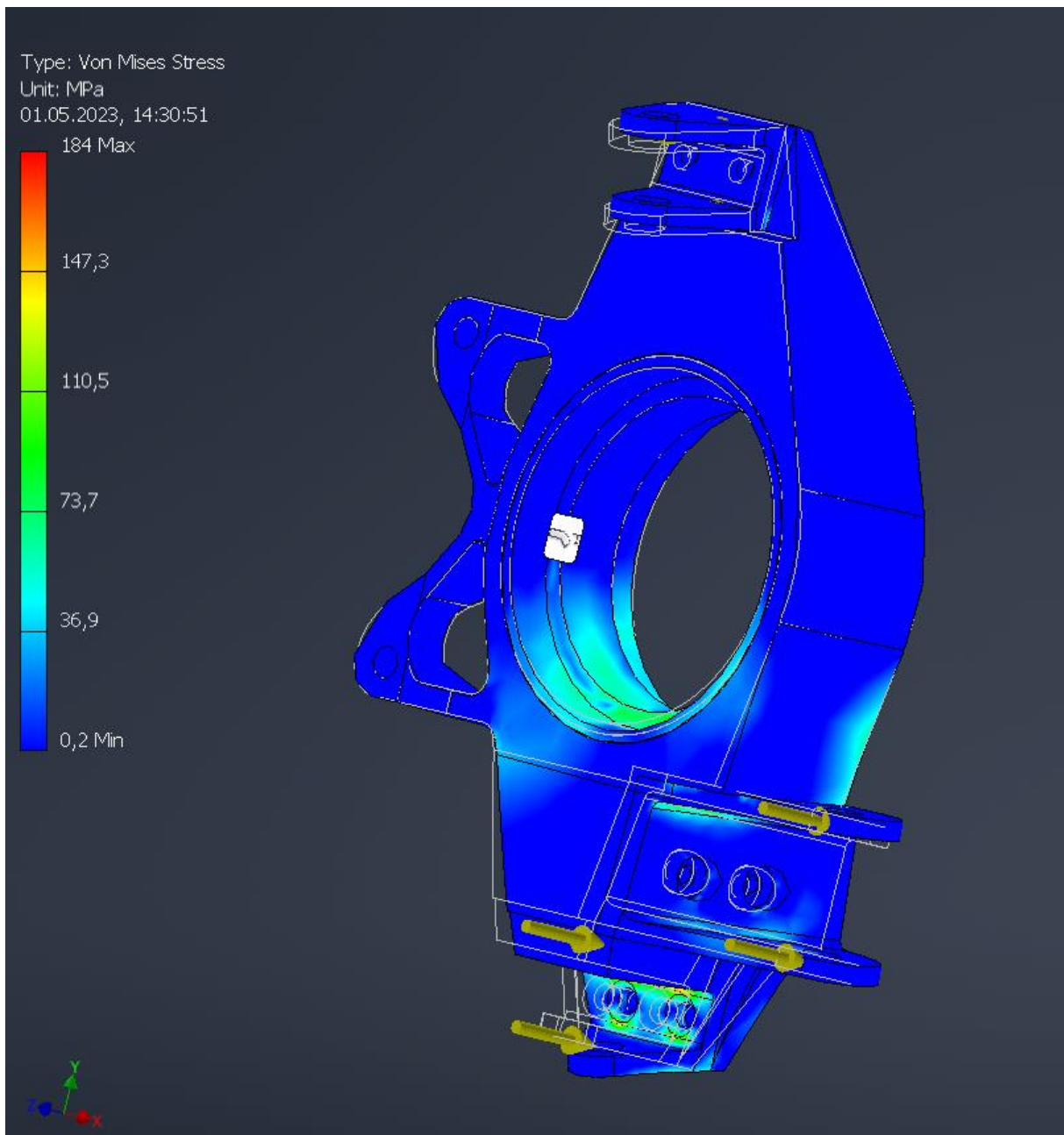
Bilde 9.19. Simulering av spindel under bremsing, her vises også brakettene og demmes spenninger med Von Mises Stress.



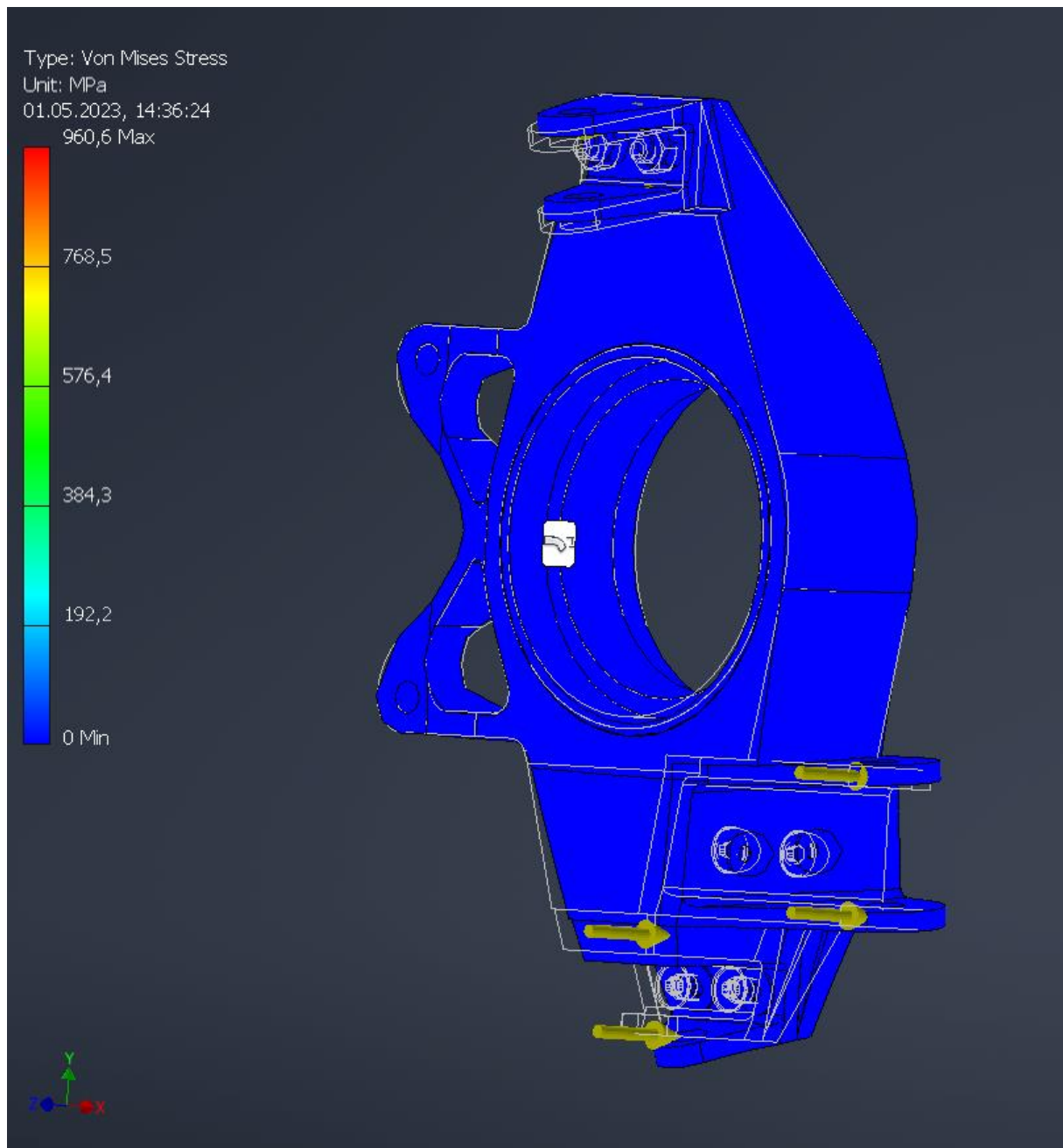
Bilde 9.20. Simulering av spindel under bremsing, her vises også boltene og demmes spenninger med Von Mises Stress.



