



Kunnskap for en bedre verden

# Fordeler ved additiv produksjon av kontinuerlig fiberforsterkede polymerkompositter i forsvar- og luftfartssektoren

Karl Ole Baastad Strengen, Bendik Skullerud Christensen

Gradering: Åpen

Bachelor i ingeniørfag - Maskin

Innlevert: Mai 2022

Veileder: Sotirios Grammatikos

Oppgavens tittel:  Fordeler ved additiv produksjon av kontinuerlig fiber forsterkede polymere kompositter i forsvars- og luftfartssektoren	Dato: 20.05.22		
	Antall sider: 37		
	Masteroppgave:	Bacheloroppgave:	X
Navn:  Bendik Christensen  Karl Ole Baastad Strengen			
Veileder:  Sotirios Grammatikos			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/ veiledere:			

Sammendrag:  Oppgaven handler om bruk av sammenhengende fiber i additivproduksjon. Undersøkelsene skal se på hvilke styrker og svakheter additiv produksjon med kontinuerlig fiber har. Oppgaven ser spesifikt på en drone.
---

Stikkord:

Additiv produksjon
Kontinuerlige fiber
Karbonfiber
Luftfart

# Forord

Denne oppgaven representerer slutten på vårt bachelorstudie som nettstudenter ved NTNU Gjøvik. Det har vært fire krevende, men samtidig spennende og interessante år, som har vært lærerike, og gitt oss den grunnkunnskapen vi trenger videre i arbeidslivet, som ingeniører. Oppgaven har vært utfordrende, men lærerik. Oppgaven omhandler fordeler med additiv produksjon med kontinuerlige karbonfiber.

Årsaken til at vi valgte å skrive denne oppgaven er at vår veileder Sotirios Grammatikos følte at dette kunne være en fin oppgave for oss, siden Bendik arbeider som helikopterpilot i Forsvaret, og Karl Ole arbeider med kompositter innen ballistikk. Vi vil derfor takke Sotirios for muligheten til å få skrive om dette temaet. Vi vil også takke Susanne Thomesen for gjennomlesing av oppgaven, og grundig tilbakemelding rundt den.

Vi kom nok litt sent i gang med arbeidet med oppgaven, men vi føler vi har klart å produsere et tilfredsstillende sluttresultat likevel.

# Abstract

This thesis deals with a study on the benefits brought by additively manufactured polymer composites, focusing on 3-dimensionally (3D) printed continuous fibre composites. Three-dimensionally printed continuous fibre composites have received enormous focus of research and development lately, due to the various benefits this manufacturing technology offers, in the field of composites. The primary reason of employing polymer composites in engineering applications is; its lightweight. The reduction of weight is preferred in most engineering applications, due to advantages such as; less fuel consumption and less energy usage. The possibility to 3D-print an engineering component using either polymers or polymer composites is by itself an added value for the polymer industry. Added to that, the recent evolvement of 3D-printed continuous fibre composites, increases further the application range, allowing for 3D-printed composites used also for structural applications. As such, the usage of 3D-printed continuous fibre composites, allows for further lowering the weight of polymer composite structures, after appropriate re-designing for additive manufacturing (AM). Therefore, a typical bulk composite structure can in the future, possibly be replaced by a lattice (truss-like) composite structure, enabled by AM continuous fibre composites.

The thesis will study the benefits of using AM continuous fibre composites, in terms of weight, design freedom and performance, compared to two other materials, one aluminium grade, that is often applied in aviation sector, and one short carbon fibre PE filament for use in regular 3D printers. Also, this thesis will elaborate on the new possibilities AM continuous fibre composites can bring, that would not be possible with other polymer printing technologies such as with FFF, SLS and SLA. The focus of this thesis will be on military and aviation sectors, where the effect of lightweight is very large.

# Innholdsfortegnelse

Forord.....	iii
Abstract.....	iv
Innholdsfortegnelse.....	v
Figurliste.....	vii
Tabelliste.....	viii
Ordforklaring.....	ix
1 Innledning.....	1
1.1.1 3D-printing.....	1
1.1.2 Problemstilling.....	2
1.2 Teori.....	2
1.2.1 Fagverk.....	2
1.2.2 Karbonfiber.....	4
1.2.3 Additiv produksjon.....	4
1.2.4 Additiv produksjon med kontinuerlige fiber.....	5
1.2.5 Co-ekstrudering med towpreg.....	5
1.2.6 Design av komponenter ved 3D printing med kontinuerlig karbonfiber.....	6
1.2.7 Anisoprint.....	6
1.2.8 Digimat.....	8
1.2.9 Abaqus.....	8
2 Metode.....	9
2.1 Materialer.....	11
2.1.1 PETG + CCF 1.5K.....	11
2.1.2 PET CF15.....	12
2.1.3 2024-T3 aluminium.....	13
2.1.4 Sammenligning av materialene.....	14
2.2 Simuleringer.....	15
2.2.1 Motortest.....	16
2.2.2 Fall.....	17
2.2.3 Sidelast.....	19
3 Resultater.....	20
3.1 Motortest.....	20

3.1.1	PET CF.....	21
3.1.2	Aluminium 2024.....	22
3.1.3	PETG + CCF 1.5 K.....	23
3.2	Fall.....	24
3.2.1	PET CF15.....	24
3.2.2	Aluminium 2024.....	25
3.2.3	PETG + CCF 1.5K.....	26
3.3	Sidelast.....	27
3.3.1	PETG + CCF 1.5K.....	28
3.3.2	Aluminium 2024.....	29
3.3.3	PET CF.....	30
4	Diskusjon og analyse.....	31
4.1	Materialer.....	31
4.2	Tester.....	32
4.2.1	Fall.....	32
4.2.2	Motortest.....	33
4.2.3	Sidebelastning.....	33
5	Konklusjon.....	34
5.1	Muligheter.....	34
5.2	Utfordringer.....	35
	Referanser.....	36

# Figurliste

Figur 1 Viser stresskonsentrasjon rundt hull (Berge & Kyrreås, 2017).....	2
Figur 2 Datablad Karbonfiberarmert epoksy (Gay, Hoa, & Tsai, 2003) .....	3
Figur 3 Illustrasjon dysehoder, Anisoprint (Anisoprint, Anisoprint, b).....	7
Figur 4 En av armene med arbeidstegning.....	10
Figur 5 Dronekropp med beskrivelse av deler.....	10
Figur 6 Dronekropp under med beskrivelse av deler .....	11
Figur 7 Datablad fra anisoprint (Anisoprint, a) .....	12
Figur 8 Datablad PET CF15 (Innofil3D, u.d.).....	13
Figur 9 Fargekode .....	15
Figur 10 Modifikasjon av dronekroppen for å motvirke spenninger.....	16
Figur 11 Oppsett spenningstest.....	17
Figur 12 Oppsett falltest .....	18
Figur 13 Oppsett sidelast.....	19
Figur 14 Stress .....	21
Figur 15 Deformasjon .....	21
Figur 16 Stress .....	22
Figur 17 Deformasjon .....	22
Figur 18 Stress .....	23
Figur 19 Deformasjon .....	23
Figur 20 Stress .....	24
Figur 21 Deformasjon .....	25
Figur 22 Stress .....	25
Figur 23 Deformasjon .....	26
Figur 24 Stress .....	26
Figur 25 Deformasjon .....	27
Figur 26 Stress .....	28
Figur 27 Deformasjon .....	28
Figur 28 Stress .....	29
Figur 29 Deformasjon .....	29
Figur 30 Stress .....	30
Figur 31 Deformasjon .....	30

# Tabelliste

Tabell 1 Sentrale materialegenskaper. ....	14
Tabell 2 Resultater motortest.....	20
Tabell 3 Resultater falltest.....	24





# 1 Innledning

## 1.1.1 3D-printing

Additiv produksjon også kjent som 3D-printing har allerede vært en revolusjonerende produksjonsprosess. Det er en forholdsvis ny produksjonsmetode som fortsatt har stort forbedringspotensialet. En av disse forbedringene er muligheten til å produsere komponenter med sammenhengende fiber. Frem til nå har det i hovedsak vært benyttet ren plast eller plast tilsatt oppkuttete fiber. For å få utnyttet denne produksjonsmetoden må også produktet endres for å hente ut det fulle potensialet. Klarer man å tenke utenfor boksen kan resultatet bli unikt.

Denne oppgaven skal se på mulighetene rundt additiv produksjon ved bruk av sammenhengende fiber. Hvordan designet kan optimaliseres for å lage et lett og sterkt produkt. Både sammenlignet med materialer som i dag brukes i luftfarten og alternative additive produksjonsmetoder. Produksjon med 3D-printer har frem til nå basert seg på ren plast eller oppkuttete fiber blandet med plast. Dette gir materialet begrenset styrke og det begrenser muligheten til å lage anisotrope egenskaper og gitterstruktur.

Anisoprint har utviklet en 3D-printer med en overkommelig pris, som printer deler med gitterstruktur og kontinuerlig fiber. Kontinuerlig fiber kan også motvirke stresskonsentrasjoner rundt for eksempel hull ved å legge fiber tettere langs

stresskonsentrasjon.

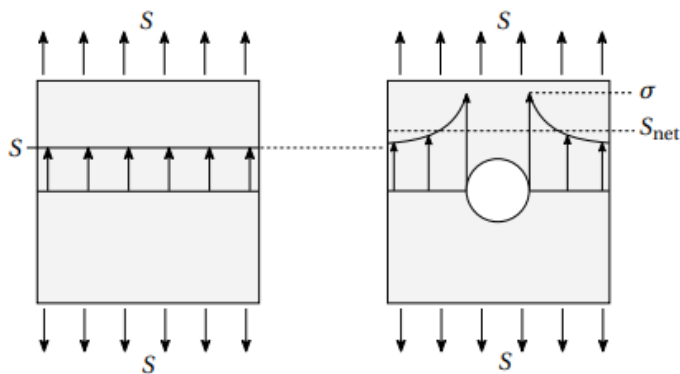


Figure 8.3: Stresses in an unnotched plate (left) and a plate with a hole (right).

Figur 1 Viser stresskonsentrasjon rundt hull (Berge & Kyrre ås, 2017)

## 1.1.2 Problemstilling

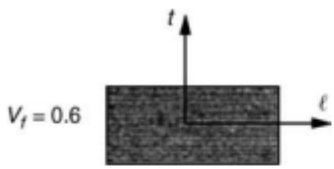
Denne oppgaven skal se på mulighetene ved additiv produksjon med bruk av kontinuerlig fiberforsterkning, med fokus på bruk innen luftfart. Oppgaven er en teoretisk undersøkelse. Kan additiv produksjon med kontinuerlig fiber ta over i luftfarten i fremtiden?

## 1.2 Teori

### 1.2.1 Fagverk

Fagverk består av staver som er koblet i sammen i punkter kalt noder, fagverket fordeler krefter med trykk og strekk parallelt på stavene. (Meyer, 2019). Fagverk brukes mye iblant annet store metallstrukturer som broer og kraner. Dette gir lette og sterke konstruksjoner, siden strukturen ikke er kompakt. Karbonfiberkompositter har stor styrke i strekk og trykk langs fiberretningen se figur 2, men er svake på tvers av fiberretning. 3D-printing av fagverk er gunstig siden strukturen kan produseres direkte uten etterarbeid.

**Table 3.4 Properties of Fiber/Epoxy Plies**



	<i>Glass</i>	<i>Kevlar</i>	<i>Carbon</i>
Specific mass (kg/m <sup>3</sup> )	2080	1350	1530
Longitudinal tensile fracture strength (MPa)	1250	1410	1270
Longitudinal compressive fracture strength (MPa)	600	280	1130
Transverse tensile fracture strength (MPa)	35	28	42
Transverse compressive fracture strength (MPa)	141	141	141
In plane shear strength (MPa)	63	45	63
Interlaminar shear strength (MPa)	80	60	90
Longitudinal elastic modulus $E_l$ (MPa)	45,000	85,000	134,000
Transverse elastic modulus $E_t$ (MPa)	12,000	5600	7000
Shear modulus $G_{lt}$ (MPa)	4500	2100	4200
Poisson ratio $\nu_{lt}$	0.3	0.34	0.25
Longitudinal coefficient of thermal expansion at 20°C $\alpha_l$ (°C <sup>-1</sup> )	$0.4 \text{ to } 0.7 \times 10^{-5}$	$-0.4 \times 10^{-5}$	$-0.12 \times 10^{-5}$
Transverse coefficient of thermal expansion at 20°C $\alpha_t$ (°C <sup>-1</sup> )	$1.6 \text{ to } 2 \times 10^{-5}$	$5.8 \times 10^{-5}$	$3.4 \times 10^{-5}$

Figur 2 Datablad Karbonfiberarmert epoksy (Gay, et al., 2003)

Derfor er fagverk gunstig ved bruk av kontinuerlig karbonfiber. Ved oppdelte karbonfiber som tidligere har vært løsningen i 3D-printing, får man ikke utnyttet styrkene til karbonfiber parallelt med fibre. Dette er som følge av at fibre ligger uordnet.

