



CHALMERS



Styrkan av 3D-utskrivna kompositer

Ett projekt om styrkan av ZYYX Labs 3D-utskrivna material

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet maskinteknik

Axel Guttman

Jacob Johansson

INSTITUTIONEN FÖR INDUSTRI- OCH MATERIALVETENSKAP

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2022

www.chalmers.se

Förord

Vi vill tacka Mikael Enelund för den hjälp vi fick med tillgång till dragprovsmaskinen på Institutionen för mekanik och maritim vetenskap och för lån av institutionens 3D-skrivare som gjorde detta projekt möjlig. Vi vill också tacka Tomas Bengtsson och Axel Hynsjö på ZYYX labs för inspiration till projektet, tillgång till material och service på 3D-skrivaren. Sist vill vi tacka Lars Nyborg som varit vår examinator i detta projekt.

Axel Guttman, Jacob Johansson

Abstract

Additive manufacturing has become very popular in the past decades. Both for companies that work with product development to streamline agile prototyping and for people that 3D-print at home. The scope of 3D printing is not just for rapid prototyping anymore, but also for end products. This has put a higher demand on materials and material data for end user products. This study follows the work done on testing and analyzing 3D-printed composites.

The material investigated in this report is polyamide 66 with 20% chopped carbon fiber reinforcement. All specimens were printed on a ZYYX Pro 3D-printer. ZYYX has a set of standard settings for their 3D-printers that were tested in different orientations on the print bed for test specimens to be close to final 3D-printed models for end use. 10 test specimens in 4 different X, Y orientation and 5 test specimens in Z direction were tested. With a tensile test machine Young's modulus and ultimate strength could be determined.

The test results showed that there is a difference in properties related to print orientation where printing with longitudinal and transverse mesh over the test specimens gives the possibility to reach highest Young's modulus and ultimate strength values. During the testing a difference in material data was noted for identical print specimens. This was investigated and proved to be related to ageing of the material after printing. In fact, in this project up to 50% decrease in Young's modulus from 3 weeks of ageing was shown.

Sammanfattning

Additiv tillverkning har blivit en mer vanlig tillverkningsmetod i produktutveckling och för slutprodukter, både för hemma-fixare och större företag. Behovet av materialdata är viktig när hållfastheten av en produkt är av avgörande betydelse. Det leder oss till huvudfrågan ”vad är styrkan av 3D-utskrivna kompositer”. Arbetet utfördes i samarbete med företaget ZYYX Labs som är tillverkare av 3D-skrivare och filament. Utrustningen som användes under projektet var en dragprovmaskin och 3D-skrivare som ställdes till förfogande av Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper. ZYYX använder flera olika material i sina skrivare, men på grund av tidsplanen utfördes prover endast på deras mest förekommande komposit ProCarbon, som består av korta kolfibrer och polyamid 66.

Dragprover utfördes på provstavar tillverkade i X-Y-led och i Z-led (byggriktningen). Med hjälp av dragprovskurvor kunde Elasticitetsmodul och brottspänning beräknas. För att få statistisk signifikans gjordes 10 exemplar av provstavarna i X-Y-led och 5 i Z-led, vilket resulterade i totalt 45 provstavar. Alla provstavar tillverkades med samma skrivare och testades sedan i samma provningsutrustning.

Resultaten visar på god styrka med den högst uppmätta Elasticitetsmodulen på 7GPa och brottspänning på 90 MPa. Under testfasen upptäcktes en stor variation av styrkan i provstavar som skrivits ut med lika profilställningar och orientering. Vi undersökte och visade att en stor åldringseffekt påverkade de provstavarna som blev färdiga i början av tillverkningen jämfört med de provstavar som blev färdiga närmre provningen. På en uppsättning av provstavar där åldringen på provstavarna kunde verifieras så hade E-modulen minskat 15% efter 100 timmars åldring och 50% efter 3 veckors åldring. Tester utfördes för att mäta upp skillnaden i styrka beroende på om provstaven skrivs ut stående (Z-led) eller liggande (X-Y-led) på byggplattan. De stående provstavarna visade en minskning i Elasticitetsmodul på 30%. Provstavar byggda stående (Z-led) visade 70% av styrkan jämfört med den starkaste liggande provstaven i X-Y-led.

Innehåll

Förord.....	I
Abstract.....	II
Sammanfattning.....	III
Mjukvara.....	VI
Koordinatsystem.....	VI
Ordlista.....	VI
1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Syfte.....	1
1.3 Avgränsningar.....	2
1.4 Frågeställning.....	2
2. Teori.....	3
2.1 Förstudier.....	3
2.2 3D-utskrivning FDM.....	3
2.3 Profilställningar.....	3
2.4 Perimeter och ifyllnad.....	4
2.5 Orientering av modell.....	4
2.6 Skevning.....	5
2.7 Isotropa material.....	5
2.8 Anisotropa material.....	5
2.9 Elasticitetsmodul.....	5
2.10 Brottspänning.....	6
2.11 Dragprov.....	6
2.12 Kryptest.....	7
2.13 Standarder.....	7
3. Metod.....	8
3.1 Val av material.....	8
3.2 Orientering av lager.....	8
3.3 Inställningar för 3D-skrivare.....	9
3.4 Dragprov.....	9
3.5 Uppgradering av skrivaren.....	9
3.6 Statistisk signifikans av provresultat.....	9
3.7 FEA.....	9
3.8 Praktiska tester.....	10
4. Tester i Ansys.....	10

5. Praktiska tester	12
5.1 Geometri av testexemplar	12
5.2 Geometri Z-led provstav	13
5.3 Tillverkning.....	13
5.4 Dragprov	13
6. Resultat	14
6.1 Variation av provresultat.....	14
6.1 Resultat för provstavar tillverkade i X-Y-Led	14
6.2 Resultat Z-led.....	15
6.3 Jämförelse mot homogena kompositer	16
7 Diskussion.....	17
7.1 Från utskrift till dragprov	17
7.2 Inverkan av orientering	17
7.3 Provstavar i Z-led.....	17
7.4 Rekommendationer	17
Källor	19
Bilagor	A

Mjukvara

ANSYS	mjukvara för finita elementberäkningar
MATLAB	mjukvara för matematiska beräkningar och för att skapa grafer
CATIA	mjukvara för 3D modellering
TRAM QA	mjukvara för dragprovsmaskin
SIMPLIFY 3D	mjukvara för förberedande av 3D fil till 3D skrivare

Koordinatsystem

Origo	mitten av byggplattan på skrivaren.
Z led	positiv riktning är höjden från byggplattan.
X led	sett framifrån skrivaren är positiv riktning höger i skrivaren.
Y led	sett framifrån skrivaren är positiv riktning bakåt i skrivaren.

Ordlista

Exstensometer	Mätanordning för att mäta förlängning under dragprov
Extruder	System för att pressa ett filament ner i ett munstycke
FDM	Fused Deposition Modelling,
FEA	Finita Element Analys
FEM	Finita Element Metoden
MPa	Mega Pascal
GPa	Giga Pascal

1 Inledning

I rapporten kommer alla väsentliga delar presenteras för detta arbete. Där ska det framgå vilken bakgrund, syfte, avgränsningar och frågeställning rapporten har. Det kommer också vara den röda tråden i hur arbetet genomförs. Målet fastslås tydligt och därefter förmedlas teori samt metod för att ge läsaren en bra bild över hur projektet genomförs. I resultatdelen av rapporten beskrivs det med hjälp av den valda metoden vilken data som togs fram och deras tolkning.

1.1 Bakgrund

Additiv tillverkning har varit en del av produktutvecklingsfasen i decennier, tidigare var 3D-skrivare för det mesta bara använda för att skapa en mockup av en produkt men det blir mer och mer vanligt att skapa slutgiltiga produkter (Zastrow, 2020) och därmed få fram en funktionell produkt med de stora fördelarna låg kostnad och snabb tillverkning. Fördelen med att använda sig av additiv tillverkning är att man på ett enkelt och snabbt sätt kan konstruera en komplex geometri. En *Fused Deposition Modeling* (FDM) skrivare lägger en sträng av material i en förutbestämd bana för att skapa 2D geometrier på varandra som bildar en 3D geometri. Tillverkning på detta vis leder till anisotropa materialegenskaper. En orsak är att vidhäftningen mellan lagren skiljer sig i Z-led jämfört med X-Y-led. Mer traditionella tillverknings sätt avlägsnar material genom skärande bearbetning, som fräsning eller svarvning. Det leder till homogena materialegenskaper som oftast är mer gynnsamma ur ett hållfasthetsperspektiv då man inte behöver ta strukturens orientering i beaktning under tillverkning förutsatt att den föregående tillverkningsprocessen före bearbetningen ger homogena egenskaper i sig, vilket inte är en självklarhet vid till exempel gjutning.