Bilde 9.21. Simulering av spindel under svinging.



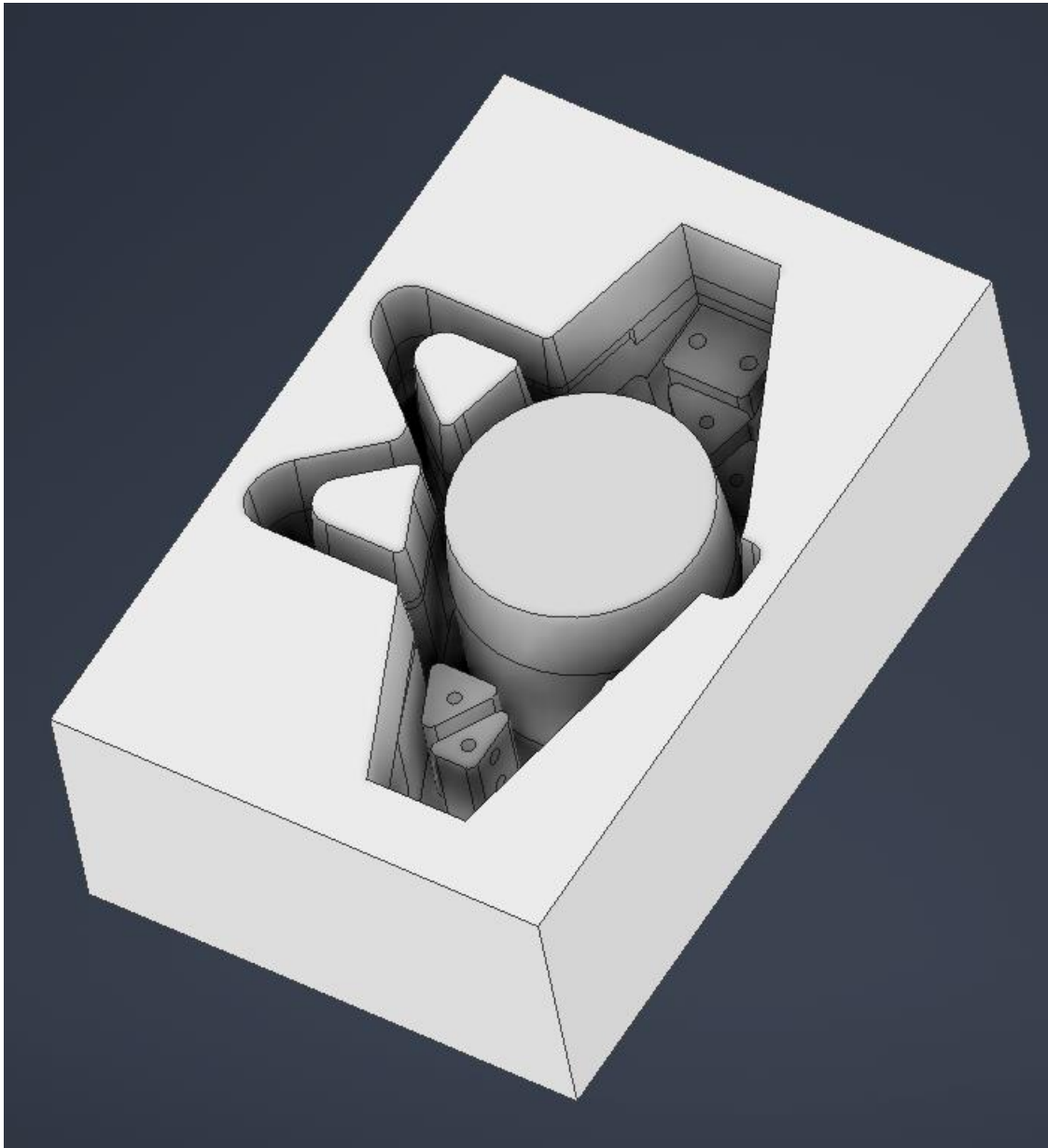
Bilde 9.22. Simulering av spindel under svinging, med braketter.



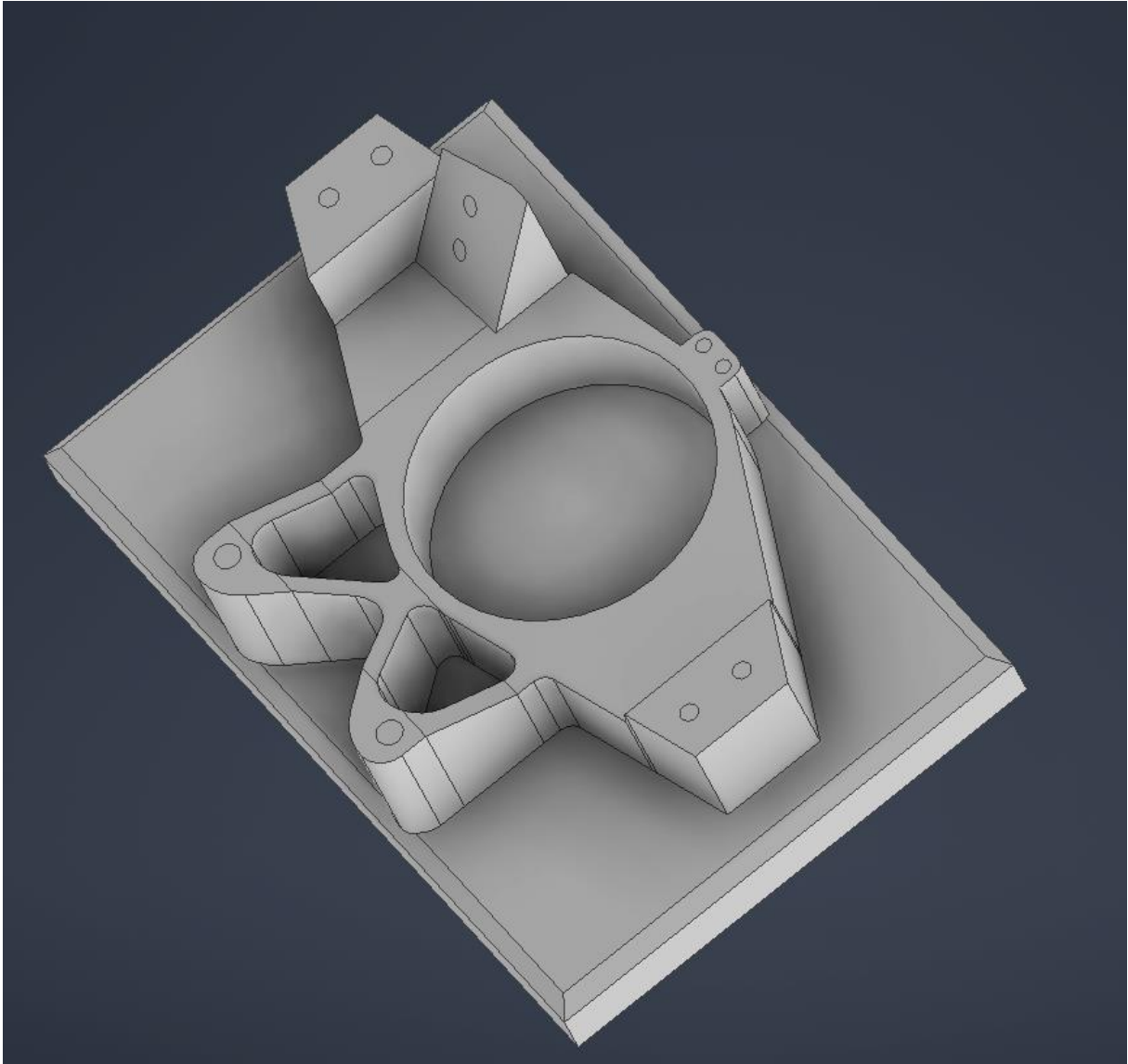
Bilde 9.23. Simulering av spindel under svinging, med bolter.