## **1.2.2 Karbonfiber**

Bruken av karbonfiber er i rask utvikling og har vært det i lang tid. Bruken er utbredt som forsterkningsfiber i kompositter. Egenskapene til karbonfiber gjør det egnet til bruk som forsterkningsfiber, det er lett, sterkt og stivt, som er viktig for et forsterkningsmateriale. Karbonfiber kan brukes som vevde kontinuerlige fiber, oppkuttet i matrise eller 3d printet. Prisen på karbonfiber er fortsatt høy i forhold til glassfiber, som har mange av de samme egenskapene.

Vanlige karbonfiber fremstilles av organiske fiber som blir varmebehandlet og deretter forkullet. Prosessen kan styres med forskjellige temperaturer for å få ønskede egenskaper. (Ore & Egil Helseth, 2021)

## **1.2.3 Additiv produksjon**

Additiv produksjon, eller 3D-printing, som er det mer allmenne navnet, er en produksjonsmetode som gjør det mulig å konstruere deler med kompleks geometri, med en lavere produksjonskostnad. Additiv produksjon har blitt allemannseie de siste årene en. En enkel 3D-printer koster lite, er lett å få tak i, lett å bruke og gir gode resultater.

Fordelen med additiv produksjon i forhold til andre produksjonsmåter er at det i liten grad trenger etterbehandling. Komplekse strukturer kan printes direkte uten «avfall», siden man ikke fjerner materiale som mange andre produksjonsmetoder baserer seg på. 3D-printing er en tidkrevende prosess, men som oftest fullautomatisert, og det krever ingen eller lite maskinering av delen i etterkant.

En annen fordel med additiv produksjon, er at det er lett å gjøre endringer på komponenters geometri, man må bare endre geometrien på CAD-modellen, og eventuelt gjøre nye analyser, men dette vil man også måtte gjøre med andre produksjonsmetoder. Om man for eksempel ser på injeksjonsstøping så vil man måtte produsere nye former om man endrer geometrien, dette slipper man med 3D-printing.

Utfordringer til additiv produksjon er å få god nok binding mellom lag og eventuelle forsterkninger så man unngår delaminering. Siden det første laget allerede er nedkjølt når

neste lag legges vil det ikke bli en homogen binding, men lag på lag. Dette kan man også se på 3D printede deler. (Mæhlum, 2021)

#### **1.2.4 Additiv produksjon med kontinuerlige fiber**

Additiv produksjon med kontinuerlige fiber er en relativt ny produksjonsmetode, der man har videreutviklet den tradisjonelle produksjonsmetoden for additiv produksjon med plast og kompositter. Tidligere har man brukt rent plast filament eller filament med oppkuttete fiber. Kontinuerlige fiber gjør at man kan oppnå større styrke i komponentene, som gjør det mulig å redusere vekt. Man kan dermed bytte ut flere komponenter som tidligere har blitt produsert av for eksempel metaller.

Additiv produksjon med kontinuerlige fiber er en samlebetegnelse på utallige forskjellige produksjonsmetoder, der de fleste produsenter har utviklet sin egen metode for å printe med kontinuerlige fiber. Siden NTNU har godt til innkjøp av en Anisoprint printer, vil oppgaven base seg på deres metode, som kalles «co-extrusion with towpreg». (Mason, Composites world)

#### **1.2.5 Co-ekstrudering med towpreg**

Co-ekstrudering med towpreg er en produksjonsmetode for additiv produksjon med kontinuerlige fiber som blant annet Anisoprint benytter seg av. Dette er en metode der man bruker en «towpreg», som er en type tynn karbonfibertråd, som er impregnert med matrise. Den pre-impregnerte karbonfibertråden blir matet inn i dysen, der den blir ekstrudert sammen med ytterligere matrise. Derav «Co-ekstrudering». Det vanlige er å benytte seg av samme matrise i den pre-impregnerte karbonfibertråden og i co-ekstruderingen, men Anisoprint er et unntak. De benytter en herdeplast som matrise i karbonfibertråden og en termoplast i co-ekstruderingen. (Mason, Composites world)

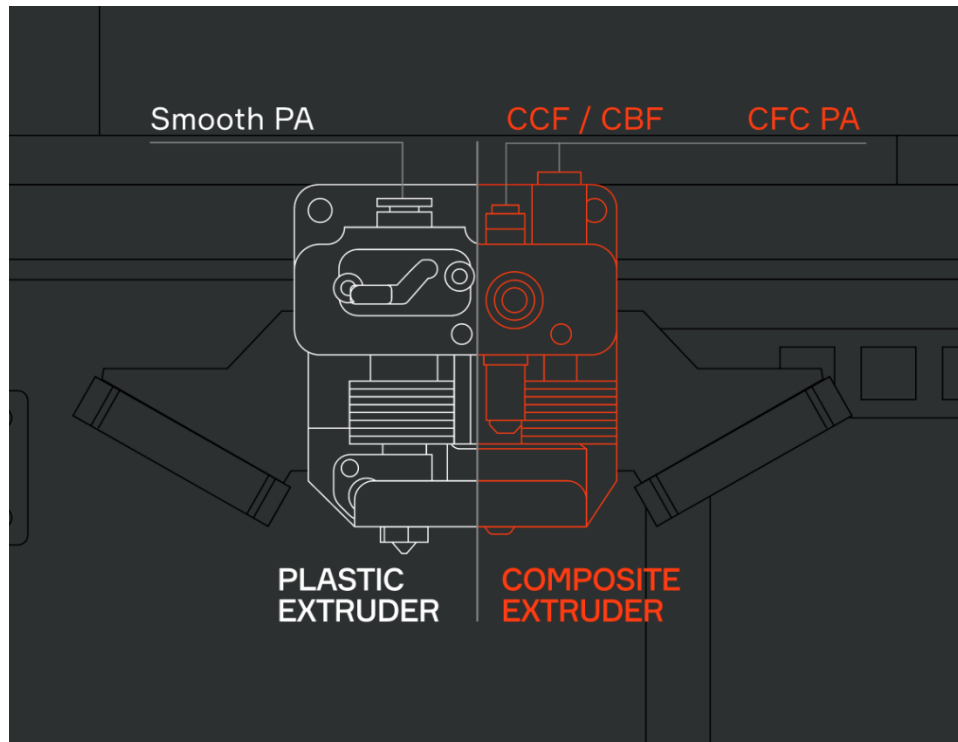
## **1.2.6 Design av komponenter ved 3D printing med kontinuerlig karbonfiber**

Ved 3D-printing av komponenter med kontinuerlig karbonfiber filament er det viktig å tenke på karbonfiberens egenskaper i design fasen av komponenten. Karbonfiber er anisotropisk, det vil si at fibre har forskjellige egenskaper i de forskjellige retningene. De har veldig høy strekk- og trykkfasthet i lengderetningen, men har lav transvers styrke (dvs. på 90 grader på lengderetningen) (Wikipedia, 2022). Man må derfor designe komponenter på en annen måte enn med en tradisjonell 3D-printing med termoplast filament.

Studien “Path-designed 3D-printing for topological optimized continuous carbon fibre reinforced composite structures” (Li & al, 2020). Viser at for å få best mulig utbytte av karbonfiberens høye strekk- og trykkfasthet i lengderetningen, bør man designe delen som et fagverk. Da kan man bruke metoden «Path-design 3D-printing». Ved å analysere hvordan kreftene vil virke på komponenten kan man dermed designe komponenten slik at fagverket tar opp mest mulig av disse kreftene. Man kan dermed oppnå en mye større vektreduksjon. I studien sammenlignet de en nedskalert bærearmling til en bil, der de printet en på den tradisjonelle måten med rent termoplastisk nylonfilament, og 100% «infill», og en med kontinuerlig karbonfiberfilament med nylon matrise, og fagverk struktur i delen. De klarte ved det å oppnå 16 ganger høyere vekt/styrke forhold på bærearmlingen laget med kontinuerlig karbonfiber filament, sammenlignet med bærearmlingen i rent nylon.

## **1.2.7 Anisoprint**

Anisoprint har laget en 3D-printer som skal være tilgjengelig for en mye lavere pris, enn tilsvarende løsninger. Dette gjør at skoler og bedrifter har tilstrekkelig økonomiske ressurser til å drive en svært avansert printer som kan akselerere utviklingen til denne produksjonsmetoden.



Figur 3 Illustrasjon dysehoder, Anisoprint (Anisoprint, b)

Anisoprint printere har, som du kan se på bildet ovenfor, to dysehoder, et alminnelig dysehode for termoplastisk filament, og et dysehode der towpregen blir ekstrudert sammen med ytterligere termoplastisk matrise. Dette innebærer at printerne har tre spoleholdere, en spole med karbonfibertråd filamentet (towpregen), en spole til termoplastisk filament til co-ekstrudering med towpregen, og en spole med termoplastisk filament som blant annet kan brukes om man ønsker en finere overflate enn det co-ekstruderingen gir. Anisoprint har da egne filament som er tiltenkt denne funksjonen, et av disse heter “Smooth PA”, og er et termoplastisk PA filament, som er iblandet 10% oppkuttet karbonfiber, og er designet for å gi en jevn og fin overflate. (Anisoprint, 2020d)



### **1.2.8            Digimat**

Digimat er et avansert material simuleringsverktøy, som skal gi brukeren mulighet til å teste materialet digitalt. Ved å gjennomføre prøving og feiling i dataprogrammet, sparer man både tid og penger som gjør produksjonen billigere og raskere. Digimat består av flere underprogrammer som brukes til forskjellige deler av produksjonen. Design av mikrostruktur i materialer og printesimuleringer er eksempler på hva de forskjellige underprogrammene kan bidra med.

Digimat har ferdige materialer som er bundet opp til leverandører. Man kan dermed bygge et produkt helt fra bunn og opp og gjennomføre tester digitalt. (e-Xstream, u.d.)

### **1.2.9            Abaqus**

Abaqus FEA er et dataprogram utgitt av Dassault Systemes der man kan modellere og analysere komponenter og ferdige produkter satt sammen av flere komponenter. Programmet ble først utgitt i 1978, og er i dag mye brukt av luftfartsindustrien, bilindustrien og også forskningsinstitusjoner. I Abaqus kan man legge inn sine egne materialdata, slik at man kan analysere komponenter i nye materialer. Analysen man utfører er en FEM-analyse (Finite Element Method), på norsk populært kalt endelige elementmetoder. Denne analysetypen blir brukt for å simulere og undersøke mekaniske og termiske virkninger på komponenter når de blir utsatt for en mekanisk eller termisk belastning. (Wikipedia, 2022)

## 2 Metode

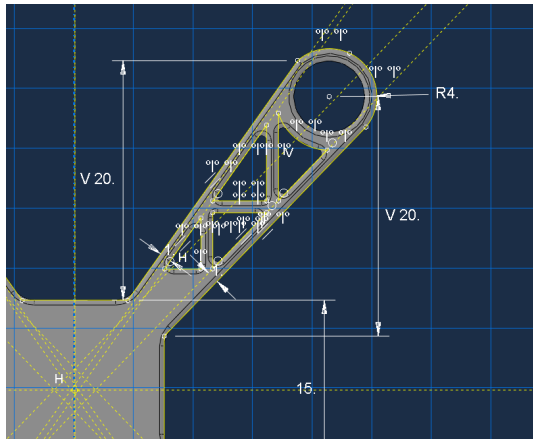
For å undersøke styrkene til kontinuerlige fiber skal det gjennomføres en sammenligning av forskjellige materialer. For å gjennomføre sammenligningene brukes en dronemodell tegnet i Abaqus. Denne komponenten er valgt siden det synligjør hva som er viktig i luftfarten generelt. En drone har på mange felt sammenfallende arbeidskrav som et fly, bare mindre komplisert. Derfor er dronen valgt for å se på fordelene til de forskjellige materialene. En drone kan også printes i fullskala i en Anisoprint printer.

Det er ikke lagt til vekt av andre komponenter som må monteres på dronekroppen i ettertid. Batteri, motorer og ledninger må monteres for at dronen skal fungere. Denne metoden ble valgt siden egenvekten til hvert materiale er forskjellig som igjen vil kreve forskjellige komponenter for at modellen skal fungere. Forskjellig tillegg av vekt i hver modell vil ikke gi et godt sammenligningsgrunnlag.