ZYYX labs är ett företag baserat i Göteborg som tillverkar 3D-skrivare och filament. De är inriktade på att skapa 3D-skrivare som skriver ut i mer hållfasta material som kolfiberförstärkt eller glasfiberförstärkt nylon. För att tillverka en produkt när hållfastheten är betydande måste grundläggande kunskap om materialet finnas. Därför fanns ett intresse för en undersökning av materialegenskaperna för ZYYX kompositmaterial utskrivet med en ZYYX skrivare.

När en 3D-skrivare tillverkar en produkt så är 3D-skrivaren så kallad blind. Den vet inte om den har gått den distansen eller banan som varit förutbestämd. Den vet inte heller om materialet som extruderades har gjort det. Ett fel som uppstod med ZYYX tidigare skrivare var att extrudern inte hade bra grepp på filamentet. Det leder till en mer porös produkt med lägre densitet. ZYYX var därför intresserade över vad för hållfasthet deras nya "dual gear extruder" gav till 3D utskrivna detaljer.

1.2 Syfte

Syftet med detta arbete är att utföra materialtest för att kunna analysera styrkan av 3D-utskrivna detaljer i kompositmaterial som tillverkats med ZYYX 3D-skrivare.

1.3 Avgränsningar

3D-skrivaren som valdes för detta projekt var en ZYYX Pro I. Alla provstavar skrevs ut med samma skrivare för att ha så få variabler som möjligt och testades sedan i endast en dragprovsmaskin för samma anledning. I och med att provstavarna tillverkades med endast en skrivare så gäller bara resultaten för denna specifika skrivare. De inställningar vi kom att ändra på i profilerna kom där med enbart att på utskriften för att inte avvika från de standardinställningarna som rekommenderas av ZYYX. På grund av tidsramen för projektet gjordes tester endast på materialet ZYYX ProCarbon. Detta är det vanligaste materialet kunder till ZYYX använder när ett starkt material efterfrågas. Termiska egenskaper och kemisk resistans undersöktes inte i detta projekt.

1.4 Frågeställning

Eftersom 3D-skrivna detaljer har anisotropa materialegenskaper så gjordes materialtester på prover som tillverkats efter olika riktningsinställningar för 3D-utskriften. Från det övergripande syftet av projektet ställdes följande delfrågor:

1. Vilken E-modul har 3D-utskrivet ProCarbon?
2. Vilken brottgräns har 3D-utskrivet ProCarbon?
3. Hur skiljer sig de två olika egenskaperna beroende på riktningsinställningar för 3D-skrivaren?

2. Teori

Detta kapitel går igenom teorin som leder till analysen av materialets styrka.

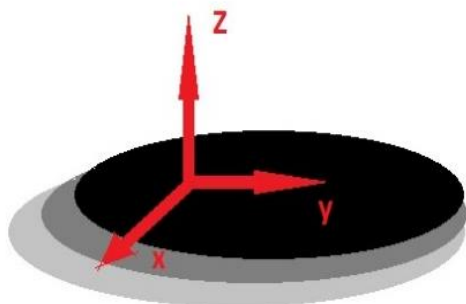
2.1 Förstudier

För att få grundläggande kunskap inom 3D-skrivning gjordes ett studiebesök hos ZYYX Labs. Där gick de igenom hur deras 3D-skrivare fungerar, begränsningar i tillverkning, hur tillverkning bör gå till för att få standardiserade resultat och vilka inställningar som bör användas.

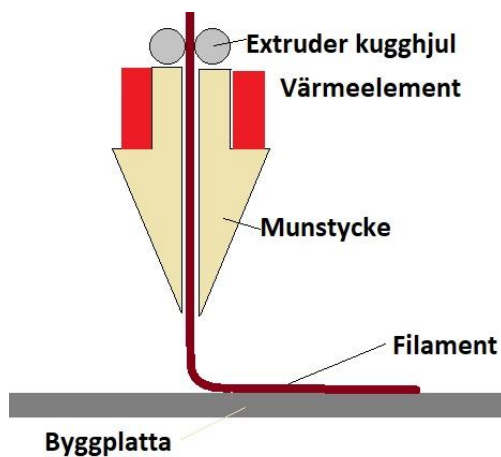
Tidigare undersökningar av styrkan av 3D-skrivet material har visat att brotten på provstavarna ofta sker i radien mellan den klämda delen och mätlängden av provstaven (Anand, K & Yeole Shivraj, N). Detta beror på imperfektioner i modellen där hålrum skapas vilket leder till spänningskoncentrationer i radien på provstaven.

2.2 3D-utskrivning FDM

Additiv tillverkning är samlingsnamnet för alla former av tillverkning där man lägger till material i stället för att avlägsna material. FDM-skrivare fungerar på ett sådant sätt att man med kuggjul som pressar mot filamentet och pressar ner filamentet i värmeelementet. I värmeelementet hettas filamentet upp till smältpunkten av materialet. Trycket från att mer filament trycks in i värmeelementet leder till att filamentet pressas ut ur munstycket. Det blir sedan placerat på ett horisontalplan i en förutbestämd bana. Detta fortsätter lager på lager i önskad geometri till dess att den färdiga produkten bildar en tre-dimensionell struktur. Filamentet är en lång kontinuerlig tråd på en diameter mellan 1-3mm oftast upplindad i en spole. Se vidare i illustrationer i Figur 1 och Figur 2.



Figur 1 visualisering av plan i 3D-utskrift.



Figur 2 schematisk bild över FDM-skrivare.

2.3 Profilinställningar

För att tillverka en struktur med en 3D-skrivare behöver man ett program som tar in en 3D-fil och översätter den till en fil som 3D-skrivaren kan läsa. Dessa program kallas ofta för "slicerprogram" då det delar upp strukturen i olika lager. Detta gör att 3D-skrivaren vet i vilken ordning den skall bygga lagren och vilken bana den skall välja för varje lager. Programmet som är valt för detta projekt är Simplify 3D då det är den ZYYX

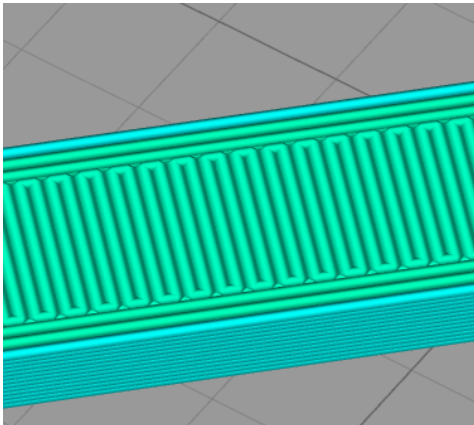
rekommenderar. I Simplify 3D så går det att ändra många inställningar för 3D-skrivaren så som hastighet på printerhuvudet, hastighet på filamentet, ifyllnadsgrad från 0 till 100%, minsta radie, riktning på lager och mycket mer. Hur man ställer in dessa parametrar gör skillnad för slutgiltiga materialegenskaper. ZYYX har standardinställningar tillgängliga på sin hemsida som är kalibrerade för att få en god ifyllnad och ytfinhet. De rekommenderade inställningarna kommer användas så att provstavarna inte får bättre eller sämre materialegenskaper än det som ZYYX skrivare har i vanliga fall.

2.4 Perimeter och ifyllnad

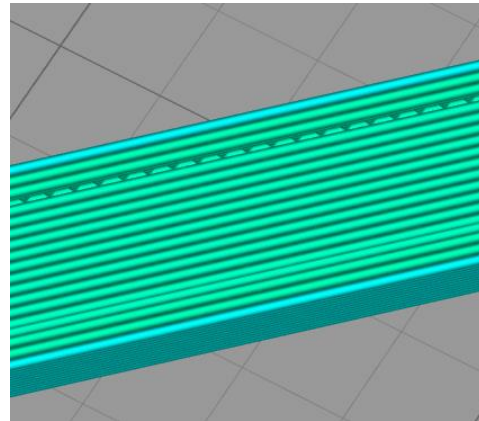
Med perimeter menas de yttersta lagren på en detalj. Printerhuvudet följer längst ytterkanten av modellen för att få en slätare yta. När man tillverkar en modell additivt har man möjligheterna att skapa ihåliga modeller genom att ändra ifyllnaden i slicerprogramvaran. Oftast så bygger 3D skrivaren en bikupestruktur, för att spara vikt och tillverkningstid men med nackdelen av att man får lägre styrka i modellen.

2.5 Orientering av modell

Vilken orientering modellen har på byggplattan ändrar hur printerhuvudet rör sig relativt provstaven. Med det menas att om första lagret av material printas längst med provstaven, kommer nästa lager printas tvärs över provstaven. Detta nät av material i X och Y led skapar en styv modell i X och Y riktningen och är den standard som ZYYX har i sina 3D-skrivare, se illustrationer i Figur 3 och Figur 4.