9.4 Design av støpeform

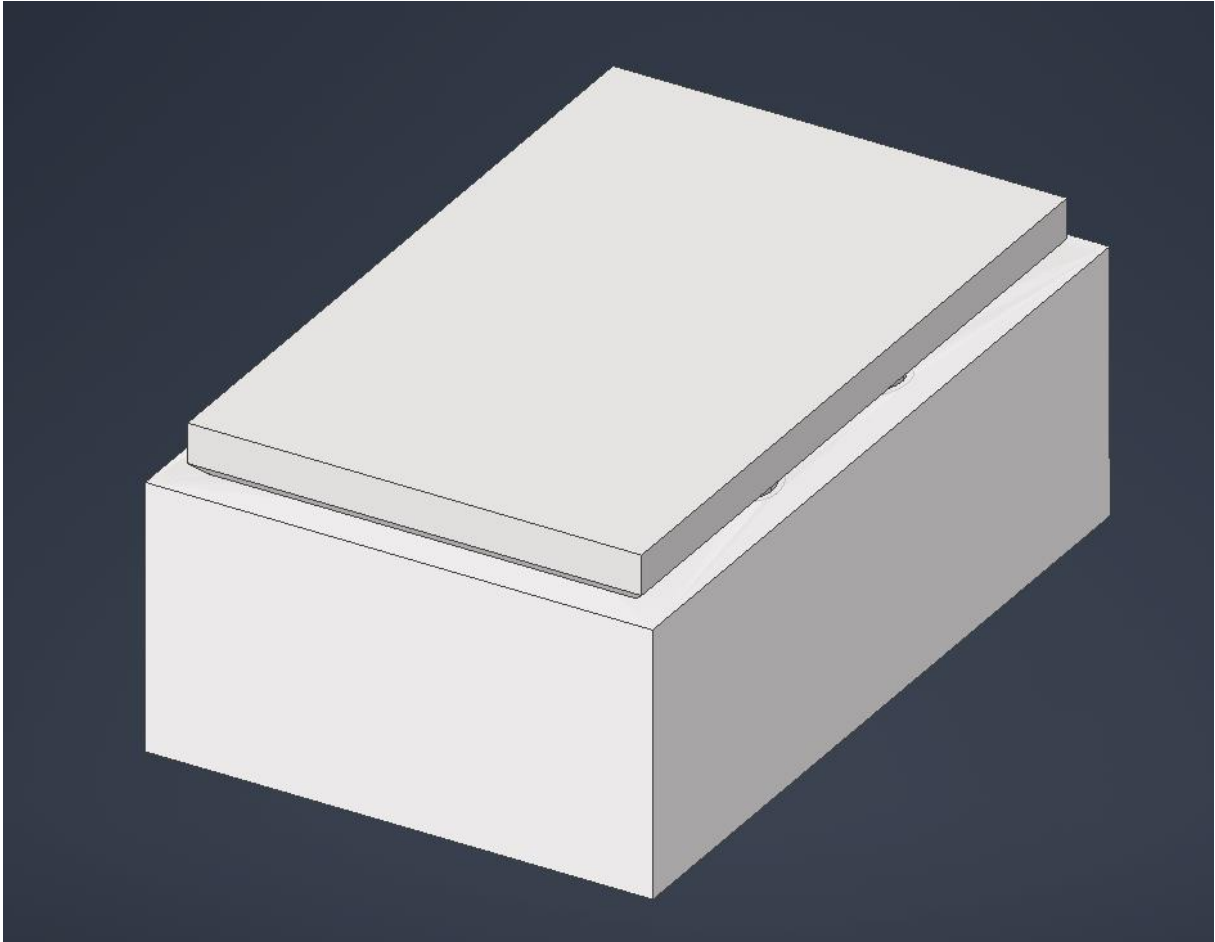
Når delen er ferdig designet kan det designes en støpeform. Denne blir designet på samme måte som de andre formene til strekkprøvene. Siden denne delen er mer avansert brukes ”mold making tool” i Inventor. Dette gjør at det enkelt designes en invers støpeform av delen. Det legges så inn rett vinkel på kanten og hull for å presse delen ut. Ferdig støpeform vist i bilde 9.24 til bilde 9.26



Bilde 9.24 Bundel av støpeform til spindel.



Bilde 9.25. Overdel av støpeform til spindel.



Bilde 9.26. Sammenstilling av støpeform til spindel.

10 Diskusjon og konklusjon

Ut fra testresultatene nærmere diskutert i kapittel 10 og simuleringene kan man si at spindelen med modifikasjonene som er gjort, er egnet for produksjon og bruk på ION Racing sin Formula Student bil. Sikkerhetsfaktoren på brakettene på 1.06 og boltene på 1.15 er kanskje noe lav, men siden friksjonskoeffisienten og vekten på bilen er i stor grad overdimensjonert da den reelle friksjonen er ukjent, er denne sikkerhetsfaktoren i realiteten høyere.

Det kan også konkluderes med at produksjonsmetoden er fullt gjennomførbar og oppnår en relativt stabil styrke i materialet. Det burde riktig nok testes mer for å kunne konkludere med at denne styrken kan oppnås i større støpinger slik som spindelen.

Når det gjelder produksjon av spindelen, kan det meste gjøres selv. Støpingen har blitt vist at kan utføres med minimalt med enkelt verkstedutstyr. Brakettene kan lages selv med fres og foringen kan dreies i dreiebank. Dette er utstyr som er tilgjengelig for ION på verkstedet til universitetet. Det kan riktignok hende at brakettene er mer egnet for CNC maskinering, men det er viktig å understreke at de er overkommelig å lage selv som oppgaven fokuserer på.

Den ferdige delen har også endt opp med en betydelig vektreduksjon på 250 g med en totalvekt med alle deler på 760 g. Dette høres kanskje lite ut, men 1/4 vektsparing på en del på en racingbil er ganske mye. Det er også to av disse på bilen, så til sammen utgjør det 500 g. dersom man skulle gjøre det samme på spindlene bak, er man oppe i et helt kilo spart.