Dronekroppen er laget enklest mulig for å enkelt gjøre nødvendige endringer, men det er lagt inn en fagverkstruktur i armene for å minimere vekten. Modellene er identiske selv om dette ikke nødvendigvis er optimalt for hvert material. Metoden ble valgt for å få resultater som kan sammenlignes direkte. Alle hjørner som bærer har sirkulær avfasing for å unngå spenningskonsentrasjon.

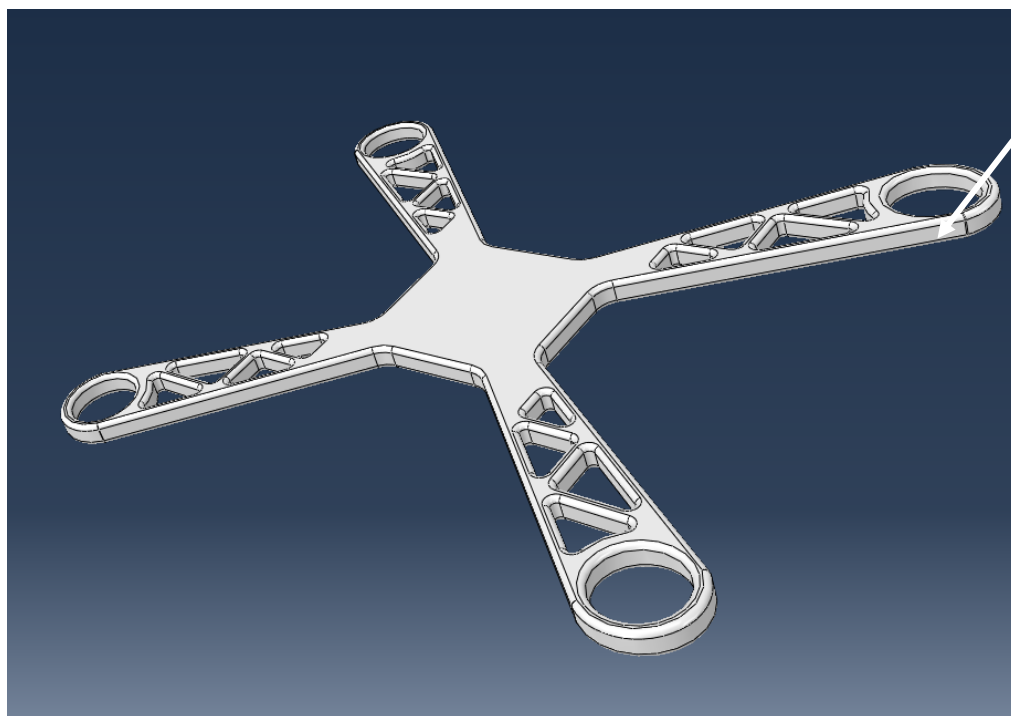
Modellen er symmetrisk på den måten at hver arm av modellen er lik. Se figur 3 for verdier i tegningen. Tykkelsen til modellen er 2.

Måleenhetene som er valgt er MPa, mm, N og kilo

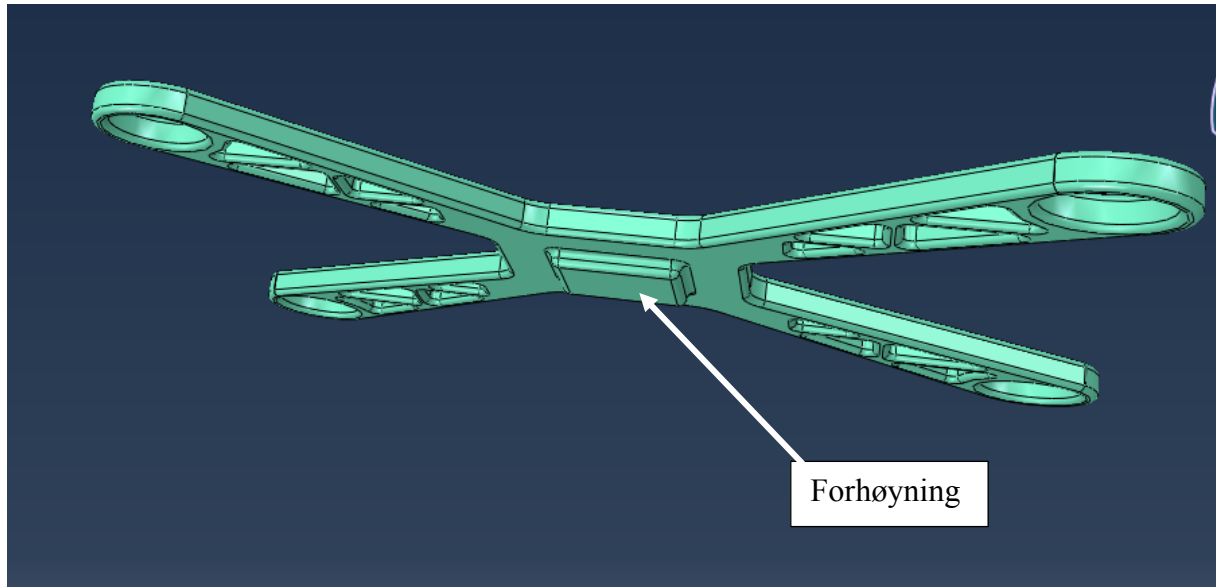


Figur 4 En av armene med arbeidstegning

Utgangspunktet for mesh er basert på standard mesh fra Abaqus. Det utføres et mesh-studie før analysene kjøres, og mesh justeres der det er nødvendig for å få gode resultater.



Figur 5 Dronekropp med beskrivelse av deler.



Figur 6 Dronekropp under med beskrivelse av deler

## 2.1 Materialer

Materialene som sammenlignes med sammenhengende karbonfiber, er en aluminiumslegering som i dag brukes i luftfarten og et karbonfiberarmert plastmateriale. Denne sammensetning er valgt siden det er to materialer som har egenskaper som ligner og bruksområder som er sammenfallende. Aluminium brukes i luftfarten og PET CF brukes i 3D-printing. På denne måten kan materialet sammenlignes med to materialer med lignende bruksområder.

### 2.1.1 PETG + CCF 1.5K

Materialet som brukes i Anisoprint printeren, består av PETG og kontinuerlig karbonfiber behandlet med et materiale som gjør bindingen mellom matrise og fiber bedre. Materialet kalles PETG+CCF 1.5K. Det består av 70% polyetylentereftalat (PET) og 30 % karbonfiber. Materialet blir kombinert i printeprosessen kalt Co-ekstrudering med towpreg. Derfor er det nødvendig med spesielle 3D printere.

Materialet er stivt og sterkt i spenn og veldig lett. Sammenlignet med aluminium 2024 er det ca. like stivt, men strekkfastheten i fibrenes lengderetning er ca. 2 ganger høyere og vekten er

halvert. Materialet er anisotropt og må derfor brukes på riktig måte for å få disse resultatene. Egenskapene på tvers av fibre er ikke gitt av anisoprint.

**PLASTIC REINFORCED WITH ANISOPRINT REINFORCING MATERIALS**

Parameter	PETG + CCF-1.5K
Density, g/cm <sup>3</sup>	1.4
Tensile modulus in fiber direction, GPa	64
Poisson ratio <sup>21</sup>	0.36
Tensile ultimate stress in fiber direction, MPa	860
Tensile elongation in fiber direction, %	1.3
Compressive modulus in fiber direction, GPa	—
Compressive ultimate stress in fiber direction, MPa	290
Compressive elongation in fiber direction, %	—
Flexural Strength, MPa	520

Figur 7 Datablad fra anisoprint (Anisoprint, a)

### 2.1.2 PET CF15

Materialet brukes til additiv produksjon og er på mange måter likt som PETG-CCF30. Det består av PET og karbonfiberforsterkning. I stedet for sammenhengende fiber består det av oppkuttete fiber. Det er 15% karbonfiber og 85% er plast. I motsetning til PETG + CCF 1.5K er karbonfibrene kombinert med PET i filament det kan derfor brukes i vanlige 3D-printere.

MATERIAL PROPERTIES		Test Method
Melt temperature	250 °C	ASTM D3418
Glass transition temperature	74 °C	ASTM D3418
Melt Flow Rate <sup>1</sup>	13.2 g/10 min	ISO 1133
Melt Volume Rate <sup>1</sup>	10.7 cm <sup>3</sup> /10 min	ISO 1133
Density	1.23 g/cm <sup>3</sup>	ASTM D1505
Odor	Odorless	/
Water solubility	Insoluble	/

MECHANICAL PROPERTIES*		Test Method
Tensile Strength	80 MPa	ISO 527
Elongation	2.5%	ISO 527
E modulus	9 GPa	ISO 527
Charpy Impact Strength	40 kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179
Flexural Strength	130 MPa	ISO 178
Flexural Elongation	3.5%	ISO 178
Flexural Modulus	8 GPa	ISO 178

Figur 8 Datablad PET CF15 (Innofil3D, u.d.)

### 2.1.3 2024-T3 aluminium

Aluminium 2024 brukes i luftfarten på grunn av høy styrke og lav vekt, og god tretthetsmotstand. Det er et naturlig produkt å sammenligne med.

Youngs modul: 73100 MPa

Strekkfasthet: 483 MPa

Poisson: 0.33

Tetthet: 2.78g/cm<sup>3</sup>

(ASM, u.d.)

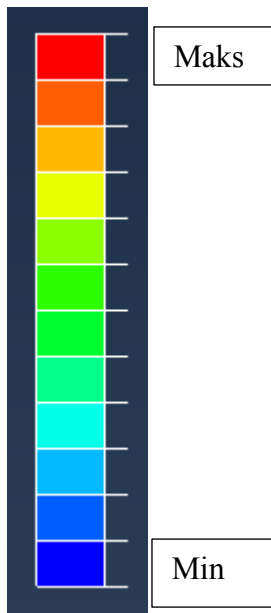
## 2.1.4 Sammenligning av materialene

Tabell 1 Sentrale materialegenskaper.

Materiale	PETG+CCF1.5K	PET CF	Aluminium 2024 T3
Tetthet	1.4 g/cm <sup>3</sup>	1.23g/cm <sup>3</sup>	2.78g/cm <sup>3</sup>
Elastisitetsmodul	64000	9000 MPa	73100 Mpa
Strekkfasthet	860MPa	80 Mpa	483 MPa

## 2.2 Simuleringer

Simuleringen gjennomføres i Abaqus. Resultatene er uten benevning. Dette er ikke nødvendig for å sammenligne materialene. Resultatene viser maksimal spenning, deformasjon og hvordan spenningen fordeles ved bruk av fargekoder.



Figur 9 Fargekode

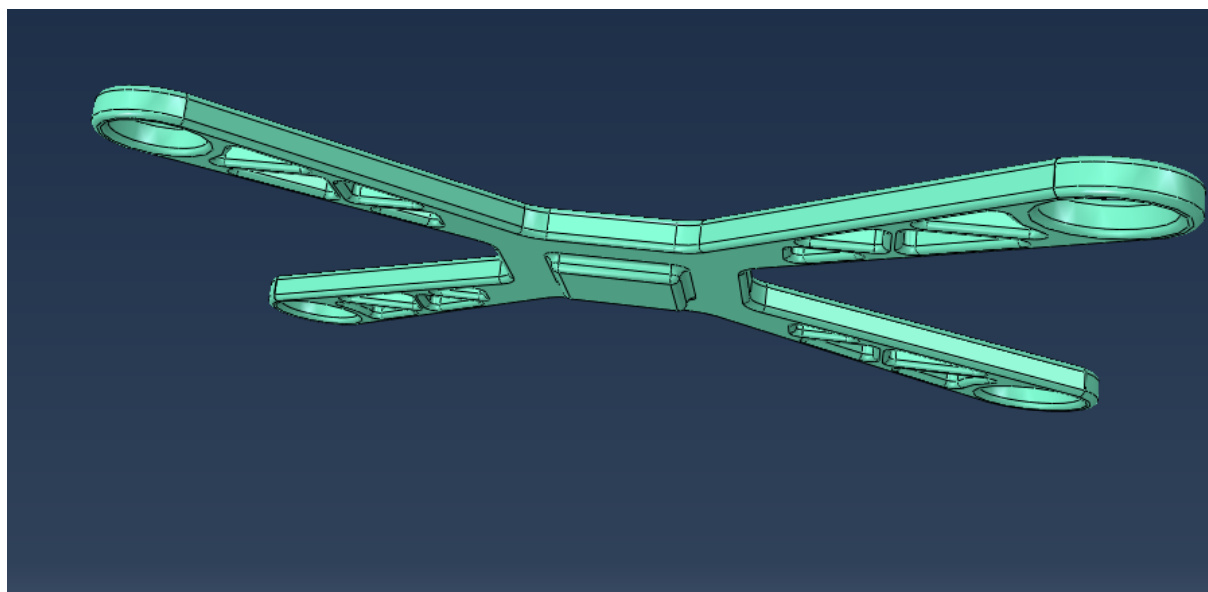
De tre simuleringene er valgt for å få en bred forståelse for de generelle styrkene og svakhetene til materialene. Testsekvensene består av en dynamisk test og to statiske tester i forskjellige plan. Kombinasjonen skal gi et godt datagrunnlag for videre analyse.