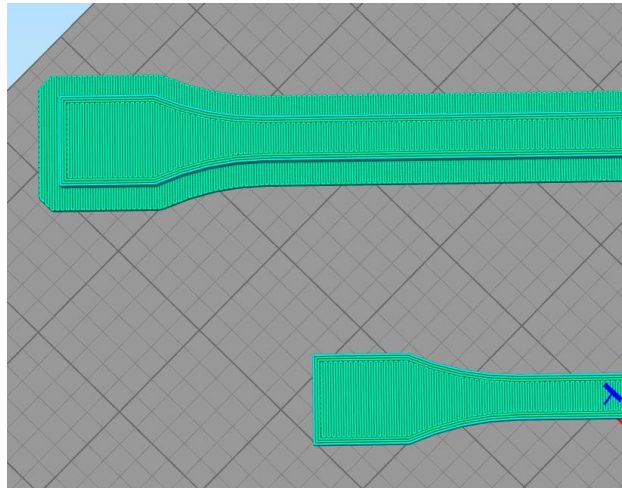
Figur 3 ifyllnad tvärs över provstaven.



Figur 4 ifyllnad längs med provstaven.

2.6 Skevning

Ett vanligt problem när man tillverkar strukturer med en 3D-skrivare är skevning eller så kallat "warping". Det sker oftast när att plasten kyls ner olika fort i olika delar av modellen och skapar inre spänningar och spänningar mellan byggplattan och modellen. Det kan leda till att modellen lossnar och blir oduglig. Det finns ett par åtgärder man kan utföra för att undvika detta. Det som funkar bäst för ZYYX skrivarna är att använda sig av en raft (Figur 5), en struktur som skrivs ut mellan modellen och byggplattan för bättre vidhäftning och stabilitet. Raften kombineras med deras uppvärmda byggkammare för att minska ojämn krympning av modellen.



Figur 5 Bild från Simplify 3D med raft i den övre strukturen i bilden och utan raft i den undre.

2.7 Isotropa material

Isotropa material har samma egenskaper i alla riktningar (Instron,2022). Detta är på grund av att molekyler/atomerna i isotropa material inte har riktningensberoende bindningar mellan varandra. Många plaster, metaller och glas kan kategoriseras som isotropa material beroende på sin materialstruktur. Kompositers anses vara isotropa om fiberriktningen är placerad i normal riktning mot ytorna på en rombisk dodekaeder (se bilaga 3) enligt totalt 6 riktningar (Kelly, A). Eftersom en 3D-skrivare endast tillverkar material i plan kan inte 3D-utskrivna modeller skapas med isotropa egenskaper.

2.8 Anisotropa material

Anisotropa material har varierande egenskaper i de olika riktningarna som är rätvinkliga till varandra. Dessa riktningar delas in i de longitudinella, radiella och tangentiella. Därför har de anisotropa materialen tre symmetriplan till skillnad från de isotropa där dessa har obegränsat med plan i symmetri (Instron,2022).

2.9 Elasticitetsmodul

E-modulen är sambandet mellan spänning och töjning i ett ideal elastiskt material och kan estimeras med hjälp av Hooks lag (Britannica 1998).

$$\sigma = E\epsilon \quad (2.1)$$

Där sigma (σ) är spänningen, epsilon (ϵ) töjningen och elasticitetsmodulen (E) en konstant som är materialspecifik.

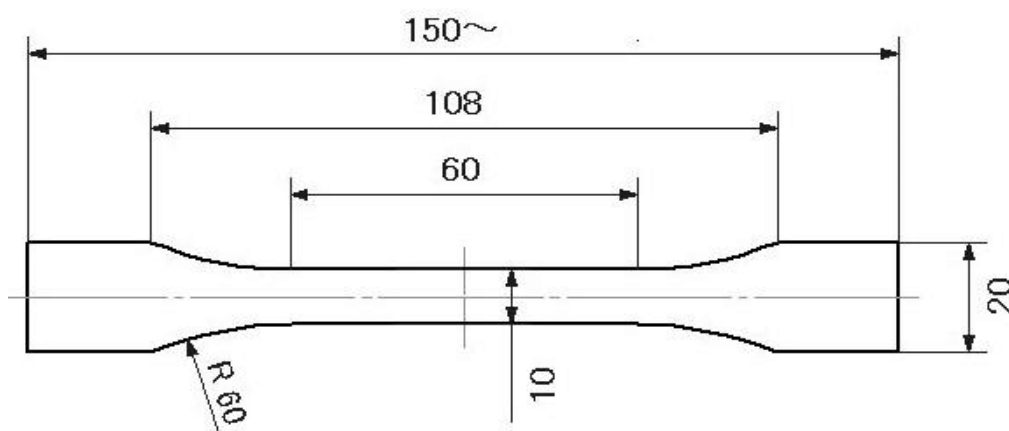
2.10 Brottspänning

Brottspänningen är den uppmätta spänningen som materialet utsätts för under dragning eller sträckning när materialet går av. Den spänningen som kommer mätas i detta projekt är den ingenjörsmässiga spänningen. Spänning definieras som kraften (F) genom tvärsnittsarean(A) (Dahlberg, T).

$$\sigma_{brott} = \frac{F_{Max}}{A} \quad (2.2)$$

2.11 Dragprov

Dragprov är det mest grundläggande och vanligaste materialprov som görs (Instron,2022). Med hjälp av dragprov får man fram en dragprovskurva som kan visa brottgräns, sträckgräns, E-modul och brottförlängning. Dragprov går till genom att griplor greppar en provstav i båda ändar och sedan dras provstaven enaxligt till brott eller en annan förutbestämd längd eller spänning. Det är väsentligt att provexemplaret får sitt brott inom mätlängden (längden 60 i ritningen i Figur 6 nedan) för att få ett tillförlitligt resultat. Om brottet sker i radien eller i en annan icke förutbestämd plats blir resultatet ogiltigt. Detta är på grund av att det inte går att anta att materialets brott sker på grund av att den maximala spänningen är uppnådd. Provstavar som används i dragprov liknar ett hundben med bredare ändar som griplorna verkar på. Nedan i Figur 6 är måtten på en ISO 527 provstav.



Figur 6 ritning över ISO 527 provstav.

För att bestämma vilken hastighet dragproverna skall utföras i undersöktes tidigare rapporter och standarder. Enligt (Tusharkumar B. Prashant A. Sanjay T. Satpute) som testat dragprov i två olika hastigheter både 10 mm/min och 100mm/min skiljer sig inte den ultimata styrkan av materialet, utan bara den totala töjningen av materialet. Enligt ASTM standard D638 ska man använda sig av den långsammaste töjnings hastigheten mellan 5 och 500mm/min så provstaven går av inom tidsintervallet 30 sek till 5 min. Enligt ISO 527 standarden skall provstavar dras i hastigheten 5 eller 50 mm/min för att få korrekt resultat för brottstyrka. För att mäta E-modul skall provstavarna dras med 1 mm/min.

2.12 Kryptest

Kryptest är ett användningssätt för att analysera hur ett material påverkas av en konstant last vid en konstant temperatur. Lasten är satt till ett värde som ligger långt under den maximala spänningen för det givna materialet och vid en temperatur som är konstant under provets gång. Sedan lämnas testexemplaret påverkat av denna last under en tid för att därefter analyseras. Kryptester kan göras med både kompressions- och dragbelastning. För att få ett noggrant mätt resultat krävs det att alla parametrar kontrolleras då testet behöver ha många konstanta sådana. Hela syftet är att lasten och temperaturen är densamma under hela testets gång och om dessa då av någon anledning skulle ändras blir resultatet ogiltigt. (Mathers, 2022)

2.13 Standarder

När materialdata skall samlas bör en standard följas för att se till att experiment görs korrekt och ingenjörsmässigt. Både ISO 527 och ASTM d638 är standarder för uppmätning av ultimata styrka och E-modul för plaster och kompositer.

3. Metod

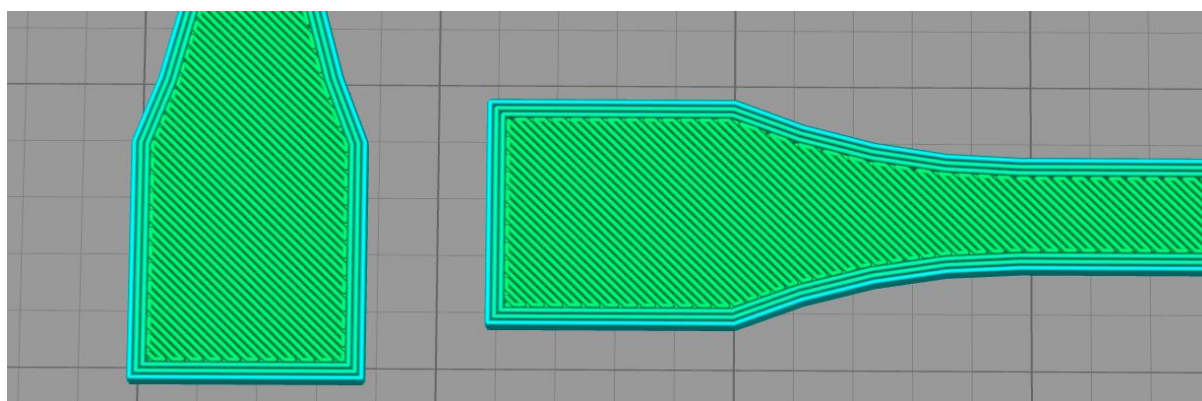
Här kommer metoden att beskrivas innefattande hur arbetet genomfördes och tillvägagångssätt som användes. Processen i detta arbete delades upp i olika faser, finita element analyser, experimentella tester/tillverkning och utförande av slutgiltiga tester.