En annen fordel med denne typen karbonfiber er at det er bærekraftig med at det kan brukes resirkulert karbonfiber av enten gjenbrukt karbonfiber eller rester fra produksjon. Dette er en stor fordel med fokuset på bærekraftigheten som er i dagens samfunn.

11 Kilder

- [1] High Performance Carbon Fibers» acs.org. Hentet fra: <https://www.acs.org/education/whatischemistry/landmarks/carbonfibers.html> (Lest: 02.04.23)
- [2] «How is Carbon Fiber Made?» zoltek.com. Hentet fra: <https://zoltek.com/carbon-fiber/how-is-carbon-fiber-made/#:~:text=The%20process%20for%20making%20carbon,oxygen%2C%20the%20fiber%20cannot%20burn> (Lest: 08.02.23)
- [3] EasyComposites, “3K Carbon Fiber Tow” Easycomposites.co.uk. Hentet fra: <https://www.easycomposites.co.uk/3k-carbon-fibre-tow> (Lest: 15.04.23)
- [4] «Carbon Fiber vs Steel» zoltek.com. Hentet fra: <https://zoltek.com/carbon-fiber-vs-steel/> (Lest: 18.02.23)
- [5] Paolo Feraboli, Fedrico Gasco, Bonnie Wade, Steve Maier, Roger Kwan, Attilio Masini, Luciano DeOto og Maurizo Reggiani, “LAMBORGHINI “FORGED COMPOSITE®” TECHNOLOGY FOR THE SUSPENSION ARMS OF THE SESTO ELEMENTO” ASC Technical Conference, Montreal, Canada, Nov. 2011.
- [6] P. Feraboli, E. Peitso, F. Deleo, T. Cleveland, M. Graves and P. Stickler, “Characterization of Discontinuous Carbon Fiber/Epoxy Systems for Aerospace Applications: Part I” University of Washington, Seattle, USA, 2009
- [7] EasyComposites, “Investigating the Mechanical Performance of 'Forged' Carbon Fibre Components” Easycomposites.eu. Hentet fra: <https://www.easycomposites.eu/learning/mechanical-properties-of-forged-carbon-fibre> (Lest: 11.02.23)
- [8] «Carbon fiber composite materials for next generation engineering» mcam.com. Hentet fra: <https://www.mcam.com/en/products/composites/carbon-fiber> (Lest: 10.02.23)
- [9] Markforged, “Micro carbon fiber filled nylon that forms the foundation of Markforged composite parts” Markforged.com. Hentet fra: <https://markforged.com/materials/plastics/onyx> (Lest: 28.01.23)
- [10] *Bestemmelse av strekkegenskaper Del 1: Generelle prinsipper*, ISO 527-1, 2019.
- [11] *Bestemmelse av strekkegenskaper Del4: Prøvingsbetingelser for isotropiske og ortotropiske fiberforsterkede plastkompositter*, ISO 527-4, 2021, Korrigert versjon 2022-02.
- [12] *Fiberforsterkede plastkompositter, Bestemmelse av bøyeegenskaper*, ISO 14125, 1998.

- [13] Jacob Nagler «Schematic og flexure tests (3- point and 4-point bending test)» Hentet fra: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-flexure-tests-3-point-and-4-point-bending-test-36_fig2_331074946 (Lest: 01.04.23)
- [14] *Fiberforsterkede plastkompositter, Bestemmelse av kompresjonsegenskaper i planets retning*, ISO 14126, 1999
- [15] Derek Seward, “Suspension links,” i *Race car design*, 1 utgave. utgitt i New York, (New York), Land: USA, Palgrave, 2014, kap. 3, Avsnitt 3.2 – 3.6, s.62 – 85
- [16] «What is camber and what is its purpose?» [Suspentionsecrets.co.uk](https://suspensionsecrets.co.uk). Hentet fra: <https://suspensionsecrets.co.uk/camber/> (Lest: 21.04.2022)
- [17] Derek Seward, “Suspension links,” i *Race car design*, 1 utgave. utgitt i New York, (New York), Land: USA, Palgrave, 2014, kap. 6, Avsnitt 6.2.2, s.157 – 158.
- [18] *Plast, Tillaging av prøvelegemer ved maskinering*, ISO 2818, 2018
- [19] HandWiki. «Chemistry:6061 aluminium alloy» [Handwiki.org](https://handwiki.org/wiki/Chemistry:6061_aluminium_alloy). Hentet fra: https://handwiki.org/wiki/Chemistry:6061_aluminium_alloy (Lest. 18.04.23)
- [20] Markforged, “Micro carbon fiber filled nylon that forms the foundation of Markforged composite parts” [Markforged.com](https://markforged.com). Hentet fra: <https://markforged.com/materials/plastics/onyx> (Lest. 28.01.23)
- [21] Derek Seward, *Race car design*, 1 utgave. New York, New York, land: USA, Palgrave, 2014.
- [22] Derek Seward, “Racing car basics,” i *Race car design*, 1 utgave. utgitt i New York, (New York), Land: USA, Palgrave, 2014, kap. 1, Avsnitt 1.9, s.24 – 29
- [23] Derek Seward, “Suspension links,” i *Race car design*, 1 utgave. utgitt i New York, (New York), Land: USA, Palgrave, 2014, kap. 3, Avsnitt 3.2 – 3.6, s.62 – 85
- [24] Truls Mentzoni Skoglund “Konstruksjon og topologioptimalisering av hjulspindler til en Formula Student-bil” ION Racing, Universitetet i Stavanger, Norge, 29.05.17
- [25] Derek Seward, “Suspension links,” i *Race car design*, 1 utgave. utgitt i New York, (New York), Land: USA, Palgrave, 2014, kap. 2, Avsnitt 2.6, s.45.
- [26] Sangeeta Das «Von Mises Stress Vs Principal Stress: Comparative Analysis And Exhaustive FACTS» Hentet fra: <https://lambdageeks.com/von-mises-stress-vs-principal-stress/?msclkid=35d640cdc2e211ec8b957bdd0450a884> (Lest: 24.02.23)
- [27] Suraj Metal Corp. «High Tensile Grade 12.9 Hex Bolts» [surajmetal.com](https://www.surajmetal.com). Hentet fra: <https://www.surajmetal.com/high-tensile-bolts-12-9-grade.html#:~:text=Grade%2012.9%20Hex%20Bolts%20are,and%201220MPa%20minimum%20tensile%20strength>. (Lest: 14.04.23)

A. Vedlegg

A.1 Forstudierapport

Navn:

Ruben Østli

Ole Fredrik Mørkved

Problemstilling

Utvikling av produksjonsmetode og testing av diskontinuerlig karbonfiber til bruk på spindel til ION racing bil

Oppgave beskrivelse

Å redusere vekt i en racer bil er en av nøkkelpunktene i å gjøre en bil raskere på banen. I flere år har det vært vanlig å bruke aluminium som materiale i deler som blir utsatt for høye spenninger.

Aluminium er et lettvektig materiale, har god styrke og er lett tilgjengelig, men ved større og mer kompliserte deler kan det fort bli dyrt å maskinere.

Diskontinuerlig karbonfiber er et relativt nytt materiale det har blitt gjort lite forskning på. Det har en tetthet på nesten halvparten av aluminium, er relativt billig og ikke nødvendigvis vanskelig å produsere. Det er gjort veldig få publiserte undersøkelser på materialet. Dette er ett av hovedpunktene i oppgaven, utføre materialtester og kartlegge egenskapene til materialet. Alle testene vil bli gjort med design av ulike test stykker og støpeformer. I tillegg skal resultatene brukes til å re-designe spindelen på årets ION Racing bil til å fungere med diskontinuerlig karbonfiber.