## 2.2.1 Motortest

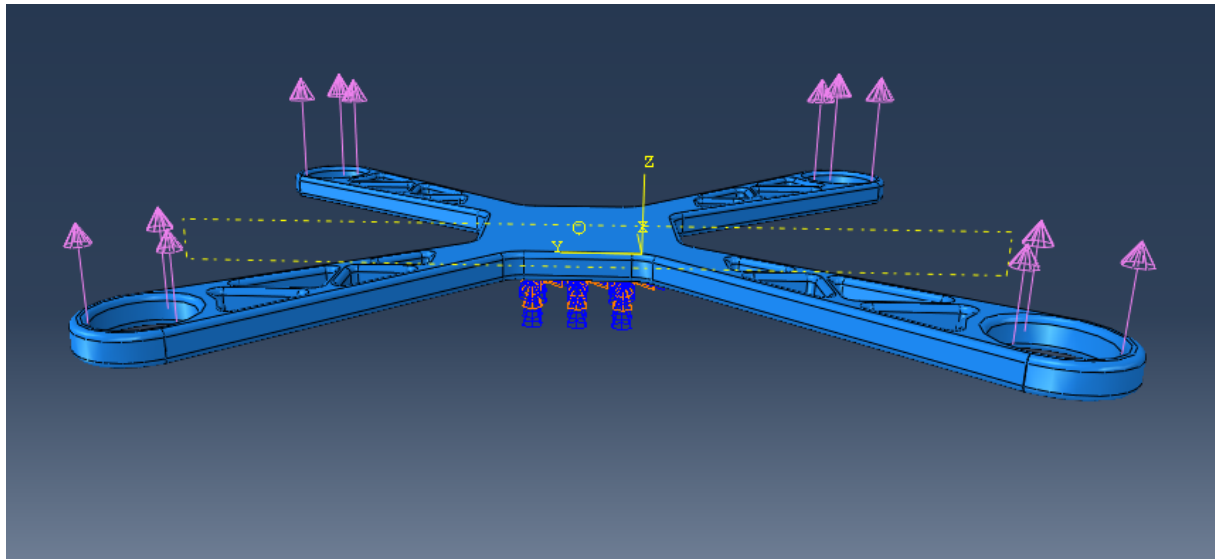
Dronen flyr som følge av fire motorer som er montert i hver av sylinderhullene på enden av hver 'arm'. Kraftene som virker på armene som følge av motorene, blir simulert med en kraft på 10 i hvert hjørne samtidig. Kraften har ingen benevning siden Abaqus ikke opererer med benevningen. Dette har ingen betydning for sammenligningen, siden belastningen er lik for alle materialene. Valg av verdi ble bestemt som følge av prøving og feiling for å gi gode resultater. Dronekroppen er låst nederst. Derfor blir ikke akselerasjon eller luftmotstand vurdert i den påførte kraften. Testen ble valgt siden dette er en av arbeidskravene som modellen må tåle for å fungere som en drone.

For å unngå spenningskonsentrasjon der delen blir «holdt fast». Bygges det opp en forhøyning under delen. Denne modifikasjonen ble laget for å unngå spenningskonsentrasjoner i overgangen der dronekroppen holdes fast.



*Figur 10 Modifikasjon av dronekroppen for å motvirke spenninger.*

Simuleringen ble gjennomført ved en kraft som virker rett opp av hullene på enden av hver arm se figur 10. Materialene som blir testet blir utsatt for identiske krefter med like forutsetninger.



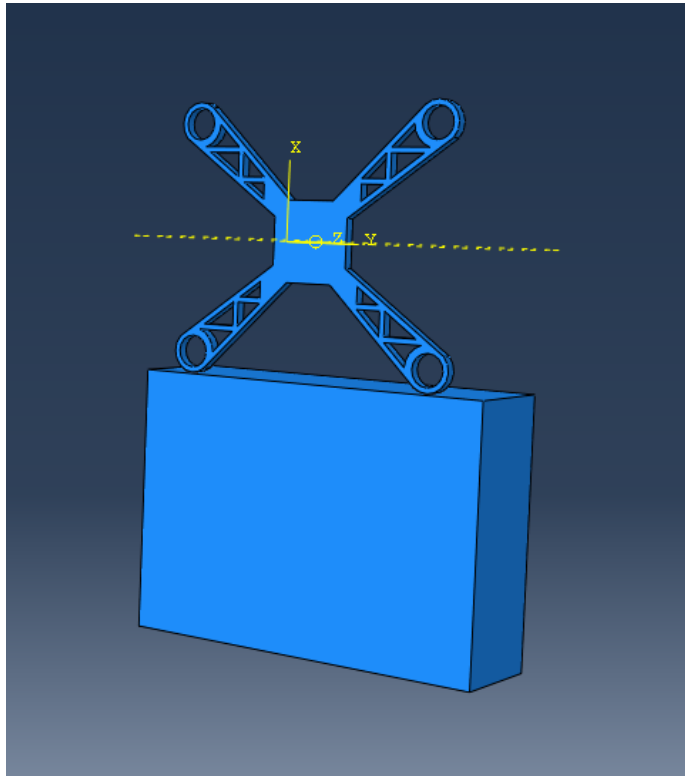
Figur 11 Oppsett spenningstest

## 2.2.2 Fall

En drone vil før eller siden krasje eller falle ned som følge av uforutsette hindringer eller pilotfeil. For at kostnadene ved en krasj ikke skal være for store må dronekroppen tåle kraftige slag, uten å bli ødelagt. Hastigheten og treffpunkt i en krasj kan i stor grad variere, denne simuleringen skal ikke vurdere alle mulige hastigheter og vinkler. Det blir gjennomført en simulering for å gi et sammenligningsgrunnlag, mellom de forskjellige materialene. Energien som overføres til dronen ved et fall henger også sammen med egenvekt. Vekten av dronen beregnes uten å ta hensyn til batteri, motor og andre deler. Dette gjør at resultatet blir mindre nøyaktig ved store vektforskjeller. Simuleringen er spesielt viktig siden resultatet har en direkte sammenheng med vekt.

Modelleringen simulerer kontakt med en stålfirkant som ikke deformeres. Hastighetene i Abaqus har ingen benevnning, men dette er ikke viktig siden alle materialene vil påføres samme hastighet. I simuleringene er hastigheten 200. Hastigheten er lik på de tre modellene, men vekten er basert på tettheten til materialene. Den kinetiske energien er derfor forskjellig i de tre forsøkene. Vinkelen der dronen treffer stålkassen er rett på «armene» så to armer treffer blokken samtidig.

Det ble på forhånd utført et mesh-studie, og modellen ble ytterligere forenklet, for å oppnå et tilfredsstillende mesh.

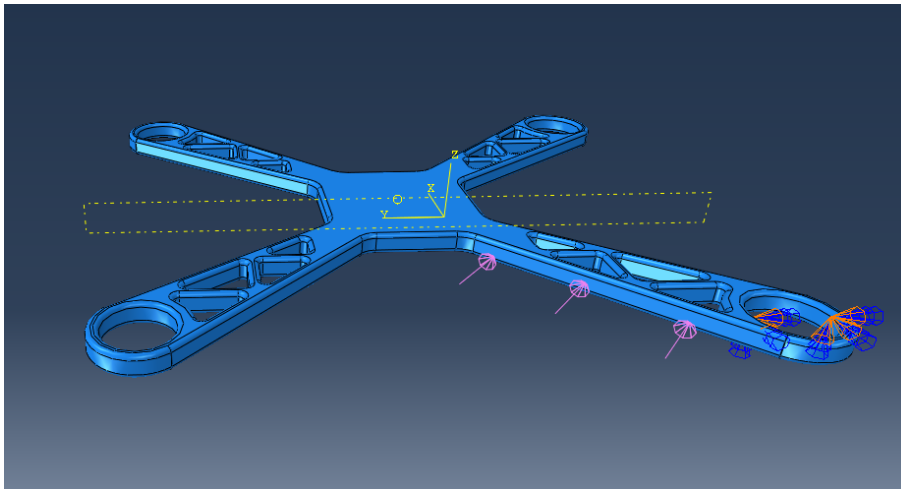


*Figur 12 Oppsett falltest*

### 2.2.3 Sidelast

For å teste motstandsdyktighet mot trykk i andre retninger blir det testet trykk på tvers av armen. Denne testen sier noe om motstandsdyktigheten mot trykk, men kan også supplere falltesten med informasjon om hvor stiv og sterk materialene er i andre retninger.

Simuleringen gjennomføres ved å holde fast innsiden av den ene ringen i hjørnet se figur 8. Samtidig som det blir påført et trykk langs den samme armen, verdi på 50.



Figur 13 Oppsett sidelast

# 3 Resultater

Alle resultatene er hentet fra tre undersøkelser som er beskrevet i metodekapittelet. Stressresultatet er  $S$  mises stress. Største stress er markert på modellen. Deformasjon i modellene er største nodebevegelse, største deformasjon er markert i hver modell.

## 3.1 Motortest

For å simulere kreftene som blir påført av motorene som sitter i hvert hjørne ble det lagt på et trykk i hvert hjørne som virker ‘opp’. Denne kraften fører til at armene trekkes oppover.

Simuleringen av fire motorer i hvert hjørne ga gode resultater i hver test. Størst spenning er ca. midt på armen. For å optimalisere konstruksjonen er det mulig å øke tykkelsen i overgang eller legge til større sirkulære avfasinger. Dette er ikke viktig for å vurdere resultatet, men kan justeres ved fremtidig produksjon.

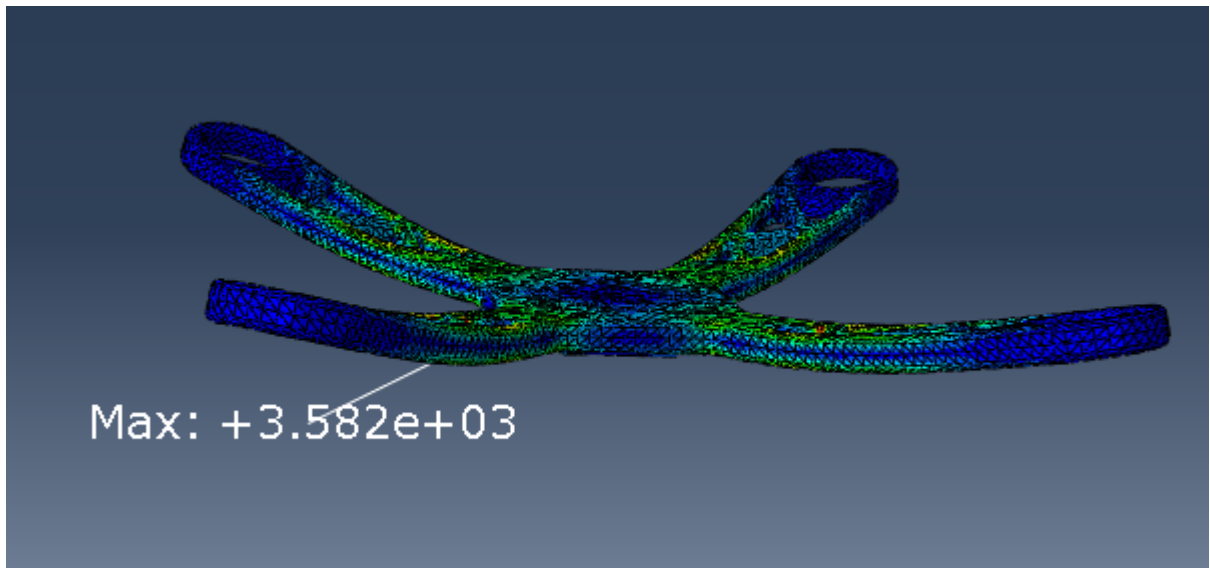
Resultatene baserer seg på samme kraft i hvert hjørne. Resultatene har ikke benevninger, men kan sammenlignes direkte. Bildene som følger, viser stress og deformasjon.