3.1 Val av material

Materialet ProCarbon valdes eftersom det är det vanligaste materialet kunder till ZYYX använder när goda materialegenskaper är efterfrågade. Filamentet ProCarbon är dock mycket fukt känsligt och måste förvaras i ett torkskåp eller en lufttät förpackning före användning. Fuktangrepp på filament leder till ångbildning vid uppvärmning av filamentet och kan skapa hålrum och porer i färdig utskriven modell. 3D skrivaren fungerar som ett torkskåp och var alltid påslagen för att undvika fuktangrepp i filamentet.

3.2 Orientering av lager

När en 3D-skrivare skriver ut en struktur går det endast att ställa in lagerorienteringen för hela strukturen. Probstavarna tillverkas därför med olika riktningsändringar på byggplattan för att undersöka vilken fiberriktning av materialet är starkast.



Figur 7 spegelvända lager vid 90 graders orienterings förskjutning.

Om en struktur skrivs ut med en riktningsförändring på printbädden med 90 grader kommer lagren endast spegelvändas (se figur). Det vill säga att efter en förskjutning av 45° har alla olika orienteringar av lager testats. På grund av tidplanen för projektet valdes 4 riktningsändringar för utvärdering i X-Y-led med riktningsändringarna 0°, 15°, 30°, 45°. Tabell 1 nedan sammanfattar orienteringen av provstavar som tillverkades och undersöktes.

Tabell 1 Orienteringar av provstavar som undersökts

Filament	Printorientering längst provstaven	Steghöjd
ZYYX proCarbon	45°, -45° X,Y led	0,2 mm
-	30°, -60° X,Y led	-
-	15°, -75° X,Y led	-
-	0°, -90° X,Y led	-
-	Z-led	-

3.3 Inställningar för 3D-skrivare

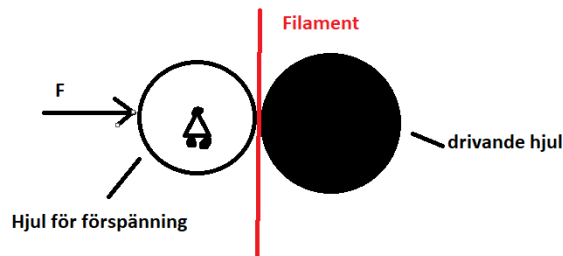
ZYYX har standardinställningar för sina skrivare som är tillgängliga på deras hemsida. Inställningarna som testades i detta projekt var uppdateringen v19.2 rc9 (ZYYX labs). De inställningarna som valdes var ifyllnad och munstyckets storlek. Då de bästa materialegenskaperna söktes sattes ifyllnaden av material till 100%. Munstyckets storlek valdes till 0,6 mm eftersom det är det vanligaste munstycket som används.

3.4 Dragprov

Alla dragprov utfördes med dragprovsmaskinen UCT 50kN från Bent Tram A/S. Maskinen kalibrerades av Bent Tram innan dragproven utfördes. Extensometern som ingick i maskinen var en Epsilontech 3542-100M-010-ST med en mätlängd på 100 mm. Hastigheten som valdes att utföra dragproven med var 5mm/min då det stämde överens med både ISO 527 och ASTM d638

3.5 Uppgradering av skrivaren

Som nämndes tidigare bestämdes det att utföra en uppgradering av 3D-skrivaren inför detta projekt. För att uppgraderingen skulle göras korrekt gjordes den hos ZYYX som i samband med detta kalibrerade skrivaren. Uppgraderingen av skrivaren var en ny extruder som med 2 drivande kugghjul pressade filamentet ner i munstycket (visat i Figur 1), vilket leder till en mer ifylld struktur. Tidigare extruder hade enbart ett drivande hjul med det andra hjulet fritt lagrat med en förspänning mot det drivande hjulet enligt Figur 8 nedan.



Figur 8 Schematisk bild över tidigare extruder.

3.6 Statistisk signifikans av provresultat

För att undvika att en eller flera provstavar med dålig kvalitet skulle väga för tungt i slutgiltiga resultaten valdes antal provstavar till 10 för varje utskriftorientering.

3.7 FEA

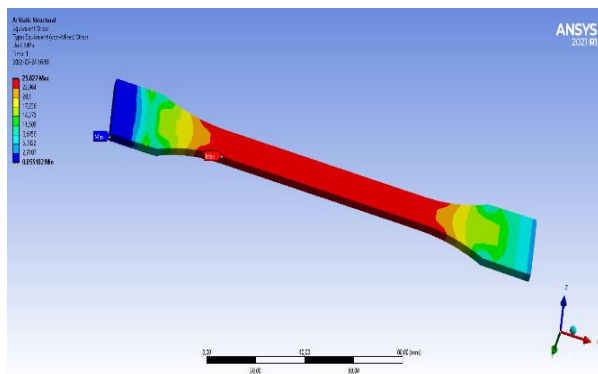
Finita element analys gjorde med hjälp av ANSYS Student 2021 R1. Analyser av geometrin på provstaven gjordes i konceptfasen för att bedöma vilken geometri som var bäst att använda i projektets syfte. Materialet som användes var PA66. Resultatet av FE analysen ska vara utgångspunkten i hur geometrierna ska designas samt hur inspänningar ska placeras för att möjliggöra bästa möjliga resultat senare i dragprovningen.

3.8 Praktiska tester

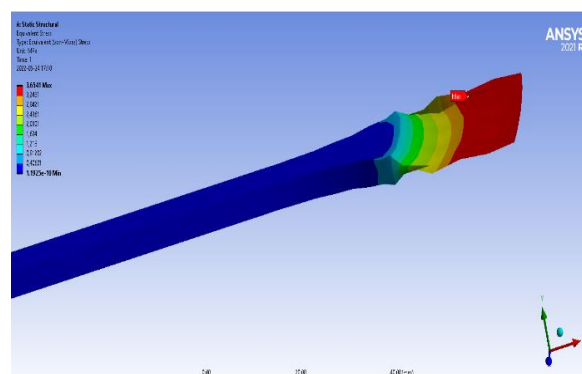
För att bäst undersöka hur provstavarna kommer gå sönder gjordes praktiska tester utföras i förberedande syfte. Olika koncept tillverkades som sedan testades i dragprovsmaskinen.

4. Tester i Ansys

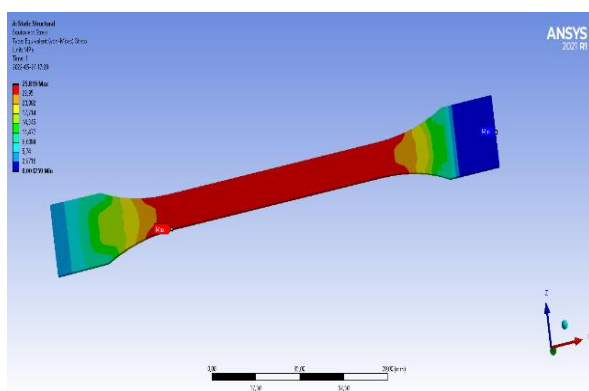
Analyserna i Ansys gav indikationer på att de flesta olika typer av geometrier skulle få höga spänningar i radierna på provexemplaren vilket i sin tur skulle leda till brott vid radien och ett ogiltigt resultat. De dimensionerade geometrierna som testades i Ansys hade materialet PA66 och mått efter standarden ISO-527. Det slutgiltiga konceptet som utgick från ISO-527 med en förlängd mätlängd avseende extensometern. Två olika typer av spänningskoncentrationer uppstod på grund av olika faktorer. Den ena var på inspänningen där stavarna utsattes för komprimerande tryck. Den andra spänningen som uppkom var från dragspänningen som skulle analyseras i kommande tester. I förhållande till varandra bedömdes inte den komprimerande spänningen vara av lika betydande effekt på provstaven. Denna avvägning gjordes då de högsta spänningarna de facto uppmättes på ställen som var direkt påverkade av den draglasten. Figur 9-12 sammanfattar analyserna som gjordes med Ansys



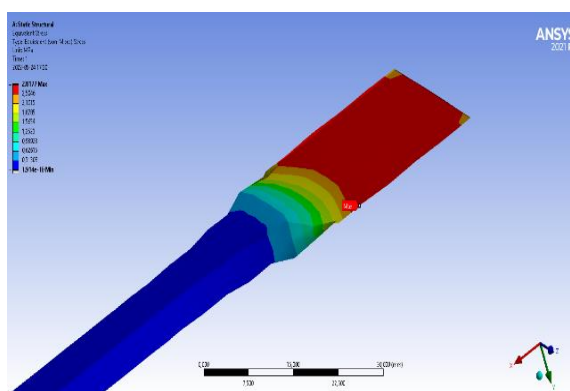
Figur 9 Spänningen vid test i dragprovsmaskinen, elementstorlek 5mm.