Oppgaven skal i hovedsak svare på. Hvor sterkt er materialet? Finnes det produksjonsmetoder som kan gi andre resultater enn de brukt i oppgaven? Hvordan fordeler og ulemper kommer frem ved å bytte ut aluminium med karbonfiber?

ION Racing UIS

ION Racing er det største student prosjektet ved Universitetet i Stavanger. Prosjektet er å delta i Formula Student, som er Europas største ingeniørkonkurransen. Konkurransen går ut på å bygge en Formula Student bil og konkurrere med denne på sommeren.

Laget blir testet både teknisk og teoretisk. Mange av dommerne er fra Formel 1 og gir poeng til lagene ut ifra hvor godt studentene klarer å forsvare valg av design, andre statiske øvelser og hvor gode de dynamiske kjøreegenskapene på bilen er.

Med hjelp fra Universitetet og det lokale næringslivet blir prosjektet mulig. Det danner jobbmuligheter for studentene samtidig som det gir studentene god praksis erfaring og relasjoner med lokale bedrifter, undervisningen på universitetet ikke ville gitt.

Bakgrunn

Ideen startet med at det ble eksperimentert med å ha ett annet type dempesystem på ION racing sin formula student bil. Den nye typen dempesystem krevde en kraftigere nedre bærearmer enn den som tidligere har vært konstruert av karbonfiberrør. Det nye designet krevde et isotropisk materiale, som karbonfiber vanligvis ikke er. Det var likevel ønskelig å fortsette å bruke karbonfiber for å spare vekt. Det ble så oppdaget at det nylig var blitt utviklet en tilvirkingsmetode av diskontinuerlig karbonfiber av Easycomposites, som er en nettbutikk for kompositter. Diskontinuerlig karbonfiber er et relativt nytt kompositt materiale som er utviklet av Lamborghini og Callaway Golf Company og varemerket Forged Composites® og er i denne sammenhengen brukt til karbonfiber. Lamborghini har brukt dette materialet til å produsere bærearmer til bilmodellene sine. Dette ble da sett på som det perfekte materialet å bruke til bærearmer på ION racing sin bil.

Det ble designet bærearmer i semesteroppgave og praksisfag. I praksisfaget ble det også gjort test støpinger og strekktester av materialet der det ble konkludert at materialet var sterkt nok til å brukes og gjøre videre undersøkelse på. Det ble riktignok konkludert med å holde seg til det gamle designet på hjuloppheng og dempesystem av andre praktiske grunner. Selv om designet på ny bærearmer ikke ble brukt, ble det konkludert med at det kunne brukes til mye annet på bilen og nærmest erstatte aluminium i mange tilfeller. Dette er til stor vektfordel da diskontinuerlig karbonfiber har en tetthet på nesten halvparten av aluminium.

Siden dette er et lite dokumentert kompositt materialet, ble det sett på som en perfekt mulighet til å gjøre grundigere testing og dokumentasjon på materialet for å kunne bruke det til diverse applikasjoner på ION racing sin formula student bil og andre prosjekter i framtiden.

Som applikasjon av materialet i oppgaven ble det valgt spindel foran på ION racing sin formula student bil. Denne delen ble sett på som en god kandidat da det er en av de største delene i aluminium på bilen, og det kunne dermed gjøres store vektbesparelser av å lage denne i karbonfiber. Spindelen er også en del under store dynamiske belastninger. Det vil si at det er en del utregninger som må gjøres for å beregne kreftene som går inn i delen. Dersom delen ender opp med å fungere bra vil det legge et godt grunnlag for å bruke materialet i andre applikasjoner med tilsvarende høy belastning, siden spindelen er av de delene med større belastning. Spindelen er også en relativt komplisert del å støpe i karbonfiber, så den vil også sette støpe prosessen på prøve.

Begrensinger

Oppgaven er begrenset av mengde litteratur og tidligere rapporter å sammenligne med. Dette er et nytt materialet som fram til nylig ikke har vært brukt av andre enn noen få store selskaper, der det er vanlig å holde slike ting som bedriftshemmeligheter. Det er likevel mye litteratur på konvensjonell karbonfiber og andre kompositter som er i høyeste grad relevant.

Det er mange variabler å ta høyde for når man utfører materialtesting. Siden denne rapporten ikke er bare på materialet i seg selv, men også bruk av materialet i en spesifikk applikasjon, er det viktig å begrense testingen til det som er relevant til oppgaven. Det er også begrenset med materialer tilgjengelig, da det i skrivende stunde er mangel på diverse varer verden over.

Bruk av analyseprogrammer for simulering av materialer er også en stor begrensning. Det er ingen på gruppen som har hatt emnet elementmetoder. Det vil derfor være for omfattende å skulle gjøre en grundig analyse på materialet i seg selv, da det er begrenset forståelse for faget i gruppen. En slik analyse er også så omfattende at det kan sees på som en bacheloroppgave i seg selv. En enkel analyse i Autodesk Inventor kan likevel være relevant for å få en anelse av spenningene som oppstår i delen.



Litteraturstudie

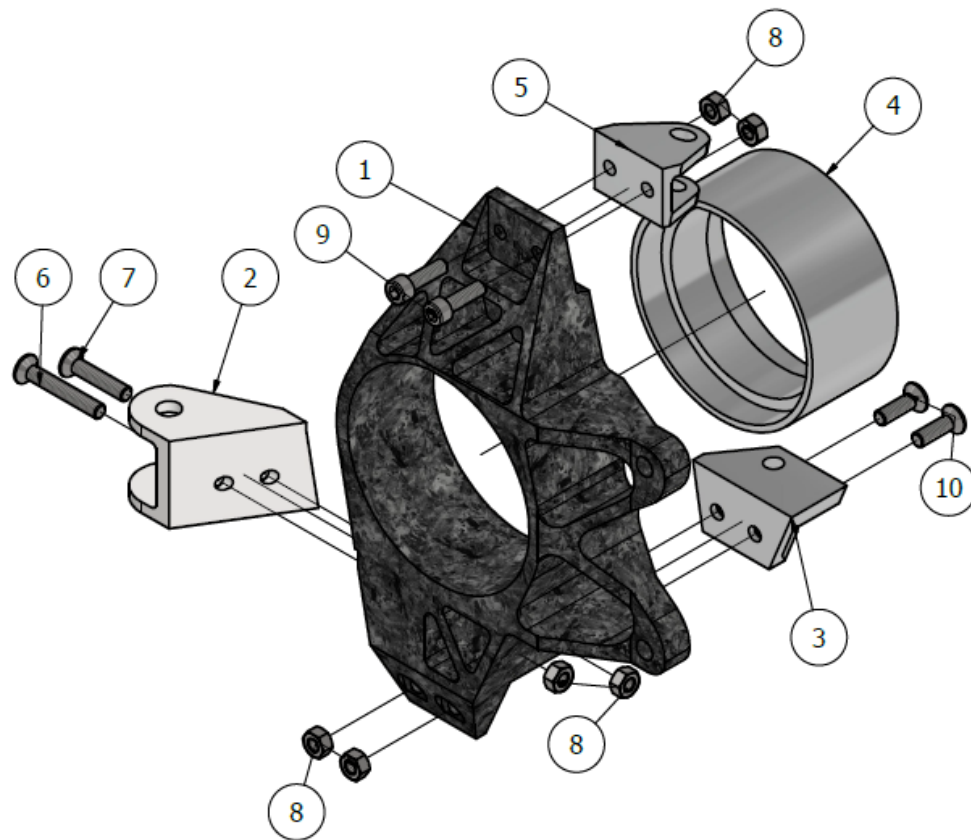
Det har så langt blitt gjort studier på konvensjonell karbonfiber. Det har og blitt funnet to rapporter fra Lamborghini på bruk av forged karbon composites og fra Boeing på bruk av diskontinuerlig karbonfiber. Disse har blitt lest nøye gjennom og hentet ut relevant informasjon fra.