Tabell 2 Resultater motortest

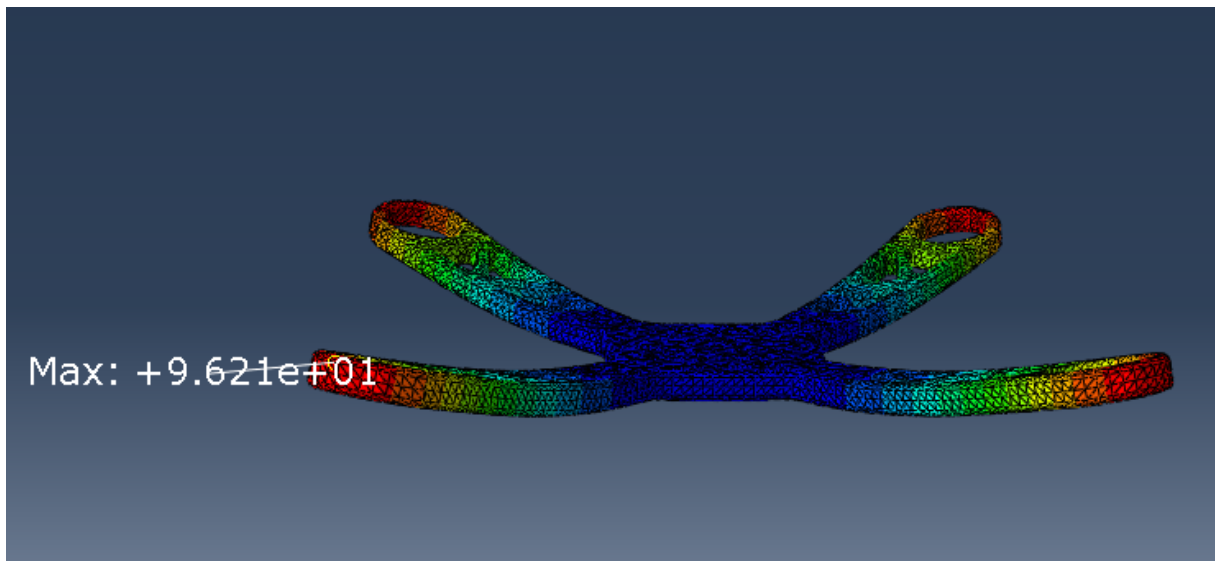
Motortest			
Materiale	Aluminium 2024	PET CF	PETG CCF 1.5
Spenning	3.574e+03	3.582e+03	3.582e+03
Deformasjon	1.186e+03	9.621e+01	1.353e+01

### 3.1.1

### PET CF



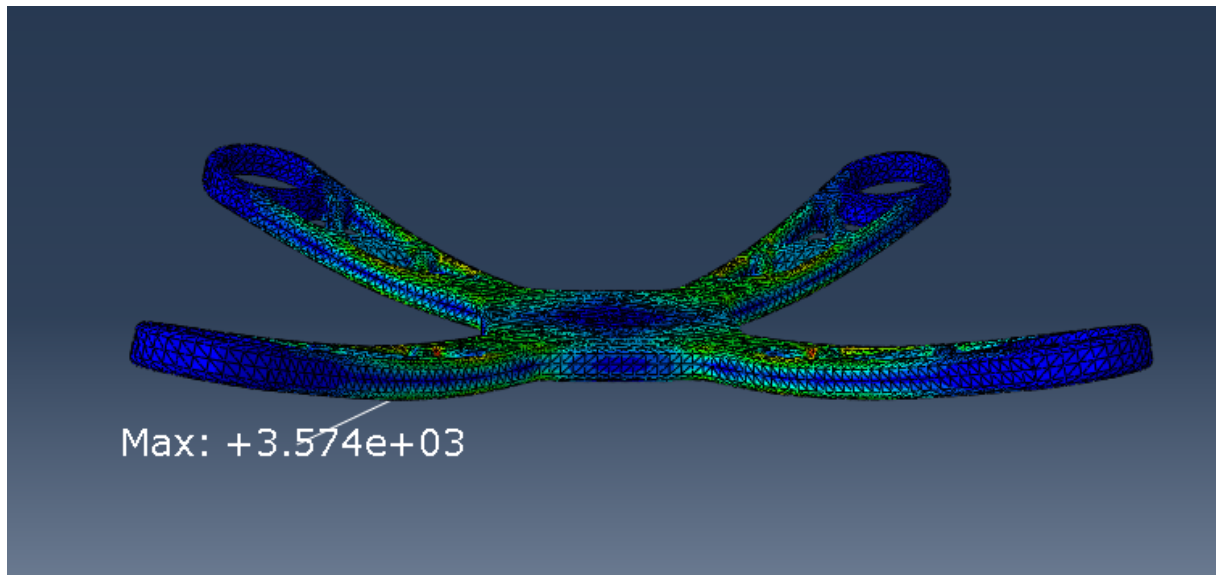
Figur 14 Stress



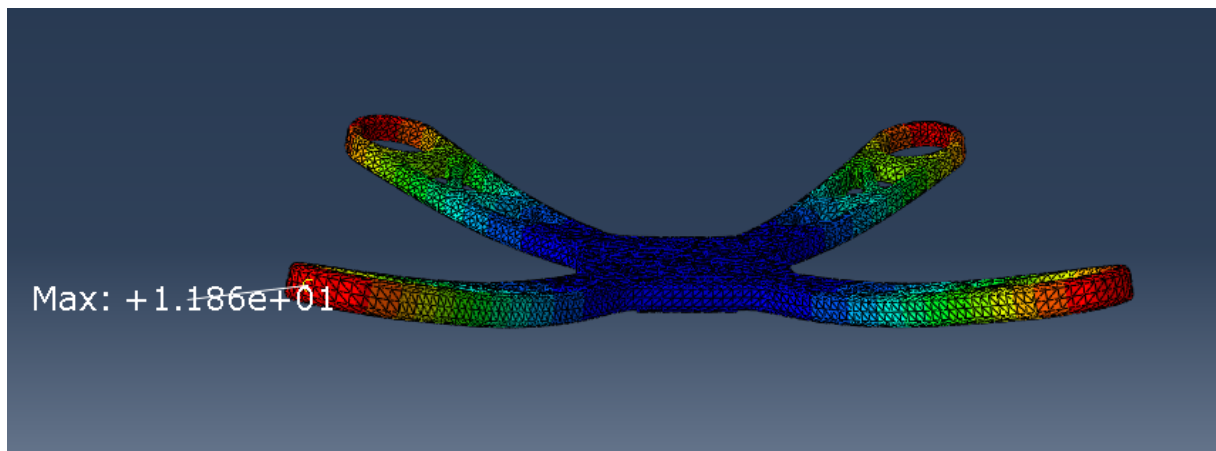
Figur 15 Deformasjon

### 3.1.2

### Aluminium 2024



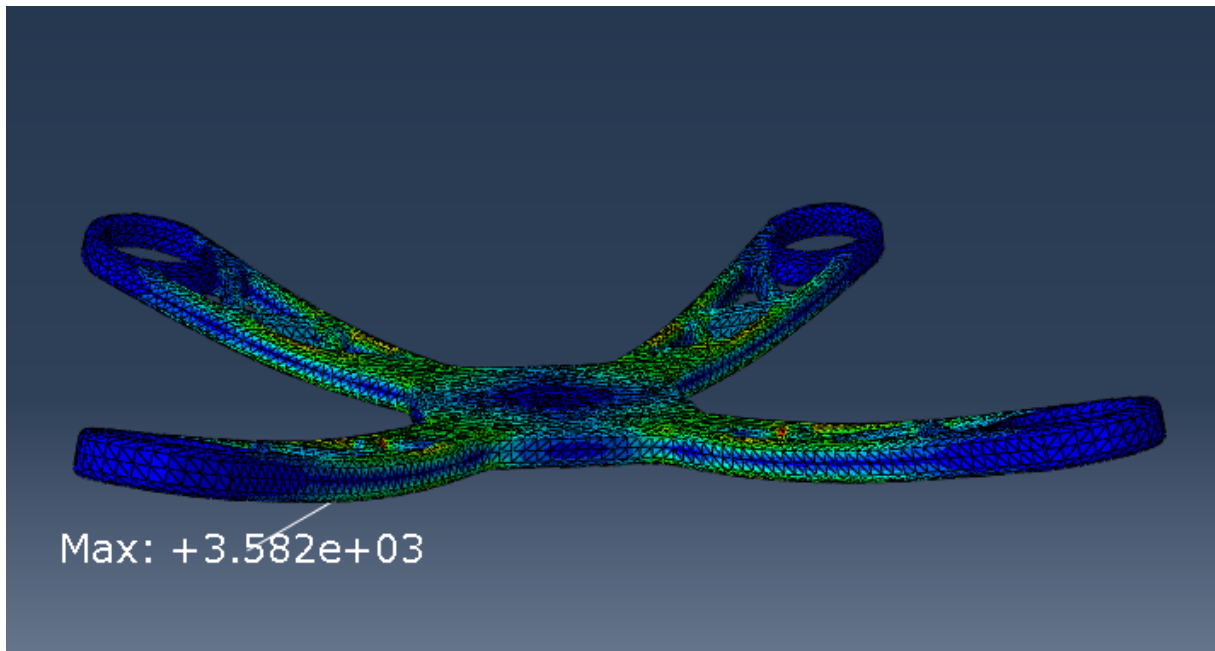
Figur 16 Stress



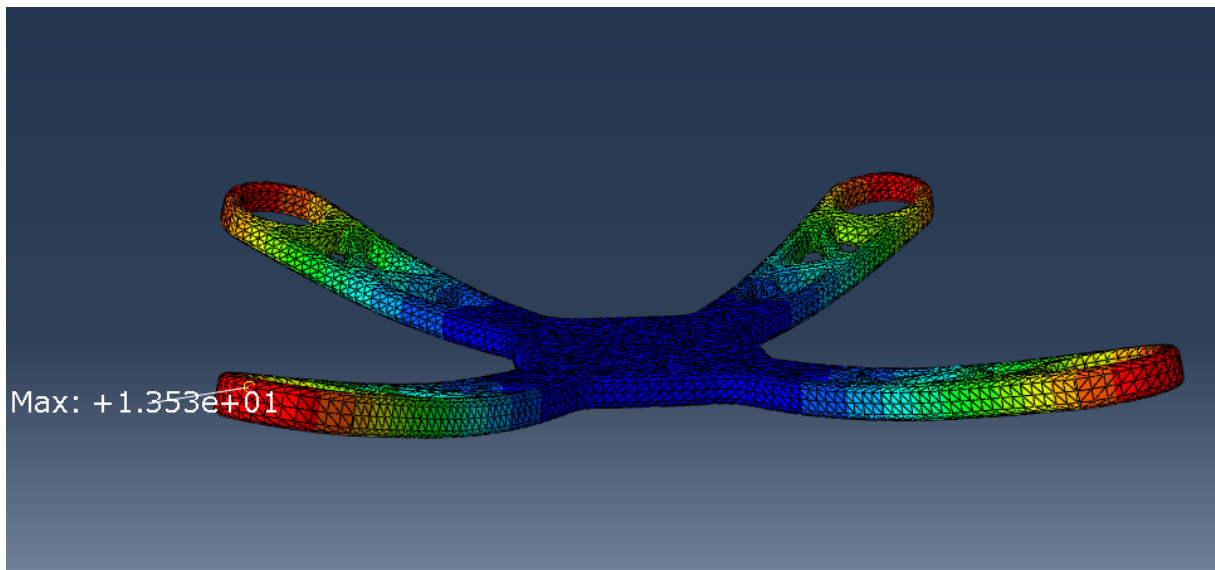
Figur 17 Deformasjon

### 3.1.3

### PETG + CCF 1.5 K



Figur 18 Stress



Figur 19 Deformasjon



## 3.2 Fall

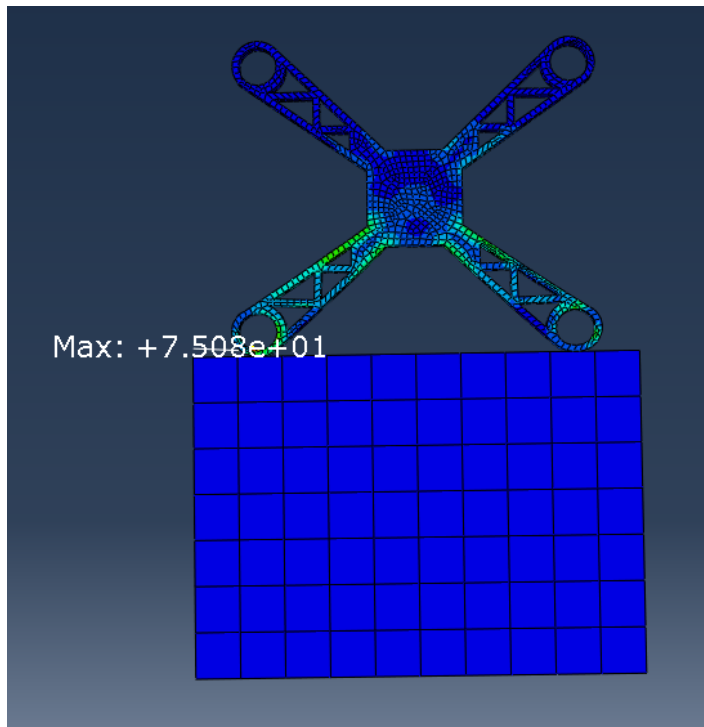
For å vurdere de forskjellige materialenes motstandsdyktighet mot slag og dynamisk belastning ble det gjennomført en test for å simulere et fall eller et krasj.