Figur 10 Den isolerade spänningen från inspänningen, elementstorlek 5mm.

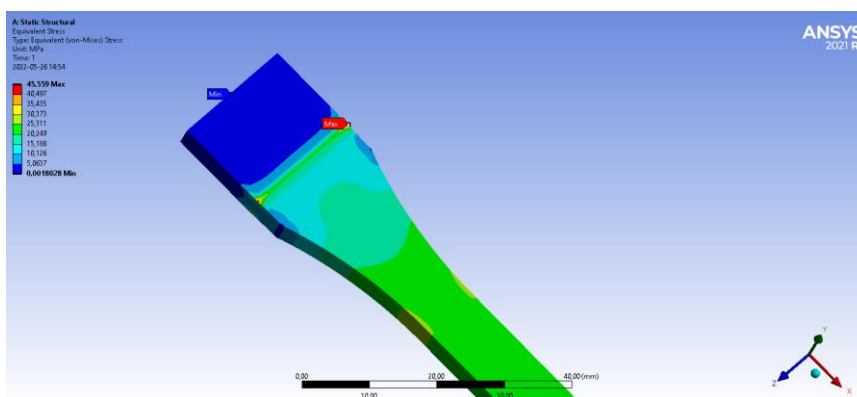


Figur 11 Spänningen då inspänningen börjar vid slutet av radien, elementstorlek 5mm.

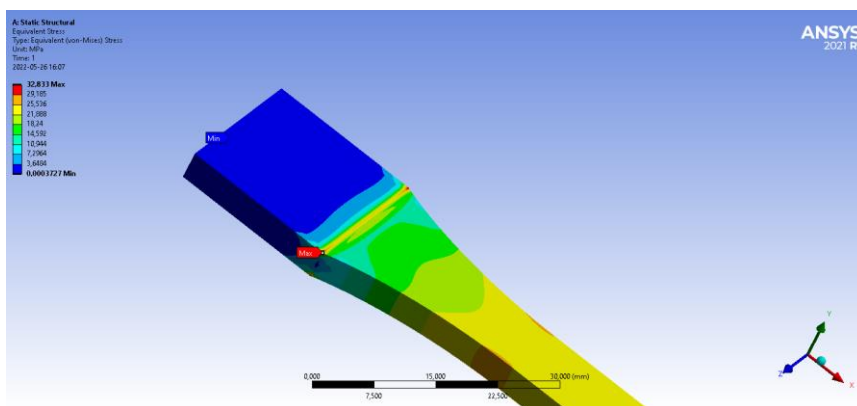


Figur 12 Isolerad Von Mises spänning vid inspänningen, elementstorlek 5mm.

Genom att analysera elementstorleken på provstaven såg man stora skillnader i var spänningskoncentrationer lokaliserades och med en finare elementstorlek var det framför allt i kanterna där provstavarna satt inspända som höga spänningar uppkom. Dock så reducerades dessa spänningar då inspänningen flyttades närmre radien mot avsmalningen. Se Figur 13.1 och 13.2.



Figur 13.1 Von Mises spänning vid inspänningen, elementstorlek 1 mm.

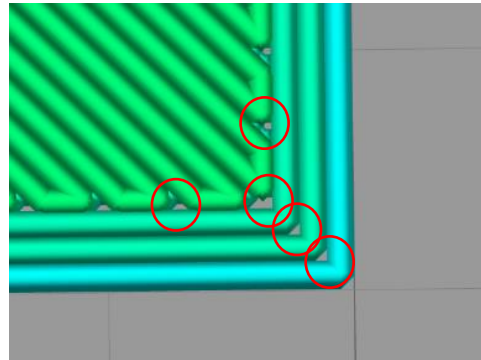


Figur 13.2 Von Mises spänning vid inspänningen närmre radien, elementstorlek 1 mm.

Spänningsbilden på grund av den isolerade spännkraften såg liknande ut för finare mesh som för den föregående elementstorleken (se bilaga 1).

5. Praktiska tester

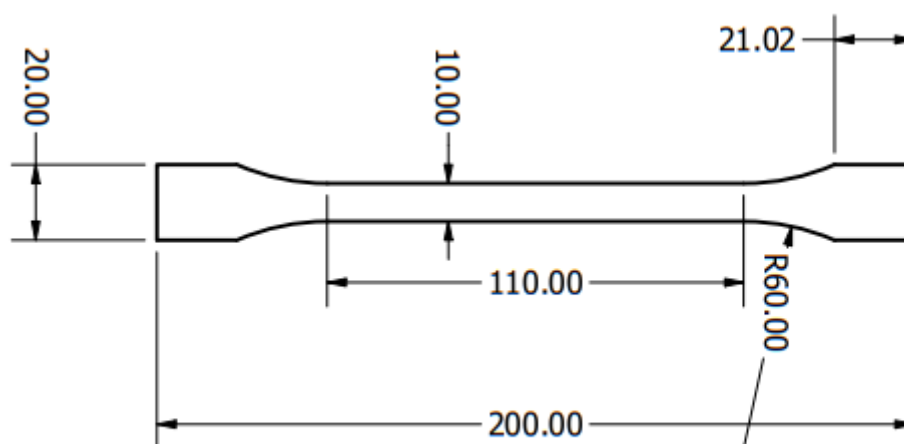
Resultatet i FEA föranledde mer praktiska prover i dragprovningssmaskinen för att undersöka hur geometrierna fungerade i praktiken. För att dragprovstesten ska godkännas så behöver provstaven gå av inom den avsatta mätlängden. Beroende på vilken bana munstycket väljer att ta när den skriver ut så kan små hålrum skapas visat som ringar i Figur 14. I tidigare rapporter (Rahul Malik 2012) (Torrado & Roberson 2016) som undersökt E-modul och brottstyrka av 3D utskrivna provstavar, har provstavarna haft en tendens att gå sönder i radien. En undersökning av hur provstavarna gick sönder gjordes därför genom att testa det slutgiltiga konceptet och alla provstavar gick av i den avsatta mätlängden, vilket visade att den valda utformningen var relevant.



Figur 14 hålrum som skapas med 3D utskrift.

5.1 Geometri av testexemplar

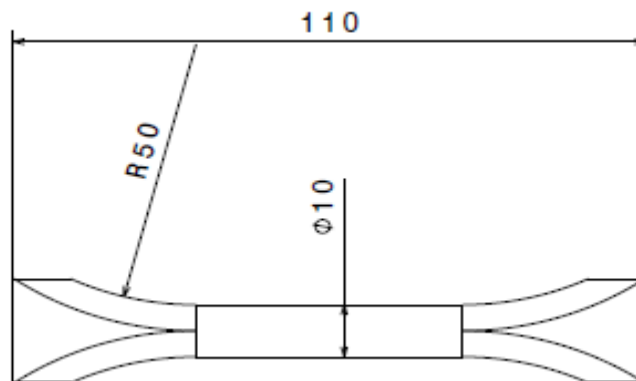
Geometrin som valdes utgick från ISO-527 som användes i den inledande processen där FEA gjordes på provstaven för att se eventuella spänningar och brottpunkter. Dock behövdes det tas med i beräkningarna att denna FEA är endast gjort för erhållet material och är inte anpassad för aktuellt tillverknings sätt. Därför gjordes praktiska tester för att få en bättre förståelse för hur testexemplaren skulle påverkas i dragprovningssmaskinen. Efter dessa tester omkonstruerades geometrin något även om de fortfarande utgick från ISO-527. Det som ändrades var mätlängden som förlängdes för att fungera ihop med extensometern som har en minimumlängd på 100 mm för att få ett tillförlitligt resultat. Se ritning över slutgiltig geometri för provstaven i Figur 15.



Figur 15 ritning över slutgiltig provstav

5.2 Geometri Z-led provstav

På grund av tillverkningsprocessen av lager på lager kan det skapa problem när man ska skriva ut en provstav stående. Den behöver ha en mer strukturell uppbyggnad för att kunna tillverkas i Z-led. Provstaven som funkade bäst att printa var enligt följande design. Se ritning över slutgiltig geometri för provstaven i Figur 16.