Planlagt tidsplan for hele prosjektet.

Uke 4	Litteraturstudie / forstudierapport Finne litteratur og standarder som er relevant for materialet. Skrive forstudierapporten.
Uke 5	Litteraturstudie forstudierapport Finne litteratur og standarder som er relevant for materialet. Skrive forstudierapporten.
Uke 6	Litteraturstudie. Design og planlegging av testing Finne litteratur og standarder som er relevant for materialet. Planlegge tester. Design av teststykker og støpeformer.
Uke 7	Design og planlegging av testing Formene og teststykkene må ferdig designes.
Uke 8	Produksjon av teststykker Formene må maskineres, 3d printes og støpes. Delene som skal testes må også lages i karbonfiber slik at testingen kan starte.
Uke 9	Første runde med testing Testene skal utføres. På forhånd skal det ha blitt gjort antagelser. Refleksjoner av resultatene må gjøres.
Uke 10	Bedømme testresultater Skrive ned resultatene og reflekterer på hva vi fikk og hvorfor vi fikk det.
Uke 11	Videre litteraturstudie og nye tester Ta en avgjørelse på om vi trenger å ta flere tester. Videre lesning for å forstå resultatene bedre.
Uke 12	Fortsettelse av testing
Uke 13	Design av spindel Mye av informasjonen om materialet skal ha blitt funnet. Design av spindel kan da startes. Spindelen som står på bilen nå er utgangspunktet for designet, det vill da bli gjort justeringer for å tilpasse designet til å støpes i karbonfiber.
Uke 14	Påske
Uke 15	Design av støpeform Når designet på spindelen er ferdig, kan vi begynne å designe støpeformen. Avgjørelsen på hva slags type form vi skal ha må tas.
Uke 16	Rettskriving Finskrivning av oppgaven.
Uke 17	Rettskriving Finskrivning av oppgaven.
Uke 18	Rettskriving Finskrivning av oppgaven.
Uke 19	Levering

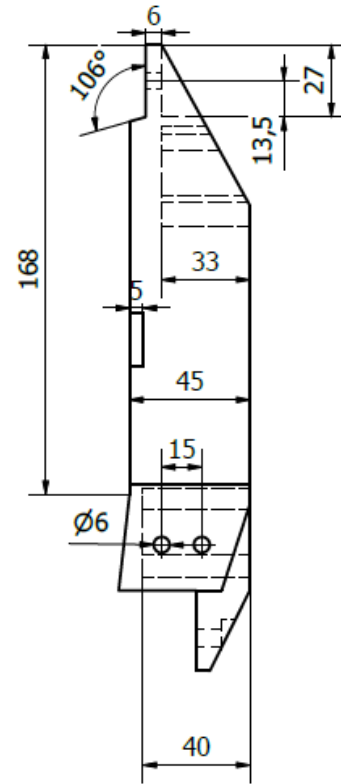
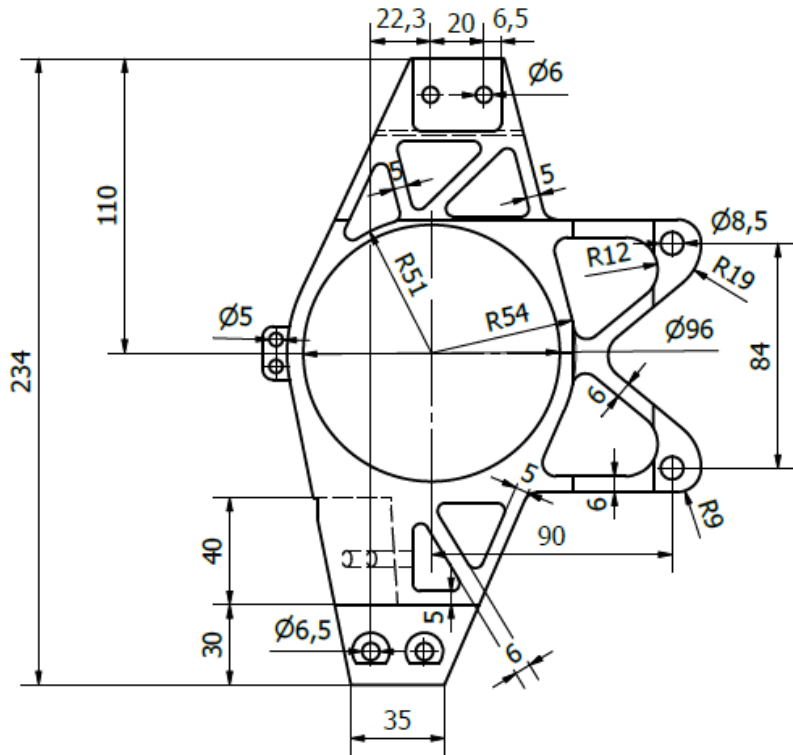
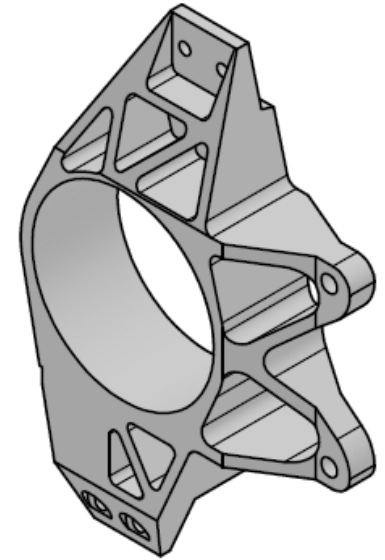
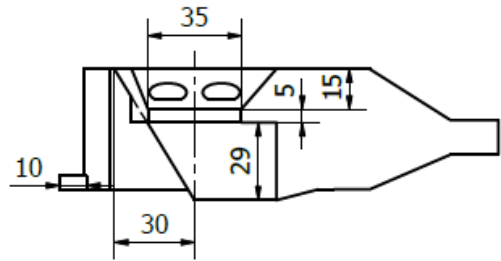


Designet av: Ruben Østli	Materiale: Karbonfiber		Dato: 14.05.2023	Ark størrelse: A3
		Del: Spindel sammenstilling		
			Revisjon 1	Ark 1 / 1