Resultatene som er valgt er høyeste stress og største deformasjon i fallsekvensen.

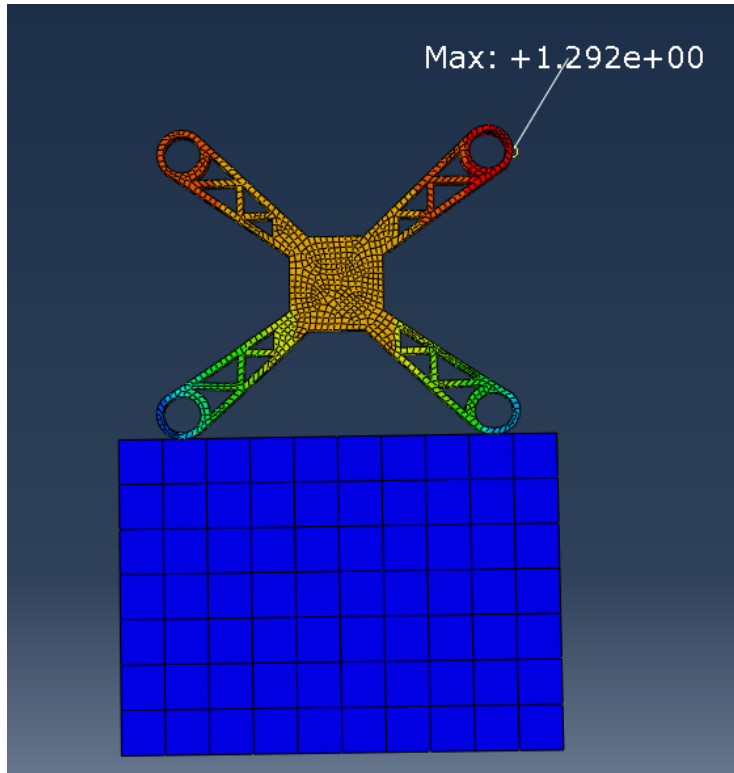
Tabell 3 Resultater falltest

Falltest			
Materiale	PETG+CCF 1.5K	Aluminium 2024	PET CF15
Spenning	3.448e+02	5.038e+02	7.508e+01
Deformasjon	6.529e-01	7.880e-01	1.292

### 3.2.1 PET CF15

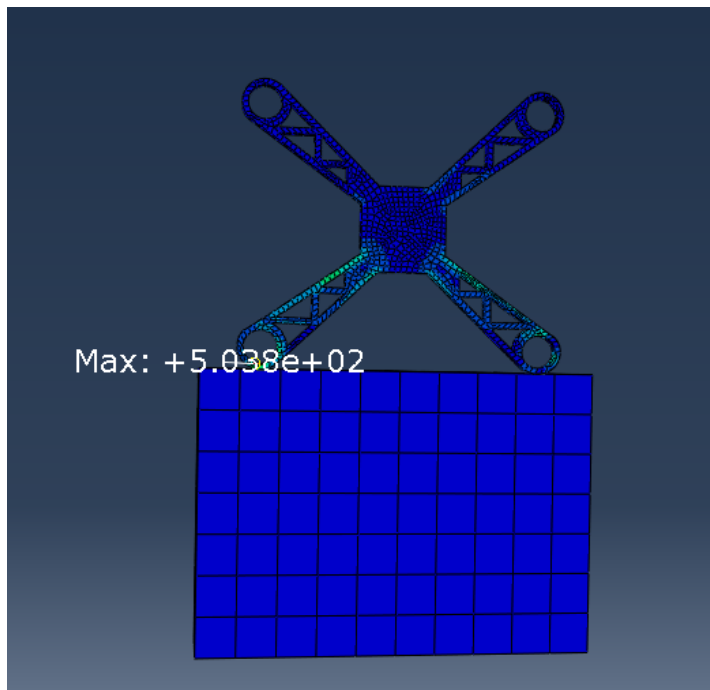


Figur 20 Stress

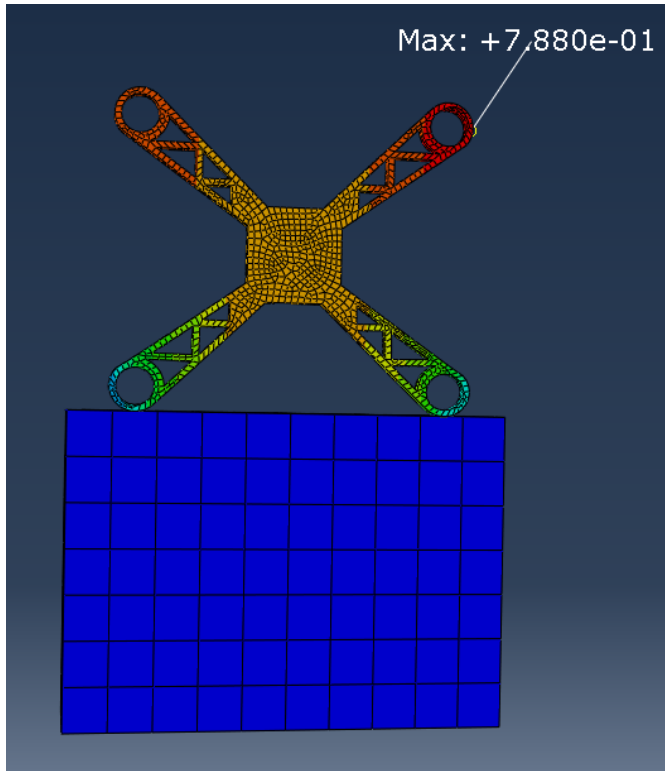


Figur 21 Deformasjon

### 3.2.2 Aluminium 2024

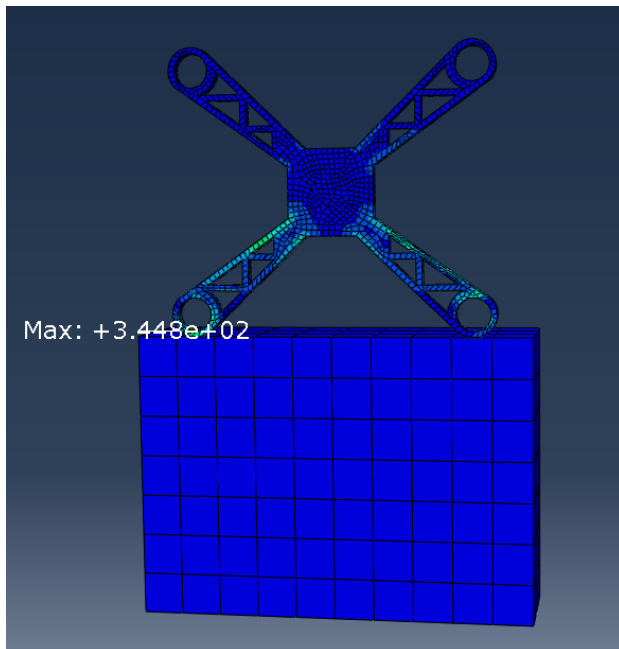


Figur 22 Stress

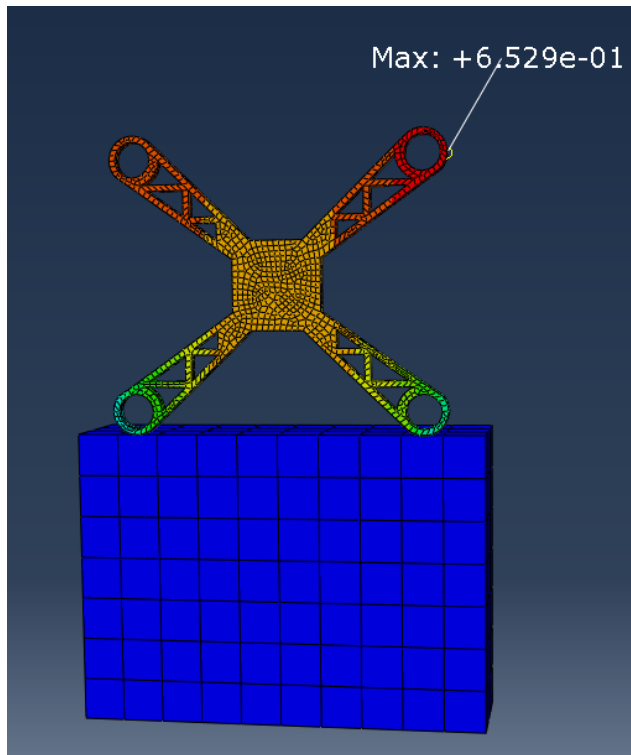


Figur 23 Deformasjon

### 3.2.3 PETG + CCF 1.5K



Figur 24 Stress



Figur 25 Deformasjon

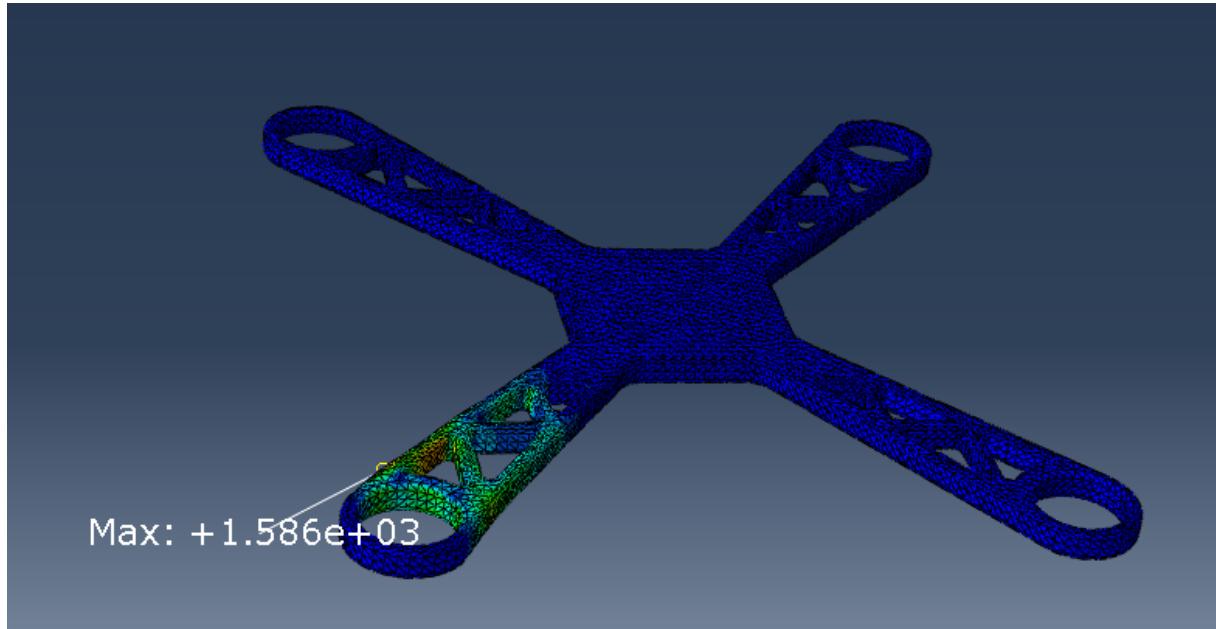
### 3.3 Sidelast

Falltest			
Materiale	PETG+CCF 1.5K	Aluminium 2024	PET CF15
Spenning	1.586e+03	1.589e+03	1.586e+03
Deformasjon	2.273	1.986	1.616e+01