Figur 16 slutgiltig design av z led provstav

Här har den centrala delen av provstaven cirkulärt tvärsnitt. Tjockleken på provstaven ändrades till 10 mm för att underlätta utskrift på höjden och då behövdes en tjockare stav än tidigare. Även den totala längden fick kortas ned då den begränsades av höjden inuti kammaren på skrivaren samt att en längre provstav blev betydligt mer instabil under tillverkningsprocessen vilket slutade i sämre prestanda. Noterbart är att flera koncept för geometrin testades för att optimera storleken för tillverkning samt dragprovning. En längre provstav gick inte att tillverka i ZYYX Pro I då maskinen har ett tak. En kortare provstav hade inte fungerat i dragprovningmaskinen. Tvärsnittet gjordes efter bedömningar från ISO-527 samt möjligheten att få den stående i tillverkningsprocessen.

5.3 Tillverkning

Att tillverka en provstav med raft tog 1 timme och 30 minuter för provstavar i X-Y-led. Provstavar i Z-led tog 2 timmar och 10 minuter att tillverka. Efter färdig print av provstav förvarades provstavarna i rumstemperatur och i mörker. Tillverkningsfasen för alla provstavar tog 2 veckor. Tillverkningen av provstavarna skede enligt slumpmässigt schema. Extruderingsproblem som nämndes av ZYYX på deras tidigare skrivare upplevdes inte med det uppgraderade printerhuvudet. När Z-led-provstavarna skulle printas gick det bara att printa 5 provstavar då filamentet tog slut och testerna skulle utföras på samma filamentspole för att ha så få variabler som möjligt.

5.4 Dragprov

Enligt ISO 527 standard ska dragprov göras i 5 eller 50 mm/min när beräkning av brottgräns skall utföras. För att beräkna elasticitetsmodul skall hastigheten vara 1mm/min. På grund av endast 10 provstavar tillverkades gjordes alla dragprov i 5 mm/min och en Elasticitetsmodul beräknades fram med den hastigheten. Inspänningen sattes vid kanterna till radierna då detta med hjälp av FEA var det som skulle skapa lägst spänningar på oönskade områden.

6. Resultat

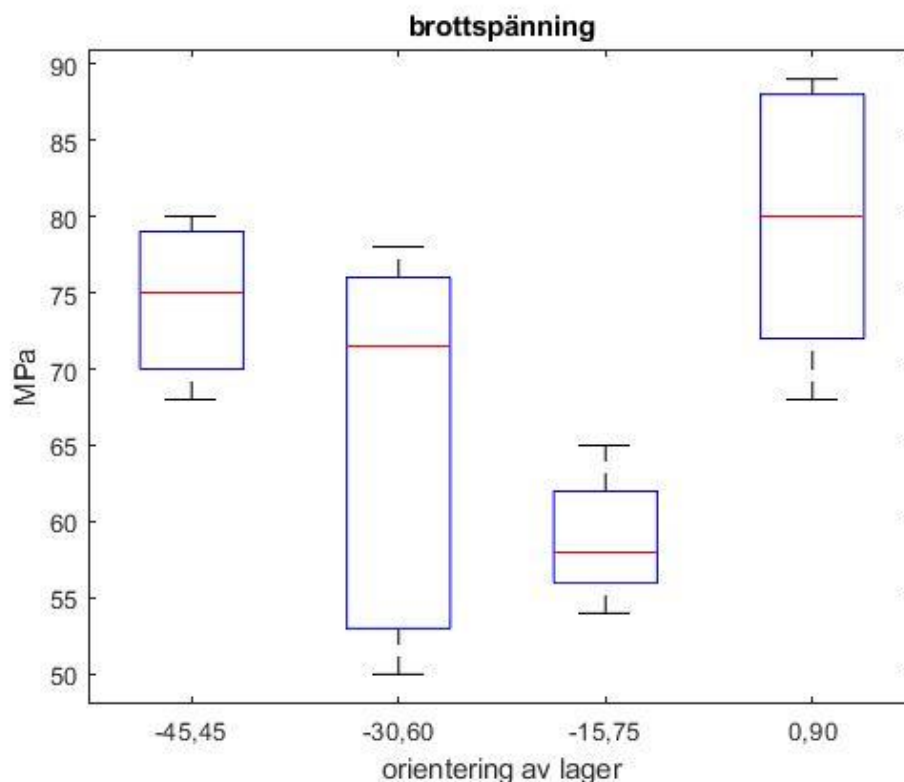
Detta kapitel innehåller de resultat som tagits fram. Resultat från kryptest kunde inte genereras därför finns detta inte med i resultatet.

6.1 Variation av provresultat

Det som har noterats under testfasens gång är att provstavarna har en tydlig spridning i resultaten förlikadant tillverkade provstavar. Den totala förlängningen av materialet innan brott ökade markant, E-modulen sänktes och brottspänningen sänktes. Detta ansågs först vara defekter via 3D-skrivaren, men det visade sig att provstavarna påverkades av en tydlig åldringseffekt. Beroende på hur lång tid det har gått från tillverkning av provstavarna till dragprovstesten observerades en degradering av egenskaperna.

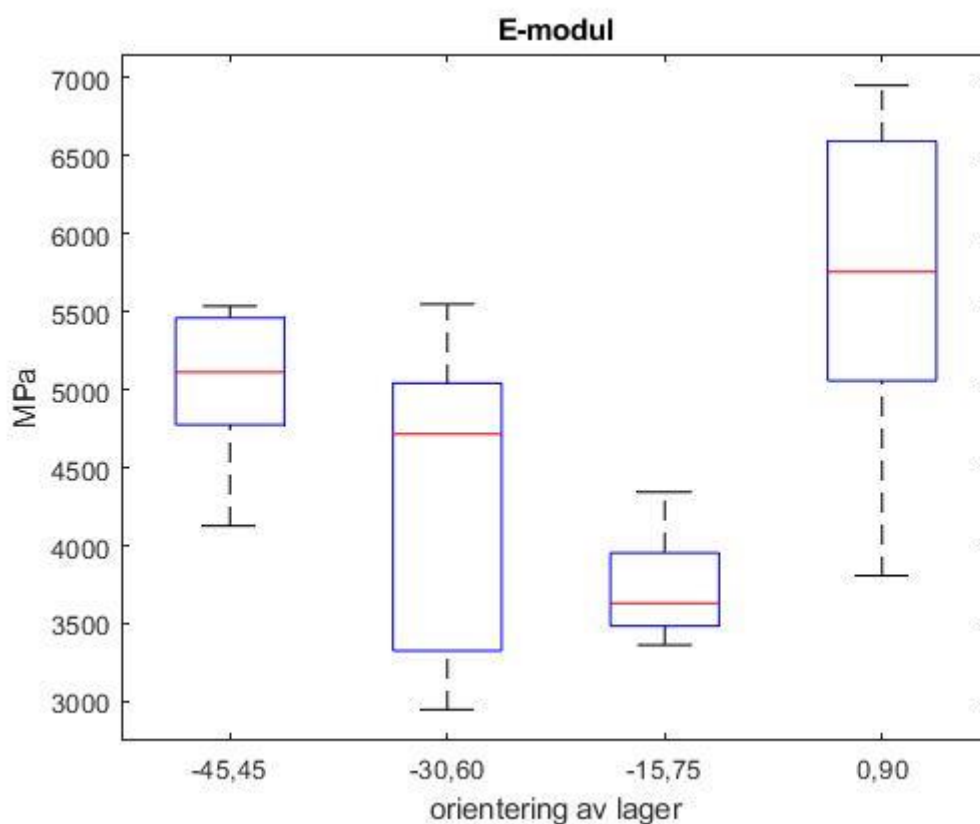
6.1 Resultat för provstavar tillverkade i X-Y-Led

Graferna nedan visar brottspänning och E-modul för alla orienteringar i X och Y på byggplattan (Figur 17). Ingen tydlig korrelation mellan orientering och styrka kan tydas. Det kan bero på att proverna hade olika tid från tillverkning till utfört test. Den övre och undre delen av lådan i grafen står för den 75e och 25e percentilen av värdena. De utstickande sprötena är de högsta och lägsta extremvärdena. Det röda strecket i lådan står för medianen av alla uppmätta värden. Resultat för toppkraft finns i bilagor. Brottspänningen för X-Y-led var mellan 50 MPa och 90 MPa. Medianvärdena för alla orienteringar förutom -15 och 75 hade en låg spridning på endast 10 MPa.



Figur 17 Graf över brottspänning i X-Y-led.

Resultaten för E-modulen i X-Y-led låg mellan 3 GPa och 7 GPa. Medianvärdena för alla orienteringar förutom -15 och 75 hade en låg spridning på endast 1 GPa.