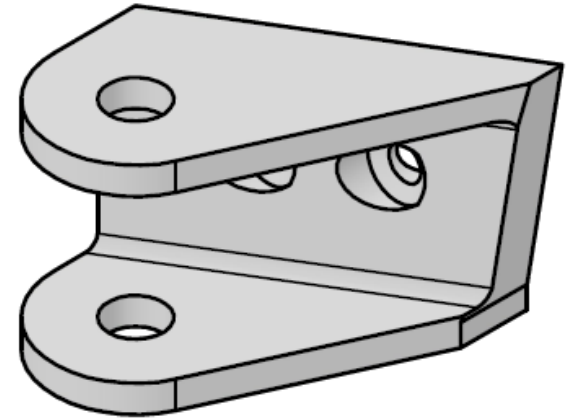
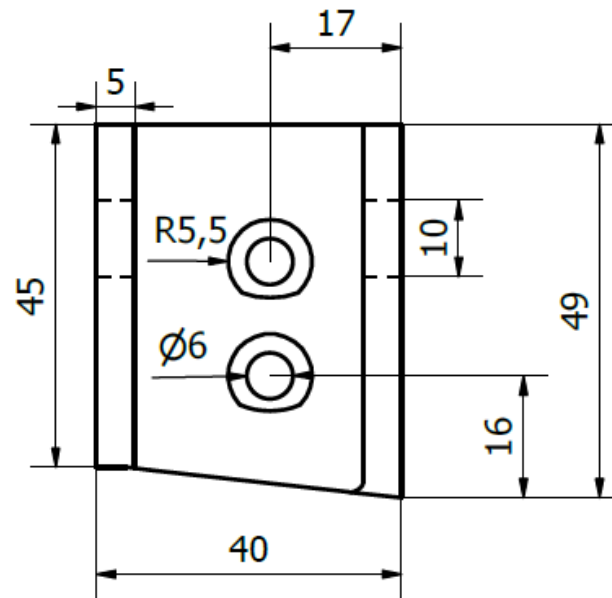
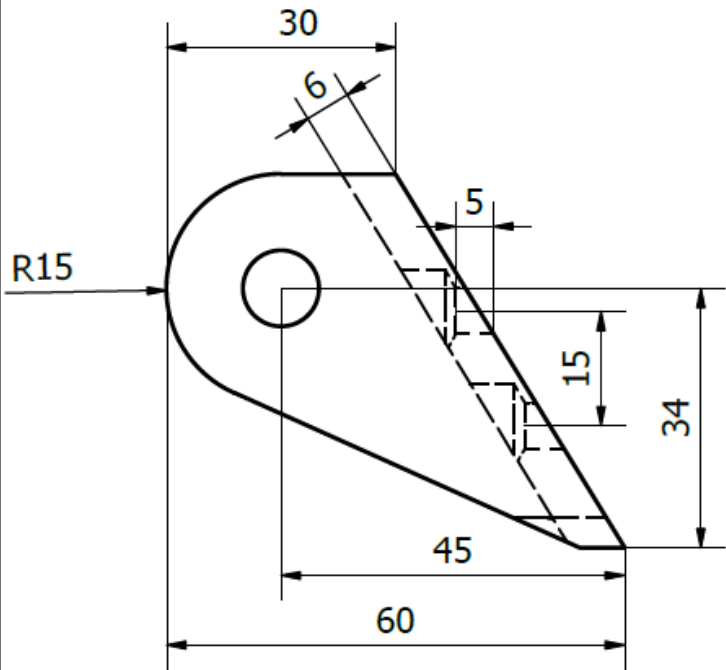


PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Spindel	
2	1	Styrebrakket	
3	1	Nedre brakett	
4	1	Foring	
5	1	Øvre brakket	
6	1	ASME/ANSI B18.3.5M - M6x40(2)	Broached Hexagon Socket Flat Countersunk Head Cap Screws - Metric
7	1	ASME/ANSI B18.3.5M - M6x30(2)	Broached Hexagon Socket Flat Countersunk Head Cap Screws - Metric
8	6	AS 1112 - M6 Type 5	ISO metric hexagon nuts, including thin nuts, slotted nuts and castle nuts
9	2	AS 1420 - 1973 - M6 x 20	ISO metric hexagon socket head cap screws
10	2	ASME/ANSI B18.3.5M - M6x20(2)	Broached Hexagon Socket Flat Countersunk Head Cap Screws - Metric

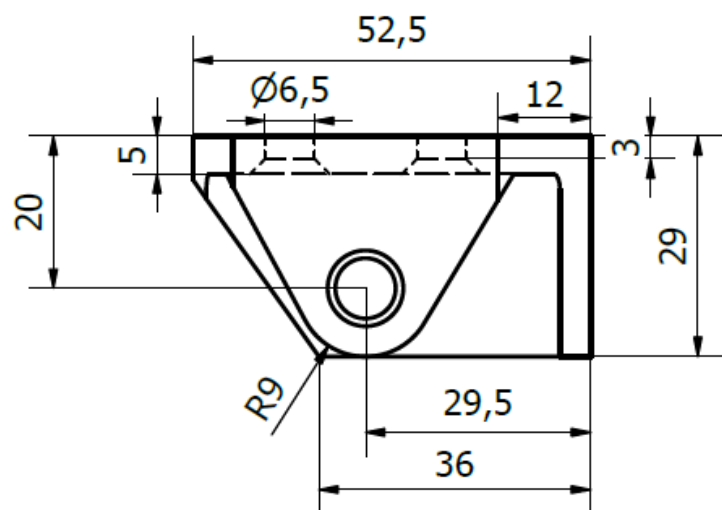
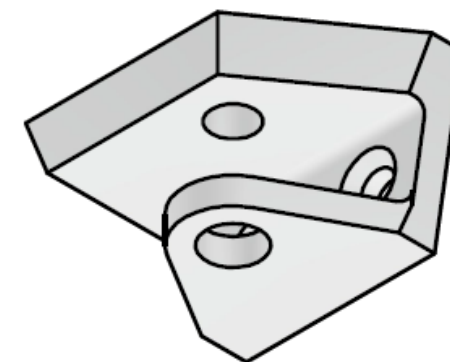
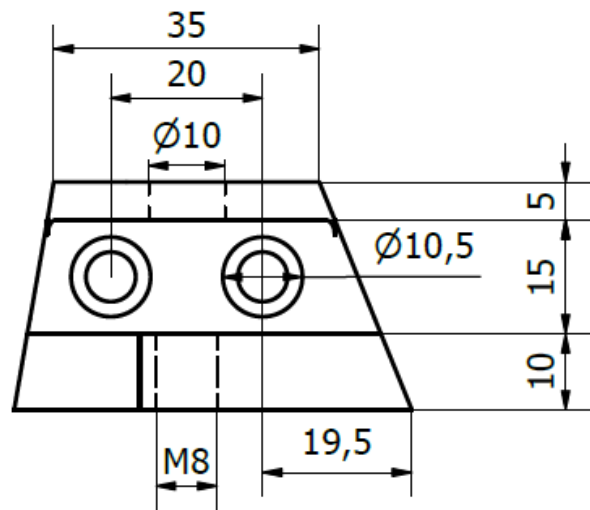
Designet av: Ruben Østli			Dato: 12.05.2023	Ark størrelse: A3
		Del: Spindel Splittegning		
		spindelSplitt		Revisjon Ark 1 / 1