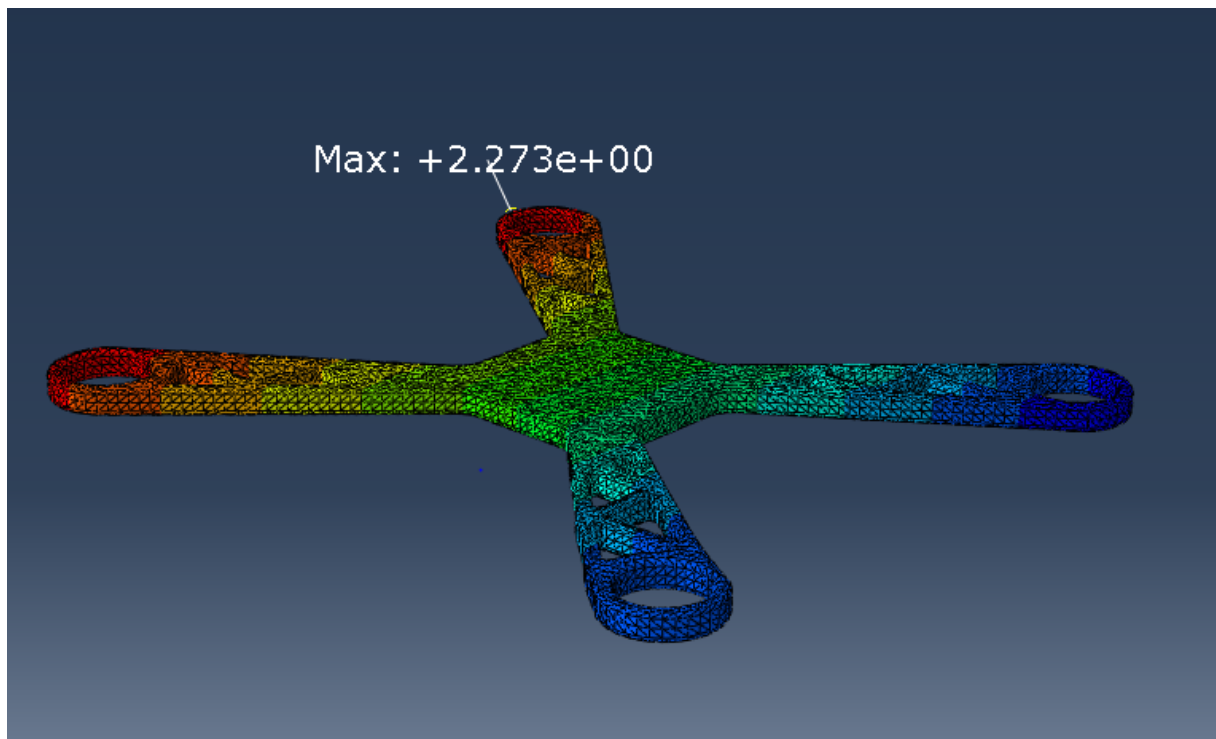
Resultatene fra simuleringene er lagt med for hvert materiale.

### 3.3.1

### PETG + CCF 1.5K



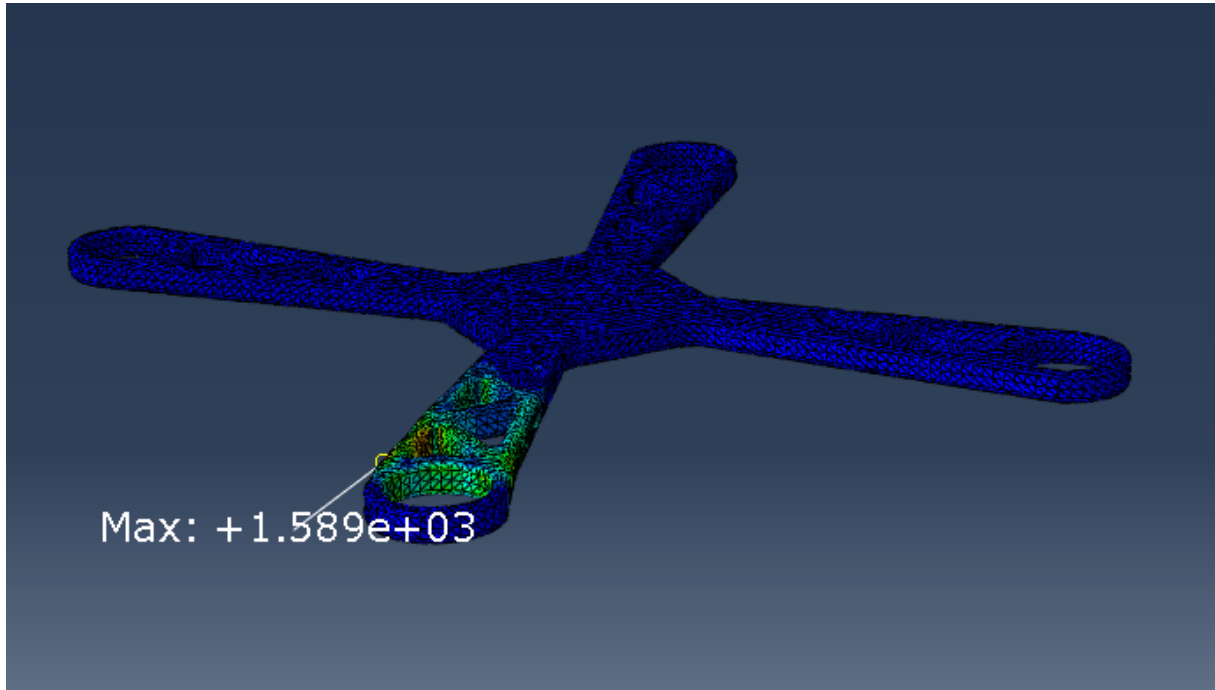
Figur 26 Stress



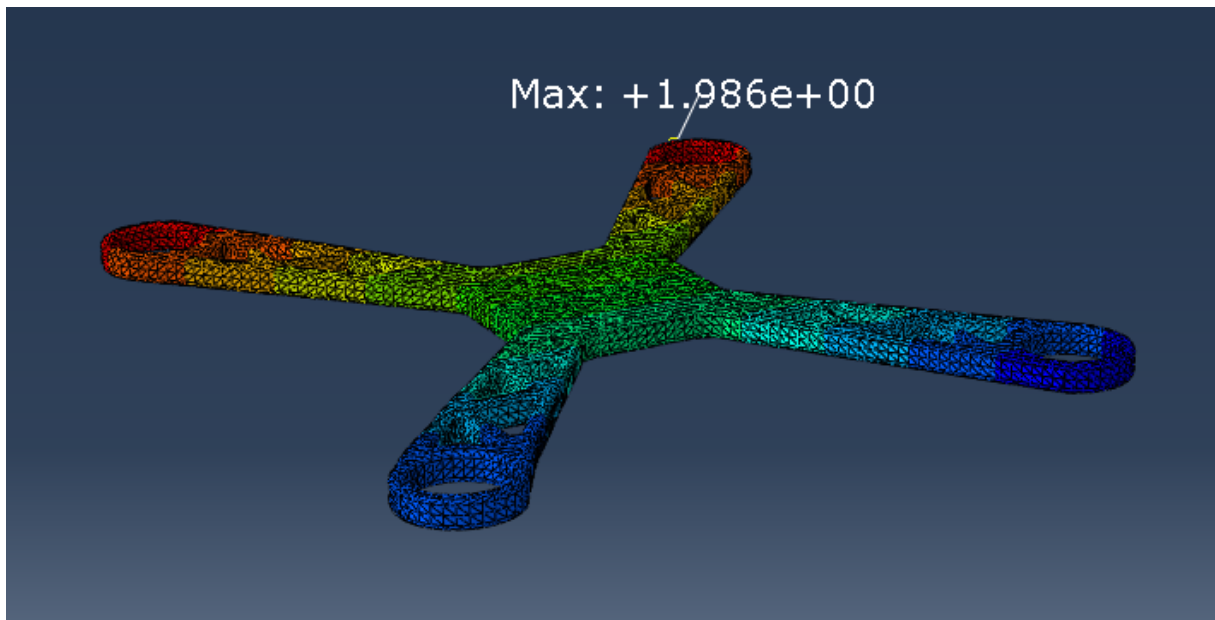
Figur 27 Deformasjon

### 3.3.2

### Aluminium 2024



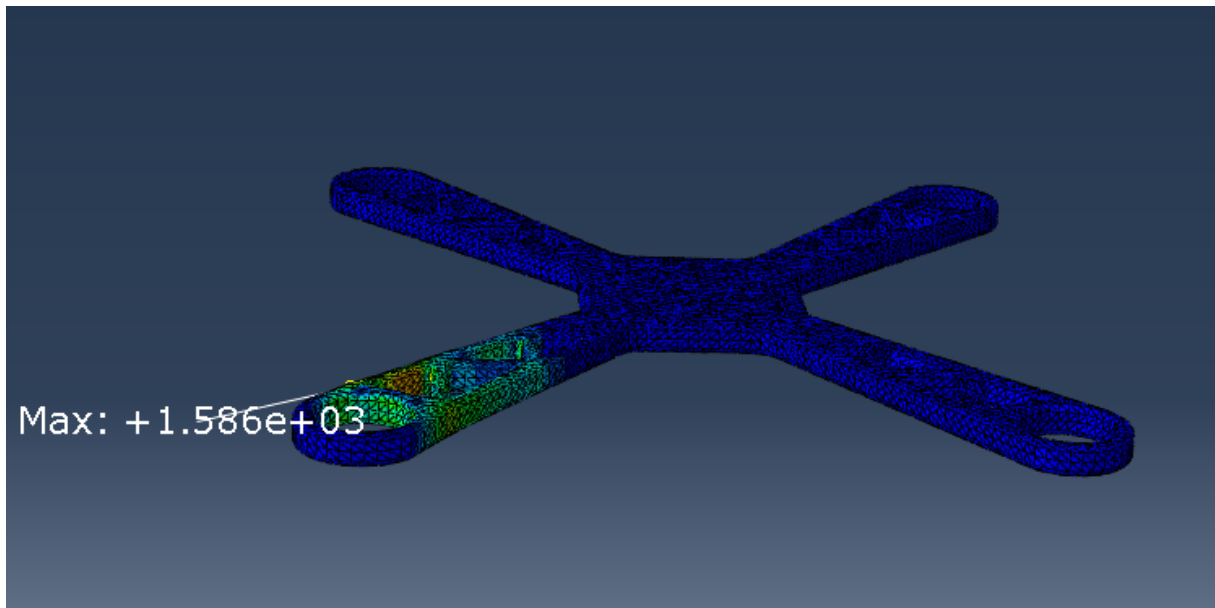
Figur 28 Stress



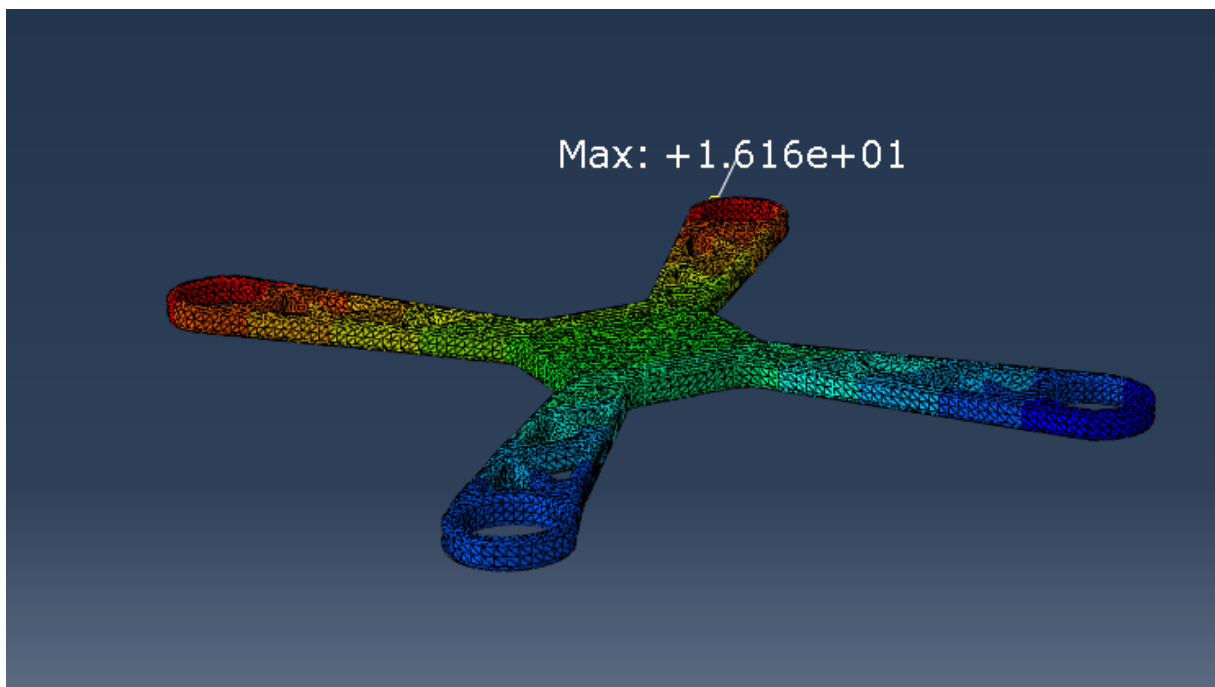
Figur 29 Deformasjon

### 3.3.3

### PET CF



Figur 30 Stress



Figur 31 Deformasjon

## 4 Diskusjon og analyse

Resultatene som undersøkelsene kom frem til gir en overordnet forståelse for hvor bra additiv produksjon med kontinuerlige fiber kan prestere. Denne informasjonen kan brukes for å vurdere potensiale som ligger i bruk av kontinuerlige fiber.