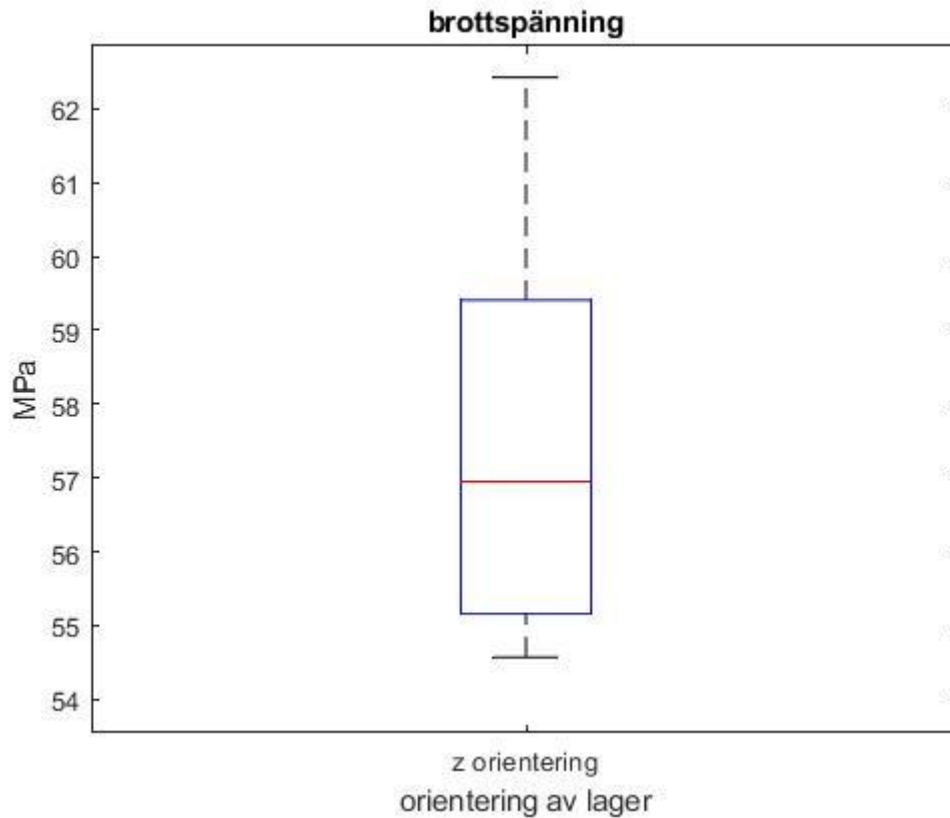


Figur 18 Graf över Elasticitetsmodulen för provstavar i X-Y-led.

För tester som utfördes på -45 och 45 graders orientering kunde tiden från print till test verifieras. Provstavar tillverkades i 2 omgångar där första omgången som hade en tid från print till test på 100 timmar och andra omgången hade tid från print till test på 1 timme. Skillnaden i resultaten visade en minskning av E-modul på 15%. Provstavar som hade tillverkats 3 veckor tidigare under experimentfasen av projektet testades och visade en minskning av E-modul på 50% jämfört med provstaven som tillverkades 1 timme innan test. Proverna visade dessutom en minskning av brottspänning på 12% respektive 41%.

6.2 Resultat Z-led

På grund av geometrin av provstaven som printades i Z-led kunde extensometern inte fästas på provstaven, därför uteblir resultaten för E-modul. Resultaten här visar att skillnaden i spänningen mellan X-Y-led och Z-led är samma som i provstaven med orienteringen -15 och 75 och ungefär 70% av styrkan för orienteringen 0 och 90.



Figur 19 Graf över brottspänning.

6.3 Jämförelse mot homogena kompositer

Ansys Granta Edupack har använts för att få fram materialdata på formgjuten polyamid 66 med kolfiberarmering. Det fanns endast data för 30% och 40 % ifyllnad med kolfiberarmering. Ett värde på 20% interpoleras fram där E-modulen beräknades till 11,6 GPa. Brottspänningen för formgjuten kolfiberarmerad polyamid 66 beräknades till 136 MPa. Styrkan av en godkänd tillverkad struktur enligt arbetet kan sålunda i värsta fall ha 30% av styrkan av en formgjuten struktur.

7 Diskussion

Målet med detta projekt var att ta fram materialdata för 3D-utskrivna detaljer från ZYYX egna material och skrivare. Från ZYYX efterfrågades i huvudsak Elasticitetsmodul och brottstyrka. Med den kunskapen vi hade i början av projektet ställdes en metod för att utföra testerna med så få variabler som möjligt. När testerna började utföras uppmärksammades en stor variation av testresultaten, som i första hand bedömdes vara defekter via 3D-skrivaren men senare visade det sig att den avgörande faktorn var tiden från utskrift till mekanisk provning. Eftersom filamentet var fukt känsligt i rumstemperatur vidtogs åtgärder, men att de utskrivna provstavarna var fukt känsliga efter tillverkning upptäcktes för sent i projektet för att åtgärder kunde vidtas mot detta problem.

7.1 Från utskrift till dragprov

En faktor vilket på förhand inte var något som bedömdes ha en stor påverkan på resultatet var den tid det tog från utskrift till den tidpunkt då provstaven drogs i dragprovningssmaskinen. I efterhand kunde man se stora skillnader när det gäller denna parameter avseende det 3D-utskrivna materialets egenskaper. Som framgår från resultatdelen observerades en skillnad i E-modul på upp till 50% och brottspänningen uppvisade en skillnad på 41% för de provstavarna som skrivits ut olika lång tid innan de testades. Tiden från utskrift till provning är alltså en parameter som har stor inverkan i resultatet. Därför skulle man behöva klarlägga inverkan av tiden från utskrift till provning för olika provstavar efter systematisk studie där även lagringsförhållandena tas med i utvärderingen.

7.2 Inverkan av orientering

Inverkan av orienteringen på byggplattan visar att starkaste orienteringen är när lagren printas tvärs över och längst med provstaven (0 och 90 graders lagerorientering). I den uppsättning av provstavar är hälften av materialet utskrivet åt samma håll som dragprovsmaskinen drar i. Det känns naturligt att provstavarna kommer vara starkast i fiberriktningen. Provstavarna med -45 och 45 borde vara svagast eftersom det är de som är mest förskjutna från den starkaste orienteringen och att det kommer få störst skjuvning mellan lagren. Så var inte fallet utan -45 och 45 var den näst starkaste orienteringen. Om det beror på åldringen av materialet eller någon annan faktor borde undersökas vidare.

7.3 Provstavar i Z-led

Intressant är hållfastheten i Z-led var så hög att provstavarna fick liknande styrka som provstaven i X-Y-led (-15 och 75). Detta resultat erhöles även då filamentet inte alls ligger i den riktningen som staven drags åt. Detta tyder på en god sammanfogning av lagren och en mycket mindre skillnad i styrka jämfört med den som mäts för prov längs filamentets riktning än vad som kunnat förväntats.

7.4 Rekommendationer

Kör kommande projekt ges rekommendationer nedan.

- Effekten av åldringen av materialet behöver undersökas och är centralt för hållfastheten.
- Tiden från utskrift till dragprov behöver noggrant kontrolleras och dokumenteras.
- Kryptest hade varit bra att göra på polymerer då de är viskoelastiska. Det gick dock inte att utföra då felkoder kom upp när vi testade med aktuell dragprovsmaskin.

- Vidare behöver ytterligare utredning avseende orienteringarna göras med mer kontrollerade tillverknings- och testfaser.