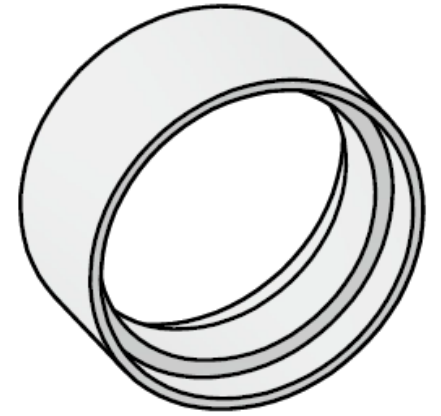
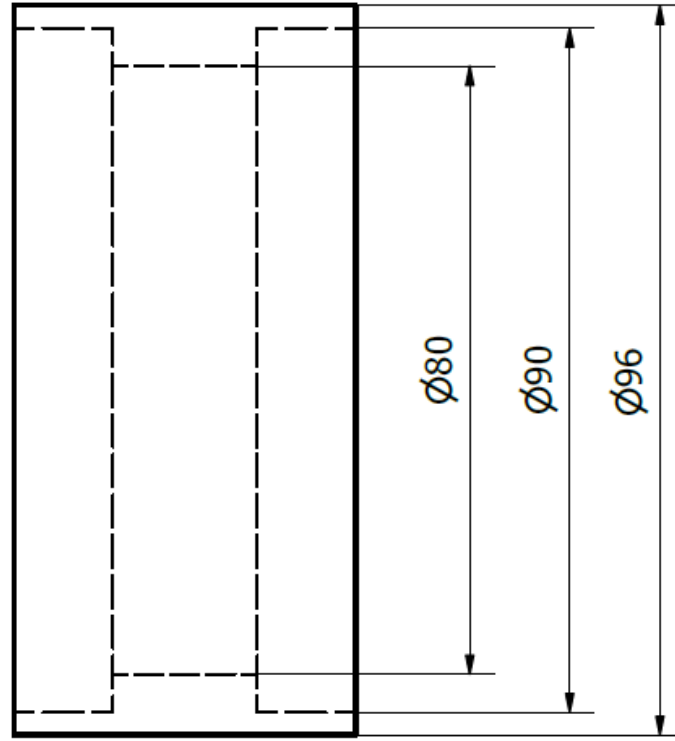
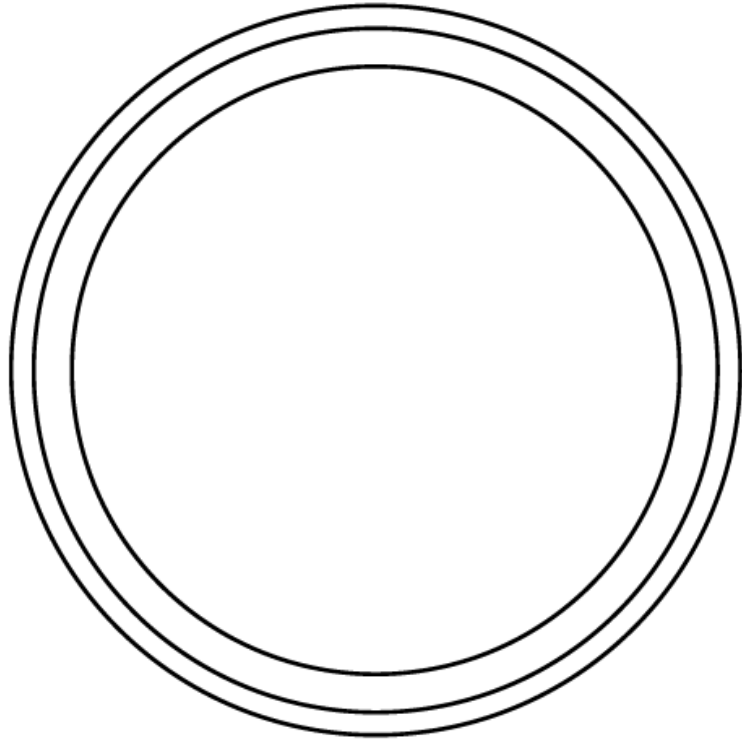
Designet av: Ruben Østli	Materiale: Karbonfiber	Scale: 1:2	Dato: 12.05.2023	Ark størrelse: A3
		Del: Spindel		
		Partnumber: 1	Revisjon 1	Ark 1 / 1





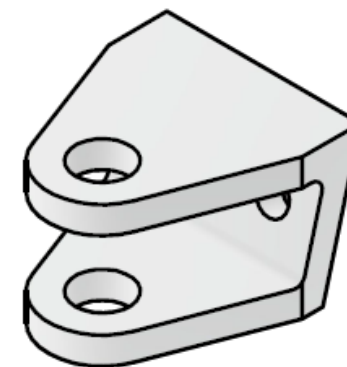
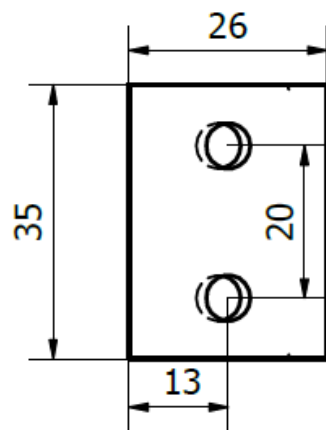
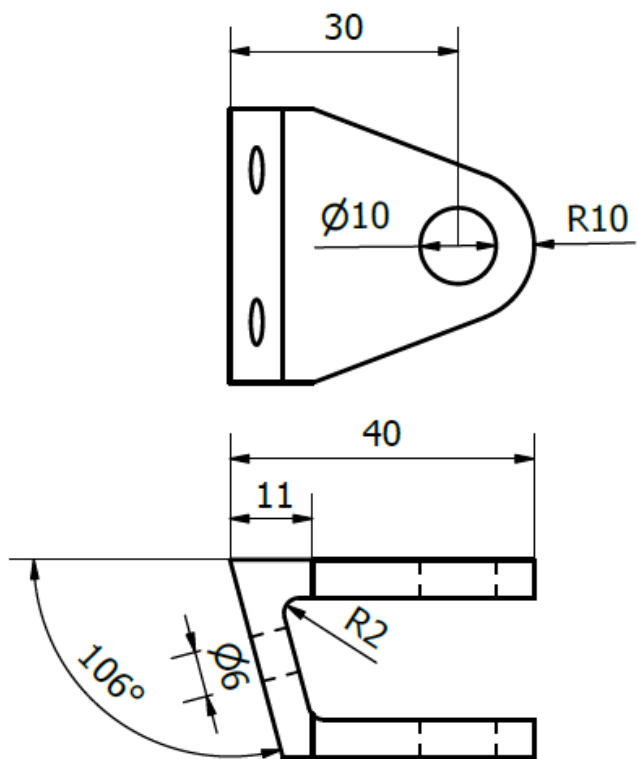
Designet av: Ruben Østli	Materiale: Aluminium		Dato: 14.05.2023	Ark størrelse: A4
		Del: Styrebrakett		
		Partnumber: 2	Revisjon	Ark 1 / 1





Designet av: Ruben Østli	Materiale: Aluminium		Dato: 14.05.2023	Ark størrelse: A4
		Del: Nedre brakett		
		Partnumber: 3	Revisjon 1	Ark 1 / 1



Designet av: Ruben Østli	Materiale: Aluminium		Dato: 14.05.2023	Ark størrelse: A4
		Del: Foring		
Partnumber: 4			Revisjon 1	Ark 1 / 1



Designet av: Ruben Østli	Materiale: Aluminium		Dato: 14.05.2023	Ark størrelse: A4
		Del: Øvre brakett		
		Partnumber: 5	Revisjon 1	Ark 1 / 1