Styrken til de kontinuerlige fibre fører til at man kan gå ned på dimensjoner som igjen fører til lavere pris og lavere vekt. Spesielt har vekten en helt sentral posisjon i luftfarten, der lav vekt fører til høyere lastekapasitet, lavere energiforbruk og større designmuligheter.

Disse resultatene er avhengig av at det er perfekt binding mellom fiber og matrise. Dette gjelder for begge de fiberarmerte materialene. Det er derfor grunn til å tro at de reelle ytelsene til materialene vil avvike noe fra resultatene i denne studien.

### 4.1 Materialer

Materialene som ble brukt i testene var godt egnet for sammenligningen, men merk at materialmodellene ikke var optimaliserte for den anisotrope materialoppførselen for karbonfiber. Alle materialene er modellert som isotrope materialer. Dette gjør at resultatene har svakheter med tanke på anisotrope egenskaper, som gjør seg gjeldende for de kontinuerlige karbonfibre. Likevel kan resultatene brukes for å se potensialet til kontinuerlige fiber.

Et annet problem ved å sammenligne materialene direkte i en CAD-modell er at man ikke oppnår det optimale designet på komponenten for å få optimale ytelser for noen av materialene. Konsekvensen av dette kan være at designet på komponenten favoriserer et av materialene.



## 4.2 Tester

Testen som ble gjennomført er godt egnet til å vurdere styrker og svakheter til materialene. Hvordan spenningen konsentreres i konstruksjonen og hvor stor deformasjon man kan forvente. Den dynamiske testen synligjør hvilken betydning tetthet og egenvekt har å si for energien som dronekroppen blir utsatt for.

### 4.2.1 Fall

Det var svært utfordrende og få gode resultater i Abaqus ved å gjennomføre en falltest. Fallet ga informasjon om hvordan materialene reagerer på dynamisk belastning. Det ga ikke svaret på hvor motstandsdyktig materialene var mot knusning og sprekkdannelse.

Vekten av motorer, batterier og andre komponenter som må monteres for å få dronen til å fungere er ikke lagt til. Resultatene må derfor vurderes som følge av det, siden den prosentvise vektøkningen vil være større for et lett materiale.

Aluminium 2024 er ca. dobbelt så tungt som de to andre materialene. Dette gjør at energien i kollisjonen er dobbelt så stor. Selv om aluminium er stivere enn begge de to materialene er deformasjonen større enn for PETG+CCF 1.5K. Siden energien som blir overført er så mye høyere for Aluminium 2024 må designet eller dimensjonene endres for at materialet skal tåle belastningen. Den økte vekten gjør også at de andre komponentene som for eksempel motor og batteri må være kraftigere som igjen øker vekt og energiforbruk. Vektutfordringen innen luftfart blir veldig tydelige i et slikt forsøk.

I motsetning til de to andre materialene er PETG+ CCF 1.5K anisotrop som kan være utfordrende i en kollisjon siden fiberorienteringen ikke kan optimaliseres for alle potensielle laster. Denne problemstilling har simuleringene ikke klart å synliggjøre på grunn av utfordringer med å produsere fiberretning i Digimat.

## **4.2.2 Motortest**

Stresstesten som simulerte motorer i hvert hjørne ga gode resultater med tanke på deformasjon og stress. Deformasjonen for PETG+CCF 1.5K er 14% større enn for Aluminium 2024 og 8 ganger mindre enn PET CF. Maksimal Spenning er ca. likt som tyder på at modellene ikke har unaturlige spenningskonsentrasjoner.

Deformasjonene kommer som følge av samme last for alle de forskjellige materialene. Dermed vil akselerasjonen være mye høyere for komposittmaterialene en aluminium 2024 som er ca dobbelt så tungt. Med andre ord kan man gå ned på kreftene som virker på komposittmaterialene og fortsatt ha samme akselerasjon. Denne sammenhengen gjør at for å få en drone med lik akselerasjon og fart må aluminiums modellen potensielt være både større og ha dyrere komponenter.

## **4.2.3 Sidebelastning**

Sidebelastningstest fungerer som et supplement til falltesten samtidig som det gir informasjon om modellen sin styrke i andre retninger. I motsetning til motortesten og Falltesten må ikke denne simuleringen vurderes med tanke på vekt.

Forholdet mellom deformasjonen er nesten likt som det var i motortestene. Dette er forventet siden det er elastisitetsmodulen som bestemmer hvordan modellene beveger seg under last.

# 5 Konklusjon

Oppgaven har sett på potensialet ved additiv produksjon med kontinuerlig fiberforsterkning. Den har sett spesielt på bruken i luftfarten og spesifikt på en drone. Oppgaven skulle i hovedsak se på de teoretiske mulighetene og gjennomføre simuleringer for å se styrker og svakheter i materialet.

Fiberforsterkede materialer gir spesielt gode egenskaper når strekk virker parallelt med fibre. Resultatene ga en bekreftelse på at konstruksjon og design er viktig. Anisotrope egenskaper gjør at det er vanskeligere å få optimal ytelse på komponenter av kontinuerlig fiber. Det stiller høyere krav til designoptimalisering enn ved bruk av isotrope materialer. Bruk av isotrope materialer er i motsetning ganske rett frem.

Stivheten til aluminium og PETG + CCF 1.5K materialene er sammenlignbar, men i forhold til Aluminium 2024 er PETG + CCF 1.5K mye lettere. PETG + CCF 1.5 har også mye høyere strekkfasthet parallelt med fiberen. Lav vekt er kanskje den viktigste egenskapen for materialer som skal brukes i luftfarten. Dette blir spesielt tydelig i dynamiske tester der energien som materialet blir utsatt for blir direkte påvirket av egenvekten til materialet.

## 5.1 Muligheter

Det er tydelig ut ifra resultatene at det finnes store muligheter til å bruke kontinuerlige fiber i luftfarten på en effektiv måte. Mulighetene er nesten ubegrensede, men det krever stor forståelse om hvordan de anisotrope materialer skal brukes. Komponenters design i dag kan nødvendigvis ikke brukes på samme måte med kontinuerlige fiber. Hvordan man skal designe komponentene krever høy kompetanse, gode programmer, materialmodeller og simuleringer for å få resultatene som er presentert.

Lav vekt gir muligheter til å gå ned på dimensjoner for de fiberarmerte materialene. Mindre materiale gir mange fordeler; lavere vekt, lavere pris m.m.. Disse egenskapene er viktig i produksjon av droner og andre produkter innen luftfarten.

Produksjonen av fagverk med 3D-printer kan gjøres uten at det krever noe etterarbeid. Aluminium må støpes eller skjæres ut som gir avfall og i stor grad etterarbeid. Dette er en stor styrke som additiv produksjon har, minimal bruk av materiale og lite bearbeiding med samme egenskaper.

## **5.2      Utfordringer**

Det viste seg at å bruke Digimat uten tidligere opplæring var utfordrende. Bruken av et avansert verktøy krever god tid for å sette seg inn i alle mulighetene som er tilgjengelig. Simuleringene i denne oppgaven har bare skrapet overflaten av hva som er mulig med programvaren. Dette blir spesielt tydelig når anisotrope materialer skal undersøkes. Anisotrope materialer må brukes på en måte som styrkene til materialet kommer frem. Innstillingene i programmet er vanskelig å kontrollere så resultatet blir tilfredsstillende.

Anisoprint er lagd for å være enkel i bruk, men det krever likevel kunnskap for å få gode resultater. Dataprogrammer som Abaqus, Digimat og Anisoprint er gode hjelpemidler, men det må læres for at dataen skal bli gode og troverdige.

Utfordringene som følger med design og produksjon gjør at man kan anta at potensialet på langt nær er hentet ut.

# Referanser

Anisoprint, 2020d. *SMOOTH PA Technical Data Sheet*. [Internett]

Available at: <https://ballistic-bit.com/Files/Smooth-PA-Technical-Data-Sheet.pdf>

[Funnet 19 Mai 2022].

Anisoprint, a. [Internett]

Available at: [https://www.3d-drucker-experte.de/media/pdf/5b/bd/d6/Material-Datasheet\\_CCF-CBF-PETG\\_2020.pdf](https://www.3d-drucker-experte.de/media/pdf/5b/bd/d6/Material-Datasheet_CCF-CBF-PETG_2020.pdf)

[Funnet 13 mai 2022].

Anisoprint, b. *Anisoprint*. [Internett]

Available at: <https://anisoprint.com/solutions/desktop/>

[Funnet 19 Mai 2022].

Anisoprint, c. *Anisoprint Reinforcing Materials: Composite Caron Fiber(CCF) And Composite Basalt fiber(CBF)*. [Internett]

Available at: [https://www.3d-drucker-experte.de/media/pdf/5b/bd/d6/Material-Datasheet\\_CCF-CBF-PETG\\_2020.pdf](https://www.3d-drucker-experte.de/media/pdf/5b/bd/d6/Material-Datasheet_CCF-CBF-PETG_2020.pdf)

[Funnet 13 03 2022].

Anon., u.d. s.l.:s.n.

ASM, u.d. [Internett]

Available at: <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma2024t3>

[Funnet 13 05 2022].

Berge, S. & Kyrre ås, S., 2017. *Fatigue and Fracture Design of Marine Structures*. s.l.:NTNU.

e-Xstream, u.d. *Hexagon*. [Internett]

Available at: <https://www.e-xstream.com/products/digimat/about-digimat>

[Funnet 06 Mai 2022].

Gay, D., Hoa, S. V. & Tsai, s. W., 2003. *COMPOSITE MATERIALS DESIGN AND APPLICATIONS*. [Internett]

Available at: <https://learn-eu-central-1-prod-fleet01-xythos.content.blackboardcdn.com/5def77a38a2f7/5950767?X-Blackboard-Expiration=1647172800000&X-Blackboard-Signature=jwBXcZPq%2B57pvtVNZKRNJ41%2FMXA2EUjuGI5vVMSMnXQ%3D&X-Blackboard-Client-Id=303508&response-cache-con>

[Funnet 13 Mars 2022].

Innofil3D, u.d. *Innofil3D*. [Internett]

Available at: <https://www.ultrafusefff.com/wp-content/uploads/2018/11/TDS-EN-PETCF-180112.pdf>

[Funnet 07 Mai 2022].

Li, N. & al, e., 2020. *Path-designed 3D printing for topological optimized continuous carbon fibre reinforced composite structures*. [Internett]

Available at:

[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836819312454?fbclid=IwAR1-PWZhd2-8dGc29VQ\\_0OzrwkyHm15Co1m38UNWdfZe6UN0obhmkFLvHbo](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836819312454?fbclid=IwAR1-PWZhd2-8dGc29VQ_0OzrwkyHm15Co1m38UNWdfZe6UN0obhmkFLvHbo)

[Funnet 19 05 2022].

Mason, H., Composites world. [Internett]

Available at: <https://www.compositesworld.com/articles/3d-printing-with-continuous-fiber-a-landscape>

[Funnet 07 Mai 2022].

Meyer, R. W., 2019. *Store Norske Leksikon*. [Internett]

Available at: <https://snl.no/fagverk>

[Funnet 13 Mars 2022].

Mæhlum, L., 2021. *3D-printing*. [Internett]

Available at: <https://snl.no/3D-printing>

[Funnet 19 april 2022].

Ore, S. & Egil Helseth, L., 2021. *karbonfiber*. [Internett]

Available at: <https://snl.no/karbonfiber>

[Funnet 1 Mai 2022].

Wikipedia, 2022. *Abaqus*. [Internett]

Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Abaqus>

[Funnet 15 Mai 2022].

Wikipedia, 2022. *Wikipedia*. [Internett]

Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon\\_fibers](https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_fibers)

[Funnet 15 mai 2022].