Källor

Zastrov, M (2020) *3D printing gets bigger, faster and stronger*. Nature
<https://www.nature.com/articles/d41586-020-00271-6>

Anand, K & Yeole Shivraj, N (2018) *Tensile Testing and Evaluation of 3D Printed PLA Specimens as per ASTM D638 Type-IV Standard* [Vignana Jyothi Institute of Engineering and Technology]
https://www.researchgate.net/publication/323726339_Tensile_Testing_and_Evaluation_of_3D_Printed_PLA_Specimens_as_per_ASTM_D638_Type-IV_Standard

Lawrence, E. (2022) *the definitive guide to performing iso 527-2 tensile testing on plastics* [instron]
<https://www.instron.com/en-gb/testing-solutions/iso-standards/iso-527-2?region=United%20Kingdom>

The Editors of Encyclopaedia Britannica (1998). *Hookes law*. Britannica
<https://www.britannica.com/science/Hookes-law>

Dahlberg, T (2001) *teknisk hållfasthet*. Studentlitteratur AB

Tusharkumar, B. Prashant, A. Sanjay, T. Satpute (2015) *Tensile test and FEA correlatons of abs plastic* [Rajarambapu Institute of Technology].
<http://troindia.in/journal/ijapme/vol1iss6/33-37.pdf>

Kelly, A. & L. N. McCartney (1999) *Isotropic and Nearly Isotropic Fiber Composites* [The National University of singapore] <http://iccm-central.org/Proceedings/ICCM12proceedings/site/papers/pap816.pdf>

Rahul, M. (2012) *Tensile Testing of 3D Printed Materials for Scoliosis Brace* [examensarbete, Maharshi Dayanand University].
https://dspace.library.uvic.ca/bitstream/handle/1828/8616/Malik_Rahul_MEng_2017.pdf?sequence=1

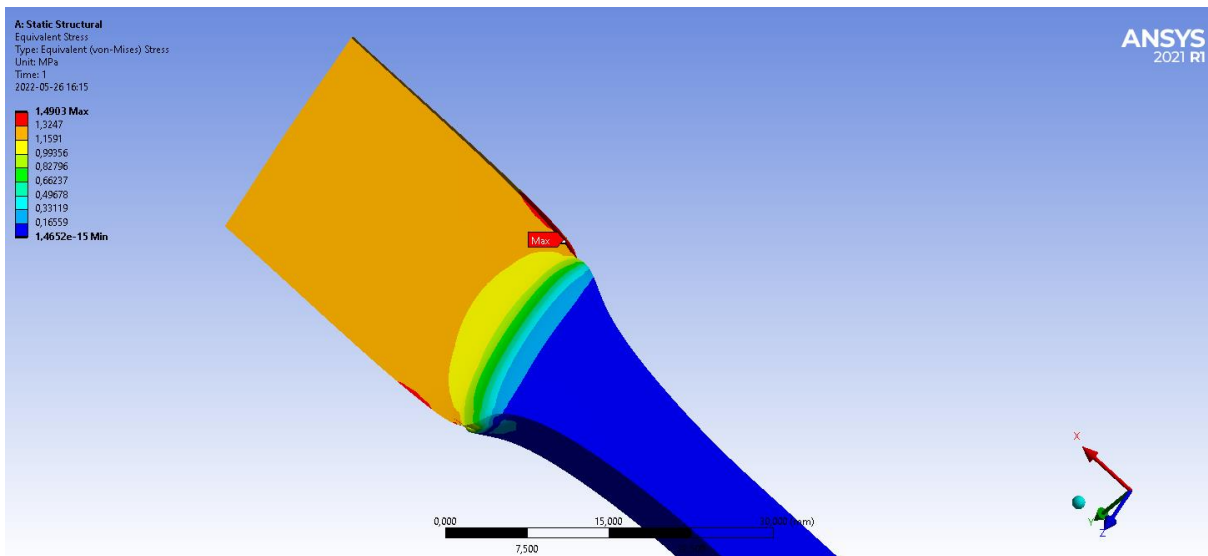
Torrado, A R. & Roberson, D A. (2016) *Failure Analysis and Anisotropy Evaluation of 3D-Printed Tensile Test Specimens of Different Geometries and Print Raster Patterns* [The uiniversety of Texas at El Paso]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11668-016-0067-4>

Mathers, Gene. (2022) Creep and Creep Testing. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/creep-and-creep-testing-081>

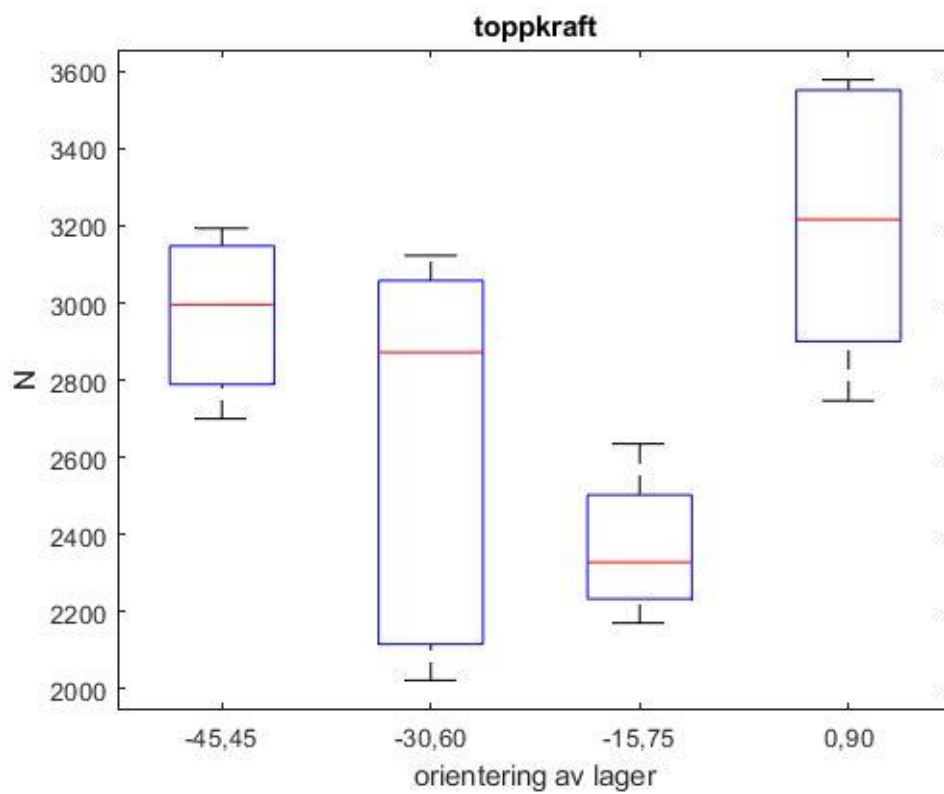
Ansys, Grata Edupack (2022) *PA66 (30% carbon fiber)*[Dataset].
<https://www.ansys.com/products/materials/granta-edupack>

Ansys, Grata Edupack (2022) *PA66 (40% carbon fiber)*[Dataset].
<https://www.ansys.com/products/materials/granta-edupack>

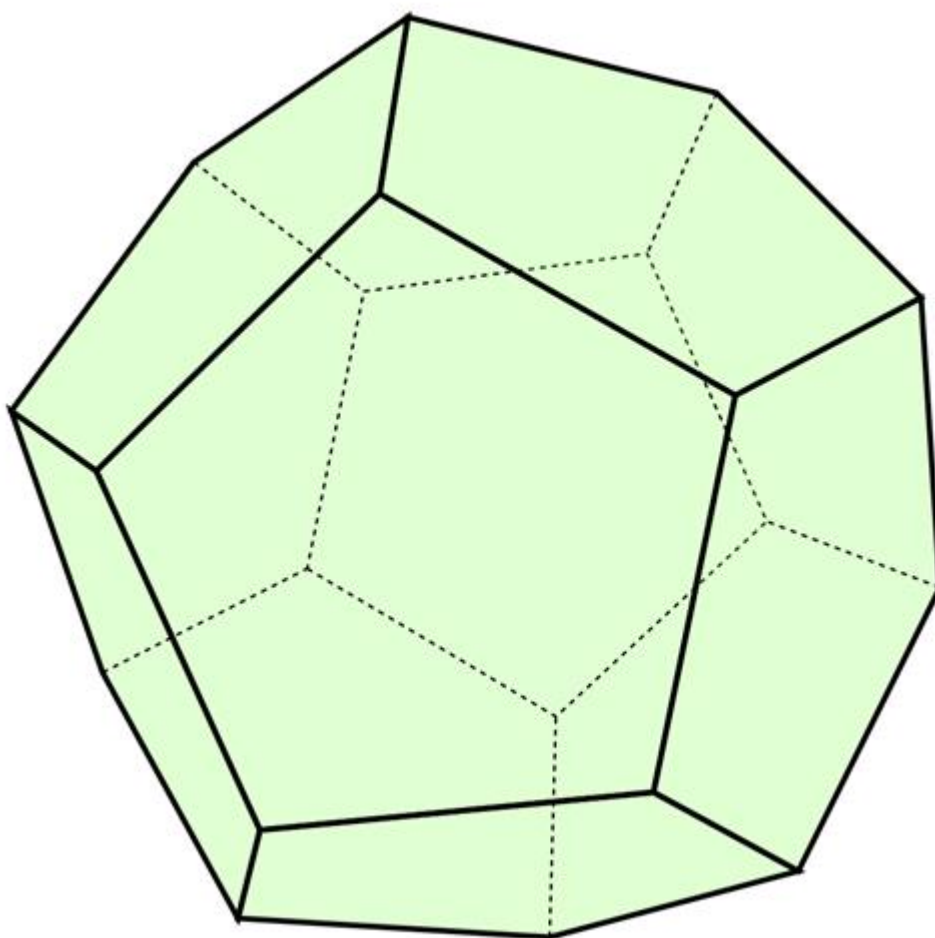
Bilagor



Bilaga 1



Bilaga 2 graf över högst uppmätta kraft



Bilaga 3 Rombisk dodekaeder